

# 博士論文

トンネル覆工のひび割れ発生形態を考慮した  
合理的な維持管理と施工方法の提案

水 野 希 典

# 目 次

## 第 1 章 本研究の背景と目的

|                     |    |
|---------------------|----|
| 1.1 背景と目的           | 1  |
| 1.2 トンネル覆工の維持管理     | 2  |
| 1.2.1 詳細点検          | 3  |
| 1.2.2 T C I の概要     | 7  |
| 1.2.3 点検における課題      | 9  |
| 1.3 覆工コンクリート施工      | 10 |
| 1.3.1 覆工コンクリート施工の現状 | 10 |
| 1.3.2 覆工コンクリート施工の課題 | 12 |
| 1.4 研究目的、対象、方法論     | 14 |
| 1.4.1 研究目的          | 14 |
| 1.4.2 本研究の方法論       | 14 |
| 1.5 本論文の構成          | 16 |

## 第 2 章 トンネル覆工のひび割れ要因となる施工方法の整理

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 2.1 本章の目的                      | 19 |
| 2.2 建設工法における覆工コンクリート施工方法の整理    | 19 |
| 2.2.1 建設工法の概要                  | 20 |
| 2.2.2 トンネル覆工のひび割れ発生要因の抽出       | 22 |
| 2.3 既存文献等によるひび割れ発生要因分析         | 25 |
| 2.3.1 矢板工法に関する分析               | 34 |
| 2.3.2 矢板工法の分析結果                | 35 |
| 2.3.3 N A T M に関する分析           | 36 |
| 2.3.4 N A T M の分析結果            | 37 |
| 2.4 建設工法ごとの材料、施工に起因するひび割れ原因の抽出 | 38 |
| 2.4.1 矢板工法の代表的なひび割れ原因          | 38 |
| 2.4.2 N A T M の代表的なひび割れ原因      | 38 |
| 2.5 本章のまとめ                     | 39 |

## 第 3 章 既設トンネル覆工のひび割れ発生形態の整理

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 3.1 本章の目的                  | 42 |
| 3.2 既往の点検記録および調査結果の整理      | 43 |
| 3.2.1 詳細点検記録によるひび割れ発生形態の把握 | 43 |
| 3.2.2 トンネル覆工からのコア採取整理      | 45 |

|       |                          |    |
|-------|--------------------------|----|
| 3.3   | 矢板工法の背面空洞および覆工厚調査結果の整理   | 55 |
| 3.4   | 既往の点検記録からの変状原因推定手法に関する検討 | 62 |
| 3.4.1 | 検討概要                     | 62 |
| 3.4.2 | 分析方法                     | 62 |
| 3.4.3 | T C I と変状原因の関係分析         | 63 |
| 3.4.4 | 分析結果                     | 66 |
| 3.4.5 | 変状原因推定手法に関する検討のまとめ       | 66 |
| 3.5   | 外力作用のひび割れと断面変形の相関把握      | 66 |
| 3.5.1 | 走行計測技術の概要                | 67 |
| 3.5.2 | ひび割れと断面変形の相関検証           | 72 |
| 3.5.3 | 外力作用のひび割れと断面変形の相関把握のまとめ  | 73 |
| 3.6   | 本章のまとめ                   | 73 |

#### 第4章 坑内環境調査、試験体暴露試験、室内試験

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 4.1   | 坑内環境が物性値へ与える影響の把握 | 76  |
| 4.1.1 | 目的                | 76  |
| 4.1.2 | 坑内環境に関する測定        | 76  |
| 4.1.3 | 供試体物性値測定          | 78  |
| 4.2   | 覆工コンクリートの養生効果確認試験 | 83  |
| 4.2.1 | 目的                | 83  |
| 4.2.2 | コンクリートの配合等        | 83  |
| 4.2.3 | 養生効果確認試験          | 83  |
| 4.3   | 材料分離に関する試験        | 89  |
| 4.3.1 | 目的                | 89  |
| 4.3.2 | 材料分離に関する試験        | 89  |
| 4.4   | 本章のまとめ            | 109 |
| 4.4.1 | 坑内環境が物性値へ与える影響の把握 | 109 |
| 4.4.2 | 覆工コンクリートの養生効果確認試験 | 109 |
| 4.4.3 | 材料分離に関する試験        | 110 |

#### 第5章 長期物性値推定およびひび割れ発生、進展の長期挙動

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 5.1   | 各建設工法のひび割れ発生、進展の長期挙動    | 112 |
| 5.1.1 | 目的                      | 112 |
| 5.1.2 | 解析手法の手順                 | 112 |
| 5.1.3 | 解析モデルの妥当性検証（測定結果に基づく解析） | 113 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.2   | 覆工コンクリートへの養生環境、施工条件がひび割れ発生、進展に<br>及ぼす影響把握 | 132 |
| 5.2.1 | 目的  | 132 |
| 5.2.2 | ひび割れ進展、解析における計算条件                         | 132 |
| 5.2.3 | 脱型時期および養生の有無によるコンクリート物性値算定解析              | 133 |
| 5.2.4 | 脱型時期および養生の有無による覆工コンクリートの<br>ひび割れ発生、進展解析   | 139 |
| 5.2.5 | 材料分離による覆工コンクリートのひび割れ発生、進展解析               | 141 |
| 5.3   | 本章のまとめ                                    | 145 |
| 5.3.1 | 各建設工法のひび割れ発生、進展の長期挙動                      | 145 |
| 5.3.2 | 覆工コンクリートへの養生環境、施工条件がひび割れ発生、進展に<br>及ぼす影響把握 | 145 |

## 第6章 トンネル覆工の維持管理および覆工コンクリートの施工方法に関する提案

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 6.1   | 本章の概要               | 147 |
| 6.1.1 | トンネル覆工の維持管理         | 147 |
| 6.1.2 | 覆工コンクリートの施工方法       | 147 |
| 6.2   | トンネル覆工の維持管理の提案      | 148 |
| 6.2.1 | 高速道路の維持管理           | 148 |
| 6.2.2 | トンネル覆工の点検           | 149 |
| 6.2.3 | トンネル覆工の対策工          | 161 |
| 6.3   | 中流動覆工コンクリートの施工方法の提案 | 163 |
| 6.3.1 | 中流動覆工コンクリートの養生方法    | 163 |
| 6.3.2 | 中流動覆工コンクリートの施工方法    | 165 |
| 6.4   | 本章のまとめ              | 166 |
| 6.4.1 | トンネル覆工の維持管理の提案      | 166 |
| 6.4.2 | 中流動覆工コンクリートの施工方法の提案 | 167 |

## 第7章 まとめ

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 7.1   | トンネル覆工の維持管理               | 179 |
| 7.1.1 | トンネル覆工の維持管理               | 179 |
| 7.1.2 | トンネル覆工の維持管理の今後の展望         | 182 |
| 7.2   | 中流動覆工コンクリートの施工方法          | 182 |
| 7.2.1 | 中流動覆工コンクリートの施工方法          | 182 |
| 7.2.2 | 中流動覆工コンクリートの施工工法における今後の展望 | 184 |
| 7.3   | 総論                        | 185 |



## 第1章 本研究の背景と目的

### 1.1 背景と目的

はじめに本研究の背景として、平成24年12月2日に発生した中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故を契機として、国土交通省は本年を「社会資本メンテナンス元年」と位置付け、社会資本の維持管理、更新への取組みを積極的に進めていく姿勢を示した。これを受けて、道路トンネルにおいては、平成25年6月に道路法が改訂され、これにともなう道路法施行令および道路法施行規則により、近接目視により、5年に1回の頻度を基本とした定期点検を実施することとなった。東日本、中日本、西日本高速道路株式会社「以下（NEXCO）という。」においても詳細点検として、5年に1回の頻度で近接目視を実施している。トンネルの詳細点検においては、近接目視と併せてトンネル覆工全面の打音点検を実施している。これは、トンネル覆工からのほく落事象を未然に防止する観点から行っているのだが、これが多大な労力と時間を要している。

トンネル覆工からのコンクリート片のほく落事象につながる変状としては、うき、はく離やひび割れのブロック化があるが、その原因についてはさまざまな要因が複合して発生するため、原因を特定できない場合が多い。そのため、すべてのトンネル覆工に対して近接目視かつ打音点検によりひび割れ等の変状を確認し、ほく落事象につながるひび割れ等に対して対策を講じる事後保全としての維持管理となっている。

トンネル覆工に発生しているひび割れ等の変状原因が推定できれば、許容できるひび割れ等の分類および変状原因を考慮した対策工の選定が可能となる。また、変状原因の推定によりひび割れ等の進行性についても把握でき、ほく落事象につながるひび割れ等の初期段階での対応が可能となる。

このように、ひび割れ状況から変状原因を推定し、ほく落事象につながるひび割れ等の抽出が可能となることで、トンネル覆工全面を対象とした近接目視かつ打音点検の点検手法から、トンネル覆工に発生したひび割れ状況を基に、近接目視かつ打音点検を限定する点検手法に変更することができる。さらに後述するNEXCOで運用している走行撮影技術により、取得した覆工撮影画像を現場点検前に確認することで、ひび割れ状況等の事前把握が可能となり、ひび割れ状況を記録として残すことができる。このように覆工画像情報から現地確認が必要なひび割れ等をスクリーニングすることは、点検の高度化、効率化に資するとともに、メリハリのある維持管理が可能となる。

一方、建設においては、従来の覆工コンクリートの施工によって発生する不具合の改善のため、NEXCOでは材料面からのアプローチとして、流動性を確保しつつ材料分離抵抗性にすぐれた覆工コンクリート（以下、「中流動覆工コンクリート」という。）を開発し、現場に採用している。

上述した変状原因推定によりトンネル覆工に求める性能に関係ない許容できるひび割れが明確化できれば、中流動覆工コンクリートに対する施工方法における留意点が整理できる。

覆工コンクリートの施工においてひび割れが発生した場合、すべてのひび割れに対して補修や要観察等の措置を講じているのが現状である。しかし、ひび割れ発生の原因推定により許容でき

るひび割れの分類ができれば、ひび割れ補修の要否を判断することが可能となる。

超高齢化社会を迎え、生産年齢人口がさらに減少していく社会情勢において、今後のトンネルの維持管理や覆工コンクリートの施工を含めた建設事業は、生産性向上への取組みが必要不可欠であり、そのためには選択と集中による事業の推進を図るべきと考える。

本章では、現在実施しているトンネルの詳細点検の概要、およびトンネル覆工に発生しているひび割れに対する維持管理について、現状と課題について整理する。さらに建設において、養生、坑内環境や施工方法の現状とトンネル覆工のひび割れへの影響が懸念される施工上の課題について整理する。

## 1.2 トンネル覆工の維持管理

NEXCO が管理する高速道路トンネルは、図 1.2.1 に示すとおり平成 28 年 3 月末時点で 1,808 本、延長 1,705 km が対象であり、もっとも供用後経過しているもので、NEXCO の前身の日本道路公団が名神高速道路栗東～尼崎間の管理を開始した昭和 38 年の路線にあるトンネルが 50 年以上を経過している。今後、さらにトンネルの老朽化が進むこととなり、今後の維持管理に要する費用の増大が懸念される。限られた予算内で効率的に複数のトンネルを統一的に管理するには、効率的な維持管理計画を立てる必要がある。しかし、NEXCO が管理するトンネルは他の機関と同様、トンネル施工法が矢板工法から山岳トンネル工法に変化しているうえに、従来のトンネル覆工の健全性における判定基準類は定性的な表現が多く、技術者の経験的判断によるところが大きかった。そこで、定量的健全度評価を目指して NEXCO が提案している覆工点検手法があり、覆工点検手法の概略とそこで用いられているひび割れ指数(TCI)について次に述べる。

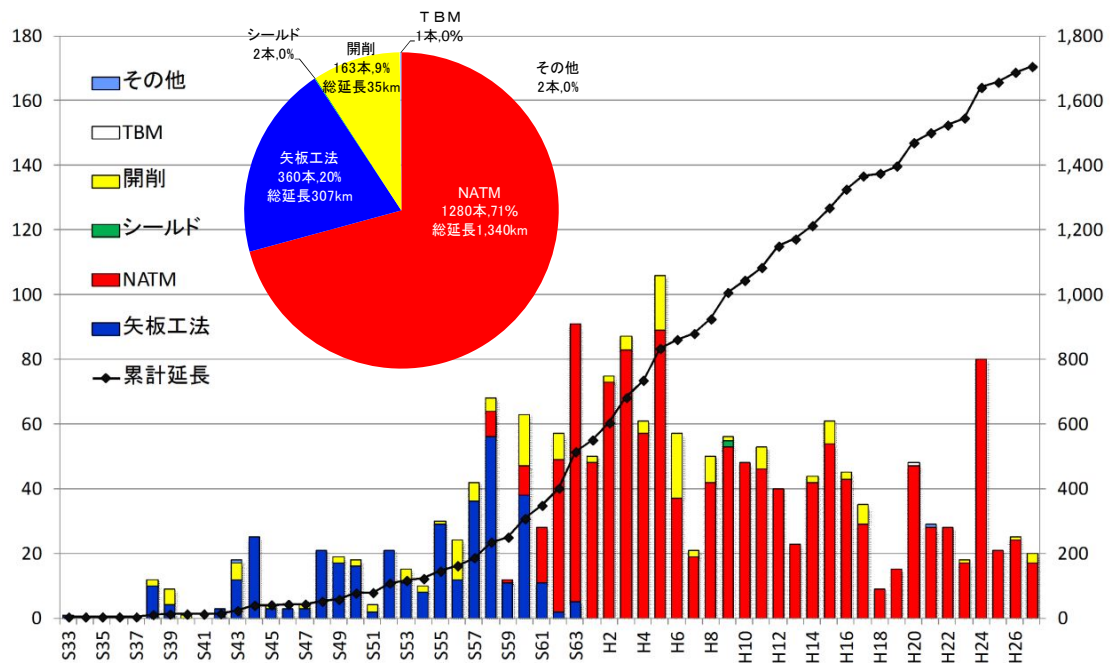


図 1.2.1 年代別トンネル延長・工法分類 (トンネル延長比率) <sup>1)</sup>

### 1.2.1 詳細点検

詳細点検は、構造物の健全性の把握および安全な道路交通の確保や第三者等に対する被害を未然に防止するため、構造物個々の状況を細部にわたり定期的に把握するために行うもので、構造物の健全性と安全な道路交通の確保や第三者等に対する被害の防止の双方の観点から変状の発生や進行状況を把握し、その状態を適切に評価、診断する点検である。

トンネル覆工の詳細点検は、図 1.2.2 に示すよう

に点検 A と点検 B に区分される。点検 A では、ま

ず覆工画像を撮影することから始まる。レーザー、CCD カメラ、ラインセンサーカメラ等による覆工表面画像を取得し、ひび割れ展開図、詳細点検 A シートを作成することで問題があると判断されるスパンおよび箇所を表 1.2.1、表 1.2.2 に示す閾値および特記事項を用いて重点点検スパン、重点点検箇所として抽出している。撮影精度としては、50km/hr 以上で走行しながら 0.5 mm 程度のひび割れが認識できることを規定している。覆工表面画像は、図 1.2.3 に示すようにトンネル横断方向に展開し、見下げ図として加工したもので、画像によ

表 1.2.1 外力・はく落評価点の閾値

| 閾値設定項目                          | 閾値の評価点内容（重点点検スパン）  |
|---------------------------------|--|
| 覆工画像判定より近接目視・打音実施スパン（重点点検スパン）抽出 | 「近接目視・打音実施スパン対象条件」<br>・外力評価点「60 点以上」<br>・はく落評価点「36 点以上」のいずれかのスパン<br>※現在は、覆工全面において近接目視を基本としていることから、覆工全面の打音を実施するスパン抽出に活用 |

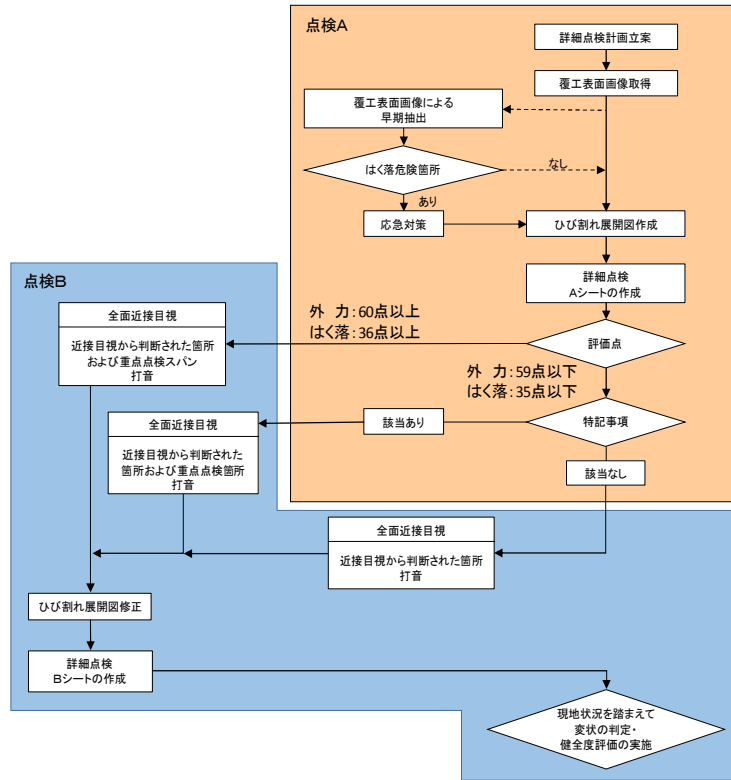


図 1.2.2 トンネル詳細点検の流れ<sup>2)</sup> を加筆修正

表 1.2.2 特記事項

| 特記事項（重点点検箇所）  |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・ひび割れ幅 2 mm 程度のひび割れが連続して 3m 以上ある。</li> <li>・ひび割れ幅 3 mm 程度以上のひび割れがある。</li> <li>・打継ぎ目部に三日月型のひび割れがある。</li> <li>・添架物（ジェットファン、標識等）のアンカー一部およびその周辺に放射状のひび割れがある。</li> <li>・モルタル系の補修材による既対策箇所がある。</li> <li>・豆板、ジャンカ等があり、浮き・はく離の危険性がある。</li> <li>・構造上問題があると判断されるひび割れがある。</li> <li>・健全度ランクⅢ-1、Ⅲ-2、Ⅳ、Ⅴに対し、前回点検時から補修・補強が実施されていない。</li> <li>・前回点検時のひび割れ展開図と比較して新たに変状が発生した箇所</li> </ul> |



図 1.2.3 覆工表面画像例

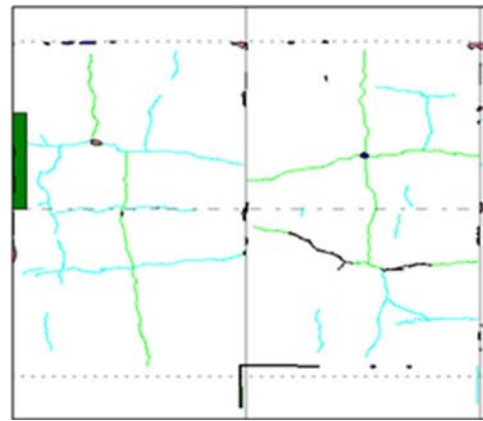


図 1.2.4 ひび割れ展開図例

て得られたひび割れ等の変状情報をトレースすることで、図 1.2.4 に示すひび割れ展開図ならびに詳細点検 A シートを作成する。詳細点検 A シートには、トンネル名、延長、路線名等の「トンネル諸元等」、重点点検箇所を判定するための表 1.2.2 に示した「特記事項」、ひび割れやエフロレッセンス、漏水の状況を表 1.2.3 に示す評価項目により外力評価点、はく落評価点を算定する「データシート」で構成されている。

表 1.2.3 評価点算定のデータシート

| 観察項目      | 判定区分                 |                | 外力               | はく落     |          |
|-----------|----------------------|----------------|------------------|---------|----------|
|           | 画像目視の判定              |                |                  |         |          |
| 評価点パラメータ  | ①ひび割れの幅、長さ、分布に関する評価点 |                | 自動算出             | 自動算出    |          |
|           | ②ひび割れの方向性に関する評価点     |                | 自動算出             | 自動算出    |          |
|           | ③パターン                | 亀甲状            | なし・1m未満・以上       | 0・7・14  | 0・11・22  |
|           |                      | 閉合型            | なし・長辺20cm未満・以上   | 0・4・7   | 0・12・23  |
|           |                      | 交差・分岐          | なし・～4・5～9・10箇所以上 | 0・2・3・5 | 0・4・8・12 |
| ④エフロレッセンス |                      | なし・少ない・中程度・多い  | 0・1・2・3          | 0・1・2・3 |          |
| ⑤湧水       |                      | なし・あり(未対策・対策済) | 0・2・2            | 0・2・0   |          |

表 1.2.3 にある外力評価点、はく落評価点の評価項目は、「①ひび割れ幅・長さ・分布」、「②ひび割れ方向性」、「③ひび割れのパターン（亀甲状、閉合、交差・分岐）」、「④エフロレッセンス（量）」、「⑤漏水（量）」の 5 項目で算出される。

外力評価点、はく落評価点は、表 1.2.3 に示す 5 項目の評価点をそれぞれ加算して、最大を 100 点として算定する。なお、評価点が高いほどトンネル覆工への外力作用の影響を受けている可能性が高く、また、はく落の可能性が高いことを表している。

「①ひび割れ幅・長さ・分布」、「②ひび割れの方向性」の 2 項目のひび割れの量の評価は、次節で述べる覆工ひび割れ指数<sup>3)</sup>（以下、「TCI (Tunnel-lining Crack Index)」という。)を用いて算定している。

「③ひび割れのパターン（亀甲状、閉合、交差・分岐）」は、覆工スパン単位でのひび割れ分布において、亀甲状、閉合型、交差・分岐の局所的な個所が存在する場合は、表 1.2.4 に示すとおりその規模や個所数によって、判定する。ただし、当該項目はひび割れ情報とは別の評価点として存在しており、覆工スパンに亀甲状、閉合型、交差・分岐の局所的な個所が複数混在する場

合は、その評価点で一番大きくなる観察項目が採用される。

「④エフロレッセンス（量）」は、覆工スパン単位で表 1.2.5 に示すとおりエフロレッセンスが発生している規模により評価点を判定する。

「⑤漏水（量）」は、覆工スパン単位で表 1.2.6 に示すとおり覆工からの漏水の有無により判定する。また、漏水対策の有無についても判定を行うこととしている。

点検 B は、すべてのトンネル覆工において近接目視を基本として実施する現場点検のことをいう。併せて、点検 A で抽出した表 1.2.1 にある覆工画像判定より重点点検スパンとして、外力評価点が 60 点以上または、はく落評価点が 36 点以上となる覆工スパンにおいては、高所作業車等を用いて技術者がトンネル覆工全面の打音点検を実施する。また、表 1.2.2 にある特記事項に該当する場合は、重点点検箇所として近接目視と併せて該当箇所に対して打音点検を実施する。

点検 B では、点検 A で作成した詳細点検 A シートを引継ぎ、点検 B 実施後に「特記事項」、「データシート」の情報を更新したうえで、構造物の健全性と安全な道路交通の確保や第三者等に対する被害の防止の双方の観点から変状の発生や進行状況を把握し、その状態を適切に評価する。トンネル覆工に対する評価としては、図 1.2.5 に示すように第三者である利用者の安全を確保するためのはく落・漏水の判定である個別判定と、トンネル覆工自体の構造安全性としての機能面を評価する健全度評価の 2 つの評価を行っている。個別判定は、はく落や漏水によって利用

表 1.2.4 ひび割れパターンに対する評価点

| 観察項目   | 判定区分  | 外力評価点    | はく落評価点 |    |
|--------|-------|----------|--------|----|
| ③パターン  | 亀甲状   | なし       | 0      | 0  |
|        |       | 1m未満     | 7      | 11 |
|        |       | 1m以上     | 14     | 22 |
|        | 閉合型   | なし       | 0      | 0  |
|        |       | 長辺20cm未満 | 4      | 12 |
|        |       | 長辺20cm以上 | 7      | 23 |
|        | 交差・分岐 | なし       | 0      | 0  |
|        |       | 0~4箇所    | 2      | 4  |
|        |       | 5~9箇所    | 3      | 8  |
| 10箇所以上 |       | 5        | 12     |    |

表 1.2.5 エフロレッセンスに対する評価点

| 観察項目      | 判定区分 | 外力評価点 | はく落評価点 |
|-----------|------|-------|--------|
| ④エフロレッセンス | なし   | 0     | 0      |
|           | 少ない  | 1     | 1      |
|           | 中程度  | 2     | 2      |
|           | 多い   | 3     | 3      |

表 1.2.6 漏水に対する評価点

| 観察項目 | 判定区分    | 外力評価点 | はく落評価点 |
|------|---------|-------|--------|
| ⑤湧水  | なし      | 0     | 0      |
|      | あり(未対策) | 2     | 2      |
|      | あり(対策済) | 2     | 0      |

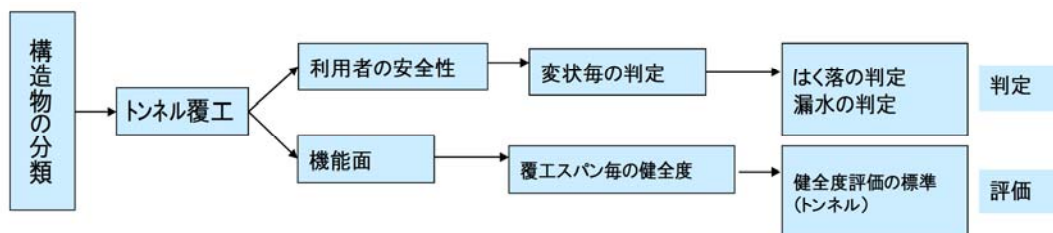


図 1.2.5 トンネル構造物の分類別における判定および評価区分<sup>1)</sup>を加筆修正

表 1.2.7 はく落に対する判定の目安

| 判定区分      |    | 判定標準   |
|-----------|----|--|
| はく落に関する判定 | AA | ひび割れ等により覆工コンクリート等の浮き、はく離等がみられ、落下する可能性があるため、速やかに対策を講じる必要がある状態     |
|           | A1 | ひび割れ等により覆工コンクリート等の浮き、はく離等がみられ、落下する可能性があるため、計画的に対策を講じる必要がある状態     |
|           | A2 | ひび割れ等により覆工コンクリート等の浮き、はく離の兆候があり、将来的に落下する可能性があるため、監視を必要とする状態       |
|           | B  | ひび割れ等による浮き、はく離の兆候がないもの、又はたたき落としにより除去できたため、落下する可能性がなく、措置を必要としない状態 |
|           | OK | ひび割れ等による浮き、はく離の兆候がなく、健全な状態                                       |

表 1.2.8 漏水に対する判定の目安

| 判定区分     |    | 判定標準   |
|----------|----|--|
| 漏水に関する判定 | AA | コンクリートのひび割れ等から漏水の噴出があり、又は、漏水に伴う土砂流出により舗装が陥没したり沈下する可能性があり、寒冷地においては漏水等によりつららや側氷が生じ、利用者の安全性を損なうため、速やかに対策を講じる必要がある状態 |
|          | A1 | コンクリートのひび割れ等から、漏水の流出があり、又は、排水不良により舗装面に滞水があり、利用者の安全性を損なう可能性があるため、計画的に対策を講じる必要がある状態                                |
|          | A2 | コンクリートのひび割れ等から、漏水の流下があり、又は、排水不良により舗装面に滞水を生じるおそれがあり、利用者の安全性を損なう可能性があるため、監視を必要とする状態                                |
|          | B  | 滴水又はにじみによる漏水があっても利用者の安全性に影響がないため、措置を必要としない状態   |
|          | OK | 漏水がみられないもの   |

表 1.2.9 健全度ランクとその定義および評価の標準

| 健全度ランク | 定義                             | 評価の標準   |                 |
|--------|--------------------------------|---|-----------------|
| V      | 変状が極めて著しく、直ちに何らかの対策を行う必要があるもの  | ・変状の進行が極めて著しくみられるもの                                   |                 |
| IV     | 変状が著しく、早急に何らかの対策検討を行う必要があるもの   | ・放射状ひび割れが見られる<br>・圧ぎが見られる<br>・5mm以上の段差、ずれのあるひび割れが見られる |                 |
| III-2  | 変状があり、速やかに何らかの対策検討を行う必要があるもの   | ・健全度ランクIII-1の状況から進行しているようにみられる                        |                 |
| III-1  | 変状があり、適切な時期に何らかの対策検討を行う必要があるもの | ・外力評価点が60点以上であるが、進行性が緩やかなもの                           |                 |
| II     | 変状があるが、現状は継続的に監視を行う必要があるもの     | ・外力評価点で31~59点   | ・継続的に監視を行う程度のもの |
| I      | 変状がないか、もしくは軽微なもの               | ・変状がないか、もしくは軽微なもの<br>・外力評価点で30点以下                     | ・進行性が見られないもの    |



者へ及ぼす影響度の判定区分によって箇所ごとに判定する。はく落に対する判定区分および判定標準を表 1.2.7 に、漏水に対する判定区分および判定標準を表 1.2.8 に示す。一方で、健全度評価においては、トンネル覆工のひび割れ、エフロレッセンスおよび湧水に基づいた評価を覆工スパン単位で行い、変状の進行性等総合的に勘案しトンネル覆工自体の健全度を評価する。健全度評価における健全度ランクとその定義および評価の標準について、表 1.2.9 に示す。健全度評価にあたっては、表 1.2.9 に示す評価の標準において外力評価点を健全度ランクの目安として活用している。

### 1.2.2 TCI の概要

ひび割れ展開図からひび割れの特徴を定量的に評価するのに採用しているTCIについて、概要を述べる。

岩盤中のひび割れ（節理）の密度や方向、幅が岩盤物性（変形係数・透水係数）に大きく影響するため、これらの影響を総括的に定量化できる指標の「クラックテンソル」が岩盤力学の分野で研究されている<sup>4)</sup>。岩盤中のひび割れに関しては、クラックテンソルの他に純岩盤強度、亀裂係数などの手法が挙げられる。純岩盤強度や亀裂係数は、弾性波速度値等から求めるものであるが、クラックテンソルは、ひび割れの方向や幅、長さ等のスケッチから求めるものである。

トンネル覆工コンクリートに発生するひび割れは、外力やコンクリートの材質、施工時における不具合等が要因となっている。トンネルは、地中に建設された線状構造物であることから、周辺地山状況によっては、トンネル覆工に地圧等からの外力が作用する場合は考えられる。外力が原因で発生するひび割れは、外力の作用位置や方向に関係しているといわれており、ひび割れの幅や長さ、分布等の情報に基づき健全度あるいは劣化度の評価法の開発が必要と考えられることから、クラックテンソルの概念を援用し覆工コンクリートのひび割れ評価指標として TCI が既往の研究<sup>3)</sup>において提案されている。TCI は、覆工表面のひび割れの幅、長さ、方向をパラメータとした指標であり「最大ひび割れ幅」、「最大ひび割れ幅の長さ」、「ひび割れの分布」、「ひび割れの方向性」についての判定が可能となる指数である。基礎式を式(1)に示すとともに、概念図を図 1.2.6 に示す。式(1)により求まる  $F_{11}$ 、 $F_{22}$  は、それぞれ TCI の縦断成分、横断成分を示すものである。覆工コンクリートの劣化の指標  $F_0$  は、テンソルの不変量として縦断・横断成分の和 ( $F_0 = F_{11} + F_{22}$ ) として表され、この  $F_0$  を TCI の変状程度の評価値としている。

なお、過去の検討結果を踏まえひび割れ幅と長さに関する係数  $\alpha$ 、 $\beta$  は、同じ重み 1.0 に設定している。

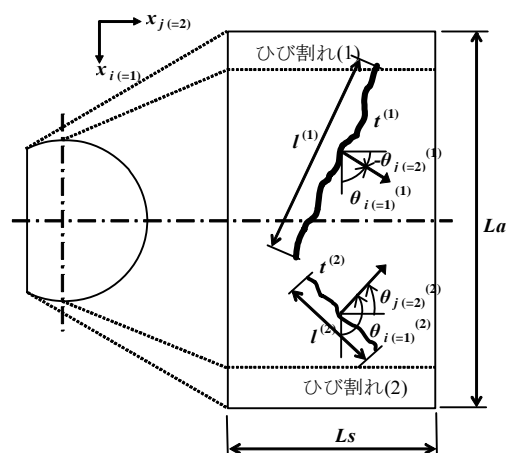


図 1.2.6 TCI の概念図

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n (l^{(k)})^\alpha (l^{(k)})^\beta \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (1)$$

$A$  : 覆工コンクリートの面積 ( $A=L_s \times L_a$ )

$L_s$  : 覆工コンクリートの縦断延長  
(通常はスパン長)

$L_a$  : 覆工コンクリートの横断延長

$n$  : ひび割れの本数

$l^{(k)}$  : ひび割れ  $k$  の長さ

$t^{(k)}$  : ひび割れ  $k$  の幅

$\theta_i^{(k)}$  : ひび割れ  $k$  の法線ベクトルが  $x_i$  軸となす角度

$\theta_j^{(k)}$  : ひび割れ  $k$  の法線ベクトルが  $x_j$  軸となす角度

$\alpha$  : ひび割れ幅の重み付けに関する係数

$\beta$  : ひび割れ長さの重み付けに関する係数

$F_0$  : TCI の大きさ

$F_{11}$  : TCI の縦断方向成分

$F_{22}$  : TCI の横断方向成分

$F_{12}=F_{21}$  : TCI のせん断方向成分

また、TCI はテンソルであるため、図 1.2.7 に示す対象スパンの平均的なひび割れ主方向を式 (2) により求めることができる<sup>5)</sup>。

$$\theta = \alpha = \tan^{-1} \left( \frac{F_{12}}{r + (F_{11} - (F_0/2))} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\theta$  : ひび割れの主方向

$\alpha$  : TCI の円が  $x$  軸と交わる点と点

( $F_{11}$ 、 $F_{12}$ ) を結ぶ直線と  $x$  軸のなす角

$r$  : ( $F_{11} - F_{22}$ ) の絶対値

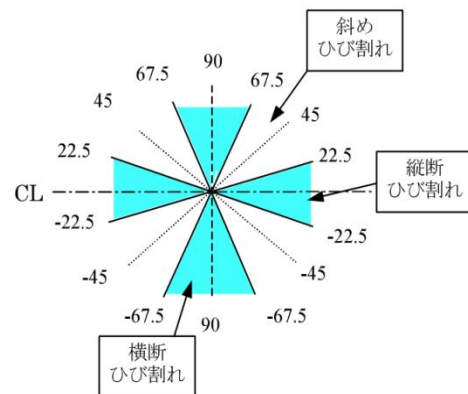


図 1.2.7 ひび割れ主方向の定義

NEXCO では、山田らの TCI の活用研究<sup>6)</sup> に基づき TCI を直接用いるのではなく覆工に発生しているひび割れが外力の作用を受けているかの判定をおこなう「外力評価点」および覆工のはく落につながる可能性のあるひび割れの判定をおこなう「はく落評価点」を TCI から下記のように換算している。



「ひび割れ幅・長さ・分布」に関する判定

外力評価点  $y_1$

$$y_1 = \frac{58 \times x \times 10^5}{(x \times 10^5 + 10)} \quad (3)$$

はく落評価点  $y_2$

$$y_2 = \frac{32 \times x \times 10^5}{(x \times 10^5 + 13)} \quad (4)$$

ここで、 $X:F_0$

また、「2.ひび割れの方向性」に関する判定は、横断卓越型、縦横断拮抗型、横断・斜め卓越型として  $Z=F_{22}/F_0$  の値から表 1.2.10 のような評価点を決定している。

NEXCO では表 1.2.1 に示したように、外力評価点が 60 点以上、もしくは、はく落評価点が 36 点以上の場合に現地点検での重点点検スパンとして近接目視かつ打音点検を実施することになっている。

これらの外力評価点およびはく落評価点の対象となるひび割れについては、覆工 1 スパンに存在するすべてのひび割れが対象となる。

このように  $F_0$  を主体としたひび割れ全体の不変量から重み付けを行い、詳細点検へ活用されている。

表 1.2.10 ひび割れの方向性に対する評価点

| Z               | 外力評価点 | はく落評価点 | 備考       |
|-----------------|-------|--------|----------|
| $0 < Z < 0.3$   | 4     | 2      | 横断卓越型    |
| $0.3 < Z < 0.7$ | 7     | 4      | 縦横断卓越型   |
| $0.7 < Z < 1.0$ | 11    | 6      | 縦断・斜め卓越型 |

$$Z = F_{22} / F_0$$

### 1.2.3 点検における課題

点検 A および点検 B の二段階からなる現在のトンネル覆工点検手法は、トンネル覆工に発生しているひび割れ、エフロッセンスおよび湧水の情報から重点的に点検が必要な覆工スパンを抽出することとしている。重点的な点検が必要な覆工スパンの抽出は、構造上問題となる外力の影響が懸念される覆工スパンやはく落事象が生じやすい覆工スパンの事前抽出を目的としている。しかしながら、トンネル覆工の点検は、近接目視かつ打音点検を基本としていることから、重点的な点検が必要な覆工スパンの抽出は、決して合理的とはいえない。

トンネル覆工のひび割れの原因としては、外力の作用等の外因と使用材料や施工等の内因に大別できる。一般には、外因、内因それぞれの変状原因が複合的に作用してひび割れが発生することから、ひび割れの状況から単純に変状原因を推定することは困難である。そのため、点検時の

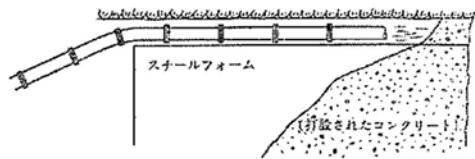
ひび割れに関する着目点としては、表 1.2.2 にあるようなひび割れの閉合部や目地部付近の三日月状のひび割れ等、はく落による第三者被害の影響が懸念される箇所やひび割れ幅が大きい、または覆工スパンを跨いで連続しているひび割れ等が発生している箇所に注視しながら点検を実施している。しかし、ひび割れ分布に着目した点検については、ひび割れの発生原因が発生機構も含めて不明瞭なところが多い。そのため、トンネル覆工に発生しているすべてのひび割れを対象とした外力評価点およびはく落評価点の算定としており、各評価点ごとの閾値設定によって近接目視と併せてトンネル覆工全面の打音点検を実施する覆工スパンの抽出を行っている。これにより、抽出した覆工スパンのなかには、内因による変状が含まれることになる。内因によるひび割れについては、ひび割れの進行もなくはく落事象となるようなひび割れ形態ではないため、安全性が確保されたトンネル覆工に対して近接目視と併せて覆工全面の打音点検を実施する場合があります、オーバースペックな点検となっていることが懸念される。仮に、コンクリートの収縮ひずみに起因するひび割れであれば、コンクリート打設後、一定期間経過すればひび割れ進展も新たなひび割れの発生もなくなる。そのため、コンクリートの収縮によると判定されたひび割れに対しては、現場点検を省略できる可能性があるが、現状はひび割れの分類等が困難で、すべてのトンネル覆工に対して近接目視かつ打音、触診を実施している状況であり、多大な労力と時間を要している。

また、トンネル覆工の詳細点検において構造物の健全性把握のため、構造物の健全性を変状の発生や進行状況を把握し、トンネル覆工の健全度評価を行うこととしている。健全度評価にあたっては、表 1.2.9 に示す評価の標準において外力評価点を健全度ランクの目安として活用している。健全度評価は、トンネル覆工への外力による変状評価として変状に対して対策の必要性について判断する指標である。しかしながら、外力評価点は上述同様すべてのひび割れを対象としていることから、変状原因推定が困難な状況であり外因によって発生したひび割れによる評価となっていない。また、外力評価点算定にあたり表 1.2.3 にある観察項目の③パターンである亀甲状、閉合型および交差、分岐による算定、④エフロッセンスおよび⑤湧水による算定が、外因によって発生するひび割れに対するトンネル覆工への影響度をより困難なものとしている。

## 1.3 覆工コンクリート施工

### 1.3.1 覆工コンクリート施工の現状

高速道路トンネルの建設は、昭和 30 年代初めから始まり、当時は矢板工法が標準工法として用いられていた。矢板工法は、掘削直後に建て込まれる鋼アーチ支保工と鋼アーチ支保工の外周に周囲の岩石・土砂を押える矢板を配置することで、覆工完了までの間、荷重を安全に支える工法である。よって、一般に鋼アーチ支保工は、覆工を設置するまでの仮設材であり、最終的にトンネルの土圧に抵抗する主体は覆工であるとの考え方で設計している。矢板工法時代の覆工コンクリートの施工は、スチールフォームとコンクリート打込み機械を用いた打設であり、側壁部は、作業員が型枠内に入り作業を実施していた。また、アーチ部の打設については、図 1.3.1 に示す



ノンテレスコピック型スチールフォームによる打設  
コンクリート輸送管の短管を1本ずつ取りはずしながら打設していく

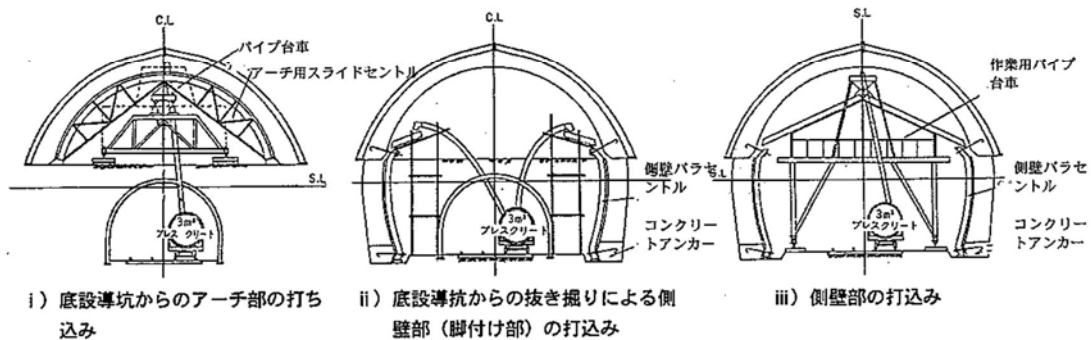


図 1.3.1 プレスクリートによる覆工コンクリートの打込み例（引抜き方式）<sup>7)</sup>

ように型枠内の天端部に配管してコンクリートを打込みながら配管を引抜く、引抜き方式が用いられていた。

昭和 50 年代になると NATM が導入され、現在まで標準工法として用いられている。NATM は、吹付けコンクリート、ロックボルトや鋼アーチ支保工の支保部材が地山と一体となった支保構造体によって、地山が安定化することから、覆工の施工は、内空変位の進行がある範囲内に収束して行われる。地山の変位が収束して施工されることから、覆工は地山の荷重を支える力学機能から解放された。NATM の覆工は、供用性の機能として、①水密性のよい構造物にする、②供用中の点検、保守等の作業性を高める、③トンネル内の架線、照明、換気等の施設保持がある。また、力学特性については、将来の地山の劣化や地下水の復元等に対してトンネルの余力を保持

する機能がある。NATM の覆工コンクリート施工は、トンネル全断面型枠（セントル）をセットしコンクリートをポンプにより圧送して打込む方式



写真 1.3.1 側壁部の締固め状況<sup>8)</sup>



写真 1.3.2 肩部の締固め状況<sup>8)</sup>

が一般的となっている。

覆工の側壁から肩部までは、型枠に設けられた窓からの打込みと棒状バイブレータによる締固めを行い、肩部から天端部までのアーチ部においては、型枠窓を閉塞し吹上方式による打込みに切替えて施工している。しかし、いずれも狭小空間で写真 1.3.1、写真 1.3.2 のような窮屈な姿勢での作業を余儀なくされるため、締固めやポンプ筒先の移動等が十分に行えていないのが現状であった。特に、アーチ部においては人力締固めが困難なことから締固め不足によるコンクリートの密実性の低下、横流しによる材料分離、充填不足による背面空洞の発生等の課題があった。これら不具合の改善のため、施工において、充填感知センサーや伸縮型バイブレータ等を利用し、設備や労力をかけた入念な施工と厳しい施工管理を実施してきた。しかし、今後の熟練作業員の高齢化や減少を考えると従来の設備や労力による取組みには限度があることから、コンクリート材料を改善するアプローチで課題解消を目指した。その結果、コンクリートの充填性・均質性を飛躍的に高めた中流動覆工コンクリートを開発し、2008（平成 20）年に導入した。当初、中流動覆工コンクリートについては、石粉やフライアッシュを用いて粉体量を増量することで適度な流動性と材料分離抵抗性を確保するものであったが、粉体系の流通事情や専用サイロの確保が困難などのプラント設備事情から中流動覆工コンクリートを採用できる地域が限定されていた。そこで全国的に普及させるために、増粘剤成分が含有された高性能 A E 減水剤等を用いた中流動覆工コンクリートの配合<sup>9)</sup>を定めた。そして石炭灰や石粉の粉体系を用いた配合と併せて基準化することで、2013（平成 25）年に高速道路トンネルにおいて、中流動覆工コンクリートの標準化を図り、併せて覆工コンクリートの長期耐久性確保の観点から、高品質なコンクリートの品質管理の確保を目的として設計基準強度を  $\sigma_{28}=18\text{N}/\text{mm}^2$  から  $24\text{N}/\text{mm}^2$  に引き上げている。

### 1.3.2 覆工コンクリート施工の課題

覆工コンクリートの機能として、供用性においては、①水密性のよい構造物にする、②供用中の点検、保守等の作業性を高める、③トンネル内の架線、照明、換気等の施設保持がある。また、力学特性については、将来の地山の劣化や地下水の復元等に対してトンネルの余力を保持する機能がある。これらの機能を確保するために、覆工コンクリートの品質に対する要求性能については、不明瞭である。そのため、何を持って覆工コンクリートの品質向上とするのか明確になっていないことから、覆工に発生するひび割れに対する要求性能について定まったものがない。

覆工コンクリートのひび割れの原因として考えられるのが、養生環境や施工方法である。養生環境は、養生方法や養生期間および型枠脱型時期等（以下「養生環境」という。）があり、一方で施工方法としては、覆工コンクリートの締固めによるものがある。

一般的な覆工コンクリートは、これまで工程を確保するために打込み翌日に脱型されるサイクルで施工され、トンネル坑内温度が安定し、かつ湿度が一定で高い状態であったことから特別な養生の必要がなかった。しかしながら、坑内環境に着目した馬場らの研究報告<sup>10)</sup>によると、トンネル施工環境の改善を目的とした換気設備の充実により、坑内温度、湿度は屋外と同様に季節変動することが明らかになった。したがって、坑内環境によっては、脱型直後のコンクリート表

面からの水分蒸発により、乾燥収縮の促進や水和反応の阻害等、コンクリートのひび割れを引起す恐れがある。これらのことから、覆工コンクリートの品質向上を目的に現場では、給水や水分逸散抑制により覆工表面を湿潤状態に保つ養生方法等の提案がされている。

高山<sup>11)</sup>は、覆工コンクリート打設初期に生じるひび割れ発生メカニズムに着目した研究を行っている。

この研究報告では、初期ひび割れ発生を抑制するために坑内温度、坑内湿度を指標とした蒸気圧の概念を用いた評価手法を提案している。

養生効果については、主に耐久性の観点から調査研究が行われており、代表的な事例としては郭ら<sup>12)</sup>が報告しているように中性化速度等の鉄筋腐食因子の浸透抑制に着目した研究が多い。覆工の大部分は、無筋コンクリート構造物であるため、鉄筋腐食に関連する中性化速度や透水係数等で長期耐久性を評価することは、適切ではない。また、覆工の維持管理では、ひび割れ発生、進展によるコンクリート片のはく落防止が第三者事故防止という観点から重要な課題であるが、養生、施工条件および坑内環境までを考慮したひび割れ発生、進展を検討した事例が少ない。さらに、養生環境の効果として実環境下での収縮ひずみの発現速度が不明であり、かつコンクリートの収縮ひずみと覆工のひび割れ発生、進展との相関が不明である。

一方、覆工コンクリート施工では、NEXCO は、中流動覆工コンクリートと型枠パイプを採用することで、材料分離や未充填部の発生を防止してきた。しかしながら、型枠パイプの配置は、図 1.3.2 に示すようにセントルのヒンジ部や補強材をかわした設置間隔となることから、型枠パイプ直近

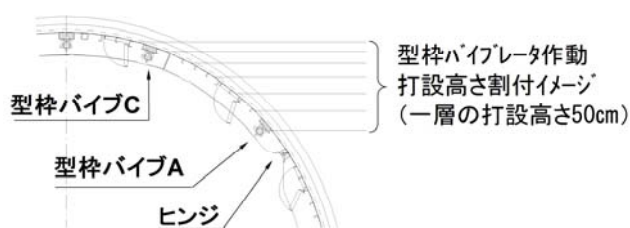


図 1.3.2 型枠パイプ配置図

では、過剰な締固め状態となり、局所的な材料分離の発生が懸念される。

粗骨材がないモルタルの収縮ひずみは、コンクリートに比べて大きくなる傾向があることが報告<sup>13)</sup>されている。したがって、材料分離が発生した場合には、覆工コンクリートの収縮ひずみが不均一になり、ひび割れの発生を誘発する懸念がある。

コンクリート標準示方書[施工編：施工標準]（土木学会編）の締固めに関する解説には、材料分離に注意して締固めを実施するとの記述がある。しかしながら、材料分離に関する定義については記述がない。これは、コンクリートの配合や構造物の特徴によって材料分離の考え方が違うために一概に設定できないものと思われる。

## 1.4 研究目的、対象、方法論

### 1.4.1 研究目的

本研究は、NEXCO で実施しているトンネル覆工の詳細点検および中流動覆工コンクリート施工に対する課題に対して、トンネル覆工の維持管理の効率化および中流動覆工コンクリートの品質向上を目的に、維持管理においてはトンネル覆工の詳細点検および施工方針の提案と、中流動覆工コンクリート施工においては養生方法および施工方法の提案を行うものである。

トンネル覆工で問題となるのが、はく落事象につながるひび割れの発生である。しかし、ひび割れの発生要因については、発生機構も含めて不明瞭なところが多いが、そのなかでコンクリートの収縮ひずみに起因するひび割れについては、コンクリート打設後、一定期間経過すればひび割れ進展も新たなひび割れの発生もなくなる。したがって、コンクリートの収縮ひずみに起因するひび割れの発生メカニズムについて検討を行い、はく落事象との関連性を把握する。また、収縮ひずみ以外のひび割れ発生の要因として、覆工厚の不均一や粗骨材等の偏りによる影響も想定されることから、収縮ひずみ同様に検討を実施する。コンクリートの収縮ひずみ等に起因するひび割れについて把握できれば、トンネル覆工の詳細点検において現場点検の省略が可能となり、ひび割れに対する補修は必要ないと考える。一方で、中流動覆工コンクリートの施工方法においては、施工に起因するひび割れを抑制する施工方法の提案が可能となる。

### 1.4.2 本研究の方法論

ひび割れ発生要因は、材料、施工等に起因して発生する内因と外力作用等の外因に大別できる。外力作用により発生するひび割れについては、トンネル局部に発生することがほとんどであり、ひび割れ発生形態については特徴的なものが多い。この場合、点検においては、特徴的なひび割れとして点検を実施することが可能であり、発見された場合については詳細調査を実施したうえで対策工検討というスキームが構築されることになる。また、建設時に外力作用が想定される場合については、外因による対策を施工段階で検討することになる。

外因によるひび割れは、ひび割れ幅および長さも大きく進行性である場合が多いことから、維持管理上は外因による損傷を早期に把握し、対応することが求められている。一方で、コンクリート収縮ひずみに起因するひび割れについては、コンクリート打設後、一定期間経過すればひび割れ進展も新たなひび割れの発生もなくなることから、特段の補修の必要はないと考える。しかしながら、コンクリート収縮に起因したひび割れの発生形態については、不明瞭なところが多い。そこで本研究では、過去の点検記録から得られた TCI の縦断方向成分  $F_{11}$ 、横断方向成分  $F_{22}$  およびせん断方向成分  $F_{21}, F_{21}$  の成分に着目し、外力作用等の特殊条件下での極端に大きな TCI 値や多くのトンネルでは TCI 値が小さいことを明らかにする。この分析結果に基づいて、既設トンネルの代表的なひび割れを示す指標として TCI(50)値を設定する。この TCI(50)値とは、TCI の縦断方向成分  $F_{11}$ 、横断方向成分  $F_{22}$  およびせん断方向成分  $F_{21}, F_{21}$  の成分毎に累積度数グラフを作成し累積 50%の値を各成分の TCI(50)値とするものである。従来は、単純な算術平均値を TCI の代表値として取り扱っていたが、平均値は極端に大きな TCI 値を示すトンネルの影響

を受けることが予想される。したがって代表値としての扱いはせずに、新しい考え方として TCI(50)値という概念を用いて分析を試みる。

従来のひび割れ判定評価では、各成分の和である  $F_0$  の不変量を用いていたが、この値ではひび割れの方向成分が分からないため、コンクリート片剥落の誘因となるひび割れの交差を評価できなかった。高速道路では、小さなコンクリート片はく落が車両事故を引き起こす可能性があることから、本研究では TCI の方向成分に着目して、ひび割れの交差を抽出する評価手法を検討し、提案する。

つぎに、コンクリートの収縮ひずみは、温度、湿度等の環境条件による影響を受けることが知られていることから、実際のトンネル坑内の環境を測定し、この測定データに基づいてコンクリートの収縮ひずみの変動を数値解析により長期間算定する。算定した数値解析結果をもとに、内因の主な要因であるコンクリートの収縮ひずみのパラメータ解析を実施した検討結果の TCI と点検データの TCI(50)値を比較することで、内因のひび割れは進行性がないことを明らかにする。また、内因に起因するひび割れは、TCI の縦断方向成分  $F_{11}$ 、横断方向成分  $F_{22}$  が支配的であることを解析にて明らかにする。

さらに、変状原因が内因によって発生するトンネル覆工のひび割れについては、収縮ひずみ以外の要因として覆工厚の不均一の影響や粗骨材の偏りによる収縮ひずみへの影響も想定されることから、覆工厚の不均一、粗骨材分布がひび割れに与える影響についても解析的な検討を加える。

以上の知見を整理し、従来は 5 年後に全てのトンネル覆工に対して実施していた近接目視と全面打音による点検方法をトンネルの安全性を担保した上で合理的な点検方法と維持管理手法を本研究で提案する。

一方、建設においては、覆工コンクリートの施工方法においてひび割れ発生の抑制方法について検討を行う。そこで、覆工コンクリートの養生効果を確認するため、実際に養生環境によるコンクリートの品質向上を、実際の養生環境をモデル化した室内実験より物性値を得たうえで短期間における評価を行い、その結果にもとづいて実環境下を想定した数値解析により、長期間の覆工コンクリートのひび割れ発生、進展を解析する。

また、中流動覆工コンクリートで使用する型枠バイブレータの締固め状況を把握するため、大型試験体を使った打設実験により、過剰な締固めによる粗骨材の含有率を把握したうえで、数値解析により、粗骨材の含有率による長期間のひび割れ発生、進展を解析し、過剰な締固めによる影響を把握する。

以上の知見を整理し、はく落事象につながる閉合ひび割れの発生を抑制するための中流動覆工コンクリートの締固め方法および養生の施工管理手法を本研究で提案する。



## 1.5 本論文の構成

この論文の構成は以下の通りである。

第1章では、NEXCOの高速道路トンネルの点検において概説し、はく落につながるひび割れ形態の把握が困難なことから、近接目視と併せてトンネル覆工全面に対して打音を実施している状況を述べた。そこで、ひび割れ形態からの変状原因の推定手法を検討することで、点検の効率化に資することを示した。

一方で、覆工コンクリートの施工において、はく落事象に結びつくひび割れを抑制することが求められている。養生環境が覆工コンクリートの品質に及ぼす影響を把握し、養生環境による品質向上の検討を行うことを述べた。さらにNEXCOで標準仕様としている中流動覆工コンクリートの型枠バイブレータを適用した施工方法における課題について、実験、解析による検討を実施することを示した。

第2章では、建設工法における覆工コンクリートの施工方法や既往の文献調査から、ひび割れの発生が懸念される施工方法について整理した。

第3章では、矢板工法およびNATMの建設工法別に既往の点検記録について、本研究で提案するTCIの縦断方向成分 $F_{11}$ 、横断方向成分 $F_{22}$ およびせん断方向成分 $F_{12} \cdot F_{21}$ 分析を活用した乾燥収縮等に起因したひび割れを抽出する手法を述べた。さらに内因と外因によるひび割れ抽出について、非破壊検査手法を用いて外因によるひび割れ抽出手法の試行について述べた。また、覆工巻厚の不均一や粗骨材含有率の分布とひび割れとの相関について、既往の点検および調査結果から検証を実施した。

これら検証結果から、要因別のひび割れ発生パターンの特徴を示した。

第4章では、コンクリートの収縮ひずみに温度、湿度等の環境条件が影響を受けることが知られていることから、実際のトンネル坑内環境を貫通前と貫通後の建設中のトンネルで測定を実施し、当環境下におけるコンクリート物性の短期間の経時変化を把握した。

また、養生方法の違いや粗骨材分布に関する物性値の把握についても、室内試験や大型試験体により確認を実施した。

第5章では、前章で室内試験等により把握した短期間のコンクリート物性値と材料-構造連成応答解析システムDuCOM-COM3<sup>14), 15), 16)</sup>によって算定した物性値を比較し、解析精度を確認したうえでDuCOM-COM3によって長期間の物性値の経時変化を算定した。長期間の物性値の変動を基に、ひび割れ発生、進展解析を実施し、工法別、養生の有無、配合、材料分離および覆工厚不足によるひび割れ発生状況を把握した。

第6章では、第5章までの既往の点検結果分析、収縮ひずみの経時変化によるひび割れ発生、進展解析により、トンネル覆工の詳細点検の効率化および合理的な補修方針に向けた維持管理について提案した。

トンネル建設の覆工コンクリート施工においては、養生環境が覆工コンクリートの品質に及ぼす影響を前章までで整理し、NEXCOの標準仕様である中流動覆工コンクリートに対する品質向上のための標準的な養生方法を提案した。さらに、中流動覆工コンクリートに使用している型枠



バイブレータの過振動の影響を把握し、品質確保のための施工管理方法を提案した。

第7章では、まとめとして第1章から第6章において、検討内容およびその成果について各章ごとにまとめた。

## 【参考文献】

- 1) 西日本高速道路(株)：保全点検要領(構造物編) 補足資料(案)【技術資料】付属資料9 トンネル点検の手引き(技術資料) ----- 付9-1、2017.4
- 2) 西日本高速道路(株)：保全点検要領 構造物編、2017.4
- 3) 重田佳幸、飛田敏行、亀村勝美、進士正人、吉武 勇、中川浩二：ひび割れ方向性を考慮した覆工コンクリートの健全度評価、土木学会論文集F、Vol.62、No.4、pp.628-632、2006.
- 4) 山辺 正、原 夏生、小田匡寛：クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメータの決定に関する研究、土木学会論文集、No.382/III-7、pp.121-130、1987
- 5) 中野清人、佐伯徹、重田佳幸、大場論、西村和夫：トンネルの変状評価・原因推定へのひび割れ指数(TCI)の適用可能性について、トンネル工学報告集、20巻、pp.239-243、2010.
- 6) 山田隆昭、佐野信夫、馬場弘二、吉武 勇、中川浩二：トンネル覆工コンクリートの定量的な健全度評価基準、土木学会論文集F、Vol.63、No.1、pp.86-96、2007.
- 7) (社)土木学会：トンネルの変状メカニズム、p.12、2003.9
- 8) (株)高速道路総合技術研究所：NEXC O中流動覆工コンクリート技術のまとめ、p.1-1、2011.12
- 9) 水野希典、岩尾哲也、中田主税：高速道路トンネルへの中流動覆工コンクリート標準化検討、トンネル工学研究発表会、2013.
- 10) 馬場弘二、伊藤哲男、城間博通、宮野一也、中島浩、谷口裕史：施工中のトンネル坑内環境と覆工コンクリートの湿度変化に関する研究、土木学会論文集 No. 742/VI-60、pp. 27-35、2003.9
- 11) 高山博文：トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れ抑制に関する研究、京都大学学位論文、2009
- 12) 郭度連、宇治公隆、国府勝郎、上野敦：養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価、土木学会論文集 No. 718/V-57、pp. 59-68、2002.11
- 13) 松下文明、柴田純夫、張文艶、濱幸雄：モルタル・コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす骨材種別の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No. 1、pp. 107-112、2011
- 14) Maekawa, K., Chaube, R. and Kishi, T. : Modelling of Concrete Performance Hydration, Microstructure Formation and Transport, E & FN SPON, 1999.
- 15) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-Scale Modeling of Structural, Taylor and Francis, 2008.
- 16) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-scale Modeling of Concrete Performance -Integrated Material and Structural Mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 2, pp.91-126、2003.

## 第2章 トンネル覆工のひび割れ要因となる施工方法の整理

### 2.1 本章の目的

覆工コンクリートに発生するひび割れのうち、施工に起因して発生するひび割れ状況を把握するため、建設工法（矢板工法・NATM）の覆工コンクリート施工について整理し、ひび割れが発生する可能性がある施工内容を抽出する必要がある。本章では、はじめに高速道路トンネルの建設工法における覆工コンクリートの施工方法について整理する。なお、本研究で対象とする矢板工法は、支保材料が鋼アーチ支保により建設されているトンネルとし、整理する覆工コンクリートの施工方法も鋼アーチ支保による矢板工法とする。次に、整理した施工方法が、トンネル覆工のひび割れ発生に影響をおよぼす要因を抽出し、施工方法の課題について整理する。さらには既往の文献調査を実施し、建設工法ごとの材料、施工に起因する代表的な損傷原因を抽出する。

### 2.2 建設工法における覆工コンクリート施工方法の整理

高速道路のトンネル建設は、昭和30年代初め頃から建設を始めた名神高速道路、栗東～尼崎間のトンネル群からであり、表2.2.1にあるとおり矢板工法からはじまりNATMへの建設工法の変遷がある。建設工法に併せて、覆工コンクリートの材料、施工方法についても変貌を遂げてきており、これら変遷における覆工施工方法がトンネル覆工のひび割れ要因となる課題を整理する。

表 2.2.1 トンネルの変遷 <sup>1)</sup>

| 年代     | 明治                     | 大正 | 昭和                       | 昭和30年代初頃         | 昭和50年代中頃   | 平成             |
|--------|------------------------|----|--------------------------|------------------|------------|----------------|
| 工法     | 矢板工法                   |    |                          |                  |            | JHのNATM標準化S58  |
| 支保材料   | 木製支保                   |    | 鋼アーチ支保                   | ロックボルト・吹付けコンクリート |            |                |
| 覆工材料   | レンガ<br>石積み             |    | コンクリートブロック<br>場所打ちコンクリート | 東名<br>中央道<br>東北道 | 中国道<br>関越道 |                |
| 覆工施工方法 | 人力(レンガ・石積み・コンクリートブロック) |    | 人力はね込み打設・吊り栈橋による投入(側壁)   | 機械化打設(プレーサー・ポンプ) | 引抜き管方式     | (ポンプ)<br>吹上げ方式 |

※表中の JH とは、NEXCO 前身の日本道路公団の略称

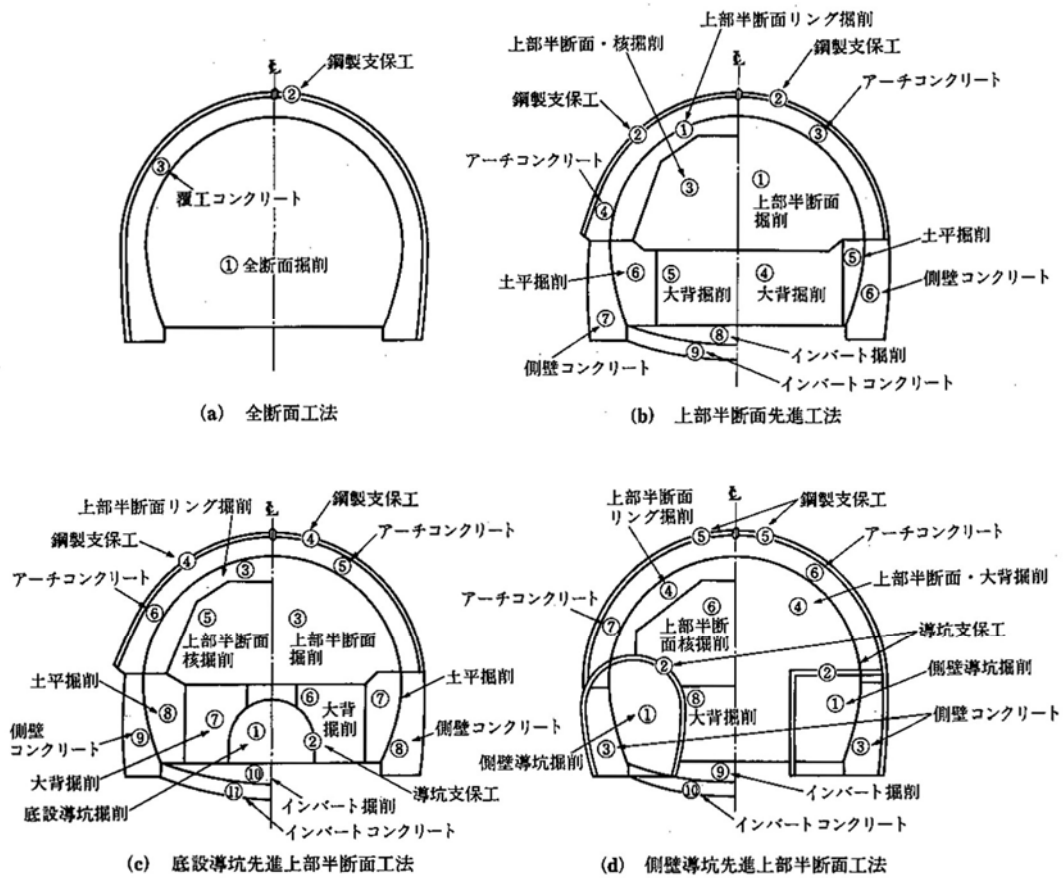
## 2.2.1 建設工法の概要

### (1) 矢板工法の覆工コンクリート施工

掘削直後に建て込まれる鋼アーチ支保工と矢板によって地山を支えた矢板工法は、NATM が導入される 1980 年代前半まで標準工法として広く用いられた。

掘削により発生する地山の荷重を支保工と覆工が一体となって支保する考え方である。

矢板工法における代表的な覆工コンクリートの打設手順を図 2.2.1 に示す。



注1：断面図の左側は不良地質の場合、右側は良好地質の場合を示す。  
注2：○の数字は施工手順を示す。

図 2.2.1 代表的な矢板工法の掘削工法 <sup>2)</sup>

当時は生コンクリートの搬送、打込みにコンクリートポンプやコンクリートプレーサーを用いた。また、一般的なアーチ部のコンクリートの打込みは、図 2.2.2 に示すように天端に配置した打込み管を徐々に引き抜く、引抜き方式で行っていた。

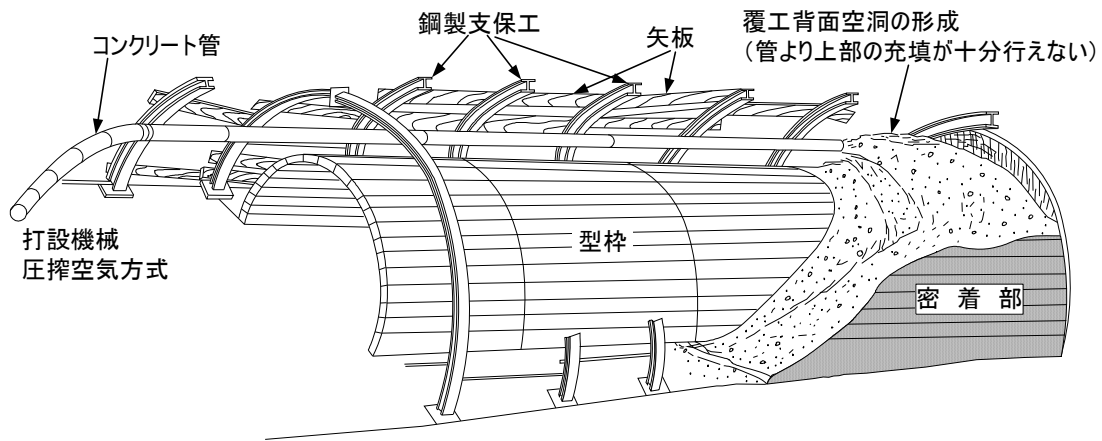


図 2.2.2 引抜き方式によるコンクリート打設<sup>3)</sup>

(2) NATMの覆工コンクリート施工

吹付けコンクリートやロックボルト、鋼アーチ支保工などを主たる支保部材とするNATMは、1980年代前半に普及した。

地山はこれら支保部材と一体となった支保構造体としてトンネル断面全体を形成する。掘削後の地山はこの支保構造体によって安定化される。

覆工コンクリートの施工については、図 2.2.3に示すように、側壁部は全断面型枠（セントル）の左右に設けられた打込み窓から左右均等に肩部まで打ち上げ、アーチクラウン部は配管を切替えて、吹上げ口より吹き上げて打込む方法としている。

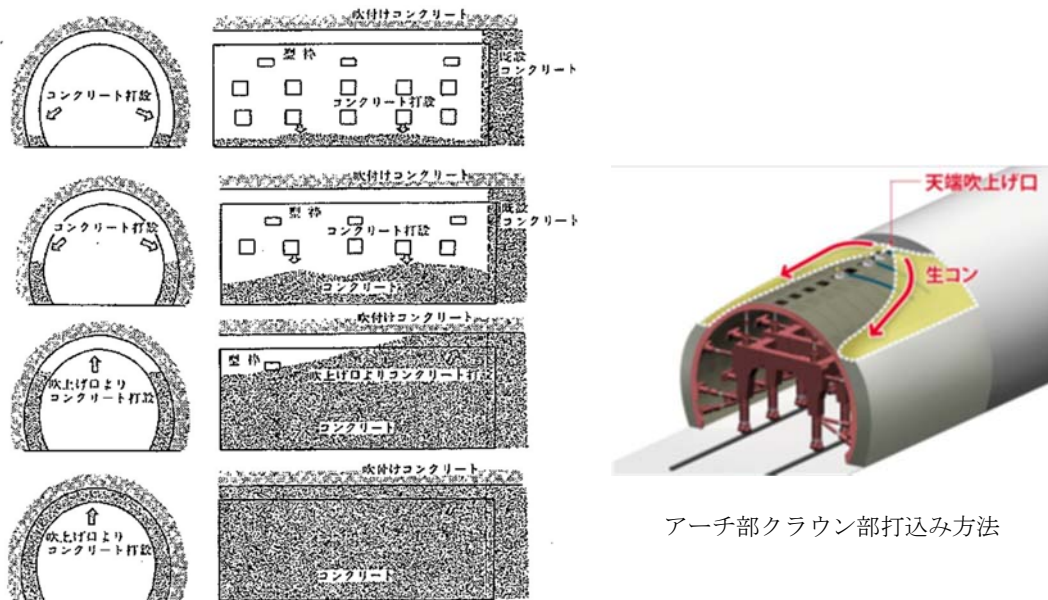


図2.2.3 標準工法（NATM）での覆工コンクリートの打込み順の例<sup>4)</sup> を加筆修正

## 2.2.2 トンネル覆工のひび割れ発生要因の抽出

### (1) 矢板工法の覆工コンクリート施工

覆工コンクリートで圧縮空気によりコンクリートを圧送して打込むコンクリートプレーサーを用いた施工では、コンクリート吐出口が打ち込んだコンクリート面から離れた場合にはコンクリートの材料分離が発生し、覆工中にジャンカや巻厚不足が発生しやすいことが知られている。

図 2.2.4 左図のように、天端部のコンクリートに盛り上がりが出てしまうと、その奥にコンクリートの充填ができない状況が考えられる。引抜き方式では、空気圧が大きく危険なため、打設したコンクリートと引抜き管の吹出し口を離して打設していた。そのため、打設したコンクリートの手前に、コンクリートの盛り上がりが出てしまうことがあったようである。硬練りのコンクリートを用いていたことから、その奥にはコンクリートは充填しにくかったと考えられる。

また、現在の NATM よりも天端のパイプレータがかけにくく、覆工奥側から手前側へのコンクリート打設によって天端付近まで圧縮空気によりコンクリートを圧送して充填させることから、空気圧が大きく危険なため、引抜き管に近づいてパイプレータがかけられなかったと考えられる。

さらに、打設を中断し引抜き管を1本ずつ外しながら打設する施工が行われていたことから、手前のコンクリートが硬化を開始したのちは、奥のコンクリートは一層充填しにくかったと考えられる。

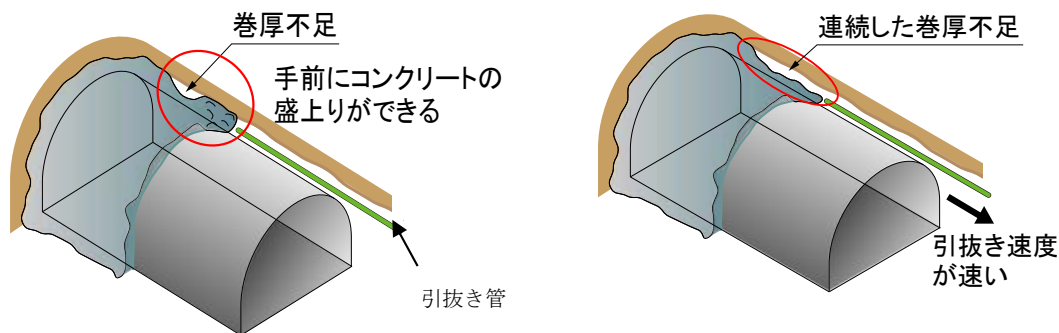


図 2.2.4 巻厚不足となるイメージの例

コンクリートの引抜き管の引抜き速度が速い場合には、図 2.2.4 右図のように、連続した覆工巻厚不足が発生したことが考えられる。天端の充填状況が確認しにくく、そのため引抜き速度についても、適切な引抜き速度が見出しにくく、施工管理が不十分であった可能性がある。

最近報告された矢板工法で施工された新幹線トンネルの覆工厚に関する報告<sup>5)</sup>によれば、覆工厚不足は、天端ではなく、天端から15度離れた箇所（天端から1m前後）に発生する頻度が高いことが示されている。

また、矢板工法では、図 2.2.5 にあるように矢板が配置されることで、コンクリートが矢板背面(地山側)に充填できず、写真 2.2.1 のように空洞ができやすい状況である。

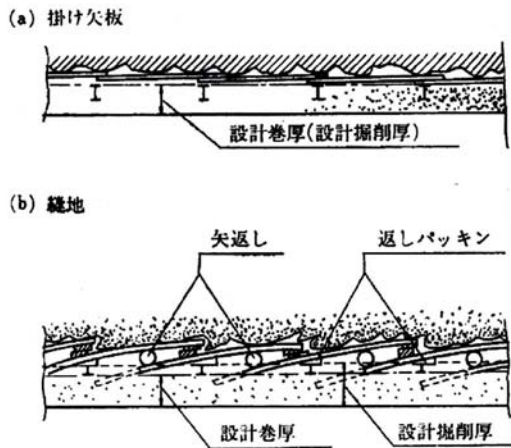


図 2.2.5 矢板の配置と覆工コンクリート<sup>6)</sup>



写真 2.2.1 覆工背面の空洞状況<sup>1)</sup>

## (2) NATMの覆工コンクリート施工

覆工コンクリートの施工条件として、狭小なスペースへの打設となり、特に図 2.2.3 に示す天端部における吹上げ・横流し施工は、打設延長として 10.5~12m の流動距離があることで材料分離の影響が懸念される。

覆工コンクリート打設時のコンクリート流動による影響を実験した坂井らの報告<sup>7)</sup>によると、打設口 1 箇所からスランプ 15 cm のコンクリートを打設される天端部分の状況を再現した実験では、打設口から約 8m 程度離れると粗骨材がほとんど含まれていないと報告されている。この原因としては、スランプ管理のコンクリートでは流動距離が長くなるとモルタル分が先走りして材料分離が発生するものと想定される。

また、吹上げ・横流し施工により図 2.2.6、写真 2.2.2 にある妻部や地山側への充填不足が懸念される。さらに、有筋区間においては、狭小なスペースにさらに鉄筋が配置されることから充填性が課題となる。

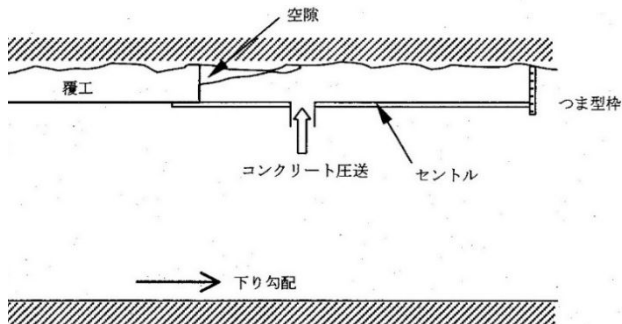


図 2.2.6 覆工妻部空洞状況の例<sup>1)</sup>



写真 2.2.2 覆工妻部空洞状況<sup>1)</sup>



防水シートの施工箇所では、ある程度吹付けコンクリート面に防水シートを追従させ引張りによる破損を防ぐため、適度なたるみを設ける必要があるが、天端部において防水シートの過度なたるみは、覆工の巻厚不足となるリスク（図 2.2.7、写真 2.2.3 参照）を含んでいる。

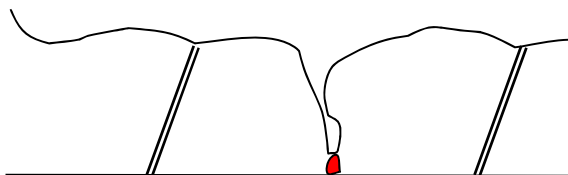


図 2.2.7 防水シートによる巻厚不足イメージ



写真 2.2.3 防水シートによる巻厚不足<sup>1)</sup>

### (3) 坑内環境による影響

現在の NATM の覆工コンクリートは、将来支保工の劣化や地山の変位に対する余力保持機能としての役割が大きい。そのため、脱型については、トンネル標準示方書に示す、12～20 時間程度で $2\sim 3\text{N}/\text{m}^2$ の圧縮強度が確認された時点で脱型しているのが現状である。しかし、若材齢時における圧縮強度の発現性は、セメントの種類、配合条件および使用する混和材料によって異なるとともに、湿度、気温および風速等の坑内環境によっても大きく相違する。

トンネル覆工に生じるひび割れの発生率は、コンクリートの打設温度に影響を受けていることが、川又らの研究<sup>8)</sup>で報告されている。この報告では、打設時のコンクリート温度が 20 度以上となると覆工にひび割れが発生する確率が高くなっている。コンクリート温度が高いほどセメントの水和反応が促進され、水和熱に起因するコンクリートの内部温度の上昇が大きくなることから、コンクリート内部温度がひび割れ発生に影響を与えている可能性が想定される。

従来、坑内環境は、高湿度で気温が一定ということもあり、覆工コンクリートの養生について十分に配慮されていなかった。しかしながら、2000 年に当時の厚生労働省が示した「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」によって、坑内の作業環境改善のため換気設備を充実させたことで、坑内が乾燥状態となり、覆工コンクリートの乾燥収縮ひび割れの発生が懸念されている。

坑内環境について調査した馬場らの報告<sup>9)</sup>によると坑内環境は、屋外の季節変動と連動していることが明らかになっている。



### 2.3 既存文献等によるひび割れ発生要因分析

覆工コンクリートに発生する代表的な損傷原因を抽出する目的で、既発表の学会や専門誌の文献調査を実施した。今回の調査は、外因による特徴的なひび割れ以外の特徴を把握するため、材料、施工に起因した損傷原因を対象とした。

