

博士論文

合理的な耐久性確保に向けた耐久設計・
コンクリート施工・表層品質評価に関する研究

Research on durability design, concrete construction and
evaluation of surface quality to rationally ensure the
durability of structures

横山勇気

論文の内容の要旨

信頼性の高いコンクリート構造物の実現には、設計、施工、検査・評価、維持管理などの各段階にて適切な技術的判断を下すことが求められる。また、各プロセスにて得られた情報を分析し、得られた知見を今後建設される構造物や既設構造物へフィードバックすることもコンクリート技術を進歩させる上で重要である。

近年では、建設分野における生産性向上を目的として設置された **i-Construction** 委員会などにより、コンクリート工の全体最適を進める取組みが行われている。具体的には阪神・淡路大震災以降、耐震性能の要求水準が高まったことで、設計段階で配筋が高密度し、打込みの効率が低下している状況を勘案し、国土交通省では2017年7月より、施工性を高めるためにスランプ値の規定が従来の8cmから12cmに改訂されている。コンクリート構造物の計画から維持管理、解体に至る過程では、数多くの組織、規定が関わるため、上記のような取組みを実施するためには、現実には障害が多く存在する。しかし、各段階に携わる人々が各々の専門や立場のみにとらわれることなく当事者意識を持ち、全ての状況を適切に理解し最善の技術的解決策を見出すことは、優良なインフラを提供することのみならず、社会全体として理想とすべき姿ではなかろうか。

以上の背景を踏まえ、本研究では、コンクリート構造物の計画から維持管理にわたる各段階の課題を整理し、実験や既往の調査結果の分析を通じ得られた知見を基に、コンクリート構造物の耐久性の合理的な確保の実現を妨げる要因及びその現象を明確にすることを目的とした。

本論文の第1章は、以上の背景および既往の研究について整理し、それらを踏まえコンクリート構造物の長寿命化を実現する上で現状の設計、施工、検査、維持管理体系で考えられる問題点を明確にすることを目的とした。具体的には、設計・維持管理の観点では、中性化に着目すると、耐久性照査にて乾燥しにくい環境ではかぶり厚さが小さくなるよう設計されている。一方、実際の維持管理の現場では、中性化が進行しにくいと考えられる降雨の影響を受ける箇所にて剥離・剥落が発生する現象が生じており、現場と示方書の間には乖離が見られる。また、施工の最終段階である養生では、近年コンクリート表層部の品質の向上を期待し、複数の養生技術が開発されるなど注目を集めている。しかしながら、数年オーダーで養生の持続性を検討した例は少なく、養生により耐久性が向上しているのかは定かではない。さらに、この養生による品質の向上効果は、非破壊試験を用いて評価が行われているが、これらの試験はコンクリート中の含水率の影響を強く受けることが知られており、得られた測定値によって表層品質が適切に評価されているかは明らかになっていない。

第2章では、コンクリート構造物の維持管理を行う上で代表的な劣化指標の一つとして用いられている中性化深さとコンクリート片の剥離・剥落の関係性について、実構造物の調

査結果に基づき検証した。鉄道や道路構造物等より得られた測定結果を、ロジスティック曲線により近似し、曲線の決定係数を用いて中性化深さとかぶり厚さがコンクリート片の剥落に及ぼす影響度を検討した。また、医学統計の分野で使用されるロジスティクス回帰分析によって、中性化深さとかぶり厚さに加え、降雨の影響の有無も考慮し、コンクリート片の剥落に及ぼす要因の大小関係を検証した。加えて、複数の調査結果を比較検討することにより、明確な水掛かりがある箇所では中性化残りは剥落リスクを評価するうえで適切な評価指標となり得るが、一般的な維持管理の現場では、水分供給の頻度の多寡が不明確であるため、中性化深さや中性化残りの情報は、技術者が本来知るべき鉄筋の腐食リスクとは正反対の情報を示している場合があり、維持管理技術者の判断に対する攪乱因子となり得ることを明らかにした。

第3章では、屋外に暴露され、複数の材料・配合、養生条件にて作製された中規模試験体を用いて数年オーダーにわたる表層透気試験を継続的に実施するとともに、表面吸水試験や空隙構造分析を行うことで、養生による品質向上効果を検証した。その結果、降雨の影響を受けない箇所では、材齢7年以上経過した時点でも養生の差異が吸水量や空隙構造に表れていた。一方、降雨の影響を受ける箇所の場合は、表層透気係数や吸水量、ピーク径、閾細孔径で養生による差が縮小していることを確認した。本検討結果を踏まえると、降雨の作用を受ける場合、材齢初期に見られる養生による表層品質の差異は、数年後には明確な違いとして表れなくなる可能性が示唆された。

第4章では、非破壊による表層品質の評価試験として、海外にて規格化も進められている表層透気試験(Torrent法)に着目し、測定結果として得られる表層透気係数と耐久性の指標である物質移動抵抗性、空隙構造の関係性を検証した。本検討の結果より、物質移動抵抗性、空隙構造ともに現在の表層透気試験の実施期間である材齢1~3ヵ月に比べ、材齢が1年以上経過した時点にて相関が高まることを確認した。すなわち、現状の試験時期によって得られた表層透気係数は、含水率の影響を除外することが難しく、耐久性を評価する指標としては適切な手法ではないと考えられる。

第5章では、これまでの章についてまとめるとともに、本研究にて得られた知見を踏まえ、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を確保するために重要である、かぶりコンクリートの「厚さ」と「品質」の両方の観点から、合理的な耐久性確保に向けた新たな設計、施工、評価、維持管理体系を述べた。

目次

第1章 序論	6
1.1 研究の背景と目的	6
1.2 本論文の構成	8
第1章の参考文献	11
第2章 コンクリート片の剥落に対するかぶりと中性化深さの関係性の検証	13
2.1 はじめに	13
2.2 中性化深さに関する既往の研究	14
2.4.1 中性化に関する研究の黎明期	14
2.4.2 土木分野における中性化の取扱い	16
2.4.3 性能照査型への移行	18
2.4.4 中性化残りコンクリートクライシス	19
2.4.5 強度から水セメント比による規定への変更	20
2.4.6 維持管理の実務的観点からの補完	20
2.4.7 中性化による限界状態の再考	21
2.3 本検討の目的	21
2.4 検討概要	22
2.4.1 検討対象構造物	22
2.4.2 分析手法	22
2.4.3 分析により得られた知見の一般性に関する検証	25
2.5 かぶり厚さ、中性化深さ、中性化残りの各指標におけるコンクリート片の剥落割合の算出	26
2.6 近似曲線の決定係数を用いた検討	27
2.7 ロジスティック回帰分析による検討	29
2.8 調査結果の比較検討	30
2.8.1 調査結果の比較（降雨の影響を受ける箇所）	30
2.8.2 かぶり厚さ、中性化深さ、中性化残りの各指標におけるコンクリート片の剥落割合の算出（前原らの調査結果）	31
2.8.3 剥落リスク評価指標としての中性化残りの有効性に関する考察	32
2.9 まとめ	34
第2章の参考文献	36
第3章 材齢初期の養生による品質向上効果の検証	38
3.1 はじめに	38
3.2 養生に関する既往の研究	38
3.3 本検討の目的	39
3.4 検討概要	40

