

## 論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 水野 希典

### 1. トンネル覆工の合理的な維持管理の提案

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している。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。

トンネル覆工からのコンクリート片のは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 NEXCO においては、すべてのトンネル覆工に対して近接目視と併せて打音点検を実施しており、点検費用の増大、点検にともなう高速道路規制の長期化が問題となっている。

トンネル覆工に発生しているひび割れのうち、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。または、特段の対策工の必要性はないと考えられる。

本研究は、材料や施工等の内因によるひび割れに着目し、ひび割れ発生原因の推定手法について検討を行い、詳細点検や対策工における合理的な維持管理の提案を行うものである。

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た。

文献調査では、矢板工法はコールドジョイントや打継ぎ処理に起因する変状が多いこと、型枠の不具合、早期脱枠、巻厚不足や背面空洞に起因する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ことなどを把握した。

NATM については、材料に起因している事例が多かった。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ことを把握した。

ひび割れの発生原因の推定を目的とした既往の点検記録や調査結果の分析においては、詳細点検記録であるトンネル覆工に発生しているひび割れ情報を、ひび割れの幅、長さ、方向をパラメータとした指標であるひび割れ指数 (以下、「TCI 値」という。) 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  $F_{12} \cdot F_{21}$  別に整理し、建設工法ごとのひび割れの特徴を把握した。詳細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。このことから一般的なトンネルのひ

ひび割れ発生状況の代表値としては、極端なひび割れの影響を受け難い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)値として定義した。

ひび割れの特徴としては、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。また、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。

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は、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。

外力性変状の可能性があるひび割れ抽出を目的として、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を確認した。

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。この測定データに基づいて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、トンネル覆工に生じるひび割れ状況を建設工法ごとにひび割れ発生、進展解析により求め、ひび割れの特徴について整理した。

ひび割れ発生、進展解析結果では、矢板工法（上半先進）、矢板工法（側壁導坑）および NATM といった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、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結果となった。解析結果でのひび割れ形態を建設工法ごとに TCI 値を算定すると、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。さらに、材料分離や覆工巻厚不足を想定したモデルでのひび割れ発生、進展解析では、斜めひび割れや放射状のひび割れが発生する結果となり、背面空洞調査を実施したトンネルに発生しているひび割れ形態と類似している。

これまでの検討結果から、トンネル覆工の維持管理に関する新たな点検手法、対策工方針について提案する。

従来の点検手法は、トンネル覆工全面に対して近接目視と併せて打音点検を実施している。これに対し提案する点検手法は、コンクリート収縮により発生したひび割れとして設定した TCI(50)値および特殊条件下で発生するせん断方向成分  $F_{12} \cdot F_{21}$  に着目し、これを閾値としたトンネル覆工の現地点検を省略する点検手法である。

また、対策工においても、この TCI(50)値および特殊条件下で発生するせん断方向成分  $F_{12} \cdot F_{21}$

を閾値として、対策工の有無を判断する。

コンクリート収縮により発生したひび割れは、コンクリート打設後、一定期間経過すればひび割れ進展も新たなひび割れの発生もなくなることから、コンクリート片の落下につながるような閉合ひび割れやブロック化とはならない。一方、せん断ひび割れが発生している場合は、コンクリート収縮以外の別の要因が考えられ、代表的なひび割れと相まって閉合ひび割れやブロック化となり、コンクリート片のはく落が懸念される。

このようにリスク事象とならないひび割れを抽出することにより、現地の近接目視および打音点検を省略することが可能となり、点検の効率化に寄与する。対策工については、対策工の実施有無の判断を行うことで選択と集中が可能となる。また、変状原因推定においてエンジニアリングジャッジの必要がなく、統一的な変状原因の推定および対策工実施判断が可能となる。

## 2. トンネル覆工の合理的な施工方法の提案

近年、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、脱型直後の覆工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。

しかしながら、養生方法、養生期間および型枠脱型時期等（以下、「養生環境」という。）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、従来から課題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。そこで 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、締固めに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部的な材料分離の発生が懸念される。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可能性がある。

本研究は、覆工コンクリートの養生環境の違いや中流動覆工コンクリートの締固め方法が、コンクリートの収縮ひずみ等に起因して発生するひび割れへの影響を把握し、コンクリート片のはく落事象につながるひび割れ発生の抑制を目的として、覆工コンクリートの合理的な施工方法の提案を行うものである。

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。

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。

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（決定配合の粗骨材に対する変動の割合）は±20%程度であった。

実際の養生環境をモデル化した室内実験でのコンクリートの収縮ひずみ等物性値の短期的な測定データに基づいて、養生環境の違いによるひび割れへの影響をひび割れ発生、進展解析により把握した。ひび割れ発生、進展解析から、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結果となった。

また、中流動覆工コンクリートの施工方法による材料分離によるひび割れへの影響把握のため、材料分離を想定したひび割れ発生、進展解析を実施した。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。このことから、中流動覆工コンクリートの施工方法を再現した大型試験体にて確認した過剰締固め（最適振動エネルギーの30倍程度）による粗骨材変動率±20%程度の材料分離ではひび割れの発生はない。

これまでの検討結果から、中流動覆工コンクリートの施工方法について提案する。

ひび割れ発生、進展解析より養生環境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、養生環境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鑑み、長期耐久性の観点から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環境について提案することとし、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。

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。

このように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環境を規定することで品質向上に寄与し、また、中流動覆工コンクリートの型枠バイブレータによる締固めの施工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こととなる。