調査対象を表 2.3.1 に示す。2010 年から 2015 年までの 6 年間の学会や専門誌を調査対象として、覆工コンクリートの損傷に関して記載されている文献を抽出した。

また、表 2.3.1 に示す既発表の学会や専門誌以外についても、覆工コンクリートの損傷に関する図書、報告書の調査を表 2.3.2 のリストについて実施した。これらの図書、報告書についても、材料、施工に起因した損傷原因を対象として分析を実施した。

表 2.3.1 調査の対象文献

| 文献名         | 発行            | 調査対象期間<br>(6 年間分) |
|-------------|---------------|-------------------|
| 土木学会年次学術講演会 | (社)土木学会       | 2010~2015 年       |
| トンネルと地下     | (株)土木工学社      | 2010~2015 年       |
| トンネル工学研究発表会 | (社)土木学会       | 2010~2015 年       |
| 施工体験発表会     | (社)日本トンネル技術協会 | 2010~2015 年       |

表 2.3.2 その他(図書、報告書)

| 文献名   | 発行                                      | 発行年               |
|---|---|-------------------|
| 変状トンネル対策工設計マニュアル                            | 鉄道総合技術研究所                               | 平成 10 年 2 月       |
| トンネルコンクリート施工指針(案)                           | 土木学会                                    | 平成 12 年 7 月       |
| トンネルクラック評価手法                                | 独立行政法人土木研究所<br>基礎道路技術研究グループ・<br>トンネルチーム | 平成 12 年<br>~14 年度 |
| トンネル安全問題検討会報告書<br>—事故の原因推定と今後の保守管理のあり<br>方— | 運輸省<br>「トンネル安全問題検討会」                    | 平成 12 年 2 月       |
| 打音検査マニュアル(案)                                | 鉄道運輸機構                                  | 平成 13 年 1 月       |
| 道路構造物点検要領(案)                                | 日本道路公団                                  | 平成 13 年 4 月       |
| 道路トンネル点検・補修の手引き<br>【近畿地方整備局版】               | 財団法人道路保全技術センター                          | 平成 13 年 7 月       |
| 鉄道総研教育講座：事例に学ぶ<br>トンネルの保守                   | 鉄道総合技術研究所                               | 平成 13 年 10 月      |
| 覆工コンクリート施工の手引き                              | 日本トンネル技術協会                              | 平成 13 年 12 月      |
| 道路トンネル定期点検要領(案)                             | 国土交通省道路局国道課                             | 平成 14 年 4 月       |
| 道路トンネル定期点検<br>説明会テキスト                       | 国土交通省道路局国道課                             | 平成 14 年 8 月       |
| 山岳トンネル覆工の現状と対策                              | 土木学会                                    | 平成 14 年 9 月       |
| トンネルの変状メカニズム                                | 土木学会                                    | 平成 15 年 9 月       |
| トンネル点検・調査<br>トレーニングマニュアル(案)                 | 道路保全技術センター                              | 平成 16 年 3 月       |
| 現場技術者のための<br>トンネル維持管理の実際                    | 山海堂                                     | 平成 16 年 12 月      |

表 2.3.2 その他(図書、報告書)

| 文献名  | 発行           | 発行年         |
|--|--------------|-------------|
| 覆工コンクリート施工技術の動向と課題<br>中間報告                           | 日本鉄道建設業協会    | 平成 17 年 3 月 |
| トンネル補強・補修マニュアル                                       | 鉄道総合技術研究所    | 平成 19 年 1 月 |
| コンクリートのひび割れ調査、<br>補修・補強指針-2013-、<br>付：ひび割れの調査と補修補強事例 | 日本コンクリート工学協会 | 平成 25 年 4 月 |
| 道路トンネル維持管理便覧<br>【本体工編】                               | 日本道路協会       | 平成 27 年 6 月 |

収集文献に関して、表 2.3.3 の項目について整理する。

その結果、表 2.3.4～表 2.3.7 に示す合計 79 件の事例を抽出した。表中には、該当する項目に対して” 1 ” を記入した。また、各事例の概要を記載した。

表 2.3.3 文献調査結果の整理

| 施工方法               | 覆工の損傷原因                         |  |                |
|--------------------|---------------------------------|--|----------------|
|                    | 材 料                             | 施 工  | その他            |
| 矢板工法<br>or<br>NATM | 乾燥収縮<br>or<br>温度収縮<br>or<br>その他 | コールドジョイント<br>or<br>セントルセット時の圧力<br>or<br>締固め不足<br>or<br>早期脱型<br>or<br>セントル沈下<br>or<br>その他 | 材料、施工<br>以外の要因 |

材料が損傷原因となっている事例のうち乾燥収縮、温度収縮については、コンクリートが収縮するときに拘束されることにより変状が生じる。これらの事例については、「覆工背面が拘束された事例」であるか、「インバートが拘束された事例」であるかについても、併せて調査した。

表 2.3.4 文献調査結果(1)

| No. | 文献タイトル                                | 文献発行年 | トンネル名                 | 施工方法 |      | 覆工の構築範囲  |             |    |     |      |             |    |     |      |             | 文獻内容の概要 |     |    |     |     |  |
|-----|---------------------------------------|-------|-----------------------|------|------|----------|-------------|----|-----|------|-------------|----|-----|------|-------------|---------|-----|----|-----|-----|--|
|     |                                       |       |                       | 矢張工法 | NATM | 乾燥保続     |             | 材料 |     |      |             | 施工 |     |      |             |         | その他 |    |     |     |  |
|     |                                       |       |                       |      |      | 背面<br>拘束 | インハート<br>拘束 | 不明 | その他 | 温度低下 | インハート<br>拘束 | 不明 | その他 | 温度低下 | インハート<br>拘束 |         |     | 不明 | その他 | その他 | その他  |
| 1   | 覆工コンクリートの温度ひび割れに対する部分ハイブクレーニングの適用     | 2015  | 境ノ目                   |      | 1    |          |             |    |     |      |             |    |     |      |             |         |     |    |     |     | インハート拘束を要する覆工部下部に部分的なハイブクレーニングを適用し、寒期温度低下、温度応力解析結果のひび割れ指数の増加を非寒期との比較から確認した報告   |
| 2   | 凍害を受けた老朽レンガトンネルの覆工補修について              | 2015  | 不詳                    |      | 1    |          |             |    |     |      |             |    |     |      |             |         |     |    |     |     | 過去に補強した収付モルタルが凍結融解により剥離したレンガトンネルに対して、レンガ研り工と内巻工を分断して覆工3時間内に安全かつ効率よく作業した工夫に関する報告  |
| 3   | 礼文トンネルコンクリート剥落箇所                      | 2014  | 礼文浜                   |      | 1    |          |             |    |     |      |             |    |     |      |             |         |     |    |     |     | 局部的な地圧により天端部が剥離した箇所に対策工として簡易な補強センターの効果と健全性を、補強後に継続した各種測定結果から確認した報告   |
| 4   | 山岳トンネル覆工コンクリートのひび割れ発生メカニズム            | 2012  | 不明                    |      | 1    |          |             |    |     |      |             |    |     |      |             |         |     |    |     |     |  |
| 5   | 塑性性を要するトンネルの変形に対する各種対策工の効果に関する研究      | 2013  | 不明                    |      | 1    |          |             |    |     |      |             |    |     |      |             |         |     |    |     |     |  |
| 6   | ひび割れ指数(TCI)を活用したトンネル覆工の要因原因推定法に関する試み  | 2010  | A〜Jトンネル               |      |      |          |             |    |     |      |             |    |     |      |             |         |     |    |     |     | ひび割れ展開率よりTCIを算出し、既知となっている要因原因とTCIを比較分析することにより、TCIから要因原因の推定の可能性を検討した。その結果、F1とF2Zの関係から、要因原因推定の目安として用いられた可能性があると考えられた。ただし、今回の検討で用いたデータ数は少ないため、追加して、さらなる検証が必要と認められる。また、TCIによる要因原因推定は、二次的な知見であり、実際に要因原因を推定する際には、地質、地質及びひび割れ発生部位並びに考慮して総合的な判断を要する必要がある。(A)のみが質劣化が原因、他は外力が原因) |
| 7   | 覆工コンクリート中の水酸化カルシウムの溶解とひび割れの進展メカニズムの考察 | 2010  | 供用後40年経過したトンネル        |      |      |          |             |    |     |      |             |    |     |      |             |         |     |    |     |     | 水酸化カルシウムが溶解することにより、セメント水化体が多量化し、ひび割れが進展した後に、間接ひび割れとびわくの一部のコンクリート片がはく落するものと考えられる。その一方で、コンクリートの自己収縮や凍結作用、または地震等の外力作用などの諸因の影響は大きいものと考えられる。  |
| 8   | 研究 高速道路トンネルにおける中流覆工コンクリートの凍害化         | 2013  | NEXCOの平成19年に施工されたトンネル |      | 1    |          |             |    |     |      |             |    |     |      |             |         |     |    |     |     | 従来配合と中流配合の覆工について、材齢28日、3ヶ月、1年、5年時点にひび割れ調査を実施。1ヶ月後は、双方とも凍害取崩による膨張ひび割れが発生。1年後は、従来配合がひび割れの拡大及び新裂に発生、中流配合がひび割れの発生のみ。5年後は、従来配合が膨張ひび割れ発生及びひび割れ拡大に對して、中流配合は新たに膨張ひび割れが発生したのみ、凍結入り中流配合は3ヶ月以降ひび割れの進展や追加無し。   |
| 9   | 新型テレスコピックセンター(TAF工法)による覆工コンクリートの施工    | 2014  | 一般国道473号 岩手トンネル       |      | 1    |          |             |    |     |      |             |    |     |      |             |         |     |    |     |     | 予防措置としてTAFを採用。100m区間、7.5m/sでひび割れが確認された。夏期に打設したインハート区間で隔壁部を取り外した後にひび割れが多く発生した。  |
| 10  | 2組の型枠を用いたインアンアーチフォーム工法で覆工養生時間を確保      | 2014  | 新東名高速道路 豊田トンネル        |      | 1    |          |             |    |     |      |             |    |     |      |             |         |     |    |     |     | 予防措置としてTAFを採用。53m/s中、インハート拘束ひび割れ、箱詰め部の背面拘束ひび割れがそれぞれ1スパン確認された。  |
| 11  | 28日間の凍結凍融面通行規制で高速道路トンネルの凍結対策を実施       | 2015  | 札幌自動車道 朝里トンネル         |      | 1    |          |             |    |     |      |             |    |     |      |             |         |     |    |     |     | 矢張工法における養生不足、背面空溜への対策事例。   |

表 2.3.5 文献調査結果(2)

| No. | 文献タイトル                              | 文献発行年 | トンネル名          | 施工方法 |      | 覆工の損傷原因 |         |     |    |      |         |      |     |    |      |         |     | 文獻内容の概要 |    |   |
|-----|-------------------------------------|-------|----------------|------|------|---------|---------|-----|----|------|---------|------|-----|----|------|---------|-----|---------|----|---|
|     |                                     |       |                | 失陥工法 | MATM | 乾燥収縮    |         |     |    | 材料   |         |      |     | 施工 |      |         |     |         |    |   |
|     |                                     |       |                |      |      | 側面拘束    | インハート拘束 | その他 | 不明 | 側面拘束 | インハート拘束 | 温度低下 | その他 | 不明 | 温度応力 | インハート拘束 | その他 |         | 不明 | コンクリートの圧力   |
| 12  | 強変質地山における支保の衰化対策と覆工補強               | 2011  | 東北中央自動車道大笹トンネル |      |      |         |         |     |    |      |         |      |     |    |      |         |     |         |    | 全長2089mの道路トンネルである。トンネル掘削時に、塑性圧に起因する支保衰化が発生した。覆工には、後期によるひび割れが複数箇所で見られた。トンネル施工時の支保衰化状況、覆工の損傷状況から発生原因を特定し、対策工を実施、その効果を検証している。  |
| 13  | 覆工の初期ひび割れの発生メカニズムとその抑制対策            | 2011  | 東北新幹線八甲田トンネル   |      |      |         |         |     |    |      |         |      |     |    |      |         |     |         |    | 覆工ひび割れ発生要因の一つとして、乾燥・放熱で、覆工の内部熱と地山削りによる不均一な収縮によるひび割れが発生していることを確認している。この現象を、コンクリート断面内の乾燥収縮の不均一性を考慮した数値解析モデルで再現解析を積み、ひび割れ発生状況の予測が可能であることを示している。  |
| 14  | 覆工材質の違いによる変形性能に関する実験的研究             | 2013  |                |      |      |         |         |     |    |      |         |      |     |    |      |         |     |         |    | ブロック積みと鑄造打ちコンクリートの違いが耐荷性能と変形性能に与える影響について模型実験で検証し、以下等がわかった。①麻筋コンクリート覆工と繊維補強コンクリート覆工は同程度の変形性能、耐荷性能を有している。②繊維補強には割れ発生抑制の効果が大きい。③麻筋コンクリート覆工は耐荷性能が高いが、十分なせん断補強が必要。                               |
| 15  | 非鋼繊維で補強した覆工コンクリートの引張強さと部材耐力の評価      | 2013  |                |      |      |         |         |     |    |      |         |      |     |    |      |         |     |         |    | 標準的な曲げ試験と一般的な覆工厚さ=300mmから500mmの薄肉火を目標とした試験体の曲げ試験を実施し、非鋼繊維補強コンクリートの引張強さと部材耐力の評価方法を考察。  |
| 16  | 60時間型貯存期間が可能な新型アレスコピックセンターの開発       | 2013  |                |      |      |         |         |     |    |      |         |      |     |    |      |         |     |         |    | 60時間の型貯存期間を確保可能な新しいアレスコピックセンターを開発、適用し、その効果を検証。  |
| 17  | 高寒道路トンネルへの中流動覆工コンクリート標準化検討          | 2013  |                |      |      |         |         |     |    |      |         |      |     |    |      |         |     |         |    | 特殊凍結耐性を備えた中流動覆工コンクリートの性状と長期凍結を伴った標準仕様としての適用性を検証。また、石粉灰を用いた中流動覆工コンクリートの施工後の経年経過年における品質は、従来の覆工コンクリートよりも密着で高品質な状態であることを確認。   |
| 18  | 覆工コンクリートの初期ひびわれ予測における熱特性値の同定とひびわれ解析 | 2014  |                |      |      |         |         |     |    |      |         |      |     |    |      |         |     |         |    | 粘土群標準化を用いて、現場での温度測定結果から熱特性値を推定する熱伝達係数推定方法を提案。また、初期ひびわれの発生を抑制するために、ひびわれの発生を抑制する温度応力、乾燥収縮、部材熱での引張力等の発生原因やコンクリート断面形状の扁平程度が初期ひびわれに与える影響について数値解析で検証。   |
| 19  | 覆工の背面形状や厚さが温度ひびわれに及ぼす影響に関する解析的検討    | 2014  |                |      |      |         |         |     |    |      |         |      |     |    |      |         |     |         |    | 覆工背面の凹凸形状や覆工厚さが覆工コンクリートの温度ひびわれに及ぼす影響について温度応力解析で検証。覆工の背面形状が凹型の箇所において、局部的に応力が増大し、ひびわれが生じる危険性が高まることを確認。トンネルの貫通に伴い、坑内気温が急激に低下した際にも、ひびわれが生じやすくなること、防水シートを設けることで、地山や吹付けコンクリートによる拘束が大層に緩和されることを確認。 |

表 2.3.6 文献調査結果(3)

| No. | 文献タイトル                                | 文献発行年 | トンネル名             | 施工方法 |      | トンネルの損傷原因 |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     | 文獻内容の概要 |    |   |
|-----|---------------------------------------|-------|-------------------|------|------|-----------|------------|-----|----|----------|------------|------|-----|----|------|------------|-----|---------|----|---|
|     |                                       |       |                   | 矢板工法 | MATM | 乾燥収縮      |            |     |    | 材料       |            |      |     | 施工 |      |            |     |         |    |   |
|     |                                       |       |                   |      |      | 平面<br>拘束  | 円ハート<br>拘束 | その他 | 不明 | 平面<br>拘束 | 円ハート<br>拘束 | 温度低下 | その他 | 不明 | 温度応力 | 円ハート<br>拘束 | その他 |         | 不明 | モルタルの圧力   |
| 20  | 覆工コンクリートの長期耐久性能に関する検討                 | 2014  |                   |      |      |           |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     |         |    | ひびわれ発生・進展のメカニズムを把握する解析モデルの作成にあたり、基礎データを取得するため、室内試験の途中経過と今後の展開について報告。  |
| 21  | 長期計画結果にもとづいたトンネル覆工の季節変動に関する考察         | 2014  |                   |      |      |           |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     |         |    | 実際のトンネルにおいて継続してトンネルのひびわれに関するデータを収集し、その長期的な変動について検討。ひびわれの許容には、乾燥収縮に伴う季節の影響を加味することが必要であること、ひびわれ密度は一定期間の後にはほぼ収束する傾向があることがわかった。           |
| 22  | 覆工コンクリート品質向上の取組みと品質評価                 | 2014  |                   |      |      |           |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     |         |    | トンネル覆工コンクリートに目標評価法を適用し、覆工コンクリートの適切な養生と合わせて、施工面からのコンクリート品質向上の取組みをまとめたもの。目標評価で品質向上が良くなった部位や追加的な養生を行った部位では、高い吸水抵抗を示し品質向上していることが定量的に示された。 |
| 23  | 新製テレスコピックセンター工法を用いて60時間型枠を存置する効果について  | 2014  | 新東名高速道路<br>穩定トンネル |      |      |           |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     |         |    | 新製テレスコピックセンター工法を採用したトンネルにおいて、解析的な検討を実施。自重の支持効果、保温効果、保湿効果の検討結果を報告。   |
| 24  | 覆工コンクリートのひびわれ抑制による長期健全性向上に向けた実験的検証    | 2015  |                   |      |      |           |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     |         |    | ひびわれ発生の原因となる養生遺漏や施工方法について室内試験と数値解析で検証を実施。その結果、7日間湿潤状態に保つ養生を行うはコンクリート表面の緻密化等の品質を確保できる。締め目エネルギーが過剰となってもコンクリートの品質には大きな影響がなかったことなどがわかった。  |
| 25  | 型枠存置期間の長期化による覆工コンクリート品質向上効果の解析的検討     | 2015  |                   |      |      |           |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     |         |    | 型枠存置期間の長短が初期ひびわれ発生にどの程度影響するかを温度応力解析で評価。   |
| 26  | 山居トンネルにおける覆工構造と地震時挙動の関係に関する一考察        | 2010  | なし                |      |      |           |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     |         |    | 平面空洞やインハートの有無、覆工厚といった覆工構造の差違が、地震時の覆工変動に及ぼす影響についても静的な二次元FEM解析にて検討した報告  |
| 27  | 凍害に進行する態ぶくれ現象の調査とトンネルの安定性評価に関する一考察    | 2010  | 長野自動車道<br>一本松トンネル |      |      |           |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     |         |    | 継続的な凍害が継続するトンネルに対して、変状メカニズムの推定、トンネルの安定性の評価及び評価方法の確立、今後の管理上の留意点を目的とし、調査・解析した報告   |
| 28  | 寒冷地トンネルにおける維持管理のためのトンネル点検記録のデータベース    | 2010  | 北海道内のトンネル         |      |      |           |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     |         |    |   |
| 29  | トンネルの表状評価、原因推定へのひび割れ指数(TCI)の適用可能性について | 2010  | A-1トンネル           |      |      |           |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     |         |    | 表状原因が明らかでないトンネルのデータを基に、表状原因とTCIの数値の分布状況を比較し、表状原因推定の信頼性の可能性を検討した報告   |
| 30  | 寒冷地トンネルにおける新たな調査手法に関する検討              | 2010  | 国道201号<br>新中家トンネル |      |      |           |            |     |    |          |            |      |     |    |      |            |     |         |    | ひび割れに関しては、施工時の沈下や乾燥収縮などの施工要因によるものか、外力によるものかの判断が難しい、表状原因究明のための新たな調査方法を適用した報告   |

表 2.3.7 文献調査結果(4)

| No. | 文献タイトル                              | 文献発行年 | トンネル名      | 施工方法 |      | 覆工の詳細原因  |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    | 文献内容の概要   |     |     |
|-----|-------------------------------------|-------|------------|------|------|----------|-------------|-----|----|------|-------------|-----|----|------|-------------|-----|----|---|-----|-----|
|     |                                     |       |            | 矢張工法 | NATM | 乾燥収縮     |             |     |    | 材料   |             |     |    | 施工   |             |     |    |   | その他 |     |
|     |                                     |       |            |      |      | 前面<br>拘束 | インハート<br>拘束 | その他 | 不明 | 温度低下 | インハート<br>拘束 | その他 | 不明 | 温度応力 | インハート<br>拘束 | その他 | 不明 |   |     | その他 |
|     |                                     |       |            |      |      |          |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    |   |     |     |
| 31  | トンネルの供用開始後に生じた変状と経緯変化に関する考察         | 2011  | 20事例       |      |      | 1        |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    | トンネルの完成後または供用開始後に発生した変状について、20事例を収集し、その特徴を整理した報告  |     |     |
| 32  | 覆工コンクリートのひび割れゼロを目指す                 | 2010  | 浦之追トンネル北   |      |      | 1        |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    | 前田覆工マルチシステム(①高品質トンネル覆工工法)②高品質トンネル覆工工法③高品質トンネル覆工工法④高品質トンネル覆工工法⑤高品質トンネル覆工工法⑥高品質トンネル覆工工法⑦高品質トンネル覆工工法⑧高品質トンネル覆工工法⑨高品質トンネル覆工工法⑩高品質トンネル覆工工法⑪高品質トンネル覆工工法⑫高品質トンネル覆工工法⑬高品質トンネル覆工工法⑭高品質トンネル覆工工法⑮高品質トンネル覆工工法⑯高品質トンネル覆工工法⑰高品質トンネル覆工工法⑱高品質トンネル覆工工法⑲高品質トンネル覆工工法⑳高品質トンネル覆工工法㉑高品質トンネル覆工工法㉒高品質トンネル覆工工法㉓高品質トンネル覆工工法㉔高品質トンネル覆工工法㉕高品質トンネル覆工工法㉖高品質トンネル覆工工法㉗高品質トンネル覆工工法㉘高品質トンネル覆工工法㉙高品質トンネル覆工工法㉚高品質トンネル覆工工法㉛高品質トンネル覆工工法㉜高品質トンネル覆工工法㉝高品質トンネル覆工工法㉞高品質トンネル覆工工法㉟高品質トンネル覆工工法㊱高品質トンネル覆工工法㊲高品質トンネル覆工工法㊳高品質トンネル覆工工法㊴高品質トンネル覆工工法㊵高品質トンネル覆工工法㊶高品質トンネル覆工工法㊷高品質トンネル覆工工法㊸高品質トンネル覆工工法㊹高品質トンネル覆工工法㊺高品質トンネル覆工工法 |     |     |
| 33  | 山岳トンネル覆工コンクリートのひび割れ防止対策             | 2010  | 大坂谷トンネル    |      |      | 1        |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    | インハート拘束に起因するひび割れの発生抑制を目的として、側壁部(H=3m)に膨張コンクリートを用い、天端部には充填管理システム(充填センサー、圧力計)と引抜きハイフレードを用いた効果検証の報告  |     |     |
| 34  | 表面平滑型シート防水の適用とその効果について              | 2012  | 梅川トンネル     |      |      | 1        |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    | ハイイータス(FILM)工法と標準工法における覆工コンクリートのひびきみ測定を行い、ハイイータス工法による側面拘束低減効果検証の報告  |     |     |
| 35  | 新型テレスコピックセントラル「TAF工法」による覆工コンクリートの施工 | 2014  | 岩谷トンネル     |      |      | 1        |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    | ツインアーチフォーム(TAF)工法の効果検証の報告   |     |     |
| 36  | 寒帯地における山岳トンネルの施工                    | 2014  | 佐田トンネル     |      |      | 1        |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    | 春秋コンクリート工法(夏期はセントラルを冷却、冬期は加温)の効果検証の報告   |     |     |
| 37  | トンネル安全問題検討会                         | 2000  | 福岡トンネル     |      |      | 1        |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    |   |     |     |
| 38  | トンネル安全問題検討会                         | 2000  | 北九州トンネル    |      |      | 1        |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    |   |     |     |
| 39  | トンネル安全問題検討会                         | 2000  | 礼文浜トンネル    |      |      | 1        |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    |   |     |     |
| 40  | トンネル安全問題検討会                         | 2000  | 覆工変状概要版    |      |      |          |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    |   |     |     |
| 41  | 道路構造点検要領(案)                         | 2001  | 覆工変状概要版    |      |      |          |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    |   |     |     |
| 42  | 事例に劣るトンネルの保守                        | 2001  | 資料-1の文庫編   |      |      |          |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    |   |     |     |
| 43  | 道路トンネル定期点検要領(案)                     | 2002  | 点検要領本文編    |      |      |          |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    |   |     |     |
| 44  | 道路トンネル定期点検要領(案)                     | 2002  | 変状の種類と写真   |      |      |          |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    |   |     |     |
| 45  | 道路トンネル定期点検要領(案)                     | 2002  | 変状の発生し易い箇所 |      |      |          |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    |   |     |     |
| 46  | 道路トンネル定期点検要領(案)                     | 2002  | 変状の種類とまとめ  |      |      |          |             |     |    |      |             |     |    |      |             |     |    |   |     |     |



表 2.3.9 文献調査結果(6)

| No. | 文献タイトル                       | 文献発行年 | トンネル名   | 施工方法  |      | 覆工の崩壊原因  |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              |     | 文献内容の概要                                       |   |   |   |   |   |    |    |
|-----|------------------------------|-------|---------|-------|------|----------|-----------|--------------|-----------|----------|--------------|-----------|-----------|------|-----|--------------|-----|---|---|---|---|---|---|----|----|
|     |                              |       |         | 矢張り工法 | NATM | 材料       |           |              |           |          |              | 施工        |           |      |     |              |     |   |   |   |   |   |   |    |    |
|     |                              |       |         |       |      | 乾燥収縮     |           | 温度低下         |           | 温度応力     |              | コンクリートの圧力 |           | 初期型型 |     | その他          |     |   |   |   |   |   |   |    |    |
|     |                              |       |         |       |      | 亀裂<br>崩壊 | その他<br>不明 | コンクリート<br>均質 | その他<br>不明 | 亀裂<br>崩壊 | コンクリート<br>均質 | その他<br>不明 | コンクリートの圧力 | 初期型型 | その他 | コンクリート<br>低下 | その他 |   |   |   |   |   |   |    |    |
| 66  | 土木学会<br>山岳トンネル覆工の現状と対策       | 2002  | C3トンネル  |       | 1    |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              |     | 養生初期の急激な乾燥、不規則な微小ひび割れの発生。                     |   |   |   |   |   |    |    |
| 67  | 土木学会<br>山岳トンネル覆工の現状と対策       | 2002  | C4トンネル  | 1     |      |          |           |              |           |          |              |           |           | 1    |     |              |     | 型枠の早期脱型、型枠沈下。                                 |   |   |   |   |   |    |    |
| 68  | 土木学会<br>山岳トンネル覆工の現状と対策       | 2002  | C5トンネル  | 1     |      |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              | 1   | 不平等沈下、側壁コンクリート打ち継目に伸びた上半コンクリートのせん断ひび割れ、逆巻き工法。 |   |   |   |   |   |    |    |
| 69  | 土木学会<br>山岳トンネル覆工の現状と対策       | 2002  | C6トンネル  | 1     |      |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              | 1   | 養生不足、不均質な打ち込み、材料分離、コンクリートが欠落し、背面地山が露出。        |   |   |   |   |   |    |    |
| 70  | 土木学会<br>山岳トンネル覆工の現状と対策       | 2002  | C7トンネル  | 1     |      |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              |     | 養生不足、背面空洞。                                    |   |   |   |   |   |    |    |
| 71  | 土木学会<br>山岳トンネル覆工の現状と対策       | 2002  | C8トンネル  | 1     |      |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              |     | 打ち継目不良、打ち継目コンクリートの欠落。                         |   |   |   |   |   |    |    |
| 72  | 土木学会<br>山岳トンネル覆工の現状と対策       | 2002  | C9トンネル  | 1     |      |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              |     | 打ち継目不良。                                       |   |   |   |   |   |    |    |
| 73  | 土木学会<br>山岳トンネル覆工の現状と対策       | 2002  | C10トンネル |       | 1    |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              |     | 打ち継目不良、打ち継目部の空洞とジャンカ。                         |   |   |   |   |   |    |    |
| 74  | 土木学会<br>山岳トンネル覆工の現状と対策       | 2002  | C11トンネル | 1     |      |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              | 1   | 打ち込み中、木製支柱式保工の場合は水平方向のコールドジョイントが発生する。         |   |   |   |   |   |    |    |
| 75  | 土木学会<br>山岳トンネル覆工の現状と対策       | 2002  | C12トンネル | 1     |      |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              | 1   | 打ち込み中、引き抜き管方式のコンクリート打ち込みで生じるコールドジョイント。        |   |   |   |   |   |    |    |
| 76  | 土木学会<br>山岳トンネル覆工の現状と対策       | 2002  | C13トンネル | 1     |      |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              | 1   | ゆるみ荷重、打ち込み中、コールドジョイントとゆるみ荷重との複合ひび割れ。          |   |   |   |   |   |    |    |
| 77  | 土木学会<br>トンネルの変状メカニズム         | 2003  |         |       |      |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              |     |   |   |   |   |   |   |    |    |
| 78  | 山梨県<br>環境技術者のためのトンネル維持管理の実際  | 2004  | 新幹線断面   |       |      |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              |     |   |   |   |   |   |   |    |    |
| 79  | 日本道路協会<br>道路トンネル維持管理便覧【本体工編】 | 2015  |         |       |      |          |           |              |           |          |              |           |           |      |     |              |     |   |   |   |   |   |   |    |    |
| 計   |                              |       |         | 21    | 26   | 6        | 6         | 4            | 11        | 2        | 2            | 3         | 2         | 4    | 7   | 6            | 7   | 8   | 6 | 2 | 6 | 5 | 2 | 18 | 10 |



表 2.3.4～表 2.3.9 に示す調査結果について、下記の方針で分析する。

「矢板工法」、「NATM」に分けて、それぞれに発生した損傷の原因について整理する。

既往の文献は、「変状発生事例」と「品質向上の取組事例」が混在しているが、「変状発生事例」についてのみ整理をする。

矢板工法に関する分析結果を図 2.3.1～図 2.3.3 に示す。また、NATM に関する分析結果を図 2.3.4～図 2.3.8 に示す。

表 2.3.10 文献調査の分析結果

| 図番号     | 施工方法 | 内容   |
|---------|------|--|
| 図 2.3.1 | 矢板工法 | 変状発生事例について、損傷原因を分析。  |
| 図 2.3.2 |      | 材料が損傷原因となっている事例について、内訳(乾燥収縮、温度収縮、その他)を分析。                                |
| 図 2.3.3 |      | 施工が損傷原因となっている事例について、内訳(コールドジョイント、セントルセット時の圧力、締め固め不足、早期脱型、セントル沈下、その他)を分析。 |
| 図 2.3.4 | NATM | 変状発生事例について、損傷原因を分析。  |
| 図 2.3.5 |      | 材料が損傷原因となっている事例について、内訳(乾燥収縮、温度収縮、その他)を分析。                                |
| 図 2.3.6 |      | 乾燥収縮が要因となっている事例について、変状の原因となった拘束(背面拘束、インバート拘束、その他、不明)を分析。                 |
| 図 2.3.7 |      | 温度収縮が要因となっている事例について、変状の原因となった拘束(背面拘束、インバート拘束、その他、不明)を分析。                 |
| 図 2.3.8 |      | 施工が損傷原因となっている事例について、内訳(コールドジョイント、セントルセット時の圧力、締め固め不足、早期脱型、セントル沈下、その他)を分析。 |

### 2.3.1 矢板工法に関する分析

#### (1) 覆工の損傷原因

変状発生事例について、損傷原因(材料、施工、その他)を分析した。

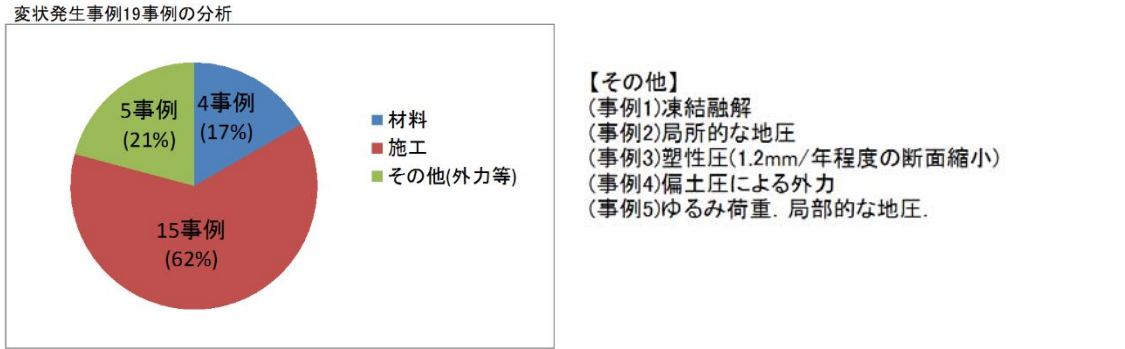


図 2.3.1 変状発生事例の損傷原因(矢板工法)

#### (2) 材料要因の内訳

材料要因について、内訳(乾燥収縮、温度収縮、その他)を分析した。

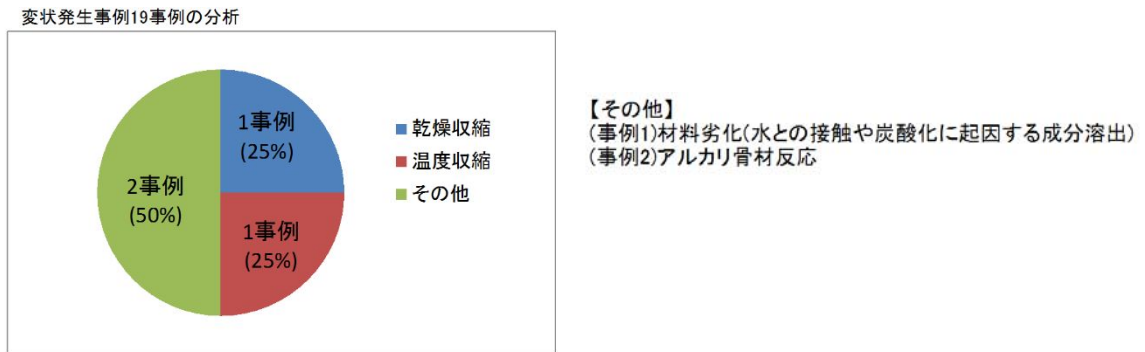


図 2.3.2 材料要因の内訳(矢板工法)

#### (3) 施工要因の内訳

施工要因について、内訳(コールドジョイント、セトルセット時の圧力、締め固め不足、早期脱型、セトル沈下、その他)を分析した。

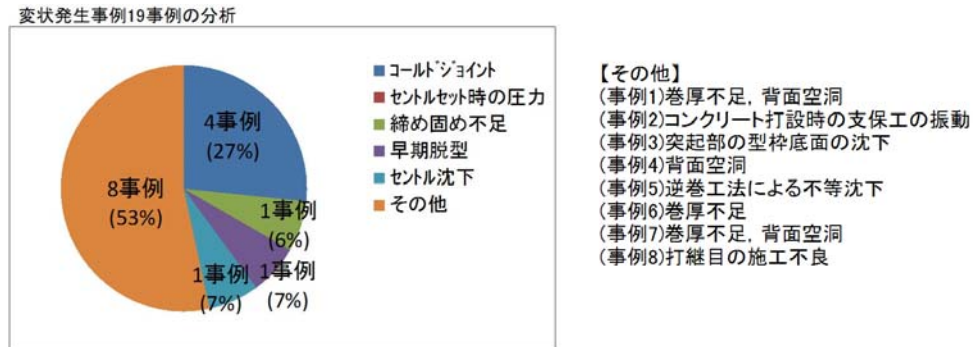


図 2.3.3 施工要因の内訳(矢板工法)

### 2.3.2 矢板工法の分析結果

図 2.3.1 では、変状事例の約 60%が施工不良に起因し、材料、外力に起因するものは、それぞれ約 20%である。矢板工法が主流であった時代は、現在の施工法とは大きく異なり、狭い型枠の中に硬練りのコンクリートを空気圧送や引抜配管などで押し込んで詰めるような施工であった。そのため、コールドジョイント等の施工不良に起因する変状が発生しやすかったものと推察される。

一方、材料に起因する事例の報告が少ないのは、当時用いていたコンクリートの材料が良質であったことが要因の 1 つであると考えられる。特に、骨材は川砂利や川砂が主流であり、現在の材料に比べると水セメント比が低くても良好なワーカビリティが確保されていたので、材料に起因する変状は少ないものと推察される。その他、スランプ、単位水量の規定値の変遷なども関連しているように思われる。

材料による変状は、図 2.3.2 にある 4 事例と少ないため十分な分析を加えることは難しい。4 事例のうち 1 件が乾燥収縮である。その変状の原因が背面拘束によるものか、インバート拘束によるものかは不明である。その他、1 事例が温度収縮と記載されているが、この事例についても拘束条件についての詳細は不明である。残り 2 事例は、材料劣化(水との接触や炭酸化に起因する成分溶出)、アルカリ骨材反応である。

図 2.3.3 にある施工不良に起因するものは、大別すると、下記のとおりとなる。

- ① コールドジョイントや打継ぎ処理に起因するもの
- ② 型枠の不具合や早期脱枠に起因するもの
- ③ 巻厚不足や背面空洞に起因するもの

①の場合は、一般的に、打ち重ね部のスパン方向や構造変化点／目地部に分布するジャンカや欠けになりやすい。②の場合は、部分的な沈下ひび割れや天端の縦断方向のクラックになりやすい。③の場合も、天端や肩上部の縦断方向クラックになりやすい傾向がある。

### 2.3.3 NATMに関する分析

#### (1) 覆工の損傷原因

変状発生事例について、損傷原因(材料、施工、その他)を分析した。

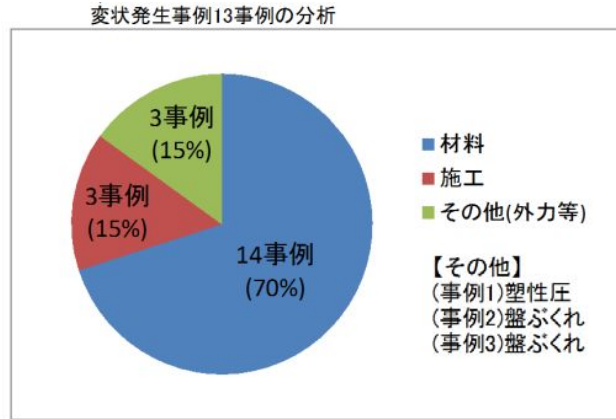


図 2.3.4 変状発生事例の損傷原因(NATM)

#### (2) 材料要因の内訳

材料要因について、内訳(乾燥収縮、温度収縮、その他)を分析した。

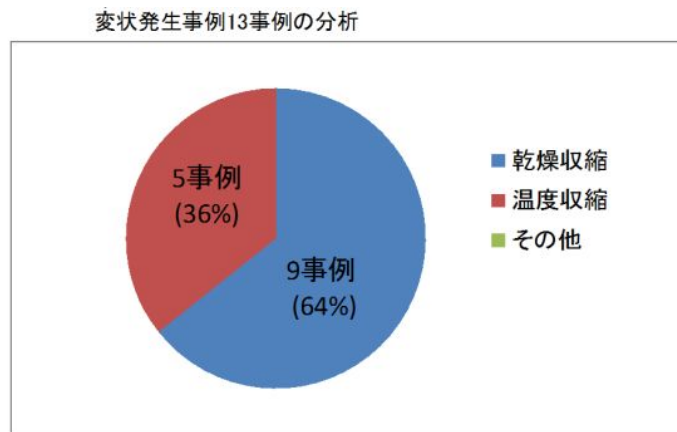


図 2.3.5 材料要因の内訳(NATM)

乾燥収縮について、変状の原因となった拘束(背面拘束、インバート拘束、その他、不明)を分析した。

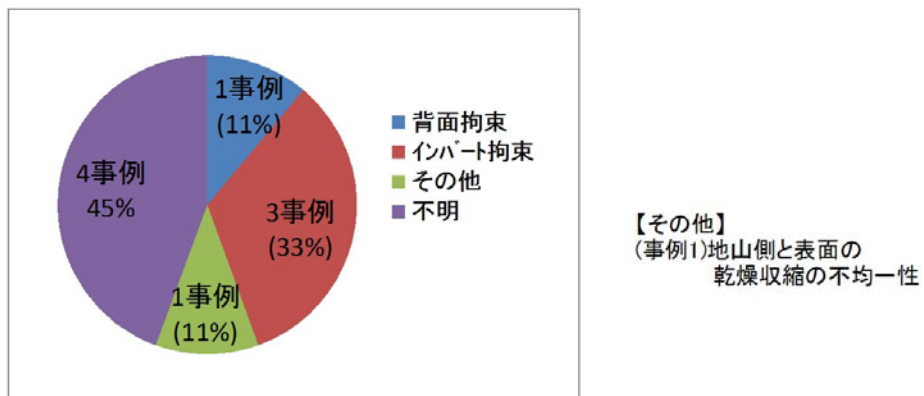


図 2.3.6 乾燥収縮時の拘束の内訳(NATM)

温度収縮について、変状の原因となった拘束（背面拘束、インバート拘束、その他、不明）を分析した。

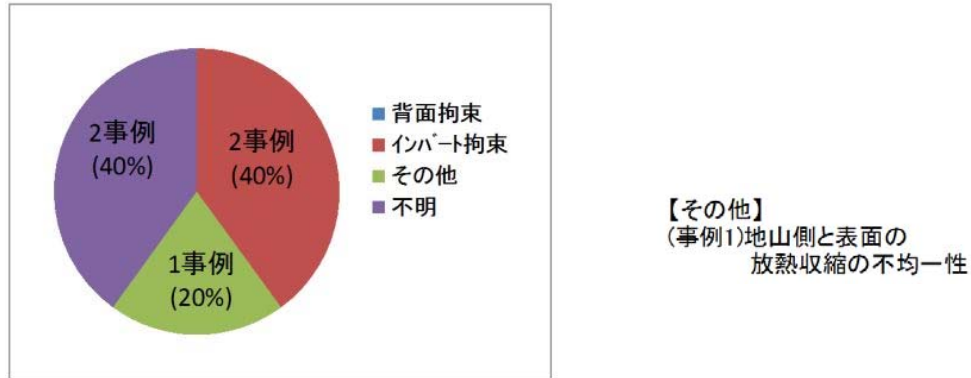


図 2.3.7 温度収縮時の拘束の内訳(NATM)

### (3) 施工要因の内訳

施工が損傷原因となっている事例について、内訳(コールドジョイント、セントルセット時の圧力、締め固め不足、早期脱型、セントル沈下、その他)を分析した。

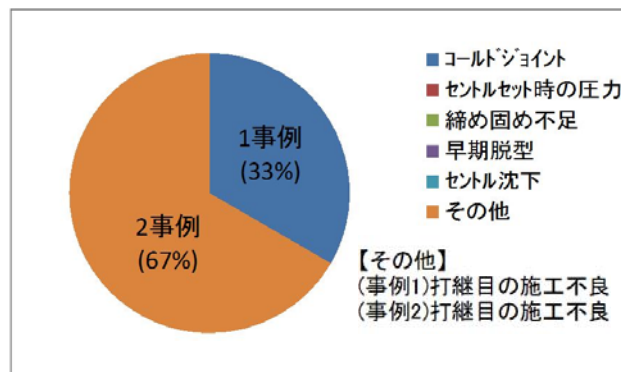


図 2.3.8 施工要因の内訳(NATM)

### 2.3.4 NATMの分析結果

今回の文献調査においては、NATMの変状事例は矢板工法に比べると少ない。1999年に連続して発生した鉄道トンネルのコンクリートはく落事故以降、覆工の品質に関する意識が高まったことが要因として考えられる。また、2007年に総合評価方式による入札が本格的に導入されたことが、覆工コンクリート技術開発や予防措置に力を入れるようになってきた大きな要因と考える。

NATMの変状事例の約70%が材料に起因し、施工と外力はそれぞれ15%である。これは、換気量の増加による坑内湿度の低下や骨材の悪化によるセメント等の粉体量の増大に伴い、コンクリートの絶対的な収縮量が大きくなっていることが要因として考えられる。高炉セメントの使用例が増えていることも一因となっている可能性が考えられる。

材料に起因する事例のうち 65%が乾燥収縮、35%が温度収縮である。変状要因となった拘束条件は記載されていないものが多いが、把握できているもので比較すると、乾燥収縮はインバート拘束によるものが 60%である。温度収縮については、インバート拘束によるものが 70%であり、乾燥収縮、温度収縮のどちらについても、インバート拘束によるものが多い。この場合には、一般的に、インバート境界部から肩下部にかけて、断面横断方向にクラックが入る場合が多い。

施工に起因するものは 3 件と少ないが、これらはすべてコールドジョイントや打継ぎ処理に起因するものである。

## 2.4 建設工法ごとの材料、施工に起因するひび割れ原因の抽出

### 2.4.1 矢板工法の代表的なひび割れ原因

矢板工法の覆工コンクリート施工についての整理および既往の文献調査により、ひび割れが発生する可能性がある施工内容について抽出する。

覆工コンクリートの施工については、狭い型枠の中に硬練りのコンクリートを空気圧送や引抜配管などで押し込んで詰めるような施工であったことから、コールドジョイント等の施工不良に起因する変状が発生しやすかったものと推察され、一般的に打ち重ね部のスパン方向や構造変化点/目地部に分布するジャンカや欠けになりやすく、ひび割れが発生する可能性が高い。また、型枠の不具合や早期脱枠に起因するひび割れについては、部分的な沈下ひび割れや天端の縦断方向のひび割れになりやすい。

矢板工法においては、その打設方法から巻厚不足や背面空洞が発生しており、この変状に起因するひび割れについては、天端や肩上部の縦断方向ひび割れになりやすい傾向がある。

材料による変状は、乾燥収縮、温度収縮によるひび割れが考えられるが、併せて背面拘束やインバート拘束による影響が含まれており、ひび割れを限定することが困難である。その他として、材料劣化(水との接触や炭酸化に起因する成分溶出)、アルカリ骨材反応によるひび割れも特殊ではあるが事例としてある。

### 2.4.2 NATMの代表的なひび割れ原因

NATM の覆工コンクリート施工についての整理および既往の文献調査により、ひび割れが発生する可能性がある施工内容について抽出する。

覆工コンクリートの施工については、側壁部は全断面型枠（セントル）の左右に設けられた打込み窓から左右均等に肩部まで打ち上げ、アーチクラウン部は配管を切替えて、吹上げ口より吹き上げて打込む方法としている。したがって、矢板工法にあるような巻厚不足や背面空洞が発生しにくく、施工に起因して発生する変状としては、コールドジョイントや打継ぎ処理による変状がある。変状箇所としては、打ち重ね部のスパン方向や構造変化点/目地部に発生し、変状と併せてひび割れが発生する可能性が高い。

材料による変状は、乾燥収縮、温度収縮によるひび割れがあり、複合的にインバート拘束によって発生するひび割れが発生する。インバート拘束によるひび割れについては、一般的に、イン

バート境界部から肩下部にかけて、断面横断方向にひび割れが入る場合が多いので、原因を特定しやすい。

## 2.5 本章のまとめ

矢板工法、NATM といった建設工法ごとで覆工コンクリートの施工方法が異なり、施工や材料に起因してひび割れが発生することが、建設工法ごとの覆工コンクリートの施工方法の整理および既往の文献調査で確認した。トンネル覆工のひび割れの原因としては、外力の作用等の外因と使用材料や施工等の内因に大別できる。一般には、外因、内因それぞれの変状原因が複合的に作用してひび割れが発生することから、ひび割れの状況から単純に変状原因を推定することは困難である。建設工法ごとの覆工コンクリートの施工においては、上述で整理した施工の不具合や覆工コンクリートの構造的な特徴により、ひび割れが発生することが従来より認識されており、種々の要領等によって記載がある。そのため、変状原因推定にあたっては、覆工コンクリートに発生したひび割れに対して、要領等から変状原因を消去法により推定していると思料される。

コンクリート片のはく落を引起すひび割れや外力による変状に起因するひび割れについて、研究<sup>10)</sup>が行われている。しかしながら、建設工法ごとに共通したひび割れに着目した研究は少なく、ひび割れ発生原因についてはコンクリートの水和熱や乾燥による収縮が影響している可能性があると思料されている。また、高山<sup>11)</sup>は、覆工コンクリート打設初期に生じるひび割れ発生メカニズムに着目した研究を行っている。この研究報告では、初期ひび割れ発生を抑制するために坑内温度、坑内湿度を指標とした蒸気圧の概念を用いた評価手法を提案している。

さらに、覆工コンクリートのひび割れ発生への影響が考えられる養生は、その効果について主に耐久性の観点から調査研究が行われており、代表的な事例としては郭ら<sup>12)</sup>が報告しているように中性化速度等の鉄筋腐食因子の浸透抑制に着目した研究が多い。

覆工の大部分は、無筋コンクリート構造物であるため、鉄筋腐食に関連する中性化速度や透水係数等で長期耐久性を評価することは、困難である。また、覆工の維持管理では、ひび割れ発生、進展によるコンクリート片の剥落防止が第三者事故防止という観点から重要な課題であるが、養生、施工条件および坑内環境までを考慮したひび割れの発生、進展を検討した事例が少ない。そのため、覆工コンクリートの長期間におけるひび割れ発生、進展の把握には、養生環境、施工条件およびトンネル坑内の環境条件を考慮した覆工コンクリートの長期間の経時変化を追跡する解析手法が求められる。

## 【参考文献】

- 1) 西日本高速道路（株）：保全点検要領（構造物偏） 補足資料（案）【技術資料】 付属資料 9 トンネル点検の手引き（技術資料） ----- 付 9-1
- 2) （社）土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説、p. 220、1996. 7.
- 3) （社）土木学会：トンネルライブラリー-12 山岳トンネル覆工の現状と対策、p. 69、2002. 9
- 4) （社）土木学会：トンネルライブラリー-102 トンネルコンクリート施工指針(案)、2007. 7
- 5) 谷雅史：覆工裏込注入施工によるトンネル状態の分析、鉄道施設技術発表会論文、pp. 37-40、2017
- 6) 日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル(1)トンネル本体工、pp. 28、1970. 1
- 7) 坂井吾郎、安齋勝、近藤啓二、菅俣匠：特殊な混和剤を用いたトンネル覆工用中流動コンクリートの開発、セメント・コンクリート、No. 787、2012. 9
- 8) 川又篤、松岡茂、窪田賢司：山岳トンネル覆工コンクリートのひび割れ発生パターン、土木学会年次学術講演会概要集、III-086、pp. 171-172、2012. 9
- 9) 馬場弘二、伊藤哲男、城間博通、宮野一也、中島浩、谷口裕史：施工中のトンネル坑内環境と覆工コンクリートの湿度変化に関する研究、土木学会論文集 No. 742/VI-60、pp. 27-35、2003. 9
- 10) たとえば、中野清人、佐伯徹、重田佳幸、大場論、西村和夫：トンネルの変状評価・原因推定へのひび割れ指数 (TCI) の適用可能性について、トンネル工学報告集、20 卷、 pp. 239-243、2010.
- 11) 高山博文：トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れ抑制に関する研究、京都大学学位論文、2009
- 12) 郭度連、宇治公隆、国府勝郎、上野敦：養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価、土木学会論文集 No. 718/V-57、pp. 59-68、2002. 11



参考資料 トンネル覆工設計仕様の変遷

| 年代   | トンネル標準示方書(土木学会)   | JH設計要領第三集トンネル  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
|--|---|--|----------------|-------------|-----------------------------|-----------------|---------|------------------|------------------|----------------|--------|----|----|------|----------|----|--|-----|
| <p>★昭和38年<br/>名神高速道路<br/>天王山Tn他供用</p>                      | <p><u>昭和39年8月制定版</u></p> <p>◎設計編<br/>[材料・配合]「コンクリート標準示方書」による。<br/>[強度]設計基準強度<math>\sigma_{28}=160\sim 200\text{kgf/cm}^2</math><br/>[設計厚さ]<br/>内空断面幅2m: 20~30cm, 5m: 30~50cm, 10m: 40~70cm<br/>[打継処理]<br/>特別な場合を除いて伸縮目的を考えなくて良いが、ホゾや鉄筋の挿し筋などによる補強を設計するのがよい。</p>           | <p><u>名神高速道路設計要領・昭和36年9月制定版</u></p> <p>JHにおける最初のトンネル設計要領制定</p>   |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★昭和43年<br/>東名高速道路<br/>溝見寺Tn他供用</p>                      | <p>◎施工編<br/>[スランプ]人力打設: 8~12cm, 機械打設: 12~15cm<br/>[逆巻き施工のアーチと側壁の継目]<br/>コンクリートの硬化収縮、クリープによって空隙が生じ易いので硬練モルタルやコンクリートで充填しなければならない。</p>   |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★昭和44年<br/>東名高速道路<br/>日本坂Tn他供用</p>                      | <p><u>昭和44年11月改訂版</u></p>   |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★昭和47年<br/>山陽新幹線<br/>新大阪~岡山開業</p>                       | <p>◎設計編<br/>同上</p>  | <p><u>設計要領第三集・昭和44年12月制定版</u></p> <p>[材料・配合]「コンクリート標準示方書」による<br/>[仕様]</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>スランプ(cm)</td> <td>設計基準強度(kg/cm<sup>2</sup>)</td> </tr> <tr> <td>コンクリートポンプを用いる場合</td> <td>10~15</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>コンクリートポンプを用いない場合</td> <td>5~10</td> <td>200</td> </tr> </table>  |                | スランプ(cm)    | 設計基準強度(kg/cm <sup>2</sup> ) | コンクリートポンプを用いる場合 | 10~15   | 200              | コンクリートポンプを用いない場合 | 5~10           | 200    |    |    |      |          |    |  |     |
|  | スランプ(cm)  | 設計基準強度(kg/cm <sup>2</sup> )  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| コンクリートポンプを用いる場合  | 10~15   | 200  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| コンクリートポンプを用いない場合   | 5~10  | 200  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★昭和50年<br/>山陽新幹線<br/>岡山~博多開業<br/>中央自動車道<br/>恵那山Tn供用</p> | <p>◎施工編<br/>[スランプ]基準値削除→空隙に行きわたるようなワーカビリチー<br/>[コンクリート打設]<br/>一区間のコンクリートは連続して打込まなければならない。</p>   |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★昭和52年<br/>中央自動車道<br/>笹子Tn供用<br/>北陸自動車道<br/>敦賀Tn供用</p>  | <p><u>昭和52年1月改訂版</u></p> <p>◎設計編<br/>[設計厚さ]一部変更<br/>内空断面幅3m: 20~30cm, 5m: 30~50cm, 10m: 40~70cm</p>   | <p>[設計厚さ]</p> <table border="1"> <tr> <td>地質区分</td> <td>覆工の設計巻厚(cm)</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>55以下</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>55</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>55</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>70以下</td> </tr> </table>  | 地質区分           | 覆工の設計巻厚(cm) | A                           | 55以下            | B       | 55               | C                | 55             | D      | 70 | E  | 70以下 |          |    |  |     |
| 地質区分   | 覆工の設計巻厚(cm)   |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| A  | 55以下  |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| B  | 55  |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| C  | 55  |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| D  | 70  |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| E  | 70以下  |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★昭和58年<br/>JHでNATM導入</p>                                | <p>◎施工編<br/>[覆工施工法]<br/>覆工施工法は掘削工法を考慮して決めなければならない。<br/>・全断面掘削工法、側壁導坑先進上半掘削工法一本巻工法<br/>・上半先進工法、底設導坑先進上半掘削工法→逆巻工法</p>   |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★昭和59年<br/>海南海道<br/>藤白Tn供用</p>                          |   | <p><u>設計要領第三集・昭和60年9月改訂版</u></p> <p>[材料・配合]「コンクリート標準示方書」による<br/>[仕様]<br/>コンクリートポンプによる打設の場合の設計基準強度: 180kgf/cm<sup>2</sup><br/>[覆工形状]</p> <table border="1"> <tr> <td>掘削工法</td> <td>上半・全断面</td> <td>上半</td> <td>側壁導坑</td> </tr> <tr> <td>主たる支保構造</td> <td>吹付けコンクリート、ロックボルト</td> <td>鋼アーチ支保工</td> <td>鋼アーチ支保工(矢板類併用)</td> </tr> <tr> <td>覆工施工順序</td> <td>順巻</td> <td>逆巻</td> <td>順巻</td> </tr> <tr> <td>設計巻厚(cm)</td> <td>30</td> <td></td> <td>45※</td> </tr> </table> | 掘削工法           | 上半・全断面      | 上半                          | 側壁導坑            | 主たる支保構造 | 吹付けコンクリート、ロックボルト | 鋼アーチ支保工          | 鋼アーチ支保工(矢板類併用) | 覆工施工順序 | 順巻 | 逆巻 | 順巻   | 設計巻厚(cm) | 30 |  | 45※ |
| 掘削工法   | 上半・全断面  | 上半   | 側壁導坑           |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| 主たる支保構造  | 吹付けコンクリート、ロックボルト  | 鋼アーチ支保工  | 鋼アーチ支保工(矢板類併用) |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| 覆工施工順序   | 順巻  | 逆巻   | 順巻             |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| 設計巻厚(cm)   | 30  |  | 45※            |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★昭和60年<br/>関越自動車道<br/>関越Tn他供用</p>                       | <p><u>昭和61年11月改訂版</u></p> <p>◎設計編<br/>[設計厚さ]<br/>通常、内空断面の大きさに応じて20~40cmの設計巻厚を用いているのが一般的である。<br/>[強度]設計基準強度<math>\sigma_{28}=160\sim 210\text{kgf/cm}^2</math><br/>[覆工コンクリートのひび割れ対策]<br/>覆工に有害なひび割れの発生するおそれがある場合には、ひび割れ対策を講じなければならない。</p>                                  |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★昭和63年<br/>JR海峡線<br/>青函Tn開業</p>                         | <p>◎施工編<br/>[型枠一般]<br/>一打設長を長くすると、温度・乾燥収縮でクラックが生じ易いので、一般的には9~12mの長さのものが使用されている。<br/>[覆工コンクリートの現場配合]<br/>一般的にはスランプ12~18cm程度で、<math>\sigma=160\sim 210\text{kgf/cm}^2</math>程度のものとなっている。<br/>[覆工コンクリートの打込み]<br/>コンクリートの打上り速度は、速すぎないように注意し、かつ一区面のコンクリートは連続して打込まなければならない。</p> | <p>解説)<br/><u>矢板を併用する鋼アーチ支保工を主たる支保構造物として用いる場合には、一般に、鋼アーチ支保工は覆工を設置するまでの仮設材と考えられており、この場合は覆工はトンネルの安定性を確保するのに必要な耐荷力を有した構造でなければならない。</u><br/>一方、吹付けコンクリートおよびロックボルト等を支保構造物として用いる場合には、これらの支保構造物のみでトンネルを安定させることが原則であるが、吹付けコンクリートおよびロックボルト等の永久構造物としての信頼性が未だ確認されていないこと等から、一般に、トンネル構造物としての最終的な安全を、保証するものとして覆工が設けられる。</p>  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★平成5年<br/>東北自動車道<br/>満田第二Tn<br/>避難橋TBM発進</p>            | <p><u>平成8年5月改訂版</u></p> <p>◎設計編<br/>[覆工コンクリートの配合]<br/>設計基準強度として18~24N/mm<sup>2</sup>程度とすることが多い。</p>   | <p><u>設計要領第三集・平成9年10月改訂版</u></p>   |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★平成6年<br/>東京湾アクアライン<br/>シールドマシン発進</p>                   | <p>◎施工編<br/>[型枠一般]<br/>一打設長を長くすると、温度・乾燥収縮でクラックが生じ易いので、一般的には9~12mの長さのものが使用されている。しかし、長大トンネルにおいて、工程短縮を図るため、長いもの(15~18cm)が使用されることもある。この場合は、クラック防止のため型枠中央部に誘発目的を設けることが望ましい。<br/>[覆工コンクリートの現場配合] スランプ、設計基準強度の値削除</p>  |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★平成8年<br/>第二東名高速道路<br/>清水第三Tn<br/>先導導坑TBM発進</p>         | <p><u>平成18年7月改訂版</u></p> <p>◎施工編<br/>[覆工コンクリートの施工]<br/>品質確保に向け内容の充実を図った。</p>  | <p><u>トンネル施工管理要領・平成20年8月改訂版</u><br/>中流動覆工コンクリート(石炭灰、石粉)開発に伴う施工管理手法の確立</p>  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★平成9年<br/>東京湾アクアライン供用</p>                               |   | <p><u>設計要領第三集・平成25年7月改訂版</u><br/>中流動覆工コンクリート(石炭灰、石粉、高性能AE減水剤(増粘剤系一液タイプ))を標準化<br/>設計基準強度: 24N/mm<sup>2</sup></p>  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |
| <p>★平成10年<br/>北陸自動車道<br/>山王Tn<br/>TWS施工完了</p>              |   |  |                |             |                             |                 |         |                  |                  |                |        |    |    |      |          |    |  |     |

## 第3章 既設トンネル覆工のひび割れ発生形態の整理

### 3.1 本章の目的

トンネル覆工のひび割れの原因としては、外力の作用等による外因と使用材料や施工等による内因に大別できる。一般には、外因、内因それぞれの変状原因が複合的に作用してひび割れが発生することから、トンネル覆工のひび割れ形態は多種多様である。したがって、ひび割れの状況から単純に変状原因を推定することは困難である。そのため、すべてのトンネル覆工に対して近接目視かつ打音点検によりひび割れ等の変状を確認し、はく落事象につながるひび割れ等に対して対策を講じる事後保全としての維持管理となっている。

建設においても、覆工コンクリートにひび割れが発生した場合、原因等関係なく補修を実施しているのが実態である。

覆工コンクリートは、軸圧縮部材でありアーチアクションによって、供用後にトンネル覆工に作用する荷重に対して、トンネル構造を保持するものである。そのため建設において、ひび割れが発生したとしても、それがコンクリート片のはく落事象につながるひび割れでなければ特段の補修の必要性はないと考える。

トンネル覆工の維持管理においては、コンクリート片のはく落への対応が特に重要であり、最適な維持管理を実施するうえでは、はく落事象につながるひび割れ等のリスクマネジメントが必要である。

そのため、コンクリート片のはく落リスクの最小化のためには、トンネル覆工に発生するひび割れの分析、評価によって、はく落につながるひび割れの抽出が必要である。

しかしながら、詳細点検で使用している覆工コンクリートのひび割れ評価指標の TCI は、トンネル覆工のひび割れ全体をテンソルの不変量でしか評価しておらず、既往の点検記録を詳細に分析、評価することが困難である。既往の点検記録において、ひび割れ形態の特徴を整理するには、ひび割れへの定量的な評価が必要である。そこで本研究は、詳細点検に使用しているひび割れ評価指標 TCI の  $F_0$  を構成している縦断方向成分  $F_{11}$ 、横断方向成分  $F_{22}$  とせん断方向成分  $F_{12} \cdot F_{21}$  に着目した。このひび割れの方向成分を利用して本章は、建設工法別にひび割れの特徴を定量的に評価することを目的に、既往の点検記録にあるひび割れを TCI の各成分ごとに詳細に分析し検討を行うものである。

また、コンクリート収縮によるひび割れ等の標準的なひび割れは、一般的には平均を採用するが、なかには外力作用等の特殊条件下において非常に大きなひび割れとなったり、まったくひび割れが発生していないトンネル覆工が存在し、平均では標準的なひび割れを正しく評価できない。そこで本研究は、TCI の各成分における累積度数グラフを作成し TCI の各成分での累積 50% のときの値を TCI(50)値として設定することで、特殊条件下等のひび割れの影響を除外した。

本章は、ひび割れの発生原因推定を目的として、既往文献での外力作用等の大きなひび割れに対する原因推定手法と TCI(50)値を融合し、コンクリート収縮等の小さなひび割れに対しての原因推定手法について検討を行うものである。

### 3.2 既往の点検記録および調査結果の整理

#### 3.2.1 詳細点検記録によるひび割れ発生形態の把握

詳細点検記録によると、多くのトンネル覆工にひび割れが発生しており、そのひび割れ発生状況には建設工法による相違がみられる。そこで、トンネル覆工のひび割れの特性を把握するため、トンネルの詳細点検で得られたひび割れ情報から詳細点検で採用している TCI を用いて分析し、ひび割れ発生形態の把握を行う。TCI は、覆工

表面のひび割れの幅、長さ、方向をパラメータとした指標であることから、覆工コンクリートの劣化状況やひび割れの特徴が把握でき

る。そのため、コンクリート片のはく落を引起すひび割れや外力による変状に起因するひび割れについて、研究<sup>1)</sup>が行われている。しかしながら、建設工法ごとに共通したひび割れに着目した研究は少ない。本研究では、NEXCO が管理する高速道路トンネルのうち、表 3.2.1 にあるトンネルを対象に、幅 0.5mm 以上のひび割れを対象に TCI を算定した。

NATM (NEXCO は、昭和 58 年から標準化) で施工されたトンネルのデータが極端に多いことから、建設工法ごとに覆工スパン単位で算定した TCI の F<sub>11</sub> 等の各成分を最小値から並び替え、 $0.5 \times 10^{-5}$  毎の TCI 値の度数を算定し、その度数を累積した曲線を作成した結果を図 3.2.1 に示す。なお、図 3.2.1 の縦軸は、各工法の結果を比較するためにデータ総数で無次

表 3.2.1 トンネル内訳

|        | 矢板工法<br>(上半先進) | 矢板工法<br>(側壁導坑) | NATM   | 合計     |
|--------|----------------|----------------|--------|--------|
| トンネル本数 | 34             | 23             | 324    | 381    |
| スパン数   | 2、669          | 980            | 33、388 | 37、037 |

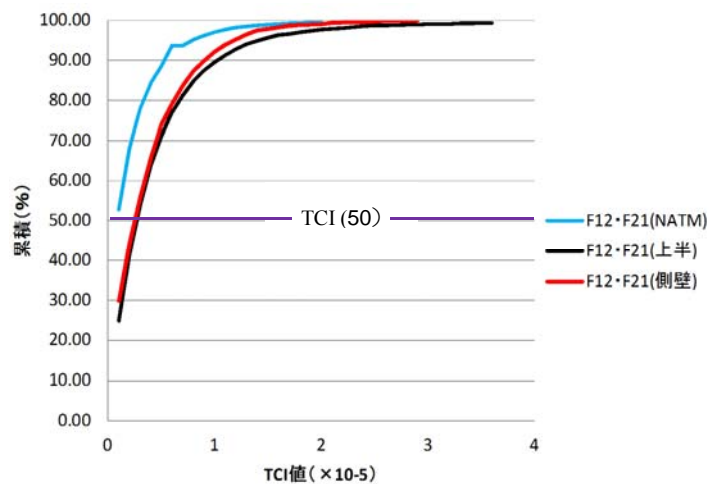
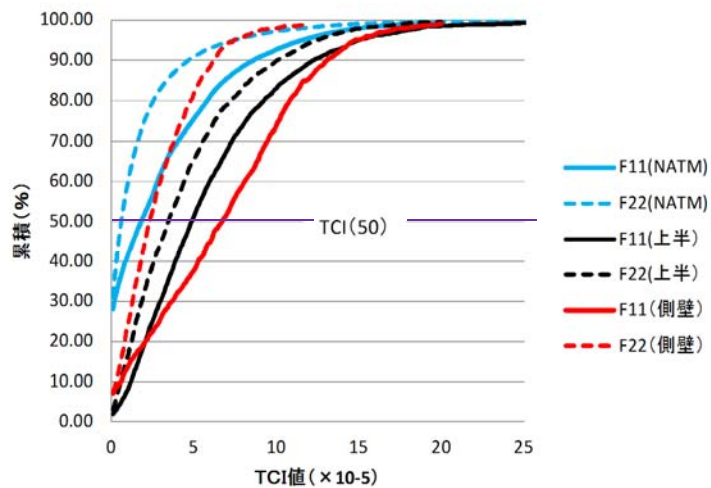


図 3.2.1 各工法の TCI 値の累積曲線

元化して、パーセント表示としている。さらに、表 3.2.2 には各 TCI 値の最大、最小値と算術平均および TCI(50)値を一覧表として示している。TCI(50)値とは、図 3.2.1 に示すように累積曲線の合計がデータ総数の 50%となった TCI 値を示している。

NATM で施工された覆工では、TCI 値が  $0.5 \times 10^{-5}$  未満、つまり、ひび割れがほとんど発生していないトンネルが全体の約 30%存在している。また、F<sub>11</sub> の算術平均が他の工法の 50%程度であり、ひび割れ発

生頻度が小さい。さらに、算術平均が TCI(50)値の約 2 倍程度になっており、かつ、F<sub>11</sub> の算術平均が他工法より小さいにも係わらず、最大値のみ大きくなっている。これは、極端に大きな TCI 値を示したトンネルが少数存在していることを示唆している。極端に大きな TCI 値を有するトンネルは、土圧の増加等の特殊条件下での特殊事例であることが想定される。本研究の主目的は、コンクリートの収縮に起因するひび割れ形態の把握であり、一般的な二車線トンネルのひび割れ発生状況の特徴は、特殊事例の影響を受け難い中央値である TCI(50)値で検討することが望ましいと思われる。また、せん断成分を示す F<sub>12</sub>、F<sub>21</sub> については、平均値が  $0.5 \times 10^{-5}$  未満と小さいことから、せん断成分が卓越するトンネルは特殊条件下にあるものと考えられ、コンクリートの収縮以外でのひび割れの発生が想定される。特に、最もトンネルスパン数が大きい NATM については、図 3.2.1 に示すように約半数に全くせん断成分のひび割れが発生していない。

全ての工法で TCI(50)値の F<sub>22</sub> の値は F<sub>11</sub> よりも小さく、縦断方向のひび割れが卓越する特徴があると判断された。トンネルのひび割れ発生状況の平均的な傾向として TCI(50)値の F<sub>11</sub> と F<sub>22</sub> との相関に着目した。その結果によると上半先進では、縦断方向に対する横断方向のひび割れ発生率は約 6 割で、側壁導坑と NATM では約 3 割となっている。上半先進の覆工は、上部の荷重を支持するためにアーチ脚部のみ部材厚が厚くなっているために、側壁導坑および NATM の覆工のひび割れ発生状況と異なっただと思われる。なお、TCI による分析結果については、外因によるひび割れも含まれているが、その頻度は全てのトンネルに共通するコンクリートの収縮ひずみ等の内因に比べて少ないと判断されることから、内因により生じるひび割れの特徴と考えてよいと思われる。また、斜め方向のひび割れを示す F<sub>12</sub>、F<sub>21</sub> の値は前述したように非常に小さく、覆工のひび割れは縦断、横断方向が卓越していると判断できる。

現在、詳細点検で使用している覆工コンクリートのひび割れ評価指標の TCI は、トンネル覆工のひび割れ全体をテンソルの不変量でしか評価していなかったことから、既往の点検記録を詳細に分析、評価することが困難である。また、コンクリート収縮によるひび割れ等の標準的な

表 3.2.2 各 TCI 値の最大、最小値、算術平均および

|          |                 | TCI(50) 値 |     |      | 単位 : $\times 10^{-5}$ |
|----------|-----------------|-----------|-----|------|-----------------------|
|          |                 | 最大値       | 最小値 | 算術平均 | TCI(50)値              |
| NATM     | F <sub>11</sub> | 77.22     | 0.0 | 3.24 | 1.79                  |
|          | F <sub>22</sub> | 9.55      | 0.0 | 1.73 | 0.59                  |
|          | F <sub>12</sub> | 9.55      | 0.0 | 0.2  | 0.09                  |
| 上半<br>先進 | F <sub>11</sub> | 45.81     | 0.0 | 6.00 | 4.86                  |
|          | F <sub>22</sub> | 36.43     | 0.0 | 4.49 | 3.44                  |
|          | F <sub>12</sub> | 8.52      | 0.0 | 0.44 | 0.28                  |
| 側壁<br>導坑 | F <sub>11</sub> | 33.18     | 0.0 | 6.87 | 6.69                  |
|          | F <sub>22</sub> | 23.30     | 0.0 | 2.95 | 2.29                  |
|          | F <sub>12</sub> | 2.82      | 0.0 | 0.38 | 0.25                  |

ひび割れとして平均的な評価としているが、なかには外力作用等の特殊条件下において非常に大きなひび割れとなったり、まったくひび割れが発生していないトンネル覆工が存在していることから、平均的数値では標準的なひび割れを正しく評価できない。このように、ひび割れの評価が全体的に漠然としたものとなっていることで、はく落につながるひび割れやコンクリート収縮による標準的なひび割れの抽出が困難なものとなっている。しかしながら、本研究で提案するひび割れ評価指標 TCI の方向成分による分析で、既往の点検記録にあるひび割れ形態の特徴を建設工法ごとに整理することが可能となる。

はく落事象は、ひび割れ同士がつながり閉合しブロック化することで発生する。そのため、ひび割れが縦断方向、横断方向およびせん断方向すべてに卓越しているトンネル覆工は、ひび割れが閉合している可能性があり、はく落のリスクが高いことを示唆している。このはく落のリスクが高いトンネル覆工については、本研究で提案する TCI の方向成分による分析により抽出することが可能となる。

また、コンクリート収縮によるひび割れは、コンクリート打設後、一定期間経過すればひび割れの進展も新たなひび割れの発生もなくなることから、はく落につながるひび割れとはならない。しかしながら、他の要因によって発生したひび割れと相まって閉合ひび割れとなる可能性を秘めている。

本研究で提案する TCI の各成分における累積度数グラフの累積 50%のときの値である TCI(50) 値は、特殊条件下等のひび割れの影響を除外したコンクリート収縮によるひび割れ等標準的なひび割れとして位置づけられると考える。そのため、TCI(50) 値より高いひび割れについてはコンクリート収縮以外の要因でひび割れが発生していることを示唆している。

したがって TCI(50) 値は、維持管理をするうえで望ましい閾値であると考えられる。

### 3.2.2 トンネル覆工からのコア採取整理

覆工のひび割れ発生、進展に影響を与える要因を把握し、その要因に起因するひび割れ発生、進展を定量的に推定することを目的に、供用中のトンネル覆工から採取したコアで、材料分離(粗骨材の偏り)および覆工厚を測定し、点検記録にあるひび割れ形態との関連性を検討した。対象トンネルは、表 3.2.3 に示す矢板工法(上半先進工法) 3 トンネル、矢板工法(側壁導坑先進工法) 1 トンネルおよび NATMI トンネルとした。

本研究では、材料分離(粗骨材の偏り)を定量評価するために、粗骨材面積率を採用した。粗骨材面積率は、採取したコアを 10cm ピッチでスライスし、コアの表面の粗骨材(約 5mm 以上)をビニールシートにトレース後、その面積を各箇所(断面)の面積で除して求めた値である。

表 3.2.3 対象トンネル

| 工法               | トンネル名     |     | コア採取概要 |      |      |
|------------------|-----------|-----|--------|------|------|
|                  |           |     | 部位     | スパン数 | コア本数 |
| 矢板工法<br>(上半先進工法) | 塩嶺トンネル    | 上り線 | 天端部    | 23   | 39   |
|                  |           | 下り線 | 天端部    | 19   | 37   |
|                  | 岡谷トンネル    |     | 天端部    | 15   | 31   |
|                  |           |     | 側壁部    | 3    | 6    |
| 矢板工法<br>(側壁導坑先進) | 大久保第一トンネル |     | 天端部    | 3    | 9    |
|                  |           |     | 側壁部    | 3    | 9    |
| NATM             | 欽明路トンネル   |     | 天端部    | 3    | 9    |
|                  |           |     | 側壁部    | 3    | 8    |

ここでは、材料分離の大局的傾向を把握するため、各コア採取トンネルの内空側、中央部、地山側の3箇所での粗骨材面積率を用いて材料の分離の傾向を評価した。

なお、採取したコアを破砕して粗骨材(5mm以上)を取り出し測定した粗骨材の含有率と、コアの表面積に占める粗骨材面積(5mm以上の断面を有する骨材)の比率である粗骨材面積率が、ほぼ等価な値であることを確認している。

(1) コンクリートの流動距離での粗骨材面積率について

各トンネルについて、内空からの採取位置と粗骨材面積率の関係を図 3.2.2～図 3.2.6 に示す。図に示すように、いずれのトンネルとも、流動距離と骨材面積率の関係には顕著な傾向は確認されないが、粗骨材が不均一であることが確認された。