3.4.1	試験体概要	40
3.4.2	表層透気試験 (Torrent 法)	40
3.4.3	表面吸水試験 (Surface Water Absorption Test, SWAT)	42
3.4.4	空隙構造分析 (MIP)	45
3.5	屋外に暴露された試験体を用いた検討	46
3.5.1	矩形試験体	46
3.5.1.1	実験概要	46
3.5.1.2.1	ボックスカルバート模擬試験体の概要	46
3.5.1.2.2	表層品質に関する非破壊試験の概要	47
3.5.1.2	表層透気試験(Torrent 法)の結果	47
3.5.2	ボックスカルバート模擬試験体	48
3.5.2.1	実験概要	48
3.5.2.1.1	ボックスカルバート模擬試験体の概要	48
3.5.2.1.2	表層品質に関する非破壊試験	50
3.5.2.1.3	空隙構造分析	50
3.5.2.2	試験結果	50
3.5.2.2.1	表層透気試験(Torrent 法)の結果	50
3.5.2.2.2	表面吸水試験 (SWAT) の結果	52
3.5.2.2.3	空隙構造分析の結果	53
3.5.2.2.3.1	累積細孔量 (養生方法の比較)	53
3.5.2.2.3.2	インクボトル空隙量と連続空隙量	56
3.5.2.2.3.3	閾細孔径	57
3.5.3	中規模柱試験体	58
3.5.3.1	実験概要	58
3.5.3.1.1	中規模柱試験体の概要	58
3.5.3.1.2	表層品質に関する非破壊試験	60
3.5.3.1.3	空隙構造分析	60
3.5.3.2	試験結果	61
3.5.3.2.1	表層透気試験 (Torrent 法) の結果	61
3.5.3.2.2	表面吸水試験 (SWAT) の結果	63
3.5.3.2.3	空隙構造分析	64
3.5.3.2.3.1	累積細孔量 (0~1cm における養生方法の比較)	64
3.5.3.2.3.2	累積細孔量 (深さ方向の比較)	68
3.5.3.2.3.3	インクボトル空隙と連続空隙	74
3.5.3.2.3.4	閾細孔径	76
3.6	室内にて作製した試験体を用いた検討	79

3.6.1	実験概要.....	79
3.6.1.1	供試体の概要.....	79
3.6.1.2	実験概要.....	80
3.6.1.2.1	質量変化.....	81
3.6.1.2.2	含水率.....	81
3.6.1.2.3	空隙構造.....	81
3.6.2	試験結果.....	82
3.6.2.1	質量変化.....	82
3.6.2.2	含水率.....	82
3.6.2.3	累積細孔量.....	84
3.6.2.4	閾細孔径.....	86
3.7	まとめ.....	89
	第3章の参考文献.....	91
	第4章 表層透気係数と物質移動抵抗性及び空隙構造の関係.....	94
4.1	はじめに.....	94
4.2	表層品質に関する既往の研究.....	94
4.2.1	コンクリート標準示方書における表層品質の扱い.....	94
4.2.2	表層透気試験.....	95
4.2.3	表面吸水試験.....	96
4.2.4	散水試験.....	96
4.2.5	目視調査に基づく表層品質評価手法.....	96
4.3	表層品質に関する試験方法の課題.....	97
4.4	本検討の目的.....	98
4.5	検討概要.....	98
4.5.1	試験体概要.....	98
4.5.2	塩分浸漬試験.....	98
4.5.3	空隙構造分析.....	99
4.6	試験結果.....	100
4.6.1	塩水浸漬試験.....	100
4.6.2	塩分浸透深さと表層透気係数の関係.....	101
4.6.3	空隙構造と表層透気係数の関係.....	102
4.7	まとめ.....	104
	第4章の参考文献.....	105
	第5章 結論.....	107
	謝辞.....	110

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

コンクリート構造物の耐久性を確保するには、設計、施工、検査・評価、維持管理などの各段階にて適切な技術的判断を下すことが求められる。また、各プロセスにて得られた情報を分析し、得られた知見を今後建設される構造物や既設構造物へフィードバックすることもコンクリート技術を進歩させる上で重要である。この考えは、現在の土木学会コンクリート標準示方書の中でも、各編の関係や役割を示す「基本原則編」¹⁾に強く反映されており、示方書の根幹を形成する思想である。

昭和6年に土木学会鉄筋コンクリート標準示方書²⁾の初版は制定された。以来、コンクリート構造物に関する技術の発達に伴い、当時最新であった知見が示方書に反映され、現在に至る。昭和24年の改訂³⁾の際には、土木学会コンクリート常置委員会委員長であった吉田徳次郎先生は「コンクリート標準示方書の適用について」という題目で、以下の文を示方書の解説⁴⁾の冒頭に記している。

「各種のコンクリート工事における差異にはおのずから限度があり、また共通した点も極めて多いのである。これらの共通する点の原則を、一般的に示したものがこのコンクリート標準示方書であって、この示方書によれば、構造物建造の目的を達するコンクリートを経済的に作ることができるのであるから、一般の場合は示方書を厳守しなければならないのである。ただし、この標準示方書が、そのまま適用できない場合もあるのであって、重要な工事ではもっと制限的な条項を必要とする場合もあるし、また、場合によっては条項を多少緩和しても良い場合もあるのである。(中略)

以上の諸例からわかるように、標準示方書を適用する場合に、字句にこだわりすぎてはならないのであって、示方書の本質をよく理解し、必要があれば、これを適当に修正して活用

しなければならないのである。しかし、何らの実験研究もしないで、単に現場の都合などにより、標準示方書の条項にそむくと一般に不経済な結果となり、また重大な失敗を招く原因となることもあることを忘れてはならない。」

上記の文は、改定時の状況を考慮し、諸例の一部を修正しながら昭和 55 年版の示方書⁵⁾まで掲載された。昭和 61 年の改訂時⁶⁻⁹⁾に示方書の分冊化が進んだことも影響し、吉田徳次郎先生が記されたコンクリートに携わる技術者の標準示方書に対する捉え方に関する文章は削除されるが、計画から維持管理に至るまでの工程を見通した上で行うべき技術的判断が下しにくいなどの理由より、示方書から 2007 年の改訂時に各編の冒頭に再び記載される。加えて、2012 年には「基本原則編」⁹⁾が制定され、示方書各編の体系と互いの連携を明確にするとともに、コンクリート構造物の性能確保のために必要な計画、設計、施工ならびに維持管理の各段階で基本となる考え方、技術者の役割が記された。