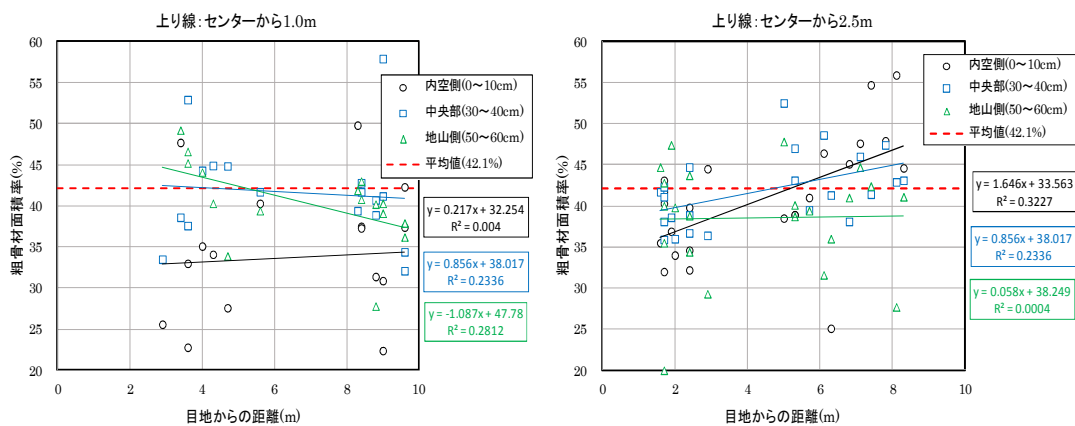


図 3.2.2 目地からの距離と骨材面積率の関係：塩嶺トンネル\_上り線

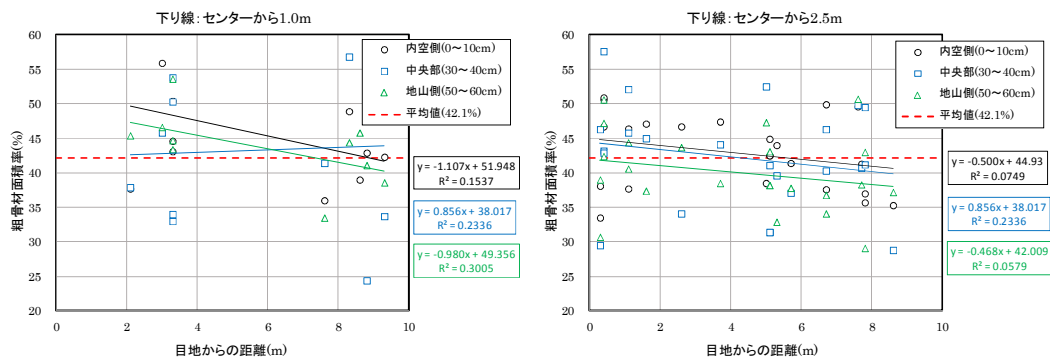


図 3.2.3 目地からの距離と骨材面積率の関係：塩嶺トンネル\_下り線

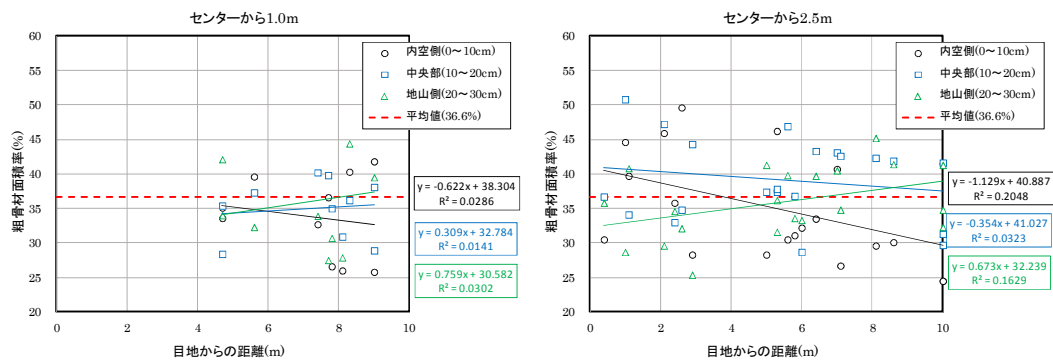


図 3.2.4 目地からの距離と骨材面積率の関係：岡谷トンネル

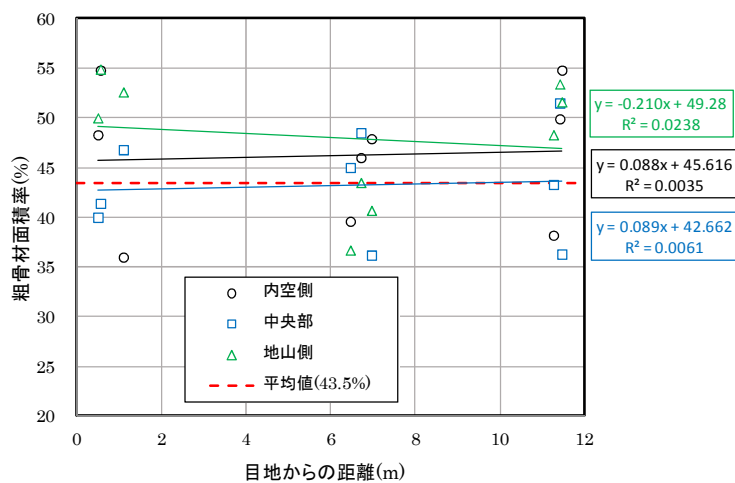


図 3.2.5 目地からの距離と骨材面積率の関係：大久保第一トンネル



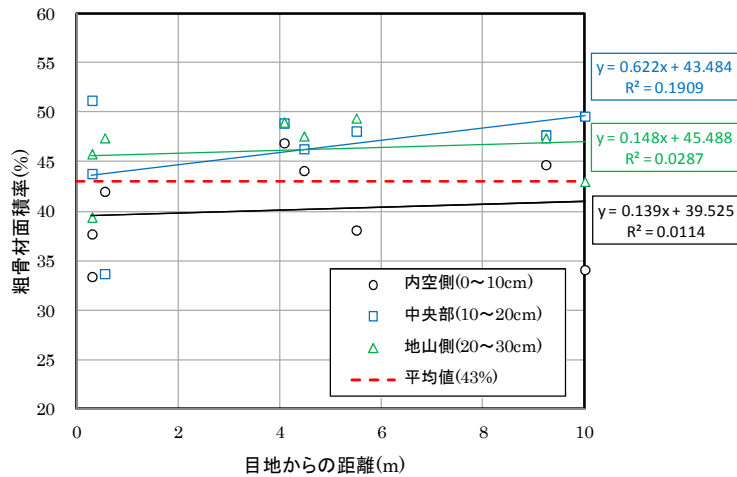


図 3.2.6 目地からの距離と骨材面積率の関係：欽明路トンネル

(2) 深さ方向での粗骨材面積率について

各トンネルについて、内空からの採取位置と粗骨材面積率の関係を図 3.2.7～図 3.2.11 に示す。図に示すように、各位置における粗骨材面積率のバラツキは大きいものの平均値は、全測定値の平均値に近い値となっている。天端部で材料分離(骨材沈降)を生じているとすれば、内空側ほど粗骨材面積率が大きくなる傾向が想定されるが、今回の測定結果ではその傾向は確認されない。

今回の調査は、ひび割れ近傍についてコアサンプリングした調査ではないことから、ひび割れの傾向と粗骨材面積率の傾向を確認することはできなかったが、明らかに粗骨材面積率が異なっていることが確認された。

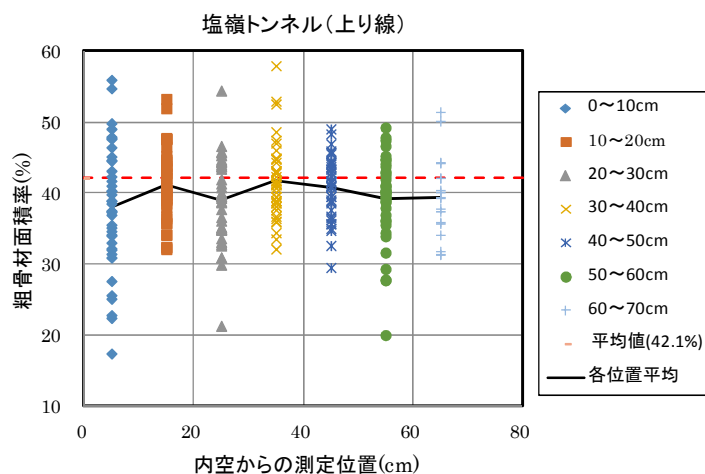


図 3.2.7 内空からの採取位置と骨材面積率の関係：塩嶺トンネル\_上り線



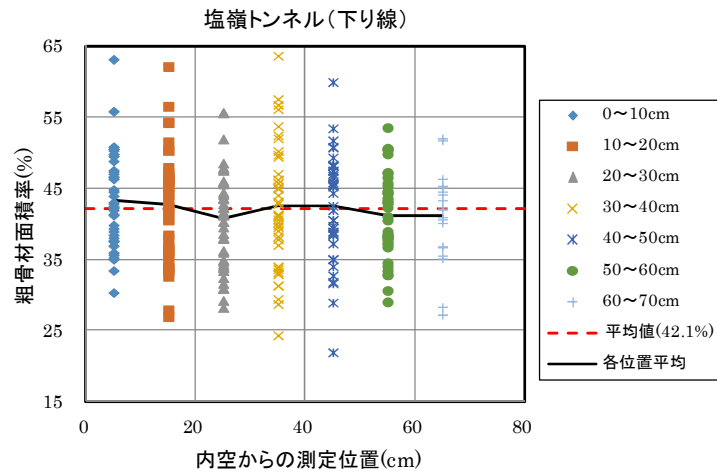


図 3.2.8 内空からの採取位置と骨材面積率の関係：塩嶺トンネル\_下り線

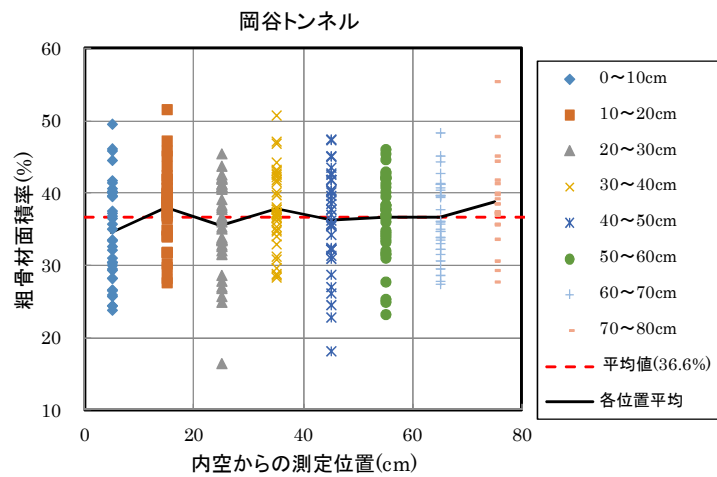


図 3.2.9 内空からの採取位置と骨材面積率の関係：岡谷トンネル

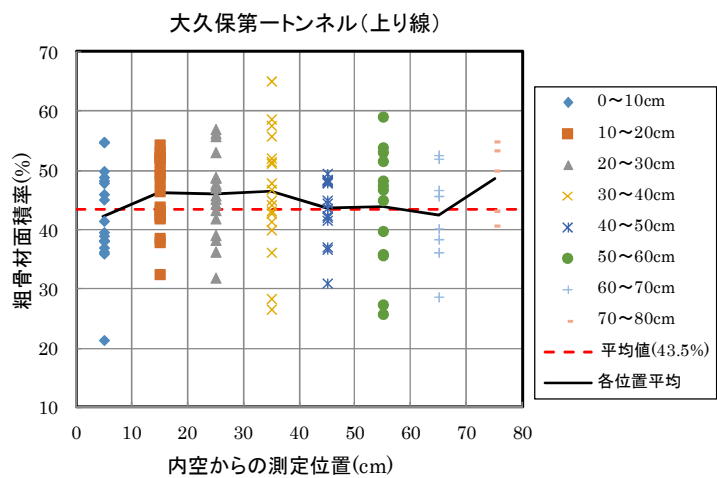


図 3.2.10 内空からの採取位置と骨材面積率の関係：大久保第一トンネル

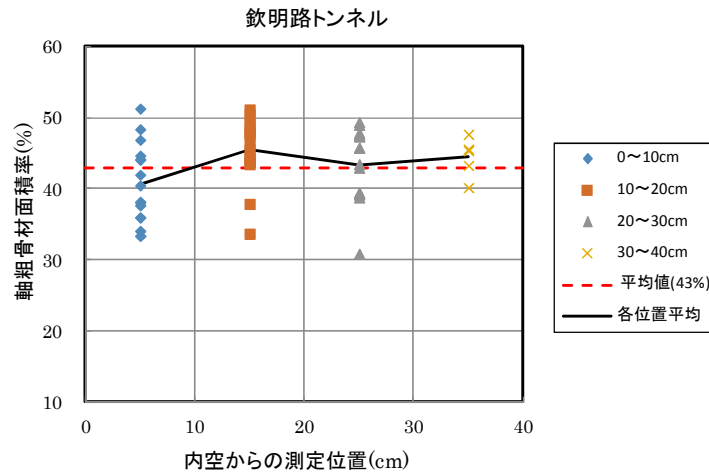


図 3. 2. 11 内空からの採取位置と骨材面積率の関係：欽明路トンネル

今回調査した5トンネルについて目地からの距離と覆工厚の関係を図3.2.12～図3.2.15に示す。図に示すように、目地からの距離と覆工厚には関係は認められない。

矢板工法は覆工厚も大きいことから、NATMの欽明路トンネルに比べて、覆工厚のバラツキはおおきい。特に、側壁導坑先進の大久保第一トンネルは覆工厚のバラツキが大きい、ひび割れが多く発生している状況ではなく、覆工厚さとひび割れの関係は、今回の整理では見だせなかった。

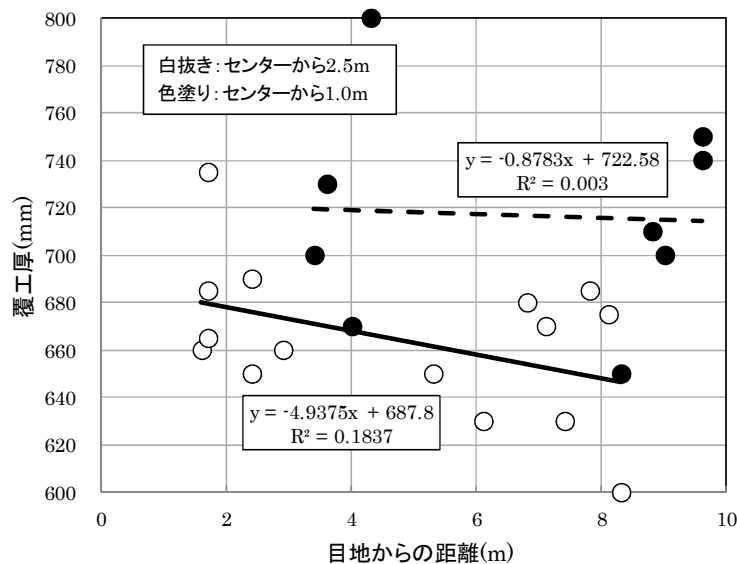


図 3. 2. 12 目地からの距離と覆工厚の関係：塩嶺トンネル（上り線）

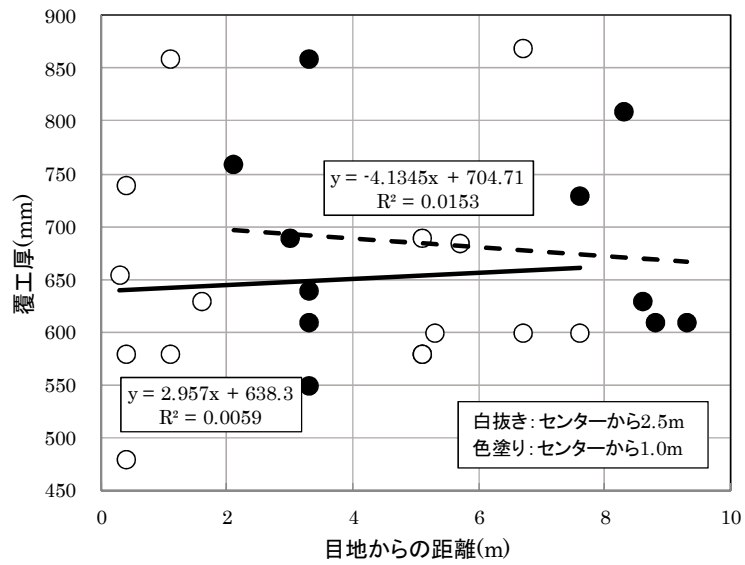


図 3.2.13 目地からの距離と覆工厚の関係：塩嶺トンネル（下り線）

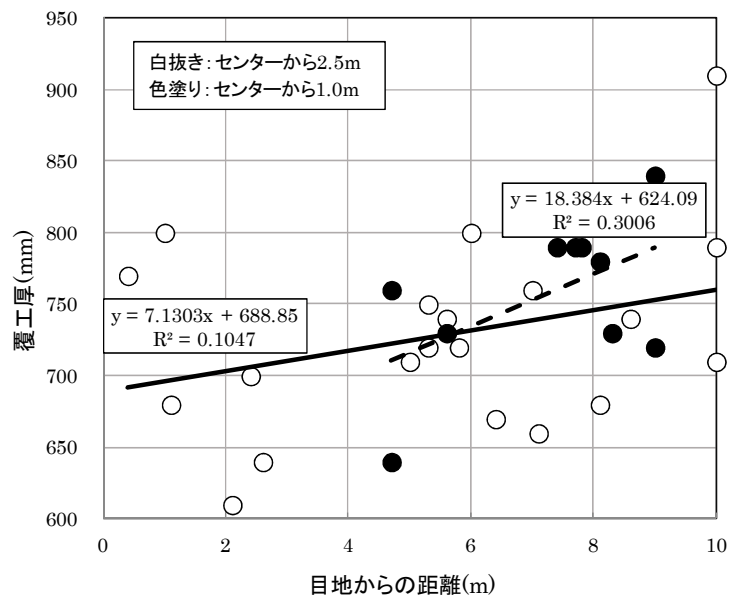


図 3.2.14 目地からの距離と覆工厚の関係：岡谷トンネル

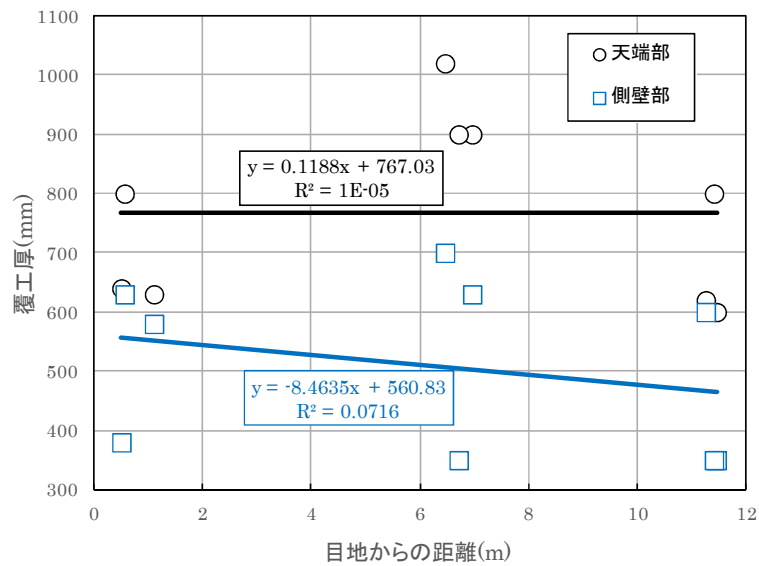


図 3.2.15 目地からの距離と覆工厚の関係：大久保第一トンネル

以上のように、既設覆工から採取したコアからは、ひび割れと覆工厚との関係は明確にならなかったが、下記の点が明らかになった。

現在の一般的な施工方法である NATM で施工されたトンネルでは、覆工厚不足と材料分離の発生頻度は非常に小さいことが判明した。一方、矢板工法で施工されたトンネルについては、覆工厚不足の発生が顕著であり、材料分離に起因すると推定できる粗骨材の含有量が非常に少ない層は局部的に生じていることが判明した。ただし、コアの採取箇所が偏在しているため、材料分離の分布状況については定量的な評価は困難であった。

- (3) コア調査結果に基づく工法別の部材厚および粗骨材面積率のばらつき  
採取したコアから得られた部材厚および粗骨材面積率をまとめると以下ようになる。

表 3.2.4 部材厚(巻き厚)一覧

|         | 矢板工法   |        |           | NATM    |
|---------|--------|--------|-----------|---------|
|         | 上半先進   |        | 側壁導坑先進    |         |
|         | 岡谷トンネル | 塩嶺トンネル | 大久保第一トンネル | 欽明路トンネル |
| 平均値(mm) | 750.8  | 659.5  | 637.7     | 309.3   |
| 標準偏差    | 95.1   | 92.4   | 191.3     | 34.5    |

矢板工法(上半先進)で施工した岡谷トンネル、塩嶺トンネルについては、部材厚(巻き厚)の平均値が 100mm 程度違うが、標準偏差はほぼ同様の値を示している。一方、側壁導坑先進工法で施工した大久保第一トンネルについては、部材厚の平均値が最も小さく、かつ標準偏差も岡谷、塩嶺の 2 倍以上の値を示している。この結果によれば、部材厚の分布が正規分布であると仮定すると部材厚が現在の NEXCO 設計要領にある矢板工法の最も薄い設計巻き厚 450mm 以下となる確率は 15%程度となっている。

NATM で施工した欽明路トンネルでは、設計覆工は矢板工法の半分の 300mm であるが、標準偏差が矢板工法の半分以下になっており、覆工厚のばらつきが少ないことが判明した。

表 3.2.5 10cm 毎の粗骨材面積率

|        | 矢板工法   |        |           | NATM    |
|--------|--------|--------|-----------|---------|
|        | 上半先進   |        | 側壁導坑先進    |         |
|        | 岡谷トンネル | 塩嶺トンネル | 大久保第一トンネル | 欽明路トンネル |
| 平均値(%) | 36.6   | 42.1   | 43.5      | 43      |
| 標準偏差*  | 16.8   | 17.1   | 17.9      | 13.8    |

\*標準偏差は、平均値を 100%として算定

表 3.2.5 に 10cm 毎のコアの粗骨材面積率の一覧表を示す。平均値は、コアの表面積に占める粗骨材の面積率であり、この値が各トンネルでの粗骨材含有量と想定される。標準偏差については、各トンネルの粗骨材の含有量に違いが見られることから、粗骨材の含有量を表している平均値を 100%として各コアの表面積を無次元化して算定した。

粗骨材の含有量を示していると想定される平均値については、岡谷トンネル以外は、ほぼ同等であった。標準偏差については、矢板工法で施工した岡谷トンネル、塩嶺トンネル、大久保第一トンネルについては 17 前後であった。NATM で施工した欽明寺トンネルの標準偏差は 13.8 と小さく、粗骨材面積率のばらつきが少ない。

以下に個々のトンネルの分布状況を記載する。

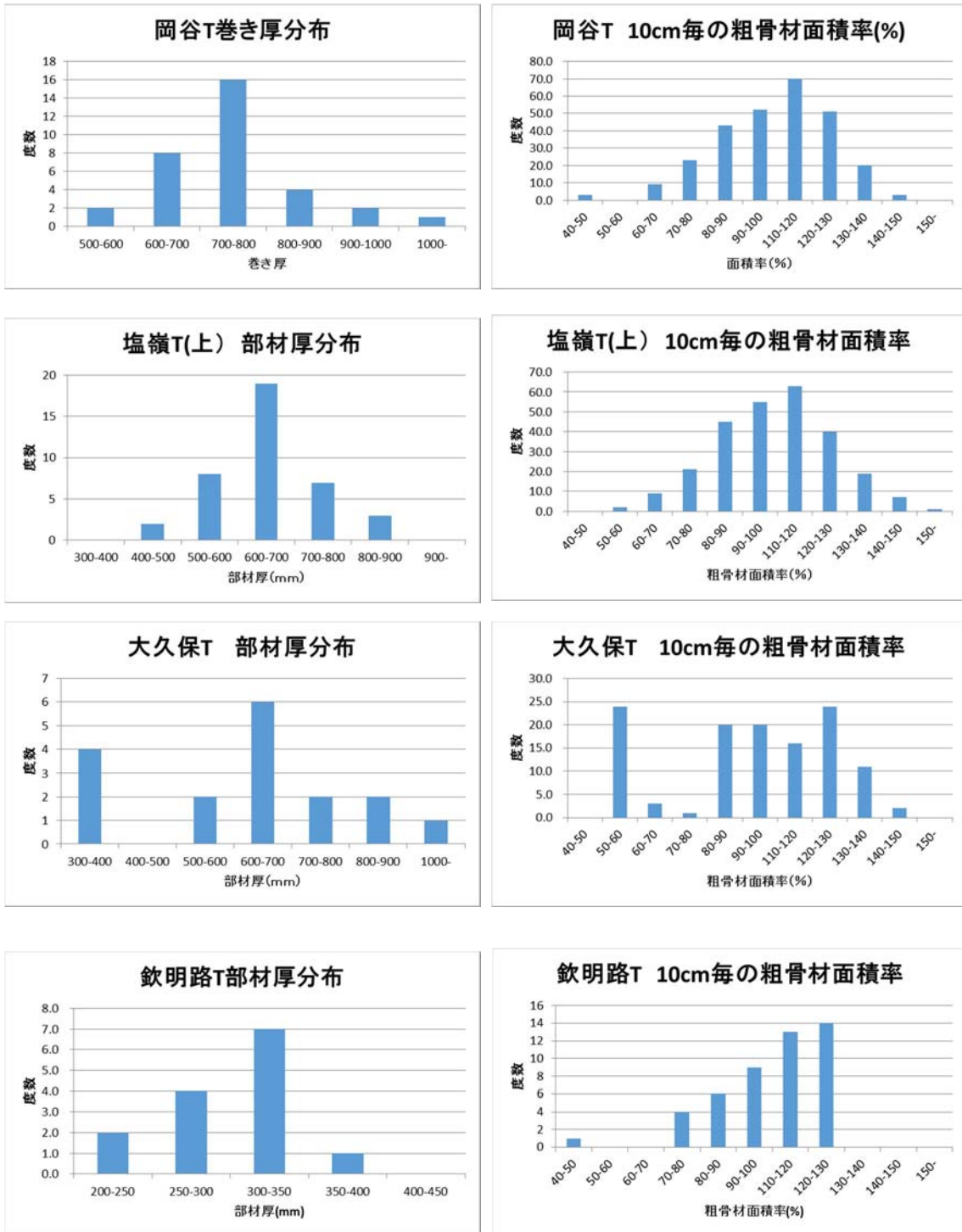


図 3.2.16 各トンネルの部材厚および粗骨材面積率  
 (注：粗骨材面積率は、各トンネルの平均値を 100%として表示)

岡谷トンネル、塩嶺トンネルについては、部材厚および粗骨材面積率ともに正規分布に近い分布形状を示している。粗骨材面積率が70%以下になる確率も小さくなっている。一方、大久保第一トンネルについては、部材厚が極端に薄い部分から厚い部分に広く分布している。さらに、粗骨材面積率についても50～60%と120～140%の頻度が多くなっており、粗骨材分布に偏りがあると判断される。

各トンネルとも粗骨材面積率が50%、つまり、各トンネルの平均値である粗骨材面積率100%の半分しか粗骨材が含まれていない部分が存在し、その厚さは10cm程度であることが確認できた。

### 3.3 矢板工法の背面空洞および覆工厚調査結果の整理

矢板工法で施工されたトンネルは、その構造から覆工背面に空洞が生じやすく、覆工厚についても不均一な状況である。覆工背面に空洞が生じるとトンネルに作用する土圧を均等に分布させることや、地山の反力を有効に利用すること等が期待できなくなる。そのため、矢板工法で施工されたトンネルにおいては、地山と覆工背面の空隙を注入材料によって充填することとしている。今回、その覆工背面の状況を調査したトンネルで、覆工厚の不足が顕著な既設トンネルの天端部の電磁波探査結果とひび割れ点検記録に着目し、覆工厚とひび割れ形態との関連性を検討した。電磁波探査は、覆工背面の空洞の有無についても調査することが可能であるが、探査に使用した機材の探査深度が設計覆工厚(60cm)以下の45cmであるため、今回の電磁波探査では背面空洞の有無を把握することができない。

調査対象となった各務原トンネルは、1986年(昭和61年)に供用開始した延長約3,000mのトンネルである。天端部分のトンネル軸方向に表3.3.1の凡例に示す3本の側線位置で電磁波探査を実施し、その結果から天端部の覆工厚の分布を色分けしている。この覆工厚分布図にトンネル点検で発見されたひび割れを記入し、その中から特徴的なひび割れ発生パターンを図3.3.1に示す。

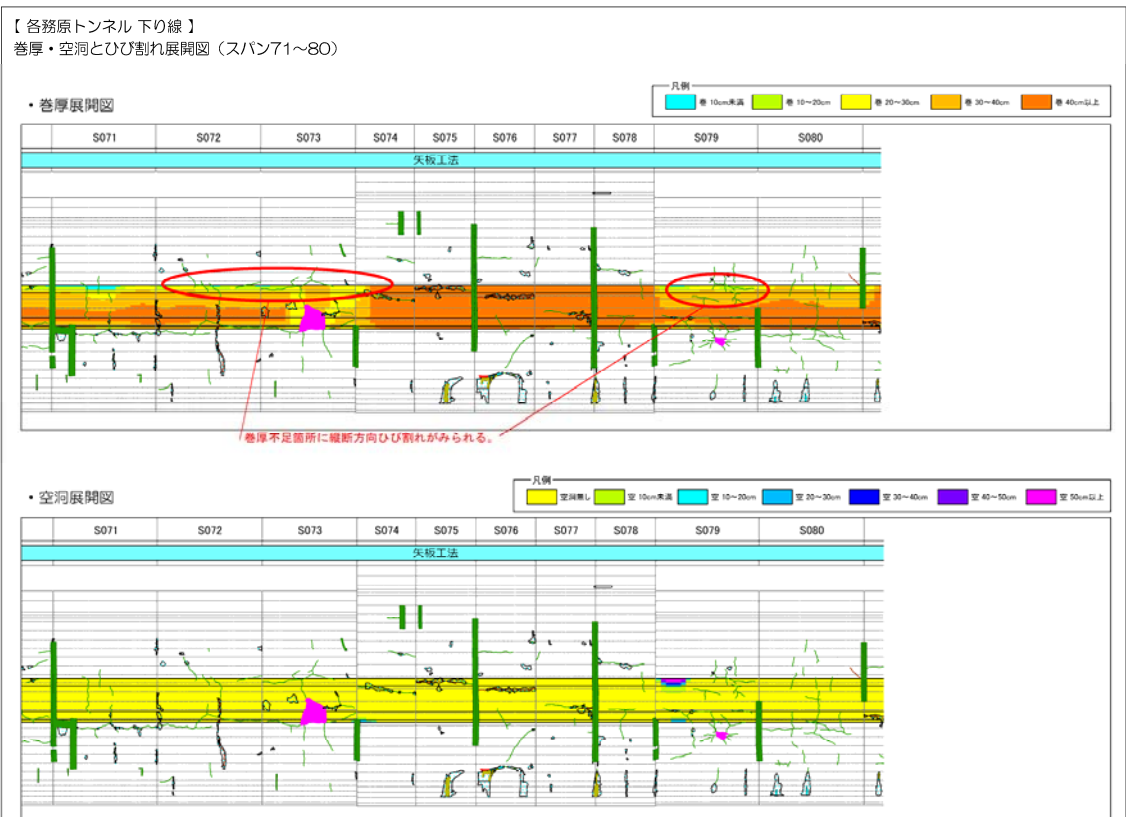
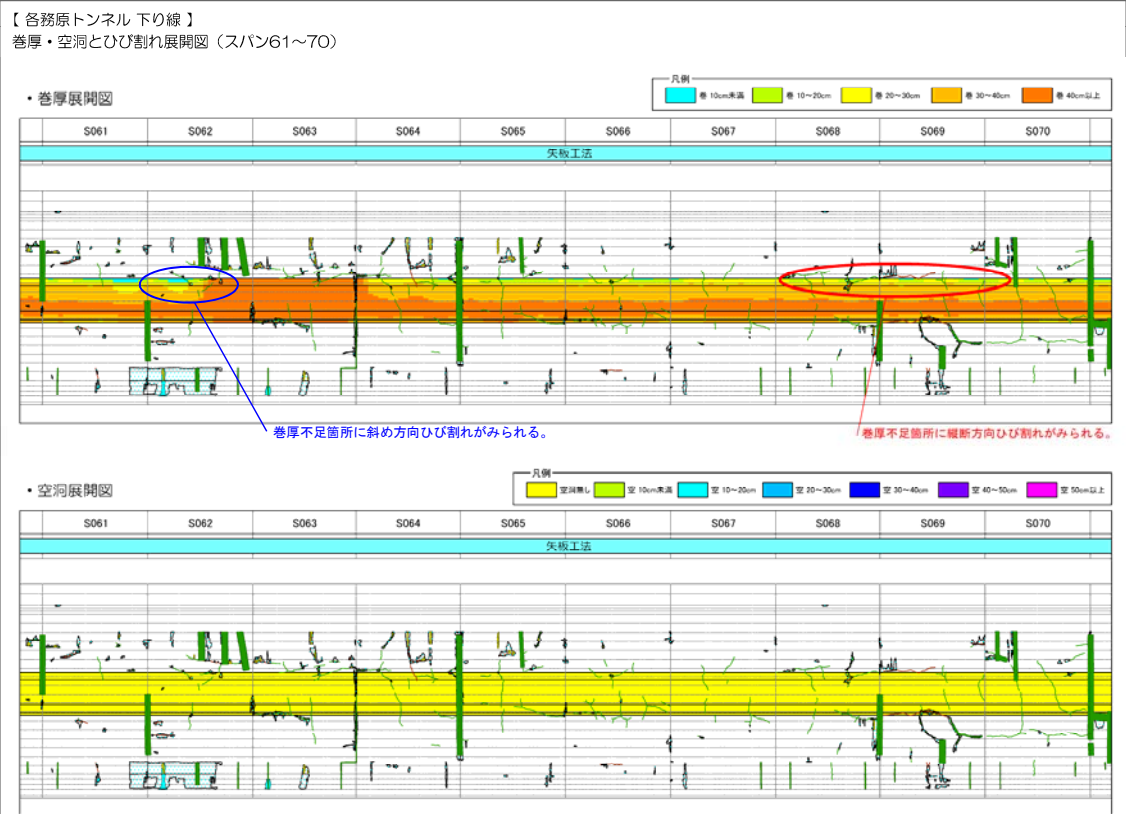
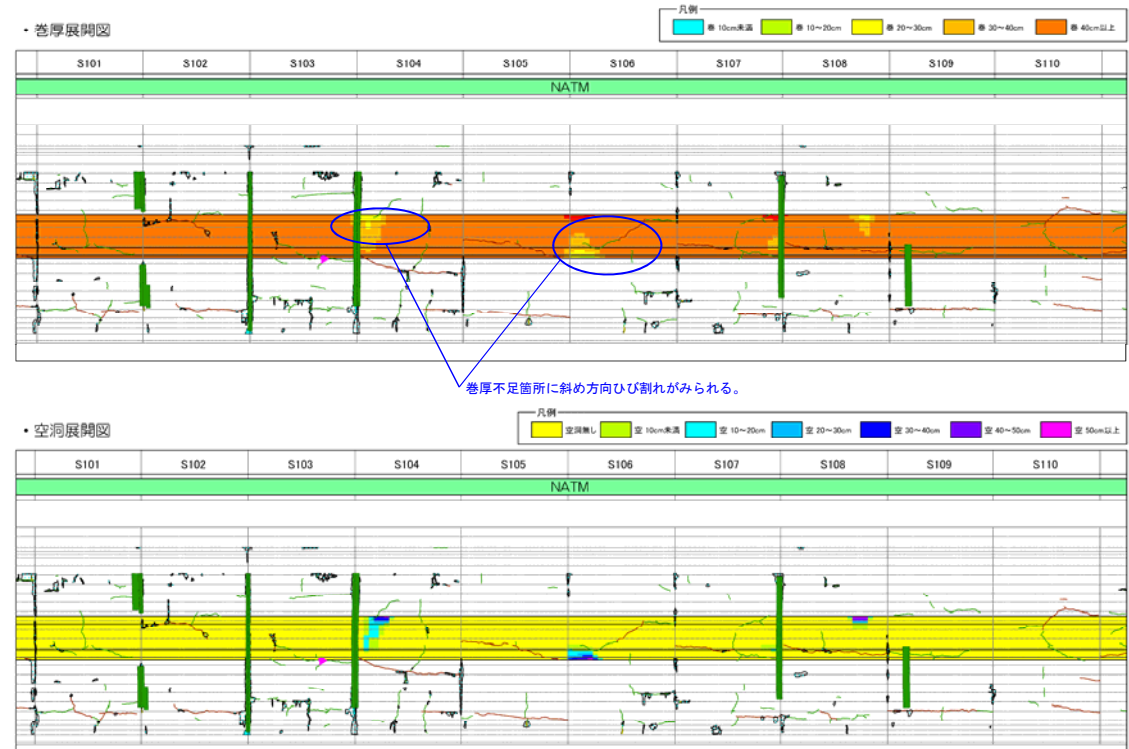


図 3.3.1 各務原トンネルの点検データと覆工厚分布（その1）



【各務原トンネル 下り線】  
 巻厚・空洞とひび割れ展開図（スパン101～110）



【各務原トンネル 下り線】  
 巻厚・空洞とひび割れ展開図（スパン111～120）

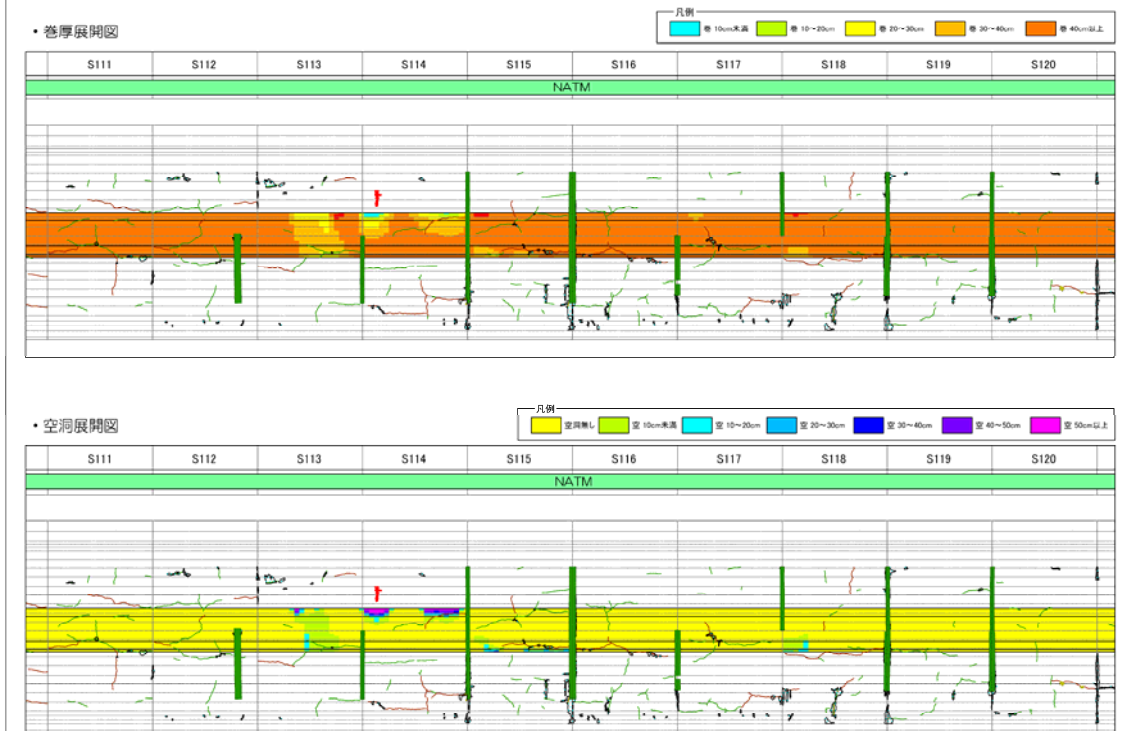


図 3.3.1 各務原トンネルの点検データと覆工厚分布（その2）

図 3.3.1 に示す背面空洞については、前述したように探査深度が設計覆工厚以下であるので、信頼性が乏しい。天端部分の覆工厚分布に着目すると、覆工厚不足している領域はトンネル軸方向に連続している事例が多い。また、スパン内に局部的に覆工厚が不足している領域も発生している。覆工厚が不足している領域は、片側のアーチ肩部のみに発生している事例が多くなっており、両側に対称に発生している事例は極めて少ない。

覆工厚を探査した範囲のひび割れ発生状況に着目すると、覆工厚不足が発生している領域では、トンネル軸方向のひび割れが天端でなく、覆工厚不足が生じているアーチ肩付近に発生している。また、斜めのひび割れの発生頻度が多いような印象を受ける。

#### (1) TCI による評価

覆工厚不足とひび割れ発生との関連性を把握するために、電磁波探査した区間のひび割れを対象に TCI で評価を行った。

##### 1) 巻厚とひび割れパターンの関係

全体を通して、巻厚が 30cm 未満で巻厚不足箇所とひび割れ発生位置が一致するスパンおよび、巻厚不足箇所でも  $F_0$ 、 $F_{11}$ 、 $F_{22}$  が TCI(50)値内にあるスパンを表 3.3.1 に示す。また、各務原トンネル下り線の全スパンにおける TCI 分布と巻厚不足の関係を図 3.3.2 に示す。

巻厚不足箇所とひび割れ発生位置が一致するスパンの TCI 分布をみると、 $F_0$ 、 $F_{11}$ 、 $F_{22}$  は、TCI(50)値を上回り、他のスパンに比べて値が大きいことがわかる。しかし、巻厚不足箇所でも  $F_0$ 、 $F_{11}$ 、 $F_{22}$  が TCI(50)値を下回るスパンや、覆工巻厚があっても TCI(50)値を上回るスパンが存在している。

$F_0$  の TCI(50)値を上回るスパンで巻厚不足箇所に発生しているひび割れは、縦断方向ひび割れが卓越する傾向にあり、逆に  $F_0$  が TCI(50)値内のスパンにおける巻厚不足箇所に発生しているひび割れは、横断方向ひび割れが卓越する傾向にある。この傾向はトンネル全体において概ね同様の傾向である。

以上より、巻厚不足箇所に必ずしもひび割れが発生するとは限らないが、巻厚不足箇所に発生するひび割れは、TCI 値が大きく縦断方向ひび割れが発生しやすい傾向にあると考えられる。

##### 2) 背面空洞とひび割れパターンの関係

図 3.3.3 に各務原トンネル下り線の全スパンにおける TCI 分布と背面空洞の関係を示す。これをみると、背面空洞の有無によってひび割れ量の傾向の違いはみられないが、縦断方向ひび割れが多い傾向がある。これは、背面空洞が存在する箇所は巻厚不足であることが多いことに関係していると考えられる。

また、全スパンに比べ、背面空洞がみられる箇所はひび割れの方向性を示す  $F_{12}=F_{21}$  が大きい傾向がある。これは当箇所に斜めひび割れが多く発生していることを示している。

したがって、背面空洞の有無によってひび割れ量に大きな傾向はみられないが、背面空洞がみられる箇所では斜めひび割れの発生が多くなる傾向があると考えられる。

##### 3) TCI による評価のまとめ

覆工巻厚を探査した範囲を対象を絞って、覆工巻厚とひび割れ発生状況との関係を TCI で検討した。検討対象とした各務原トンネルでは、探査深さが設計巻厚 60cm 以下の 40cm であるため、巻厚不足に起因する背面空洞のみが探査可能であった。各務原トンネルの結果では、巻厚不足した箇所(背面空洞区間)に縦断方向のひび割れが発生する傾向があり、斜めひび割れについても多く発生しているものと

判断された。

各務原トンネルのみの結果であるが、巻厚不足に起因する背面空洞区間では、トンネル縦断方向ひび割れと斜めひび割れが発生する傾向があることが判明した。

表 3.3.1 巻厚不足箇所とひび割れ発生位置の関係

| 巻厚不足箇所とひび割れ発生位置が一致しているスパン                   |             |     | 凡例   |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
|---|-------------|-----|--|--|-------------|--|-------------|--|---------|--|--------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|-----------|--|--------|
| スパン   | 73          | 79  |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
| 巻厚とひび割れの関係                                  |             |     | <table border="1"> <tr> <td></td> <td>ひび割れ0.5mm程度</td> </tr> <tr> <td></td> <td>ひび割れ1.0mm程度</td> </tr> <tr> <td></td> <td>閉合型ひび割れ</td> </tr> </table> <p><b>巻厚</b></p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>10cm以下</td> </tr> <tr> <td></td> <td>10cm～20cm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>20cm～30cm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>30cm～40cm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>40cm～50cm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>50cm～60cm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>60cm～70cm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>70cm以上</td> </tr> </table> |  | ひび割れ0.5mm程度 |  | ひび割れ1.0mm程度 |  | 閉合型ひび割れ |  | 10cm以下 |  | 10cm～20cm |  | 20cm～30cm |  | 30cm～40cm |  | 40cm～50cm |  | 50cm～60cm |  | 60cm～70cm |  | 70cm以上 |
|   | ひび割れ0.5mm程度 |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
|   | ひび割れ1.0mm程度 |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
|   | 閉合型ひび割れ     |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
|   | 10cm以下      |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
|   | 10cm～20cm   |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
|   | 20cm～30cm   |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
|   | 30cm～40cm   |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
|   | 40cm～50cm   |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
|   | 50cm～60cm   |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
|   | 60cm～70cm   |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
|   | 70cm以上      |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
| 巻厚不足箇所と TCI (F0、F11、F22) が TCI(50) 値内にあるスパン |             |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
| スパン   | 233、234     | 270 |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |
| 巻厚とひび割れの関係                                  |             |     |  |  |             |  |             |  |         |  |        |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |           |  |        |

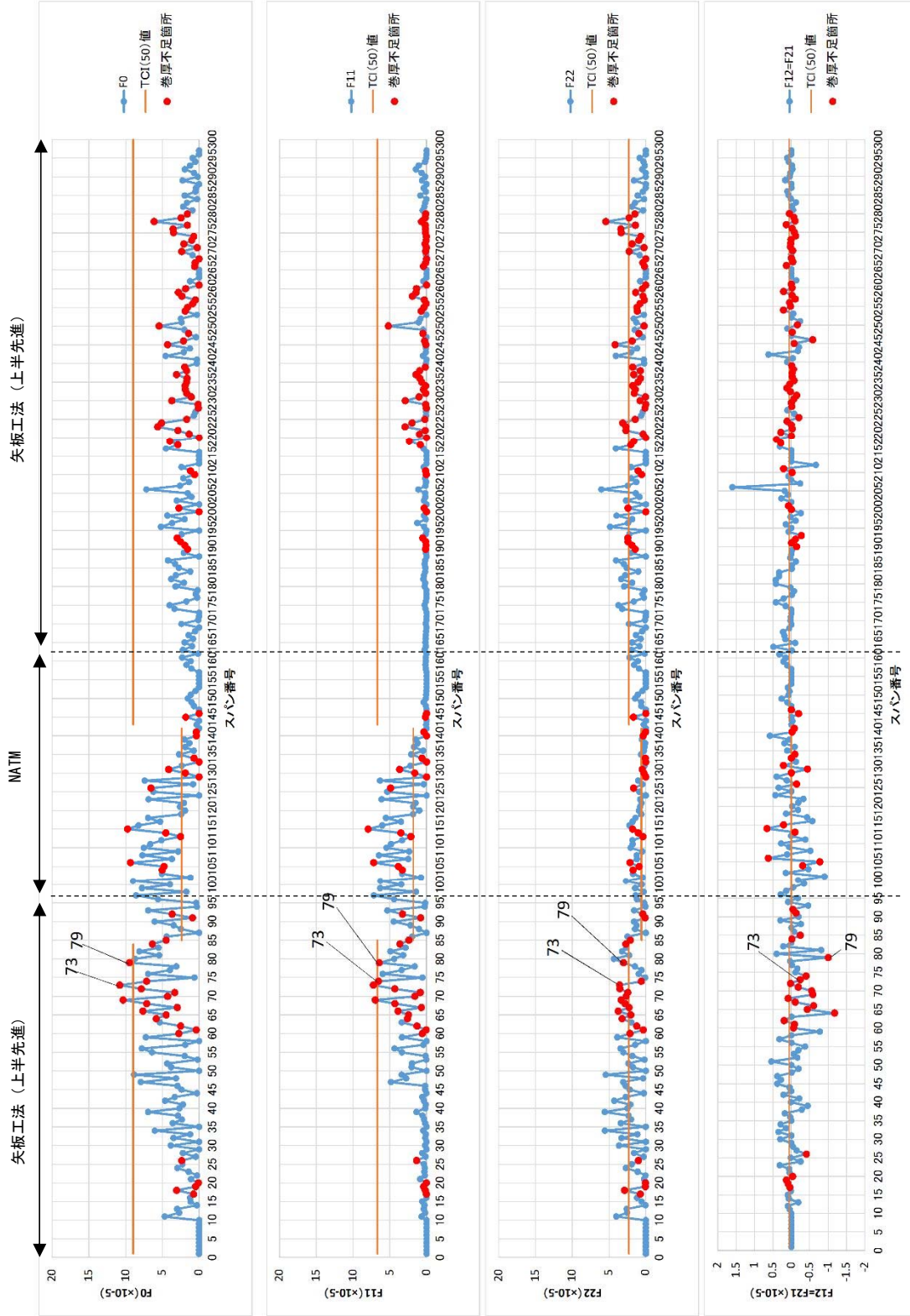


図 3.3.2 各務原トンネル下り線における全スパンの TCI 分布と巻厚不足の関係

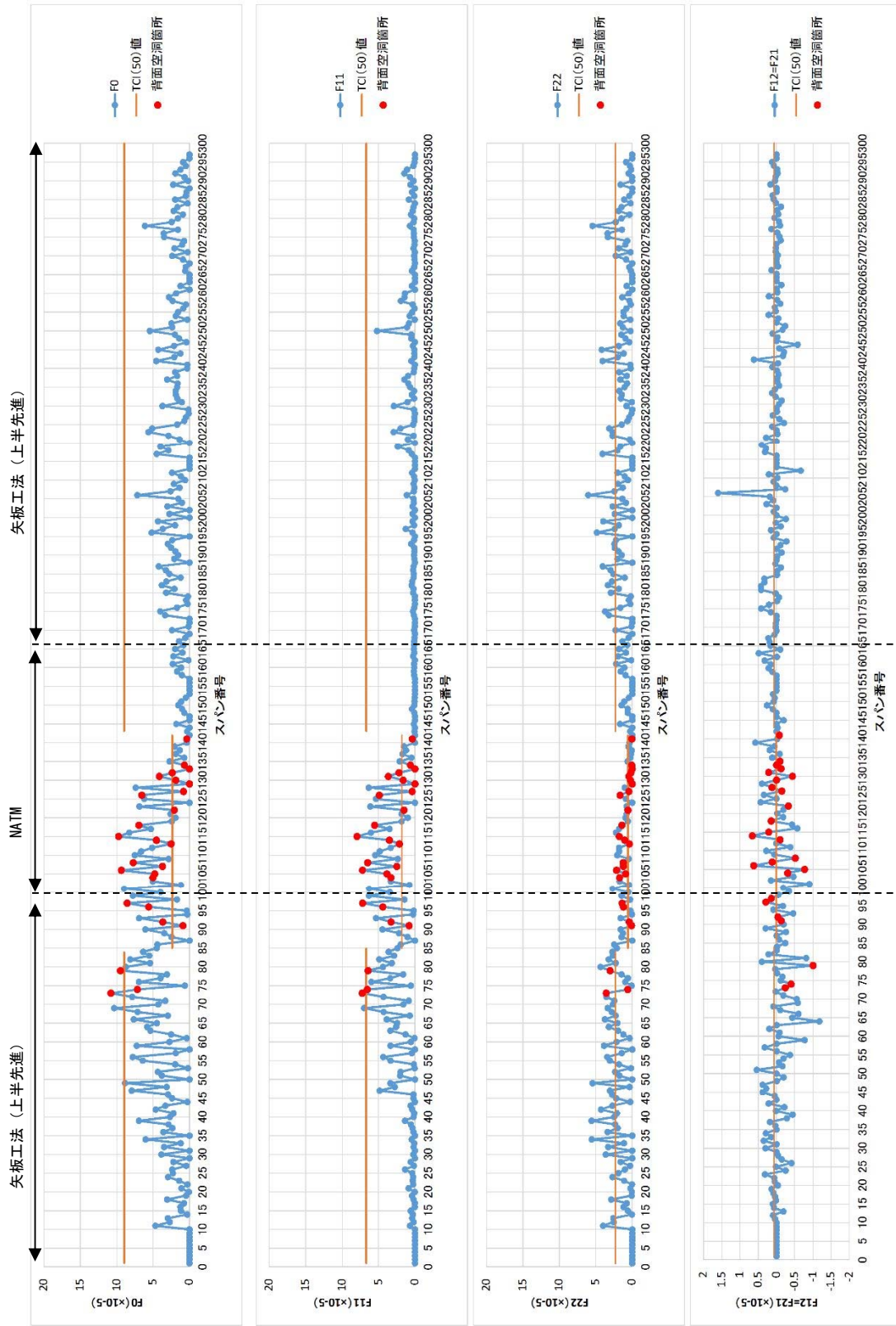


図 3.3.3 各務原トンネル下り線における全スパンの TCI 分布と背面空洞の関係



### 3.4 既往の点検記録からの変状原因推定手法に関する検討

#### 3.4.1 検討概要

詳細点検記録によるひび割れ発生形態の把握において、TCIにより建設工法ごとでひび割れの発生形態が異なることが確認された。また、材料分離（粗骨材の偏り）とひび割れとの相関は確認できなかったが、矢板工法で施工されたトンネルについては、材料分離が局部的に生じていることが判明した。さらに矢板工法においては、覆工厚不足や覆工背面の空洞が顕著であり、特徴的なひび割れが発生していることを確認した。

しかし、これらのひび割れ発生要因は一部であり変状原因については、内因および外因に大別する必要がある。内因によるひび割れについては、材料や施工に起因していることからトンネル単位で、標準的なひび割れが発生することが想定される。一方で外因については、外力の作用によって局部的に特異なひび割れが発生する。

そこで、標準的なひび割れおよび局部的なひび割れを抽出するにあたり、トンネルの各スパンにおけるひび割れ発生形態をTCIの $F_0$ 、 $F_{11}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{12}=F_{21}$ 成分により分析した。

標準的なひび割れの抽出にあたっては、NEXCOが管理するトンネルで、表3.2.1に示す矢板工法（上半先進）、矢板工法（側壁導坑先進）およびNATMの工法別に区分した。

本研究では、表3.4.1に示すひび割れが発生しているトンネルで主たる原因が判明している覆工スパンについて、TCIによるひび割れ発生の原因推定手法について検討した。

表 3.4.1 対象トンネル

| 分類     | 対象トンネル     | 工法    | 対象スパン   | 変状原因     |
|--------|------------|-------|---------|----------|
| 変状トンネル | 一本松トンネル(下) | NATM  | 104~107 | 塑性圧      |
|        | 御園トンネル(上)  | NATM  | 0~28    | 覆工背面拘束   |
|        |            |       | 29~42   | 支保工の拘束   |
|        |            |       | 43~47   | 断層破砕帯のズレ |
| 辰野トンネル | 矢板工法(上半先進) | 29~30 | 坑門工の沈下  |          |

#### 3.4.2 分析方法

中野らの報告<sup>2)</sup>は、外因によるひび割れの特徴についてひび割れの方向成分に着目した分析を行っている。中野らの報告による分析例を図3.4.1に示す。グラフの横軸に $F_{11}$ 、縦軸に $F_{22}$ を設定し、覆工1スパンごとに算出した $F_{11}$ 、 $F_{22}$ との交点をプロットする。このとき、プロットがグラフ上の点線（ $F_{11}=F_{22}$ ライン）より下側に分布すれば縦断方向ひび割れ卓越型、上側に分布すれば横断方向ひび割れ卓越型とできる。プロットが点線上もしくは点線付近に分布すれば、斜めひび

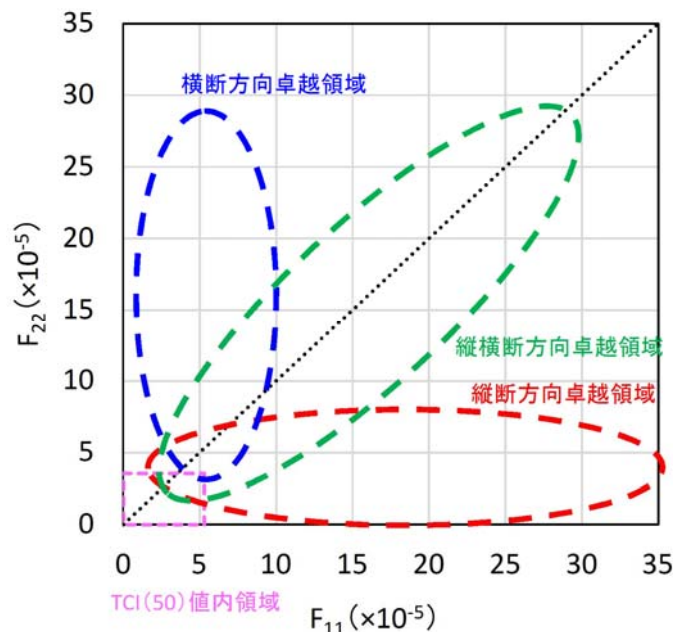


図 3.4.1 TCI ( $F_{11}$ 、 $F_{22}$ ) 分析例

割れ卓越型となる。このグラフから、中野らの報告<sup>2)</sup>によれば以下のような変状原因が推定できると考えられる。

$F_{11} > F_{22}$  : 緩み圧による天端縦断方向ひび割れ、水圧、塑性圧による側壁部縦断方向ひび割れ等

$F_{11} = F_{22}$  : 地すべり、偏圧地形による斜め方向ひび割れ等

$F_{11} < F_{22}$  : 路盤沈下、路盤隆起による横断方向ひび割れ等

中野らの報告では、トンネルに外力作用で生じた損傷を対象にひび割れの方向成分から変状原因を推定できる可能性を示している。しかしながら、実際の点検データにどの様に報告結果を反映するなどの方法については提案されていない。

本研究で提案するひび割れの原因推定手法については、中野らの外力作用により発生する局所的な規模の大きいひび割れの抽出とは対照的に、コンクリート収縮によりトンネル全体に発生する標準的なひび割れを、**図 3.4.1** に示す方向成分の範囲設定により抽出するものである。外力作用により発生するひび割れについては、トンネルの補強を実施する必要があるのに対し、本研究で対象としている標準的なひび割れは、補修の有無或いは全面打音調査の有無を判断するための閾値である。この閾値以下のトンネルに外因によるひび割れが含まれている可能性について、外力による変状と想定されているトンネル点検結果と比較した。

標準的なひび割れの設定は、**表 3.2.1** にあるトンネルを対象とした工法別の TCI の方向成分  $F_{11}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{12}$ ・ $F_{21}$  をまとめた**表 3.2.2** にある TCI(50)値を採用し、各スパンの方向成分  $F_{11}$ 、 $F_{22}$  が、**図 3.4.1** に示す TCI(50)値内領域に含まれるものを、標準的なひび割れとして評価するものである。

### 3.4.3 TCI と変状原因の関係分析

分析結果を以下に示す。なお、外力性変状の可能性のあるトンネルについては、今回現地調査を実施しており、一本松トンネル、御園トンネル、辰野トンネルでひび割れ展開図上に図示しているひび割れ幅については、現地調査時（平成28年）に計測したものである。

#### (1) 一本松トンネル

変状状況としては、**図3.4.2**に示すようにスパン104～107で路盤隆起が確認されており、塑性圧による外力性変状と判定された区間が存在する。スパン105では、側壁が地山の側圧によって押し出され、路肩排水溝が閉口している。また、路盤隆起により覆工には横断方向ひび割れが発生した。

$F_{11}$  と  $F_{22}$  の関係を**図3.4.3**に示す。

$F_{11}$  と  $F_{22}$  の関係をみると、対象スパンのうち、外力性変状の可能性のあるスパンを赤のプロットで示しており、外力性変状の可能性のあるスパンのうち105、107スパンは TCI(50)値領域外に分布していることから、

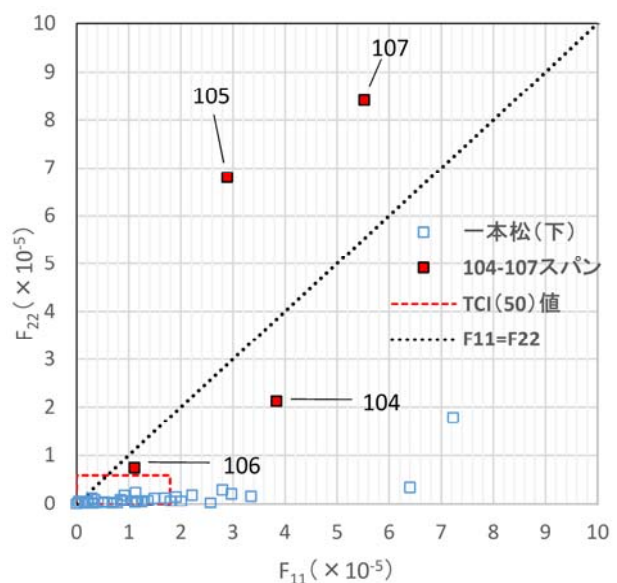


図 3.4.3 一本松トンネルの  $F_{11}$  と  $F_{22}$  の関係

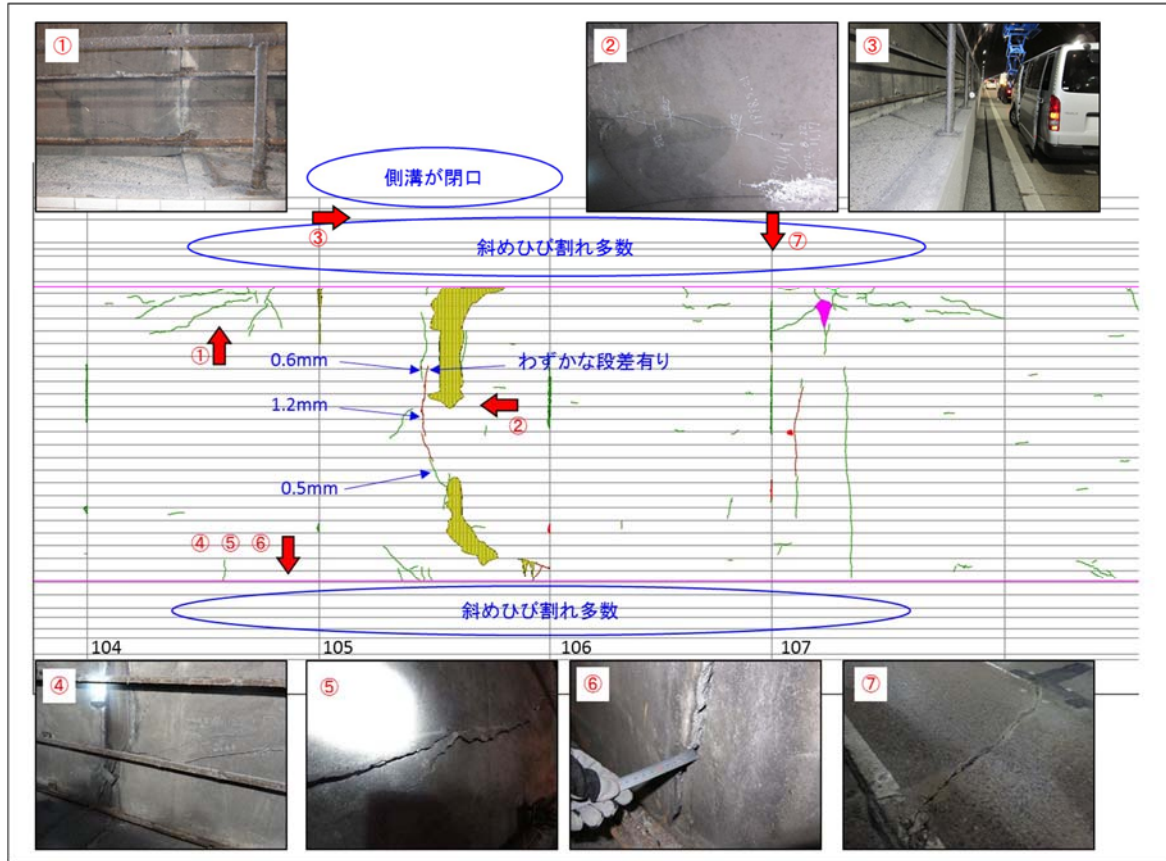


図 3.4.2 一本松トンネルのひび割れ展開図と変状写真

$F_{11}$ と $F_{22}$ の関係性を分析することで、外力性変状の可能性を捉えられていることがわかる。

その他のスパンにおいては、TCI(50)値の範囲内にほとんどが含まれる。

## (2) 御園トンネル

御園トンネルは、NATMで施工されており、図3.4.4に示すように43～47スパンにおいて横断方向および斜め方向ひび割れが発生しており、地山の地すべり性挙動による外力性変状と判定された区間が存在する。

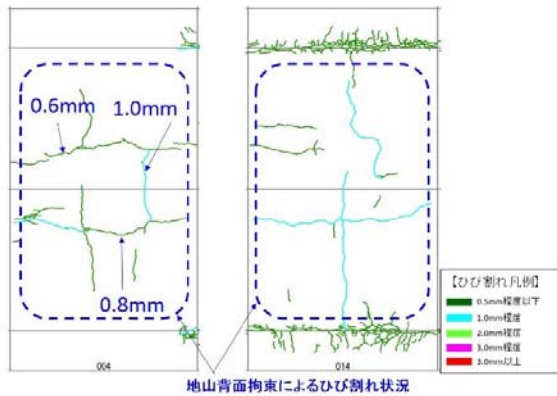
さらに、0～28スパンは、地山の覆工背面拘束の影響により、縦横断方向にひび割れが発生し、29～42スパンは支保工の拘束による横断ひび割れが発生している。

$F_{11}$ と $F_{22}$ の関係を図3.4.5に示す。

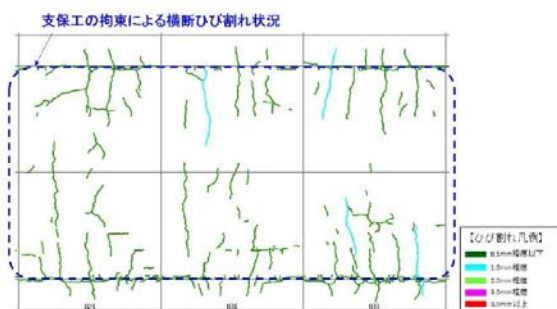
$F_{11}$ と $F_{22}$ の関係をみると、外力性と判定された43～47スパンはTCI(50)値領域の外側に分布していることがわかる。また、これら変状スパンのプロットが、 $F_{11}=F_{22}$ ラインより $F_{22}$ 側に分布していることから、横断方向および斜め方向ひび割れの発生を捉えられていることがわかる。

さらに、縦横断卓越型の0～28スパンの分布は、 $F_{11}=F_{22}$ ライン付近に分布しており、横断卓越型ひび割れの29～42スパンの分布は、 $F_{22}$ 側に分布していることがわかり、外力変状でなくてもひび割れ発生形態の特徴を、TCIによって捉えられていることがわかる。しかし、地山の背面および支保工の拘束によるひび割れは、TCI(50)値領域の範囲外となり、標準的なひび割れとしての判定が困難なものとなった。

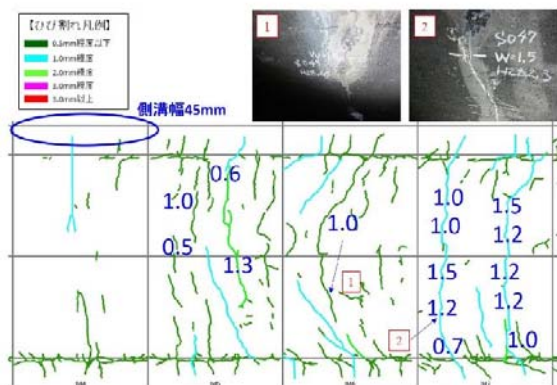




0~28 スパン 代表的なひびわれ展開図



29~42 スパン 代表的なひびわれ展開図



43~47 スパン 代表的なひびわれ展開図

図 3.4.4 御園トンネルの変状状況

### (3) 辰野トンネル

辰野トンネルの変状区間は、図3.4.6に示すように坑門工の沈下や倒れに伴う側方土圧減少により、天端部の曲げモーメントが増加して縦断方向ひび割れが発生したと考えられ、外力性変状の可能性のあるトンネルである。

$F_{11}$ と $F_{22}$ の関係を図3.4.7に示す。

外力性変状と考えられ、縦断方向ひび割れが発

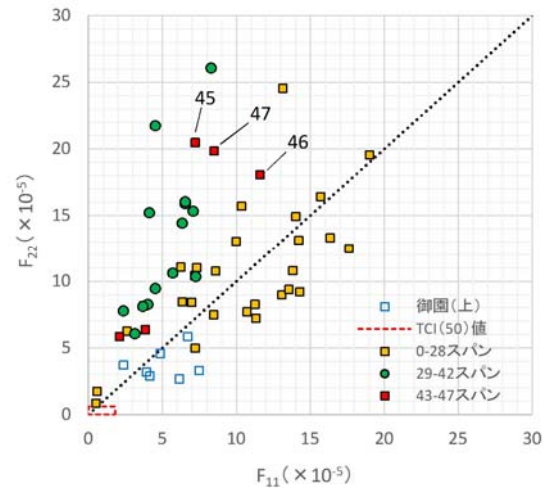


図 3.4.5 御園トンネルの  $F_{11}$  と  $F_{22}$  の関係

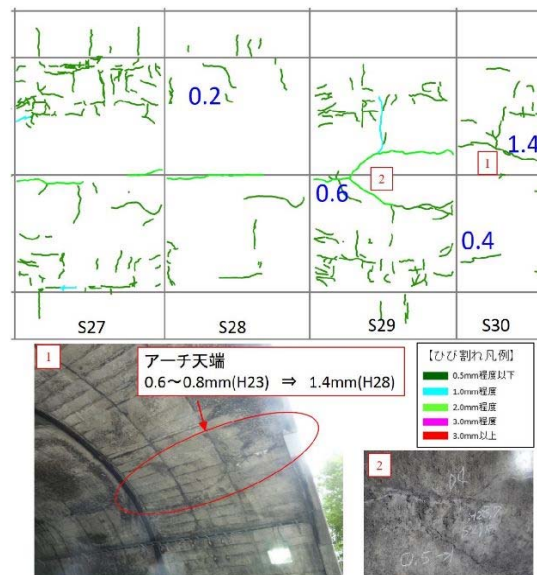


図 3.4.6 辰野トンネルの変状状況

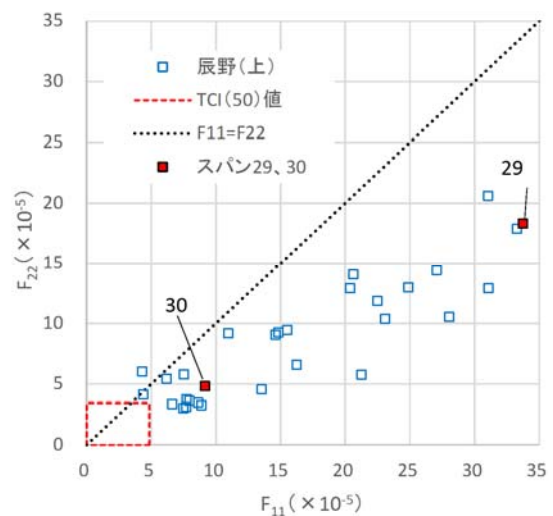


図 3.4.7 辰野トンネルの  $F_{11}$  と  $F_{22}$  の関係

生しているスパン29、30は、 $F_{11}$ の方が $F_{22}$ に比べ値が大きく、縦断方向ひび割れが発生する分布となった。

詳細点検および調査にて外力性変状の可能性が低いと判定したスパンで、TCI(50)値領域よりも大きな値を示すスパンが存在する。これは、覆工撮影画像からのひび割れ抽出によるひび割れ幅に対し、今回現地調査時のひび割れ幅が小さい傾向であり、外力変状で無いと想定されるが、覆工撮影画像からのひび割れ抽出時に過大なひび割れ幅としたことから、TCIの値が大きくなったと考えられる。

#### 3.4.4 分析結果

$F_{11}$ 、 $F_{22}$ を用いてTCIと変状原因の関係を分析した。その結果、外力性変状の可能性のある一本松トンネル、御園トンネル、辰野トンネルは、外力性変状の原因を $F_{11}$ と $F_{22}$ の関係から推定できることがわかった。また、変状原因が内因によるものであると想定されるトンネルは、TCIがTCI(50)値領域内に含まれるスパンが多く、提案した閾値は妥当であると判断される。

しかし、内因のなかでも地山の背面や支保工の拘束によって発生するひび割れについては、TCI(50)値領域外となり、外部拘束によるひび割れの判定を、TCI(50)値領域で整理することが困難な場合がある。内因による変状と確認されたトンネルにおいても、同様にTCI(50)値領域外に存在するスパンが確認され、特に矢板工法のトンネルにおいてはそれが顕著なトンネルが存在する結果となった。

また、NEXCOのトンネル詳細点検の支援として活用している覆工画像撮影において、覆工画像からひび割れを抽出するための画像精度等が問題であることがわかった。

#### 3.4.5 変状原因推定手法に関する検討のまとめ

NEXCOが管理するトンネルを対象に、矢板工法(上半先進)、矢板工法(側壁導坑)、山岳工法の3工法に分類し、TCI(50)値領域により工法ごとの標準的なひび割れを抽出した。

外力性変状と想定される一本松トンネル、御園トンネル、辰野トンネルは、 $F_{11}$ と $F_{22}$ の関係から、外力性変状の可能性を捉えられることがわかった。また、変状原因が内因と想定されるトンネルは、TCIがTCI(50)値領域内に含まれるスパンが多く、変状が小さい、あるいは、変状に特徴がないものでもTCIを用いて変状原因を推定できると考えられる。

しかし、内因のなかでも地山の背面拘束や支保工の拘束によって発生するひび割れ発生形態については、TCI(50)値領域内から外れる結果となり、TCI(50)値領域に加えてさらなる評価項目の検討が必要であるとする。外因による変状においても、ひび割れ幅の変動による変状進行性を加味した変状原因推定の評価が必要である。

また、現在NEXCOのトンネル詳細点検にて実施している覆工画像撮影を用いたひび割れ展開図の作成において、画像の精度および画像からひび割れ幅抽出時の個人差においては、今後の検討課題である。

### 3.5 外力作用のひび割れと断面変形の相関把握

変状原因推定手法に関する検討の結果、TCIの縦断方向成分 $F_{11}$ と横断方向成分 $F_{22}$ が工法別に整理したTCI(50)値領域内にある覆工スパンのひび割れについては、標準的なひび割れとして内因によってひ

び割れが発生した可能性が高い。一方で外因によるひび割れについては、TCIの縦断方向成分 $F_{11}$ と横断方向成分 $F_{22}$ をグラフ化し、覆工スパンにおける各成分でのプロットにおいて、TCI(50)値領域外でかつ、プロット位置により外力作用による変状原因の推定が可能である。しかし、検証結果において、内因によって発生したひび割れでもTCI(50)値領域外に存在するトンネルが存在し、外力作用の可能性が否めない。

そこで、TCIの工法別トンネルのTCI(50)値領域および $F_{11}$ と $F_{22}$ の関係によるひび割れ原因推定に加えて、内因と外因を区分する指標として、外力作用におけるトンネル内空断面の変形に着目し、内空断面計測を実施することで区分できると考え、本研究で外力作用により変状しているトンネルを対象に、ひび割れ状況と断面変形の相関について検証を実施した。

断面変形を把握するうえでは、内空断面をコンバージェンスメジャーによる測量や反射プリズムを用いた光波測距儀などで内空断面を計測するが、本研究では、交通規制が伴わない、断面変形把握が可能な走行型レーザー計測を採用することとした。

### 3.5.1 走行計測技術の概要

#### (1) 走行型レーザー計測

この計測手法は、「新都市社会技術融合創造研究会 走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化研究プロジェクト」において実用化検討が行われ、トンネル点検や調査においての計測実績も多い手法である。

本研究で採用する走行型レーザー計測は、安田ら<sup>3)</sup>、重田ら<sup>4),5)</sup>が研究している走行型計測車両(MIMM-R)とする。

以下に概要を述べる。

#### 1) 走行型計測車両(MIMM-R)の特徴

通常走行が可能であり、交通規制が不要のため一般交通への支障回避、安全性の向上が図れる。

#### 2) 画像計測(MIS) : JPEG形式

近接目視点検に匹敵する高い検出精度を確保し、変状に位置情報(3D座標)を付与することで、客観的なデータが取得可能である。また、進行性把握に有効であり、客観性の向上が図れる。

#### 3) レーザー断面計測(MMS) : CAD、JPEG形式

図3.5.2にあるようにひび割れ分布とコンター図を重ねることで、断面変形モードによる評価により変状原因の推定が可能となる。

#### 4) 非接触レーザー探査(MRS) : CAD、JPEG形式

非接触レーザー探査(MRS)により、図3.5.3にあるように覆工巻厚不足箇所、背面空洞箇所の有無を把握、突発性崩壊に対する安全性の評価が可能である。

ただし、対策必要箇所は、従来の接触型レーザー探査等で面的な調査を別途実施する必要がある。

本研究においては、外力による変形モードの把握を目的としていることから、本機能については採用しないこととする。



図 3.5.1 走行型計測システム (MIMM-R)

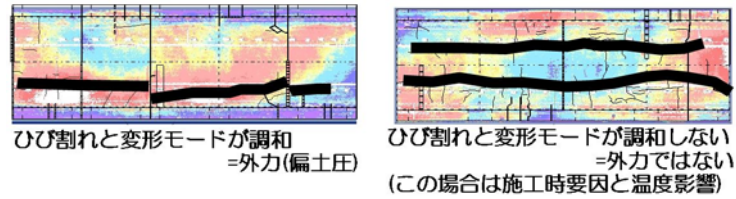


図 3.5.2 走行型計測による変状原因の推定例

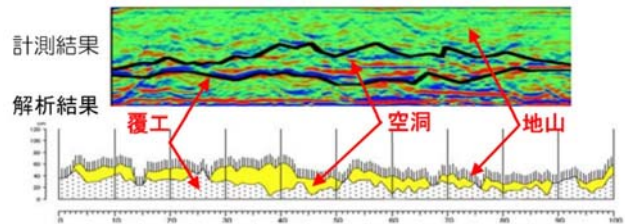


図 3.5.3 走行型計測による巻厚・空洞の推定例

## (2) 変形モード解析

変形モード解析は、新都市社会技術融合創造研究会の「走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化検討に関する研究 報告書、平成25年3月」<sup>6)</sup> の手法を用いて解析を実施する。

また、施工時に問題となった箇所などで変形の有無を確認する。

## (3) 変形モード算出方法

変形モード算出は、はじめに、解析を行うため、不要なデータの除去やスパン分けを行う。次に、**図 3.5.4**にあるようにトンネル中心軸を設定し、その中心軸に対してトンネルの推定出来形断面を求め、推定出来形断面とレーザー計測結果の点群との差分によりコンター図を作成する。

### 1) 平均断面（推定出来形断面）の設定

レーザー計測で得られる点群データは単なる三次元の座標データでしかない。このため、トンネルの変形状態を判断するためには、基準となるトンネル平均断面を設定し、その面に対して点群データがどのような位置にあるかをコンター図で示し視覚化する必要がある。

はじめに、トンネル断面の中心軸を算出する。求められた中心軸に垂直な面を投影面として点群を投影する。投影された点群を投影面の中心より見た角度方向に平均化処理を行い、できた形状を推定出来形とする。

### 2) 中心軸の設定

トンネル覆工の変形は、各スパン内で局所的に変形を起こしているものと、数スパンにわたって覆工

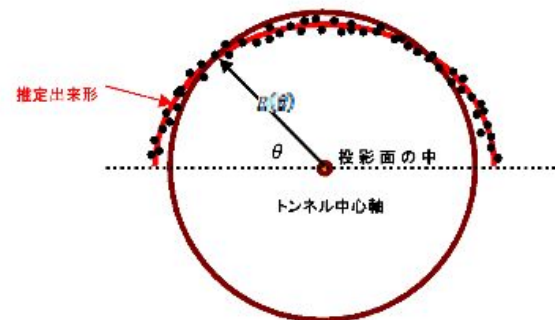


図 3.5.4 推定出来形の計算



が変形、移動するものがある。これらの変形を抽出するためには、トンネル中心軸を2種類設定する必要がある、図3.5.5に示すスパン毎中心軸とトンネル全体中心軸（平滑化面）とがある。

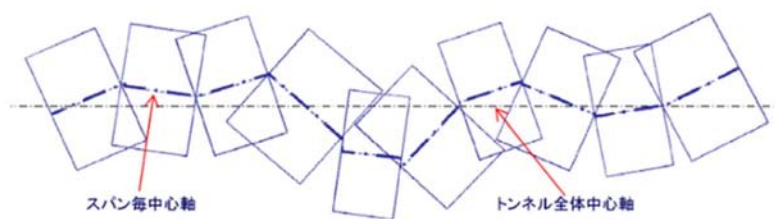


図 3.5.5 中心軸イメージ

### 3) 変形モード算出

トンネル覆工面の凹凸状態（平均断面と実測点群との差分）を等高線上に色分けして表示したコンター図から、覆工がどのように変形しているかを知ることができる。コンター図は、図3.5.6にある変形モード毎に作成し、以降にそれぞれの特徴を示す。