このように、我が国におけるコンクリート黎明期に活躍した先人の思想は、信頼性の高いコンクリート構造物を建造する上で普遍的な本質を表すものであり、数多くの知見が得られ、設計や施工などの体系が複雑化した現代では、その重要度はさらに増していると考えられる。

近年では、生産年齢人口の減少に伴い、各種分野において生産性向上が社会的な問題としてクローズアップされている。なかでも、建設分野のコンクリート工と土工の生産性は 30 年前からほとんど向上していないとされており、現状の社会基盤の質を維持するだけにとどまらず、新たな担い手にとって魅力ある分野とするためにも、急務の課題であると考えられる。このような現状を受け、国土交通省は、建設分野における生産性向上を目的として、i-Construction 委員会を設置し、コンクリート工の全体最適を進める取組みを行っている¹⁰⁾。この活動の具体的な成果としては、阪神・淡路大震災以降、耐震性能の要求水準が高まったことで、設計段階で配筋が高密度し、打込みの効率が低下している状況を踏まえ、施工性を高めるためにスランプ値の規定が従来の 8cm から 12cm に改訂された。しかし、コンクリート構造物の計画から維持管理、解体に至る過程では、数多くの組織、規定が関わるため、上記のような取組みを実施するためには、現実には未だに解決されていない障害が存在する。

例えば、設計・維持管理の観点では、現状のコンクリート標準示方書の「中性化に伴う鋼材腐食に対する照査」¹¹⁾に着目すると、かぶりの設計値を算出する際に、中性化の進行予測に及ぼす環境作用の程度を、乾燥しやすい環境と乾燥しにくい環境の 2 種類としている。中性化は乾燥しやすい環境にて進行する。そのため、耐久設計では乾燥しにくい環境に比べ、乾燥しやすい環境は 1.6 倍の速度で中性化が進行するという仮定のもとに、かぶり厚さが設定される。しかし、実際の維持管理の現場においては、かぶりコンクリートの剥離・剥落は、雨水等の影響を受ける乾燥しにくい環境、すなわち中性化の進行が遅い環境の方でより多く発生しており、設計と現場には乖離が見られる。この設計と現場の乖離が生じた原因を明らかにするため、これまでの中性化に関する研究や規定を整理する必要がある。

また、施工の最終段階である養生では、近年、コンクリート表層部の品質向上を期待し、

新しい養生技術が複数開発¹¹⁻¹³⁾されるとともに、復興道路のトンネル坑口部では型枠存置期間が1週間に設定される¹⁴⁾など、数多くの実構造物にて養生による品質確保に向けた積極的な工夫が施されている。この養生による品質向上効果は多くの場合、竣工時点にてコンクリートの透気性や吸水性などを活用した非破壊試験¹⁵⁻¹⁷⁾により評価される。しかしながら、数年オーダーで養生効果の持続性や、品質部の変化を検討した例¹⁸⁻²⁰⁾は少なく、養生により耐久性が向上しているのかは定かではない。

さらに、この養生による品質の向上効果を評価する非破壊試験¹⁵⁻¹⁷⁾は、近年精力的に研究が行われており、複数の試験方法が提案されるに至っている。これらの試験は、コンクリート中の含水率の影響を強く受けることが知られており²¹⁾、非破壊による試験の中でも国内外で数多くの使用実績のある表層透気試験(Torrent 法)¹⁵⁾では、この影響を軽減するために、試験を実施する際の表面含水率は5.5%以下でなければならないという規格²²⁾が海外で定められている。しかしながら、含水率が5.5%を下回っている場合に試験を行ったとしても、乾燥の進行とともに測定値が変化することが報告されている²⁰⁾。加えて、表層透気試験より得られる表層透気係数が、コンクリートの水分逸散量と高い相関にあることなども報告²³⁾されており、透気試験ではコンクリート表層部の品質を適切に評価できていない可能性も考えられる。

本研究では、これらの点に着目し、コンクリート構造物の計画から維持管理にわたる各段階の課題を整理し、実験や既往の調査結果の分析を通じ得られた知見を基に、コンクリート構造物の耐久性をより合理的に確保するための新たな設計、施工、検査・評価、維持管理体系を提案することを目的とした。なかでも設計、維持管理では中性化深さを用いた耐久性照査により設計されるかぶり厚さと現場で生じている現象の乖離、施工では耐久性の向上を目的として施される養生が長期耐久性に与える効果、検査・評価では、表層品質の評価手法として使用されている表層透気試験(Torrent 法)と耐久性の関係性を検証することとした。

1.2 本論文の構成

本論文は、全5章で構成される。図1.1に本論文の構成を示す。第1章は本章であり、本論文の背景および目的、論文の構成を記述する。第2章では、設計、維持管理の段階として「中性化に伴う鋼材腐食に対する照査」と維持管理の現場における乖離に着目し、中性化深さがコンクリート片の剥落に及ぼす影響について検証する。第3章では、施工の段階として養生に着目し、養生効果の持続性および耐久性の向上効果を検討する。第4章では、評価の段階として非破壊による表層品質の試験、表層透気試験(Torrent 法)に着目し、試験結果として得られる表層透気係数と耐久性の関係性を検討する。第5章では、本論文の最終章として本研究で得られた成果および知見をまとめるとともに、それらを踏まえより合理的に構造物の耐久性を確保するために有効と考えられる体系について言及し、今後の課題を示す。以下に各章の概要を述べる。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的、ならびに本論文の構成を示した。

第2章「コンクリート片の剥落に対するかぶり厚さと中性化深さの関係性の検証」では、中性化深さに関する既往の研究を整理するとともに、鉄道構造物ならびに道路構造物より得られた調査結果を基に、かぶり厚さと中性化深さがコンクリート片の剥落に及ぼす影響について行った分析結果を示す。

第3章「材齢初期の養生効果の持続性、品質向上効果の検証」では、国内の複数個所に屋外に暴露された中規模試験体を用い、数年間にわたり実施した表層透気係数の経年変化に加え、表面吸水試験、空隙構造分析を実施することで、脱型直後から施した養生による品質向上効果の残存性について検証した。それらの検討結果を示す。

第4章「表層透気係数と耐久性の関係の検証」では、非破壊による表層品質の試験の一つである表層透気試験(Torrent 法)に着目し、3章の検討で用いた中規模試験体より得られた測定結果より、表層透気係数と物質移動抵抗性(塩分浸透深さ)、空隙構造の関係性について検証した。

第5章「結論」では、以上の結果を総括するとともに、実験や既往の調査結果の分析を通じ得られた知見を基に、コンクリート構造物の耐久性をより合理的に確保するために有効と考えられる新たな設計、施工、検査・評価、維持管理体系を提案した。

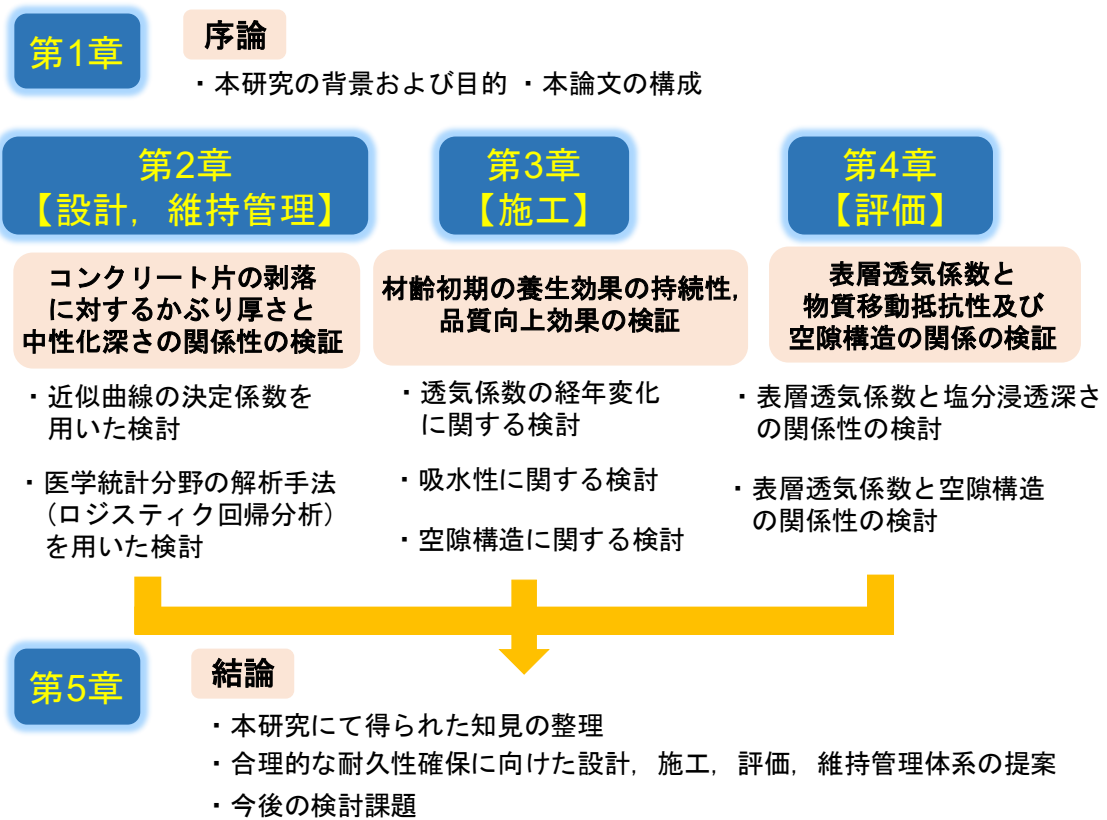


図 1.1 本論文の構成

第1章の参考文献

- 1)土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[基本原則編]，2012.
- 2)土木学会：昭和六年土木学会鉄筋コンクリート標準示方書，1931.
- 3)土木学会：昭和24年土木学会制定コンクリート標準示方書，1949.
- 4)土木学会：昭和24年土木学会制定コンクリート標準示方書解説，1950.
- 5)土木学会：昭和49年度版コンクリート標準示方書解説[昭和55年版]，1950.
- 6)土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書[設計編]，1986.
- 7)土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書[施工編]，1986.
- 8)土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書[舗装・ダム編]，1986.
- 9)土木学会：土木学会規準(昭和61年版)，1986.
- 10)土木学会：コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案，土木学会コンクリートライブラリー148，2016.
- 11)土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2013.
- 12)臼井達哉，宮原茂禎，坂本淳，岸利治：排水・湿潤連続養生によるコンクリートの耐久性向上技術，コンクリート工学，Vol.53，No.10，pp.867-873，2015.10
- 13)渡邊賢三，坂井吾郎，坂田昇，石田哲也：水分逸散抑制養生が表層品質に及ぼす影響，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.74，No.4，pp.247-255，2018.
- 14)佐藤和徳：復興道路・復興支援道路に関する取組み，コンクリート工学，Vol.53，No.1，pp.15-20，2014.1
- 15)Torrent, R.J. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992.
- 16)林和彦，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013.
- 17)西尾壮平：散水によるコンクリート表層品質の簡易評価，鉄道総研報告，Vol.30，No.6，pp.5-10，2016.6
- 18)Sanjuán, M.A., Muñoz-Martialay, R. : Variability of the concrete air permeability coefficient with time, *Building and Environment*, Vol.32, No.1, pp.51-55, 1997.
- 19)Parrott, L.J. : Influence of cement type and curing on the drying and air permeability of cover concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol.47, No.171, pp.103-111, 1995.6
- 20)Nakarai, K. et al. : Long-term permeability measurements on site-cast concrete box culverts, *Construction and Building Materials*, Vol.198, pp.777-785, 2019.2
- 21)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(JSCE335 委員会) 第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，土木学会コンクリート技術シリーズ 97，2012.

- 22)半井健一郎，蔵重勲，岸利治：かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査—スイスにおける指針—，コンクリート工学，Vol.49，No.3，pp.3-6，2011.3
- 23)蔵重勲，山田一夫，小川彰一：非破壊透気試験等を用いたコンクリート品質管理の可能性検討—指定廃棄物の最終処分に向けて—，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，No.1，pp.287-294，2015.