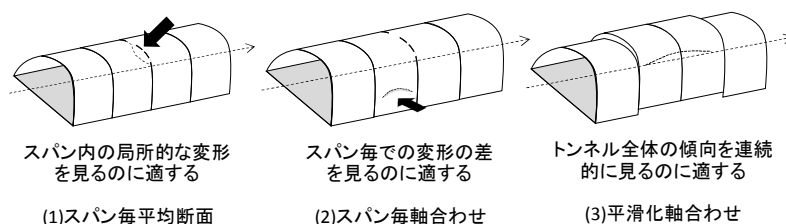


図 3.5.6 変形モード

#### ① スパン毎平均断面

スパン毎平均断面は、各スパンで求めた平均断面を、スパン中心軸に沿ってスライドさせてできる推定出来形から、レーザー計測結果を色分けしたものである。これにより、スパン内の局所的な変形を見ることができる。

#### ② スパン毎軸合わせ

スパン毎軸合わせは、トンネル全体で求めた平均断面を、各スパン中心軸に沿ってスライドさせた推定出来形から、レーザー計測結果を色分けしたものである。これにより、各スパンでの差を見ることができる。

#### ③ 平滑化軸合わせ

平滑化軸合わせは、トンネル全体で求めた平均断面を、平滑化軸に沿ってスライドさせた推定出来形から、レーザー計測結果を色分けしたものである。これにより、トンネル全体の傾向を連続的に見ることができる。

### 4) コンター図の評価

レーザー計測で得られる点群データは単なる三次元の座標データでしかないため、基準となるトンネル平均断面を設定し、その面に対して点群データがどのような位置にあるかをコンター図で示し視覚化することで、変形モードを把握する。

変形コンター図の色は、図3.5.7にあるように赤色であるほど内空側へ変位しており、青色であるほど地山側へ変位していることを示す。軸座標（XY）は、軸座標が平滑化軸との水平差を示しており、水平方向の断面のずれを示している。

軸座標 (H) については、軸座標が平滑化軸との高さ差、すなわち縦断方向の断面のずれ (表示色 : orange) と、道路面縦断変位 (表示色 : red) を示している。この色調の各コンター図からトンネルの形状 (変形、凹凸) の傾向を読み取り、軸座標と平滑軸とのズレを加味して、変形の原因を推定する。

まず、図 3.5.8 (2) (5) のコンター図に着目し、色調の変化 (凹凸モード) が同調しているか、していないかを判別する。

色調が同調している場合、トンネルの変形が示唆され、(3) (4) 平滑化軸からの水平差・高低差や、ひび割れ展開図等の情報を加味して、外力作用の可能性を精査する。

図 3.5.8 の事例では (3) (4) に示される軸ズレが少なく、展開図から縦断方向の貫通ひび割れが確認されていることから、外力作用の可能性が高いと判断する。

表 3.5.1 に変状原因別コンター図の解析結果イメージを示す。

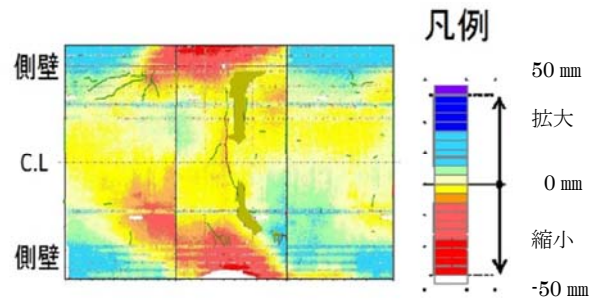


図 3.5.7 色調の凡例

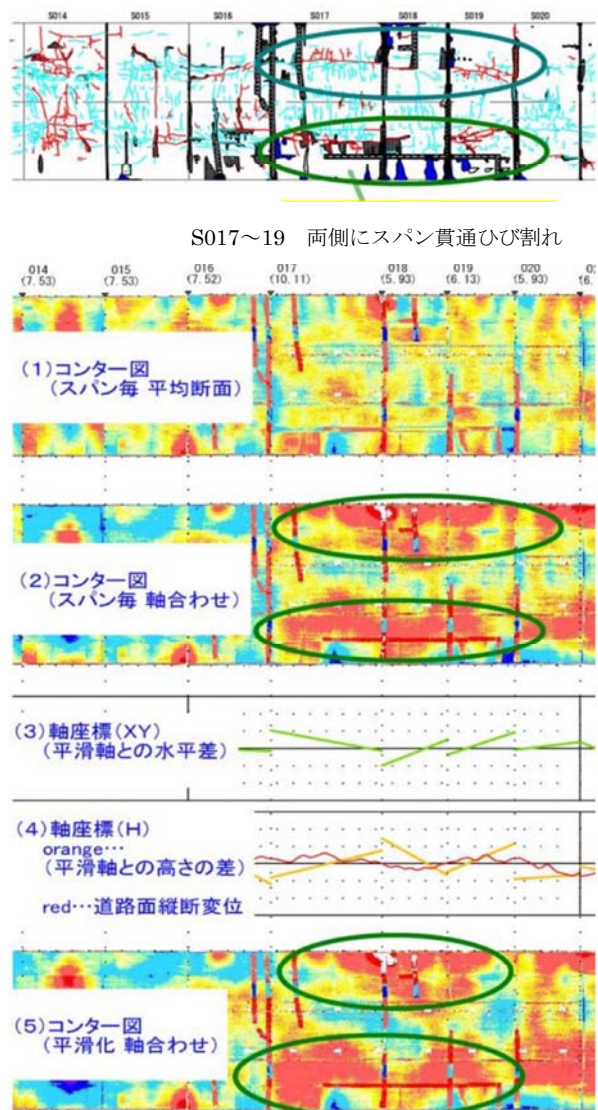


図 3.5.8 変状トンネルの事例

表 3.5.1 変状原因別コンター図の解析結果イメージ

| 外力作用    | 覆工変状イメージ | 建設工法               | 平滑化軸合わせ | スパン軸合わせ |
|---------|----------|--------------------|---------|---------|
| 緩み土圧 1  |          | 矢板工法<br>or<br>NATM |         |         |
| ②緩み土圧 2 |          | 矢板工法               |         |         |
| ③側圧     |          | 矢板工法<br>or<br>NATM |         |         |
| ④塑性圧    |          | 矢板工法<br>or<br>NATM |         |         |
| ⑤偏圧     |          | 矢板工法<br>or<br>NATM |         |         |



### 3.5.2 ひび割れと断面変形の相関検証

検証するトンネルについては、前章で外力作用のひび割れが発生しているとして検討を行った一本松トンネル、御園トンネル、辰野トンネルを対象とした。検証結果を以下に示す。

#### (1) 一本松トンネル

断面計測結果を図3.5.9に示す。側溝の閉口が確認されているスパン105付近は、コンター図を見ると内空側へ変形しており、断面計測で変状状況を再現できていることがわかる。さらに、同スパンの路盤隆起は、道路面縦断変位で再現されていることがわかる。また、コンター図において、側壁部および天端中央部でひび割れ発生箇所と断面変形箇所が一致し、外力が作用したことでひび割れが発生した可能性がある。

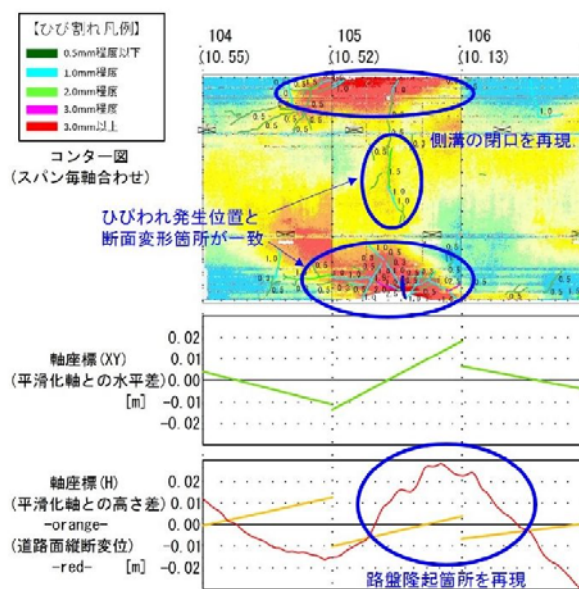


図 3.5.9 一本松トンネル断面計測結果

#### (2) 御園トンネル

断面計測結果を図3.5.10に示す。スパン43～47では、レーザー計測により縦断変位が確認されており、特にスパン45、46では水平方向のズレも確認されている。コンター図を確認すると、横断方向ひび割れが平行に複数発生している箇所と断面変形しており、外力に起因する変状であると考えられる。

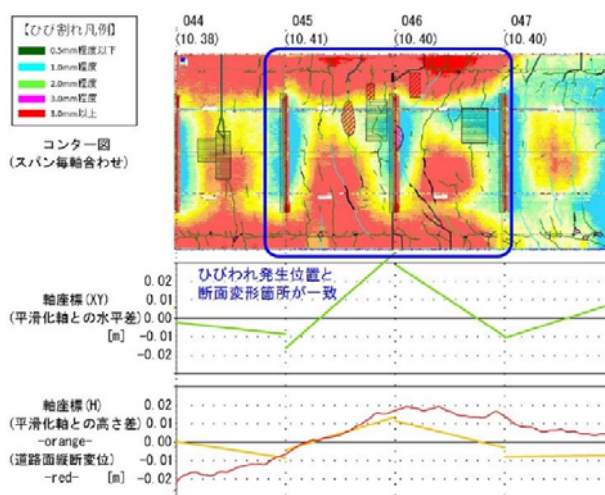


図 3.5.10 御園トンネル断面計測結果

#### (3) 辰野トンネル

断面計測結果を図3.5.11に示す。レーザー計測により、ひび割れ発生箇所と断面変形モードは一致した。しかし、ひび割れ発生箇所以外でも断面が変形したモードとなった。これは、NATMで施工されたトンネルは、覆工打設時に移動式型枠を用いるため、全線で断面のズレが少なくなるが、辰野トンネルは、矢板工法で施工され、覆工打設に組立式型枠を用いているためである。この影響により、一つ一つの組立てによる断面のズレにより、平均断面算出



にブレが生じるため、外力性変状でない箇所にも変形したモードが算出される結果となった。

### 3.5.3 外力作用のひび割れと断面変形の相関把握のまとめ

外力性変状の可能性のあるトンネルについて、走行型レーザー計測により断面形状計測を実施し、断面変形とひび割れ状況に相関があることがわかり、外力作用によるひび割れであることをあらためて確認できた。ただし、覆工打設に組立式型枠を用いている場合、平均断面算出にブレが生じるため、外力性変状でない箇所にも変形したモードが算出される結果となることがわかり、今後の課題についても把握することができた。

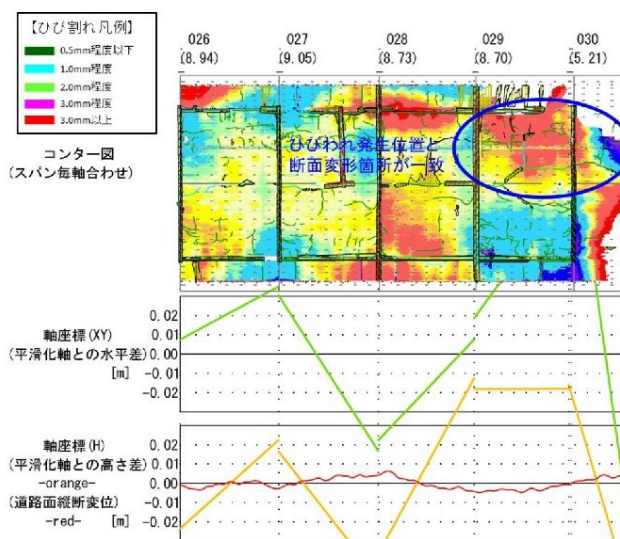


図 3.5.11 辰野トンネル断面計測結果

### 3.6 本章のまとめ

NEXCO が管理するトンネルのうち、381 トンネルの点検結果を収集、分析したうえで各トンネルの覆工スパン単位で TCI を算出し、矢板工法(上半先進)、矢板工法(側壁導坑)および山岳工法におけるひび割れ形態の把握、現地調査による覆工厚、背面空洞とひび割れの関係について検討を実施した。また、内因および外力性変状の外因によるひび割れ形態の抽出について、TCI の縦断方向成分、横断方向成分である  $F_{11}$ 、 $F_{22}$  を用いて変状原因推定の検討を行った。

さらには、外力変状の可能性のあるトンネルについて、走行型レーザー計測によりひび割れと断面変形の相関について確認を行った。

建設工法におけるひび割れ形態の把握については、TCI の縦断方向成分、横断方向成分である  $F_{11}$ 、 $F_{22}$  の分析において、建設工法ごとのひび割れの特徴を定量的に把握できた。一方で、覆工の材料分離（粗骨材の偏り）とひび割れの関係性は不明瞭であった。覆工厚、背面空洞とひび割れの関係については、覆工厚が薄い箇所は、縦断方向ひび割れが発生、背面空洞箇所においては斜め方向ひび割れが発生する傾向が把握できた。既設覆工のひび割れ発生の原因推定については、TCI を用いた TCI(50)値領域の設定が核となることから、さらなる詳細点検結果の収集、分析を実施していくこととするが、覆工厚の違いおよびトンネル延長によっては、外気の影響を受けやすくひび割れが発生しやすいため、これらの条件についても考慮すべきである。また、矢板工法のトンネルについては、覆工コンクリートの打設手順が複雑で打設方法についても特殊なものがあり、覆工背面の空洞状況等と相まって様々なひび割れが発生する可能性がある。そのた

め、建設時および供用時の坑内環境や建設工法における覆工コンクリートの打設手順等を条件とした、ひび割れ進展解析の方向から変状原因の推定を次章以降で検討する。

#### 【参考文献】

- 1) たとえば、中野清人、佐伯徹、重田佳幸、大場論、西村和夫：トンネルの変状評価・原因推定へのひび割れ指数（TCI）の適用可能性について、トンネル工学報告集、20巻、 pp. 239-243、2010.
- 2) 中野清人、佐伯徹、重田佳幸、大場論、西村和夫：トンネルの変状評価・原因推定へのひび割れ指数（TCI）の適用可能性について、トンネル工学報告集、20巻、 pp. 239-243、2010.
- 3) 谷川征嗣、安田 亨、田近宏則、石田智朗：変状トンネルにおける新たな調査手法に関する検討、トンネル工学報告集、20巻、I-35、pp. 245-250、2010.
- 4) 重田佳幸、前田佳克、水野希典、海瀬忍、前田洸樹、山本秀樹、安田亨：走行型計測による既設トンネル覆工の外力変状評価、トンネル工学報告集、26巻、 I-21、2016.
- 5) 水野希典、前田佳克、海瀬忍、前田洸樹、重田佳幸、松岡茂、西村和夫：既設トンネル覆工の変状原因推定手法に関する検討、土木学会論文集 F1、73巻、pp. I\_1-I\_9、2017
- 6) 新都市社会技術融合創造研究会 道路トンネル健全性評価技術研究プロジェクト：走行型計測技術による道路トンネルの健全性評価の実用化研究 研究成果報告書、2013. 2

## 第4章 坑内環境調査、試験体暴露試験、室内試験

### 4.1 坑内環境が物性値へ与える影響の把握

#### 4.1.1 目的

覆工コンクリートの収縮等の内因により発生するひび割れは、トンネル施工時の坑内環境の影響を受けることが想定される。そのため、トンネル施工時の坑内環境が覆工コンクリートの収縮等へ与える影響を把握することを目的に、実際のトンネルで坑内環境を測定するものである。なお、トンネルの坑内環境は、トンネルの貫通の前後で異なることも想定されたことから、貫通前の掘削中のトンネルと貫通後のトンネルで坑内環境の経時変化を測定する。

また、環境条件と水分移動距離の違いがコンクリートの収縮特性へ及ぼす影響を実験的に把握するために、坑内環境を測定したトンネル内にコンクリートの供試体を暴露し、収縮ひずみの経時変化を測定する。さらに、コンクリート自体の収縮特性を把握するために、恒温恒湿室でも収縮試験を実施する。

#### 4.1.2 坑内環境に関する測定

##### (1) 測定概要

トンネルの坑内環境の測定は、貫通の前後および坑口からの距離による差異を確認するため、既に貫通している延長 199m の中山トンネルと、当時掘削中で未貫通の延長 1,361m のにしごうトンネルの2トンネルで実施する。測定器を用いて、温度、相対湿度（以下、「湿度」という。）および風速を測定する。測定箇所については、表 4.1.1 のとおりとする。

表 4.1.1 測定項目および測定箇所

| 測定項目           | 測定条件                   | 測定箇所   |                          |
|----------------|------------------------|--------|--------------------------|
| 温度<br>湿度<br>風速 | 貫通後のトンネル<br>(中山トンネル)   | 坑口部    | 坑口から約 20m の側壁部分(高さ 1.5m) |
|                |                        | トンネル坑内 | 坑口から 50m の側壁部分(高さ 1.5m)  |
|                |                        |        | 坑口から 100m の側壁部分(高さ 1.5m) |
|                | 貫通前のトンネル<br>(にしごうトンネル) | 坑口部    | 坑口から約 20m の側壁部分(高さ 1.5m) |
|                |                        | トンネル坑内 | 坑口から 100m の側壁部分(高さ 1.5m) |
|                |                        |        | 坑口から 700m の側壁部分(高さ 1.5m) |

##### (2) 測定結果

###### 1) 貫通後のトンネル（中山トンネル）

坑内温度の月平均値は、冬季に 0℃程度、夏季に 23℃程度となり、季節によって変化していることが確認された。これらの温度変化は、図 4.1.2 に示すように当該地域の外気温の変化と同様の傾向であった。測定位置による影響を見ると、坑内温度は、坑口部(坑口から 20m 程度)、坑口から 50m および坑口から 100m のいずれの測定位置も同程度であった。

坑内湿度は、日および日間での変動幅が比較的大きくなったが、月平均値を見るといずれの測定位置も 6 月～3 月は 80～90%と一定で、4 月と 5 月は若干低下して 70%程度になったが年間を

通じて高い数値であった。これらの湿度変化は、図 4.1.2 に示すように当該地域の湿度の変化と同様の傾向であった。

坑内風速は、6月～9月が月平均値で0.5m/s程度(最大3.7m/s)、その後10月～5月が1.5m/s程度(最大9.2m/s)となり、時期によって異なった。また、図 4.1.2 に示す当該地域の風速の変化とは異なる傾向であった。これは、当該トンネルの覆工コンクリートの施工が9月まで行われており、トンネル坑内にセメント等が存在したことで、風が流れにくくなったことによる影響と推察される。ただし、覆工コンクリートの施工期間も貫通後の風速は、後述する貫通前のトンネルと比較すると大きくなっており、少なからず貫通の影響を受けていると考えられる。なお、測定位置による差異は小さかった。

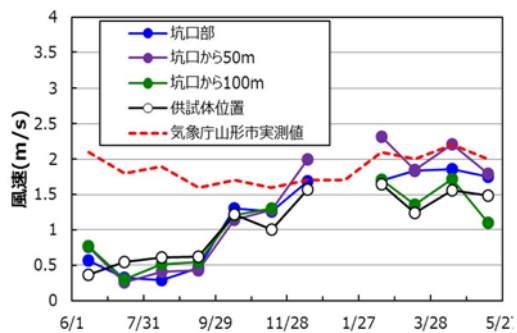
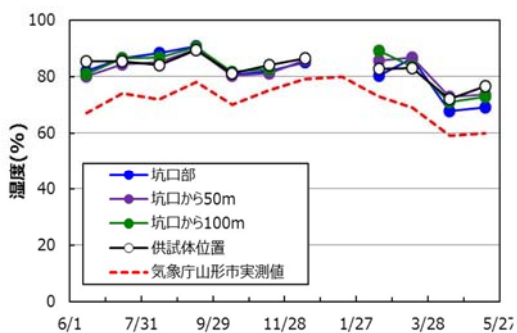
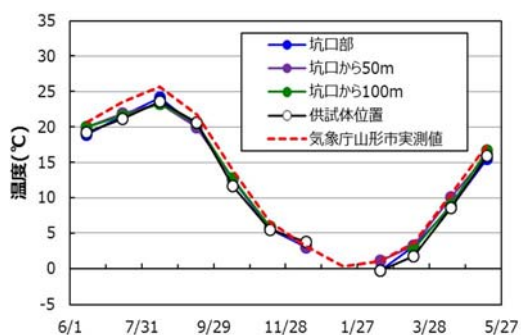


図 4.1.2 中山トンネルの坑内環境の測定結果の月平均値(温湿度・風速計)

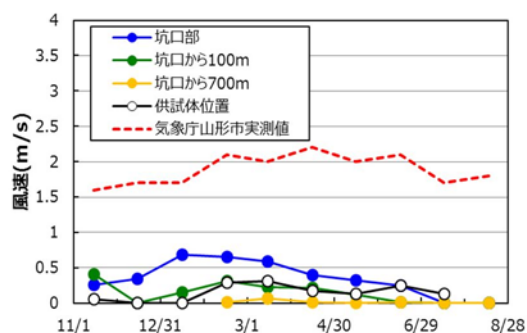
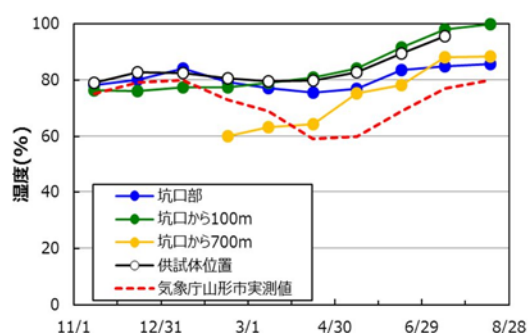
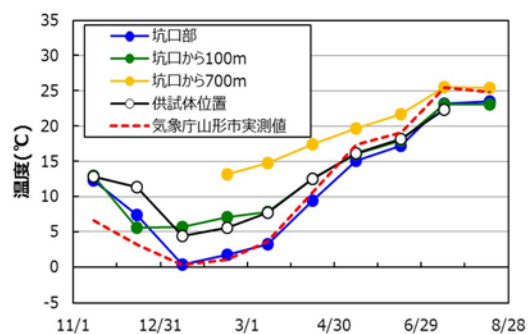


図 4.1.3 にしごうトンネルの坑内環境の測定結果の月平均値(温湿度・風速計)

## 2) 貫通前のトンネル（にしごうトンネル）

にしごうトンネルは、掘削中であるため、常時換気が行われていた。換気方法は、希釈封じ込め方式で、切羽で発生した粉塵を、坑外からの送風によって希釈し、粉塵が後方に飛散するのを防ぐための集塵機が設置されていた。具体的には、送風機によって風量 1,864m<sup>3</sup>/min で、集塵機によって風量 2,278m<sup>3</sup>/min で換気が行われていた。

坑内温度は、図 4.1.3 に示すように季節によって変動していることが確認された。ただし、坑内温度は、測定位置によって異なり、坑口からの距離が遠い位置ほど高くなった。また、この傾向は冬季ほど大きくなった。これより、貫通前のトンネルの坑内温度は、坑口からの距離が遠い位置ほど、トンネル坑外の外気温の影響を受けにくくなっていたものと考えられる。

坑内湿度は、坑口から 700m の測定位置を除き、測定期間中の月平均値で 75～85%程度となり、変動も非常に小さかった。測定位置による影響を見ると、坑口から距離が遠い位置ほど坑内湿度は小さくなる傾向が見られた。

坑内風速については、換気量として、風速 0.3m/s 以上となる送風が行われていたが、測定位置の坑内風速は、月平均値で 0.3m/s 程度以下で、貫通後の中山トンネルと比較しても小さくなった。また、坑口からの距離が遠い位置ほど風速は小さくなった。

以上の結果より、延長 200m 程度の貫通後のトンネルの坑内環境は、通風によってある程度一様になると考えられ、坑口からの距離による差異は小さいことが判った。

一方、貫通前のトンネルの坑内環境は、換気を行っていても通風が小さいために、坑口に近いほどトンネル坑外の環境の影響が大きく、逆に坑口から遠い位置ではトンネル坑外の影響が小さく、坑口からの距離によって差異があることが判った。

### 4.1.3 供試体物性値測定

#### (1) 作製供試体

実際に使用する材料および環境変動によって生じる自由収縮ひずみを解析によって検証することを目的として、表 4.1.2 に示すように供試体を作製した。

環境変動に応じた自由収縮ひずみの把握を目的とする供試体は、各トンネル坑内で作製し、打設後 18 時間経過した時点で脱型して坑内に静置し、埋め込み型ひずみゲージで収縮ひずみを測定した。

一方、使用材料でのコンクリート自体の収縮特性の把握を目的とする供試体

表 4.1.2 供試体諸元

| 供試体名    | 形状寸法【mm】    | 粗骨材の最大寸法【mm】 | セメントの種類 | 脱型後の存置場所                    |
|---------|-------------|--------------|---------|-----------------------------|
| AA-□100 | 100×100×400 | 20           | N       | 貫通後のトンネル<br>(中山トンネル)        |
| AA-□150 | 150×150×530 | 40           | N       |                             |
| A2-□100 | 100×100×400 | 20           | N       | 貫通前のトンネル<br>(にしごうトンネル)      |
| A3-□150 | 150×150×530 | 40           | N       |                             |
| □150    | 150×150×530 | 40           | NとBB    | 20°C RH60%                  |
| JIS□150 |             |              | NとBB    | 7日間<br>水中養生後<br>20°C, RH60% |
| □100    | 100×100×400 | 20           | NとBB    | 20°C, RH60%                 |
| JIS□100 |             |              | NとBB    | 7日間<br>水中養生後<br>20°C, RH60% |

は、材齢 18 時間で脱型して、一つは 20℃、RH60%の恒温恒湿庫内に、もう一つは JIS A 1129 モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法に準じて 7 日間標準水中養生を行った後、20℃、RH60%の恒温恒湿庫内に存置し、収縮ひずみを測定した。

なお、供試体の粗骨材の最大寸法は、20mm と 40mm の 2 種類とし、セメントは、普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種の 2 種類とした。

各トンネル内および恒温恒湿庫内に存置した供試体の粗骨材の最大寸法およびセメント種別による配合を表 4.1.3 に示す。

表 4.1.3 供試体の配合

| 種類         | W/C (%) | s/a (%) | air (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |         |         |           |           |           |
|------------|---------|---------|---------|--------------------------|-----|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
|            |         |         |         | W                        | C   | S① (陸砂) | S② (砕砂) | G① (2010) | G② (1505) | G③ (4020) |
| 21-15-40N  | 59.4    | 45.4    | 4.5     | 171                      | 288 | 447     | 366     | 297       | 396       | 298       |
| 21-15-20N  | 59.3    | 46.7    | 4.5     | 178                      | 300 | 453     | 371     | 572       | 382       |           |
| 21-15-40BB | 58.3    | 45.2    | 4.5     | 169                      | 290 | 443     | 362     | 298       | 397       | 298       |
| 21-15-20BB | 58.3    | 45.7    | 4.5     | 176                      | 302 | 442     | 361     | 580       | 387       |           |

(2) 貫通後のトンネル (中山トンネル)

1) 圧縮強度

供試体の製作に用いたコンクリートの円柱供試体の圧縮強度の試験結果を表 4.1.4 に示す。標準養生を行った供試体の圧縮強度は、いずれも呼び強度を有する結果であった。しかしながら、材齢 18hr で脱型し、その後トンネル坑内に放置した現場養生を行った供試体は、21-15-20N 以外でいずれも呼び強度を下回る結果となった。

本研究において、養生効果を確認する目的で各種養生による圧縮強度への影響を検証しており、その時の試験結果では打設後 18hr で脱型して乾燥状態(温度 20℃、湿度 60%)の環境に放置した場合の圧縮強度は、標準養生(28 日間の水中養生)したものの 72~83%となっており、普通セメントを用いた場合には 83%であった。中山トンネル坑内に存置した供試体の圧縮強度は、標準養生に比べて普通セメントで 84~85%、高炉セメント B 種で 73~77%であった。高炉セメント B 種についての養生効果を確認する目的で実施した圧縮強度検証は行っていないが、中山トンネルでの得られた標準養生と現

表 4.1.4 圧縮強度の試験結果

| 配合         | 標準水中 (N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      | 現場養生 (N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      |
|------------|---------------------------|------|------|------|---------------------------|------|------|------|
|            | No.1                      | No.2 | No.3 | 平均   | No.1                      | No.2 | No.3 | 平均   |
| 21-15-20N  | 25.8                      | 25.5 | 25.2 | 25.5 | 21.8                      | 21.8 | 21.9 | 21.8 |
| 21-15-40N  | 24.0                      | 24.5 | 24.9 | 24.5 | 20.6                      | 20.3 | 20.9 | 20.6 |
| 21-15-20BB | 24.8                      | 25.1 | 25.2 | 25.0 | 19.5                      | 19.9 | 18.8 | 19.4 |
| 21-15-40BB | 23.1                      | 22.6 | 23.0 | 22.9 | 16.1                      | 17.5 | 16.9 | 16.8 |

場養生との強度差は同様であり、高炉セメント B 種でもセントル脱型後の初期養生が重要であることを示唆している。

## 2) 収縮ひずみ

AA-□100 と AA-□150 の材齢と全ひずみの関係を図 4.1.4 に示す。ひずみは、以後、符号が (-) の場合が収縮を、(+) の場合が膨張を示す。

AA-□100 と AA-□150 の全ひずみは、図 4.1.4 に示したようにトンネル坑内の温湿度の変化によって増減しながら材齢に伴って収縮ひずみが増大する傾向が見られた。その収縮ひずみの増加量は 120 日経過した以降は、頭打ちとなっている。全ひずみは、脱型から 321 日(5/9)の時点で最も収縮ひずみが大きくなり、AA-□100 が-862 $\mu$ 、AA-□150 が-858 $\mu$  となった。また、AA-□100 に比べ AA-□150 が緩やかに収縮する傾向を示したが、材齢の経過とともに互いの差は小さくなった。AA-□100 と AA-□150 では、コンクリート中の水分移動距離が異なるため、収縮ひずみに違いが生じると想定されたが、図 4.1.4 では収縮ひずみに違いが見られなかった。これは、後述する恒温恒湿条件下と同様にコンクリート表面からの水分逸散に大きく影響を与える坑内湿度の変化が少ないためと想定されるが、計測結果のみでは収縮ひずみに違いがない原因は明確でない。

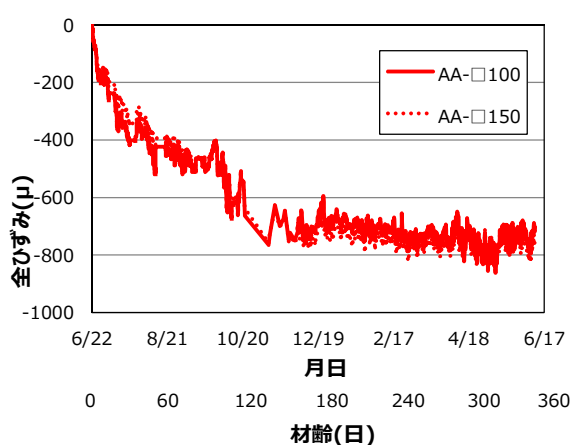


図 4.1.4 材齢と全ひずみの関係

## (3) 貫通前のトンネル (にしごうトンネル)

### 1) 圧縮強度

供試体の製作に用いたコンクリートの円柱供試体の圧縮強度の試験結果を表 4.1.5 に示す。

標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度は、いずれも呼び強度を有する結果であった。しかしながら、材齢 18 時間で脱型し、その後トンネル坑内に存置して現場養生を行った供試体は、いずれも呼び強度を下回る結果となった。

今回、トンネル坑内に存置した供試体の圧縮強度は、養生期間中の坑内温度(平均 13℃程度)が低かったことに起因すると考えられるが、標準養生に比べてさらに低下して 21-15-20N

表 4.1.5 圧縮強度の試験結果

| 配合        | 標準水中(N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      | 現場養生(N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      |
|-----------|--------------------------|------|------|------|--------------------------|------|------|------|
|           | No.1                     | No.2 | No.3 | 平均   | No.1                     | No.2 | No.3 | 平均   |
| 21-15-20N | 26.7                     | 26.1 | 27.2 | 26.7 | 17.4                     | 16.9 | 17.3 | 17.2 |
| 21-15-40N | 22.8                     | 23.1 | 22.5 | 22.8 | 16.1                     | 16.2 | 16.1 | 16.1 |



で 64%、21-15-40N で 71%となった。これより、冬季では、セントル脱型後の初期養生が重要であることが判る。

## 2) 収縮ひずみ

A2-□100 と A3-□150 の材齢と全ひずみの関係を図 4.1.5 にそれぞれ示す。A2-□100 と A3-□150 の全ひずみは、図 4.1.5 に示すようにトンネル坑内の温湿度の変化によって増減しながら材齢に伴って収縮ひずみが増大する傾向が見られた。全ひずみは、脱型から 60 日まで急増し、その後は緩やかに増加して 184 日(5/3)の時点で最も収縮ひずみが大きくなり、A2-□100 で-722 $\mu$ 、A3-□150 で-608 $\mu$ となった。その後、収縮ひずみが減少する傾向となった。

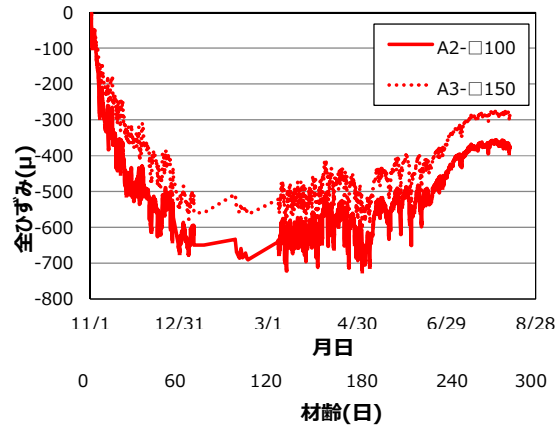


図 4.1.5 材齢と全ひずみの関係

## (4) 恒温恒湿庫内に存置した供試体

### 1) 圧縮強度

水中養生を行った試験体の圧縮強度試験結果を表 4.1.6 に示す。圧縮強度については、呼び強度 21N/mm<sup>2</sup> を全て確保している。高炉セメント B 種を用いた場合には、材齢 7 日の段階では普通セメントより圧縮強度は低い、その後の強度発現は早く、材齢 28 日では普通セメントより強度が大きくなっている。

一方、粗骨材径の影響については、最大骨材径 40mm ものが高炉セメント B 種、普通セメントともに圧縮強度が 5~6%小さくなっている。

表 4.1.6 圧縮強度の試験結果

| 配合         | $\sigma_f$ (N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      | $\sigma_{28}$ (N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      |
|------------|---------------------------------|------|------|------|------------------------------------|------|------|------|
|            | No.1                            | No.2 | No.3 | 平均   | No.1                               | No.2 | No.3 | 平均   |
| 21-15-20N  | 23.2                            | 23.3 | 23.6 | 23.4 | 30.3                               | 30.9 | 30.6 | 30.6 |
| 21-15-40N  | 22.5                            | 21.5 | 22.1 | 22.0 | 28.2                               | 28.8 | 28.7 | 28.6 |
| 21-15-20BB | 19.4                            | 19.6 | 19.1 | 19.4 | 32.3                               | 31.8 | 32.2 | 32.1 |
| 21-15-40BB | 18.4                            | 18.2 | 18.0 | 18.2 | 30.5                               | 30.8 | 30.3 | 30.5 |

### 2) 収縮ひずみ

恒温恒湿庫内に存置した供試体の材齢とひずみの関係を図 4.1.6 に示す。なお、覆工コンクリートを模擬して 18 時間で脱型した後、20°C、RH60%の恒温恒湿庫内に存置した供試体のひずみは、脱型時からの変化で表した。

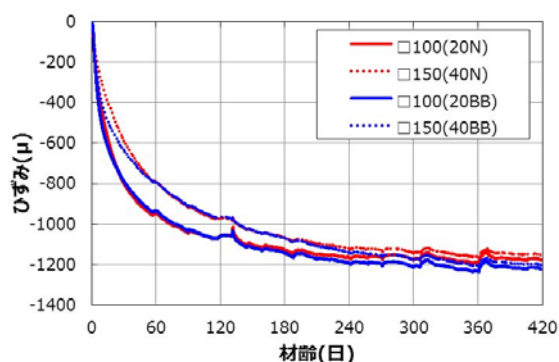
脱型後、直ちに恒温恒湿庫内に存置した供試体について、粗骨材の最大骨材寸法および供試体寸法の違いを見ると、□100 に比べて□150 の収縮ひずみは、緩やかに増大する傾向を示した。ただし、材齢の経過とともに互いの収縮ひずみの差は小さくなり、材齢 1 年程度では 20 $\mu$  程度

の差となった。これより、今回の試験の範囲では、粗骨材の最大骨材寸法と供試体寸法の違いが材齢1年程度の収縮ひずみに及ぼす影響は小さいと考えられる。

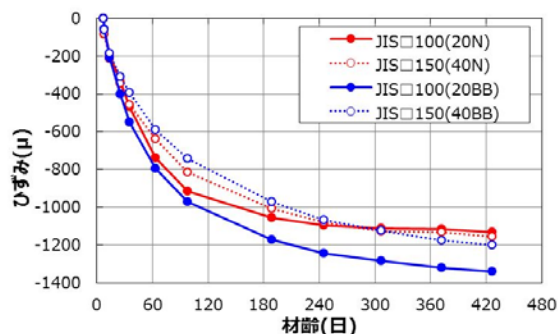
セメントの種類の影響を見ると、収縮ひずみは、材齢の初期段階では普通セメントに比べて高炉セメント B 種で若干大きくなったが、材齢 30~60 日程度で同等となり、その後、また材齢 150~180 日程度で高炉セメント B 種が大きくなる傾向が見られた。ただし、その差は 50 $\mu$  程度であり、材齢 1 年程度では、セメントの種類が収縮ひずみに及ぼす影響は小さいと考えられる。

乾燥開始時期の影響を見ると、脱型後、7 日間水中養生を行った後、恒温恒湿庫内に存置した供試体の JIS A 1129 に準じた収縮ひずみは、セメントの種類によって若干異なり、材齢 1 年程度では、普通セメントに比べて高炉セメント B 種で大きくなる傾向が見られた。

脱型後、直ちに恒温恒湿庫内に存置した供試体は、7 日間水中養生を行った供試体に比べて、材齢 120 日程度までは収縮ひずみが大きくなった。しかしながら、その後の材齢 1 年程度の収縮ひずみは、JIS $\square$ 100(20BB)の供試体を除き、いずれも 1200 $\mu$  で同程度となった。これより、材齢 1 年程度では、乾燥開始時期が最終的な収縮ひずみに及ぼす影響は小さいと考えられる。



覆工を模擬して 18 時間脱型→20℃、60%RH 養生



JIS A 1129 (脱型後 20℃水中養生 7 日)

図 4.1.6 恒温恒湿庫内に存置した供試体の材齢とひずみの関係

## 4.2 覆工コンクリートの養生効果確認試験

### 4.2.1 目的

覆工コンクリートにおける品質向上の取組として、養生方法、型枠脱型時期等が研究分野や現場への技術提案等により行われてきている。

これら品質向上の取組は、覆工の長期耐久性の確保に寄与しているが、はく落事象へつながるひび割れへの影響についての知見は少ない。

そこで本試験は、覆工コンクリートの初期養生方法、型枠脱型時期の違い（以下、「養生効果確認試験」という。）に関する室内試験を実施し、環境条件と水分移動距離の違いがコンクリートの物性値へ及ぼす影響を実験的に把握することを目的とする。

### 4.2.2 コンクリートの配合等

NEXCOの標準仕様である中流動覆工コンクリートの施工管理要領<sup>1)</sup>にもとづいて、実験に使用する配合を決定した。表4.2.1に実験に使用したコンクリート配合と使用材料の一覧を示す。また、比較対象として中流動覆工コンクリートを採用する前の配合（表中のT1（在来）と表記したもの）についても実験を行う。

中流動覆工コンクリートの配合については、石炭灰（FA）または石粉（LS）を混和材としたもの以外に、高性能 AE 減水剤（増粘剤一液タイプ）（Ad）を用いた3種類とする。

表 4.2.1 コンクリートの配合と使用材料一覧

| 配合     | スランプ<br>(cm) | 空気量<br>(%) | 水結合材<br>比<br>W/C(%) | 細骨材<br>s/a(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |      |        |          |          |
|--------|--------------|------------|---------------------|---------------|-------------------------|------|--------|----------|----------|
|        |              |            |                     |               | 水<br>W                  | 結合材  |        | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>G |
|        |              |            |                     |               |                         | セメント | 混和材    |          |          |
| T1(在来) | 15±2.5       | 4.5±1.5    | 63                  | 49            | 170                     | 270  | —      | 888      | 950      |
| T1(FA) | 21±2.5       | 4.5±1.5    | 48.6                | 49.4          | 170                     | 270  | 80(FA) | 847      | 902      |
| T1(LS) | 21±2.5       | 4.5±1.5    | 48.6                | 49.4          | 170                     | 270  | 80(LS) | 847      | 902      |
| T1(Ad) | 21±2.5       | 4.5±1.5    | 53.1                | 50.4          | 170                     | 320  | —      | 894      | 902      |

注：T1(FA)、T1(LS)、T1(Ad)は中流動覆工コンクリートでスランプフロー35～50cm、

セメント：普通ポルトランドセメント

粗骨材：砕石（表乾密度：2.66g/cm<sup>3</sup> 吸水率:0.5%）最大粗骨材径 20mm

細骨材：陸砂（表乾密度：2.59g/cm<sup>3</sup> 吸水率：2.07%）

石炭灰（FA）：JIS II種（密度:2.32g/cm<sup>3</sup>）、石粉（LS）：炭酸カルシウム（密度：2.71g/cm<sup>3</sup>）

### 4.2.3 養生効果確認試験

#### (1) 試験計画

養生効果確認試験は、養生による覆工コンクリートへの影響を推定するために必要なデータを収集する目的として、養生環境の違いによるコンクリートの物性データの相違を確認する。

表4.2.2に実験を行う養生環境の一覧を示す。一般的な覆工コンクリートの施工では、コンクリートの自重に耐えられる強度が発現した時点で脱型されており、脱型時期は打設後18時間程度である。そこで、実験では打設後18時間で脱型し無養生としたものを、基準とする（表4.2.2の養生A）。表4.2.2の養生B～養生Iについては、実際にトンネルで施工されている覆工の養生

環境をモデル化する。ただし、養生Eについては、コンクリート自体の強度特性等を確認する目的で28日間水中養生（標準養生）を行う。

養生環境によるコンクリートの品質への影響を確認する目的で表4.2.3に示す物性試験を実施した。水分拡散係数および細孔径分布については、実際のトンネル覆工厚と同等の300mm角の試験体を用いる。この試験体は、乾燥面を1面のみ限定し、その他の面を完全にシールすることで実際のトンネル覆工に近い水分移動の状況を再現し、乾燥面から内部にかけての水分拡散係数、細孔径分布の変化を養生終了の経過日数ごとに把握する。なお、養生終了後は、室温20℃、湿度60%の恒温恒湿室で試験体を保管する。

水分拡散係数、細孔径分布の試験は、養生終了後、恒温恒湿室に1、3、28日保管した時点で行う。脱型後に養生を実施しない養生A、B、Cは、脱型時点を養生終了として取り扱う。

実トンネルでは、脱型後に覆工全体を養生する設備を設置する作業を行っている。この作業の間は、養生を実施できない状態であり、脱型直後はコンクリート表面からの水分発散が多い時期であることから、養生D、F、G、Hについては脱型後8時間放置（室温20℃、湿度60%）とする。

表 4.2.2 養生効果試験の基本条件

| 基本条件 | 記号 | 要因        | 水 準  |
|------|----|-----------|--|
|      |    | 配合        | 普通コンクリート T1-1配合<br>中流動コンクリート 石炭灰(FA)、石粉(LS)、増粘剤系(Ad) |
| 養生方法 | A  | 従来(比較用)   | 18時間脱型後20℃湿度60%養生                                    |
|      | B  | 脱型時期      | 48時間脱型後20℃湿度60%養生                                    |
|      | C  |           | 72時間脱型後20℃湿度60%養生                                    |
|      | D  |           | 18時間脱型後→8h後に湿度80%養生→7日間で養生終了                         |
|      | E  | 水中養生      | 18時間脱型後→直後水中養生(28日間)                                 |
|      | F  | 水中養生(8h後) | 18時間脱型後→8h後に養生開始→7日間で養生終了                            |
|      | G  |           | 18時間脱型後→8h後に養生開始→28日間で養生終了                           |
|      | H  |           | 18時間脱型後 封緘養生→7日間で養生終了                                |
|      | I  | 膜養生       | 18時間脱型後 乾燥収縮低減剤塗布 → 養生終了                             |

注) 養生期間終了後→温度20℃湿度60%温度は20℃一定

表 4.2.3 物性試験一覧

| 物性値               | 試験方法         | 試験体寸法<br>(mm) |
|-------------------|--------------|---------------|
| 圧縮試験              | JIS A 1108   | φ100×200      |
| 長さ変化試験            | JIS A 1129-3 | 100×100×400   |
|                   | 埋め込みゲージ      |               |
| 透気性試験<br>(透気係数)   | トレント法        | 100×100×400   |
| 透水性試験<br>(水分拡散係数) | インプット法       | 300×300×300   |

(2) 試験結果

コンクリートの物性値は、各配合とも同様であったことから、本研究では代表的な配合の試験結果を示す。

1) 圧縮強度

養生方法の違いによる圧縮強度への影響を整理したものを図4.2.1に示す。この図では、コンクリートのポテンシャルとして供試体養生Eの圧縮強度  $\sigma_{28}$  に対する各養生の圧縮強度  $\sigma_{28}$  との比で整理した。

トンネル覆工の施工では、脱型後にコンクリートを湿潤状態に保持するために、コンクリート表面をシートで覆うなどの養生設備を設置する事例が多い。養生設備を設置後は、コンクリート表面は湿潤状態に保持されるが、脱型から養生設備を設置する間は、コンクリート表面から水分逸散が継続する。脱型直後は、コンクリート中の水分量が多く、とくに水分逸散が多い時期に相当する。そこで、脱型直後の水分発散による影響を確認するために、脱型後に実トンネルにおける養生設備設置までの時間とほぼ同じ8時間放置し、その後28日間水中養生を実施した養生Gと養生Eの圧縮強度を比較した。表4.2.4に示すように、配合に関係なくほぼ等価であった。また、養生F、Hについても脱型後に8時間放置したにも係らず、圧縮強度については養生Eの90%~110%程度の値を示しており、8時間程度の養生設備構築時間による圧縮強度  $\sigma_{28}$  への影響はないものと

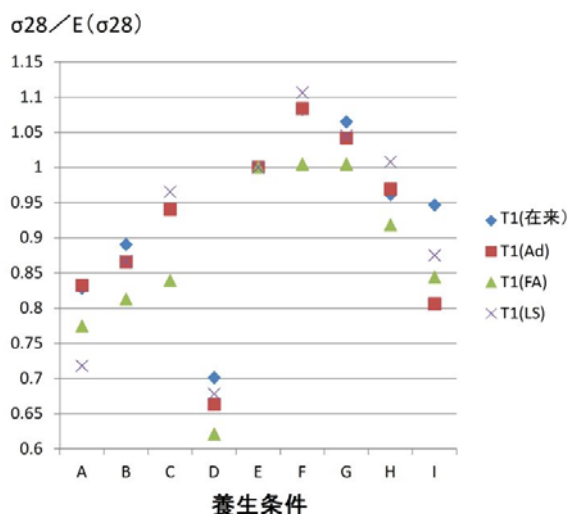


図 4.2.1 養生 E に対する各養生の圧縮強度比

表 4.2.4 養生方法による 28 日圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) 一覧

| 養生方法 | T1(在来) | T1(Ad) | T1(FA) | T1(LS) |
|------|--------|--------|--------|--------|
| A    | 28.0   | 37.8   | 32.3   | 27.0   |
| B    | 30.1   | 39.3   | 33.9   | 32.6   |
| C    | 31.8   | 42.7   | 35.0   | 36.3   |
| D    | 23.7   | 30.1   | 25.9   | 25.5   |
| E    | 33.8   | 45.4   | 41.7   | 37.6   |
| F    | 36.6   | 49.2   | 41.9   | 41.6   |
| G    | 36.0   | 47.3   | 41.9   | 39.3   |
| H    | 32.5   | 44.0   | 38.3   | 37.9   |
| I    | 32.0   | 36.6   | 35.2   | 32.9   |

推定される。なお、養生なしを想定したT1(在来)の養生Aでも28N/mm<sup>2</sup>の圧縮強度であり、その他のケースでは30N/mm<sup>2</sup>以上の強度であり、養生D以外のケースで設計基準強度(24N/mm<sup>2</sup>)を満足した。養生Dについても、設計基準強度とほぼ同等の値を示している。この結果から、圧縮強度については、特別な養生を実施しない場合でも設計基準強度を確保できるものと考えられる。

養生Dは、脱型後に湿度80%の室内に7日間放置したにも係らず、脱型後に湿度60%の室内に

放置した養生Aの結果よりも小さい値を示している。この原因については、今回の試験結果のみでは推定することが困難であるが、今回の結果からは、湿度80%では養生効果がないことを示唆していると判断できる。

## 2) 長さ変化試験

図4.2.2～図4.2.3に埋め込みゲージで得られた長さ変化試験の結果を示す。長さ変化試験については、養生終了後に乾燥状態（室温20℃、湿度60%）に放置した乾燥材齢と収縮ひずみとの関係で整理する事例が多いが、本研究では収縮ひずみ等の影響を検討するため、打設日からの材齢で整理した。したがって、材齢28日まで水中養生している養生E、Gについては養生期間中は収縮ひずみが発生していない。乾燥収縮低減剤を塗布した養生I以外は、養生終了後の収縮ひずみの発現は、ほぼ同様であり、乾燥材齢180日での収縮ひずみ量に大きな差異はなかった。これは、コンクリートの最終的な収縮ひずみは、水セメント比に依存するという既存論文<sup>2)</sup>と一致している。また、養生Iは、収縮ひずみの発現を抑制する効果があることが判明した。

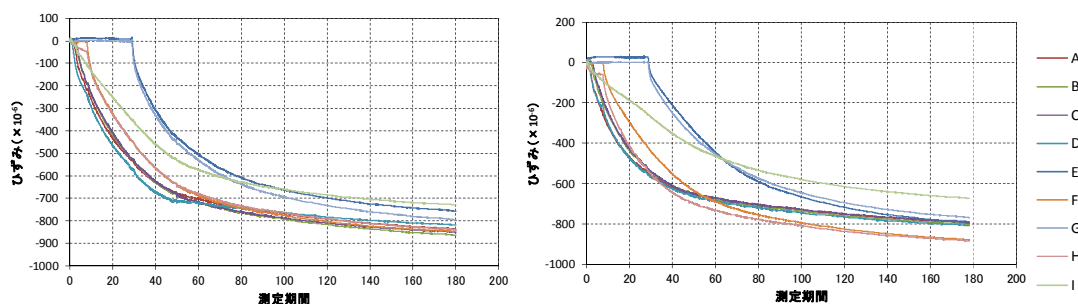


図 4.2.2 配合における収縮ひずみと材齢との関係（左図：T1(在来)、右図：T1(FA)）

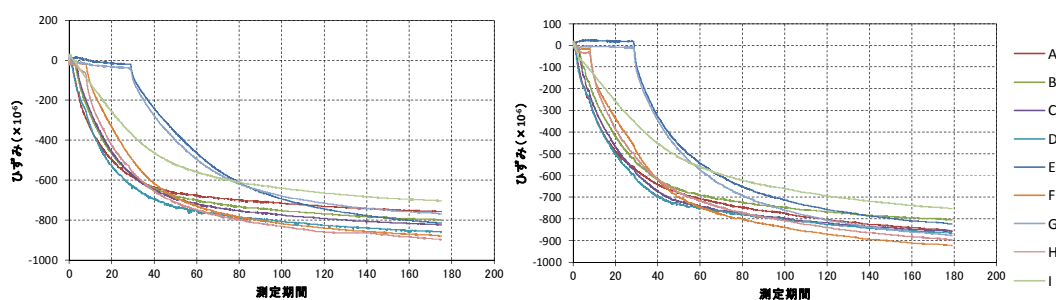


図 4.2.3 配合における収縮ひずみと材齢との関係（左図：T1(LS)、右図：T1(Ad)）

## 3) 透気係数

コンクリート表面で測定した透気係数の一覧表を表4.2.4に示す。表には、かぶりコンクリートの品質を判定する目的で設定されたグレード<sup>3)</sup>と各グレードの評価を記載した。なお、透気係数はコンクリートの含水率に影響を受けることが知られている。そこで、透気性試験のみは、コンクリート表面の乾燥状態を同一条件で実施するために、乾燥材齢（養生後の材齢）28日で実施



した。

養生をまったく実施しない養生Aの透気係数は、グレード分けの評価では「劣」となっており、二酸化炭素等の鉄筋腐食因子がコンクリート内部へ浸入しやすいと判断される。脱型時間を72時間に延長した養生Cおよび何らかの養生を7日以上実施した養生F、G、H、Iは、グレード分けの評価で「一般」以上と判定され、鉄筋コンクリートで施工される坑口部等については、脱型時間を延長するか、脱型後に養生を実施することが望ましい。

脱型後、湿度80%で養生を行った養生Dの透気係数は、養生Aと同様に「劣」と判定されている。また、図4.2.1に示す圧縮強度の結果についても養生Dは、養生Aと同程度であり養生によるコンクリ

ートの品質向上が見られない。この原因については、脱型直後のコンクリートの含水量は飽和状態に近いと想定される。したがって、脱型直後の養生としては、コンクリート表面を湿潤状態に保持するか、コンクリート表面を被膜等で覆い水分発散を抑制する方法が良い。

#### 4) 水分拡散係数

水分拡散係数の試験結果として図4.2.5に示す。水分拡散係数に用いた試験体は、トンネル覆工厚と同じ300mmの厚さを有しており、乾燥面となる1面以外をエポキシ樹脂でシールしている。材齢28日を経過した時点で、試験体をカットして乾燥面から内部の水分拡散係数を測定した。その結果、図4.2.5に示すように養生Aでは、乾燥面から120mm程度までは水分拡散係数が変化しているが、それ以深ではほぼ一定の値を示している。この傾向は、水中養生した養生E、F以外はほぼ同一である。一方、水中養生を行った養生E、Fについては120mm以深の水分拡散係数を測定していないが、乾燥面から120mm程度までは拡散係数が小さく、ほぼ一致している。120mm以深の拡散係数は、養生ケースに関係なく配合ごとに、ほぼ一定の値を示した。今回の試験結果では、養生条件により、表面から120mmまでの拡散係数は変動する。また、養生E（標準養生）と7日間水中養生した養生Fの表面から120mmまでの拡散係数は、すべての配合で同等であった。この結果から、水分拡散係数の評価では、養生期間としては7日程度で十分であることを示している。

表 4.2.4 透気性試験結果

| 養生 | 項目   | 透気係数 $kT(10^{-16}m^2)$ |                       |                       |                       |
|----|------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|    |      | 配合種別                   |                       |                       |                       |
|    |      | T <sub>1-1</sub> (従来)  | T <sub>1-4</sub> (Ad) | T <sub>1-4</sub> (FA) | T <sub>1-4</sub> (LS) |
|    |      | 28                     | 28                    | 28                    | 28                    |
| A  | 透気係数 | 13                     | 2.7                   | 4.7                   | 6.5                   |
|    | グレード | 5                      | 4                     | 4                     | 4                     |
|    | 評価   | 極劣                     | 劣                     | 劣                     | 劣                     |
| B  | 透気係数 | 1.6                    | 0.69                  | 1.1                   | 2.1                   |
|    | グレード | 4                      | 3                     | 4                     | 4                     |
|    | 評価   | 劣                      | 一般                    | 劣                     | 劣                     |
| C  | 透気係数 | 0.78                   | 0.43                  | 0.78                  | 1.0                   |
|    | グレード | 3                      | 3                     | 3                     | 4                     |
|    | 評価   | 一般                     | 一般                    | 一般                    | 劣                     |
| D  | 透気係数 | 13                     | 4.8                   | 6.0                   | 11                    |
|    | グレード | 5                      | 4                     | 4                     | 5                     |
|    | 評価   | 極劣                     | 劣                     | 劣                     | 極劣                    |
| E  | 透気係数 | 0.042                  | 0.023                 | 0.032                 | 0.041                 |
|    | グレード | 2                      | 2                     | 2                     | 2                     |
|    | 評価   | 良                      | 良                     | 良                     | 良                     |
| F  | 透気係数 | 0.091                  | 0.055                 | 0.095                 | 0.087                 |
|    | グレード | 2                      | 2                     | 2                     | 2                     |
|    | 評価   | 良                      | 良                     | 良                     | 良                     |
| G  | 透気係数 | 0.051                  | 0.018                 | 0.022                 | 0.026                 |
|    | グレード | 2                      | 2                     | 2                     | 2                     |
|    | 評価   | 良                      | 良                     | 良                     | 良                     |
| H  | 透気係数 | 0.36                   | 0.24                  | 0.75                  | 0.69                  |
|    | グレード | 3                      | 3                     | 3                     | 3                     |
|    | 評価   | 一般                     | 一般                    | 一般                    | 一般                    |
| I  | 透気係数 | 1.2                    | 0.42                  | 0.060                 | 0.43                  |
|    | グレード | 4                      | 3                     | 2                     | 3                     |
|    | 評価   | 劣                      | 一般                    | 良                     | 一般                    |

注)：試験材齢は、所定の養生終了後からの材齢を示す。

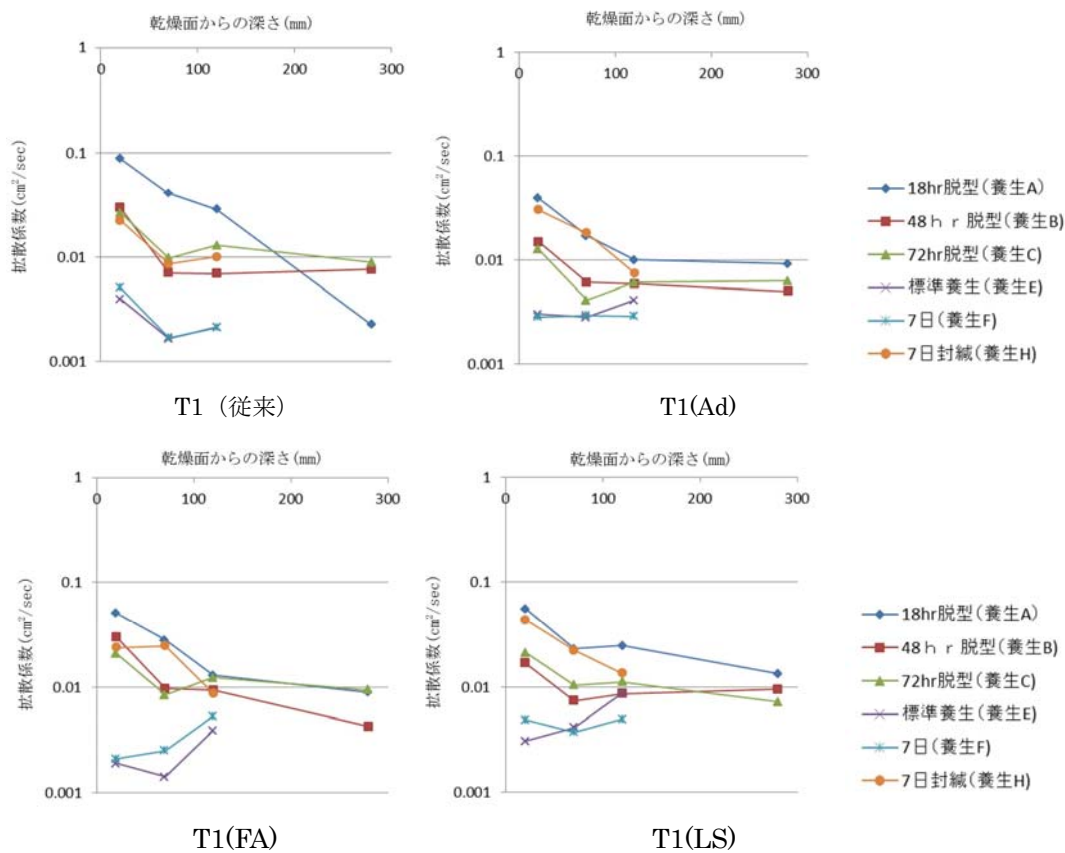


図 4.2.5 拡散係数と乾燥面からの深さ関係

### 5) 養生効果確認実験結果のまとめ

養生効果確認実験の結果を簡単に整理すると以下ようになる。

- ①脱型後の養生としては、コンクリート表面を湿潤状態に保持するか、被膜等でコンクリート表面を覆うことで水分発散を抑制する養生方法が有効である。
- ②脱型時間を72時間まで延長するか、養生期間を7日実施すると強度は養生Eの90%程度を確保でき、かつコンクリートの緻密性を示す透気係数も、グレード分けの評価で「一般」以上の値を確保できる。
- ③打設後180日後の収縮ひずみ量については、養生方法による影響はほとんどない。ただし、収縮ひずみは、養生終了時点から生じるため、若材齢での収縮ひずみには養生の影響を受ける。



### 4.3 材料分離に関する試験

#### 4.3.1 目的

NEXCO は、中流動覆工コンクリートと型枠バイブレータを採用することで、材料分離や未充填部の発生を防止してきたが、締固め方法によっては過剰な締固めとなることが懸念される。

そこで本研究は、中流動覆工コンクリートの過剰な締固めによる粗骨材の含有率の違いがコンクリートの物性値へ及ぼす影響を実験的に把握することを目的とする。

#### 4.3.2 材料分離に関する試験

##### (1) 試験計画

コンクリート標準示方書[施工編：施工標準]（土木学会編）の締固めに関する解説には、材料分離に注意して締固めを実施するとの記述がある。しかしながら、材料分離に関する定義については記述がない。これは、コンクリートの配合や構造物の特徴によって材料分離の考え方が違うためにいちがいに設定できないものと思われる。

一方、粗骨材がないモルタルの収縮ひずみは、コンクリートに比べて大きくなる傾向があることが報告<sup>4)</sup>されている。したがって、材料分離が発生した場合には、覆工コンクリートの収縮ひずみが不均一になり、ひび割れの発生を誘発する懸念がある。そこで本研究では、過剰な締固めに伴う材料分離による影響を定量的に把握するために実験を以下の手順で実施する。

なお、コンクリート等の配合については、表 4.3.3～表 4.3.5 に示す。

##### 1) 粗骨材変動率による物性値影響把握

中流動覆工コンクリートの室内試験時の決定配合に対して粗骨材を-20%、-40%、-80%変動させ、収縮ひずみ、弾性係数、圧縮強度への影響を確認する。実験では、決定配合の粗骨材に対する変動の割合を“粗骨材含有率”と定義する。

なお、試験を実施するコンクリート種別は、中流動覆工コンクリート T1-4 (FA)、(LS)、(Ad) とし、表 4.3.1 に試験項目等を示す。

表 4.3.1 粗骨材含有率による物性値影響把握試験項目

| 試験項目              |                         | 単位 | 数量 | 備考           |
|-------------------|-------------------------|----|----|--------------|
| フレッシュコンクリート<br>試験 | スランプ・スランプフロー試験          | 回  | 3  |              |
|                   | 空気量試験                   | 回  | 3  |              |
|                   | 加振変形試験                  | 回  | 3  |              |
|                   | U型充填性試験                 | 回  | 3  |              |
| 供試体作成             | 縦 100×横 100×400 (mm)    | 本  | 27 |              |
|                   | φ 100×高さ 200 (mm)       | 本  | 27 |              |
| 硬化コンクリート<br>試験    | 長さ変化測定 (100×100×400 mm) | 本  | 27 | 材齢 7、28、56 日 |
|                   | 質量変化率 (100×100×400 mm)  | 本  | 27 | 材齢 7、28、56 日 |
|                   | 管理用供試体圧縮強度              | 本  | 27 | 材齢 28 日      |

## 2) 振動エネルギーと材料分離特性との相関把握

覆工コンクリートの施工で材料分離が発生する原因としては、打設口が天端部の 1 箇所であるためにセントル内のコンクリート流動によるものと、過剰な締固めによるものが想定される。セントル内の流動による影響については、既往の研究<sup>5)</sup>によると在来の配合では 10.5m 流動すると粗骨材変動率が - 80%以下、すなわち粗骨材量が配合の 20%以下となるのに対して、中流動覆工コンクリートは粗骨材変動率が - 20%程度であったことが報告されている。一方、過剰締固めによる影響については、定量的な評価を行う研究が行われていない。そこで、中流動覆工コンクリートを対象に大型試験体を用いて、過剰締固めによる影響を把握する目的で実験を行う。

試験を実施するコンクリート種別については、中流動覆工コンクリート T1-4 (Ad) とし、表 4.3.2 に試験項目等を示す。

表 4.3.2 振動エネルギー制限値設定試験項目

| 試験項目          |                                  | 単位 | 数量 | 備考           |
|---------------|----------------------------------|----|----|--------------|
| フレッシュコンクリート試験 | スランプ・スランプフロー試験                   | 回  | 1  |              |
|               | 空気量試験                            | 回  | 1  |              |
|               | 加振変形試験                           | 回  | 1  |              |
|               | U型充填性試験                          | 回  | 1  |              |
| 供試体作成         | 縦 300×横 300×300 (mm)             | 個  | 4  |              |
|               | 長さ 5000×高さ 2000×幅 300 (mm)       | 体  | 1  |              |
| 硬化コンクリート試験    | 歪み測定 (試験体 上・中・下) (300×300×300mm) | 箇所 | 24 | 材齢 7、28、56 日 |
|               | 粗骨材分布 (300×300×300mm)            | 個  | 4  | 材齢 28 日      |
|               | 粗骨材分布 (5000×2000×300mm)          | 本  | 6  | 材齢 28 日      |

振動エネルギーによる粗骨材沈降が材料分離に与える影響を室内で確認することと、その結果に基づいて大型試験体 (長さ 5000×高さ 2000×幅 300 mm) の実験条件を設定することを目的として実施する。全体の実験フローを図 4.3.1 に示す。

締固めと材料分離との関係が不明であることから、締固めによる材料分離への影響を把握し、大型試験体で加える締固めエネルギーを設定するため、最適振動エネルギーを繰り返し载荷する頻度を変更 (4、8、10、20 回) させた供試体を用いて、粗骨材の分布状況を確認する。供試体は、図 4.3.2 に示すように底面から振動を加え、振動エネルギーと粗骨材の沈降量との関係を把握す

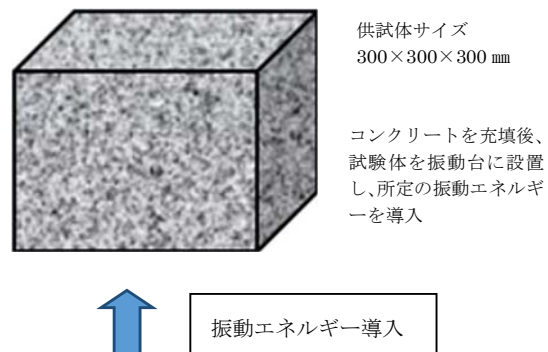


図 4.3.2 小型試験体による材料分離試験概要図

る。加える振動エネルギーは、トンネル施工管理要領りで示される最適な締固め振動エネルギー（3.7J/L）の整数倍とする。粗骨材の変動率は、試験体の硬化後に高さ方向に3分割して試料を採取し確認する。

大型試験体には、図4.3.3に示すように実際の覆工コンクリート打設で使用される型枠バイブレータを設置し、型枠面に等間隔で加速度計を取り付け、振動エネルギーを測定する。実験は、大型試験体の上面までコンクリートを打設後に型枠バイブレータを作用させる。コンクリートが硬化した後にコアを採取し、粗骨材の表面積を測定し、粗骨材の含有率を推定する。

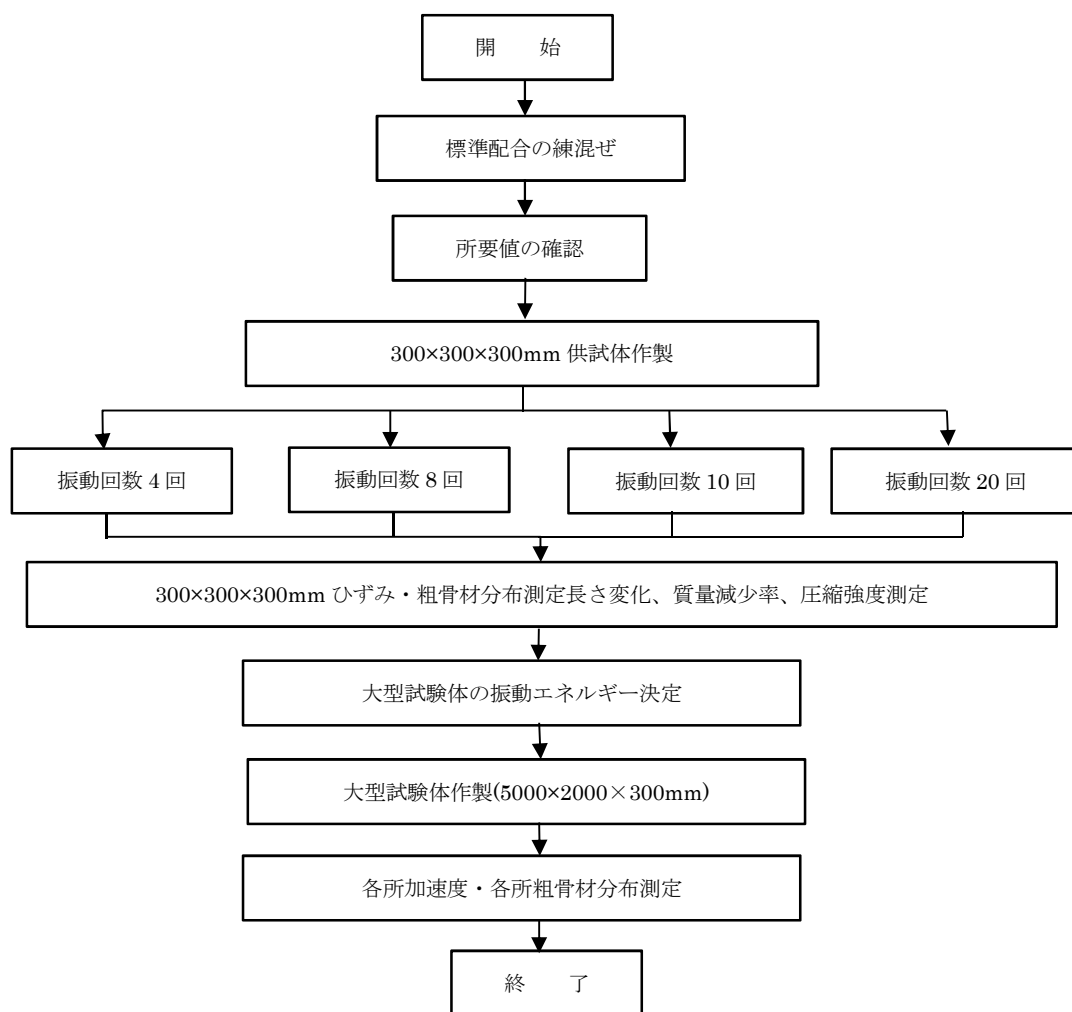


図 4.3.1 振動エネルギーと材料分離に関する実験フロー

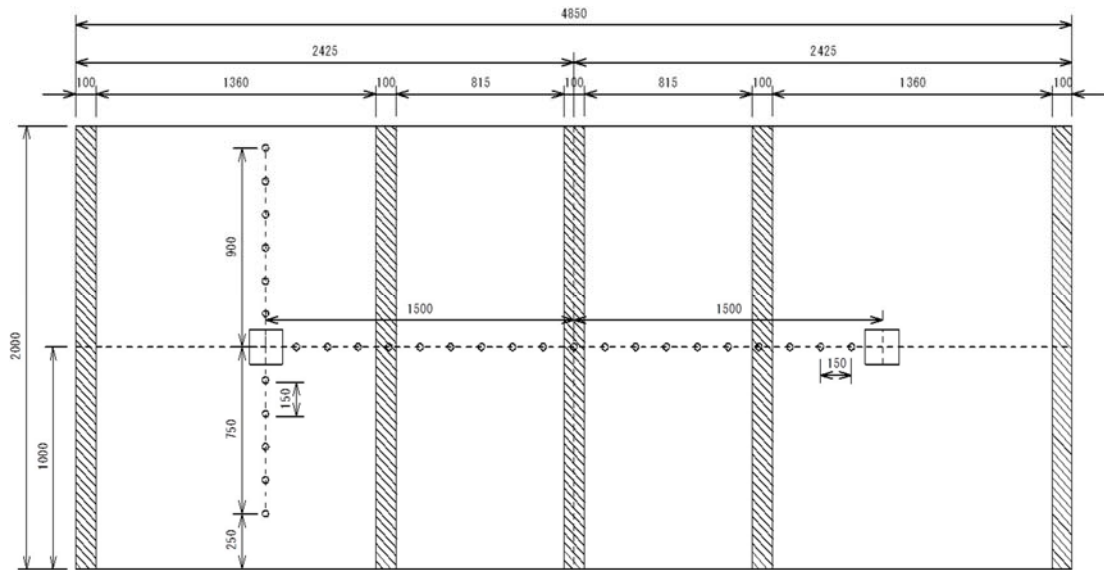


図 4.3.3 大型試験体の型枠パイプレイアウト配置図

(2) 実験結果

1) 粗骨材含有率と物性値との関係

表 4.3.3～表 4.3.5 に実験に使用したコンクリートの配合および流動性などを示す。

表 4.3.3 粗骨材含有率による物性値影響把握 (A d)

| 粗骨材<br>減量<br>(%) | スラブ及び<br>スラブフロー<br>の範囲<br>(cm)   | 空気量<br>の範囲<br>(%) | 水結合<br>材比<br>W/B<br>(%)          | 細骨<br>材率<br>s/a<br>(%) | 単位数 (kg/m <sup>3</sup> )         |           |               |          |          |          |                                       |               | 測定<br>項目 | スラブ<br>(cm) | スラブ<br>フロー<br>(mm) | 加振後の<br>広がり<br>(cm) | U形充填性試験                    |                   | 空気量<br>(%)       | コンクリート<br>温度<br>(°C) | 圧縮強度<br>材齢28日<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 静弾性係数<br>材齢28日<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |                                |                                |                                |                                |
|------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------|---------------|----------|----------|----------|---------------------------------------|---------------|----------|-------------|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------|------------------|----------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                  |                                  |                   |                                  |                        | 水<br>W                           | 結合材B      |               |          | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>G | マスター<br>グレンニウム<br>6500 X <sub>2</sub> | マスターエア<br>202 |          |             |                    |                     | 充填<br>高さ<br>(mm)           | 停止<br>時間<br>(sec) |                  |                      |                                       |   |                                |                                |                                |                                |
|                  |                                  |                   |                                  |                        |                                  | セメント<br>C | フライアッシュ<br>FA | 石粉<br>LS |          |          |                                       |               |          |             |                    |                     |                            |                   |                  |                      |                                       |   |                                |                                |                                |                                |
| 0                | スラブ<br>21±2.5<br>スラブフロー<br>35～50 | 4.5±1.5           | 53.1                             | 50.4                   | 170                              | 320       | -             | -        | 890      | 902      | B×1.15%                               | B×0.0004%     | 加振前      | 21.0        | 406×384<br>(400)   | -                   | 323<br>331<br>321<br>(325) | 6.5               | 5.0              | 20                   | 48.3<br>48.6<br>47.4<br>(48.1)        | 30.4<br>30.7<br>29.8<br>(30.3)          |                                |                                |                                |                                |
|                  |                                  |                   |                                  |                        |                                  |           |               |          |          |          |                                       |               | 加振後      | -           | 491×484<br>(490)   | 9.0                 | 2.7                        | 20                |                  |                      | 53.4<br>53.0<br>51.5<br>(52.6)        | 28.9<br>27.0<br>28.3<br>(28.1)          |                                |                                |                                |                                |
| 20               |                                  |                   | 53.1                             | 56.0                   | 182                              | 343       | -             | -        | 955      | 774      | B×1.15%                               | B×0.0004%     | 加振前      | 21.0        | 430×411<br>(420)   | -                   |                            |                   | -                | -                    |                                       |   | 2.7                            | 20                             | 53.4<br>53.0<br>51.5<br>(52.6) | 28.9<br>27.0<br>28.3<br>(28.1) |
|                  |                                  |                   |                                  |                        |                                  |           |               |          |          |          |                                       |               | 加振後      | -           | 484×484<br>(485)   | 6.5                 |                            |                   |                  |                      |                                       |   |                                |                                |                                |                                |
| 40               |                                  |                   | スラブ<br>21±2.5<br>スラブフロー<br>35～50 | 4.5±1.5                | 53.2                             | 62.9      | 197           | 370      | -        | -        | 1,030                                 | 626           | B×1.15%  | B×0.0004%   | 加振前                | -                   | 542×519<br>(530)           | -                 | -                | -                    | 2.8                                   | 20                                      | 50.1<br>50.5<br>50.5<br>(50.4) | 26.0<br>27.1<br>26.4<br>(26.5) |                                |                                |
|                  |                                  |                   |                                  |                        |                                  |           |               |          |          |          |                                       |               |          |             | 加振後                | -                   | 608×574<br>(590)           | 6.0               |                  |                      |                                       |   |                                |                                |                                |                                |
| 80               |                                  |                   |                                  |                        | スラブ<br>21±2.5<br>スラブフロー<br>35～50 | 4.5±1.5   | 53.1          | 83.6     | 233      | 439      | -                                     | -             | 1,221    | 248         | B×1.15%            | B×0.0004%           | 加振前                        | -                 | 686×661<br>(675) | -                    | -                                     | -                                       | 1.8                            | 21                             | 50.4<br>49.5<br>49.5<br>(49.8) | 22.4<br>23.2<br>23.0<br>(22.9) |
|                  |                                  |                   |                                  |                        |                                  |           |               |          |          |          |                                       |               |          |             |                    |                     | 加振後                        | -                 | -                | -                    |                                       |   |                                |                                |                                |                                |