第2章 コンクリート片の剥落に対するかぶりと中性化深さの関係性の検証

2.1 はじめに

コンクリート構造物の維持管理を行う上で、重要と考えられている変状の指標の一つとして中性化深さが挙げられる。鉄筋近傍のコンクリートの中性化が進行すると、鉄筋の腐食環境が高まると考えられている。しかし、構造物にとって問題となるのは中性の進行そのものではなく、コンクリート中の鉄筋の腐食、それに伴って生じるかぶりコンクリートの剥離・剥落である。かぶりの剥落に関する既往の研究として、図 2.1 に石橋らの調査結果¹⁾を示す。

この調査結果より、かぶりコンクリートの剥落の主な原因は、かぶり厚さの不足と雨水等の影響であるとの知見が報告されている。さらに、雨水等の影響を受ける場合は、中性化残

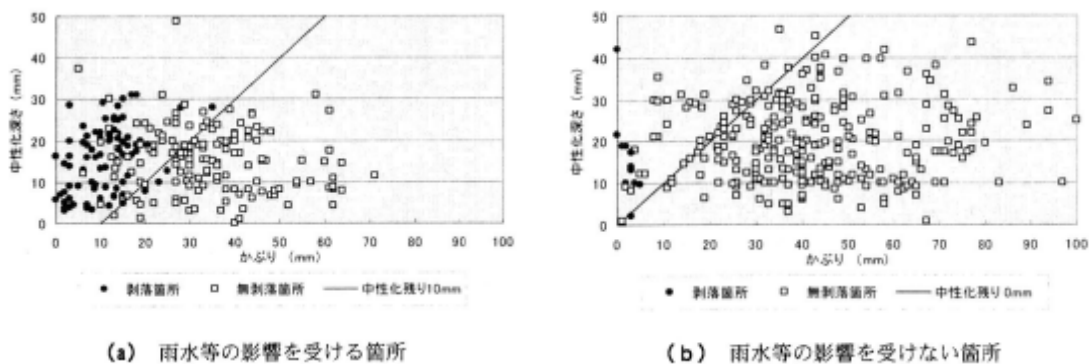


図-2.1 コンクリート片の剥落と中性化残り、雨水等との関係¹⁾

りが 10mm を下回る場合にコンクリート片の剥落が生じることについても言及されている。しかし、中性化残りが 10mm を下回った範囲においても無剥落箇所が多く存在していることは注目すべき事実であり、かぶりコンクリートの剥落へ影響を及ぼす因子について詳細な検討をする必要があると考えられる。また、2012 年のコンクリート標準示方書における耐久性照査²⁾では、乾燥しにくい環境ではかぶり厚さが小さくなるよう設計されていたが、実際に剥離・剥落が生じているのは、降雨の影響を受ける乾燥しにくい箇所である。さらに、設計上中性化残りが 10mm を下回ると鋼材腐食が徐々に発生し始めるという仮定が設けられている一方、石橋らの調査結果のように、中性化残りが 10mm も残っている段階でかぶりコンクリートの剥離・剥落が発生し始めるという報告もあり、設計段階の仮定と実構造物より得られる結果の解釈には議論の余地が大きい。

2.2 中性化深さに関する既往の研究

2.2.1 中性化に関する研究の黎明期

日本におけるコンクリートの耐久性研究の端緒は、廣井勇博士による「海中工事における鉄筋コンクリート」³⁾であり、1894 (明治 27) 年に函館でセメント・コンクリートの試験が開始された。同じ時期に、建築分野においても、鉄筋コンクリートの「鋼材腐食試験」^{4,5)}が行われている。その発端は、サンフランシスコ大震災で発錆したがれきの中で腐食した鋼材を佐野博士らが見たことにある。多湿である日本では鉄筋が腐食しやすいとの懸念から、震災予防調査会は 1907 (明治 40) 年に佐野利器博士のもとで鋼材腐食試験を開始した。作製された数百の供試体は大気中・土中・池中の自然環境に曝露され、佐野博士、内田祥三博士、濱田稔博士と引き継がれ、研究期間は 20 年に及んだ。曝露試験の結果は、試験材齢が 2 年 7 ヶ月⁴⁾ (佐野博士)、5 年⁴⁾ (内田博士)、20 年⁶⁾ (内田博士・浜田博士) の時点における結果が報告されている。

5 年までの試験結果は、コンクリートの充填不足などの欠陥部を除いて、鋼材の腐食は確認されず、コンクリートの防錆力に内田博士は感嘆の意を記している。中性化に関する記述は、曝露材齢 20 年の実験結果⁶⁾で初めて確認できる。フェノールフタレインによる中性化深さと鉄筋腐食の実験結果から内田博士、濱田博士は「アルカリ性の存否が即ち鋼材の安定か否かを示すものと解して可なるべし」と述べている⁶⁾。またこのときに、博士らがフェノールフタレインによる中性化深さの測定手法を提案されたことで、中性化の進行の情報を簡易に視覚的に得られるようになった。目に見える中性化深さの情報は、博士らの研究を中性化速度の評価へと展開させ、やがて 1928 年に内田博士と濱田博士の論文の中で \sqrt{t} 則の提案されるに至る。

この研究以降、中性化は鉄筋腐食をもたらすとの仮定は疑われることなく、中性化の研究は濱田博士を中心に西忠雄博士、洪悦郎博士、岸谷孝一博士によって精力的に行われており、博士らの興味の焦点は、鉄筋腐食の研究から中性化の研究へと移行したものと推察される。

そして、建築構造物の調査と室内で行われた促進中性化試験の結果を基に、中性化の速度係数の修正がなされた⁷⁾。この中性化の速度係数に関する研究は、1968年のセメント化学の国際会議において主要論文⁷⁾として議論された。しかし、上記研究の後に編纂された海外の教科書^{例えば8-10)}では、中性化（または炭酸化）の影響に関する記述は、体積変化（炭酸化収縮）や強度変化だけであり、中性化（または炭酸化）と鉄筋腐食を結び付ける記述が見当たらない。そこで、内田博士、濱田博士が「中性化は鉄筋腐食をもたらす」との仮定に至った実験の内容を検証する。

「鋼及びコンクリートの耐久試験」⁶⁾の内容を引用する。表-2.1の配合は容積比で示され、水量は硬練との記述がある。水セメント比は、中性化深さをを用いて \sqrt{t} 則より推定した値である。鉄筋は1/2inch ($\phi=12.7$ mm)の丸鋼であり、角柱供試体の中央に設置されている。

表-2.2に曝露20年目における供試体寸法ごとの腐食状況を示す。いずれも屋外(大気中)に曝露された供試体の試験結果である。寸法が150mmの供試体では、いずれの配合においても、施工上の欠陥による空隙部分にのみ錆が発生した。コンクリートで完全に被覆されている部分では、鋼材は供試体に埋設された当時の光沢を保っていたと記されている。

基本の配合と考えられる配合3では、寸法の異なる3種類の供試体が作製されている。このなかで、鉄筋腐食が確認できたのは寸法が60mmの供試体だけである。図-2.2に示したように、鉄筋の腐食膨張によるひび割れが確認できる。この60mmの供試体では中性化深さに関する記述はないが、同じ配合で150mmの供試体では、平均値で33mmの中性化深さが記録されている(図-2.2)。配合が同じであることから、60mmの供試体でも同程度に中性化が進行したと考えると、中性化深さがかぶり(23.7mm)を超えていたと推測される。

図-2.3における図中の白線は中性化深さを示している。ただし、骨材部では骨材を横切るように点線で線が描かれている。腐食が生じた60mm(かぶり23.7mm)の供試体では中性化深さが鉄筋以深に到達し、一方で、腐食が生じなかった150mm(かぶり68.7mm)の供試体では中性化深さが鉄筋表面に達していなかった。博士らは、この事例に着目し、中性化が鉄筋腐食の主因と結論付けた可能性が高いと考えられる。なお、コンクリートの防錆力の高さに魅せられ、既に中性化研究に邁進していたためか、当初の研究動機であった湿度(降雨)の影響に関する検討は尽くされていない。

表-2.1 配合と中性化深さ⁶⁾

記号	配合 C : S : G	中性化深さ (mm)	推定水セメント比 W/C (%)
1	1 : 1 : 2	6.5	42
2	1 : 2 : 4	14	64
3	1 : 3 : 6	33	92
4	1 : 5 : 10	43	160

表-2.2 暴露 20 年による鉄筋コンクリートの腐食状況⁶⁾

記号	上段：供試体寸法，下段：かぶり (mm)		
	60×60×600 237	150×150×600 68.7	600×600×900 239.7
1	—	付き固め不足による空隙 部においてのみ発錆	—
2	—	同上	—
3	完全に腐食した。 腐食ひび割れが発生。	同上	豆板の発生部において、 鉄筋表面積の 10%程度に赤 錆が発生
4	—	配合の良否に基づく空隙 によって、鉄筋表面積の 30%程度が腐食	—

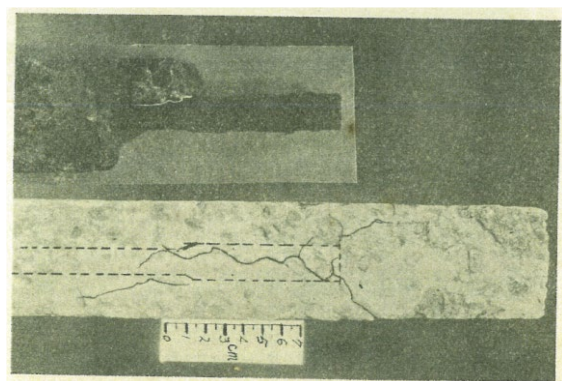


図-2.2 暴露 20 年の腐食状況⁶⁾
(かぶり 23.7mm, 配合 3)

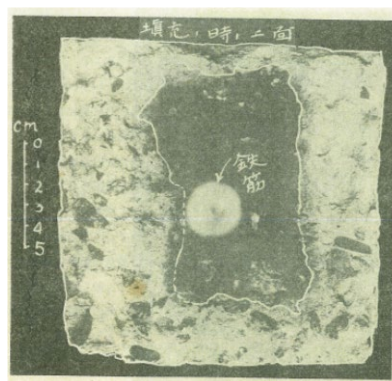


図-2.3 暴露 20 年の中性化の状況⁶⁾
(かぶり 68.7mm, 配合 3)

2.4.2 土木分野における中性化の取扱い

土木学会では昭和 6 年（1931 年）に初めてコンクリート標準示方書¹¹⁾が制定された。昭和 6 年版では、「第十章鉄筋の保護として必要なるコンクリートの厚さ」にかぶり厚さに関する記述が見られ、部材や暴露環境により異なるが、普通の環境に置かれる構造物を想定した場合、かぶり厚さは 1～2cm 以上とする規定となっている。

性能照査が用いられる転機となったのは、昭和 61 年（1986 年）の示方書の改訂^{12～15)}である。昭和 61 年版では限界状態設計法が導入され、設計編「第 10 章一般構造細目」においてはかぶり厚さの最小値をコンクリートの設計基準強度、部材の種類、環境条件を考慮して設計するように記載されている。このように限界状態設計法の導入を機に、これまで個別に規定されていた強度（水セメント比）とかぶり厚さの両方を考慮して、耐久性が設計されるようになった。

1988年には耐久設計小委員会が設置され、これまでに行われてきた耐久性に関する様々な研究成果を基に耐久性照査の手法が検討された。委員会活動の成果は1989年に「コンクリート構造物の耐久設計指針（試案）」¹⁶⁾、1995年に「コンクリート構造物の耐久設計指針（案）」¹⁷⁾として整理された。指針（試案）では耐久指数と環境指数の大小を比較して、構造物の部材各部における耐久性を照査するというわが国独自の新しい概念が示され、構造物の耐久性に関係する要因の影響を定量的に評価する耐久性ポイントの算定方法も本書で提示された。指針（案）では指針（試案）の内容で生じた疑問点や問題点に対する修正を加え、付録には中性化を対象とした耐久性照査手法も掲載された。この付録で提示された照査手法では、耐久性上の限界状態をコンクリート構造物に有害なひび割れが発生する状態と設定している。コンクリート中に埋設された鋼材に腐食が発生した時点を限界状態とする方法も考えられたが、鋼材の腐食発生はコンクリート構造物の耐久性の低下には直接結びつかず、耐久性上の要件としては厳しすぎると判断された。一方で、有害なひび割れの発生は耐久性の低下に直接影響を及ぼし、腐食発生後から有害なひび割れの発生までの期間を妥当に予測できるのであれば、この方が合理的であると考えられた。耐久設計では、コンクリート構造物の発注者（あるいは委託された設計者）が定めた設計耐用期間 T_d と、コンクリート構造物の建設後鉄筋の腐食によりコンクリートに有害なひび割れが発生するまでの期間である耐久限界期間 T_s を比較し、 T_s が T_d 以上であること、すなわち設計耐用期間中に限界状態に至らないことを照査する（式 2.1）。 T_s は一般に、供用開始後から鉄筋腐食が開始するまでの期間 T_{cr} に、鉄筋腐食開始後からコンクリートに腐食ひび割れが発生するまでの期間 T_{ck} を加えたものとして表される。

$$T_s = T_{cr} + T_{ck} \quad (2.1)$$

T_{cr} の算出では等価かぶり、中性加速度係数、コンクリートの品質係数、環境係数、表面仕上げ材の耐用期間が用いられている。等価かぶりとは、図面上の最小かぶりから施工ごぎ、摩耗や凍害などによる表面剥離などの影響を差し引いたものである。中性加速度係数には、岸谷、檜野の実験結果および、梶田、棚野の数値解析結果が参考とされた。コンクリートの品質係数は、コンクリートの水セメント比、セメントや骨材の種類、打継ぎ目の有無養生条件およびひび割れなど、直接コンクリートの品質に影響を及ぼす要因のほか、コンクリートの施工性に影響を及ぼす鉄筋の配筋状況についても考慮され、各要因の積により表されると仮定されている。環境係数は、構造物が置かれる環境ごとに異なる係数で表されている。 T_{ck} の算出には、ひび割れ抵抗性にかかわる係数、等価かぶり、コンクリートの品質係数、環境係数が用いられている。ひび割れ抵抗性にかかわる係数は、森永の実験式、武若・松本の実験結果を参考として算出される。なお、コンクリートの品質係数と環境係数については、 T_{cr} と T_{ck} で算出方法が異なる。コンクリートの品質係数については、 T_{cr} の場合、水セメント比、セメント種類、骨材の種類がそれぞれ考慮されており、水セメント比に関しては岸