表 4.3.4 粗骨材含有率による物性値影響把握 (F A)

| 種別                       | 配合       | 粗骨材<br>減量<br>(%) | スランパ及び<br>スランパフロー<br>の範囲<br>(cm)                | 空気量<br>の範囲<br>(%) | 水結合<br>材比<br>W/B<br>(%) | 細骨<br>材率<br>s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |           |               |                  |          |          |                                       | 測定<br>項目  | スランパ <sup>o</sup><br>(cm) | スランパ <sup>o</sup><br>フロー<br>(mm) | 加振後の<br>広がり<br>(cm) | U形充填性試験       |                            | 空気量<br>(%) | コンクリート<br>温度<br>(°C) | 圧縮強度<br>材齢28日<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 静弾性係数<br>材齢28日<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |                                |
|--------------------------|----------|------------------|---|-------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-----------|---------------|------------------|----------|----------|---------------------------------------|-----------|---------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------|----------------------------|------------|----------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------|
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        | 水<br>W                   | 結合材B      |               |                  | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>G | マスター<br>クレニウム<br>SP8SV X <sub>2</sub> |           |                           |                                  |                     | マスターエア<br>202 | 充填<br>高さ<br>(mm)           |            |                      |                                       |   | 停止<br>時間<br>(sec)              |
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        |                          | セメント<br>C | フライアッシュ<br>FA | 石粉<br>LS         |          |          |                                       |           |                           |                                  |                     |               |                            |            |                      |                                       |   |                                |
| 中流動覆工<br>コンクリート<br>(粉体系) | T1-4(FA) | 0                | スランパ <sup>o</sup><br>21±2.5<br>スランパフロー<br>35~50 | 4.5±1.5           | 48.6                    | 49.0                   | 170                      | 270       | 80            | -                | 841      | 902      | B×0.80%                               | B×0.0065% | 加振前                       | 22.0                             | 453×412<br>(435)    | -             | 323<br>330<br>325<br>(326) | 5.3        | 4.2                  | 20                                    | 40.1<br>41.3<br>40.1<br>(40.5)          | 29.4<br>29.8<br>29.1<br>(29.4) |
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        |                          | 加振後       | -             | 560×534<br>(545) | 10.5     |          |                                       |           |                           |                                  |                     |               |                            |            |                      |                                       |   |                                |
|                          |          | 20               |   |                   | 48.4                    | 54.6                   | 182                      | 290       | 86            | -                | 902      | 774      | B×0.80%                               | B×0.0065% | 加振前                       | -                                | 534×509<br>(520)    | -             | -                          | -          | 3.7                  | 20                                    | 39.2<br>39.2<br>39.2<br>(39.2)          | 26.8<br>27.0<br>28.0<br>(27.3) |
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        |                          | 加振後       | -             | 616×597<br>(605) | 8.5      |          |                                       |           |                           |                                  |                     |               |                            |            |                      |                                       |   |                                |
|                          |          | 40               |   |                   | 48.6                    | 61.6                   | 197                      | 312       | 93            | -                | 973      | 626      | B×0.80%                               | B×0.0065% | 加振前                       | -                                | 637×626<br>(630)    | -             | -                          | -          | 2.4                  | 20                                    | 45.9<br>44.8<br>43.9<br>(44.9)          | 25.6<br>25.8<br>26.1<br>(25.8) |
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        |                          | 加振後       | -             | 682×680<br>(680) | 5.0      |          |                                       |           |                           |                                  |                     |               |                            |            |                      |                                       |   |                                |
|                          |          | 80               |   |                   | 48.4                    | 82.8                   | 233                      | 371       | 110           | -                | 1,154    | 248      | B×0.80%                               | B×0.0065% | 加振前                       | -                                | 762×713<br>(740)    | -             | -                          | -          | 1.1                  | 20                                    | 41.0<br>41.7<br>42.6<br>(41.8)          | 23.4<br>21.7<br>22.1<br>(22.4) |
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        |                          | 加振後       | -             | -                | -        |          |                                       |           |                           |                                  |                     |               |                            |            |                      |                                       |   |                                |

表 4.3.5 粗骨材含有率による物性値影響把握 (L s)

| 種別                       | 配合       | 粗骨材<br>減量<br>(%) | スランパ及び<br>スランパフロー<br>の範囲<br>(cm)                | 空気量<br>の範囲<br>(%) | 水結合<br>材比<br>W/B<br>(%) | 細骨<br>材率<br>s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |           |                  |          |          |          |                                       | 測定<br>項目  | スランパ<br>(cm) | スランパ<br>フロー<br>(mm) | 加振後の<br>広がり<br>(cm) | U形充填性試験       |                            | 空気量<br>(%) | コンクリート<br>温度<br>(°C) | 圧縮強度<br>材齢28日<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 静弾性係数<br>材齢28日<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |                                |
|--------------------------|----------|------------------|---|-------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-----------|------------------|----------|----------|----------|---------------------------------------|-----------|--------------|---------------------|---------------------|---------------|----------------------------|------------|----------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------|
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        | 水<br>W                   | 結合材B      |                  |          | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>G | マスター<br>グレンウム<br>SP8SV X <sub>2</sub> |           |              |                     |                     | マスターエア<br>202 | 充填<br>高さ<br>(mm)           |            |                      |                                       |   | 停止<br>時間<br>(sec)              |
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        |                          | セメント<br>C | フライアッシュ<br>FA    | 石粉<br>LS |          |          |                                       |           |              |                     |                     |               |                            |            |                      |                                       |   |                                |
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        |                          |           |                  |          |          |          |                                       |           |              |                     |                     |               |                            |            |                      |                                       |   |                                |
| 中流動覆工<br>コンクリート<br>(粉体系) | T1-4(LS) | 0                | スランパ <sup>*</sup><br>21±2.5<br>スランパフロー<br>35~50 | 4.5±1.5           | 48.6                    | 49.0                   | 170                      | 270       | -                | 80       | 854      | 902      | B×0.85%                               | B×0.0008% | 加振前          | 20.0                | 391×366<br>(380)    | -             | 332<br>336<br>330<br>(333) | 5.3        | 3.6                  | 20                                    | 39.4<br>39.4<br>39.4<br>(39.4)          | 30.1<br>29.2<br>29.5<br>(29.6) |
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        | 加振後                      | -         | 502×489<br>(495) | 11.5     |          |          |                                       |           |              |                     |                     |               |                            |            |                      |                                       |   |                                |
|                          |          | 20               |   |                   | 48.6                    | 55.0                   | 182                      | 290       | -                | 86       | 916      | 774      | B×0.85%                               | B×0.0008% | 加振前          | 23.5                | 513×510<br>(510)    | -             | -                          | -          | 3.4                  | 20                                    | 38.3<br>38.3<br>37.0<br>(37.9)          | 27.2<br>27.6<br>28.1<br>(27.6) |
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        | 加振後                      | -         | 608×593<br>(600) | 9.0      |          |          |                                       |           |              |                     |                     |               |                            |            |                      |                                       |   |                                |
|                          |          | 40               |   |                   | 48.6                    | 61.9                   | 197                      | 312       | -                | 93       | 988      | 626      | B×0.85%                               | B×0.0008% | 加振前          | -                   | 596×552<br>(575)    | -             | -                          | -          | 2.8                  | 20                                    | 38.5<br>38.1<br>38.5<br>(38.4)          | 26.4<br>25.7<br>26.1<br>(26.1) |
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        |                          |           |                  |          |          |          |                                       |           | 加振後          | -                   | 653×626<br>(640)    | 6.5           |                            |            |                      |                                       |   |                                |
|                          |          | 80               |   |                   | 48.4                    | 83.0                   | 233                      | 371       | -                | 110      | 1,172    | 248      | B×0.85%                               | B×0.0008% | 加振前          | -                   | 770×692<br>(731)    | -             | -                          | -          | 2.1                  | 20                                    | 39.6<br>39.7<br>39.6<br>(39.6)          | 21.8<br>21.3<br>22.4<br>(21.8) |
|                          |          |                  |   |                   |                         |                        |                          |           |                  |          |          |          |                                       |           | 加振後          | -                   | -                   | -             |                            |            |                      |                                       |   |                                |

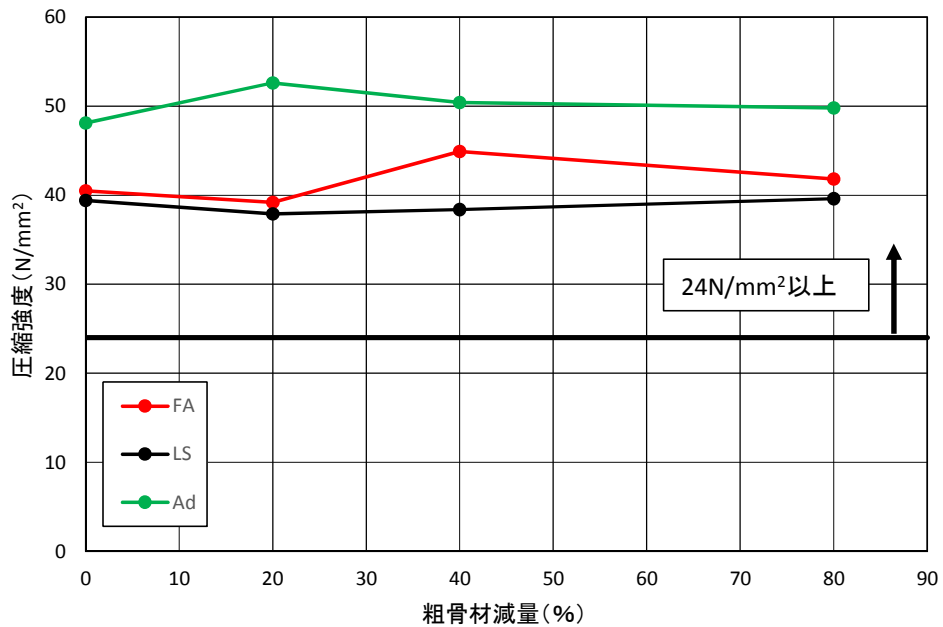


図 4.3.4 圧縮強度と粗骨材

圧縮強度については、図 4.3.4 に示すように粗骨材の含有量に関係無くほぼ一定の結果が得られた。一方、静弾性係数は、図 4.3.5 に示すように粗骨材が少なくなるとともに低下する傾向を示している。これらの結果は、強度はセメントの水和反応で決定され、弾性係数は粗骨材の影響を受けるという既存の研究結果と一致する。

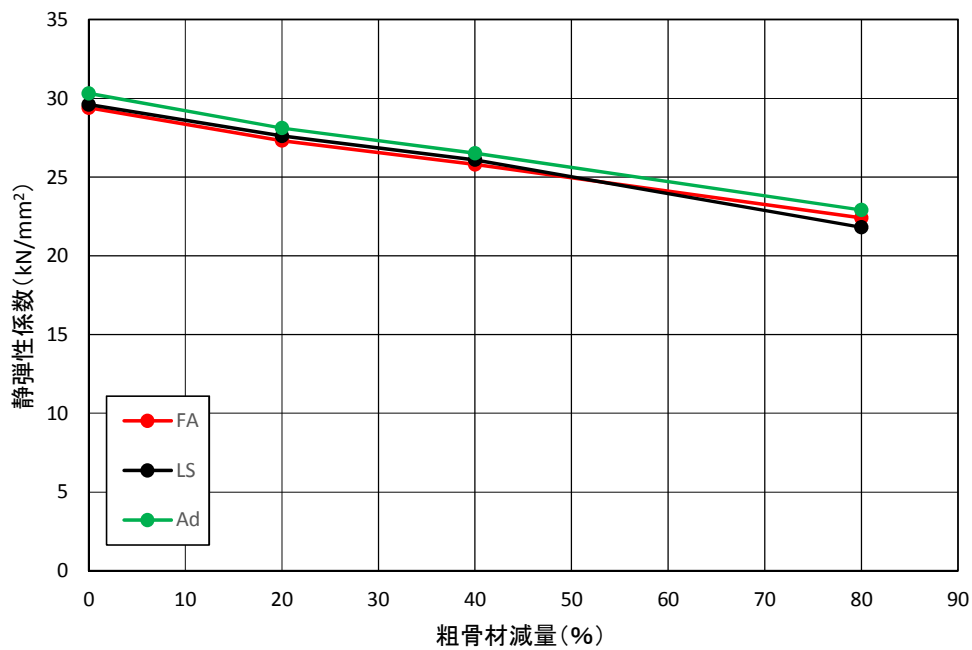


図 4.3.5 静弾性係数と粗骨材



長さ変化試験結果から、コンクリート標準示方書に記載されている計算式に基づいて、**図 4.3.6** に示すように収縮ひずみを算定した。

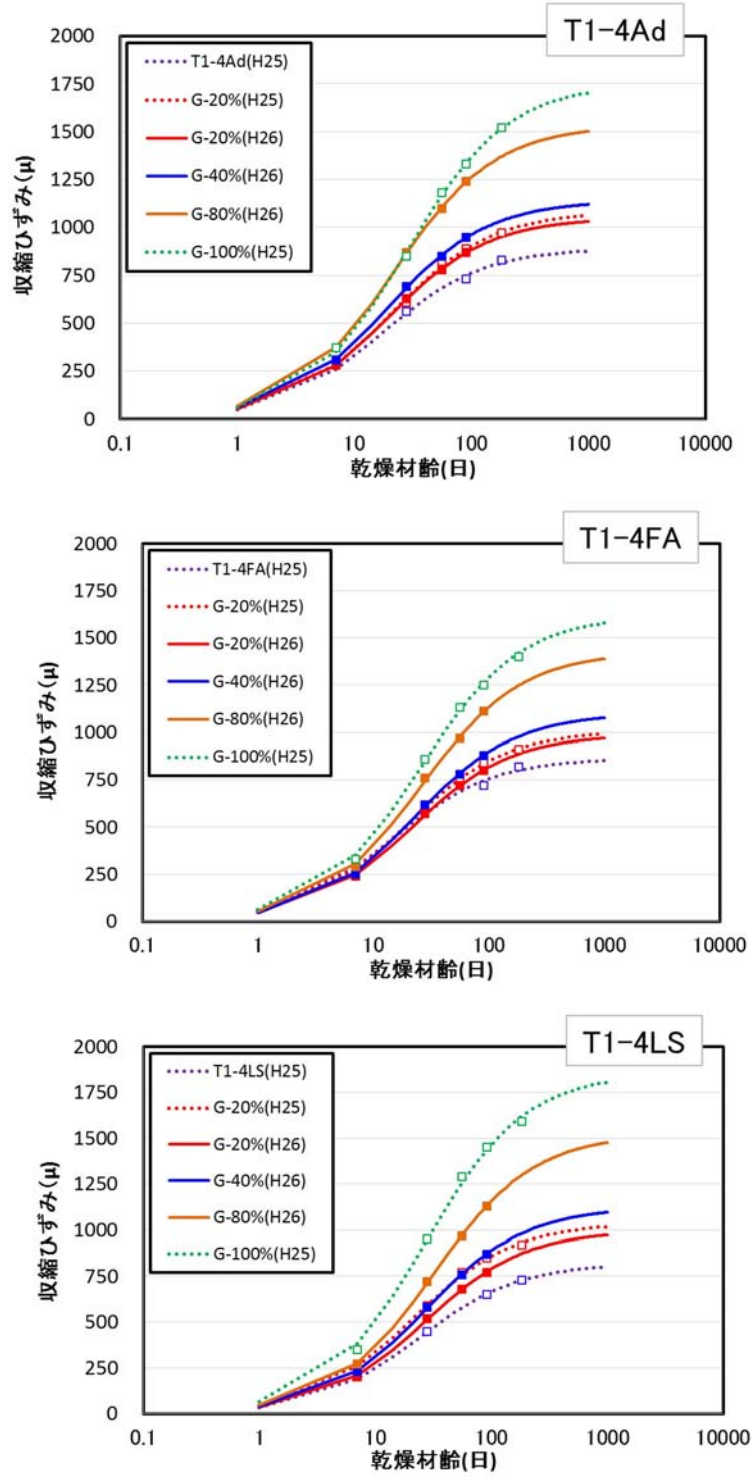


図 4.3.6 収縮ひずみと乾燥材齢

収縮ひずみの経時変化の傾向は、決定配合の収縮ひずみを 100%として粗骨材含有率との相関を整理した結果を図 4.3.7 に示す。

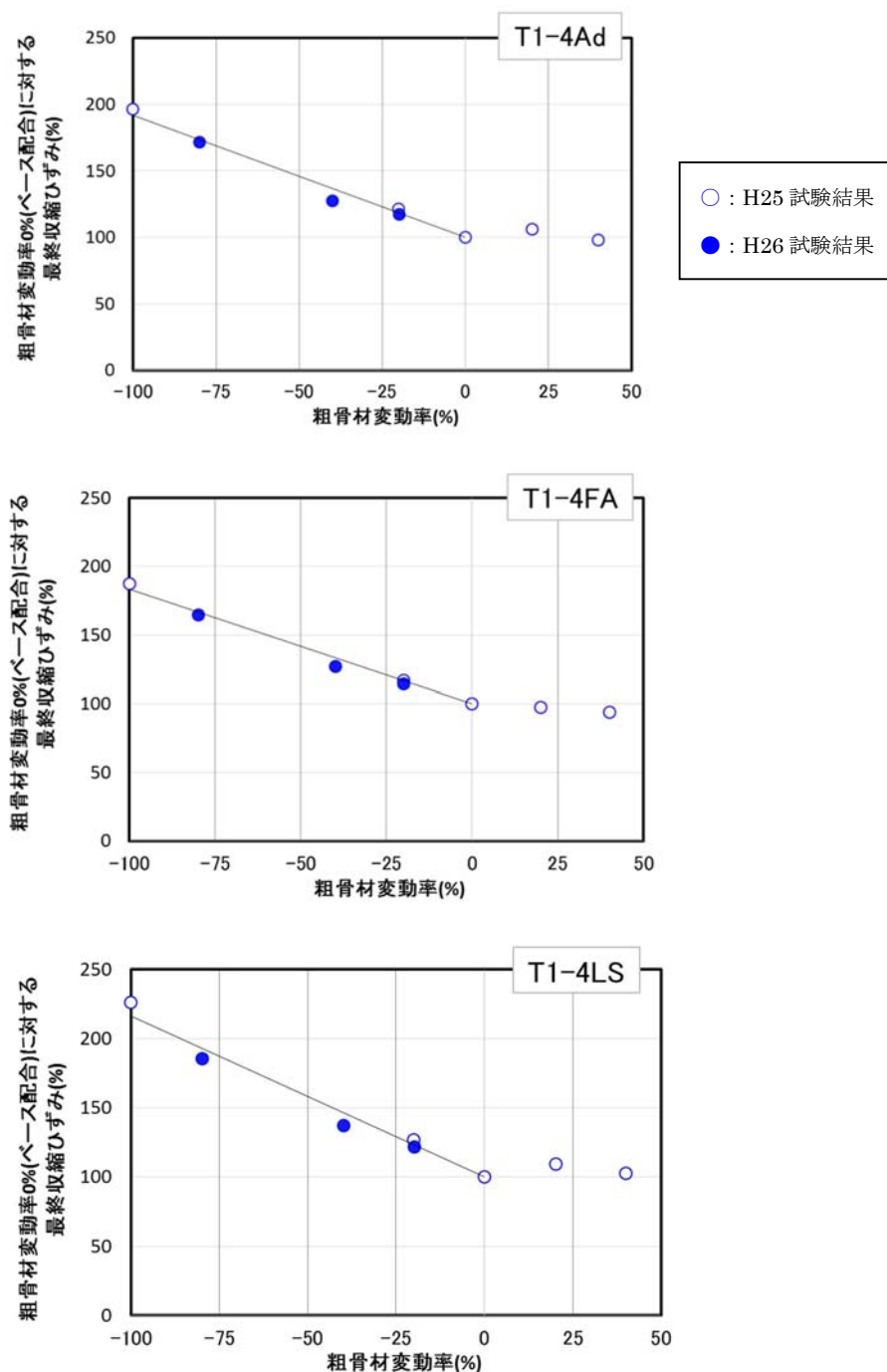


図 4.3.7 収縮ひずみ比と粗骨材含有率

※粗骨材変動率 25%、50%とは、配合通り製造したコンクリートに対し、粗骨材量を 25%、50%追加したもの

ここでの最終収縮ひずみは、コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>で定義される乾燥収縮ひずみの最終値を示している。図 4.3.7 の縦軸は、表 4.3.3～表 4.3.5 に示す粗骨材減量 0% 配合のコンクリートの最終収縮ひずみを 100% として、各粗骨材変動率の最終収縮ひずみの増減率を示している。試験結果によると、粗骨材の変動率 +20、+40% の収縮ひずみは、適正な配合の収縮ひずみとほぼ同一の結果であった。一方、粗骨材変動率が -20% から -100% になるに従って、最終収縮ひずみは増加しており、最終収縮ひずみの増加率は粗骨材変動率と負の相関がある。粗骨材がまったく配合されない粗骨材変動率 -100% では、適正な配合の約 2 倍の収縮ひずみが発生する。このような粗骨材変動率と最終収縮ひずみ比との関係は、試験を行ったすべての配合に共通している。収縮ひずみについては、図 4.3.7 に示すように粗骨材の減少に比例して増加していることが確認された。したがって、コンクリートの粗骨材の含有量を把握することで、収縮ひずみを推定することが可能と判断される。

## 2) 振動エネルギーと材料分離特性との相関把握

図 4.3.2 に示す 30cm 角試験体を用いた加振実験では、表 4.3.6 および図 4.3.8 に示すように最適振動エネルギーを 4、8、10、20 回加えるとコアの粗骨材面積が試験体下部で増加する傾向を示す。つまり、振動により粗骨材が沈降すると判断できる。

表 4.3.6 30×30×30cm より採取したコアの粗骨材面積率

| 振動回数  | 振動エネルギー (J/l) | 総面積 (cm <sup>2</sup> ) | 粗骨材面積 (cm <sup>2</sup> ) | 粗骨材面積率 (%) | 骨材数 |
|-------|---------------|------------------------|--------------------------|------------|-----|
| 4回 上  | 14.8          | 302.0                  | 69.1                     | 22.89      | 83  |
| 4回 中  |               | 302.0                  | 102.8                    | 34.05      | 89  |
| 4回 下  |               | 311.2                  | 135.0                    | 43.38      | 111 |
| 8回 上  | 29.6          | 298.9                  | 39.4                     | 13.17      | 60  |
| 8回 中  |               | 298.9                  | 129.8                    | 43.44      | 124 |
| 8回 下  |               | 311.2                  | 141.7                    | 45.51      | 123 |
| 10回 上 | 37            | 298.9                  | 33.4                     | 11.17      | 66  |
| 10回 中 |               | 298.9                  | 116.8                    | 39.09      | 109 |
| 10回 下 |               | 291.9                  | 126.7                    | 43.41      | 118 |
| 20回 上 | 74            | 295.0                  | 22.1                     | 7.49       | 42  |
| 20回 中 |               | 295.0                  | 135.9                    | 46.06      | 140 |
| 20回 下 |               | 305.0                  | 155.6                    | 51.01      | 143 |

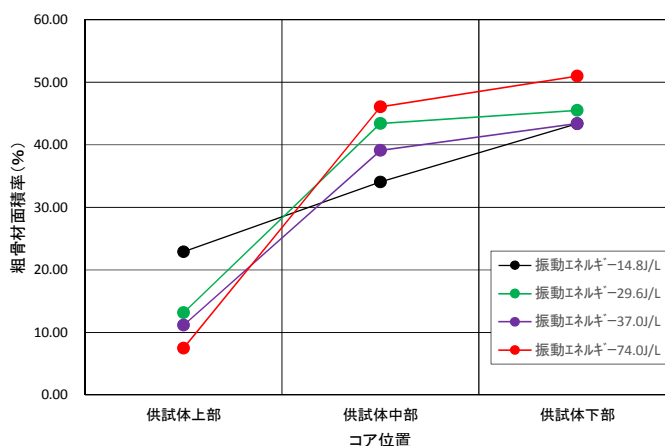


図 4.3.8 粗骨材面積率分布

決定配合に基づいた粗骨材体積が全体に占める割合は 33.9%であり、表 4.3.7 に示すように、面積率の平均値 (33.39%) とほぼ一致しており、面積率は粗骨材含有の指標になる。そこで、面積率の平均値と各コアの面積率との比が粗骨材含有率と一致するものと仮定した。実験で得られた結果から加振回数と粗骨材含有率との関係を整理した結果を図 4.3.9 に示す。

加振回数が増加すると上部の粗骨材含有率は小さくなり、下部は増加する傾向を示す。これは、過剰な締固めで粗骨材が沈降し、材料分離が発生している可能性を示している。ただし、加振回数が 10 回以上では上部の粗骨材含有率の変動が小さくなっている。

表 4.3.7 粗骨材含有率と面積率

| 振動回数<br>(回) |   | 粗骨材面積率<br>(%) | 平均<br>(%) | 粗骨材含有率<br>(%) |
|-------------|---|---------------|-----------|---------------|
| 4           | 上 | 22.89         | 33.44     | -31.4         |
|             | 中 | 34.05         |           | 2.0           |
|             | 下 | 43.38         |           | 29.9          |
| 8           | 上 | 13.17         | 34.04     | -60.6         |
|             | 中 | 43.44         |           | 30.1          |
|             | 下 | 45.51         |           | 36.3          |
| 10          | 上 | 11.17         | 31.22     | -66.5         |
|             | 中 | 39.09         |           | 17.1          |
|             | 下 | 43.41         |           | 30.0          |
| 20          | 上 | 7.49          | 34.85     | -77.6         |
|             | 中 | 46.06         |           | 37.9          |
|             | 下 | 51.01         |           | 52.8          |
| 平均          |   |               | 33.39     |               |

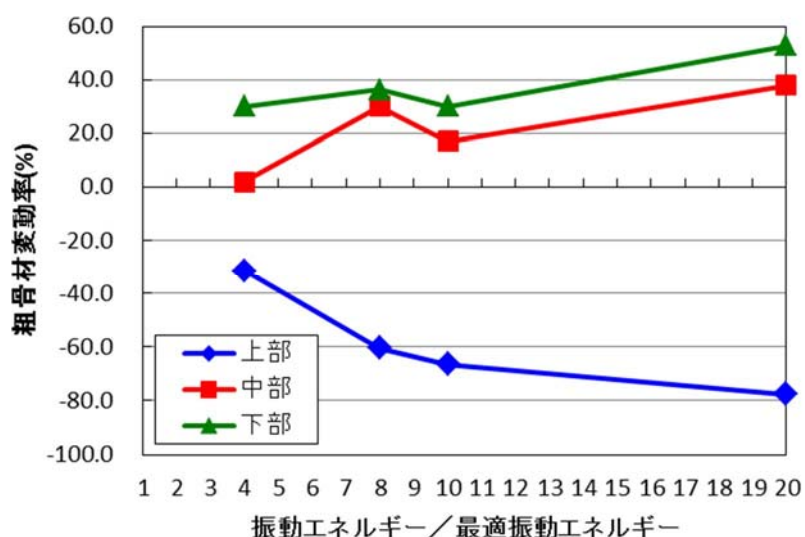
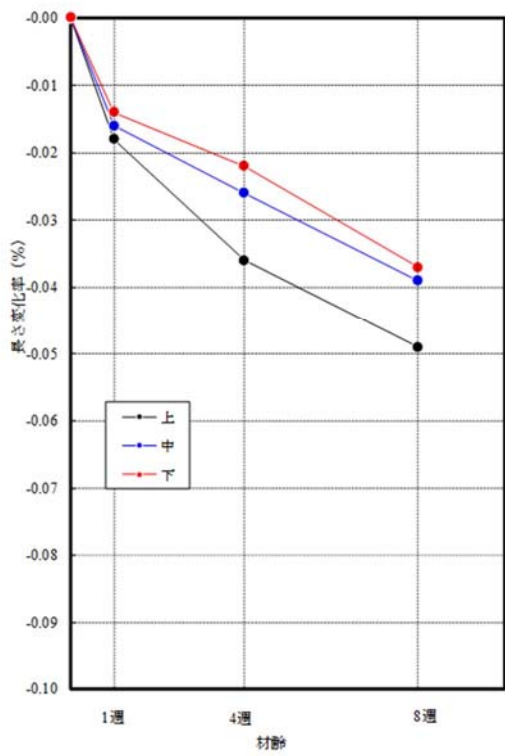
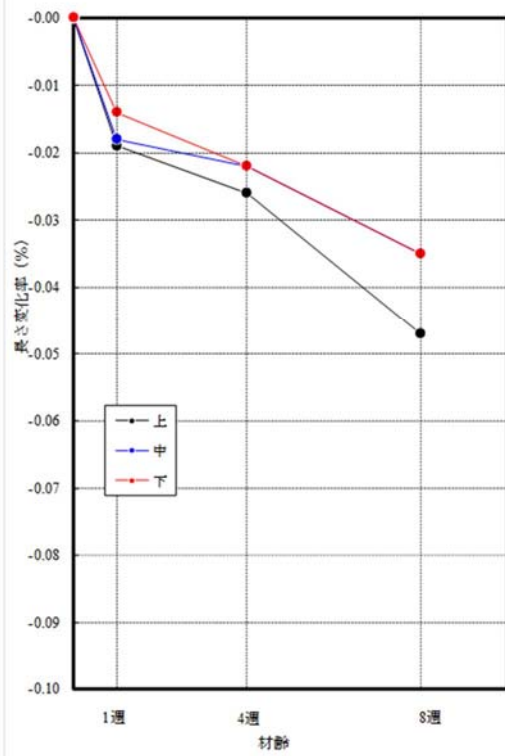


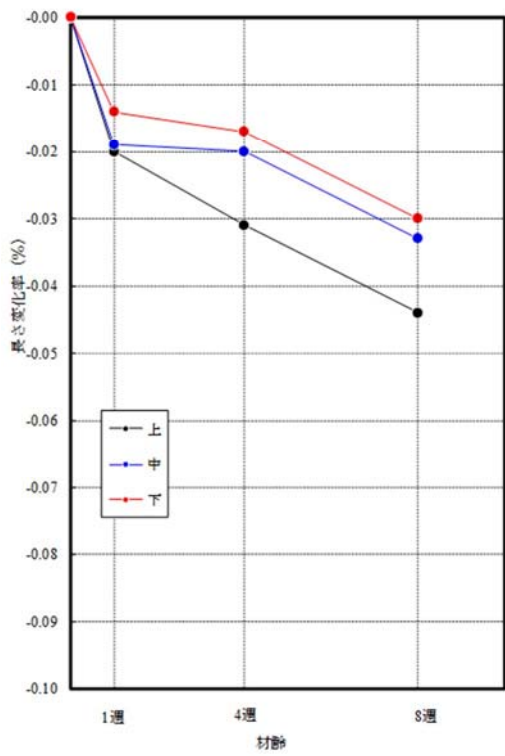
図 4.3.9 加振回数と粗骨材の変動



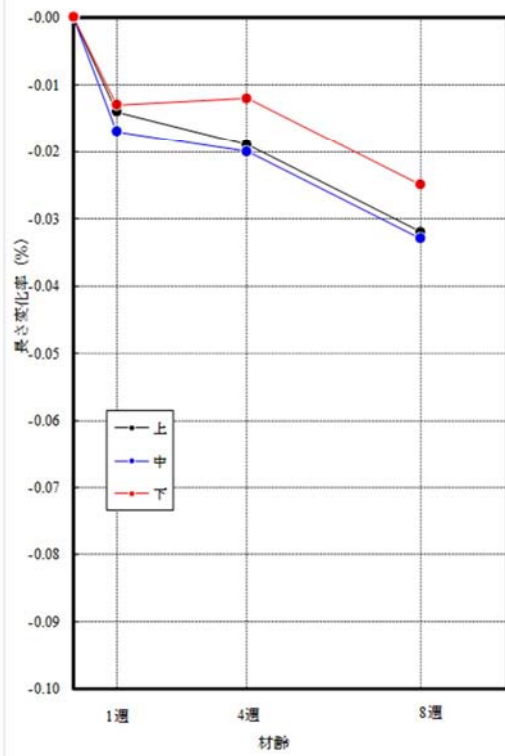
【振動エネルギー:14.8J/φ】



【振動エネルギー:29.6J/φ】



【振動エネルギー:37J/φ】



【振動エネルギー:74J/φ】

図 4.3.10 30cm 角試験体の収縮ひずみ

図 4.3.2 の 30cm 角試験体で得られた収縮ひずみの経時変化は、図 4.3.10 に示すように上部のひずみが大きい傾向が確認される。しかしながら、上部と下部との収縮ひずみ差は、長さ変化試験で得られた「粗骨材含有率－収縮ひずみ」との関係に基づいて推定した差より小さくなっている。この理由については、30cm 角試験体では、乾燥面が 1 面であるのに対して、長さ変化試験では試験体 6 面すべてが乾燥面となっているため水分逸散が促進され早期に収縮ひずみが発現したものと判断される。

次に、大型試験体に使用したコンクリート配合およびフレッシュコンクリートの試験結果を表 4.3.8 に示す。

表 4.3.8 配合および試験結果一覧

| 種別                 | 配合       | 呼び強度 | スランブ及びスランブフローの範囲 (cm)               | 空気量の範囲 (%) | 水セメント比 W/B (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単体量 (kg/m <sup>3</sup> ) |        |              |       |                               |            |
|--------------------|----------|------|-------------------------------------|------------|----------------|--------------|--------------------------|--------|--------------|-------|-------------------------------|------------|
|                    |          |      |                                     |            |                |              | 水 W                      | セメント C | 細骨材 S        | 粗骨材 G | マスターグレンウム 6500 X <sub>2</sub> | マスターエア 202 |
| 中流動覆工コンクリート (増粘剤系) | T1-4(Ad) | 24   | スランブ°<br>21±2.5<br>スランブフロー<br>35～50 | 4.5±1.5    | 53.1           | 50.4         | 170                      | 320    | 890          | 912   | C×1.15%                       | 3.5A       |
|                    |          |      |                                     |            |                |              |                          |        | ①498<br>②405 |       |                               |            |

| 測定項目 | スランブ | スランブフロー             | 加振後の広がり | U形充填性試験                    |            | 空気量 (%) | コンクリート温度 (°C) |
|------|------|---------------------|---------|----------------------------|------------|---------|---------------|
|      | (cm) | (cm)                |         | 充填高さ (mm)                  | 停止時間 (sec) |         |               |
| 加振前  | 21.0 | 37.5×36.6<br>(37.0) | —       | 341<br>347<br>348<br>(345) | 6.3        | 3.9     | 15            |
| 加振後  | —    | 46.9×46.6<br>(47.0) | 10.0    |                            |            |         |               |

30cm 角試験体により振動エネルギーと粗骨材の沈降量との関係を確認した結果、加振するほど粗骨材の変動が大きくなることが確認できた。そこで大型試験体では、振動に伴う粗骨材の移動を把握するために最適な締固め振動エネルギーの 30 倍の振動を加えることとした。振動エネルギーを 111.0J/L にするため、コンクリートを上部まで打設した後、10 秒間加振し各加速度計の最大値と最小値を読み取り、振動時間を 33 分と設定した。ただし、振動数は型枠バイブレータの公称の周期 140Hz として設定した。以下に計算式を明示する。

$$E = m \cdot \alpha_{\max}^2 \cdot t / ((2\pi)^2 \cdot f) \quad \alpha_{\max} = (2\pi^2 \cdot 2a \cdot f^2) / 1000$$

|                 |                          | 近傍    | 中間点    |
|-----------------|--------------------------|-------|--------|
| E               | 振動エネルギー(J/L)             | 13.1  | 0.3    |
| m               | 試料の想定密度(kg/L)            | 2.3   | 2.3    |
| $\alpha_{\max}$ | 最大加速度(m/s <sup>2</sup> ) | 56.0  | 8.3    |
| t               | 振動時間(s)                  | 10.0  | 10.0   |
| f               | 振動数(Hz)                  | 140.0 | 140.0  |
| a               | 振幅(mm)                   |       |        |
|                 | 目標振動エネルギー                | 111.0 | 111.0  |
|                 | 振動時間                     | 85.1  | 3871.9 |
|                 | 必要振動時間t(s)               | 1978  |        |
|                 | 必要振動時間t(m)               | 33    |        |

大型試験体の型枠表面で測定された加速度の代表的な波形とフーリエ解析で求めた卓越振動数を図 4.3.11 に示す。

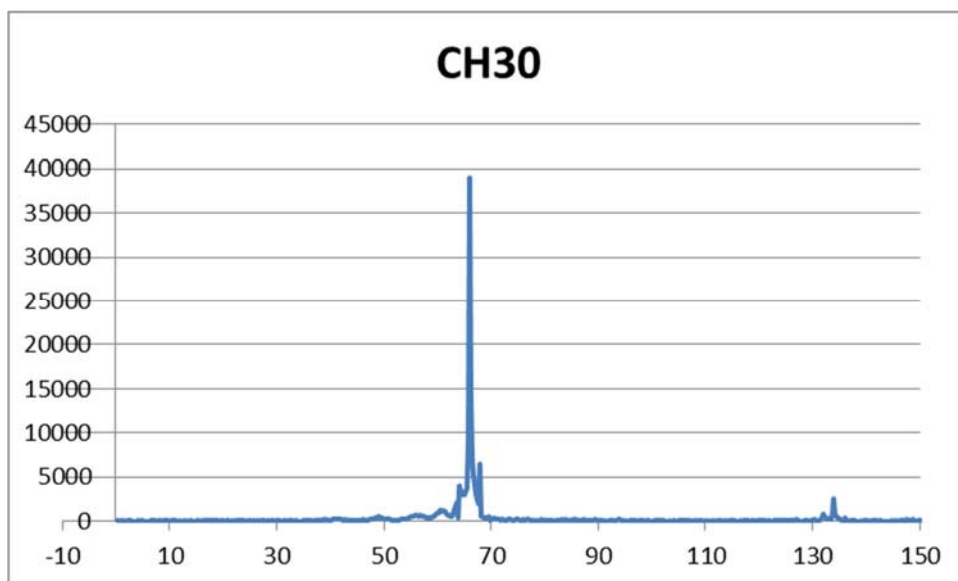
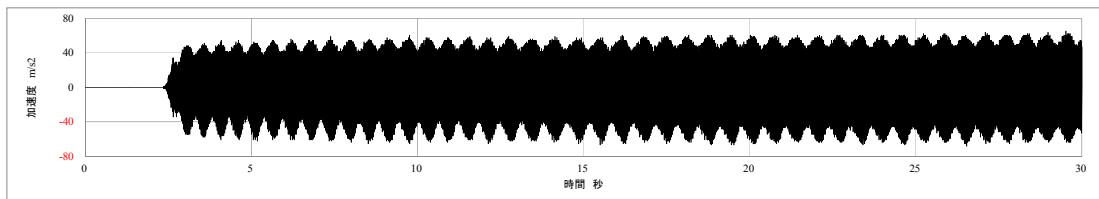


図 4.3.11 CH30 の加速度と卓越周期

加速度波形は、規則的な振動を生じており、卓越周期は 68Hz 付近にあり型枠バイブレータの公称振動数より小さくなっている。これは、型枠の剛性とコンクリート自重に影響を受けているためであると考えられる。

振動エネルギーの距離減衰については、図 4.3.12 に示すようにバイブレータ近傍の加速度 50~60m/s<sup>2</sup> が、最初の縦補強鋼材位置で 1/5 に減衰する。これは中央の縦補強鋼材位置でも同様。±50cm 位置で増加するのは横補強材を伝播していると考えられる。この最大加速度の減衰に基づいて、実際のセントルで中央に補強材を配置した状態を想定した場合の加速度分布は図 4.3.13 のように想定される。

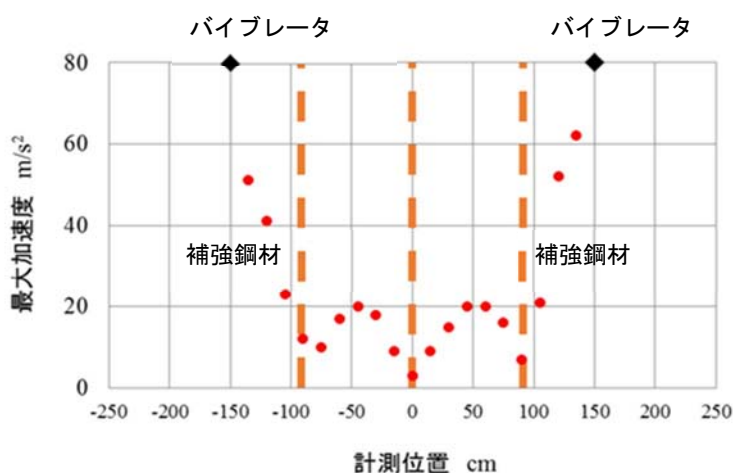


図 4.3.12 最大化加速度の減衰

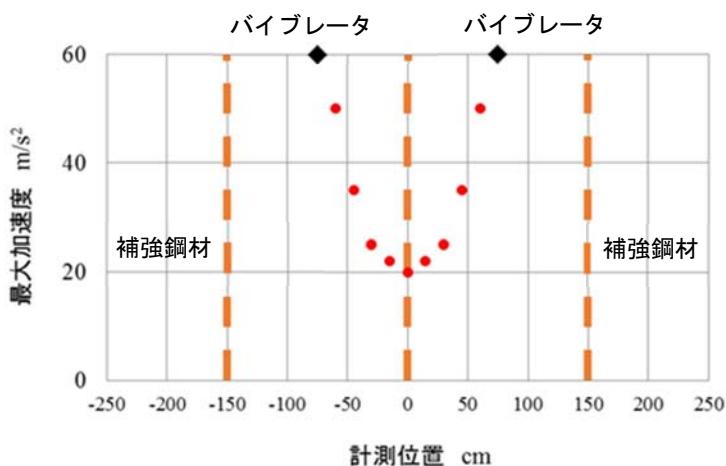


図 4.3.13 セントルでの加速度分布予測 (1.5m 間隔での設置)



コンクリートの粗骨材面積率は、図 4.3.14 に示すように打設位置と高さ方向で整理した。大型試験体では、左側面から 1m 離れた位置からコンクリートを打設した。したがって、右側では 4m の流動している状態である。面積率によると上部と下部で 10%程度しか違いなく、この結果からでは過剰締固めによる粗骨材の分布への影響は顕著でないと思われる。そこで、配合から決定される粗骨材の体積率 33.9%とコアの面積率が等価であると仮定した大型試験体の粗骨材の変動率を、図 4.3.15 に示す。また、振動している型枠面側（コア E）と振動していない型枠面（コア F）で粗骨材の分布の違いを確認するために採取したコアの粗骨材分布を比較した結果を図 4.3.16 に示す。

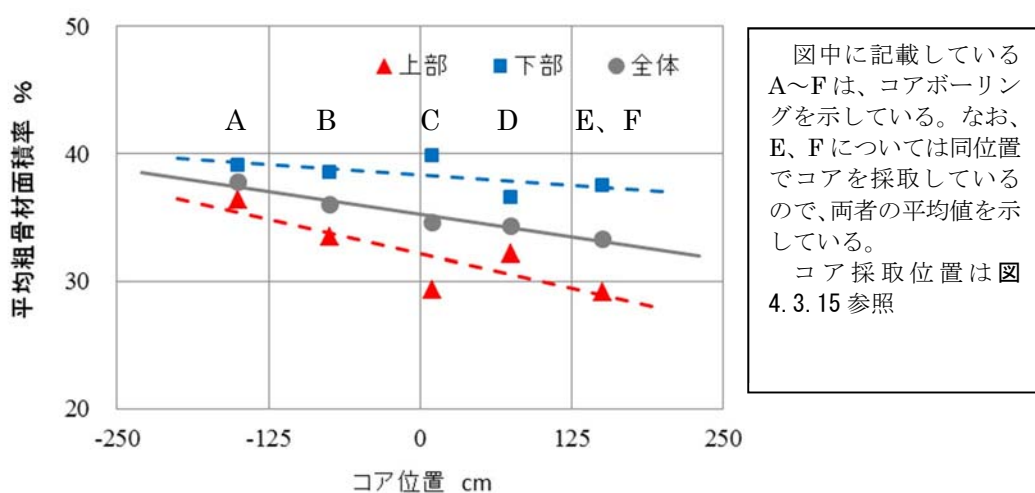


図 4.3.14 粗骨材面積率

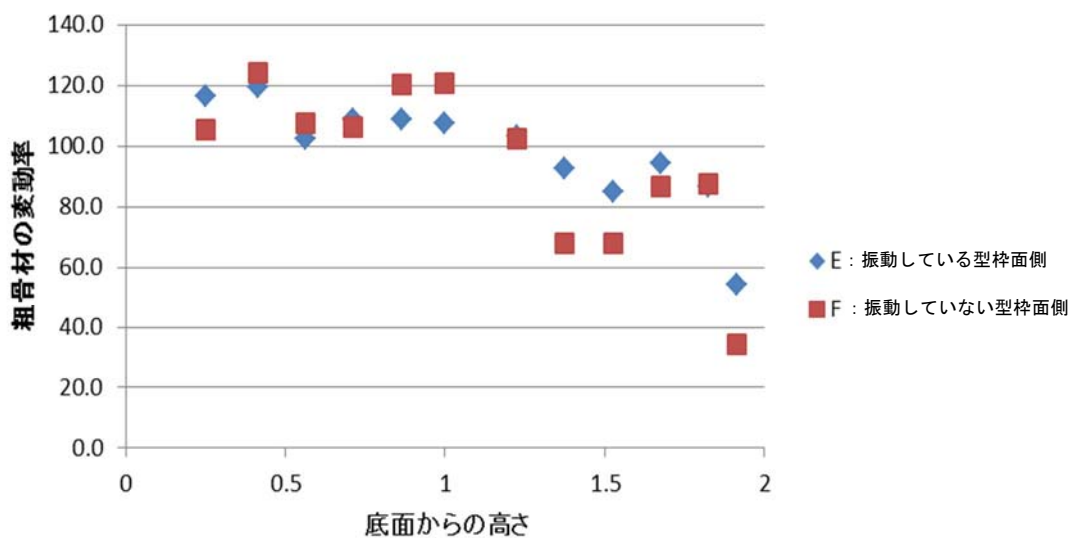
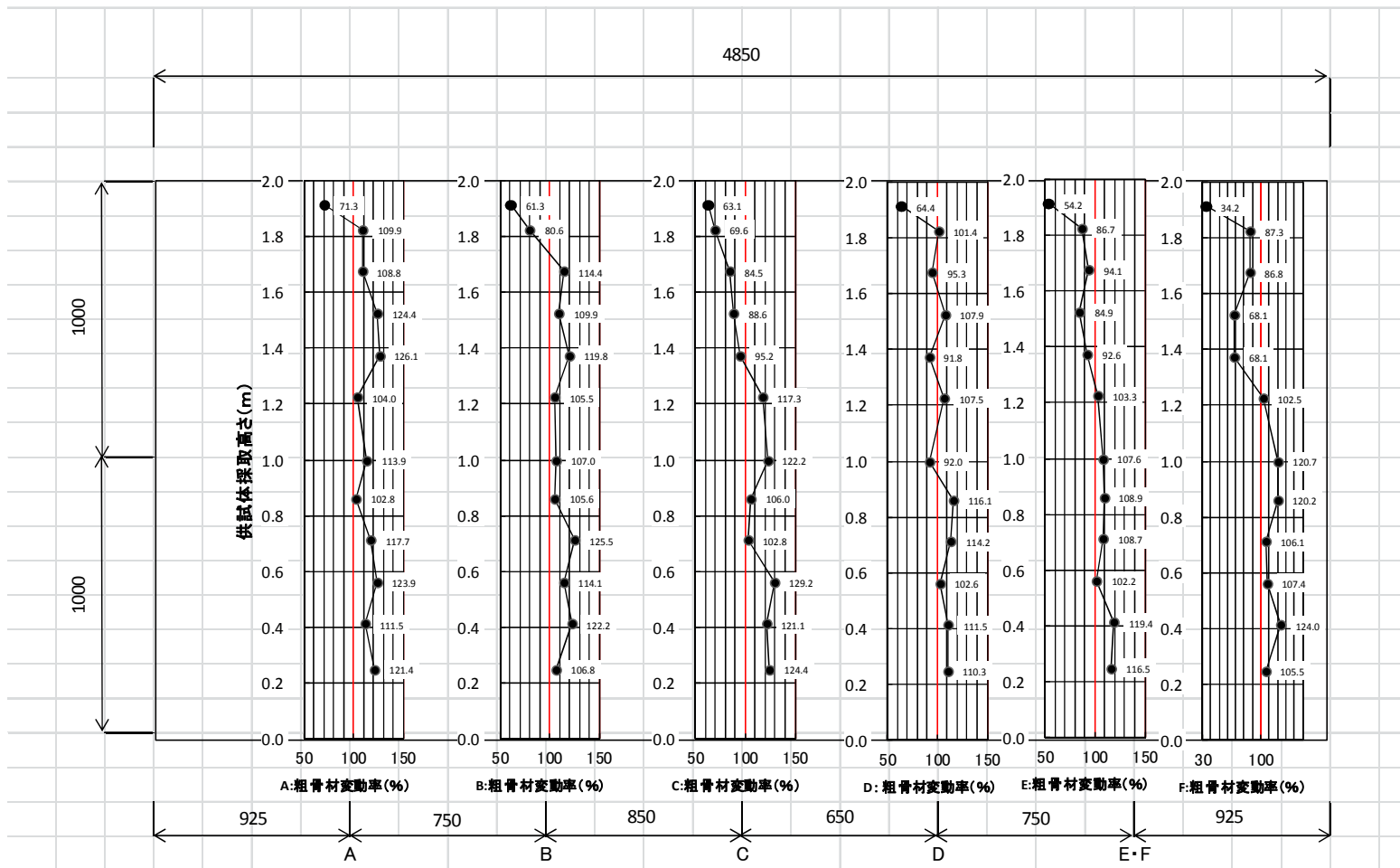


図 4.3.16 E、F の分布状況



※連続して採取したコアを約 20cm ごとに切断し、粗骨材量を計算

図 4.3.15 コアの面積率から換算した粗骨材変動率

図 4.3.15 の結果によると粗骨材の含有率の低下は、上部の表面近傍（上面から 20cm 以内）に限定されており、低減率は E、F を除いて 40%程度である。実際の施工は、上部からコンクリートを連続的に打込み、上部の狭いエリアに粗骨材が少ない領域が限定されている状態となることから、品質上の問題にならないと想定される。また、E と F の粗骨材分布に大きい差異は見られないことから、部材厚 30cm 程度では型枠バイブレータにより内空側と地山側で粗骨材の含有量に違いは生じないものと考えられる。

図 4.3.17 にコアの面積率から換算した粗骨材の変動率を等高線で示した。等高線分布は、型枠バイブレータの設置位置とは相関が無いように判断でき、粗骨材の低減率が 20%以上（青い線）となるのは、大型試験体の中央部付近で上面から約 20cm 程度である。粗骨材の低減率が 20%程度では、収縮ひずみに与える影響が軽微（収縮ひずみの増加率が 10%以下）であるので、収縮ひずみによるひび割れを誘発することは無いものと考えられる。よって、今回の実験結果では、コンクリート流動や過剰な締固めによる材料分離は顕著でないと判断できる。

さらに、仕上がり状況についても、写真 4.3.1 に示すように表面に空気アバタなどの過剰締固めによる影響を確認できなかった。

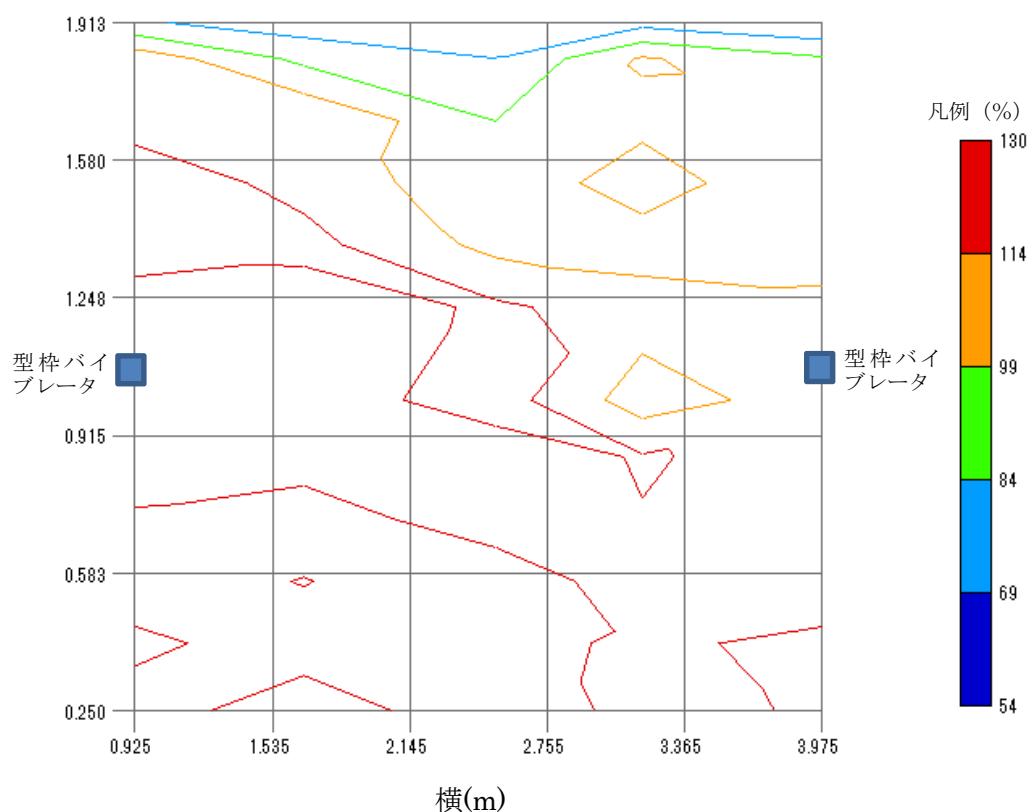


図 4.3.17 粗骨材分布コンター



左側



中央部



右側



写真 4.3.1 大型試験体全景写真

### 3) 実験結果のまとめ

材料分離に関する実験結果を簡単にまとめると次のようになる。

- ①粗骨材含有量の減少と収縮ひずみとの関係は線形であり、粗骨材の含有量が低下すると収縮ひずみが増加する。
- ②小型試験体による試験結果では、振動エネルギーが増加すると粗骨材は沈降するが、その振動エネルギーが適正振動の10倍以上は沈降量が頭打ちになる。
- ③小型試験体の収縮ひずみは、粗骨材含有率が一樣な長さ変化試験結果よりも小さい。その原因については、粗骨材含有率の不均一性を考慮した解析で検討が必要である。
- ④型枠の振動数は、型枠の剛性およびコンクリート重量の影響を受ける
- ⑤型枠バイブレータの振動エネルギーは、補強材部分で小さくなる。
- ⑥今回の大型試験体による実験では、適正な振動エネルギーの30倍程度加振してもコンクリートの流動および締固めによる影響は少ない（粗骨材含有率の変動が20%程度）。

## 4.4 本章のまとめ

### 4.4.1 坑内環境が物性値へ与える影響の把握

覆工コンクリートの収縮ひずみに、影響を与える坑内環境を把握するために、実際のトンネルで測定を行った。

延長200m程度のトンネルでは、貫通後の坑内環境は外気と同様であった。

貫通前の坑内環境は、坑口からの距離が長くなるほど外気の影響は小さくなった。

坑内に暴露した供試体の収縮ひずみは、貫通後のトンネルに比べて貫通前のトンネルで小さい傾向であった。

室内試験の結果では、普通セメントと高炉セメントB種との間には収縮ひずみに差が見られなかった。

材齢1年程度では、乾燥開始時期が収縮ひずみに及ぼす影響は小さかった。

### 4.4.2 覆工コンクリートの養生効果確認試験

養生環境による覆工コンクリートの物性値への影響を室内実験で確認した。

長さ変化試験結果では、乾燥材齢180日における収縮ひずみ量に対して養生の影響はない。ただし、乾燥収縮は、養生が終了しコンクリート表面から水分が発散する時点から生じるため、初期材齢では養生による収縮ひずみ量に違いが見られる。

材齢28日の圧縮強度は、一般的には養生期間が長くなると増加する傾向にあるが、水中養生を7日間実施すれば28日間水中養生を行ったものと同等となった。

脱型後の膜養生、封緘養生の7日間実施および脱型時間の72時間存置で、28日間水中養生した圧縮強度の90%程度以上の強度を概ね確保でき、かつ表面の緻密性を示す透気係数も概ね良好な値を示す。

実トンネルで想定される養生設備を構築する時間（脱型後8時間）にコンクリートを乾燥状態

(室温 20℃、湿度 60%) に放置しても、その後、水分逸散防止あるいは水分供給等の養生を実施すれば品質に大きな影響を与えない。

#### 4.4.3 材料分離に関する試験

覆工コンクリートの過剰な締固めに伴う材料分離による影響を定量的に把握するために実験を実施した。

粗骨材量が配合より小さくなる粗骨材変動率が0%以下の範囲では、粗骨材変動率の低下率と収縮ひずみの増加率とは比例関係にある。まったく粗骨材が含まれない場合の収縮ひずみは、配合どおりのコンクリートの2倍となる。

中流動覆工コンクリートを対象に実施した実験結果では、最適な振動エネルギーの30倍程度の振動エネルギーを締固め時に与えても、粗骨材変動率が-20%程度であった。

#### 【参考文献】

- 1) 東日本・中日本・西日本高速道路㈱：トンネル施工管理要領、2015.7
- 2) セメント協会：コンクリート専門委員会委員会報告ダイジェスト版、pp. 37-39、2011.3
- 3) 土木学会「構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集」
- 4) 松下文明、柴田純夫、張文艶、濱幸雄：モルタル・コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす骨材種別の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No. 1、pp. 107-112、2011
- 5) 坂井吾郎、安齋勝、近藤啓二、菅俣匠：特殊な混和剤を用いたトンネル覆工中流動コンクリートの開発、セメント・コンクリート、No. 787、2012.9
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編：本編]、p. 40、2012



## 第5章 長期物性値推定およびひび割れ発生・進展の長期挙動

### 5.1 各建設工法のひび割れ発生、進展の長期挙動

#### 5.1.1 目的

覆工コンクリートの長期間におけるひび割れ発生、進展の把握には、トンネル坑内の環境条件を考慮した覆工コンクリートの材料物性値の長期間の経時変化を追跡することが可能な解析手法が求められる。

そこで、前章で実施した実験結果による物性データを基に、覆工コンクリートの材料物性値の長期間の経時変化を解析手法により推定し、建設工法ごとの施工方法を勘案したひび割れ発生、進展解析を行い、コンクリート収縮によるひび割れ形態について把握するものである。

#### 5.1.2 解析手法の手順

本章では、コンクリートの収縮特性が覆工のひび割れに与える影響を解析的に把握することを目的としており、解析ケースが多いことから演算時間を短縮するために、図 5.1.1 のような計算フローを用いた。水分移動は、トンネル内空側のみと仮定した 1 次元モデルを用いて材料-構造連成応答解析システム DuCOM-COM3<sup>1)2)3)</sup> (以下、「DuCOM-COM3」という。) でコンクリートの収縮特性等の物性値の経時変化を計算した。この経時変化をひび割れ解析の入力値とすることが可能であるが、本研究はひび割れ進展状況の把握であることから、ひび割れ解析の演算時間を短縮する目的で図 5.1.1 に示すように DuCOM-COM3 で算定された経時変化グラフの最大

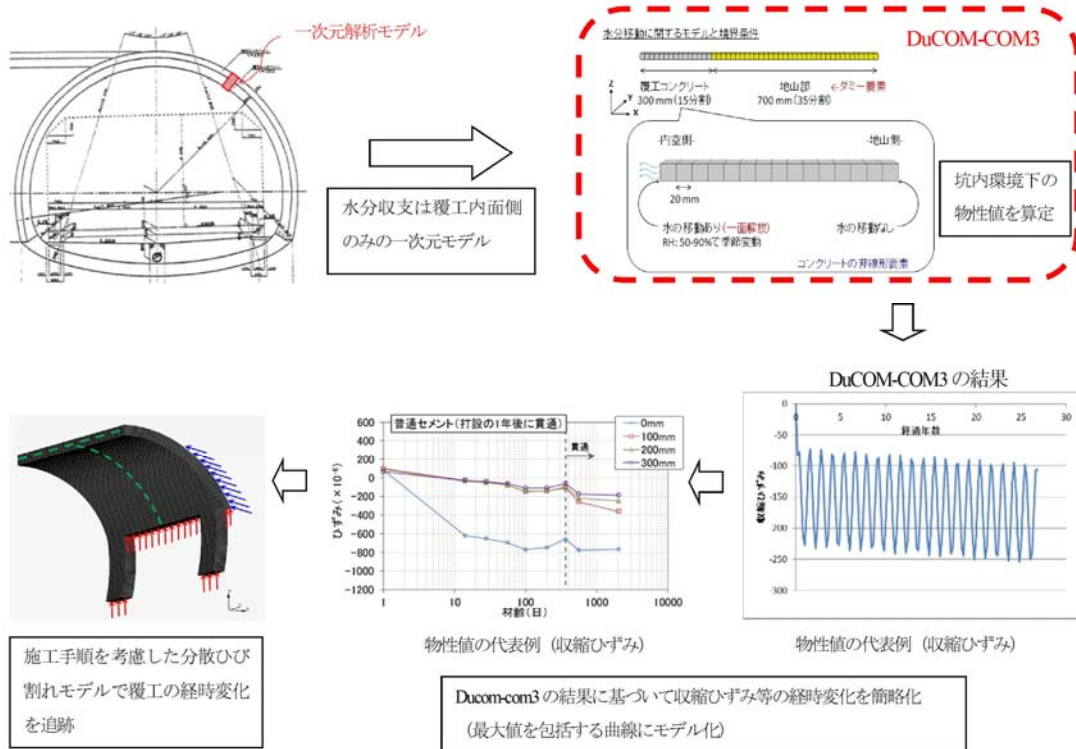


図 5.1.1 覆工コンクリートのひび割れ発生、進展解析フロー

値の包括曲線を入力値とした。その後、各要素にひび割れが1本発生すると仮定した分散ひび割れモデルで覆工全体の解析<sup>4)</sup>を行う。この解析フローでは、DuCOM-COM3で考慮されているコンクリートのクリープを考慮していないので、ひび割れ発生を少し過大に評価している可能性がある。

### 5.1.3 解析モデルの妥当性検証(測定結果に基づく解析)

(1) 坑内環境を考慮した解析モデルでのひずみの算定・妥当性検証

#### 1) 解析手法の概要

DuCOM-COM3を用いて、コンクリートの経時的な長期収縮ひずみを予測する。この解析手法は、セメントの水和反応を考慮した空隙の生成とコンクリート中の水分状態に基づいて自由水の移動等を考慮したものである。

コンクリート中には、下記のような空隙が形成されていると考えられている。

①毛管空隙：もともと水が占めていた部分で、セメントゲル(水和物)によってその空間が満たされなかったため空隙として残存したもので、連続性を有する。

→ W/C が大きいと空隙が多くなる

②ゲル空隙：セメントゲル中に存在する間隙であり、連続性が無く、この空隙に取り込まれた水分の移動は少なく、かつ緩やかと考えられている。

③セメントゲル：セメント成分である、けい酸三カルシウム、けい酸二カルシウム、アルミン酸三カルシウム、鉄アルミン酸四カルシウムに水を加えると、化学反応(水和反応)を起こし、水和物を生成する。この水和反応の結果、生成された微小な結晶体をセメントゲルと呼ぶ。

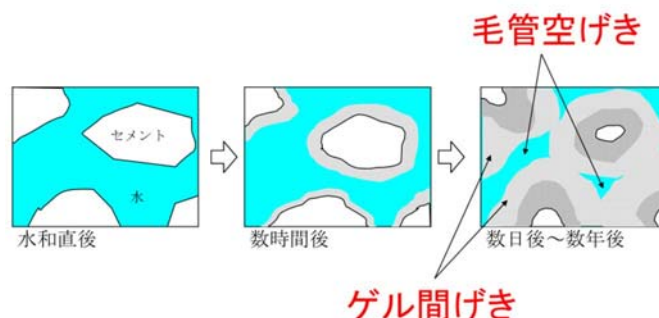


図 5.1.2 硬化コンクリートの空隙イメージ

硬化したコンクリートの収縮ひずみは、主に毛管空隙に含まれる水分(自由水)が移動により引き起こされる。したがって、収縮ひずみの経時変化を計算するためには、セメントゲルを生成するための水分、ゲル空隙に封じ込められるゲル水と毛管空隙の自由水を求め、さらに自由水の移動を考慮する必要がある。東京大学で開発された解析モデルは、図 5.1.3 に示すように入力条件として、配合、養生・環境条件を入力することでセメントの水和反応を計算し、セメントゲルの形成および毛管空隙内の水分移動の経時変化を計算することができる。その結果、コンクリー

トの収縮ひずみの経時変化を推定することが可能となる。また、水和反応で形成されるセメントゲルによる骨格構造も推定できるため、強度や剛性の発現も推定することが可能である。

## 2) モデル化

貫通後の中山トンネル内と貫通前のにしごうトンネル内、および実験室（恒温恒湿室）に設置した供試体を対象に、施工中のト

ンネル内の実環境条件を模擬した再現解析を行い、収縮ひずみの算定と妥当性の検証を行う。

具体的には、普通セメントを用いた、100×100×400 mm および 150×150×530 mm 供試体による六面乾燥試験と、600×600×300 mm 供試体による一面乾燥試験を対象とする。検討期間はコンクリート打設後約1年間とし、トンネル内に設置した供試体については、風速の影響を考慮する。コンクリート配合は、表 5.1.1 のとおりである。

トンネル内の温度、相対湿度、風速に関する環境条件は、実測データに基づいて設定する。

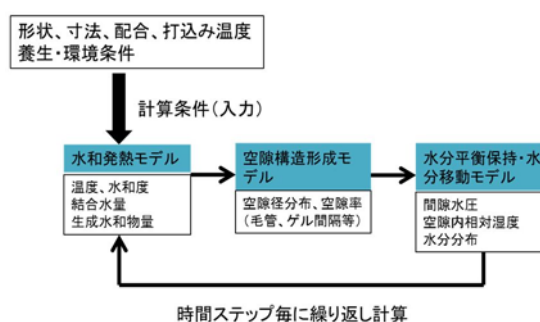


図 5.1.3 計算フローの概念図

表 5.1.1 コンクリートの配合（普通セメント）

(a)  $G_{max}=40\text{mm}$  (150×150×530 mm 供試体)

| 種類        | W/C  | s/a  | air | 単用量 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ |          |        |        |          |          |          |
|-----------|------|------|-----|------------------------------|----------|--------|--------|----------|----------|----------|
|           | 【%】  | 【%】  | 【%】 | W                            | C(Nセメント) | S①(陸砂) | S②(砕砂) | G①(2010) | G②(1505) | G③(4020) |
| 21-15-40N | 59.4 | 45.4 | 4.5 | 171                          | 288      | 447    | 366    | 297      | 396      | 298      |

(b)  $G_{max}=20\text{mm}$  (100×100×400 mm 供試体)

| 種類        | W/C  | s/a  | air | 単用量 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ |          |        |        |          |          |          |
|-----------|------|------|-----|------------------------------|----------|--------|--------|----------|----------|----------|
|           | 【%】  | 【%】  | 【%】 | W                            | C(Nセメント) | S①(陸砂) | S②(砕砂) | G①(2010) | G②(1505) | G③(4020) |
| 21-15-20N | 59.3 | 46.7 | 4.5 | 178                          | 300      | 453    | 371    | 572      | 382      | ---      |

以上の条件の下、構造的な挙動を追跡するためのモデル、発熱および水分移動に関する材料的な挙動を追跡するためのモデルの計 3 つのファイルを作成し、これらを連成して解析することで収縮ひずみや強度等の経時変化を試算する。対称性を考慮した 1/8 または 1/4 モデルとする。水分移動に関する境界条件は、実験条件に応じて、18 時間後に脱型し、六面乾燥または一面乾燥とする。一面乾燥の 600×600×300 mm 供試体では、 $z=300\text{ mm}$  の上面を解放面とする。

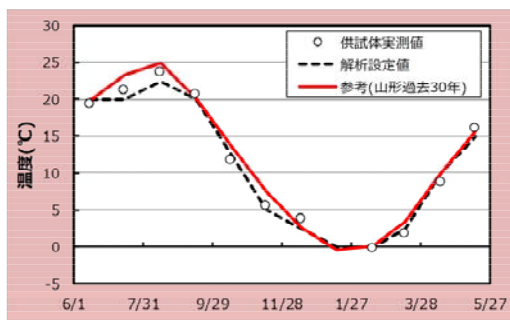
### ①各トンネルの環境条件

温度については、トンネル内で計測されたデータを基に、月平均値を 2.5 °C ごとに丸めた値を用いて近似曲線を作成し、中山トンネルが図 5.1.4 にある解析設定値、にしごうトンネルが図 5.1.7 にある解析設定値を温度条件とした。

湿度については、計測されたデータを基に、温度と同様に月平均値を 5 % ごとに丸めた値を用

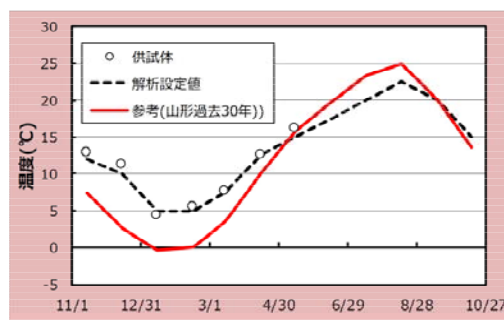
いて近似曲線を作成し、中山トンネルが図 5.1.5、にしごうトンネルが図 5.1.8 に示した解析設定値を相対湿度条件とした。

風速についても、計測されたデータを基に、月平均値の近似曲線を用いて、中山トンネルが図 5.1.6、にしごうトンネルが図 5.1.9 に示した解析設定値を風速条件とした。また、計測していない期間の値については、当該地域の過去の気象データを参考に推定して設定した。



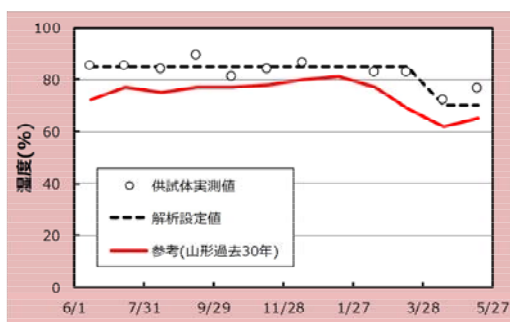
解析で設定した年間の温度条件(月平均値)

図 5.1.4 中山 TN の温度データ



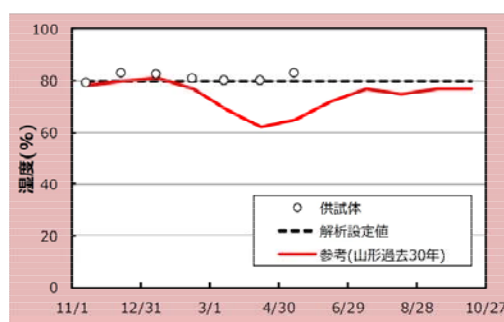
解析で設定した年間の温度条件(月平均値)

図 5.1.7 にしごう TN の温度データ



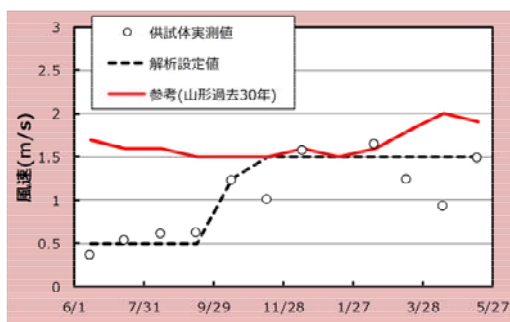
解析で設定した年間の相対湿度条件(月平均値)

図 5.1.5 中山 TN の相対湿度データ



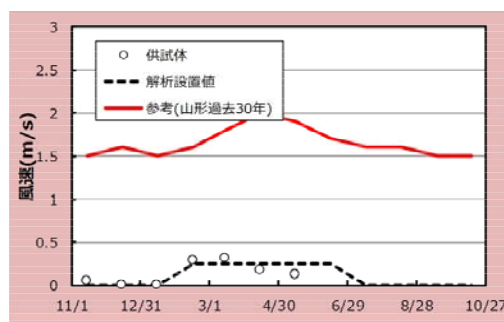
解析で設定した年間の相対湿度条件(月平均値)

図 5.1.8 にしごう TN の相対湿度データ



解析で設定した年間の風速条件(月平均値)

図 5.1.6 中山 TN の風速データ



解析で設定した年間の風速条件(月平均値)

図 5.1.9 にしごう TN の風速データ

②恒温恒湿室の環境条件

恒温恒湿室では18時間脱型後、温度20℃、相対湿度60%一定の条件で、六面乾燥させる環境条件とする（解析対象は、100×100×400 mm および 150×150×530 mm 供試体による六面乾燥試験のみ）。中山トンネルおよびにしごうトンネルと同じく、約1年間の挙動を追跡する。

3) 解析結果

①六面乾燥試験の解析結果概要(□100 および□150)

100×100×400 mm および 150×150×530 mm 供試体による収縮挙動の解析結果を図 5.1.10～図

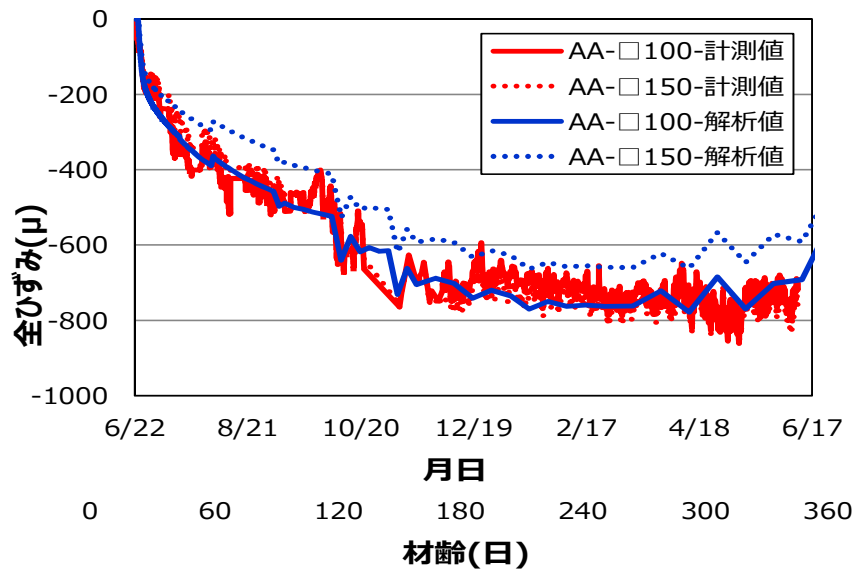


図 5.1.10 全ひずみ解析値と実測値（中山トンネル）

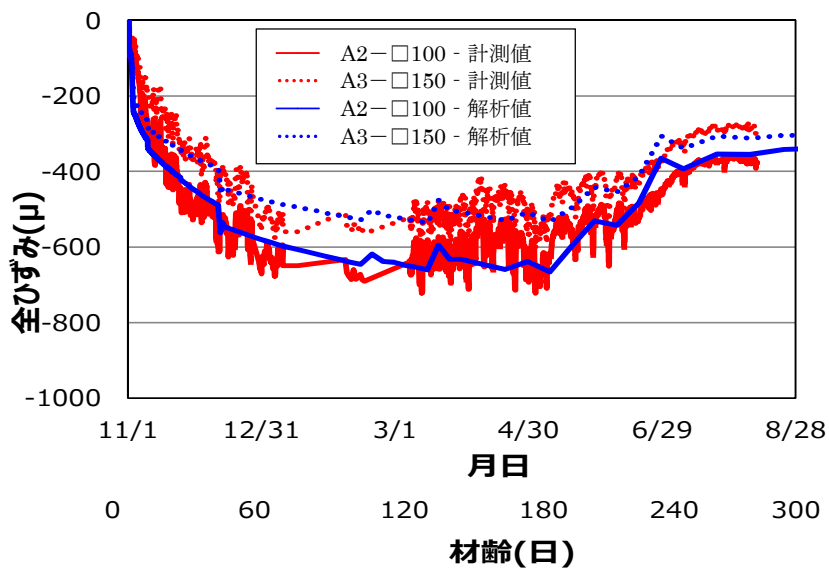
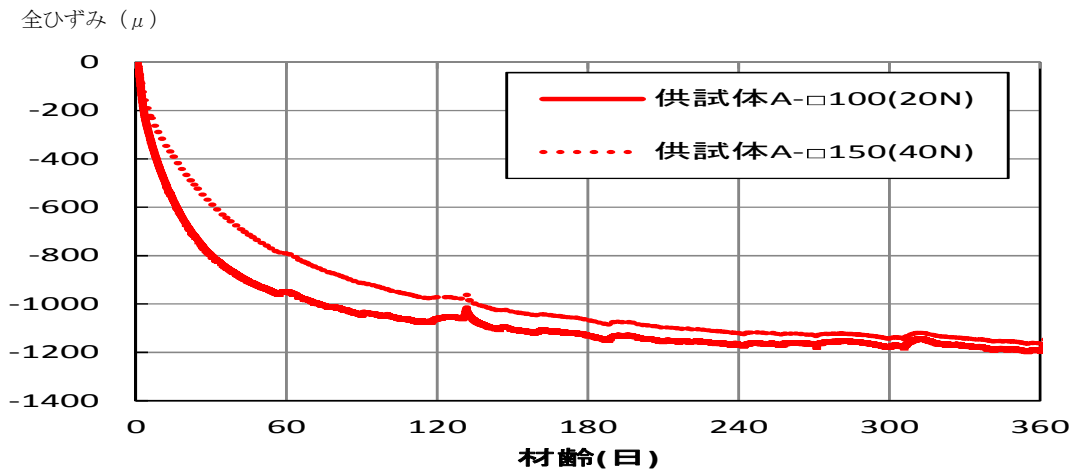


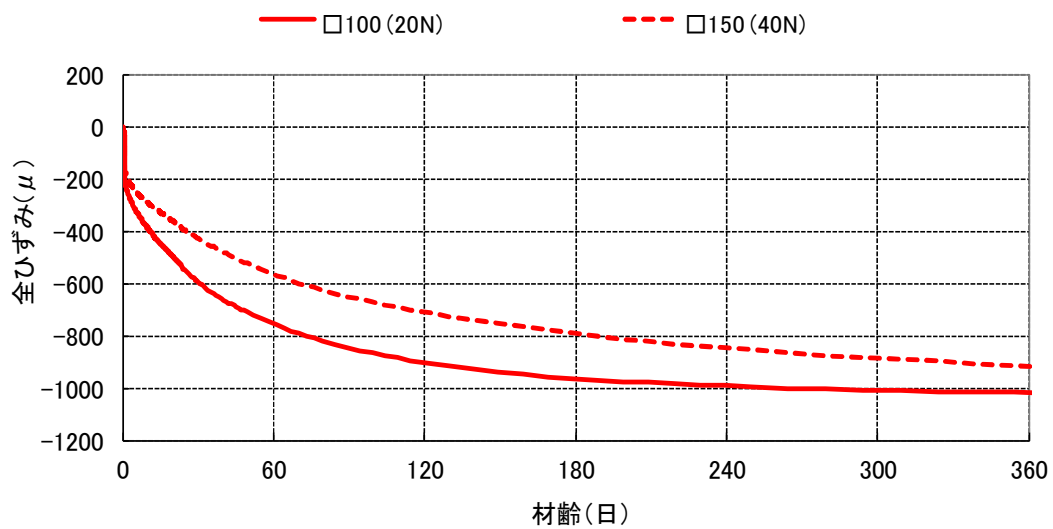
図 5.1.11 全ひずみ解析値と実測値（にしごうトンネル）

5.1.12 に示す。ここでは、温度の影響を含めた全ひずみにより整理しており、脱型時をゼロ点として整理している。

20N の 100×100×400 mm 供試体と 40N の 150×150×530 mm 供試体では、実験結果と比較して、いずれの環境条件においても収縮挙動を概ね捉えられていると言える。



(a) 全ひずみの実験結果



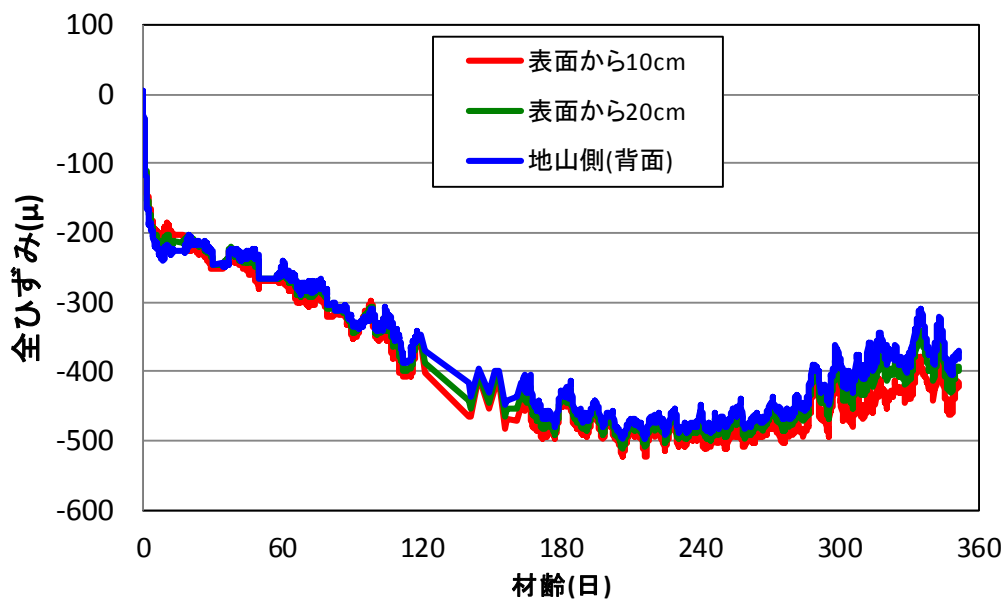
(b) 全ひずみの解析結果

図 5.1.12 恒温恒湿室に設置した六面乾燥供試体

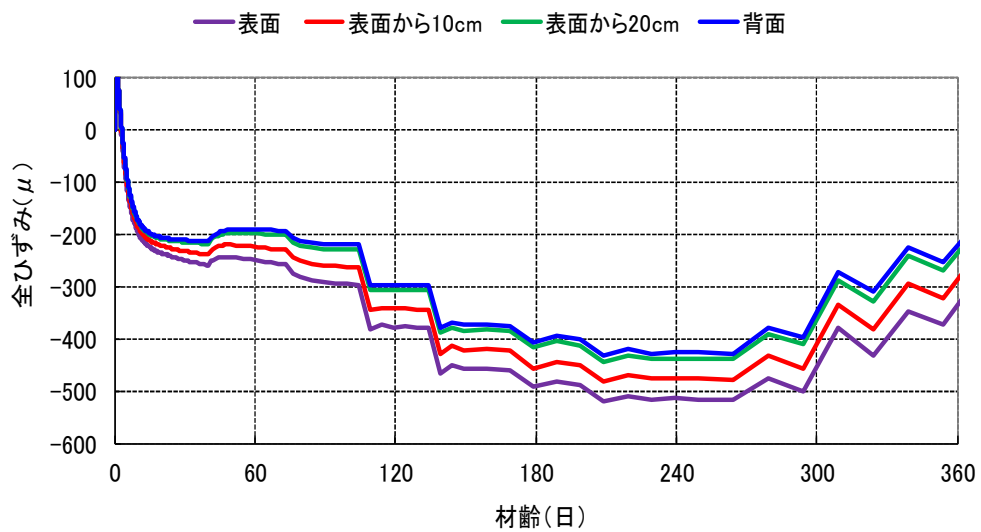
②一面乾燥試験の解析結果概要(□600×600×300)

600×600×300 mm 供試体(一面乾燥)による収縮ひずみの解析結果を図 5.1.13～図 5.1.14 に示す。ひずみ評価では、温度の影響を含めた全ひずみにより整理しており、脱型時をゼロ点として整理している。

600×600×300 mm 供試体(一面乾燥)では、実験結果と比較して、いずれの環境条件においても収縮挙動を概ね捉えられていると言える。収縮ひずみは、1 年間の温度変化の影響を受けつつ、乾燥にさらされる表面で大きくなるのが解析より把握できる。



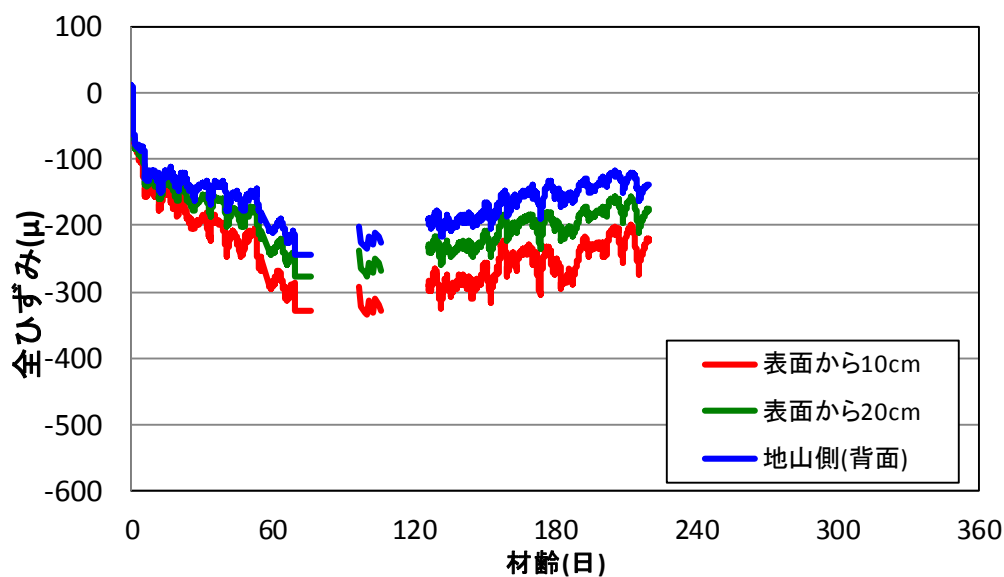
(a) 全ひずみの実験結果



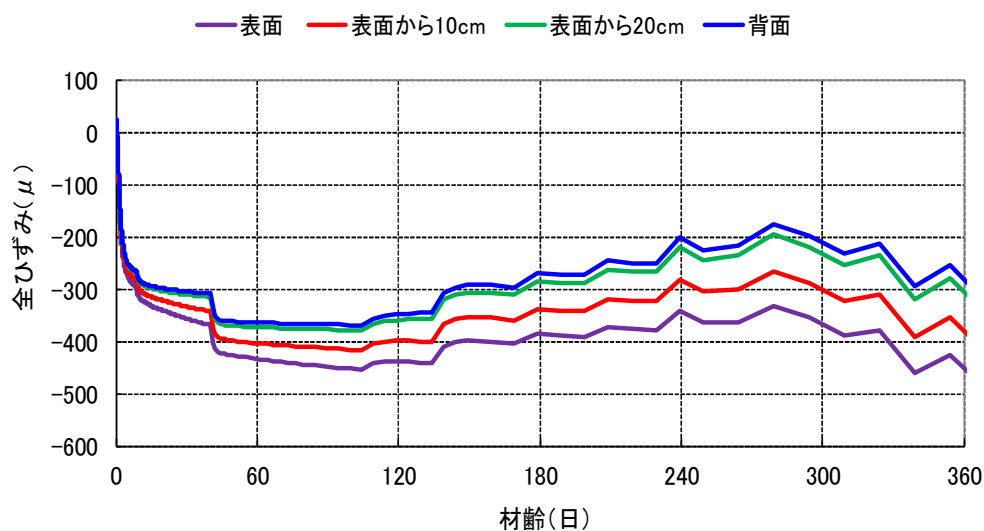
(b) 全ひずみの解析結果

図 5.1.13 中山トンネルに設置した一面乾燥供試体のひずみ経時変化





(a) 全ひずみの実験結果



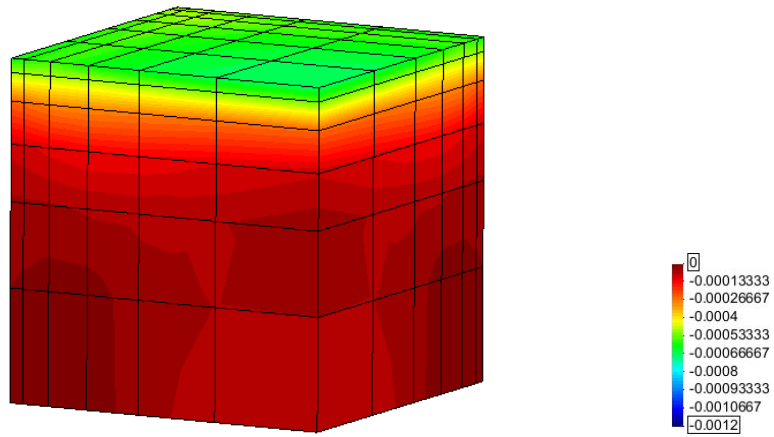
(b) 全ひずみの解析結果

図 5.1.14 にしごうトンネルに設置した一面乾燥供試体のひずみ経時変化

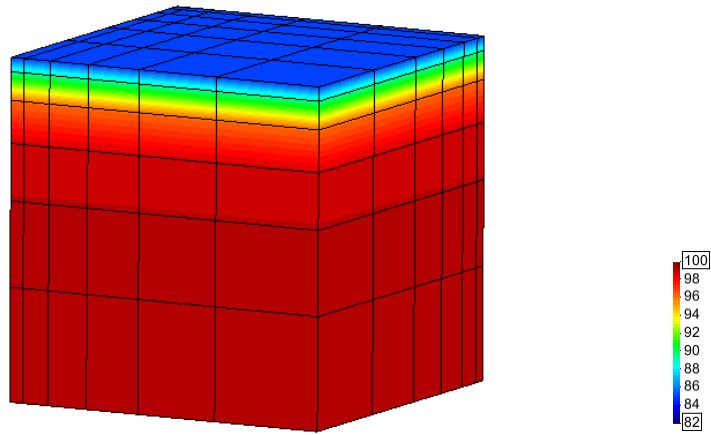
1 年後の時点での最小(圧縮)主ひずみ、相対湿度、圧縮強度分布コンター図を図 5.1.15～図 5.1.16 に示す。対称性を考慮した 1/4 モデルとなっているので、1 辺が 300 mm の立方体としてモデル化されており、上面が解放面としている(その他の五面は断熱・封緘の条件としている)。

乾燥の影響は、表面からわずか数 cm 程度の範囲に留まることが明瞭に見て取れる。

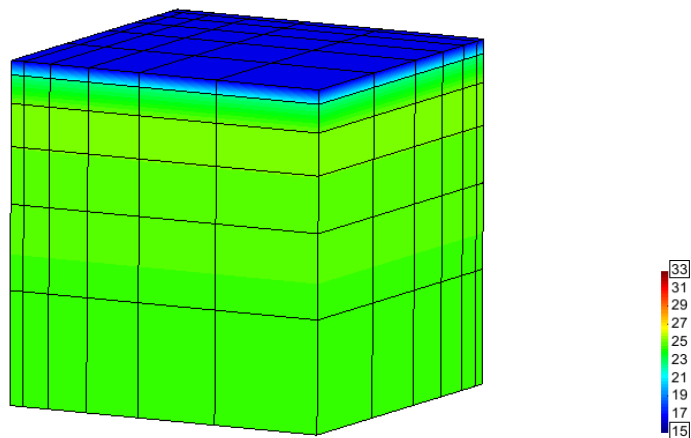




(a) 最小(圧縮)主ひずみ  $\varepsilon_3$

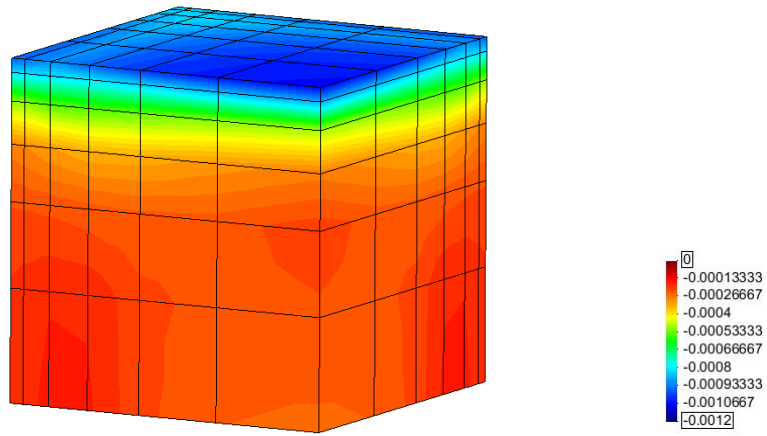


(b) 相対湿度

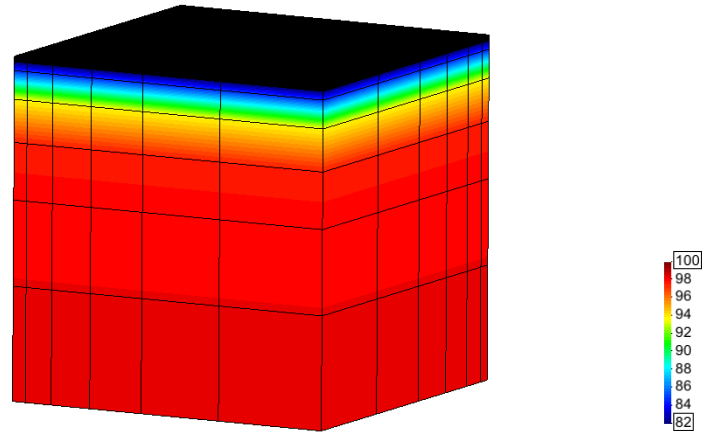


(c) 圧縮強度

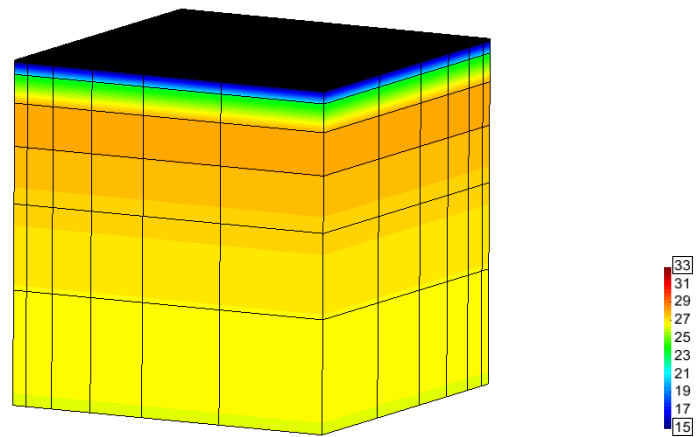
図 5.1.15 中山トンネルに設置した一面乾燥供試体の1年後の各物性コンター図



(a) 最小(圧縮)主ひずみ  $\varepsilon_3$



(b) 相対湿度



(c) 圧縮強度

図 5.1.16 にしごうトンネルに設置した一面乾燥供試体の1年後の各物性コンター図

(2) 長期的な収縮特性の把握

実験結果と解析結果から、環境条件によりコンクリートの収縮が影響を受けることが確認された。解析結果によると、環境条件によって表面からの水分発散量が異なっており、貫通前の坑内といえども風速、湿度などの影響を考慮する必要があること、さらに、温度の変動によりコンクリートは、収縮膨張しており、温度の影響も無視できないことが判った。今回、トンネル坑内での供試体の暴露期間は、1年程度であるため、コンクリート内部の水分移動量は表面近傍に限定されており、今後もコンクリート内部の水分減少により収縮が増大することが予想される。そこで、コンクリートの収縮特性を再現できた本解析手法により、トンネル覆工の長期的な収縮特性の試算を行った。

1) 条件設定

トンネルの坑内環境の測定結果によると、貫通すると風速が大きくなった。コンクリート表面からの水分逸散は、風速に依存することから、貫通後にコンクリートを打設した場合と貫通前に打設した場合は、コンクリートの収縮によるひび割れ発生、進展が異なると想定される。また、ひび割れの発生確率は、打設時のコンクリート温度が20度以上となると高くなることが報告<sup>5)</sup>されている。

以上のことから、貫通による坑内環境の変化による影響を把握するため、中山トンネルとにしごうトンネルの坑内環境の測定結果に基づいて、コンクリート打設時期と貫通時期の組み合わせを表5.1.2のように設定した。

表 5.1.2 坑内環境パターン一覧

| パターン  | 概要                             |
|-------|--------------------------------|
| パターン1 | 貫通後に打設。打設時期は夏季(8月)             |
| パターン2 | 貫通前に打設(夏季8月)。<br>その後、打設後1年後に貫通 |

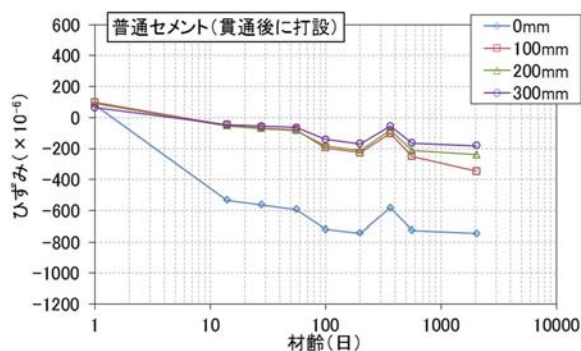


図 5.1.17 パターン1の収縮ひずみの経時変化

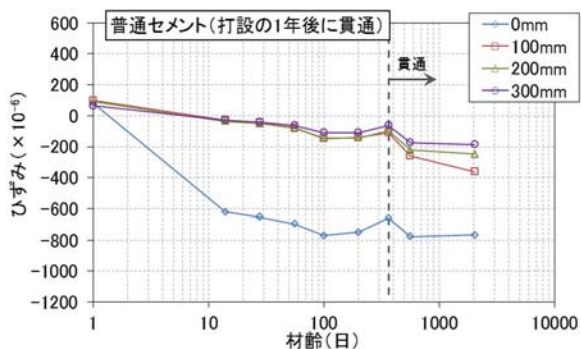


図 5.1.18 パターン2の収縮ひずみの経時変化

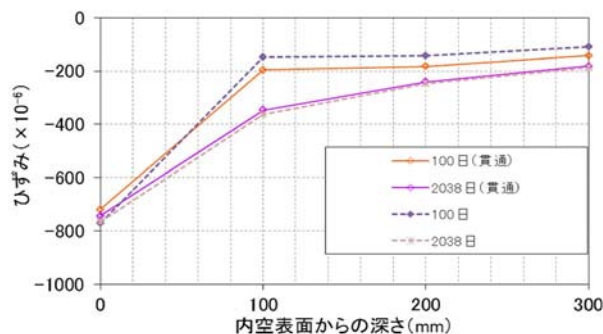


図 5.1.19 覆工内の収縮ひずみ分布

## 2) 解析結果

図 5.1.17 および図 5.1.18 に 5.5 年間の覆工コンクリートの収縮ひずみの経時変化を示す。なお、凡例中の数字は覆工内表面からの距離で、覆工厚さは 300 mm、300 mm の背面はアイソレーションシートに接している。

収縮ひずみの全体的な傾向は、ほぼ同一であるが、詳細に両者を観察すると材齢 100 日前後までのひずみに差が見られる。例えば、材齢 100 日におけるコンクリートの収縮ひずみを覆工厚方向に比較すると、図 5.1.19 のように貫通後に打設したパターン 1の方がパターン 2 に比べて表面部分以外で 50 $\mu$  程度大きなひずみが発生している。この原因としては、貫通後に覆工コンクリートを打設した場合にはコンクリート内部の水分移動が早いため、覆工コンクリート内部の収縮ひずみの発生が早期に生じるためであると推測される。5 年程度経過した状態では、両者のひずみ分布は、ほぼ同一であり貫通前に打設したものと、貫通後に打設したものととの差異はないと判断できる。

### (3) 各建設工法のひび割れ発生、進展解析

覆工コンクリートの長期的なひび割れ発生、進展の把握を行うには、養生環境およびトンネル坑内の環境条件と併せて、覆工コンクリートの建設工法を考慮する必要があると考えられる。そこで、矢板工法（上半先進）、矢板工法（側壁導坑）および NATM の覆工コンクリートの施工手順を再現し、ひび割れ発生、進展解析を実施した。

#### 1) 設定条件

覆工コンクリートの配合は、表 5.1.1 にある 21-15-40N の配合とした。この配合に基づいて、DuCOM-COM3 によりコンクリートの収縮ひずみと強度の経時変化を計算した。この計算では、背面空洞があった場合でも、コンクリート中の水分はトンネル内空側のみに移動するものとした。さらに、ひび割れ発生頻度が高い夏季に打設したと想定して計算を行った。坑内環境については、季節変動を考慮して以下の温度、湿度内で変動させた。

以下に解析条件を示す。

- ① 脱型は、材齢 18 時間とする。
- ② 検討期間はコンクリート打設後 5.5 年間とし、トンネル内空側では、坑内環境を以下の範囲で変動させる。  
温度：0～30℃、湿度：50～90%
- ③ 打設時期は、ひび割れの発生確率が高い夏季施工を想定する。
- ④ 水分移動は、内空側のみで考慮する（地山側では水の出入りはなし）。
- ⑤ 熱の移動は、内空側および地山側で考慮する（地山温度は年間を通して 15℃と設定する）。

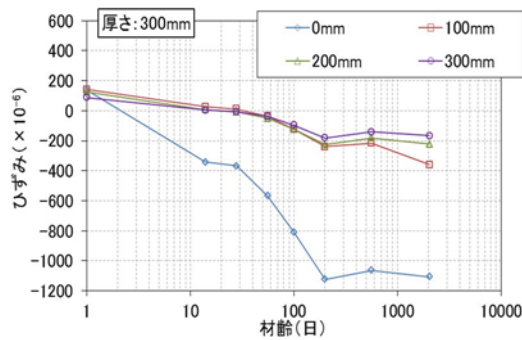
矢板工法では、コンクリートと地山間に空洞がある場合も想定される。今回の解析では、矢板工法で生じる空洞は外気と遮断されるため、コンクリートから空洞に拡散する水分量は微量で無視できるものとした。

2) 要素の解析結果

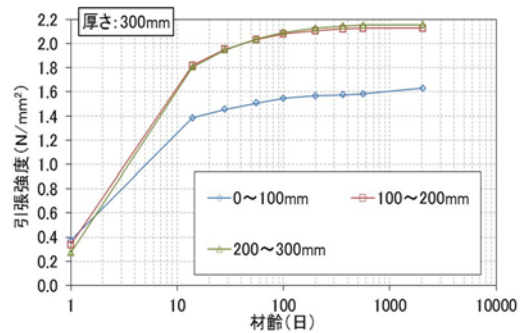
ひび割れ解析に用いる覆工厚さをパラメータとした覆工要素の収縮ひずみの経時変化を図 5.1.20 に、覆工コンクリートの引張強度の強度発現を図 5.1.21 に示す。コンクリート表面のひずみは、打設後 20 日経過した時点でひずみが急増し、110 日経過した時点でほぼ一定値に収束している。実際の解析結果では、季節変動の影響で収縮ひずみは周期的に変動するが、ひび割れ解析では収縮ひずみの最大値を包括する値を入力値として設定した。そのため、図 5.1.20 に示した解析に使用した収縮ひずみの経時変化は、季節による変動を考慮していない。

3) ひび割れ発生、進展解析

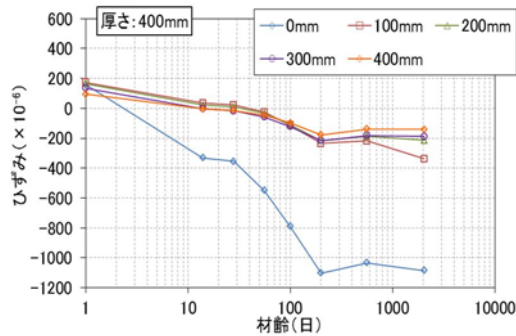
前項で算定された収縮ひずみをトンネル覆工の FEM モデルに入力し、収縮ひずみに起因するひび割れの発生、進展を解析した。



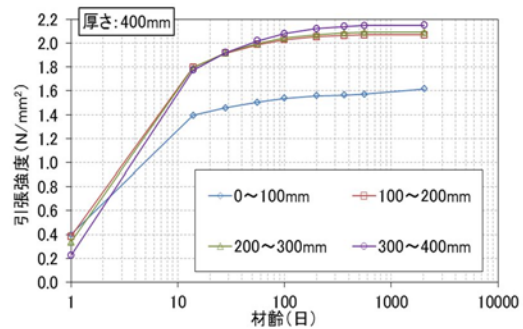
覆工厚 30 cm



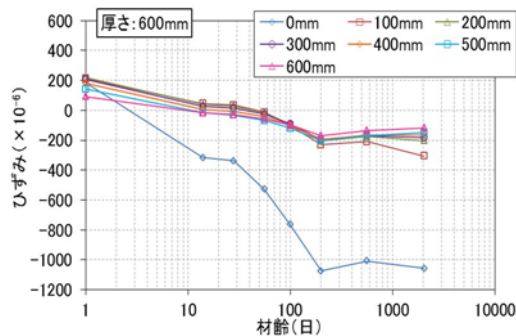
覆工厚 30 cm



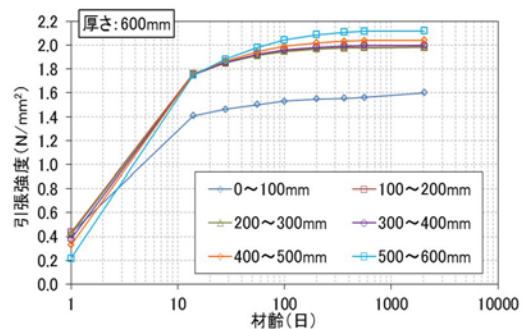
覆工厚 40 cm



覆工厚 40 cm



覆工厚 60 cm



覆工厚 60 cm

図 5.1.20 覆工厚毎の収縮ひずみの経時変化

図 5.1.21 覆工厚毎の引張強度発現

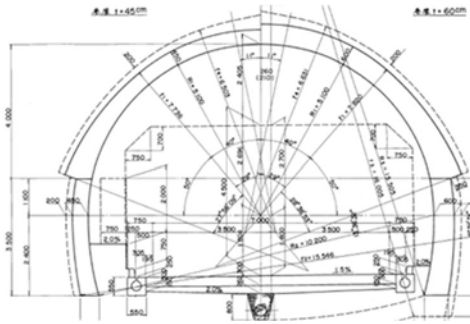
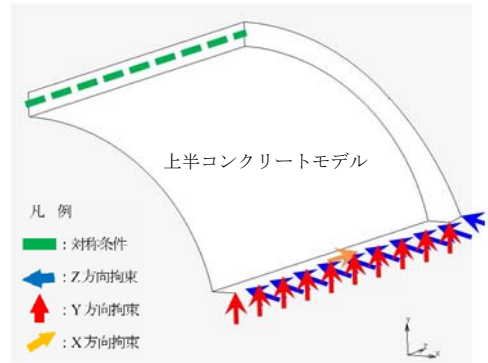


図 5.1.22 標準断面 矢板工法 (上半先進工法)



矢板工法(上半先進工法)

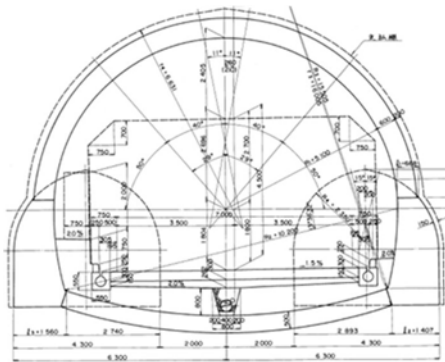
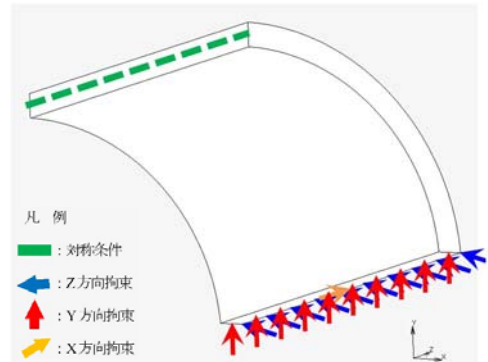


図 5.1.23 標準断面 矢板工法 (側壁導坑先進工法)



矢板工法(側壁導坑先進工法)

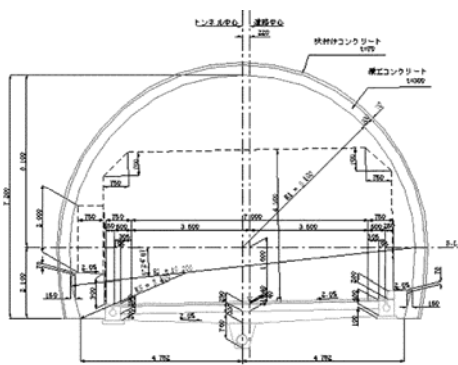
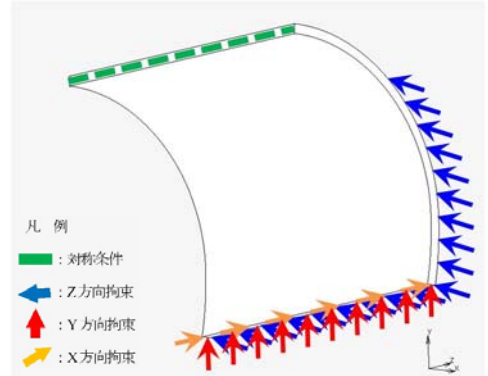


図 5.1.24 標準断面 NATM



NATM

図 5.1.25 各建設工法の解析モデル

矢板工法と NATM で構築された覆工の断面は、図 5.1.22～図 5.1.24 に示す断面とした。ただし、モデル化については、対称条件を考慮して、天端部から片側半分の領域とした。

矢板工法では、覆工は上半と側壁に分割して施工が行われていた。上半先進の覆工打設手順は、第 2 章に示すように上半部分を最初に打設し、その後、脚付けコンクリートと総称される側壁の一部を打設して、上半コンクリートを支持した後に、残りの側壁部分を打設する。このため、上

半と側壁の接合部分には、モルタルの充填等の施工が行われていたが、完全な剛結となっていない可能性が高い。しかしながら、上半先進のアーチ脚部分は自重を支持するため、側壁より部材厚が大きく、地山に直接支持する構造となっている。一方、側壁導坑では側壁コンクリートを打設したのちに上半コンクリートを打設する。そこで、解析は、矢板工法では上半コンクリート脚部が確実に支持されているものとして、**図 5. 1. 25** に示すように上半のみをモデル化して解析を行った。また、矢板工法では地山とコンクリート間に矢板があるので、覆工背面には拘束が無いものとした。一方、NATM では、側壁がインバートコンクリートに完全に拘束されているものと想定し、完全固定の境界条件で解析を行った。さらに、NATM ではコンクリートが地山に密着し、アイソレーションシートが配置されることから、覆工が地山側に変形しないものとした。

なお、解析では、脱型した段階で覆工コンクリートの自重が作用するものとした。

#### 4) ひび割れ発生、進展解析結果

各工法で発生するひび割れ分布図を**図 5. 1. 26** に示す。図では、引張ひずみである最大主ひずみに要素長を乗じたものをひび割れ幅として表示している。解析では、引張特性としてコンクリート標準示方書に準拠した引張軟化曲線を使用しており、ひび割れ発生後に引張応力が低下した場合に原点に指向する除荷経路とした。その結果、打設後 100 日後から 1 年の間に水和熱等の影響で覆工表面に微細なひび割れが発生する。その後、時間経過するのに伴って、水分移動によりコンクリート中の内部水分が地山側に向かって減少する。コンクリート水分の低下により、収縮ひずみが増大し、ひび割れが進展するが、その際にひび割れの局所化が生じるため、表面のひび割れは閉口する。解析結果では、経過時間が覆工コンクリート打設から 5.5 年となっても、ひび割れ幅、長さに殆ど進展が見られなかった。**図 5. 1. 27** に 5.5 年経過時点のひび割れ状況をひび割れ幅の表示レンジを変えて示している。各工法のひび割れ発生状況を簡単にまとめると以下ようになる。覆工厚が均一である場合には、トンネル縦断方向のひび割れとそれに直交するトンネル横断方向のひび割れが発生している。この場合には、コンクリート片を引起すような斜めひび割れや閉合ひび割れの発生は見られない。

上半先進工法の場合には、標準的な覆工については、天端部と設計巻き厚が変化するアーチ肩部にトンネル縦断方向のひび割れが発生する。さらに、トンネル横断方向にもひび割れが発生する。これらのひび割れ幅は、0.1～0.2mm 程度であり、微細なひび割れである。

側壁導坑先進工法の場合は、標準的な覆工については、天端部にトンネル縦断方向のひび割れが複数発生する。そのひび割れ幅は、1 本のみが 0.2～0.3mm で、その他のひび割れは 0.1～0.2mm であった。

NATM で施工した場合には、標準的な覆工に発生するひび割れの大部分は 0.1mm 程度であり、0.2mm 以上のひび割れは天端部に生じるトンネル縦断方向のみである。また、インバートの拘束によるひび割れがトンネル横断方向に発生するが、そのひび割れ幅は 0.1～0.2mm の範囲である。側壁導坑先進工法と比較して NATM でトンネル縦断方向のひび割れ本数が減少したのは、覆工厚の相違によるものと考えられる。



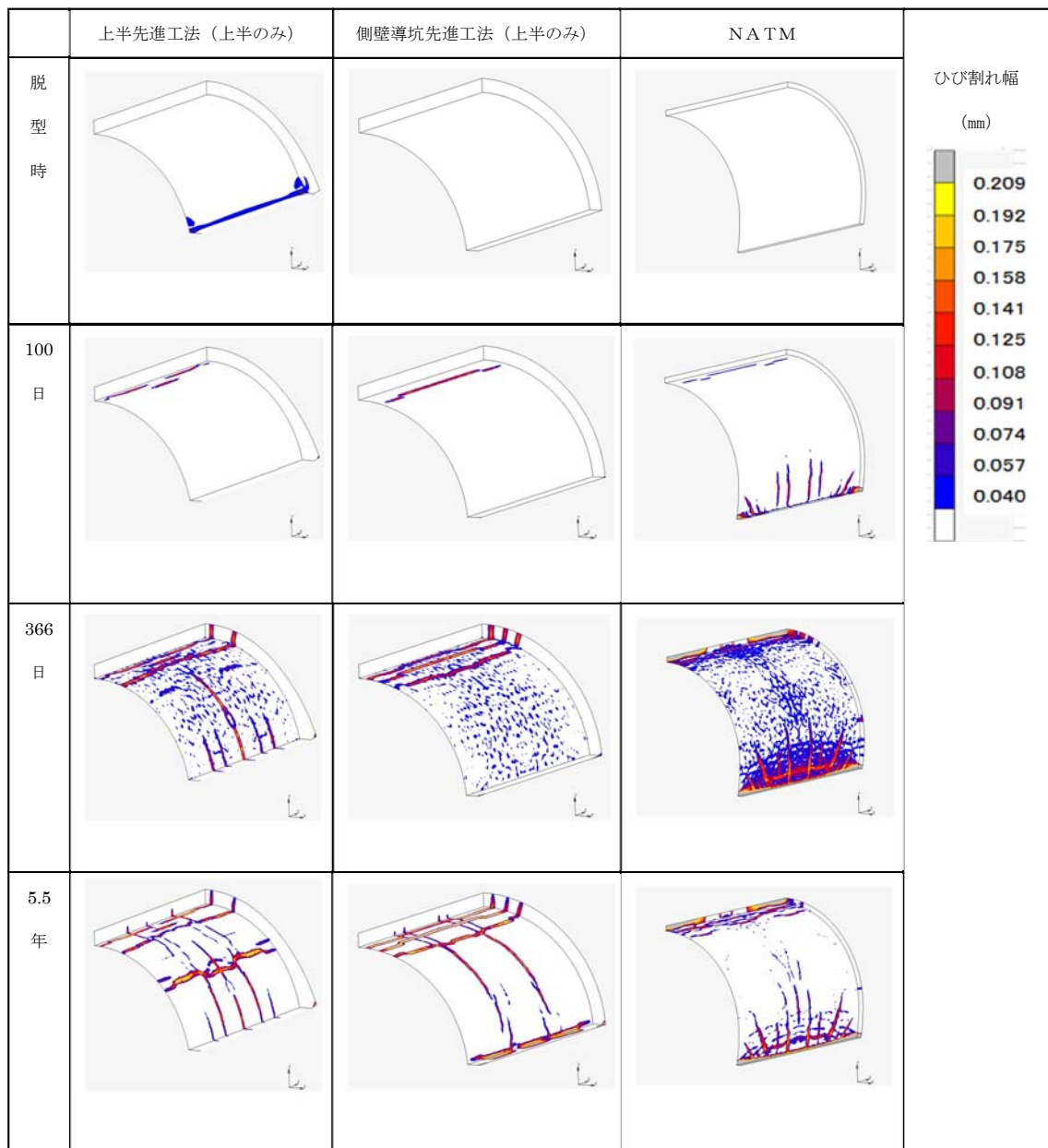


図 5.1.26 建設工法によるひび割れ発生、進展の相違

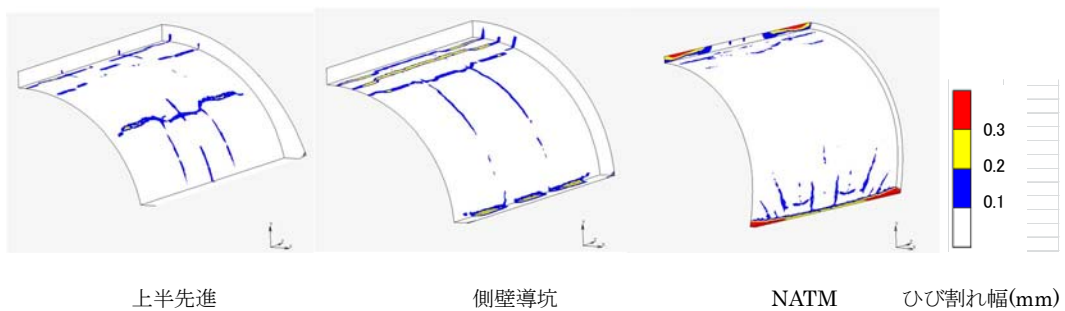


図 5.1.27 5.5年経過した時点のひび割れ発生状況



図 5.1.27 に示す最終的なコンクリート収縮によるひび割れ分布の解析結果を TCI 値の各成分ごとに算定し、第 3 章で既往の点検記録からコンクリートの収縮に起因する一般的なひび割れ分布として設定した TCI(50)値と比較した結果を表 5.1.3 に示す。なお、参考として TCI 値算術平均についても比較を行った。点検記録は、0.5mm 以上のひび割れを対象として TCI 値を算定しているのに対

表 5.1.3 TCI 値一覧  $F_{11}$ 、 $F_{22}$ =単位： $\times 10^{-5}$

|          |                 | NATM | 上半先進 | 側壁導坑 |
|----------|-----------------|------|------|------|
| 算術平均     | $F_{11}$        | 3.24 | 6.00 | 6.87 |
|          | $F_{22}$        | 1.73 | 4.49 | 2.95 |
|          | $F_{22}/F_{11}$ | 0.53 | 0.75 | 0.43 |
| TCI(50)値 | $F_{11}$        | 1.79 | 4.86 | 6.69 |
|          | $F_{22}$        | 0.59 | 3.44 | 2.29 |
|          | $F_{22}/F_{11}$ | 0.31 | 0.70 | 0.34 |
| 解析結果     | $F_{11}$        | 1.30 | 5.30 | 7.80 |
|          | $F_{22}$        | 0.30 | 3.30 | 2.50 |
|          | $F_{22}/F_{11}$ | 0.23 | 0.62 | 0.32 |

して、解析結果では 0.3mm 前後のひび割れが主体であるため、点検結果の TCI 値は解析結果のものより大きくなる傾向があると考えられる。表 5.1.3 に示すように算術平均は、前述したように外力の作用等の特殊条件下で極端に TCI 値が大きいトンネルの影響を受けていると想定される。したがって、各工法の代表的なひび割れ発生状況としては、TCI(50)値と考えられる。TCI(50)値とコンクリートの収縮ひずみのみを考慮した解析結果の TCI 値は、近い値を示しており、 $F_{22}/F_{11}$  の比率についても近い値を示している。さらに、解析結果では図 5.1.27 に示すようにせん断成分のひび割れは発生しておらず、点検記録の TCI 値でもせん断成分が極めて少ない傾向と一致している。このことから、TCI(50)値以下の値を示すトンネルは、コンクリートの収縮ひずみの影響を強く受けていると判断できると想定される。ただし、実際のトンネルの TCI 値のばらつきが大きいことから、トンネルに生じるひび割れはコンクリートの収縮ひずみ以外の要因の影響を受けていると想定される。

解析結果によると、コンクリートの収縮ひずみに起因するひび割れは、トンネル縦断、横断方向に発生し、コンクリート片はく落を引き起こす要因となる斜めひび割れを発生させない。第 3 章での既往の点検記録からの TCI 値の分析でもせん断成分が少なく、TCI(50)値が解析結果と近い値となった。

しかしながら、その他の亀甲状等ひび割れ形態やひび割れ幅については、解析結果では再現できず既往の点検記録と相違がある。要因としては、亀甲状のひび割れについては、コンクリート自体の収縮ひずみのみを考慮した数値解析では再現できないことが言える。また、ひび割れ幅については、外気温の季節変動の影響を受けることが知られている。したがって、解析結果で得られたひび割れ幅は、ある条件下を想定した値であることに留意する必要があるが、コンクリートの収縮ひずみのみで点検記録の様なひび割れ幅になることは考えにくい。ただし、ひび割れの発生パターン自体は、解析結果と点検記録の TCI 値の傾向に類似性が見られたことから、コンクリートの収縮ひずみが覆工のひび割れに影響を与えていると判断でき、ひび割れ幅については、収縮ひずみ以外の材料、施工等による内因が影響を与えていると想定される。

#### (4) 材料分離、覆工厚不足がひび割れへ与える影響把握

コンクリート収縮によるひび割れは、トンネル縦断、横断方向に発生し、コンクリート片はく落を引き起こす要因となる斜めひび割れを発生させない結論に至ったが、収縮ひずみ以外の影響でひび割れが複合的に発生し、コンクリート片はく落を引き起こすことが懸念される。そこで、収縮ひずみ以外で覆工のひび割れ発生、進展に影響を与える因子によるひび割れ発生、進展を定量的に推定することとする。

第3章で実施した、供用中のトンネル覆工から採取したコアによる材料分離(粗骨材の偏り)調査の結果では、覆工コンクリート内には粗骨材が少ない領域が局所的に存在している可能性があり、その厚さは10cm以下と想定された。また、第2章の建設工法の整理および既往文献整理、第3章による既設トンネルの覆工調査では、特に矢板工法における背面空洞の発生や不均一な覆工厚となる可能性が高いことがわかった。これら施工の不具合に着目し、材料分離、背面空洞および覆工の不均一の状態が、ひび割れ形態に与える影響について検討を行う。

##### 1) 材料分離

第3章での既設トンネル覆工から採取したコアの粗骨材含有率の結果から、覆工コンクリート内部に粗骨材が少ない領域が局所的に存在し、材料分離を生じている場合があることが確認された。ただし、発生頻度が高い領域などについては、採取されたコアの位置が限定されていることと、対象としたトンネル数が少ないことから同定することが出来なかった。

覆工コンクリート打設時のコンクリート流動による影響を実験した坂井ら<sup>9)</sup>の報告によると、打設口1箇所からスランプ15cmのコンクリートを打設される天端部分の状況を再現した実験では、打設口から約8m程度離れると粗骨材がほとんど含まれていないと報告されている。

一方、中流動覆工コンクリートで同様の実験を実施した場合には、粗骨材の含有量低下は少なかったと報告されている。この原因としては、スランプ管理のコンクリートでは流動距離が長くなるとモルタル分が先走りして材料分離が発生するものと想定される。そこで、今回は、打設スパンは10.5~12mであることから、**図 5.1.28**に示すように天端部の妻側に2m程度の材料分離が発生し、粗骨材が少ない領域が発生したと想定して数値解析を行う。計算条件としては、コンクリートの配合および坑内環境は第4章と同一とし、上半先進工法で施工されたトンネルとする。また、材料分離については**図 5.1.28**に示すように材料分離範囲では、全く粗骨材が含まれていないものとする。収縮ひずみと粗骨材含有率との関係は、第4章の試験結果に準拠し、材料分離範囲の収縮ひずみは健全な部分の2倍とする。

計算結果によると、**図 5.1.29**に示すように材料分離が発生した周辺に斜めひび割れが生じて

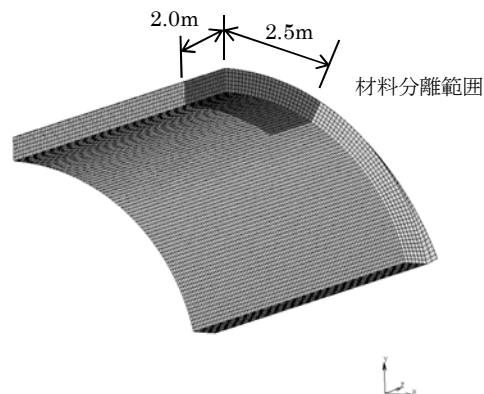


図 5.1.28 上半先進における材料分離範囲

おり、材料分離の有無がひび割れの発生に影響を与えている。また、ひび割れ幅については、材料分離の程度に依存していると想定される。ひび割れ幅については、隣接した要素にひび割れが発生しており、隣接しているひび割れ幅はほぼ等価である。隣接要素に生じたひび割れは、実際には1本のひび割れに集約する可能性があるので、隣接要素に発生したひび割れ幅については、計算結果より大きくなると想定される。想定されるひび割れ幅の最大値は0.5から0.6mmと判断される。

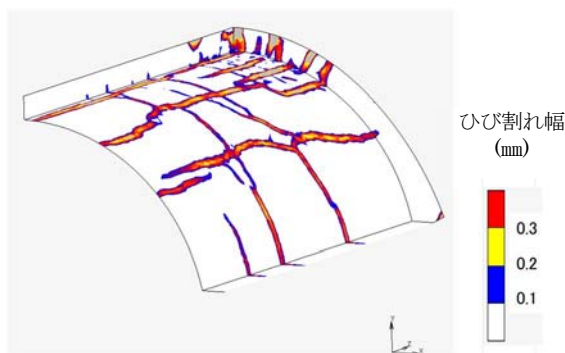


図 5.1.29 上半先進におけるひび割れへの材料分離影響

## 2) 覆工厚不足

矢板工法のトンネルは、その構造から覆工背面に空洞が生じやすく、覆工厚についても不均一な状況である。第3章での矢板工法の背面空洞および覆工厚調査においても、トンネル覆工背面の空洞および巻厚不足が確認できており、当該箇所ひび割れについては、縦断方向のひび割れが発生しやすい傾向がある。併せて、背面空洞がみられる箇所では、斜めひび割れの発生が多くなる傾向がある。

また、矢板工法で施工された新幹線トンネルの覆工厚に関する報告<sup>7)</sup>によると、覆工厚の不足は、天端部でなく、天端から15度離れた箇所(天端から1m前後)に発生する頻度が高いことが示されている。そこで、アーチ肩部分に覆工厚の不足が連続的に発生した状態を想定し、図5.1.30のモデルでひび割れ発生、進展の解析を行った。なお、コンクリートの配合および坑内環境は、(3)各建設工法のひび割れ発生、進展解析の設定条件と同一とした。

覆工厚の不足箇所は、図5.1.30に示すようにアーチ肩部分に半円形状の陥没がトンネル軸方向に3箇所連続して存在しているものとした。

解析結果を図5.1.31に示す。ひび割れ幅については、0.3mm以上のひび割れが発生している要素が隣接して発生する領域がある。このような領域は、実際には1本のひび割れに集約されることが考えられる。隣接要素のひび割れが1本に集約された場合には0.6~0.7mmのひび割れ幅となる可能性が高い。

計算結果によるとアーチ肩部分に覆工厚の不足が非対称に生じると、覆工厚の不足が連続している部分にトンネル縦断方向にひび割れが発生し、その後、複数のひ

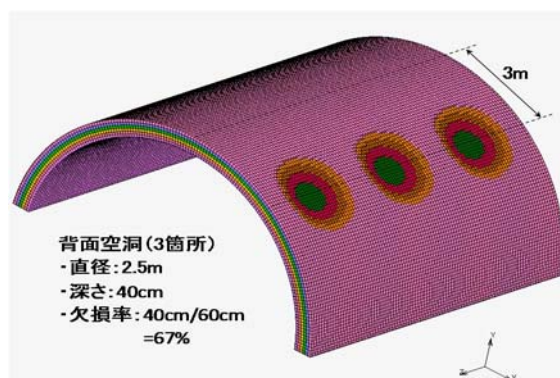


図 5.1.30 覆工モデル

ひび割れが発生する。最終的には、覆工厚の不足領域にトンネル縦断方向のひび割れが複数発生し、そのひび割れからトンネル横断方向に放射状のひび割れが生じた。第 3 章の背面空洞および覆工厚不足が確認された箇所にも解析結果同様の縦断方向、斜め方向のひび割れが発生しており、覆工厚不足および背面空洞がある場合、ひび割れへの影響が高いことがわかる。また、矢板工法で施工された新幹線トンネルの覆工厚に関する報告<sup>7)</sup>でも、覆工厚の不足が連続した箇所ではひび割れ発生頻度が高いことが報告されており、解析結果と傾向が一致している。

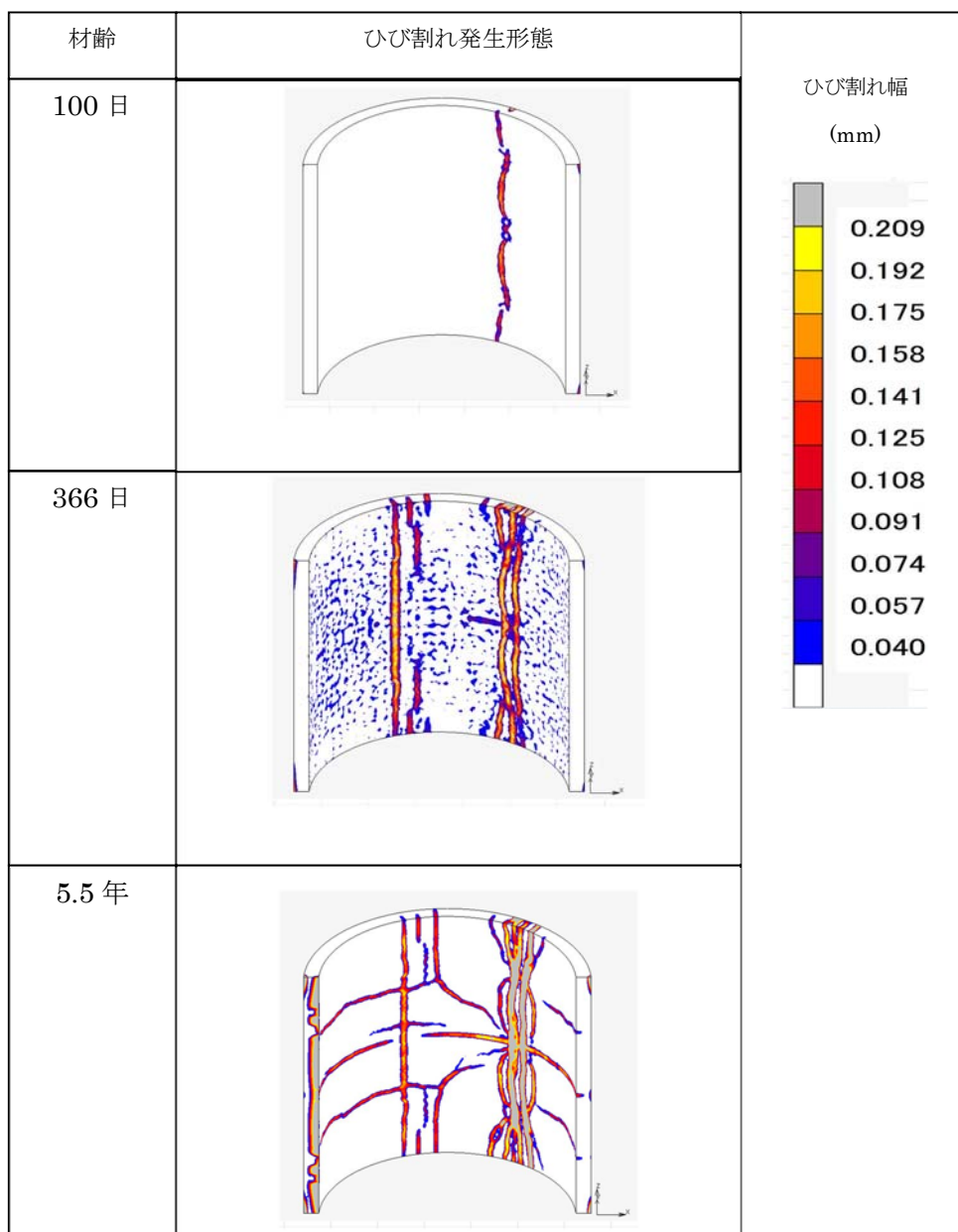


図 5. 1. 31 覆工厚不足による影響

## 5.2 覆工コンクリートへの養生環境、施工条件がひび割れ発生、進展に及ぼす影響把握

### 5.2.1 目的

トンネル施工環境の改善を目的とした換気設備の充実により、坑内温度、湿度は屋外と同様に季節変動することが明らかになった。したがって、坑内環境によっては、脱型直後のコンクリート表面からの水分蒸発により、乾燥収縮の促進や水和反応の阻害等、コンクリートのひび割れを引起すおそれがある。これらのことから、覆工コンクリートの品質向上を目的に現場では、給水や水分逸散抑制により覆工表面を湿潤状態に保つ養生方法等の提案がされている。ただし、養生によるひび割れ抑制効果については定量的な評価は行っていない。そこで、脱型時期および養生の有無による覆工コンクリートのひび割れへの影響を把握する目的で、ひび割れ発生、進展解析を実施する。さらに、中流動覆工コンクリートの締固め方法による過剰な締固めによる影響を把握する目的で、粗骨材の含有率による長期間のひび割れ発生、進展解析を実施する。

### 5.2.2 ひび割れ進展、解析における計算条件

覆工コンクリートのひび割れ発生について、川又ら<sup>5)</sup>がコンクリート打設温度とひび割れ発生確率との関係を報告している。この報告によるとコンクリート温度が20℃以上になるとひび割れ発生確率が増加しており、その原因としては硬化時の温度ひずみとコンクリートの乾燥収縮ひずみの複合作用と想定されると報告されている。

コンクリート温度が高い場合には、セメントの水和反応が促進され、水和熱が短時間に生じるため硬化時の覆工コンクリートの内部温度の上昇が大きく、温度ひずみが増大すると想定される。そこで、本研究の解析では夏季にコンクリートを打設したものと設定した。また、第4章での坑内環境調査結果から坑内環境は、屋外の季節変動と連動していることが明らかになっている。以上のことから、覆工コンクリートの長期的な経時変化を試算する計算条件を表5.2.1のように設定する。また、コンクリートの配合については、養生効果確認実験で使用した高性能 AE 減水剤（増粘剤一液タイプ）を用いた T1 (Ad) とする。

表 5.2.1 経時変化を試算する計算条件

| 項目          | 内容  |
|-------------|---|
| 検討期間        | コンクリート打設後50年間                             |
| 温度          | 0 ～ 30℃                                   |
| 湿度          | 50 ～ 90%                                  |
| 力学的境界条件     | 地山側固定<br>周方向およびトンネル縦断方向に対し、対象条件となる節点拘束付与  |
| 水移動に関する境界条件 | 内空側でのみ水分の逸散と流入を考慮<br>(一面開放。地山側では水の出入なし)   |
| 温度に関する境界条件  | 内空側および地山側で熱の移動を考慮<br>地山外面での温度：年間を通じて15℃設定 |

### 5.2.3 脱型時期および養生の有無によるコンクリート物性値算定解析

#### (1) 検討ケースと解析方針

養生の長期挙動に及ぼす効果を確認するため、断面厚を 300 mm とする覆工コンクリート断面を取り出した解析モデルを作成して、3次元非線形 FEM 解析を実施する。水和開始からのコンクリート材料の経時変化を試算するものである。

具体的には、覆工コンクリート部に対して、コンクリートの非線形性を考慮した辺長を 20 mm とする立方体のソリッド要素 15 個を一列に配置した、一軸条件下でのモデルにより計算を行う（解析手法自体は、三次元）。また、発熱/温度挙動を追跡するため、地山部に対して、辺長を 20 mm とする立方体のソリッド要素 35 個を接続する。コンクリートの温度分布が影響を受けないように、事前に予備検討を実施した上で、700 mm と大きめの区間を設定したものである。以上の計算条件で、DuCOM-COM3 によりコンクリートの物性値の経時変化を試算する。

覆工コンクリートは、一般的な構造物に比べて早期に脱型するため、コンクリート強度が低い段階で自重による応力が生じる。この応力の影響を把握するため、覆工コンクリートの標準的な脱型時間 18 時間（養生 A）と脱型時間を 72 時間（養生 C）とした場合のコンクリート物性値の経時変化を試算する。さらに、養生効果による影響を把握する目的で、7 日間封緘養生（養生 H）のコンクリート物性値（収縮ひずみ、圧縮強度、引張強度および弾性係数）の経時変化も試算する。

検討期間はコンクリート打設後 50 年間とし、トンネル内空側の温度、湿度では年間平均値として、表 5.2.1 に示す範囲で月ごとに変動させる。

解析モデルと境界条件のイメージ図を図 5.2.1、図 5.2.2 に示す。

以上の条件により、ひずみや強度等の経時変化を試算する。少数要素での比較的簡易な解析モデルではあるが、三次元解析であるので、体積成分については三方向のひずみが出力される。

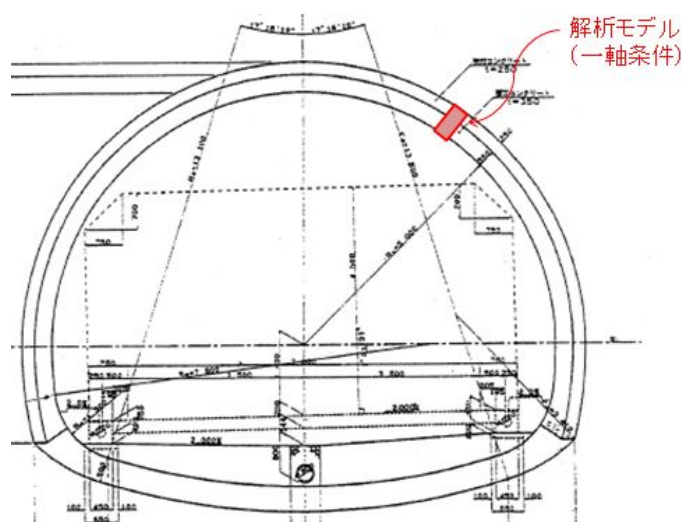
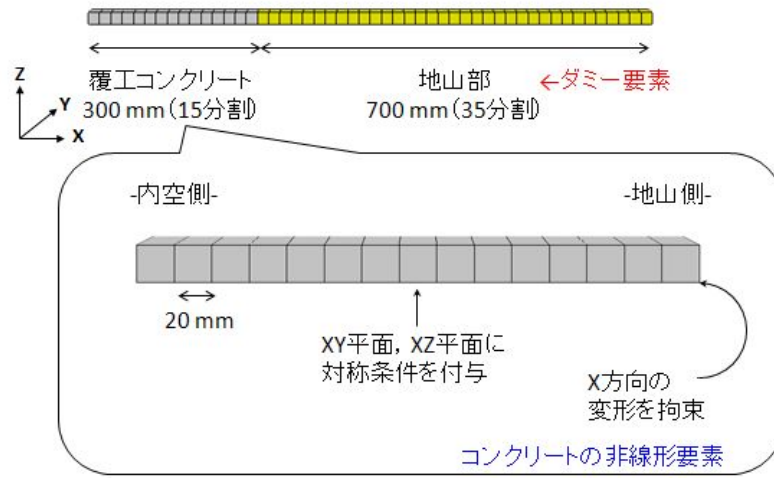
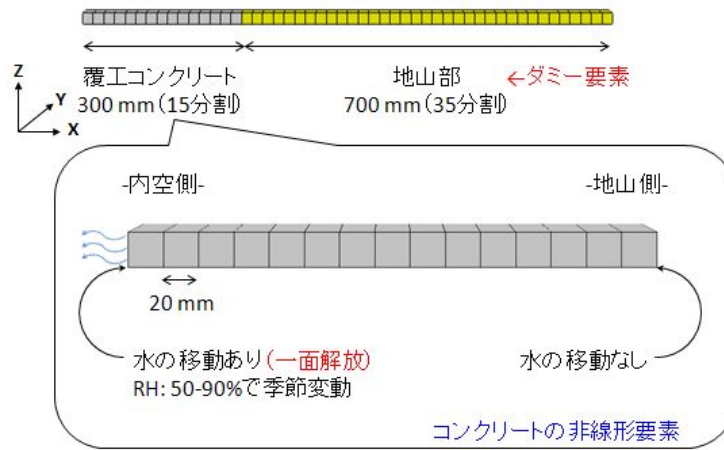


図 5.2.1 解析モデルと境界条件のイメージ図(1)

構造力学的なモデルと境界条件



水分移動に関するモデルと境界条件



温度に関するモデルと境界条件

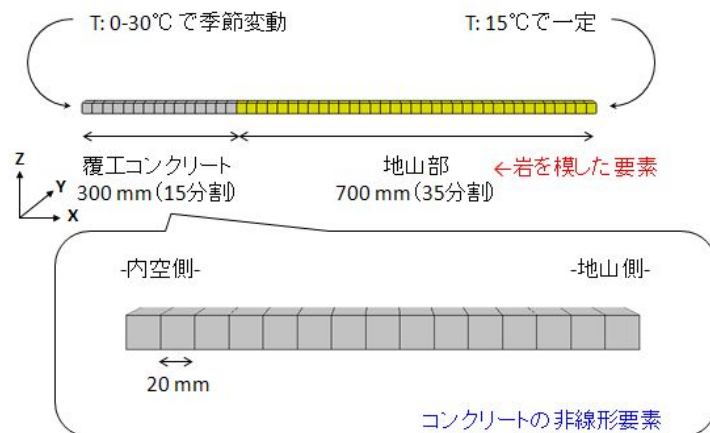


図 5.2.2 解析モデルと境界条件のイメージ図 (2)



(2) 解析結果

3通りの養生条件について、材齢約50年までの試算を行った解析結果を以下に示す。入力した配合条件は表5.2.2、養生条件は表5.2.3のとおりである。解析結果について、養生A、CおよびHについて示す。

表 5.2.2 コンクリートの配合条件

| Slump (cm)<br>Slump flow | 空気量 (%) | W/P (%) | s/a (%) | W   | C   | S   | G   | SP   | AE (g) |
|--------------------------|---------|---------|---------|-----|-----|-----|-----|------|--------|
| 21.5<br>471*459          | 4.6     | 53.1    | 50.4    | 170 | 320 | 894 | 902 | 3.04 | 3.2    |

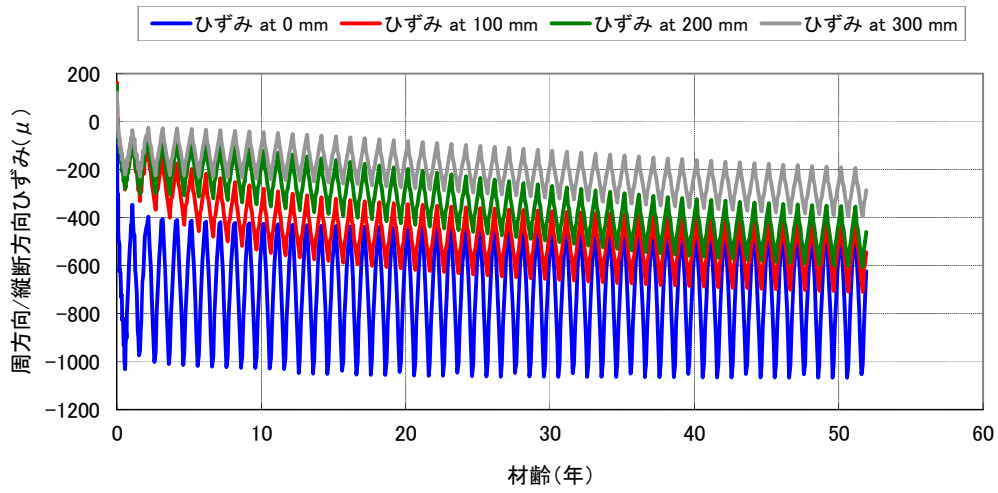
表 5.2.3 コンクリートの養生条件の概要

|           |                                 |
|-----------|---------------------------------|
| 従来（比較用）   | A 18時間後脱型                       |
| 脱型時期      | B 48時間後脱型                       |
|           | C 72時間後脱型                       |
| 湿度 80%    | D 18時間脱型後→8hr後に湿度80%養生→7日間で養生終了 |
| 水中養生      | E 18時間脱型後→直後水中養生                |
| 水中養生（8h後） | F 18時間脱型後→8hr後に養生開始→7日間で養生終了    |
|           | G 18時間脱型後→8hr後に養生開始→28日間で養生終了   |
| 封緘養生      | H 18時間後脱型 封緘養生→7日間で養生終了         |
| 膜養生       | I 18時間脱型後乾燥収縮低減剤塗布→養生終了         |

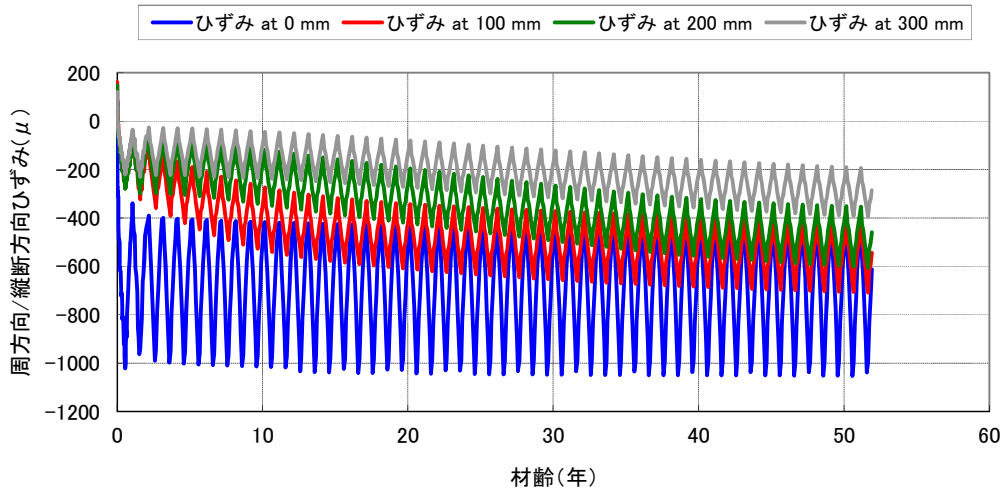
1) 収縮ひずみ

収縮ひずみの経時変化の計算結果を図5.2.3に示す。コンクリートの収縮ひずみ等の物性値の経時変化に起因するひび割れ発生、進展解析は、三次元モデルで計算する必要があることから、温度伝達および水分移動は一次元であるが、計算は三次元要素で計算を実施している。三次元モデルで計算しているため、収縮ひずみは地山方向の成分である半径方向と、それに直交するトンネル軸方向と周方向の3成分が得られる。この内、図5.2.3には、もっとも収縮ひずみが大きい周方向の成分（軸方向もまったく同じ値を示している）を表示している。図5.2.3の収縮ひずみは、コンクリート表面からの位置で示しており、ひずみat0mmと記載しているのは表面のひずみであり、ひずみat300mmは地山側のコンクリートのひずみである。ひずみat0mm

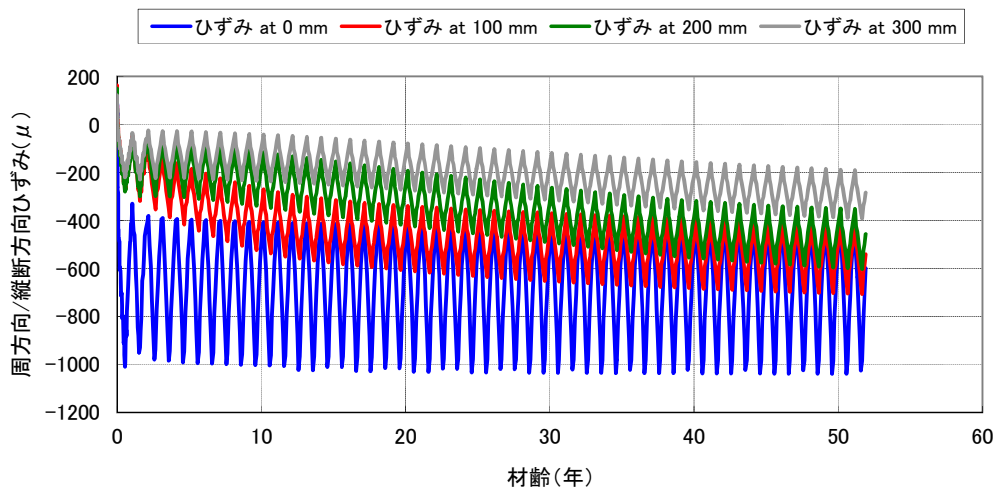




(a) 養生 A



(b) 養生 C



(c) 養生 H

図 5.2.3 周方向/トンネル縦断方向のひずみの経時変化 (長期表示)

の表面の収縮ひずみは、打設後半年経過するまでに収縮ひずみが急激に増大し、その後は季節変動に応じて収縮ひずみ変動している。これに対して、ひずみat300mmの地山側のコンクリートの収縮ひずみは、季節変動の影響を多少は受けているが、全体としては収縮ひずみが増加する傾向を示しており、50年経過した時点でも収縮ひずみは微増する傾向を示している。この原因は、地山側のコンクリートの水分が徐々に内空側に移動していることに起因している。また、収縮ひずみの経時変化のみでは養生の有無による相違を確認することはできない。

なお、半径方向についても、最大値は異なるが、収縮ひずみの経時変化の傾向は図5.2.3と同様である。

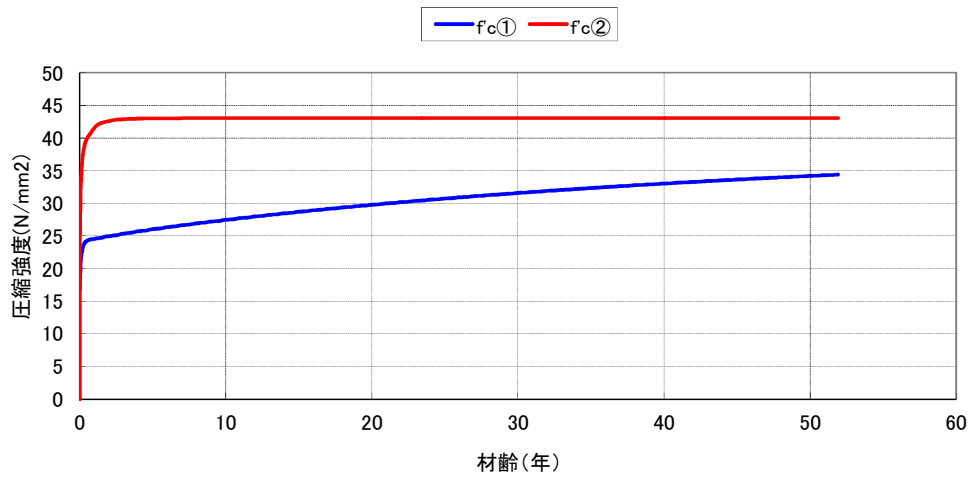
## 2) 圧縮強度

コンクリートの圧縮強度の経時変化を、内空側の表面付近(①)と地山側の表面付近(②)の位置について、図5.2.4に示す。圧縮強度についても長期挙動に関して、大きな相違がみられる。

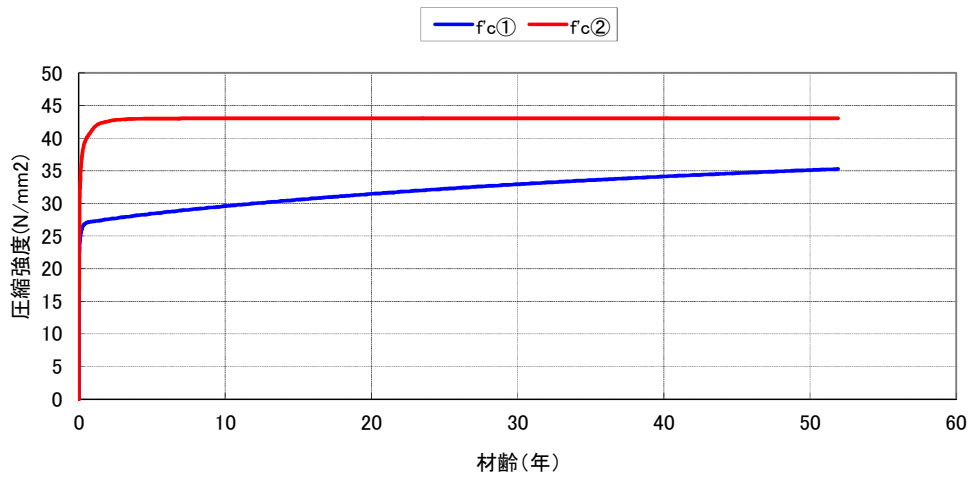
### (3) 解析結果のまとめ

以上の解析結果より、材齢約50年までの収縮や強度等に関する材料応答を評価することができた。解析結果の概要を以下にまとめる。

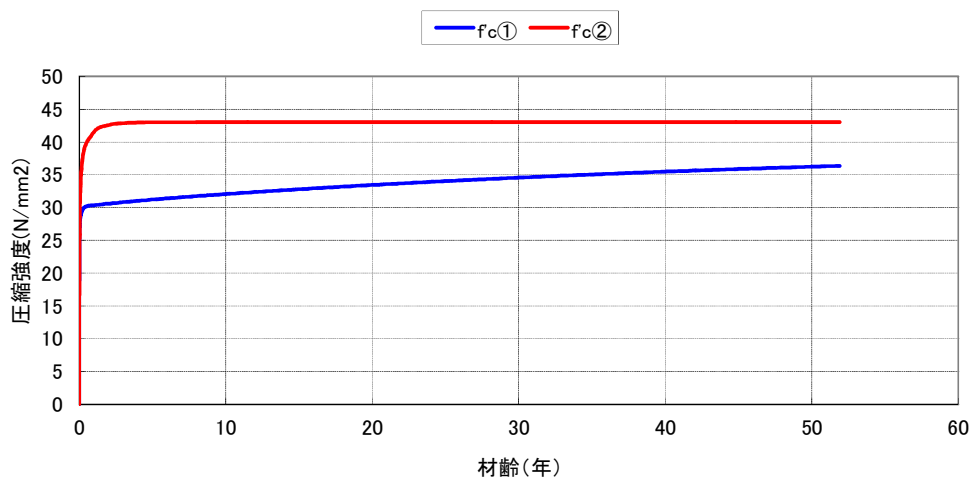
- 1) 養生条件の違いが収縮ひずみ自体に及ぼす影響は少ないと思われる。むしろ圧縮強度で差異が大きくなっており、付随してヤング係数にも差異が生じていると思われる。乾燥の影響を受ける内空側表層付近の圧縮強度は、養生条件Hの封緘養生>Cの72時間脱型>Aの18時間脱型の順に大きくなっている。一方で、乾燥の影響を受けにくい地山側表層付近の圧縮強度は、養生条件によらず、ほぼ一定の値を示している。
- 2) 収縮ひずみは、乾燥にさらされる内空側表層で大きくなり、比較的早い段階で収束値に到達する。コンクリート内部では内空側表層に比べひずみの絶対値は小さいが、1年間の温度と湿度変化によるサイクルを繰り返しながら徐々に大きくなっていく。付随して、コンクリート内部の相対湿度の経時変化に大きな相違がみられ、本条件下では50年後であっても湿度勾配が残留している。
- 3) 300 mm程度の断面厚であっても、ひずみが収束値に至るまでに長い時間を要する理由として、一面解放の境界条件となっていることが挙げられる。一般にJIS等で規定されている材料試験では、180日程度で収束値に到達することが知られているが、これは六面開放の小型試験体を用いた実験であり、通常、相対湿度60%一定の厳しい乾燥条件が設定される。本解析においては、相対湿度の季節変動を90~50%で設定しており、夏はトンネル表面から吸水し、定常状態に至るまでに長い時間が掛かることになる。
- 4) 解析では、ひずみの季節変動が大きい。これは、温度と湿度の両方の影響を受けているためである(例えば8)。



(a) 養生 A



(b) 養生 C



(c) 養生 H

図 5.2.4 コンクリート圧縮強度の経時変化 (長期表示)

## 5.2.4 脱型時期および養生の有無による覆工コンクリートのひび割れ発生、進展解析

### (1) ひび割れ解析の設定

ひび割れ解析は、各要素にひび割れが発生する分布ひび割れモデルを用い、ひび割れの局所化を考慮したものを使用する<sup>9)</sup>。また、ひび割れ発生後の引張応力は、コンクリート標準示方書に定められた引張軟化曲線に従う。図 5.2.5 に前項の覆工コンクリート部材の物性値の経時変化で算定された解析結果から、ひび割れ発生、進展解析に用いた圧縮強度等の強度特性の経時変化を示す。

弾性係数、引張強度については、圧縮強度と相関があり、その相関関係は過去の研究論文<sup>10)</sup>と一致しているとの結果を得ている。そこで、圧縮強度から次に示すように計算に使用する各種強度特性と材令の関係を定めた。

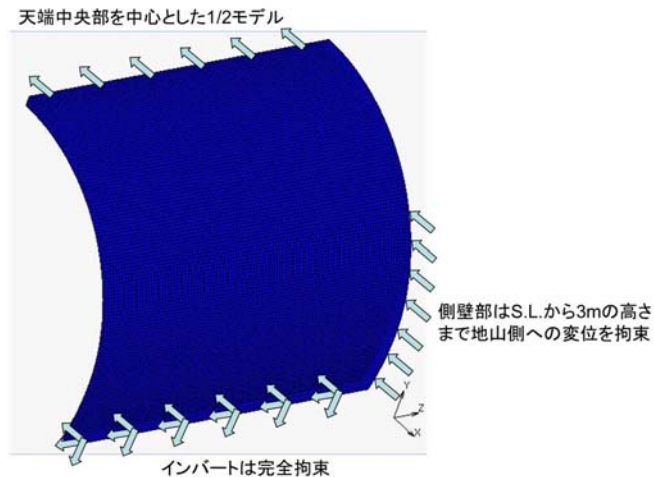
$$\text{引張強度} : \sigma_t = 0.23\sigma_c^{2/3} \quad (\text{示方書より})$$

$$\text{弾性係数} : E = \left( 2.2 + \frac{\sigma_c - 18}{20} \right) \times 10^4 \quad (\text{示方書より})$$

$$E = 0.42 \times 6.3 \times 10^3 \times \sigma_c^{0.45} \quad (\text{若材齢時、示方書より})$$

$$\text{引張強度時ひずみ} : \varepsilon_{ts} = \sigma_t / E$$

圧縮強度については、脱型時間を延長した養生 C が養生 A、養生 H と比較して打設後 3 日で 20N/mm<sup>2</sup> 程度と初期強度が高くなっている。ひび割れ発生、進展解析では、脱型した段階で覆工コンクリート自重が作用するものとして解析を行っている。また、図 5.2.6 のとおり境界条件としては、アーチ脚部はインバートコンクリートで完全に拘束されているものと想定し、完全固定とする。側壁からアーチ部については、覆工コンクリート部材は地山側へ変形しないものとして解析を行う。また、モデル化の範囲は対称条件を考慮して、天端部からの半分の領域とする。



注：アーチ部については、地山側への変形を許容していない。  
自重を考慮していない場合には、上図に示すように側壁部分のみを拘束  
自重を考慮した場合には、インバートとの接合部分から 4.5m 程度の範囲  
まで拘束