谷式による結果と整合するように係数が定められている。その一方で T_{ck} の場合には、 T_{cr} と同様に水セメント比および単位水量、セメント種類、骨材の種類のほか、ひび割れ幅や設計、施工および養生も考慮されている。なお、水セメント比および単位水量に関しては出頭らの研究成果より得られた、コンクリートの酸素拡散係数と水セメント比、スランプ値ならびに細孔容積の関係を参考としている。環境係数に関しては、 T_{cr} の場合、JCI の「鉄筋コンクリート構造物の耐久設計に対する考え方」を参考として、温度、湿度、 CO_2 濃度を考慮した地域ごとに異なる係数と表面の濡れ程度にかかわる補正係数の積で表される。一方 T_{ck} の場合は、鉄筋腐食開始後からコンクリートのひび割れが発生する期間には、コンクリート中の含水状態が極めて密接に関係するとして、コンクリートの含水状態と環境湿度を対応させて評価することを基本としている。具体的には、環境湿度に関わる係数が以下の表のように示されており、大気中の環境湿度に応じて異なる係数が定まっているのは注目すべき事実である。このほか、環境温度、コンクリート面への日射の影響も考慮している。

2.4.3 性能照査型への移行

1995 年には、本格的な性能規定型のコンクリート標準示方書を 10 年後に作成することを目的に、コンクリート標準示方書改訂に関する中長期ビジョンの小委員会が設置された。この委員会の長期品質 WG では、凍害、アルカリ骨材反応、化学的浸食、溶出、塩害、中性化に加え、コンクリート中の水の移動またはセメントの化学反応と耐久性に関して、現状におけるそれらの評価技術と今後の研究の方向性を整理するとともに、既往の研究結果に基づいて耐久性照査に関する改訂原案¹⁸⁾が作成された。

中性化の進行に関してはメカニズムが明確にされてきており、モデル化も比較的進んでいる状況にあった。しかし、物質移動に影響を及ぼす初期欠陥の有無や構造物の設置環境のモデル化に関しては研究途上にあった。コンクリート中の鋼材の腐食に関しては、Pourbaix 図によって腐食域、安定域、不動態域のいずれにあるか判定ができ、理論的には腐食開始時期や中性化による腐食速度の予測が可能であった。ただし、これらの予測は比較的単純なイオン組成の溶液中の結果に基づくものであり、精度の高い予測を行うためにはコンクリート中の環境に近い状態を対象とした Pourbaix 図および pH と腐食速度の関係が必要とされていた。腐食により生じたひび割れと物質移動抵抗性の関係についても検討が十分ではなく、 \sqrt{t} 則による中性化深さの算定、中性化残りを指標とした腐食開始時期（岸谷・小林）の判定と腐食進行予測（佐伯・大即）が、1999 年制定[施工編]-耐久設計照査型¹⁹⁾において採用されている。

中性加速度係数は土木学会フライアッシュ研究小委員会で実施された混和材を含むコンクリートの実験結果をバックデータとして検討されている。環境（含水率）の影響を表す係数については、環境条件や施工の良否の影響を受けるため、岸谷らの研究を参考に定め、構造物の設置環境と施工状況に起因する中性化深さのばらつきを考慮した安全係数を定めている。

2.4.4 中性化残りとコンクリートクライシス

中性化の進行程度と鉄筋の腐食開始時期との関係を検討する際に用いられる指標である中性化残りは、1979年に岸谷博士によって提案された²⁰⁾。岸谷らは、フェノールフタレイン法による変色点と鉄筋間の距離が塩分を含まないコンクリートでは8mm、塩分を含むコンクリートでは約20mmを下回ると、腐食が生じることを発見した。これはフェノールフタレインによって変色する領域と、pHの値の低下が全く見られない限界との距離が9～11.5mmであることや、詳細なメカニズムは不明だがコンクリート中の塩分の移動が関与している可能性を指摘している。このように中性化残りは簡易に鋼材腐食を判定される指標とされてきた。しかしながら建築分野の規準類には採用されなかった。中性化残りのメカニズムが検証されその意義が見出されるきっかけとなったのは、1980年代中頃から顕在化した「コンクリート構造物の早期劣化」である。

1964年以降に建設された実構造物では、炭酸化速度が大きい傾向にあり、岸谷らによる推定値に比べ2～3倍の速度で炭酸化が進行しているとの報告がされた。実構造物より採取したコアを用いた熱分析の結果では、炭酸カルシウムの量が水酸化カルシウムを供給源とした生成量を上回り、水酸化カルシウムが炭酸カルシウムになるという従来考えられてきたメカニズムだけでは説明がつかなかった。小林一輔博士は、この炭酸カルシウムはC-S-Hに由来するのではないかと考え、国内外の文献を精力的に調査した。その結果、セメント科学の分野では、実験室で造成したケイ酸カルシウム水和物が炭酸化すると、炭酸カルシウム、シリカ、水に分解されることが明らかにされていることを知った。

小林博士は、鈴木一孝博士の協力を得て、重液分離による分析を行い、コンクリート構造物で生じた炭酸化によるC-S-Hの分解現象を実証した。また炭酸化によってエトリンガイトとフリーデル氏塩の分解が起き、細孔溶液中に硫酸イオンと塩化物イオンが遊離するため、イオンの濃度拡散現象により、コンクリート内部にこれらのイオンが移動し、濃縮が生じることも元素分析の結果(写真-2.1, 図-2.4)から明らかにした²¹⁾。この硫酸・塩化物イオンの移動・濃縮現象こそが岸谷博士の実験で提唱された中性化残りのメカニズムである。