図 5.2.6 ひび割れ発生、進展解析のモデルおよび拘束条件

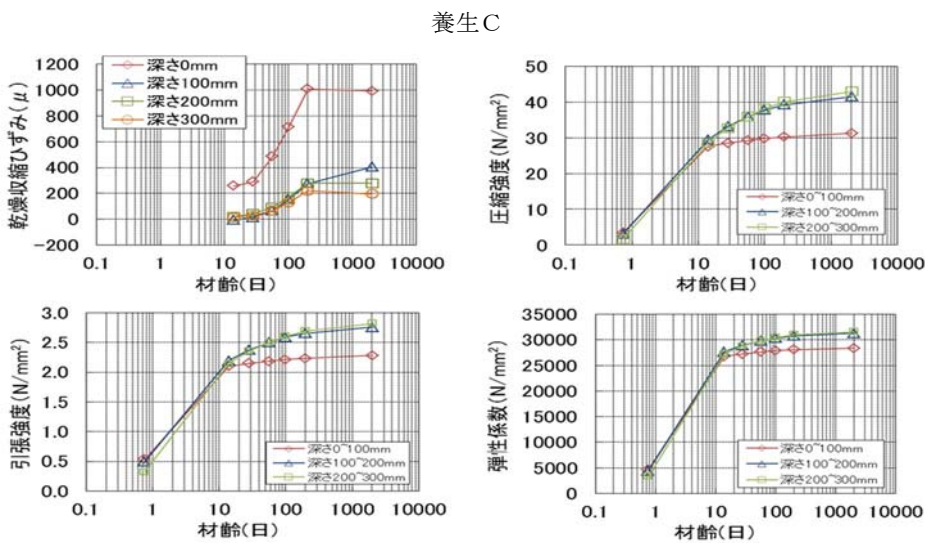
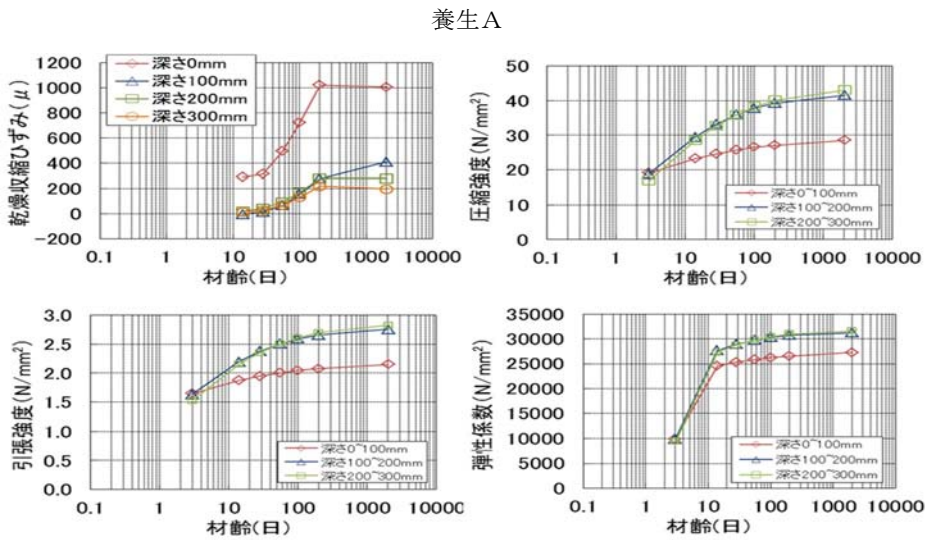
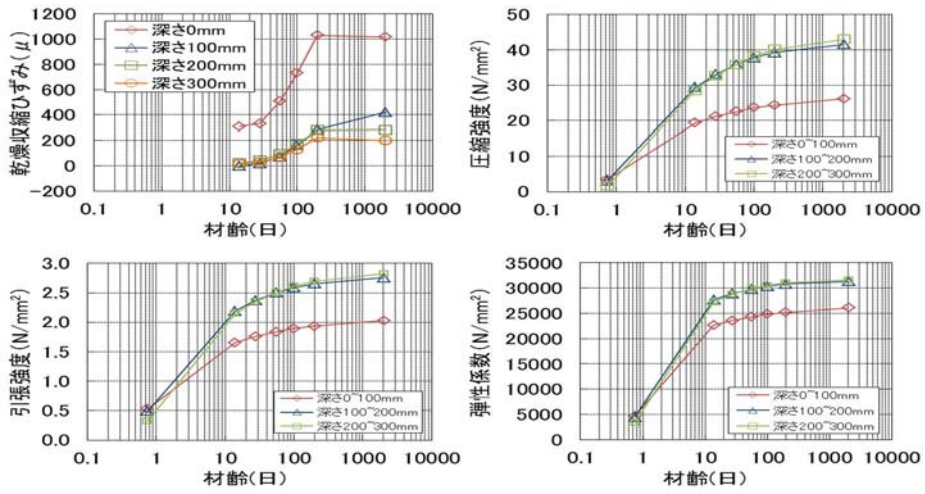


図 5.2.5 ひび割れ発生、進展解析に用いたコンクリートの物性値

## (2) ひび割れ発生、進展解析結果

図5.2.7にひび割れ発生状況を示す。計算結果によるとコンクリート打設後50日経過した時点で覆工コンクリートにひび割れが発生する。ただし、ひび割れ幅は、計算上は0.02mm以下のマイクロクラックと呼ばれるもので目視での確認が困難なものと判断される。このマイクロクラック領域では、骨材とモルタルとの界面はく離やモルタル中に微細な亀裂が複数発生しているが、この界面はく離や微細な亀裂は連続していない状態で引張応力の伝達も期待できるとされている。したがって、図中の0.02mm以下のひび割れ幅の領域は、計算上のひび割れ発生であり実際には引張応力が伝達されていることから、一般的にいわれているひび割れ領域と異なることに注意が必要である。計算上、完全に引張応力の伝達がなくなり、ひび割れが局所化して連続する領域は図中の赤色以上の部分であり、その時のひび割れ幅は0.06mm以上である。養生A、養生C、養生Hでひび割れ発生、進展に大きな差異はなく、インバートで拘束された側壁部にひび割れが発生している。天端部には、ひび割れ幅が0.05mm以下のマイクロクラックが軸方向に局部的に生じている。脱型時の影響については、脱型した直後に天端沈下が0.5mm前後発生するが、その後のコンクリートの収縮ひずみの影響で天端沈下は5~6mm程度となっており、自重による影響は軽微であると判断される。覆工コンクリートの収縮ひずみ量は、コンクリートの配合で決定され、養生の影響はない。また、収縮ひずみの発現速度は、坑内環境に依存しており、自重の影響も収縮ひずみに比べると軽微であるために、長期的なひび割れ発生、進展には大きな影響を与えなかったものと推定される。ただし、材齢50日におけるひび割れ発生状況が多少違うことから、ひび割れが発生する時期については、脱型時期や養生の有無が影響を与えているものと推定される。

### 5.2.5 材料分離による覆工コンクリートのひび割れ発生、進展解析

第4章での大型試験体の実験で、中流動覆工コンクリートは締固めによる材料分離が発生しにくいことが明らかになったが、コンクリートの流動や締固めにより粗骨材変動率が $\pm 20\%$ 変化することが確認された。そこで、本解析では粗骨材変動率と覆工コンクリートのひび割れ発生、進展との関係を把握する目的で、材料分離が生じたことを想定したひび割れ発生、進展解析を実施する。

#### (1) ひび割れ解析の設定

中流動覆工コンクリートでは、型枠バイブレータで打設高さ50cmごとに締固めることが標準的な施工方法とされている。そのため、図5.2.8に示すようにアーチ肩部分では、型枠バイブレータAの作動回数が他の箇所より多くなる傾向がある。また、アーチ肩部では粗骨材が側壁方向へ沈降

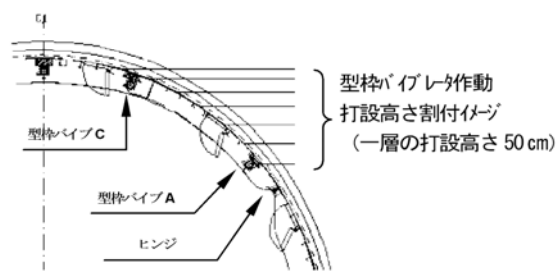


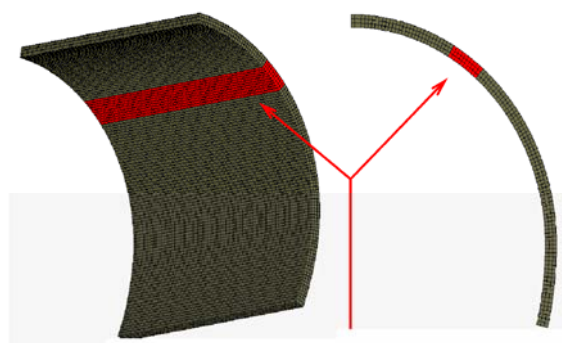
図5.2.8 型枠バイブレータ配置図

する可能性も想定される。以上のことから、**図5.2.9**に示すようにアーチ肩部分にトンネル軸方向に連続して材料分離領域が生じたと仮定して解析を行う。

解析では、粗骨材変動率を-50%、-100%とし、配合はT1(Ad)とする。なお、粗骨材変動率を-50%と設定したのは、事前に解析を実施し、ひび割れが顕在化する領域をトライアルし定めたものである。また、材料分離の解析は、打設後18時間で脱型してまったく養生を実施しない養生Aのみを行う。材料分離領域の収縮ひずみの増加率は、第4章の実験結果から得られた粗骨材変動率と収縮ひずみ比の関係にもとづいて算定する。

## (2) ひび割れ解析結果

**図 5.2.10** に粗骨材変動率をパラメータとしたひび割れ発生、進展の解析結果を示す。粗骨材変動率を-50%と設定した解析結果では、材料分離領域に 0.06mm 程度のひび割れが複数発生しており、材料分離による収縮ひずみの増加により、引張応力の伝達がない完全に開口したひび割れが新たに形成される。粗骨材変動率が-50%に達しない場合には、完全に開口したひび割れの発生はない (**図 5.2.10** 養生 A (自重あり) 参照)。粗骨材がまったくない状態を想定した粗骨材変動率-100%では、材料分離領域で多くのひび割れが発生しており、ひび割れ幅は最大で 0.16mm を越えており、材料分離がひび割れを引起す要因となっていることが明らかになった。



想定した材料分離領域(高さ 50cm)

**図 5.2.9** 想定した材料分離範囲



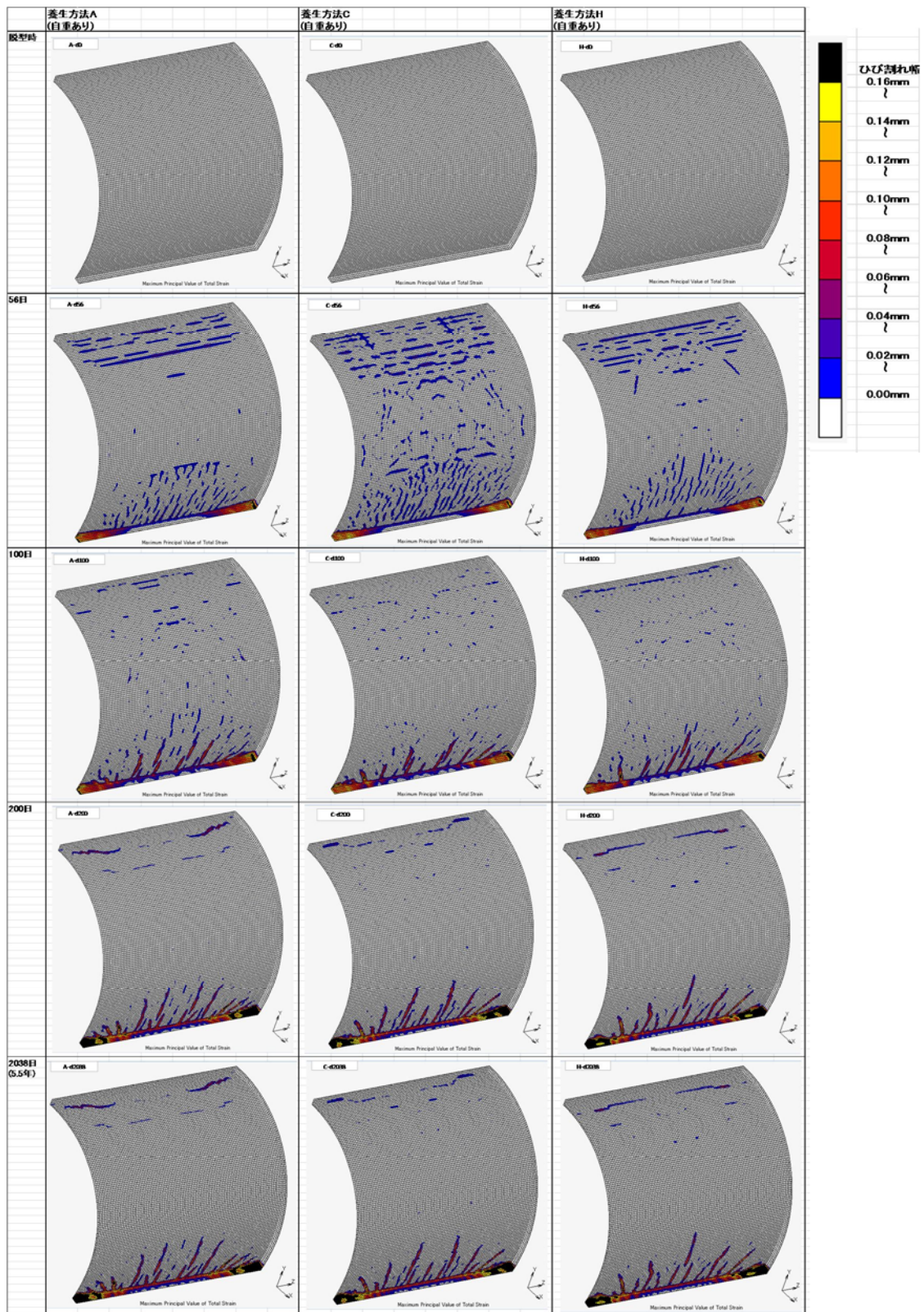


図 5.2.7 脱型時期および養生環境の有無によるひび割れ発生、進展の相違



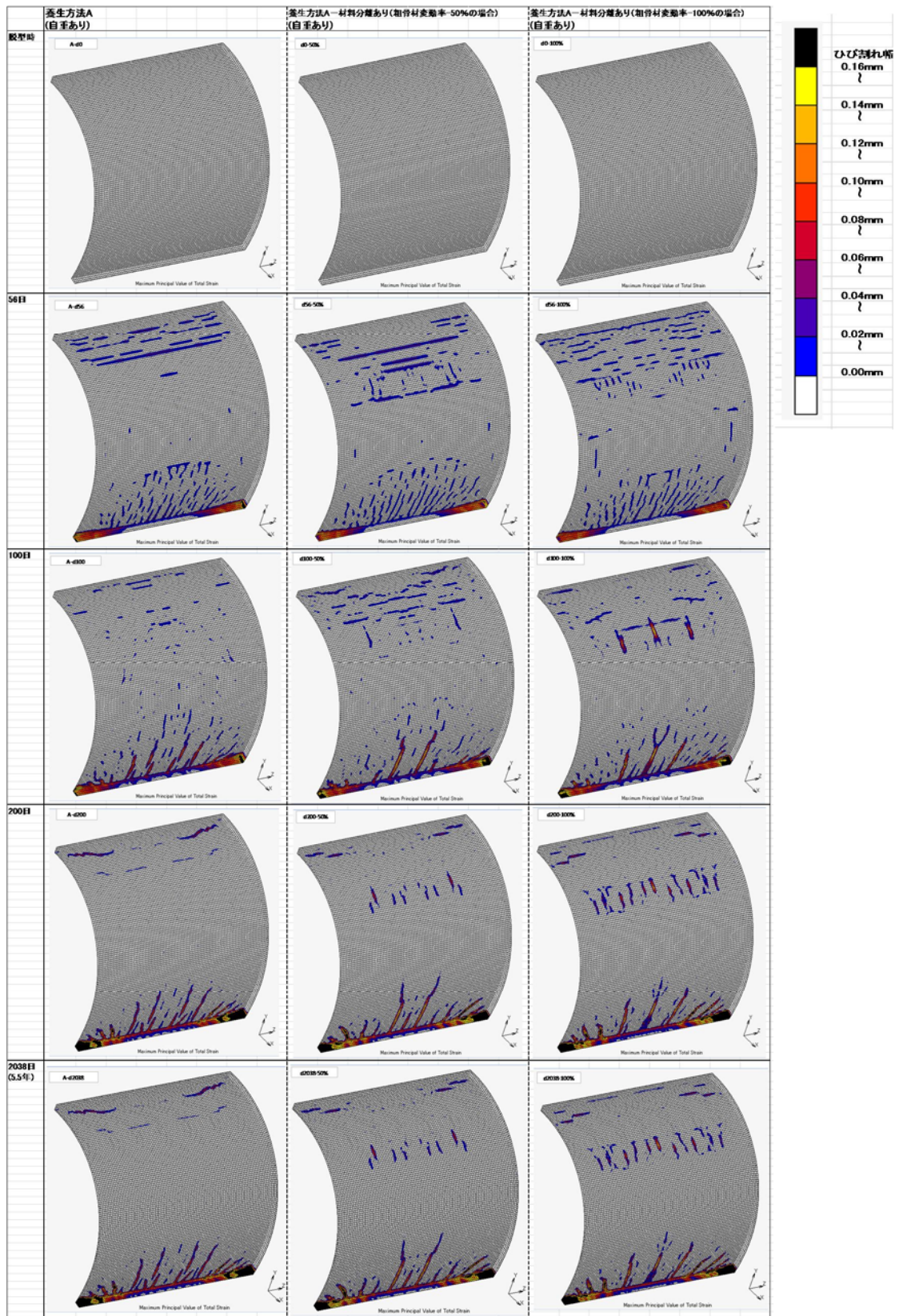


図 5.2.10 材料分離によるひび割れ発生、進展の相違

### 5.3 本章のまとめ

#### 5.3.1 各建設工法のひび割れ発生、進展の長期挙動

坑内環境等の測定結果に基づいて、覆工コンクリートの収縮ひずみ等の長期予測結果を用いて、建設工法ごとのひび割れ発生、進展解析を実施した。

算出された収縮ひずみを入力値とし、ひび割れ発生、進展解析を行うことで、打設後、任意の経過時間におけるひび割れ発生パターンが把握できた。

収縮ひずみによるひび割れ発生、進展は、打設後 5.5 年程度でほぼ収束した。

点検記録による各建設工法の標準的なひび割れ形態とコンクリートの収縮特性を基に解析により算定したひび割れ形態は、点検記録の TCI 値と解析により算定したひび割れ形態の TCI 値を比較した結果、解析結果が点検記録の標準的なひび割れパターンを再現しているものと考えられる。ただし、ひび割れ幅についてはコンクリートの収縮ひずみのみを考慮した解析結果が点検記録より小さくなった。

#### 5.3.2 覆工コンクリートへの養生環境、施工条件がひび割れ発生、進展に及ぼす影響把握

脱型時期および養生の有無による覆工コンクリートのひび割れへの影響把握および、中流動覆工コンクリートの過剰な締固めによる影響を把握のため、長期間のひび割れ発生、進展の解析を実施した。

コンクリートの水分移動を考慮した解析手法で、コンクリートの収縮ひずみや強度発現等の物性値の経時変化を追跡することができる。

トンネルの実環境下を想定した解析結果から、コンクリートの収縮ひずみに起因するひび割れの発生、進展は、脱型時期および養生の有無に関係していないことが明らかになった。

中流動覆工コンクリートで施工されたトンネルを対象に材料分離による影響を検討した結果、粗骨材変動率が-50%以下になると材料分離に起因したひび割れ発生、進展が顕著になる。

#### 【参考文献】

- 1) Maekawa, K., Chaube, R. and Kishi, T. : Modelling of Concrete Performance Hydration, Microstructure Formation and Transport, E & FN SPON, 1999.
- 2) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-Scale Modeling of Structural, Taylor and Francis, 2008.
- 3) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-scale Modeling of Concrete Performance - Integrated Material and Structural Mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 2, pp.91-126, 2003.
- 4) 小島芳之、津野究、佐野信夫、伊藤哲男、馬場弘二、松岡茂、川島義和：三次元効果を考慮したトンネル覆工のひび割れ進展と力学特性、土木学会論文集、No.554/III-37、pp.147-155、1996.12
- 5) 川又篤、松岡茂、窪田賢司：山岳トンネル覆工コンクリートのひび割れ発生パターン、土木学会年次学術講演会概要集、III-086、pp. 171-172、2012.9
- 6) 坂井吾郎、安齋勝、近藤啓二、菅俣匠：覆工用中流動コンクリートの開発、セメント・コンクリート No.787、Sep 2012、pp.35-40
- 7) 谷雅史：覆工裏込注入施工によるトンネル状態の分析、鉄道施設技術発表会論文、2017
- 8) 笹田俊之、砂金伸治、石村利明：長期計測結果にもとづいたトンネル覆工の挙動に関する考察、トンネル工学報告集、第24巻、I-3、2014.12
- 9) 渡辺忠朋、松岡茂、武田康司：破壊力学に基づくRC部材のせん断耐力の研究、土木学会論文集V、592巻、V-39、pp. 25-36、1998.5
- 10) Koenig, G., Grimm, R. and Rimmel, G. : Shear Behavior of Longitudinally Reinforced Concrete Members of HSC, JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures, pp.63-74, pp.63-77, 1993

## 第6章 トンネル覆工の維持管理および覆工コンクリートの施工方法に関する提案

### 6.1 本章の概要

#### 6.1.1 トンネル覆工の維持管理

NEXCOは、平成28年3月現在、1,808本、総延長1,705kmのトンネルを管理しており、詳細点検として5年に1回の頻度で近接目視かつ打音により点検を実施している。また、詳細点検の支援としてトンネル覆工画像撮影を行い、重点的に打音を実施する箇所の抽出に活用している。この点検記録によると、多くのトンネル覆工にひび割れが発生しており、そのひび割れ発生形態は多種多様である。

ひび割れは、トンネル覆工からのはく落事象の要因となっているため、トンネル覆工すべてに対して近接目視かつ打音を実施している。しかしながらひび割れの中には、コンクリートの水和熱や乾燥による収縮が影響しているものも含まれている。このようなコンクリートの収縮に起因するひび割れであれば、コンクリート打設後、一定期間経過すればひび割れの進展や新たなひび割れの発生はないと考えられるため、コンクリートの収縮によると判定されたトンネル覆工に対して、近接目視かつ打音の省略化が可能となり、ひいてはトンネル覆工の維持管理の合理化につながると考える。

このため、本研究では、トンネル覆工に発生するひび割れのうち、材料や施工を「内因」とするひび割れに着目し、トンネル覆工に対する維持管理の効率化を目的として以下の検討を行った。NEXCOが管理している道路トンネルの詳細点検で得られたひび割れ情報から、TCIを用いて分析を行い、コンクリートの水和熱や乾燥による収縮が影響している可能性があるひび割れを抽出し、ひび割れ発生形態の把握を行った。コンクリートの収縮は、温度、湿度等の環境条件による影響を受けることが知られていることから、実際のトンネルで坑内環境を測定し、この測定データに基づいてコンクリートの収縮ひずみの長期にわたる変動を数値解析により算定した。さらに、算定した収縮ひずみからトンネル覆工に生じるひび割れ状況を解析的に求めた。また、変状原因が内因（要因が材料、施工、設計によるもの）によって発生するトンネル覆工のひび割れについては、収縮以外の要因として、材料分離や覆工厚の違いによる覆工の不均一の影響も想定されたことから、これらがひび割れに与える影響についても検討を加えた。本章は、本研究にて得られた成果をまとめ、今後の詳細点検を含めた維持管理を合理的に実施するための提案を行う。

#### 6.1.2 覆工コンクリートの施工方法

トンネル施工環境の改善を目的とした換気設備の充実により、坑内温度、湿度は屋外と同様に季節変動している。したがって、覆工コンクリート脱型直後のコンクリート表面からの水分蒸発により乾燥収縮の促進や水和反応の阻害等、コンクリートのひび割れを引起す恐れがある。これらのことから、覆工コンクリートの品質向上を目的に現場では、給水や水分逸散抑制により覆工表面を湿潤状態に保つ養生方法等の提案がされている。ただし、養生によるひび割れ抑制効果については定量的な評価は行っていない。そこで、実際に養生環境によるコンクリートの品質向上を、実際の養生環境をモデル化した室内実験より物性値を得たうえで短期間における評価を行い、その結果に基づいて実環境下を想定した数値解析により、長期間の覆工コンクリートのひび割れ発生、進展を解析した。

一方、覆工コンクリート施工では、NEXCOは中流動覆工コンクリートと型枠バイブレータを採用することで、材料分離や未充填部の発生を防止してきた。しかし、中流動覆工コンクリートの締固め方法

によっては、過剰な締固めとなることが懸念された。

そこで、大型試験体を使った打設実験により、過剰な締固めによる粗骨材の含有率を把握したうえで、数値解析により、粗骨材の含有率による長期間のひび割れ発生、進展を解析し、過剰な締固めによる影響を把握した。

本章は、養生環境や施工方法が覆工コンクリートのひび割れ発生、進展に及ぼす影響を把握し、覆工コンクリート表面からのコンクリート片のはく落を予防することで、覆工の長期健全性の向上につながると考え、中流動覆工コンクリートの品質向上に向けた施工方法の提案を行う。

## 6.2 トンネル覆工の維持管理の提案

### 6.2.1 高速道路の維持管理

高速道路の維持管理は、①安全・安心・快適な道路空間の確保、②道路本体や施設の保全と機能向上、③社会的なニーズへの対応を主な目的とし、図 6.2.1 にあるように点検、補修工事、記録保存の維持管理サイクルを効率よく運用することが重要である。点検は、計画的な道路の維持管理を行うための基本となる重要な業務であり、構造物の変状を含めた現状を把握し、補修等の対策の要否判断を行うとともに、構造物を良好に保つための適切な維持管理計画を策定するために実施するものである。特に点検に期待される役割としては、安全な道路交通を確保すると



図 6.2.1 維持管理サイクル

ともに、第三者等被害を未然に防止するため、道路構造物の変状を早期に発見し、迅速かつ適切な措置を行うこと、および長期的に構造物を良好な状態に保つための維持管理計画策定に向け、構造物の変状を含めた現状を的確に把握し、変状の進行状況や健全度の評価を行うことである。

判定評価は、点検対象構造物の各々の変状に対して「個別判定」、「健全度評価」を行うことを基本としている。「個別判定」は主に短期の補修計画策定に活用し、「健全度評価」は主に中長期の修繕・更新計画に活用する。

計画策定は、変状の進行状況や健全度評価の点検結果をもとに、交通量や路線の重要性および周辺の道路補修計画等をふまえて総合的な観点で検討することが重要である。

補修は、第三者等に対する安全性の確保と構造安定性確保を目的に実施する必要がある。補修にあたっては、点検結果に基づいて機能や耐久性等を回復、維持させるため最適な補修方法等検討する必要がある。

記録保存は、点検から補修まで一連の情報を記録保存する必要がある。NEXCO は、すべての点検結果と点検結果に対する補修情報を点検補修管理システムにより記録保存を行っている。点検補修管理システム等に記録した点検結果等については、点検結果等の共有や統計処理の効率化、変状原因の分析、点検・調査計画の立案や補修計画の立案等、一連の維持管理に関するマネジメントに有効に活用する必要がある。

本研究は、この維持管理サイクルにおける今後のトンネル覆工の維持管理について、提案する。



## 6.2.2 トンネル覆工の点検

### (1) 現状のトンネル覆工点検手法

詳細点検は、構造物の健全性の把握および安全な道路交通の確保や第三者等に対する被害を未然に防止するため、構造物個々の状況を細部にわたり定期的に把握するために行うもので、構造物の健全性と安全な道路交通の確保や第三者等に対する被害の防止の双方の観点から変状の発生や進行状況を把握し、その状態を適切に評価する点検である。トンネル覆工に対する評価としては、**図 6.2.2** に示すように第三者である利用者の安全を確保するためのはく落・漏水の判定である個別判定と、トンネル覆工自体の構造安全性としての機能面を評価する健全度評価の 2 つの評価を行っている。個別判定は、はく落や漏水によって利用者へ及ぼす影響度の判定区分によって箇所ごとに判定する。一方で、健全度評価においては、トンネル覆工のひび割れ、エフロレッセンスおよび湧水に基づいた評価を覆工スパン単位で行い、変状の進行性等総合的に勘案しトンネル覆工自体の健全度を評価する。

上記の評価は、定期的実施されるトンネル詳細点検結果に基づいて実施される。NEXCO におけるトンネル覆工への詳細点検は、**図 6.2.3** に示すように点検 A と点検 B に区分される。

点検 A は、トンネル覆工（アーチ部）を対象とし、レーザー、CCD カメラ、ラインセンサーカメラ等を用いた計測手法により覆工表面画像を取得し、ひび割れ展開図、詳細点検 A シートを作成し、1 スパンごとに「外力評価点」および「はく落評価点」を算出し、重点点検スパンの判定を行うものである。また、重点点検箇所の判定も併せて行う。

詳細点検 A シートには、トンネル名、延長、路線名等の「トンネル諸元等」、重点点検箇所を判定するための**表 6.2.1** に示す「特記事項」、ひび割れやエフロレッセンス、漏水の状況を**表 6.2.2** に示す評価項目

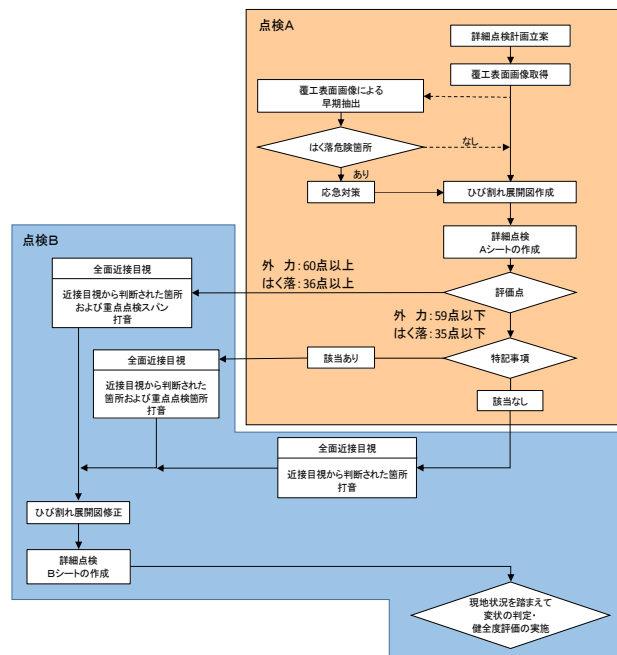


図 6.2.3 トンネル詳細点検の流れ<sup>1)</sup>を加筆修正

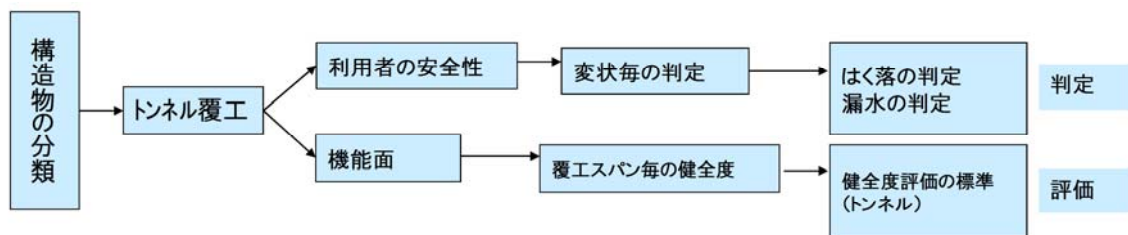


図 6.2.2 トンネル構造物の分類別における判定および評価区分<sup>1)</sup>を加筆修正

により外力評価点、はく落評価点を算定する「データシート」で構成されている。

外力評価点、はく落評価点は、覆工スパン単位に表 6.2.2 の観察項目①から⑤ごとに算定する。

点検 B は、現場にて高所作業車等を用いて技術者がトンネル覆工全面に対して、近接目視を実施するものである。特に図 6.2.3 に示すように、点検 A で算定した外力評価点が 60 点以上、もしくは、はく落評価点が 36 点以上となる覆工スパンを重点点検スパンとして位置付け、近接目視と併せて覆工全面の打音点検を実施する。また、表 6.2.1 に示す「特記事項」に該当する箇所については、重点点検箇所として、近接目視と併せて該当箇所の打音点検を実施する。

点検 B では、点検 A で作成した詳細点検 A シートを引継ぎ、点検 B 実施後に「特記事項」、「データシート」の情報を更新する。また、点検 B において、図 6.2.2 の分類にて判定および評価を行う。判定は変状ごとに、はく落に対する判定(表 6.2.3 参照)および漏水に対する判定(表 6.2.4 参照)について行う。評価は、覆工スパン単位に表 6.2.5 のとおりトンネル覆工の健全度評価を行う。

覆工表面画像を基に覆工展開図を作成し、問題となる箇所およびスパンを判定する点検 A と、点検 A での

表 6.2.1 特記事項<sup>1)</sup>を加筆修正

| 特記事項(重点点検箇所)   |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>ひび割れ幅 2 mm程度のひび割れが連続して 3m以上ある。</li> <li>ひび割れ幅 3 mm程度以上のひび割れがある。</li> <li>打継ぎ目部に三日月型のひび割れがある。</li> <li>添架物(ジェットファン、標識等)のアンカー部およびその周辺に放射状のひび割れがある。</li> <li>モルタル系の補修材による既対策箇所がある。</li> <li>豆板、ジャンカ等があり、浮き・はく離の危険性がある。</li> <li>構造上問題があると判断されるひび割れがある。</li> <li>健全度ランクⅢ-1、Ⅲ-2、Ⅳ、Ⅴに対し、前回点検時から補修・補強が実施されていない。</li> <li>前回点検時のひび割れ展開図と比較して新たに変状が発生した箇所</li> </ul> |

表 6.2.2 評価点算定のデータシート

| 観察項目     | 判定区分                 |                | 外力               | はく落     |          |
|----------|----------------------|----------------|------------------|---------|----------|
|          | 画像目視の判定              |                |                  |         |          |
| 評価点パラメータ | ①ひび割れの幅、長さ、分布に関する評価点 |                | 自動算出             | 自動算出    |          |
|          | ②ひび割れの方向性に関する評価点     |                | 自動算出             | 自動算出    |          |
|          | ③パターン                | 亀甲状            | なし・1㎡未満・以上       | 0・7・14  | 0・11・22  |
|          |                      | 閉合型            | なし・長辺20cm未満・以上   | 0・4・7   | 0・12・23  |
|          |                      | 交差・分岐          | なし・〜4・5〜9・10箇所以上 | 0・2・3・5 | 0・4・8・12 |
| ④エフロッセンス |                      | なし・少ない・中程度・多い  | 0・1・2・3          | 0・1・2・3 |          |
| ⑤湧水      |                      | なし・あり(未対策・対策済) | 0・2・2            | 0・2・0   |          |

表 6.2.3 はく落に対する判定の目安

| 判定区分      | 判定標準 |  |
|-----------|------|--|
| はく落に関する判定 | AA   | ひび割れ等により覆工コンクリート等の浮き、はく離等がみられ、落下する可能性があるため、速やかに対策を講じる必要がある状態     |
|           | A1   | ひび割れ等により覆工コンクリート等の浮き、はく離等がみられ、落下する可能性があるため、計画的に対策を講じる必要がある状態     |
|           | A2   | ひび割れ等により覆工コンクリート等の浮き、はく離の兆候があり、将来的に落下する可能性があるため、監視を必要とする状態       |
|           | B    | ひび割れ等による浮き、はく離の兆候がないもの、又はたつき落としにより除去できたため、落下する可能性がなく、措置を必要としない状態 |
|           | OK   | ひび割れ等による浮き、はく離の兆候がなく、健全な状態                                       |

表 6.2.4 漏水に対する判定の目安

| 判定区分     | 判定標準 |  |
|----------|------|--|
| 漏水に関する判定 | AA   | コンクリートのひび割れ等から漏水の噴出があり、又は、漏水に伴う土砂流出により舗装が陥没したり沈下する可能性があるため、寒冷地においては漏水等によりつららや側氷が生じ、利用者の安全性を損なうため、速やかに対策を講じる必要がある状態 |
|          | A1   | コンクリートのひび割れ等から、漏水の流出があり、又は、排水不良により舗装面に滞水があり、利用者の安全性を損なう可能性があるため、計画的に対策を講じる必要がある状態                                  |
|          | A2   | コンクリートのひび割れ等から、漏水の流下があり、又は、排水不良により舗装面に滞水を生じるおそれがあり、利用者の安全性を損なう可能性があるため、監視を必要とする状態                                  |
|          | B    | 滴水又はにじみによる漏水があっても利用者の安全性に影響がないため、措置を必要としない状態   |
|          | OK   | 漏水がみられないもの   |

判定結果から近接目視かつ打音点検を実施する点検 B の二段階のトンネル覆工点検の運用において、評価点は重要な役割を担っている。また、外力評価点にあつては、表 6.2.5 のとおりトンネル覆工の健全度評価の目安としても活用している。ここで、評価点の算定方法について、以下に述べる。

表 6.2.2 評価点算定のデータシートにある①ひび割れの幅、長さ、分布に関する評価点および②ひび割れの方向性に関する評価点については、1-2-2 TCI の概要で述べたとおり、TCI から評価点を算定している。TCI は、覆工に発生するひび割れを定量的に評価するため

に、岩盤中のひび割れ（節理）の密度や方向、幅を総括的に定量化する指標であるクラックテンソルを援用し、覆工コンクリートの劣化指標としている。TCI は、覆工表面のひび割れの幅、長さ、方向をパラメータとした指標であり「最大ひび割れ幅」、「最大ひび割れ幅の長さ」、「ひび割れの分布」、「ひび割れの方向性」についての判定が可能となる指数である。TCI は、テンソルの一次不変量として縦断方向成分を示す  $F_{11}$  と横断方向成分を示す  $F_{22}$  の和  $F_0$  で表される。この  $F_0$  から評価点への換算に関して、以下の①ひび割れの幅、長さ、分布に関する評価点および②ひび割れの方向性に関する評価点に区分して算定している。

① ひび割れ幅、長さ、分布に関する評価点

外力評価点  $y_1$

$$y_1 = \frac{58 \times x \times 10^5}{(x \times 10^5 + 10)} \quad (1)$$

はく落評価点  $y_2$

$$y_2 = \frac{32 \times x \times 10^5}{(x \times 10^5 + 13)} \quad (2)$$

ここで、 $X:F_0$

② ひび割れの方向性に関する評価点

外力評価点、はく落評価点ともに、横断卓越型、縦横断拮抗型、横断・斜め卓越型として  $Z=F_{22}/F_0$  ( $F_0$ ) の値から表 6.2.6 のような評価点を決定している。

表 6.2.5 健全度ランクとその定義および評価の標準

| 健全度ランク | 定義                             | 評価の標準  |                 |
|--------|--------------------------------|--|-----------------|
| V      | 変状が極めて著しく、直ちに何らかの対策を行う必要があるもの  | ・変状の進行が極めて著しくみられる                                      |                 |
| IV     | 変状が著しく、早急に何らかの対策検討を行う必要があるもの   | ・放射状ひび割れが見られる<br>・圧ざが見られる<br>・5 mm以上の段差、ずれのあるひび割れが見られる |                 |
| III-2  | 変状があり、速やかに何らかの対策検討を行う必要があるもの   | ・健全度ランク III-1 の状況から進行しているようにみられる                       |                 |
| III-1  | 変状があり、適切な時期に何らかの対策検討を行う必要があるもの | ・評価点が 60 点以上であるが、進行性が緩やかなもの                            |                 |
| II     | 変状があるが、現状は継続的に監視を行う必要があるもの     | ・評価点で 31~59 点  | ・継続的に監視を行う程度のもの |
| I      | 変状がないか、もしくは軽微なもの               | ・変状がないか、もしくは軽微なもの<br>・評価点で 30 点以下                      | ・進行性が見られないもの    |

表 6.2.6 ひび割れの方向性に対する評価点

| Z         | 外力評価点 | はく落評価点 | 備考       |
|-----------|-------|--------|----------|
| 0<Z<0.3   | 4     | 2      | 横断卓越型    |
| 0.3<Z<0.7 | 7     | 4      | 縦横断卓越型   |
| 0.7<Z<1.0 | 11    | 6      | 縦断・斜め卓越型 |

Z :  $F_{22}/F_0$



③ パターン

覆工スパン単位でのひび割れ分布において、亀甲状、閉合型、交差・分岐の局部的な個所が存在する場合は、表 6.2.7 に示すとおりその規模や個所数によって、判定する。ただし、当該項目はひび割れ情報とは別の評価点として存在しており、覆工スパンに亀甲状、閉合型、交差・分岐の局部的な個所が複数混在する場合は、その評価点で一番大きくなる観察項目が採用される。

表 6.2.7 ひび割れパターンに対する評価点

| 観察項目   | 判定区分  | 外力評価点    | はく落評価点 |    |
|--------|-------|----------|--------|----|
| ③ パターン | 亀甲状   | なし       | 0      | 0  |
|        |       | 1㎡未満     | 7      | 11 |
|        |       | 1㎡以上     | 14     | 22 |
|        | 閉合型   | なし       | 0      | 0  |
|        |       | 長辺20cm未満 | 4      | 12 |
|        |       | 長辺20cm以上 | 7      | 23 |
|        | 交差・分岐 | なし       | 0      | 0  |
|        |       | 0~4箇所    | 2      | 4  |
|        |       | 5~9箇所    | 3      | 8  |
| 10箇所以上 |       | 5        | 12     |    |

④ エフロッセンス

覆工スパン単位で表 6.2.8 に示すとおりエフロッセンスが発生している規模により評価点を判定する。

⑤ 漏水

覆工スパン単位で表 6.2.9 に示すとおり覆工からの漏水の有無により判定する。また、漏水対策の有無についても判定を行うこととしている。

表 6.2.8 エフロッセンスに対する評価点

| 観察項目     | 判定区分 | 外力評価点 | はく落評価点 |
|----------|------|-------|--------|
| ④エフロッセンス | なし   | 0     | 0      |
|          | 少ない  | 1     | 1      |
|          | 中程度  | 2     | 2      |
|          | 多い   | 3     | 3      |

表 6.2.9 漏水に対する評価点

| 観察項目 | 判定区分    | 外力評価点 | はく落評価点 |
|------|---------|-------|--------|
| ⑤湧水  | なし      | 0     | 0      |
|      | あり(未対策) | 2     | 2      |
|      | あり(対策済) | 2     | 0      |

(2) 現状のトンネル覆工点検手法の課題

点検 A および点検 B の二段階からなる現在のトンネル覆工点検手法は、トンネル覆工に発生しているひび割れ、エフロッセンスおよび湧水の情報から重点的に点検が必要な覆工スパンを抽出することとしている。重点的な点検が必要な覆工スパンの抽出は、構造上問題となる外力の影響が懸念される覆工スパンやはく落事象が生じやすい覆工スパンの事前抽出を目的としている。しかしながら、トンネル覆工の点検は、近接目視かつ打音を基本としていることから、重点的な点検が必要な覆工スパンの抽出は、決して合理的とはいえない。高速道路トンネルの点検は、車線規制を実施し限られた規制時間のなかで点検を実施することから、点検の効率化が求められている。そのためには、ひび割れ等の変状原因の推定が重要であり、近接目視かつ打音点検の選択と集中が必要となる。

また、重点的な点検が必要な覆工スパンの抽出に活用している評価点の観察項目①ひび割れの幅、長さ、分布に関する評価点および②ひび割れの方向性に関する評価点は、覆工スパンにあるすべてのひび割れが対象である。

トンネル覆工に発生しているひび割れ原因については、外因によるもの、内因によるものが複合的に作用しているため、ひび割れ発生形態から変状原因の推定をすることは困難な状況である。したがって、外力評価点が 60 点以上、もしくは、はく落評価点が 36 点以上を重点点検スパンとして、近接目視と併せて覆工全面の打音点検を実施する覆工スパンのなかには、内因による変状も含んでいる

ことになる。内因によるひび割れについては、ひび割れの進行もなくはく落事象となるようなひび割れ形態ではないため、安全性が確保されたトンネル覆工に対して近接目視と併せて覆工全面の打音点検を実施する場合があります、オーバースペックな点検となっていることを示唆している。

現在、詳細点検で使用している覆工コンクリートのひび割れ評価指標の TCI は、トンネル覆工のひび割れ全体をテンソルの不変量でしか評価していなかったことから、既往の点検記録を詳細に分析、評価することが困難である。また、コンクリート収縮によるひび割れ等の標準的なひび割れとして平均的な評価としているが、なかには外力作用等の特殊条件下において非常に大きなひび割れとなったり、まったくひび割れが発生していないトンネル覆工が存在していることから、平均値では標準的なひび割れを正しく評価できない。このように、ひび割れの評価が全体的に漠然としたものとなっていることで、はく落につながるひび割れやコンクリート収縮による標準的なひび割れの抽出が困難なものとなっている。

外力評価点は、表 6.2.4 に示すトンネル覆工の健全度評価の評価基準としても活用している。健全度評価は、トンネル覆工への外力による変状評価として変状に対して対策の必要性について判断する指標である。しかしながら、外力評価点は上述同様すべてのひび割れを対象としていることから、変状原因推定が困難な状況であり外因によって発生したひび割れによる評価となっていない。また、外力評価点算定にあたり表 6.2.2 にある観察項目の③パターンである亀甲状、閉合型および交差、分岐による算定、④エフロレッセンスおよび⑤湧水による算定が、外因によって発生するひび割れに対するトンネル覆工への影響度をより困難なものとしている。

上述した現状のトンネル覆工点検手法の課題について、以下に整理する。

- 1) トンネル覆工の点検は、近接目視かつ打音を基本としていることから、重点的な点検が必要な覆工スパンを抽出する点検手法は、合理的ではない。
- 2) 外力評価点、はく落評価点の算定にあたっては、内因による安全性が確保されたひび割れも含んでいることから、評価点によって抽出する重点点検がオーバースペックとなっている可能性がある。
- 3) 詳細点検で使用している覆工コンクリートのひび割れ評価指標の TCI では、ひび割れの特徴を把握することが困難である。
- 4) コンクリート収縮によるひび割れ等標準的なひび割れが平均的な評価としているが、なかには外力作用等の特殊条件下において非常に大きなひび割れとなったり、まったくひび割れが発生していないトンネル覆工が存在していることから、平均値では標準的なひび割れを正しく評価できない。
- 5) 健全度評価の目安として採用している外力評価点の算定として、内因および外因によって発生するすべてのひび割れを対象に算定しており、また、局所的なひび割れパターン、エフロレッセンスおよび湧水による算定も加算することで、外因によるトンネル覆工への影響度としての健全度評価となっていない。

### (3) トンネル覆工点検の提案

#### 1) トンネル覆工点検手法

従来の評価方法では、トンネル覆工全面に対して打音点検の実施有無を判定する外力評価点、はく落評価点の基礎点は、覆工表面積に対するひび割れ面積（長さ×幅）比率の縦断方向成分  $F_{11}$  と横断方向成分  $F_{22}$  の和から算定している。そのため、前項で記述したように安全性が確保されたひび割れを分

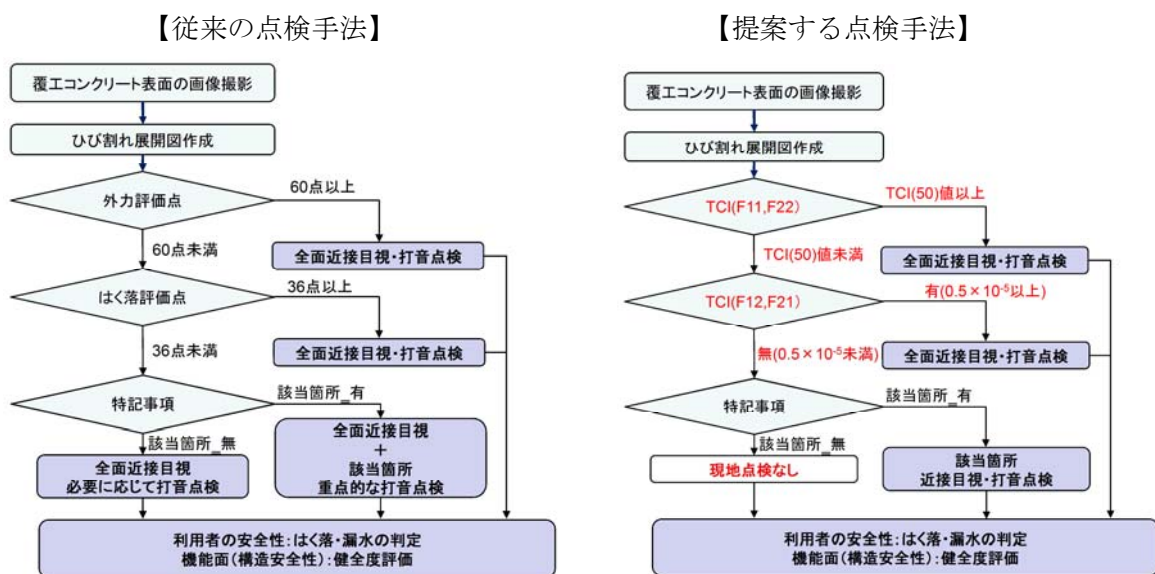
離できない。さらに、トンネル周辺地山の緩み圧や地すべり、路盤沈下等で発生するひび割れはトンネル軸方向、周方向に卓越する特徴があることが既往の研究で明らかになっており、この特徴を  $F_{11}$  と  $F_{22}$  との和のテンソルの不変量で評価する従来手法では、直接的に評価することができない。

また、従来の点検手法は、トンネル覆工の撮影画像からひび割れ展開図、詳細点検 A シートの作成により重点点検スパンおよび重点点検箇所を抽出を行う点検 A と、すべてのトンネル覆工に対して近接目視かつ打音点検を実施する点検 B を実施しており、点検 A で抽出した重点点検スパン、重点点検箇所以外のトンネル覆工に対しても点検 A、点検 B の二重点検を行っている。

それに対して本提案の点検手法は、図 6.2.4 の右図にあるように従来の点検手法と同様に覆工画像撮影からのひび割れ展開図は作成し、TCI 値を算出することは従来手法と同様である。しかし、従来と異なり、TCI の成分  $F_{11}$ 、 $F_{22}$  および  $F_{12} \cdot F_{21}$  毎に閾値を設定し、閾値に該当しないトンネル覆工に対しては近接目視かつ打音点検を省略するといった現地点検のスクリーニングを導入する点検手法を提案する。

閾値は、TCI の縦断方向成分  $F_{11}$ 、横断方向成分  $F_{22}$  およびせん断方向成分  $F_{21}, F_{12}$  の成分に着目し、外力作用等の特殊条件下での極端に大きな TCI 値や多くのトンネルでは TCI 値が小さいことを明らかにし、既設トンネルの代表的なひび割れを示す指標として TCI(50)値を設定した。従来は、単純な算術平均値を TCI の代表値として取り扱っていたが、平均値は極端に大きな TCI 値を示すトンネルの影響を受けることが予想される。したがって代表値としての扱いはせずに、新しい考え方として TCI(50)値という概念を用いて分析を試みた。

従来のひび割れ判定評価では、各成分の和である  $F_0$  の不変量を用いていたが、この値ではひび割れの方向成分が分からないため、コンクリート片剥落の誘因となるひび割れの交差を評価できなかった。高速道路では、小さなコンクリート片はく落が車両事故を引き起こす可能性があることから、本研究では TCI の方向成分に着目して、ひび割れの交差を抽出する評価手法を提案する。また、TCI の成分毎に閾値を設定することで、緩み土圧や地すべり荷重等の特殊条件下で発生する頻度がひび割れ状況、



赤字：従来点検からの変更内容

図 6.2.4 従来点検手法と提案する点検手法との運用フロー比較

つまりトンネル軸方向または周方向のひび割れが卓越する状況を簡単に把握できる。さらには、従来手法では判定に用いていない、内因のみでは発生しないと判断されるせん断方向のひび割れ成分  $F_{12} \cdot F_{21}$  を指標とすることで、コンクリート収縮以外の原因でひび割れが生じている覆工を確実に抽出できる。以下に提案する点検手法の手順を述べる。

- ① トンネル覆工撮影車により取得したトンネル覆工画像から、ひび割れ等変状情報を展開図にトレースしひび割れ展開図を作成することで、覆工 1 スパンごとに TCI 値 ( $F_{11}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{12} \cdot F_{21}$ ) を算定する。

従来の点検手法では、上述したように TCI 等から外力評価点およびはく落評価点を算定していたが、提案する手法では覆工 1 スパンごとに TCI の縦断方向成分  $F_{11}$ 、横断方向成分  $F_{22}$  およびせん断方向成分  $F_{12} \cdot F_{21}$  を算定することで、定量的なひび割れ分布の把握が可能となる。

- ② トンネル覆工 1 スパンごとに算定した TCI の  $F_{11}$ 、 $F_{22}$  をそれぞれ TCI(50)値と比較し、 $F_{12} \cdot F_{21}$  においては、トンネル覆工への発生の有無を確認する。

従来の点検手法では、外力の変状が疑われる外力評価点 60 点以上およびはく落事象が疑われるはく落評価点 36 点以上となる覆工スパンを抽出することとしていたが、評価点対象のひび割れにはコンクリート収縮による安全性が確保されたひび割れも含まれる。そこで、コンクリート収縮により発生する可能性が高いひび割れ形態である TCI の  $F_{11}$ 、 $F_{22}$  の TCI(50)値を閾値として採用することで、コンクリート収縮以外で発生したひび割れを抽出する手法とした。また、TCI の  $F_{12} \cdot F_{21}$  のひび割れについては、コンクリート収縮以外の要因で発生するため、トンネル覆工への発生の有無を確認することで特殊条件によるトンネル覆工スパンの抽出も判定に加えた。

- ③  $F_{11}$ 、 $F_{22}$  のうち、どちらかが TCI(50)値を超えるまたは、 $F_{12} \cdot F_{21}$  が存在する覆工スパンの場合、現地にて覆工全面の近接目視かつ打音、触診を実施し、ひび割れ状況を把握する。 $F_{11}$ 、 $F_{22}$  がそれぞれ TCI(50)値未満かつ、 $F_{12} \cdot F_{21}$  が存在しない( $0.5 \times 10^{-5}$  未満)の覆工スパンについては、現地点検を省略する。

従来の点検手法では、各評価点の閾値は近接目視と併せて重点的に打音点検をトンネル覆工全面に実施する覆工スパンの抽出に活用している。これでは、トンネル覆工の近接目視を基本としている点検手法において現地点検の効率化には至っていない。これに対し提案する点検手法は、TCI 値 ( $F_{11}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{12} \cdot F_{21}$ ) の閾値を現地点検の実施判断に活用するもので、これにより現地点検を実施するトンネル覆工スパンを限定することで現地点検の選択と集中が可能となる。このトンネル覆工に対する近接目視かつ打音点検を省略することによって、詳細点検の効率化に資する。また、従来の点検手法にあるはく落事象が疑われるトンネル覆工スパンの抽出（はく落評価点 36 点以上）に対しては、はく落評価点の加点が大きかった亀甲状ひび割れ箇所や閉合ひび割れ箇所を、以下の特記事項に加えることで近接目視かつ打音点検を実施する局所的な箇所として対応する。交差・分岐箇所については、 $F_{12} \cdot F_{21}$  が存在するトンネル覆工に発生する可能性が高いことから、該当箇所に対しても近接目視かつ打音点検が可能となる。

以下の特記事項に該当する箇所は、近接目視かつ打音点検を実施する。

- ・ひび割れ幅 2 mm 程度のひび割れが連続して 3m 以上ある。
- ・ひび割れ幅 3 mm 程度以上のひび割れがある。
- ・打継ぎ目部に三日月型のひび割れがある。
- ・添架物（ジェットファン、標識等）のアンカー部およびその周辺に放射状のひび割れがある。

- ・モルタル系の補修材による既対策箇所がある。
- ・豆板等があり、浮き・はく離の危険性がある。
- ・構造上問題があると判断されるひび割れがある。
- ・健全度ランクⅢ-1、Ⅲ-2、Ⅳ、Ⅴに対し、前回点検時から補修・補強が実施されていない。
- ・前回点検時のひび割れ展開図と比較して新たに変状が発生した箇所
- ・局所的に発生している亀甲状ひび割れや閉合ひび割れ箇所

④ F<sub>11</sub>、F<sub>22</sub>のうち、どちらかがTCI(50)値を超える、またはF<sub>12</sub>・F<sub>21</sub>が存在する(0.5×10<sup>-5</sup>以上)覆工スパンの場合、現地点検を実施したうえで、**図 6.2.2**にある覆工の利用者の安全性に対する判定である**表 6.2.3**のはく落の判定および**表 6.2.4**の漏水の判定を行う。覆工の機能面に対しては、覆工スパン毎で健全度評価を実施する。

健全度評価にあたっては、**表 6.2.10**にある評価の標準を目安に健全度ランクを「Ⅲ-1」以上

の評価とする。これは、健全度評価の定義にある「Ⅲ-1」を対策の実施検討の閾値としていることから、コンクリート収縮以外によるひび割れと判断されたトンネル覆工に対しては、措置が必要と判断するものである。

一方で、F<sub>11</sub>、F<sub>22</sub>がそれぞれTCI(50)値未満かつ、F<sub>12</sub>・F<sub>21</sub>が零の覆工スパンの場合、トンネル覆工画像から作成するひび割れ展開図の情報により、**図 6.2.2**にある覆工の利用者の安全性に対する判定にある**表 6.2.3**のはく落の判定および**表 6.2.4**の漏水の判定を行う。

なお、TCI(50)値未満かつ、F<sub>12</sub>・F<sub>21</sub>が零の覆工スパンの場合、健全度評価については、ひび割れが発生していないトンネル覆工は健全度ランク「Ⅰ」を、それ以外は健全度ランクを「Ⅱ」とする。

F<sub>12</sub>・F<sub>21</sub>が存在する覆工スパンでは、モルタル分だけの材料分離領域や特に矢板工法においては、覆工厚の不足もしくは背面が空洞となっていることが想定されるため、詳細な調査を実施したうえで、健全度評価を行う。また、過年度の詳細点検よりひび割れの進展が確認され、TCI(50)値を超過している覆工スパンについては、コンクリート収縮以外の原因が想定されることからF<sub>11</sub>、F<sub>22</sub>成分の分布状況を把握したうえで、走行型レーザー計測により内空断面測定等の詳細調査を実施し、健全度評価を行う。

## 2) トンネル覆工点検手法に関する閾値の設定

提案した点検手法における現地点検方法のスクリーニングや健全度ランクの目安に採用したTCI値の各閾値の設定について以下に述べる。

表 6.2.10 健全度ランクとその定義および評価の標準

| 健全度ランク | 定義                             | 評価の標準  |                 |
|--------|--------------------------------|--|-----------------|
| V      | 変状が極めて著しく、直ちに何らかの対策を行う必要があるもの  | ・変状の進行が極めて著しくみられる  |                 |
| Ⅳ      | 変状が著しく、早急に何らかの対策検討を行う必要があるもの   | ・放射状ひび割れが見られる<br>・圧ざが見られる<br>・5mm以上の段差、ずれのあるひび割れが見られる  |                 |
| Ⅲ-2    | 変状があり、速やかに何らかの対策検討を行う必要があるもの   | ・健全度ランクⅢ-1の状況から進行しているようにみられる   |                 |
| Ⅲ-1    | 変状があり、適切な時期に何らかの対策検討を行う必要があるもの | ・F <sub>11</sub> およびF <sub>22</sub> がTCI(50)値以上であるが、進行性が緩やかなもの<br>・F <sub>12</sub> ・F <sub>21</sub> が存在する(0.5×10 <sup>-5</sup> 以上)もの |                 |
| Ⅱ      | 変状があるが、現状は継続的に監視を行う必要があるもの     | ・F <sub>11</sub> およびF <sub>22</sub> がTCI(50)値未満<br>・F <sub>12</sub> ・F <sub>21</sub> が存在しない(0.5×10 <sup>-5</sup> 未満)                 | ・継続的に監視を行う程度のもの |
| Ⅰ      | 変状がない                          | ・変状がない   |                 |



① 縦断成分 F<sub>11</sub>、横断成分 F<sub>22</sub> の TCI(50)値

縦断成分 F<sub>11</sub>、横断成分 F<sub>22</sub> の TCI(50) 値は、第 3 章での既往の点検記録から図 6.2.5 に示すように  $0.5 \times 10^{-5}$  毎の TCI 値の度数を算定し、その度数を累積した曲線の合計がデータ総数の 50% となった値で、矢板工法（上半先進）、矢板工法（側壁導坑）、NATM の建設工法ごとに算出している。第 3 章の既往の点検記録の分析によれば、NATM で施工されたトンネル覆工では、TCI 値が  $0.5 \times 10^{-5}$  未満、つまり、ひび割れがほとんど発生していないトンネル覆工が全体の約 30% 存在している。一方で、表 6.2.11 に示すように極端に大きな TCI 値を示したトンネル

表 6.2.11 各 TCI 値の最大、最小値、算術平均、TCI(50)値

単位： $\times 10^{-5}$

|      |     | 最大値   | 最小値 | 算術平均 | TCI(50)値 |
|------|-----|-------|-----|------|----------|
| NATM | F11 | 77.22 | 0.0 | 3.24 | 1.79     |
|      | F22 | 9.55  | 0.0 | 1.73 | 0.59     |
|      | F12 | 9.55  | 0.0 | 0.2  | 0.09     |
| 上半先進 | F11 | 45.81 | 0.0 | 6.00 | 4.86     |
|      | F22 | 36.43 | 0.0 | 4.49 | 3.44     |
|      | F12 | 8.52  | 0.0 | 0.44 | 0.28     |
| 側壁導坑 | F11 | 33.18 | 0.0 | 6.87 | 6.69     |
|      | F22 | 23.30 | 0.0 | 2.95 | 2.29     |
|      | F12 | 2.82  | 0.0 | 0.38 | 0.25     |

覆工も少数だが存在している。このため、算術平均では極端に大きな TCI 値を含むことから、すべての覆工に共通して発生する可能性がある一般的なひび割れを表現することが困難である。そこで、一般的なトンネルのひび割れ発生状況の特徴は、特殊事例の影響を受け難い中央値である TCI(50)値で検討することが望ましいと考えた。また、第 5 章の収縮ひずみに起因するひび割れ発生、進展解析結果によると、設計覆工厚を有している標準的な覆工でもコンクリートの収縮により、ひび割れが発生する可能性がある。ただし、コンクリートの収縮により生じるひび割れは、天端付近のトンネル縦断方向とトンネル横断方向であり、コンクリート片のはく落を引き起こすような閉合ひび割れは生じない。さらに、第 3 章の点検記録の分析や第 5 章の解析からひび割れ幅は 0.5mm を超えないこと、収縮によるひび割れについては、5~6 年程度で収束することがわかった。第 3 章で算出した点検記録の TCI(50) 値は、土圧の増加等の特殊事例の影響を受け難く、第 5 章での収縮ひずみに起因するひび割れ発生、進展解析結果の建設工法ごとの TCI 値とも近い値を示しており、F<sub>22</sub>/F<sub>11</sub> の比率についても、TCI(50)値と解析結果との差が 0.1 以下であり、解析結果で各工法の代表的なひび割れ発生パターンを再現しているものと考えられる。このことから TCI(50)値は、トンネルに発生しているひび割れのうち、コンク

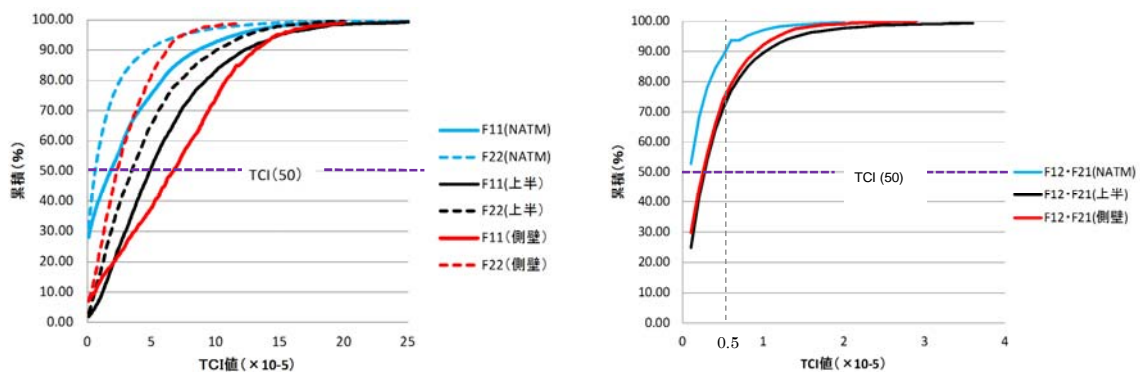


図 6.2.5 各工法の TCI 値の累積曲線（左図：F<sub>11</sub>、F<sub>22</sub> 右図：F<sub>12</sub>(F<sub>21</sub>))

リートの収縮ひずみの影響を強く受けていると判断でき、収縮に起因する一般的なひび割れ分布の閾値として設定することとした。すなわち TCI(50)値を超えるスパンについては、収縮ひずみ以外の要因でひび割れが発生していることが考えられることから、なにかしらの措置を行う必要があると判断したものである。

## ② $F_{12} \cdot F_{21}$ の有無

TCIのせん断成分である  $F_{12} \cdot F_{21}$ の有無については、せん断成分の TCI 値が小さいことから  $0.1 \times 10^{-5}$  毎の度数分布を作成した。第3章での既往の点検記録から図 6.2.5 および表 6.2.11 に示すように  $0.5 \times 10^{-5}$ 未満、つまり、ひび割れがほとんど発生していないトンネルが矢板工法（上半先進）、（側壁導坑）で約 70%、NATM においては約 90%存在している。平均値でも  $0.5 \times 10^{-5}$ 未満と小さいことから、せん断成分が卓越するトンネルは特殊条件下にあることが想定される。特に、最もトンネルスパン数が大きい NATM については、図 6.2.5 に示すように約半数に全くせん断成分のひび割れが発生していない。

また、第3章では、巻厚不足や背面空洞とひび割れパターンとの関係について既往の点検および調査結果から検討を実施しており、背面空洞によってひび割れ量の傾向の違いはみられないが、今回対象の全スパンに比べ、背面空洞がみられる箇所は  $F_{12} \cdot F_{21}$  が大きい傾向がある。したがって、背面空洞の有無によってひび割れ量に大きな傾向はみられないが、背面空洞がみられる箇所では斜めひび割れの発生が多くなる傾向があると考えられる。第5章では、打設方法による粗骨材の材料分離や矢板工法における背面空洞の発生および不均一な覆工厚の要因がひび割れ形態に与える影響をひび割れ進展、解析により検討を行った。解析の結果、材料分離が発生した周辺に斜めひび割れが生じており、材料分離の有無がひび割れの発生に影響を与えている。背面空洞や覆工厚不足が連続で発生している箇所については、最終的には背面空洞や覆工厚不足領域にトンネル縦断方向のひび割れが複数発生し、そのひび割れからトンネル横断方向に放射状のひび割れが発生する結果となった。このようにコンクリートの収縮以外の要因で発生するひび割れについては、斜めひび割れや放射状のひび割れが発生することが想定される。

コンクリートの収縮により生じるひび割れだけでは、コンクリート片のはく落を引き起こすような閉合ひび割れは生じないが、材料分離や背面空洞および不均一な覆工厚が要因で発生する斜めひび割れや放射状のひび割れと相まって閉合ひび割れとなることで、コンクリート片のはく落を引き起こす可能性がある。したがって、TCIのせん断成分である  $F_{12} \cdot F_{21}$  が存在する覆工スパンについては、はく落事象を未然に防止することが重要となることから、近接目視かつ打音点検を実施することとした。また、 $F_{12} \cdot F_{21}$  が存在する覆工スパンで斜めひび割れや放射状のひび割れが発生している箇所については、コンクリート収縮以外の材料分離や特に矢板工法においては、覆工の不均一や背面空洞の可能性が懸念され覆工の機能を十分に発揮できない状態となることから、詳細調査を実施したうえで健全度評価を行うこととした。

## 3) 従来点検手法と提案する点検手法における閾値の比較

従来の点検手法においては、トンネル覆工に存在するひび割れの  $F_{11}$ 、 $F_{22}$  の和を TCI 値として援用し、外力評価点、はく落評価点を算定したうえで、近接目視と併せてトンネル覆工全面に対して打音点検を実施する覆工スパンを抽出している。外力評価点、はく落評価点の算定にあたっては、コンクリート収縮による安全性が確保されたひび割れも含んでいることから、評価点によって抽出する現地点検



がオーバースペックとなっている可能性が高い。

一方で、提案する点検手法においては、現地点検の実施の有無を判断する閾値として、 $F_{11}$ 、 $F_{22}$ のTCI(50)値および $F_{12} \cdot F_{21}$ の有無 ( $0.5 \times 10^{-5}$ )を採用している。これら閾値は、コンクリート収縮により発生する可能性が高いひび割れの境界として設定している。従来の点検手法と提案する点検手法において、TCIの $F_{11}$ 、 $F_{22}$ は現地点検を実施する閾値として両手法で採用している。

そこで、本研究では近接目視かつ打音点検を実施している従来の点検手法の点検Bの結果における評価点が実際の覆工の状況を正しく示しているものと判断し、点検Bを実施した評価点とTCIについて比較した。比較にあたっては、提案する点検手法での閾値TCI(50)値未満の覆工スパン群と各評価点の分布について把握した。比較対象としたのは、点検Bを実施したNATMで施工された約15,000スパンのデータである。外力評価点とTCIの各成分との関係を図6.2.6に示す。

図6.2.6のとおり、せん断方向成分 $F_{12} \cdot F_{21}$ 以外はTCI値が増加すると外力評価点が高くなる傾向を示している。TCI(50)値未満の領域では、重点点検スパンとなる外力評価点60点以上となったものはなかった。そのなかで、TCI(50)値未満で外力評価点が40点以上となっているスパンは5スパンあり、外力評価点が高くなった理由としては、亀甲状等のひび割れパターンの配点が加算されたことによるものであった。外力評価点算定には直接関係しないせん断方向成分 $F_{12} \cdot F_{21}$ と評価点の関係を見ると、図6.2.6のとおり $F_{12} \cdot F_{21}$ が小さいにも関わらず、ひび割れパターンの加点があることから、せん断ひび割れが非常に短い交差していることで加点され評価点が高くなっていることが判断できる。

一方で、はく落評価点とTCIの各成分との関係を図6.2.7に示す。はく落評価点では、表6.2.7にあるようにひび割れパターンの比重が大きくなるため、TCI(50)値未満でも重点点検スパン判定の閾値36点以上のトンネルが20スパン程度生じている。

従来の点検手法である、重点的に打音点検を実施するスパンの判定に採用している外力評価点およびはく落評価点については、ひび割れの情報に加えて局部的な変状である亀甲状等のひび割れパターン、エフロレッセンスおよび漏水の配点を覆工スパン全体の評価とすることで安全側に重点点検スパンの判定を実施していたことが示唆される。そのため、今回提案する現地点検が必要な覆工スパンに

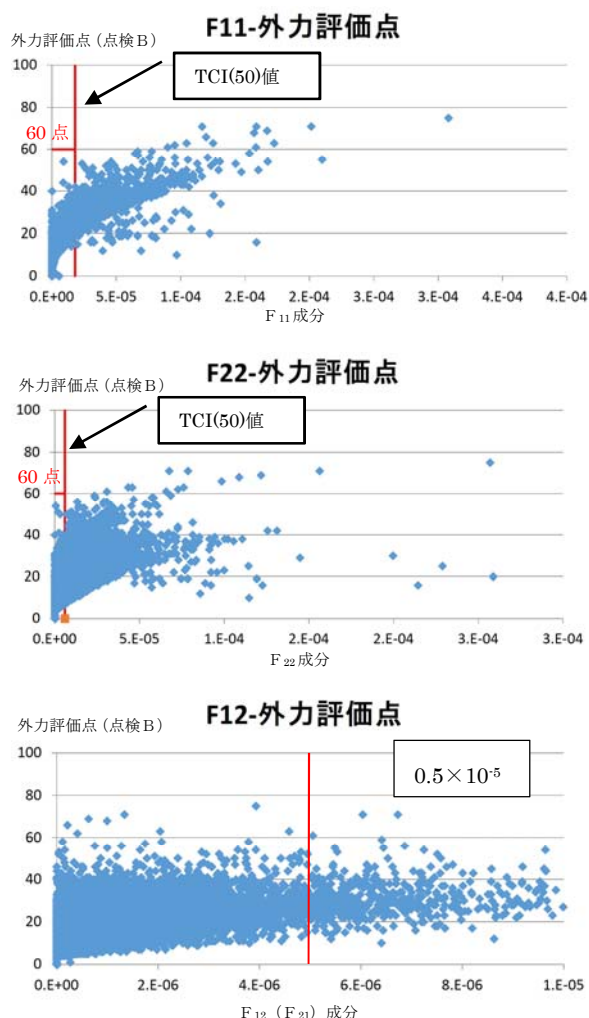


図 6.2.6 外力評価点とTCI各成分との関係

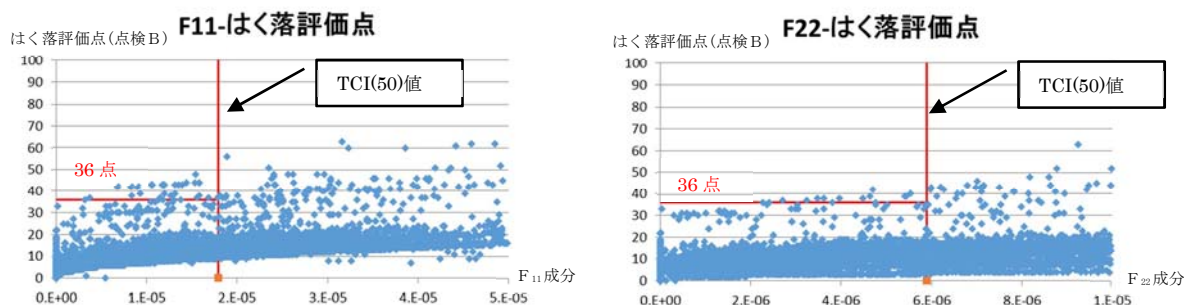


図 6.2.7 はく落評価点と T C I 各成分との関係

については、 $F_{11}$ 、 $F_{22}$ のひび割れ情報による判定とし、そのなかでもひび割れ発生要因としてコンクリート収縮以外の影響が懸念される TCI(50)値以上の覆工スパンを対象とすることとする。

ただし、はく落事象が懸念される亀甲状、閉合型のひび割れパターンの局所的な変状部の現地点検においては、特記事項により対応することとする。さらに、図 6.2.6 に示すせん断方向成分  $F_{12} \cdot F_{21}$  と評価点の関係から、せん断ひび割れが非常に短い交差・分岐していることで評価点が高くなっていることが判断できるため、 $F_{12} \cdot F_{21}$  が  $0.5 \times 10^{-5}$  以上の覆工スパンについても現地点検が必要な覆工スパンとして選定することとする。

また、外力評価点においては覆工健全度評価の目安としていたが、上述するとおり外力評価点の中には、ひび割れ情報以外の判定が含まれていることから、外因によるトンネル覆工への影響度としての健全度評価となっていない。さらには、施工や材料に起因して発生する亀甲状、閉合型の局所的なひび割れパターンの配点により、覆工全体に発生しているひび割れに対しての健全度ランクの区分に齟齬が生じる結果となっている。このような外力評価点による健全度評価の課題に対して、本提案では外因によるトンネル覆工への影響度である健全度ランクの区分として、トンネル覆工に発生しているひび割れ情報を定量的に算定する TCI の成分を採用することとする。健全度評価の区分は、表 6.2.10 の定義に示すように、対策の必要性の有無が健全度ランク「Ⅲ-1」と「Ⅱ」の境界となっている。そのため、コンクリート収縮の影響が支配的なひび割れ形態である TCI(50)値を健全度ランク「Ⅲ-1」と「Ⅱ」の境界として採用することとする。さらには、コンクリートの収縮以外の要因で発生するひび割れについては、斜めひび割れや放射状のひび割れが発生することが想定されるため、せん断方向成分  $F_{12} \cdot F_{21}$  の有無 ( $0.5 \times 10^{-5}$ ) について対策の検討を実施する必要があることから、健全度ランク「Ⅲ-1」と「Ⅱ」の境界区分として併記することとする。

#### (4) 提案における効果

提案した点検手法は、トンネル覆工スパン単位に算定する TCI の  $F_{11}$ 、 $F_{22}$  の TCI(50)値および  $F_{12} \cdot F_{21}$  の有無 ( $0.5 \times 10^{-5}$ ) を閾値とした現地点検手法の合理的かつ効率化を目的として提案を行った。現在、NEXCO は、現地点検において近接目視かつ打音点検をすべてのトンネル覆工に対して実施している。そのため、現地点検での多大な労力および時間を要することはもちろんのこと、点検に伴う交通規制回数も増加することで、一般走行車に対して快適な道路空間の提供ができていない結果となっている。これに対して、提案する点検手法は、トンネル覆工に対して、覆工画像撮影からひび割れ展開図を作成

し、現地点検が必要な覆工スパンを判定することで現場点検のスクリーニングを実施する方法である。これにより従来、すべてのトンネル覆工に対して実施していた近接目視かつ打音点検を限定することで、現地点検に要する労力および時間の省力化が可能となる。単純計算でいうと、第3章での既往の点検記録からひび割れ特性の分析に用いたトンネル覆工37,037スパンのうち、半分の18,518スパンが近接目視かつ打音点検を実施しない算段となる。また、TCIの各成分によって現地点検の有無を区分することで、近接目視かつ打音点検を実施しないスパンにあるひび割れについては、コンクリート収縮に起因したひび割れの可能性が高いことから、ひび割れへの対応についてエンジニアリングジャッジの必要性がなくなり、ひび割れへの対応が合理的となることを秘めている。

### 6.2.3 トンネル覆工の対策工

#### (1) トンネル覆工の対策工の提案

NEXCOにおいて、トンネル覆工の対策工については、図6.2.3にある覆工の利用者の安全性に対する判定にあるとおり、はく落と漏水の個別損傷に対して補修を行う必要がある。一方で、健全度評価については、覆工スパン単位で対策工を実施する。これら対策工は、詳細点検、詳細調査の判定および評価によって対策工を実施することとなる。対策工実施にあたり、前述の詳細点検において、現地点検手法の閾値として設定した縦断成分 $F_{11}$ 、横断成分 $F_{22}$ のTCI(50)値およびせん断成分 $F_{12}$ 、 $F_{21}$ の有無( $0.5 \times 10^{-5}$ )を活用した、トンネル覆工における対策工フローを図6.2.8に提案する。

収縮ひずみに起因するひび割れは、第5章でのひび割れ発生、進展解析結果から覆工施工から5~6年程度でひび割れが収束すること、また、収縮ひずみに起因するひび割れは、はく落を引き起こすひび割れ形態とはならないことから、 $F_{11}$ 、 $F_{22}$ のTCI(50)値未滿となるトンネル覆工については、収縮ひずみの影響によるひび割れであり、対策工の必要性はないとする。なお、斜め方向のひび割れについては、内因のみでは発生しないことと、コンクリート収縮による縦横断方向のひび割れと相まって閉合ひび割れ等のはく落を引き起こす可能性があることから、 $F_{12}$ 、 $F_{21}$ が $0.5 \times 10^{-5}$ 以上のトンネル覆工については、必ず近接目視、打音点検および詳細調査を義務付けた。さらに斜めひび割れは、粗骨材の偏り等の材料分離、覆工の不均一や背面空洞の可能性が懸念され、覆工の機能を十分に発揮できない状態となる可能性が高い。そのため、詳細調査等で覆工厚不足が確認された場合は、覆工スパン全体において設計覆工厚の耐荷力と同等となる覆工補強を実施する必要がある。覆工背面が空洞となっている場合は、背面空洞注入を行ったうえで覆工補強を行うことが重要である。変状原因の推定にあたっては、TCI(50)値を超過している覆工スパンや $F_{12}$ 、 $F_{21}$ が $0.5 \times 10^{-5}$ 以上の斜めひび割れが発生しているトンネル覆工について、第3章で外力変状の変形モード検証を実施した走行型レーザー計測により、内空断面測定等の詳細調査を実施し内空変形モードを把握する。併せて、第3章で検証した図6.2.9に示す $F_{11}$ 、 $F_{22}$ を用いたひび割れ特性から変状

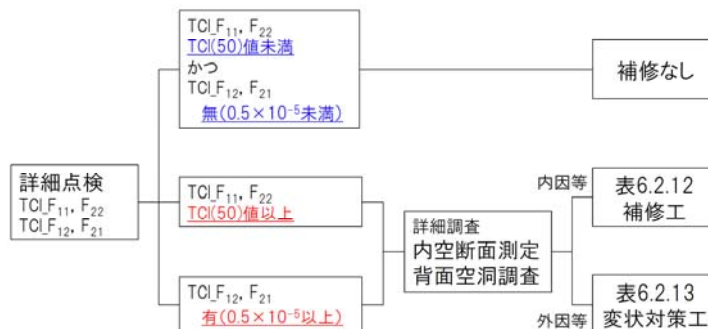
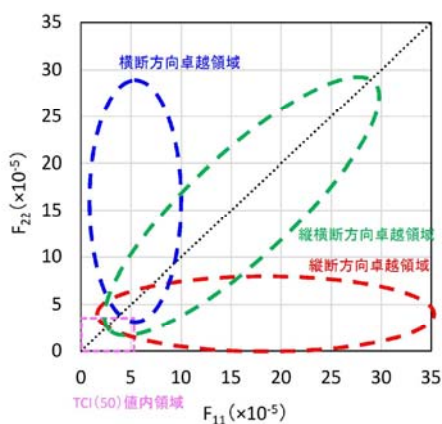


図6.2.8 ひび割れ等に対する対策工フロー

原因推定を行う。これら変状原因推定の結果より、表 6.2.12 および表 6.2.13 による補修の目的および変状原因に応じた対策工を行う。



- $F_{11} > F_{22}$  : 縦断方向卓越領域  
緩み圧による天端縦断方向ひび割れ、  
水圧、塑性圧による側壁部縦断方向ひび割れ等
- $F_{11} = F_{22}$  : 縦横断方向卓越領域  
地すべり、  
偏圧地形による斜め方向ひび割れ等
- $F_{11} < F_{22}$  : 横断方向卓越領域  
路盤沈下、  
路盤隆起による横断方向ひび割れ等

図 6.2.9 TCI( $F_{11}$ 、 $F_{22}$ )のひび割れ分布からの変状原因推定

表 6.2.12 補修工の目的と工種<sup>2)</sup>

| 目的          | 工法等     | 工種                                      |
|-------------|---------|---|
| はく落対策       | はつり落とし  | クォータージェット、電動ビックハンマー、ハンマー、たがね等           |
|             | はく落防止工法 | 繊維シート接着、ネット、樋の設置                        |
| 漏水対策        | 導水工法    | 樋式、溝切り式                                 |
|             | 止水工法    | ひび割れ注入                                  |
|             | 水抜き工法   | 水抜き孔、水抜きボーリング                           |
| 凍結防止        | 断熱工法    | 断熱性板材                                   |
|             | 加熱工法    | 電熱ヒーター、ヒートパイプ                           |
| 覆工コンクリートの保護 | ひび割れ注入  | NEXCO 設計要領第二集橋梁保全編「4章コンクリート構造物」によるものとする |
|             | 防錆処理    |   |
|             | 断面修復    |   |

表 6.2.13 主な変状対策工の変状目安<sup>2)</sup>

| 変状対策工              | 変状要因 |    |     |    |       |      |        | 施工条件 |                               |
|--------------------|------|----|-----|----|-------|------|--------|------|-------------------------------|
|                    | 塑性圧  | 偏圧 | 鉛直圧 | 水圧 | 支持力不足 | 材料劣化 | インパルト無 |      |                               |
| 裏込注入工              | ◎    | ◎  | ◎   | ○  |       | ○    | △      | ◎    | 片側車線規制で施工可能                   |
| ロックボルト補強工          | ○    | ○  | △   | △  |       |      |        |      | 片側車線規制で施工可能                   |
| 内巻工                | ○    | ○  | ○   | △  |       | △    | △      |      | トンネル内通行止めが必要                  |
| 繊維シート接着工           | ○    | ○  | ○   | △  |       | △    | △      |      | 片側車線規制で施工可能                   |
| 鋼板接着工              | ○    | ○  | ○   | △  |       | △    | △      |      | トンネル内通行止めが必要<br>※採用には細心の注意が必要 |
| 路盤下補強工             |      |    |     |    | ○     |      | ○      |      | 片側車線規制で施工可能                   |
| アンカー補強工            | ◎    | ○  | △   |    |       |      | △      |      | 片側車線規制で施工可能                   |
| インパルト補強工           |      |    |     |    |       | ○    | ◎      |      | トンネル内通行止めが必要 <sup>注1)</sup>   |
| 水抜工 <sup>注2)</sup> |      |    |     | ◎  |       |      |        |      | 片側車線規制で施工可能                   |

注1) 近年では片側車線規制でも施工可能な場合がある。

注2) 水抜工は本要領においては補修工に分類される。

◎：非常に有効

○：有効

△：場合により適用できる。

## (2) 提案における効果

トンネル覆工に発生したひび割れについては、従来より補修を実施してきているところであるが、ひび割れによっては補修が必要ないものも含まれていると想定される。今回、提案したひび割れに対する対策工については、トンネル覆工に発生しているひび割れ特性を TCI の  $F_{11}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{12}$ 、 $F_{21}$  により分析し、コンクリート収縮の可能性が高いひび割れについては、特段の対策工を実施する必要はないとする。また、TCI の各成分分布および走行レーザー計測による内空断面の変形モードにより、変状原因推定を行い対策工につなげていくこととする。コンクリート収縮により発生するひび割れは、はく落を引き起こすようなひび割れではなく、ひび割れの進展については施工から 5 年程度で収束するこ

とを確認できたことから、対策工の選択と集中が可能となる。また、変状原因について定量的に判断することで、エンジニアリングジャッジが必要なく統一的な変状原因の推定が可能となる。

### 6.3 中流動覆工コンクリートの施工方法の提案

#### 6.3.1 中流動覆工コンクリートの養生方法

(1) 中流動覆工コンクリートの養生および型枠脱型の提案

中流動覆工コンクリートの養生方法を規定するにあたり、養生および脱型時期の違いが覆工コンクリートの収縮ひずみ等物性値へおよび影響を把握するため、第4章では表6.3.1に示す実際の養生環境をモデル化した室内実験により覆工コンクリートの収縮ひずみ等物性値への影響を把握した。

収縮ひずみの発現については、養生の影響が見られるが、最終的な収縮ひずみ量については、養生の影響は見られず、養生を実施することで初期の収縮ひずみの発現を低減できることが判った。また、材齢28日の圧縮強度は、型枠脱型後に封緘養生の7日間実施または、型枠脱型を72時間後にすることで、型枠脱型直後28日間水中養生した圧縮強度の90%程度以上の強度を概ね確保でき、かつ表面の緻密性を示す透気係数も概ね良好な値を示す結果となった。

第5章では、第4章で得られた養生、坑内環境や施工方法による覆工コンクリートの物性値の測定データに基づいて、コンクリートの収縮ひずみ等の長期にわたる変動を数値解析により算定し、物性値等の経時変化に起因するひび割れ発生、進展解析により、養生方法や型枠脱型時間の違いによるひび割れへの影響について把握した。解析の結果、養生方法や型枠脱型時間の違いによるひび割れ発生、進展に大きな差異はなく、インバートで拘束された側壁部にひび割れが発生することがわかった。天端部には、ひび割れ幅が0.05mm以下のマイクロクラックが軸方向に局部的に生じている。

第4章での室内試験で、養生や脱型時間の違いによる初期の収縮ひずみの発現を低減でき、圧縮強度についても強度特性に差異があることが確認され、中流動覆工コンクリートのポテンシャルを概ね確保できる養生方法および脱型時間について把握できた。一方で、ひび割れ発生への影響については、養生方法や脱型時期の違いによるひび割れの発生形態に差異はなく、ひび割れが発生する結果となった。しかし、はく落事象につながるような閉合ひび割れの発生はなく、ひび割れ幅についても0.05mm以下のマイクロクラックが天端部の軸方向に局部的に生じる結果であり、特段補修の必要性はないと考える。

養生効果については、主に耐久性の観点から調査研究がおこなわれており、表層の品質向上等による中性化速度等の鉄筋因子の浸透抑制に着目した研究が多い。覆工の大部分は無筋構造物であるため、鉄筋腐食に関連する中性化速度や透気係数等で長期耐久性を評価することは、困難である。そこで、ト

表 6.3.1 養生環境の一覧

| 養生 | 養生種別         | 養生環境                           |
|----|--------------|--------------------------------|
| A  | 無養生          | 18時間脱型後 20℃湿度 60%養生 (坑内環境)     |
| B  | 脱型時期         | 48時間脱型後 20℃湿度 60%養生            |
| C  |              | 72時間脱型後 20℃湿度 60%養生            |
| D  | 湿度 80%       | 18時間脱型後→8時間後に湿度 80%養生→7日間で養生終了 |
| E  | 水中養生         | 18時間脱型後→直後水中養生 (28日間)          |
| F  | 水中養生 (8hr 後) | 18時間脱型後→8時間後に養生開始→7日間で養生終了     |
| G  |              | 18時間脱型後→8時間後に養生開始→28日間で養生終了    |
| H  | 封緘養生         | 18時間脱型後 封緘養生→7日間で養生終了          |
| I  | 膜養生          | 乾燥収縮低減剤 18時間脱型後塗布→塗布後→養生終了     |



ンネル覆工からのコンクリート片のはく落防止が第三者事故防止という観点から重要な課題であることに着目し、養生方法や型枠脱型によりはく落事象となるひび割れの抑制を目的に検討を実施した。

検討の結果、養生方法や型枠脱型時間の違いに関係なくひび割れは発生するが、はく落事象につながるような閉合ひび割れの発生はなかったこと、養生方法や型枠脱型時間の違いにより初期の収縮ひずみや強度特性に差異があることを確認した。

覆工背面の未充填や材料分離等の施工不具合によって、コンクリートの収縮ひずみに起因するひび割れの発生・進展が顕著になることが数値解析で明らかになった。そこで、施工不具合の発生を確実に防止する目的で、充填性や材料分離抵抗性等に着目した中流動覆工コンクリートの施工性を規定した。施工性を満足するという観点から結合材量が決定されるため、中流動覆工コンクリートでは養生を省略した場合でも、要求される圧縮強度を満足できる。また、無筋コンクリートのアーチ構造である覆工は、圧縮強度を満足すれば安定していると考えられる。

以上のことから、型枠脱型後 28 日の水中養生については、中流動覆工コンクリートのポテンシャルを引き出すものであるものの、実際の養生として現実的ではなく、要求される性能を勘案すれば過度な養生であると考えられる。また、覆工の養生については、設備が膨大となるものから簡易な方法まで多種多様であり、その効果についても様々であることから、ある一定の合理的な基準を設定する必要がある。そのため、コンクリート標準示方書にある養生日数に準拠し、他のコンクリートと同等の品質を確保し、はく落事象につながるような閉合ひび割れの発生を抑制する養生方法および脱型時期について、以下のとおり提案するものである。

- 1) 養生等に関する施工管理基準としては、型枠を取り外す時間を 3 日（72 時間）程度とするか、型枠取り外し後（8 時間程度の養生構築時間含む）から給水、水分逸散防止、封緘および膜養生等で覆工コンクリート表面を 7 日間湿潤状態に保つ養生を標準とする。
- 2) 無筋区間の覆工コンクリートにおけるインバート拘束による側壁部横断方向のひび割れが構造上問題となるものではないが、外力等に起因するひび割れとの明確な判断が難しいことから、工事中の経過観察と発生要因の把握が重要であることを記載した。有筋区間は、ひび割れ発生に伴い鉄筋等鋼材の腐食が懸念されることから、適切な措置を講ずる必要があることを記載した。

## (2) 提案における効果

従来まで養生方法や型枠脱型の違いがトンネル覆工に与える影響について明確になっておらず、養生等への要求性能が曖昧であった。今回、中流動覆工コンクリートを対象とした養生方法や型枠脱型時期の違いが初期のコンクリート収縮や強度特性に影響を及ぼすことが明確となり、中流動覆工コンクリートのポテンシャルに近づける養生方法や型枠脱型を規定することで、中流動覆工コンクリートの品質向上に寄与する。また、養生方法や型枠脱型の違いに関係なくひび割れが発生するが、はく落事象を引き起こすようなひび割れとはならない。インバート拘束によるひび割れについても構造上問題となるものではないことを記載した。これにより、ひび割れに対して補修する必要がなく従来まで実施していたすべてのひび割れへの補修を省略することが可能となる。

### 6.3.2 中流動覆工コンクリートの施工方法

(1) 中流動覆工コンクリートの施工方法の提案

第5章で記述したように、材料分離や巻厚不足はひび割れ発生、進展を促進し、かつコンクリート片のはく落の誘因となる斜めひび割れの原因となることが想定された。したがって、トンネル覆工の施工では、材料分離を防止し、確実に充填することが求められる。コンクリートの流動性を向上した中流動覆工コンクリートは、充填性については過去の論文等で向上することが明らかになっている一方で、締め固め等の施工方法による影響については未解明であった。そこで、中流動覆工コンクリートの締め固めに着目した施工方法の検討を行った。中流動覆工コンクリートの施工にあたっては、型枠バイブレータを標準としており、中流動覆工コンクリートが最も密実となる締め固め振動エネルギーを最適振動エネルギー(3.7J/L)として規定している(図6.3.1参照)。しかし、

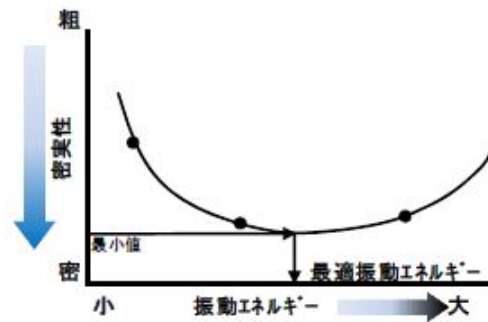


図 6.3.1 最適振動エネルギーのイメージ<sup>3)</sup>

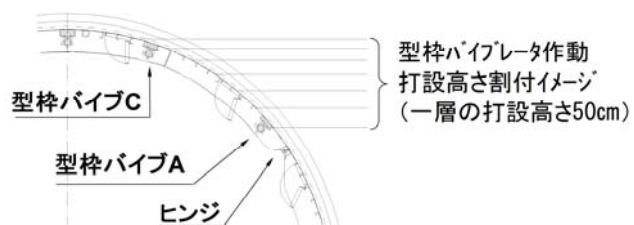


図 6.3.2 型枠バイブレータ配置図

図 6.3.2 に示すとおり型枠バイブレータの配置上、型枠バイブレータ直近では複数回振動させることにより過剰な締め固めとなることが想定される。そのため、第4章で大型試験体を用いた過剰な締め固めによる影響を把握した。振動エネルギーの設定については、中流動覆工コンクリートの締め固め時に想定される振動エネルギー程度では、コンクリートの収縮ひずみ差によるひび割れの発生には影響を与えない結果であったことから、今回確認した最適な振動エネルギーの30倍程度の振動エネルギーを上限として、中流動覆工コンクリートで採用している型枠バイブレータの配置を検討した。大型試験体を用いた実験結果では、最適な振動エネルギーより30倍程度の振動エネルギーを加えても、顕著な粗骨材の沈降が発生しなかった。今回の実験範囲では、粗骨材変動率は±20%程度であった。ただし、粗骨材の変動についてはコンクリートの流動による影響が含まれている可能性がある。

第5章では、中流動覆工コンクリートの施工方法によっては、材料分離によるひび割れへの影響が懸念されたため、施工方法によるひび割れへの影響をひび割れ発生、進展解析により確認した。ひび割れ発生、進展解析の結果において、粗骨材変動率を-50%と設定した解析結果では、材料分離領域に0.06mm程度のひび割れが複数発生しており、材料分離による収縮ひずみの増加により、引張応力の伝達がない完全に開口したひび割れが新たに形成される。粗骨材変動率が-50%に達しない場合には、完全に開口したひび割れの発生はない。粗骨材がまったくない状態を想定した粗骨材変動率-100%では、材料分離領域で多くのひび割れが発生しており、ひび割れ幅は最大で0.16mmを越えており、材料分離がひび割れを引起す要因となっていることが明らかになった。

第4章での大型試験体を用いた試験により、型枠バイブレータを用いた過剰な締め固めの影響により、材料分離の指標とした粗骨材変動率が最大で20%程度となり、第5章での材料分離によってひび割れ



が発生する解析結果となった粗骨材変動率-50%より、小さい変動となった。これは、今回確認した最適な振動エネルギーの30倍程度の振動エネルギーでは、ひび割れが発生しないことを示唆する。したがって、中流動覆工コンクリートの施工管理について、以下のとおり提案するものである。

1) 天端部からの吹き上げ打設方法についての説明を示し、注意事項として実験結果から得られた知見をもとに、最適振動エネルギーの30倍以上の振動エネルギーを与えても有害なひび割れを引起す材料分離は発生しなかったことから、型枠バイブレータ位置での振動エネルギーを最適エネルギーの30倍程度を上限として良いものとした。ただし、材料分離抵抗性は、コンクリートの粘性に依存するので、エネルギーの上限値については試験施工等で確認することが望ましい。

## (2) 提案における効果

本論文の研究成果から提案した施工方法を実トンネルで試験施工を実施し、材料分離を発生せずに中流動覆工コンクリートを型枠内に充填することが可能であることを確認した。特に、覆工コンクリートの型枠長は工程管理上から10m前後になっていることから、打設直後に生じるコンクリートの流動による材料分離発生が懸念されたが、試験施工では流動距離が10m程度でも問題が生じなかった。これらの研究結果を、「トンネル施工管理要領（平成27年7月）」の改定に反映した。現在、改定した施工管理要領は道路会社3社で適用されており、中流動覆工コンクリートの施工管理に活用されている。これにより、中流動覆工コンクリートの型枠バイブレータによる締固めの施工管理方法を規定することで、誰でも中流動覆工コンクリートの施工が可能となり、品質の均一化が図れる。

## 6.4 本章のまとめ

### 6.4.1 トンネル覆工の維持管理の提案

詳細点検において、点検Aおよび点検Bの二段階からなる現在のトンネル覆工点検手法は、トンネル覆工に発生しているひび割れ、エフロッセンスおよび湧水の情報から重点的に点検が必要な覆工スパンを抽出することとしている。しかしながら、トンネル覆工の近接目視を基本としている現在の点検手法では、重点点検としての抽出が合理的な点検手法となっていない。また、重点点検としての抽出に用いている外力評価点、はく落評価点の算定にあたっては、内因による安全性が確保されたひび割れも含んでいることから、評価点によって抽出する重点点検がオーバースペックとなっている可能性がある。そこで、本提案はコンクリート収縮により発生する可能性が高いひび割れ形態であるTCIの $F_{11}$ 、 $F_{22}$ のTCI(50)値を閾値として採用することで、コンクリート収縮以外で発生したひび割れを抽出する手法とした。また、TCIの $F_{12} \cdot F_{21}$ のひび割れについては、コンクリート収縮以外の要因で発生するため、トンネル覆工への発生の有無( $0.5 \times 10^{-5}$ )を確認することで特殊条件によるトンネル覆工スパンの抽出も判定に加えた。これにより、 $F_{11}$ 、 $F_{22}$ のTCI(50)値未満、 $F_{12} \cdot F_{21}$ が $0.5 \times 10^{-5}$ 未満のひび割れが発生していないトンネル覆工については、コンクリート収縮による要因であることからひび割れの進展はなく、はく落の可能性もないため、現地点検を省略できるとした。ただし、従来より評価点の観察項目にあったひび割れパターン、エフロッセンス、湧水については、特記事項における重点点検箇所と併せて、該当箇所を限定して点検することで、従来の内容も網羅できることとしている。これにより、覆工撮影画像から現地点検を実施するトンネルのスクリーニングが可能となり、覆工画像撮影

の有効活用が図られ現地点検の省力化に資することとなる。

トンネル覆工の対策工においては、構造安全性の指標として健全度ランクを覆工スパン単位で評価している。評価にあたり、対策工の検討実施の判断を行うのに外力評価点を採用している。外力評価点は、内因および外因によって発生するトンネル覆工に存在するすべてのひび割れを対象に算定しており、また、局部的なひび割れパターン、エフロッセンスおよび湧水による算定も加算することで、外因によるトンネル覆工への影響度としての健全度評価となっていない。そこで、対策工の検討実施の判断として縦断成分  $F_{11}$ 、横断成分  $F_{22}$  の TCI(50)値およびせん断成分  $F_{12}$ 、 $F_{21}$  の有無 ( $0.5 \times 10^{-5}$ ) を活用したトンネル覆工における対策工フローを提案した。 $F_{11}$ 、 $F_{22}$  の TCI(50)値未満のひび割れは、収縮ひずみに起因するひび割れであり、覆工施工から 5~6 年程度でひび割れが収束すること、また、収縮ひずみに起因するひび割れは、はく落を引き起こすひび割れ形態とはならないことから対策工の必要性はないとした。斜め方向のひび割れについては、内因のみでは発生しないことと、コンクリート収縮による縦横断方向のひび割れと相まって閉合ひび割れ等のはく落を引き起こす可能性があることから、 $F_{12}$ 、 $F_{21}$  が  $0.5 \times 10^{-5}$  以上で斜め方向ひび割れが存在するトンネル覆工については、対策工の検討を行うこととした。さらに斜め方向ひび割れは、粗骨材の偏り等の材料分離、覆工の不均一や背面空洞の可能性が懸念され、覆工の機能を十分に発揮できない状態となる可能性が高いため、詳細調査等により状況を把握したうえで対策工検討を実施することとした。コンクリート収縮により発生するひび割れへの対策工を省略できることで、対策工の選択と集中が可能となる。また、変状原因について定量的に判断することで、エンジニアリングジャッジが必要なく統一的な変状原因の推定が可能となる。

#### 6.4.2 中流動覆工コンクリートの施工方法の提案

養生および脱型時期の違いによる収縮ひずみの発現については、養生の影響が見られるが、最終的な収縮ひずみ量については、養生の影響は見られず、養生を実施することで初期の収縮ひずみの発現を低減できることが判った。また、材齢 28 日の圧縮強度は、脱型後の封緘養生の 7 日間実施および脱型時間の 72 時間存置で、28 日間水中養生した圧縮強度の 90%程度以上の強度を概ね確保でき、かつ表面の緻密性を示す透気係数も概ね良好な値を示す結果となった。一方で、ひび割れ発生への影響については、養生方法や脱型時期の違いによるひび割れの発生形態に差異はなく、ひび割れが発生する結果となった。このことから、養生方法や型枠脱型時間の違いに関係なくひび割れは発生するが、はく落事象につながるような閉合ひび割れの発生はなかったこと、養生方法や型枠脱型時間の違いにより初期の収縮ひずみや強度特性に差異があることを確認した。

中流動覆工コンクリートの配合については、充填性や材料分離抵抗性等の施工性によって決定されており、結合材量が通常のコンクリートと比べて多く、必要とされる強度を達成することは容易である。また、中流動覆工コンクリートに対する型枠脱型後 28 日の水中養生については、養生として現実的ではなく、必要強度を鑑みても過度な養生であり、そこに品質を近づけることは、オーバースペックな品質管理である。覆工の養生については、設備が膨大となるものから簡易な方法まで多種多様であり、その効果についても様々であることからある一定の合理的な基準を設定する必要がある。そのため、コンクリート標準示方書にある養生日数に準拠し、他のコンクリートと同等の品質を確保し、はく落事象につながるような閉合ひび割れの発生を抑制する養生方法および脱型時期について、以下のとおり提案するものである。

- 1) 養生等に関する施工管理基準としては、型枠を取り外す時間を3日（72時間）程度とするか、型枠取り外し後（8時間程度の養生構築時間含む）から給水、水分逸散防止、封緘および膜養生等で覆工コンクリート表面を7日間湿潤状態に保つ養生を標準とする。
- 2) 無筋区間の覆工コンクリートにおけるインパルト拘束による側壁部横断方向のひび割れが構造上問題となるものではないが、外力等に起因するひび割れとの明確な判断が難しいことから、工事中の経過観察と発生要因の把握が重要であることを記載した。有筋区間は、ひび割れ発生に伴い鉄筋等鋼材の腐食が懸念されることから、適切な措置を講ずる必要があることを記載した。中流動覆工コンクリートのポテンシャルに近づける養生方法や型枠脱型を規定することで、中流動覆工コンクリートの品質向上に寄与する。

中流動覆工コンクリートの締め固めに着目した施工方法の検討では、中流動覆工コンクリートの締め固め時に想定される振動エネルギー程度では、コンクリートの収縮ひずみ差によるひび割れの発生には影響を与えない結果であったことから、今回確認した最適な振動エネルギーの30倍程度の振動エネルギーを上限として、中流動覆工コンクリートで採用している型枠バイブレータの配置を検討することを提案した。中流動覆工コンクリートの型枠バイブレータによる締め固めの施工管理方法を規定することで、誰でも中流動覆工コンクリートの施工が可能となり、品質の均一化が図れる。

【参考文献】

- 1) 西日本高速道路(株)：保全点検要領 構造物偏、p. 141、2017. 4
- 2) 西日本高速道路(株)：設計要領 第三集 トンネル 保全編 (2) トンネル本体工、p. 3-1、2016. 8.
- 3) (株)高速道路総合技術研究所：NEXCO 中流動覆工コンクリート技術のまとめ、p. 1-3、2011. 12

## 中流動覆エコンクリートの施工管理方法の提案

NEXCO 設計要領第三集 (1) トンネル本体工建設編

NEXCO トンネル施工管理要領

ただし、こうした場合にいたずらに巻厚を大きくすることは掘削断面が大きくなり荷重が増大するなど不利となるので、曲げに強い鉄筋コンクリート構造や繊維補強コンクリート、あるいは仮巻きを施工して安定化した後本覆工を施工する、などの検討も必要である。

なお、坑口部の覆工については「5-3 坑口部の設計」を参照されたい。

#### 4-10-5 ひび割れ抑制対策

覆工コンクリートのひび割れは、構造物の耐久性を損なう恐れがあるので、適切なひび割れ抑制対策を施さなければならない。

覆工コンクリートのひび割れは、通常これを完全になくすことは困難であり、特に、吹付けコンクリート面に直接覆工コンクリートを施工した場合にひび割れの発生が避けられないのが現状である。ひび割れが発生する主な原因としては、コンクリートの硬化熱と乾燥収縮による歪が、吹付けコンクリートによって拘束されるためであると考えられている。ひび割れ抑制の対策としては、覆工と吹付けコンクリートの縁切りや、覆工コンクリートの品質改良などがあり、また、特定の個所にひび割れ誘発目地を設置して全体のひび割れを少なくする方法なども考えられる。

これらの中で現在最も効果的であると考えられている方法は、吹付けコンクリートと覆工コンクリートとの間をシート等により縁切りする方法であり、これまでのトンネルの施工によりその効果が確認されている。それによると、ひび割れを完全には防止することはできないが、かなりの程度軽減できることが明らかになっている。縁切り（Insulation）材としては合成樹脂等のシートのほかに、ゴムアスファルト・エマルジョン等の吹付けなどが試用された例があるが、基本的に防水工として防水シートを施工することとなっているため防水シートが縁切り材となる。

ただし、無筋区間の覆工コンクリートのひび割れのうち、インパートの設置により接続部が拘束されて、覆工コンクリートの側壁部のトンネル横断方向にひび割れが発生する場合（図4.10.3参照）があるが、これは構造上問題となるようなひび割れではない。しかし、外力等に起因するひび割れとインパートの設置に伴い拘束されて発生するひび割れを明確に判断することは困難であり、このようなひび割れが発生した場合には、工事期間中は経過観察するなどして、発生要因の把握に努めることが重要である。

なお、有筋区間については、覆工コンクリートのひび割れ発生に伴い鉄筋等鋼材の腐食が懸念されることから、有筋区間については、ひび割れに対して適切な措置を講じる必要がある。

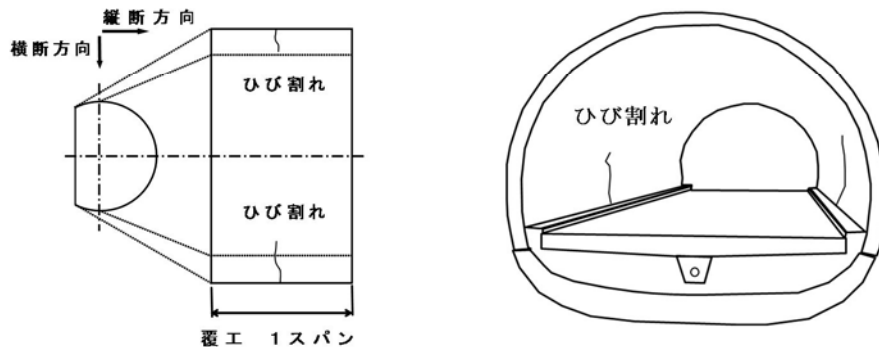


図4.10.3 インパート設置による拘束ひび割れ発生イメージ図

## 4-10-6 覆工コンクリートの設計・施工についての留意事項

- (1) 型枠は、打ち込んだコンクリートが必要な強度に達するまで取り外してはならない。
- (2) 型枠を取り外した後は、硬化に必要な温度及び湿度を保ち、有害な外的要因の影響を受けないよう、適切な期間にわたり養生を行うこととする。

## (1) 型枠の取り外し時期について

型枠の取り外しの時期は、打ち込んだコンクリートが自重などに耐えられる強度に達した後でなければならない。自重などに耐えられる強度の目安としては、2車線の円形アーチのトンネルでは、コンクリートの圧縮強度が2~3N/mm<sup>2</sup>程度<sup>※1</sup>である。この強度を得るまでの材齢は養生環境の影響を受けることから、トンネル貫通後や冬期の練り混ぜ温度が低い場合などでは、型枠の取り外しの時期や養生方法について検討する必要がある。

※1 土木学会：コンクリートライブラリー102，トンネルコンクリート施工指針（案），p41,2000

## (2) 型枠を取り外した後の養生について

従来、覆工コンクリートの施工環境は、坑内温度が安定し湿度が高い状態に保たれていたことから、一般的には付加的な養生は行われていなかった。しかし、近年、坑内作業環境の改善のための換気設備の充実により、坑内風速が向上することにより坑内湿度が低下し、覆工表面の乾燥収縮ひび割れの発生が懸念されている。そのため、型枠を取り外した後の養生は、品質向上の取り組みとして、各種養生方法が現場にて適用されているが、中流動覆工コンクリートに対しての効果検証が十分に行われていなかった。そこで、養生効果の検証として、各種養生の効果を評価するため、室内試験により、養生条件が圧縮強度、透気係数、水分拡散係数及び超音波伝搬速度などのコンクリート品質に与える影響を確認し、中流動覆工コンクリートの品質向上を目的として、型枠を取り外した後の養生について以下を標準とすることとした。

中流動覆工コンクリートの養生方法は、給水、水分逸散防止、封緘及び膜養生等で覆工コンクリート表面を湿润状態に保持する方法を標準とし、養生開始にあたっては、型枠を取り外した後速やかに行うものとする。

また、型枠の取り外し時期を、「(1) 型枠の取り外し時期」で設定した時期より延長することで、標準の養生方法と同等な効果が得られる場合がある。

ただし、坑口部などの鉄筋区間では、通常のコンクリート構造物と同様に中性化速度や塩化物イオンの侵入が耐久性に大きな影響を与えることから、適切な養生を実施して耐久性を確保する必要がある。



5-6 覆工コンクリートの打継目の処理

覆工コンクリートの打継目の処理は、ひび割れ抑止のために切欠き構造を設けるものとする。

なお、切欠き構造はその形状によりコンクリート端部の欠けや充填性に影響する。図-10「覆工コンクリート打継目の切欠き構造例」に切欠き構造の例を示す。

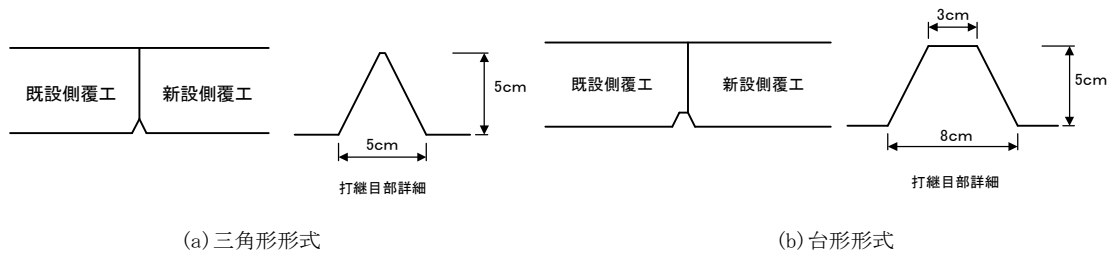


図-10 覆工コンクリート打継目の切欠き構造例

5-7 覆工コンクリート型枠脱型時期

覆工コンクリートの型枠については、打設したコンクリートの強度が自重に対し十分な強度に達するまで取り外してはならない。型枠脱型時期の決定に対しては、実際の養生条件と合わせた供試体作成によりコンクリートの初期強度の発現特性を把握し、骨組解析により脱型可能時期について解析したものと合わせて検討し、十分な安全を確認の上、脱型時期を設定するものとする<sup>注1)</sup>。

注1) 表-13の「若材齢における圧縮強度確認試験」時に、試験体成型から圧縮試験までのコンクリート温度を計測し「圧縮強度-積算温度」の関係から覆工コンクリートの温度を測定する方法、同様に「圧縮強度-弾性波速度」の関係から覆工コンクリートの弾性波速度を測定する方法、低強度用のテストハンマを用いて反発係数を測定する方法などにより、脱型時期の管理を検討した事例がある。

5-8 覆工コンクリートの養生

覆工コンクリートの養生は、給水、水分逸散防止、封緘及び膜養生等で覆工コンクリート表面を7日間湿潤状態に保持する方法を標準とする。なお、養生開始にあたっては、型枠を取り外した後速やかに行うものとし、型枠の取り外し後から8時間以内実施する。

型枠脱型時期を3日程度延長する方法も標準と定めた養生方法と同等の効果が確認されている。

坑口部などの鉄筋区間では、通常のコンクリート構造物と同様に中性化速度や塩化物イオンの侵入が耐久性に大きな影響を与えることから、適切な養生を実施して耐久性を確保する必要がある。鉄筋区間における適切な養生は、「コンクリート標準示方書 施工編 第8章 養生」に準拠して設定してよい。

膜養生については、膜養生剤の種類や使用量、施工環境、施工方法等の相違により、乾燥の抑制効果が異なる。このため、使用量や施工方法等を信頼できる資料あるいは試験によって事前に確認しておく必要がある。なお、膜養生の実施にあたっては、型枠の取り外し後速やかに行うものとし、現場においては事前に確認した使用量や施工方法等により管理するものとする。

膜養生剤の確認方法については、次に示す圧縮強度および表面透気係数の試験を実施し、いずれかの基準を満足する材料（膜養生剤の種類、使用量、施工方法）であることを確認する。

(1) 圧縮強度

1) 基準

養生方法②の圧縮強度が、養生方法①の圧縮強度の90%以上を確保

2) 試験方法

- ・ 供試体：JIS A 1132：2014 準拠 管理用供試体φ100×200mm 各養生方法毎に3本
- ・ 養生方法：①18時間（ラッピング、温度20℃、湿度60%）脱型後に水中養生（28日間）を実施したケース  
②18時間（ラッピング、温度20℃、湿度60%）脱型後に膜養生剤により規定の方法、使用量により全面を塗布後28日間（温度：20℃、湿度60%）放置したケース
- ・ 試験方法：JIS A 1108：2006
- ・ 測定時期：①18時間脱型後に水中養生を28日間行った後に実施  
②18時間脱型後に膜養生剤を塗布してから28日間後に実施

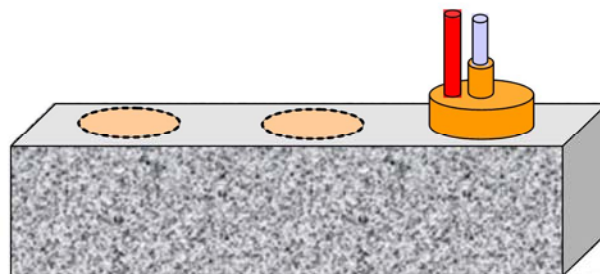
(2) 表面透気係数

1) 基準

表面透気係数が $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 以下（表面透気係数：Torrent法による）

2) 試験方法

- ・ 供試体：JIS A 1132：2014 準拠 100×100×400mm 供試体1本
- ・ 養生方法：18時間（ラッピング、温度20℃、湿度60%）脱型後に膜養生剤により規定の方法、使用量により全面を塗布後28日間（温度：20℃、湿度60%）放置したケース
- ・ 試験方法：Torrent法による  
土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集 参照  
測定箇所は、膜養生を実施した側面の3箇所について、膜養生剤を除去した後に測定を実施（下図参照）
- ・ 測定時期：18時間脱型後に膜養生剤を塗布してから28日後に実施



参考図 透気試験測定方法例

なお、中流動覆工コンクリートを対象とした型枠の取り外し時期や養生に関する実験についての結果を以下に示す。

参 考

中流動覆工コンクリートのさらなる品質向上を目的として、型枠の取り外し時期や養生が中流動覆工コンクリートの品質におよぼす影響を把握するため、型枠を取り外した直後に水中養生を 28 日間実施した条件を、中流動覆工コンクリートが持つポテンシャルとして、型枠取り外し時期および養生方法の違いが、中流動覆工コンクリートの品質におよぼす影響について比較、検証のための実験を行った。以下に実験結果を示す。

1. 養生条件

表-4.10.6.1 室内試験の養生条件

| 記号 | 種別              | 養生内容                              |
|----|-----------------|-----------------------------------|
| A  | 無養生             | 18 時間脱型後 20℃湿度 60%養生 (坑内環境)       |
| B  | 脱型時期            | 48 時間脱型後 20℃湿度 60%養生              |
| C  |                 | 72 時間脱型後 20℃湿度 60%養生              |
| D  | 湿度 80%          | 18 時間脱型後→8hr 後に湿度 80%養生→7 日間で養生終了 |
| E  | 水中養生            | 18 時間脱型後→直後水中養生                   |
| F  | 水中養生<br>(8hr 後) | 18 時間脱型後→8hr 後に養生開始→7 日間で養生終了     |
| G  |                 | 18 時間脱型後→8hr 後に養生開始→28 日間で養生終了    |
| H  | 封緘養生            | 18 時間脱型後 封緘養生→7 日間で養生終了           |
| I  | 膜養生             | 乾燥収縮低減剤 18 時間脱型後塗布→塗布後→養生終了       |

※養生終了後は、気温 20℃、湿度 60%の環境としている。

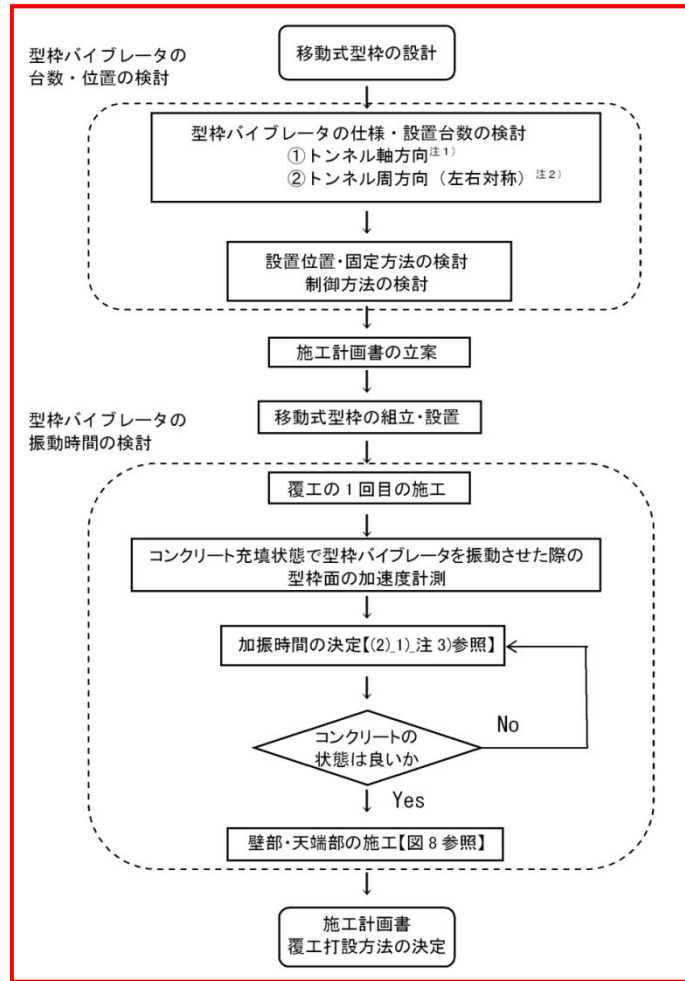
※封緘養生とは、シート・フィルムを覆工コンクリート表面に被覆し、水分逸散抑制を行うもの

2. 実験結果

- ①すべての養生ケース（無養生含む）で材齢 28 日の設計基準強度（24N/mm<sup>2</sup>）を満足し、養生期間が長くなるのに伴って強度は増進しており、養生期間 3 日（記号 C）、膜養生（記号 I）及び養生期間 7 日（記号 F、記号 H）は、記号 E とほぼ同程度の強度となることを確認した。
- ②養生設備を構築する時間として、脱型後 8 時間については気温 20℃、湿度 60%の乾燥状態として養生設備構築時間の影響を確認した結果、養生設備構築後に養生を実施すれば強度増進に影響がないことを確認した。
- ③コンクリートの緻密性を評価する指標として表面の透気係数を測定した結果、18 時間で脱型した場合には養生期間（脱型からの期間）を 7 日とすることで、透気係数が Torrent 法によるグレーディングで示されている  $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以下の「標準」<sup>1)</sup> に分類され、コンクリートの緻密性を確保できることを確認した。
- ④脱型時間を 3 日（記号 C）まで延長することで、透気係数が  $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以下の「標準」<sup>1)</sup> に分類され、コンクリートの緻密性を確保できることを確認した。
- ⑤膜養生（記号 I）の乾燥収縮低減剤を塗布することで、透気係数が  $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以下の「標準」<sup>1)</sup> に分類され、コンクリートの緻密性を確保できることを確認した。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会（335 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集



注1) トンネル軸方向は型枠を構成するパネルと補強材を考慮して1.5～3.0m程度の間隔で設置することが望ましい

注2) トンネル周方向はトンネル形状、検査窓、支保材の位置を考慮して1.5～2.5m程度の間隔で設置することが望ましい

図-8 施工計画の検討フロー

- 2) 中流動覆工コンクリートでは、フレッシュの品質変化がワーカビリティに与える影響が通常のコンクリートより大きくなる場合があるため、**圧送開始から30分以内**に打設を完了することを基本とする。また、適切な配管、コンクリートの吐出量、ポンプ圧力等の設定に関して、施工計画、特に機材の配置計画等について十分な検討を行い、実打設において確認するものとする。
- 3) 側壁～肩部では、コンクリートの圧送は型枠構造の安定を考慮してバランスを保つために横断方向で左右交互に打込むことが一般的であるが、中流動覆工コンクリートを用いた施工方法では、さらに、天端の吹上げ打設を除き左右各々の側壁～肩部毎に縦断方向の型枠中央で吐出口を設けて打込むことにより、コンクリートの流れる距離を短くし振動締め時間を短くすることを基本とする。
- 4) 中流動覆工コンクリートの特性を最大限引き出すためには、自己充填性能を補助する程度、すなわち、振動を与えることなく流し込んだコンクリートの動きが止まった後、コンクリートの打込み対象上面全体が水平になる程度の振動を与えることを基本とする。



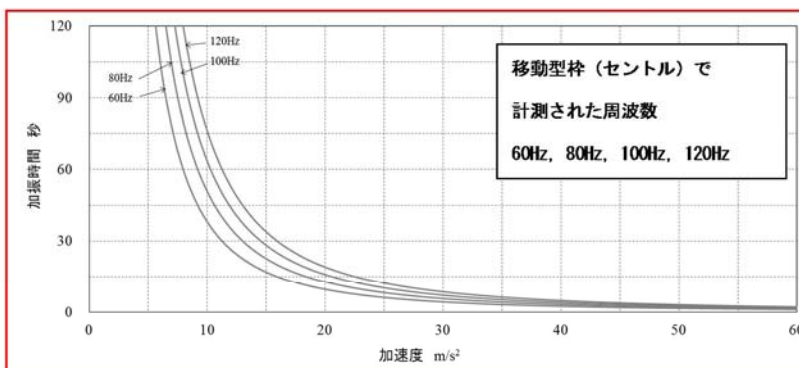


注 4) 型枠パイプレータを型枠補強材の中間部に設置すると、振動加速度が補強材位置で低下する。式(2)で加振時間を計算する場合、下表の例 b のように 3m 間隔で設置して中間点の加速度が小さいと平均から求める加振時間が大きくなり、型枠パイプレータ近傍で投入される振動エネルギーが過大となる。また、周方向の各列で計測される加速度は型枠の構造により異なるので、加振時間は列毎に定めることが望ましい。

表-15 測定加速度により設定される振動時間で投入される振動エネルギーの違い

| 例                   | 計測加速度 $m/s^2$ |    | 式(2)の振動時間 秒 |       | 振動時間 秒 | 投入される振動エネルギー J/L |            |
|---------------------|---------------|----|-------------|-------|--------|------------------|------------|
|                     | 近傍            | 中間 | 近傍          | 中間    |        | 近傍               | 中間         |
| a 注3) パネル中央15m間隔で設置 | 40            | 16 | 4.0         | 25.0  | 15     | 13.8 (3.7)       | 2.2 (0.59) |
| b パネル中央3m間隔で設置      | 40            | 5  | 4.0         | 256.3 | 130    | 120.1 (32.5)     | 1.9 (0.51) |

( ) は最適振動エネルギーに対する倍率



参考図 2 振動数、最大加速度と加振時間の関係

参考図は、移動型枠（セントル）で計測された振動の加速度と周波数から式(2)で求められる加振時間の関係を示している。  
一般的に用いられる型枠パイプレータはインバータで周波数を変えられるため、参考図を基に加振時間の設定の目安とする。

- 2) 周方向の左右両側の型枠振動機を用いて同時に締め固めを行うと、振動が大きくなりすぎ型枠の接合に用いているボルト・ナットの緩みを生じる可能性がある。そのため、締め固めは左右交互に行うことを原則とする。
- 3) 中流動覆工コンクリートは型枠パイプレータの振動を受けた直後に側圧が上昇し、ほぼ液圧となる計測例が報告されている。したがって、型枠の設計荷重と側圧の時間経過に伴う低下に基づいた打込み速度を設定し、側圧が許容値を超えないように圧送速度を調整するとともに、移動式型枠の支保材やジャッキの変形等に留意する。型枠パイプレータのみで施工を行う場合、打込み速度は高さ方向で 1.2~2.0 m/h 程度とし、最初の施工スパンをモデル施工と位置付け、材料分離や液状化を起こさない程度に振動時間、振動間隔、振動順序、打込み速度等を設定しなければならない。
- 4) 天端部は、吹上げ口からの片押し施工となり、10m 程度の長距離を流動させる必要がある。そのため、中流動覆工コンクリートの自己充填性能による流動を補助する目的で吹上げ口から反対側の天端先端部の型枠パイプレータ 2、3 台を 10 秒程度振動させることが有効である。妻部までコンクリートが到達した段階で、天端部の型枠パイプレータを 1) の要領で決定した時間で振動させる。この振動で締め固められることにより上端に空隙ができるので、コンクリートを追加圧入し、再度型枠パイプレータを振動させる<sup>注1)</sup>。妻部上端からのモルタルの流出などにより充填を確認して打込みを終了する。

注 1) 大型試験体を用いた実験結果では、最適振動エネルギーの 30 倍以上の振動エネルギーを与えても有害なひび割れを引起す材料分離は発生しなかった。したがって、型枠パイプレータ位置での振動エネルギーを最適エネルギーの 30 程度を上限として良いものと思われる。ただし、材料分離抵抗性はコンクリートの粘性に依存するので、エネルギーの上限値については試験施工等で確認することが望ましい。

## 第7章 まとめ

### 7.1 トンネル覆工の維持管理

#### 7.1.1 トンネル覆工の維持管理

平成 24 年 12 月 2 日に発生した中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故を契機として、国土交通省は本年を「社会資本メンテナンス元年」と位置付け、社会資本の維持管理、更新への取組みを積極的に進めていく姿勢を示した。これを受けて、道路トンネルにおいては、平成 25 年 6 月に道路法が改訂され、これにともなう道路法施行令および道路法施行規則により、近接目視により、5 年に 1 回の頻度を基本とした定期点検を実施することとなった。NEXCO は、平成 28 年 3 月現在、1,808 本、総延長 1,705 km のトンネルを管理しており、詳細点検として 5 年に 1 回の頻度で近接目視かつ打音により定期点検を実施することとしている。本論文は、詳細点検が近接目視となったことで多大な労力と時間を要している実態を鑑み、トンネル覆工の維持管理について提案したものである。

以下に各章より得られた結論を総括する。

第 1 章では、NEXCO の高速道路トンネルの維持管理において、トンネル覆工全面の近接目視を実施している詳細点検の背景やトンネル覆工に対する詳細点検手法の解説および点検における課題について整理した。

トンネル覆工の詳細点検を含めた課題に対して、本研究の目的および課題解決に向けた本研究の方法論について述べたうえで、本論文の構成について記載した。

第 2 章では、覆工コンクリートに発生するひび割れのうち、施工に起因して発生するひび割れ状況を把握するため、建設工法（矢板工法、NATM）の覆工コンクリート施工について整理し、ひび割れ発生の影響が懸念される施工上の不具合を抽出した。

さらに材料や施工に起因した損傷原因について抽出するため、文献調査を実施した。この結果、以下の結論を得ることができた。

(1) 矢板工法の施工不良に起因する変状としては、コールドジョイントや打継ぎ処理に起因する変状があり、一般的に打ち重ね部のスパン方向や構造変化点／目地部に分布するジャンカや欠けになりやすい。また、型枠の不具合、早期脱枠、巻厚不足やおよび面空洞に起因する変状は、部分的な沈下ひび割れや天端の縦断方向のクラックになりやすい。

(2) NATM の変状としては、材料に起因している事例が多く、換気量の増加による坑内湿度の低下や骨材の悪化によるセメント等の粉体量の増大に伴い、コンクリートの絶対的な収縮量が大きくなっていることが要因として考えられる。高炉セメントの使用例が増えていることも一因となっている可能性が考えられる。また材料に起因する変状事例のうち、乾燥収縮、温度収縮のどちらについてもインバート拘束によるものが多く、一般的に、インバート境界部から肩下部にかけて、断面横断方向にクラックが入る場合が多い。

第 3 章では、既往の点検記録や調査結果を分析し、建設工法によるひび割れの特徴や施工上の不具合とひび割れの関係について検討を行った。また、外因によってひび割れが発生しているトンネルを



走行型レーザー計測により内空断面を測定し、ひび割れ状況との関係を把握した。この結果、以下の結論を得ることができた。

(1) 点検記録から得られた TCI 値には、極端に大きな値を示すものがある一方、ほとんどひび割れが発生していない場合には、TCI 値が零となることから、一般的なトンネルのひび割れ発生状況の代表値として、本論文ではトンネルのひび割れ状況を示す指標として TCI 値の累積曲線で 50%となる値を TCI(50)値と定義し、採用した。

(2) 矢板工法、NATM とともに TCI(50)値の  $F_{11}$  が  $F_{22}$  より大きいため、ひび割れはトンネル縦断方向が卓越している。

(3) TCI(50)値の  $F_{11}$  と  $F_{22}$  との相関に着目すると、上半先進では、縦断方向に対する横断方向のひび割れ発生率は約 6 割で、側壁導坑と NATM では約 3 割となっている。斜め方向のひび割れを示す  $F_{12}$ 、 $F_{21}$  の値は  $F_{11}$  の 1/10 以下が多く、覆工のひび割れは縦断・横断方向が卓越していると判断できる。

(4) 既設覆工から採取したコア調査結果より、NATM で施工されたトンネルでは、覆工厚不足と材料分離の発生頻度は非常に小さいことが判明した。一方、矢板工法で施工されたトンネルについては、覆工厚不足の発生が顕著であり、材料分離に起因すると推定できる粗骨材の含有量が非常に少ない層は局部的に生じていることが判明した。

(5) 矢板工法における覆工巻厚、覆工背面空洞の状況を調査したトンネルにおいて、背面空洞の有無によってひび割れ量に大きな傾向はみられないが、背面空洞がみられる箇所では斜めひび割れの発生が多くなる傾向があると考えられる。

(6) 外力性変状の可能性があるトンネルについて、走行型レーザー計測により断面形状計測を実施し、断面変形とひび割れ状況に相関があることが確認できた。

第 4 章では、覆工コンクリートのひび割れの原因として考えられている養生、坑内環境や施工方法が覆工コンクリートの物性値へおよぼす影響を把握するため、実際のトンネルで坑内環境を測定し、併せてコンクリートの収縮ひずみ等物性値の短期的な挙動を把握した。この結果、以下の結論を得ることができた。

(1) 坑内環境測定において、延長 200m 程度の貫通後のトンネルの坑内環境は、通風によってある程度一様になると考えられ、坑口からの距離による差異は小さいことが判った。一方、貫通前のトンネルの坑内環境は、換気を行っていても通風が小さいために、坑口に近いほどトンネル坑外の環境の影響が大きく、逆に坑口から遠い位置ではトンネル坑外の影響が小さく、坑口からの距離によって差異があることが判った。

(2) 坑内環境の違いによる覆工コンクリートの物性値把握のために作製した標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度は、いずれも呼び強度を有する結果であった。しかしながら、材齢 18 時間で脱型し、その後トンネル坑内に存置して現場養生を行った供試体は、いずれも呼び強度を下回る結果となった。

第 5 章では、第 4 章で得られた養生、坑内環境や施工方法による覆工コンクリートの物性値の測定データに基づいて、コンクリートの収縮ひずみ等の長期にわたる変動を数値解析により算定した。さらに、算定した収縮ひずみ等からトンネル覆工に生じるひび割れ状況を建設工法ごとに解析的に求め、

ひび割れの特徴について整理した。また、変状原因が内因（要因が材料，施工，設計によるもの）によって発生するトンネル覆工のひび割れについては、収縮以外の要因として、材料分離や覆工厚の違いによる覆工の不均一の影響も想定されたことから、これらがひび割れに与える影響についても整理した。この結果、以下の結論を得ることができた。

(1) 矢板工法（上半先進），矢板工法（側壁導坑）および NATM の覆工コンクリートの施工手順を再現したひび割れ発生，進展解析では、建設工法に関係なく、トンネル縦断方向のひび割れとそれに直交するトンネル横断方向のひび割れが発生している。この場合には、コンクリート片を引起すような斜めひび割れや閉合ひび割れの発生は見られない。

(2) 上半先進工法の場合には、標準的な覆工については、天端部と設計巻き厚が変化するアーチ肩部にトンネル縦断方向のひび割れが発生する。さらに、トンネル横断方向にもひび割れが発生する。側壁導坑先進工法の場合には、標準的な覆工については、天端部にトンネル縦断方向のひび割れが複数発生する。NATM で施工した場合には、標準的な覆工に発生するひび割れの大部分は 0.1mm 程度であり、0.2mm 以上のひび割れは天端部に生じるトンネル縦断方向のみである。

(3) ひび割れ発生，進展解析結果の建設工法ごとの TCI 値は、点検記録の TCI(50)値と近い値を示しており、 $F_{22}/F_{11}$  の比率についても近い値を示している。このことから、トンネルに発生しているひび割れは、コンクリートの収縮ひずみの影響を強く受けていると判断できる。また、 $F_{22}/F_{11}$  の比率についても、TCI(50)値と解析結果との差が  $0.1 \times 10^{-5}$  以下であり、解析結果で各工法の代表的なひび割れ発生パターンを再現しているものと考えられる。

(4) 材料分離によるひび割れへの影響を把握するため、全く粗骨材が含まれていない材料分離範囲を設けた覆工モデルのひび割れ発生，進展解析結果は、材料分離が発生した周辺に斜めひび割れが生じており、材料分離の有無がひび割れの発生に影響を与えている。

(5) 覆工厚不足によるひび割れへの影響を把握するため、アーチ肩部分に覆工厚の不足が連続的に発生した状態を想定したモデルでのひび割れ発生，進展解析結果では、アーチ肩部分に覆工厚の不足が非対称に生じると、覆工厚の不足が連続している部分にトンネル縦断方向にひび割れが発生し、その後、複数のひび割れが発生する。最終的には、覆工厚の不足領域にトンネル縦断方向のひび割れが複数発生し、そのひび割れからトンネル横断方向に放射状のひび割れが生じた。

第 6 章では、第 2 章～第 5 章までの検討結果から、トンネル覆工に対する維持管理に関する新たな点検手法、補修方針について、以下のとおり提案する。

(1) 新たなトンネル覆工の詳細点検手法の提案として、覆工スパン単位で算定する TCI 値の  $F_{11}$ 、 $F_{22}$  に対しての TCI(50)値、TCI 値の  $F_{12} \cdot F_{21}$  の有無 ( $0.5 \times 10^{-5}$ ) を閾値として設定する。TCI(50)値以上、または  $F_{12} \cdot F_{21}$  が  $0.5 \times 10^{-5}$  以上存在する覆工スパンに対して近接目視かつ打音点検を実施し、閾値等条件に該当しない覆工スパンについては、現地点検を省略する点検手法を提案する。

(2) トンネル覆工の健全度評価においては、健全度ランク「Ⅲ－1」が対策検討、「Ⅱ」が継続監視として定義していることから、評価の標準に TCI(50)値、TCI 値の  $F_{12} \cdot F_{21}$  の有無 ( $0.5 \times 10^{-5}$ ) を閾値として提案する。

(3) トンネル覆工の対策として、TCI(50)値未滿かつ、TCI 値の  $F_{12} \cdot F_{21}$  が  $0.5 \times 10^{-5}$  未滿で斜め方向ひび割れが存在しない覆工スパンにおいては、ひび割れに対する対策は実施しない。

### 7.1.2 トンネル覆工の維持管理の今後の展望

道路トンネルにおいては、道路法改訂、道路法施行令および道路法施行規則により、5年に1回の頻度を基本とした近接目視が義務付けられているため、本研究で提案する近接目視を省略する点検手法の実現には至っていない。点検の効率化のためには、近接目視による評価と同等の評価が行える非破壊検査技術の確立が課題である。そのうえで、非破壊検査技術だけでは、はく落事象等の潜在リスクの排除が困難であることから、ひび割れ等の変状原因の推定手法が必要である。本研究において、ひび割れ等の変状原因の推定手法として、収縮ひずみによる一般的なひび割れ分布をTCI(50)値として整理したが、最終的には収縮ひずみも包括した内因によるひび割れ検出として閾値を検討していく必要がある。また、外力作用による外因によるひび割れ検出についても検討していく必要があり、そのためには本研究で採用した走行計測技術の信頼性が不可欠である。

今後、非破壊検査技術において近接目視と同等の評価検証やトンネル断面変形の精度向上および評価検証を実施し、非破壊検査技術が融合した新たな点検手法を確立していく必要がある。

## 7.2 中流動覆工コンクリートの施工方法

### 7.2.1 中流動覆工コンクリートの施工方法

NEXCOは、中流動覆工コンクリートと型枠バイブレータを採用することで、材料分離や未充填部の発生を防止してきた。しかしながら、型枠バイブレータの配置は、セントルのヒンジ部や補強材をかわした設置間隔となることから、型枠バイブレータ直近では、過剰な締固め状態となり、局所的な材料分離の発生が懸念され、ひび割れ発生を引起す恐れがある。

トンネル坑内については、トンネル施工環境の改善を目的とした換気設備の充実により、坑内が乾燥状態となることで、脱型直後のコンクリート表面からの水分蒸発により、乾燥収縮の促進や水和反応の阻害等、コンクリートのひび割れを引起す恐れがある。これらのことから、覆工コンクリートの品質向上を目的に現場では、給水や水分逸散抑制により覆工表面を湿潤状態に保つ養生方法等の提案がされている。

覆工の大部分を占める無筋コンクリート構造物に対しては、鉄筋腐食に関連する中性化速度や透水係数等で長期耐久性を評価することは必要ない。したがって、覆工の維持管理では、ひび割れ発生、進展によるコンクリート片のはく落防止が第三者事故防止という観点から重要な課題であるが、養生、施工条件および坑内環境までを考慮したひび割れ発生、進展を検討した事例が少ない。さらに、養生環境の効果として実環境下での収縮ひずみの発現速度が不明であり、かつコンクリートの収縮ひずみと覆工のひび割れ発生、進展との相関が不明である。本研究は、中流動覆工コンクリートの施工方法や養生方法がひび割れ発生へ与える影響を検討し、中流動覆工コンクリートの品質向上を目的とした施工方法について提案したものである。ただし、鉄筋コンクリートで構築された覆工については、通常の鉄筋コンクリート部材と同様に鉄筋腐食に関する検討を実施するものとした。

以下に各章より得られた結論を総括する。

第1章では、NEXCOの高速道路トンネルの建設事業において、覆工コンクリートの施工の現状および覆工コンクリートの施工にあたっての養生や中流動覆工コンクリートの施工に関する課題について

整理した。

覆工コンクリート施工の課題に対して、本研究の目的および、課題解決に向けた本研究の方法論について述べたうえで、本論文の構成について記載した。

第4章では、覆工コンクリートのひび割れの原因として考えられている養生、坑内環境や施工方法が覆工コンクリートの物性値へおよぼす影響を把握するため、実際の養生環境をモデル化した室内実験により覆工コンクリートの収縮ひずみ等物性値への影響を把握した。さらに大型試験体を使った打設実験により、中流動覆工コンクリートの過剰な締固めによる粗骨材の含有率の分布状況について把握した。この結果、以下の結論を得ることができた。

(1) 実際の養生環境をモデル化した室内実験での収縮ひずみの発現については、養生の影響が見られるが、最終的な収縮ひずみ量については、養生の影響は見られない。養生を実施することで初期の収縮ひずみの発現を低減できることが判った。

(2) 実際の養生環境をモデル化した室内実験での材齢28日の圧縮強度は、一般的には養生期間が長くなると増加する傾向にあるが、水中養生を7日間実施すれば28日間水中養生を行ったものと同等となった。

脱型後の膜養生、封緘養生の7日間実施および脱型時間の72時間存置で、28日間水中養生した圧縮強度の90%程度以上の強度を概ね確保でき、かつ表面の緻密性を示す透気係数も概ね良好な値を示す結果となった。

実トンネルで想定される養生設備を構築する時間（脱型後8時間）にコンクリートを乾燥状態（室温20℃、湿度60%）に放置しても、その後、水分逸散防止あるいは水分供給等の養生を実施すれば品質に大きな影響を与えないことが判った。

(3) 実際の養生環境をモデル化した室内実験での拡散係数については、水分を供給する養生を7日以上実施することで、コンクリート内部より表面の拡散係数を低減することができ、塩化物イオン等の腐食因子の浸透を抑制できることが確認された。

(4) 過剰な締固めに伴う材料分離による影響を定量的に把握するための実験では、粗骨材変動率が適正な配合の粗骨材に対して+20%、+40%となる供試体の収縮ひずみは、適正な配合の収縮ひずみとほぼ同一の結果であった。一方、粗骨材変動率が適正な配合の粗骨材に対して-20%から-100%になるに従って、最終収縮ひずみは増加しており、最終収縮ひずみの増加率は粗骨材変動率と負の相関がある。粗骨材がまったく配合されない粗骨材変動率-100%では、適正な配合の約2倍の収縮ひずみが発生する。圧縮強度については、粗骨材の変動率に関係なく、各配合で一定であった。

(5) 中流動覆工コンクリートの過剰締固めによる影響を把握するため、大型試験体を用いた実験結果では、最適な振動エネルギー（3.7J/L）より30倍程度の振動エネルギーを加えても、顕著な粗骨材の沈降が発生しなかった。今回の実験範囲では、粗骨材変動率は±20%程度であった。ただし、粗骨材の変動についてはコンクリートの流動による影響が含まれている可能性がある。

第5章では、第4章で得られた養生、坑内環境や施工方法による覆工コンクリートの物性値の測定データに基づいて、養生方法や型枠脱型時間の違いによるひび割れへの影響について把握した。また、中流動覆工コンクリートの施工方法によっては、材料分離によるひび割れへの影響が懸念されたため、

施工方法によるひび割れへの影響を確認した。この結果、以下の結論を得ることができた。

(1) 覆工コンクリートの養生や型枠脱型時期の違いによるひび割れ進展、解析では、無養生（20℃・湿度 60%）、封緘養生および脱型時間 72 時間の覆工モデルにおけるひび割れの発生、進展に差異はなく、インバートで拘束された側壁部にひび割れが発生している。天端部には、ひび割れ幅が 0.05mm 以下のマイクロクラックが軸方向に局部的に生じている。脱型時の影響については、脱型した直後に天端沈下が 0.5mm 前後発生するが、その後のコンクリートの収縮ひずみの影響で天端沈下は 5～6mm 程度となっており、自重による影響は軽微であると判断される。

(2) 中流動覆工コンクリート施工の材料分離範囲を想定したひび割れ発生、進展解析において、粗骨材変動率を-50%と設定した解析結果では、材料分離領域に 0.06mm 程度のひび割れが複数発生しており、材料分離による収縮ひずみの増加により、引張応力の伝達がない完全に開口したひび割れが新たに形成される。粗骨材変動率が-50%に達しない場合には、完全に開口したひび割れの発生はない。粗骨材がまったくない状態を想定した粗骨材変動率-100%では、材料分離領域で多くのひび割れが発生しており、ひび割れ幅は最大で 0.16mm を越えており、材料分離がひび割れを引起す要因となっていることが明らかになった。

第 6 章では、第 4 章～第 5 章の検討結果から、中流動覆工コンクリートの養生等に関する施工管理基準を、平成 27 年 7 月に NEXCO 要領として整備した。要領化した内容については、次のとおりである。

養生等に関する施工管理基準としては、型枠を取り外す時間を 3 日（72 時間）程度とするか、型枠取り外し後（8 時間程度の養生構築時間含む）から給水、水分逸散防止、封緘および膜養生等で覆工コンクリート表面を 7 日間湿潤状態に保つ養生を標準とする。

無筋区間の覆工コンクリートにおけるインバート拘束による側壁部横断方向のひび割れが構造上問題となるものではないが、外力等に起因するひび割れとの明確な判断が難しいことから、工事中の経過観察と発生要因の把握が重要であることを記載した。有筋区間は、ひび割れ発生に伴い鉄筋等鋼材の腐食が懸念されることから、適切な措置を講ずる必要があることを記載した。

また、中流動覆工コンクリートの締固め時に想定される振動エネルギー程度では、コンクリートの収縮ひずみ差によるひび割れの発生には影響を与えない結果であったことから、今回確認した最適な振動エネルギーの 30 倍程度の振動エネルギーを上限として、中流動覆工コンクリートで採用している型枠バイブレータの配置を検討する。

## 7.2.2 中流動覆工コンクリートの施工方法における今後の展望

中流動覆工コンクリートの施工方法として、養生方法と締固め方法について平成 27 年 7 月に NEXCO 要領として整備した。そのなかで規定した養生方法や締固め方法については、実験や解析により導き出した成果である。特に養生方法においては、ひび割れ発生、進展解析では、養生に関係なくひび割れが発生するが、はく落するようなひび割れ形態とはなっていない結果となった。解析は、コンクリート収縮に特化したひび割れ形態でありその他の要因でひび割れが発生した場合、コンクリート収縮によるひび割れと相まってはく落につながるようなひび割れに成長することが考えられる。そのために、今回規定した養生方法により中流動覆工コンクリートのポテンシャルに近づけておく必要がある。

今後は、はく落事象につながる過度なひび割れ等の確認が必要である。

現在、NEXCO 要領で規定した養生方法が現場で展開されている。今後は、現場で採用されている養生方法ごとにトンネル覆工に発生しているひび割れ状況を詳細点検にて確認し、規定した養生方法とひび割れの関係性について検証していく必要がある。

### 7.3 総論

NATM の覆工コンクリート施工は、トンネル全断面型枠（セントル）をセットしコンクリートをポンプにより圧送して打込む方式が一般的となっている。

覆工の側壁から肩部までは、型枠に設けられた作業窓からの打込みと棒状バイブレータによる締固めを行い、肩部から天端部までのアーチ部においては、型枠窓を閉塞し吹上方式による打込みに切替えて施工している。しかし、いずれも狭小空間からの窮屈な姿勢での作業を余儀なくされるため、締固めやポンプ筒先の移動等が十分に行えていないのが現状であった。特に、アーチ部においては人力締固めが困難なことから締固め不足によるコンクリートの密実性の低下、横流しによる材料分離、充填不足による背面空洞の発生等の課題があった。また、これらの施工初期段階に生じる不具合は、供用後において材料劣化やはく落事象などを生じさせる要因ともなっていた。これら不具合の改善のため、NEXCO ではコンクリート材料を改善するアプローチで課題解消を目指し、以下のコンセプトのもと、従来の覆工コンクリートと高流動コンクリートの中間的な性状を有する中流動覆工コンクリートを開発した。

- ① 一般のコンクリートプラント設備で製造できること
- ② 従前の施工機械・設備で施工でき、大規模な型枠補強を必要としないこと
- ③ 材料分離抵抗性と適当な流動性を有すること
- ④ 著しい高コストとならないこと
- ⑤ 型枠各所に設置した型枠バイブレータにより、コンクリートの締固めが行えること

施工初期段階で生じる不具合については、中流動覆工コンクリートにより改善を図ったが、養生環境や中流動覆工コンクリートの施工方法によっては、ひび割れへの影響が懸念された。トンネル覆工に発生するひび割れは、はく落事象を引き起こす要因となる可能性があることから、中流動覆工コンクリートの施工方法や養生方法の違いによる、収縮ひずみ等の影響を室内実験と数値解析で検証し、ひび割れ発生、進展解析によりコンクリート収縮に起因するひび割れ状況について把握した。

一方で、NEXCO が管理する高速道路トンネルは、平成 28 年 3 月末時点で 1,808 本、延長 1,705 km が対象であり、もっとも供用後経過しているもので 50 年以上が経過している。その間、トンネル施工法が矢板工法から NATM に変化し、トンネル覆工には、ひび割れ等の変状が顕在化している状況である。ひび割れの原因としては、外力の作用等の外因と使用材料や施工等の内因に大別できる。一般には、外因、内因それぞれの変状原因が複合的に作用してひび割れが発生することから、トンネル覆工のひび割れ形態は多種多様である。したがって、ひび割れの状況から単純に変状原因を推定することは困難である。ひび割れは、はく落事象の原因となることから詳細点検により、トンネル覆工すべてにおいて近接目視かつ打音点検を実施している。しかし、コンクリートの収縮ひずみに起因するひび割れについては、コンクリート打設後、一定期間経過すればひび割れ進展も新たなひび割れの発生もなくなる

ことから、トンネル覆工点検においては現地点検の効率化に寄与できると考え、既往の点検記録からコンクリートの収縮ひずみ等によって発生するひび割れ形態を把握した。また、室内実験および解析の方向からもコンクリートの収縮により発生するひび割れの発生、進展状況の把握を行った。

中流動覆工コンクリートの施工方法、養生方法および型枠脱型時期によるひび割れ発生への影響については、養生方法や脱型時期の違いによるひび割れの発生形態に差異はなく、ひび割れが発生する結果となった。しかし、はく落事象につながるような閉合ひび割れの発生はなく、ひび割れ幅についても0.05mm以下のマイクロクラックが天端部の軸方向に局部的に生じる結果であった。

既往の点検記録の分析、室内実験およびひび割れ発生、進展解析の結果から、矢板工法（上半先進工法）、矢板工法（側壁導坑）、NATMの建設工法ごとに、コンクリートの収縮ひずみ等に起因するひび割れ形態に違いはあるが、はく落事象につながるような斜めひび割れや閉合ひび割れは発生しない結果となった。

建設事業のトンネルの覆工コンクリート施工や保全事業のトンネル覆工の維持管理において、共通する課題がトンネル覆工に発生するひび割れへの対応である。トンネル覆工のひび割れについては、コンクリート片はく落のリスク事象に直結することから、発注者はひび割れに対してナーバスになっている現状がある。そのため、建設時では覆工コンクリートの品質向上の取組みを技術提案項目として設定したり、覆工コンクリートにひび割れが発生した場合には、すべてのひび割れに対して対応を考え手当を行うこととなっている。

保全事業においても同様で、トンネル覆工に発生したひび割れを含むすべての覆工面に対して近接目視の点検を義務付け、ひび割れに対してなにかしらの措置を行うこととしている。

トンネル覆工の機能として、供用性においては、①水密性のよい構造物にする、②供用中の点検、保守等の作業性を高める、③トンネル内の架線、照明、換気等の施設保持がある。また、力学特性については、将来の地山の劣化や地下水の復元等に対してトンネルの余力を保持する機能がある。

しかしながら、これらの機能を確保するために覆工コンクリートの品質に対する要求性能については、不明瞭である。そのため、何を持って覆工コンクリートの品質向上とするのか明確になっておらず、覆工に発生するひび割れの取扱いについて定まったものがない。ただし、これらの機能を確保するためのトンネル覆工構造として考える場合、ひび割れを許容できる構造物であることは間違いない。許容できるひび割れとしては、コンクリート収縮に起因するひび割れが考えられる。コンクリート収縮に起因するひび割れは、前述したようにはく落につながるようなひび割れ形態とはならず、覆工コンクリート施工から約5年程度で収束することを踏まえると、トンネル覆工の機能には問題ないひび割れであると言える。

建設事業および保全事業において、このコンクリート収縮により発生するひび割れを許容することで、合理的な事業推進につながるものと考えられる。

建設事業においては、中流動覆工コンクリートによる施工を実施し今回提案する養生方法を行ったとして、コンクリート収縮によるひび割れが発生した場合は、そのひび割れに対して特段の補修の必要はない。

保全事業に至っては、コンクリート収縮に起因してひび割れが発生したトンネル覆工スパンにおいては、詳細点検で本来近接目視かつ打音点検としているところを現地点検を省略できる。ひび割れの補修についても、該当するひび割れに対しては特段の補修については実施しない。



現在、超高齢化社会を迎え、生産年齢人口がさらに減少していく社会情勢において、今後のトンネルの維持管理や覆工コンクリートの施工を含めた建設事業は、生産性向上への取組みが必要不可欠であり、そのためには選択と集中による事業の合理化を図るべきと考える。

## 謝辞

本論文は、2012年4月から2015年3月まで株式会社高速道路総合技術研究所（以下、「NEXCO 総研」という。）の在籍中にトンネル覆工に関する研究を行った成果をとりまとめたものです。2012年と、12月2日に発生した中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故の状況が現在でも鮮明に記憶に残っています。当時、NEXCO 総研に勤務した初年度であり覆工コンクリートの施工および詳細点検を含む維持管理の研究は、最重要テーマだということを知ることができました。本研究をまとめるまでに、NEXCO 総研から西日本高速道路（株）（以下、「NEXCO 西日本」という。）への異動となり、これまでに多くの方々の暖かいご支援とご助言をいただきました。以下に記し、深甚の謝意を表します。

本研究をまとめるにあたり、主査である東京大学大学院石田哲也教授には論文の構成から論文の新規性の表現等にいたるまで、的確なご助言およびご指摘をいただきました。なかでも本研究テーマであるトンネル覆工の維持管理の提案については、会社組織から脱却できていない内容であった当初の提案に対し、「本論文は、水野さんの論文です。会社等のしがらみは関係ない。」とのご指摘をいただいたことで、納得いく論文にまとめることができました。石田教授とお会いできたことで、本研究も含めてさまざまな経験をさせていただき人生の貴重な財産となりました。本当にお世話になりました。ありがとうございました。

副査を引き受けていただきました西村和夫理事（首都大学東京）、岸利治教授（東京大学生産技術研究所）、細田暁教授（横浜国立大学大学院）、高橋佑弥講師（東京大学大学院）におかれましては、各段階でご助言をいただきました。ありがとうございました。西村理事におかれましては、わたしがNEXCO 総研時代に担当しておりました「覆工コンクリートの長期耐久性に関する検討委員会」・「覆工コンクリートの効率的な点検に関する検討委員会」（以下、「検討委員会」という。）の委員長を引き受けていただき、このときの検討委員会の成果を本論文でまとめさせていただきました。検討委員会の時代からあわせて、本当にお世話になりました。ありがとうございました。

そしてなにより、本論文をまとめるにあたり NEXCO 総研時代から現在まで大恩人であり、検討委員会の幹事長を引き受けていただいた鉄建建設（株）の松岡茂常務執行役員には、大変お世話になりました。本論文の内容が検討委員会の成果であることから、論文構成の段階から相談に乗っていただき、各章のまとめにおきましては的確なご助言やご指導をいただきました。ここまでの論文をまとめることができましたのも、石田教授と一緒に松岡常務が各段階でご指導いただいたからこそだと確信しております。本当にお世話になりました。ありがとうございました。

外力によって発生したひび割れの把握について、（株）パシフィックコンサルタンツの重田佳幸部長、前田洸樹様には、走行レーザー計測車両を用いた外力による内空断面変形と、ひび割れとの相関把握に関しましてご指導いただきました。お世話になりました。ありがとうございました。

中流動覆工コンクリートの施工方法に関する実験について、（株）八洋コンサルタントの高橋幸一郎部長には、養生方法の違いによる物性値の取得や大型試験体を用いた過振動による材料分離の把握のため、試験計画の段階からご指導いただきました。大型試験体ではハプニングがありましたが、大変勉強になりました。お世話になりました。ありがとうございました。

建設中のトンネル内の坑内環境調査や坑内曝露試験について、鉄建建設（株）の西脇敬一様をはじめ

とする、にしごうトンネルおよび中山トンネルの現場調査等にご協力いただきました皆様には、お世話になりました。ありがとうございました。

ひび割れ発生、進展解析について、(株) コムスエンジニアリングの土屋智史代表取締役社長には、コンクリート物性値の長期挙動に関する解析について、ご指導およびご協力いただきました。お世話になりました。ありがとうございました。

その他、本論文を取りまとめるにあたって検討委員会の皆様には、ご支援いただき厚くお礼申し上げます。

NEXCO 総研に在籍していた期間、本当に多くの方々のご支援により研究ができましたこと感謝申し上げます。そして、研究成果を本論文にまとめることに対し背中を強く押していただきました中日本高速道路(株)の八木弘専門主幹に感謝申し上げます。

NEXCO 総研から NEXCO 西日本へ異動となり、NEXCO 総研から引き続いて直属の上司でありました NEXCO 西日本岩尾哲也所長におかれましては、本論文の作成にあたりいつもご配慮いただきありがとうございました。おかげさまで本論文をまとめることができました。

NEXCO 総研トンネル研究室の同志におきましては、トンネル覆工に関する研究にご協力いただきありがとうございました。

最後にわたしの最大の理解者であり常に支えになってくれた妻と休日によりどこにも連れて行けなかった愛すべき姉妹と愛犬に深く感謝いたします。