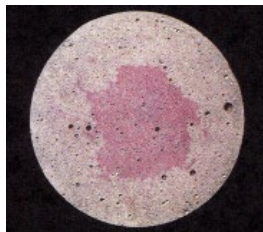


写真-2.1 フェノールフタレインによる呈色反応の結果²¹⁾

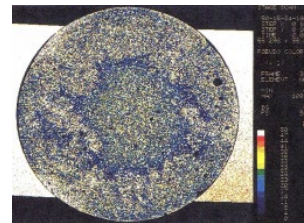


図-2.4 促進炭酸化16週後のナトリウムの面分析結果²¹⁾

2.4.5 強度から水セメント比による規定への変更

従来のコンクリート工学では、中性化は水酸化カルシウムのみが炭酸化するという単純な反応として捉えており、水酸化カルシウムの消費による pH の低下が鉄筋腐食をもたらすと考えられてきた。炭酸化のメカニズムが科学的な観点から研究されてこなかったことに、早期劣化の問題が生じた原因があると小林博士は述べている。加えて、早期に強度を発現するために使用されてきた高アルカリのセメントが炭酸化速度の上昇の要因として挙げている。小林博士は、東京オリンピックが開催された年代（1965～69年、1970～1975年）に建設された同じ設計基準強度である構造物の中性化深さを例として、高アルカリのセメントによる炭酸化速度の上昇を示している。

その後もセメントは変化し続けた。工期短縮、コストの低減など社会からのニーズを満たすためである。岡村博士によって、設計基準強度 21N/mm^2 に対する水セメント比は、1970～80年代で 47～50%、1999年ごろでは 60%近くであることが示されている。このことから、強度が早期に発現する近代のセメントを用いた場合、強度から水セメント比を定めると耐久性を満足するコンクリートの建設は難しいことが分かる。そのため岡村博士は1999年版[施工編]-耐久性照査型-の制定において、強度から水セメント比を定める従来の設計法から早急に脱却すべきであると述べている。

2.4.6 維持管理の実務的観点からの補完

2001年に制定された[維持管理編]²²⁾では、[施工編]で示されなかった鋼材腐食の進行予測手法として、中性化残りを変数とした腐食面積率の算定式が紹介された。

2007年の改訂では、耐久性照査が[施工編]から[設計編]²³⁾へ移設された。構造物の耐久性を設計段階で検討し、構造詳細、材料、施工、維持管理を適切に行えば必要とされる水準の性能が確保できることを客観的な方法で確認してから施工段階に進むという理念が体现された。[設計編]における耐久設計では、一般的な環境下で標準的な耐久性を満足する構造物の最小被りと最大水セメント比の組み合わせが示された。

この仕様は2005年出版「土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[鉄道構造物編]」²⁴⁾に掲載されている、2002年版示方書をもとに作成された「耐久性の検討を満足する水セメント比とかぶりの組み合わせ」が参考とされた。技術と経験の蓄積に立脚した設計解の範囲から確実な解を簡易に選び出すことが可能であり、耐久性照査を省略しても不都合が生じないと考えられる標準的なコンクリートの品質とかぶりの組み合わせである。客観的、科学的な方法で構造物の各種性能を照査することを旨とする性能照査を実務的観点から補完している。

また、かぶりの設計値 cd が新たに定義された。かぶりの設計値は、耐久性照査に用いるかぶりであり、かぶり c から施工誤差 Δce を差し引いたものである。等価かぶりと同義であるが、実構造物を用いた調査によって施工誤差が検証され、施工誤差は最大でかぶりの値の10%である結果が反映されている。

2013年に改訂された[維持管理編]²⁵⁾では、実構造物の貯砂や維持管理に関する研究成果として、第三者影響度の評価・判定や水掛かりに着目した維持管理手法が示方書へ反映された。中性化によって安全性や使用性が失われる状況に至る例はほとんど報告されていないことを受け、かぶりの剥離・剥落などの第三者影響度は、外観上のグレードなどにより性能が評価・判定されることになった。第三者影響度は性能評価式が確立されず、設計では直接照査されない性能であるが、維持管理の上では重要とされている。

劣化機構の推定が容易でない場合は、劣化現象の面から見た維持管理を行うこととしている。そのひとつに水掛かりが挙げられており、様々な劣化を引き起こすもしくは促進させる要因として紹介している。付属資料には、道路構造物と鉄道構造物を対象とした水掛かりに配慮した維持管理事例が掲載され、水掛かりの重要性が喚起されている。

2.4.7 中性化による限界状態の再考

水掛かりに着目し、過去の実構造物における鋼材腐食の調査研究が見直された結果、コンクリートの中性化が進んだとしても、鋼材腐食に必要な水と酸素の供給が乏しい場合には鋼材腐食の進展が見られない、あるいは進展が著しく遅いことが報告された。この事実を受け、2017年に改訂された[設計編]²⁶⁾では、中性化深さだけを限界状態の指標とするのではなく、中性化と水の浸透によって発生する鋼材腐食深さをを用いて性能照査を行う手法へと修正された。

2.3 本検討の目的

以上の背景より、現行のコンクリート示方書においては、中性化深さ 10mm を鋼材が腐食し始める閾値として設定し、中性化に伴う鋼材腐食に対する耐久性照査が行われている。多く実構造物の劣化状況調査結果からも支持される中性化残り 10mm という閾値は、鋼材腐食が相当に進行した結果として発生するかぶりコンクリートの剥離・剥落の有無の境界位置のかぶり厚さからも導かれたものである。しかし、石橋らの調査研究に着目すると、雨水等の影響を受ける箇所と雨水等の影響を受けない箇所の何れにおいても、中性化残りが 10 mm を上回っている範囲は元より、単に中性化残りが 10 mm を下回っているだけでなく、中性化深さがかぶり厚さを確実に超えた範囲においても無剥落箇所のデータが多数、しかもほぼ一様に存在していることは注目すべき事実である。この事実は、かぶりコンクリートの剥落は、中性化深さの程度にかかわらず生じている可能性を強く示唆している。そこで本研究では、実構造物の調査結果を統計的に分析し、中性化深さ、中性化残り、かぶり(厚さ)、雨水の有無の各指標がかぶりコンクリートの剥離・剥落の事象発生に与える影響度や、それぞれの耐久性指標としての有意性について検討することを本章の目的とした。

2.4 検討概要

2.4.1 検討対象構造物

本検討における分析の対象とした構造物は鉄道構造物であり、石橋らの調査研究⁹⁾を活用した。図-2.5 に石橋らの調査研究から引用した、コンクリート片の剥落と中性化残り、雨水等との関係を示す。調査対象構造物は JR 東日本の高架橋等である。首都圏線区の 1970 年以降に建設された高架橋等が主な調査対象とされており、構造物の材齢は調査当時で 15～37 年程度である。なお、ここでの雨水等の影響を受ける箇所は、高架橋などの高欄、地覆、張出スラブ下面（水切りの外側）電柱基礎、桁座などを基本としており、その他にも目視にて雨水等の影響が確認された箇所が含まれている。

本研究では、石橋らの論文⁹⁾中の調査結果を数値化するためにグラフ読取システム GSYS を用いた。測定値が重複し識別が困難であった数カ所を除き、論文⁹⁾中の調査結果をおおむね数値化することができた。データ化した調査結果は、雨水等の影響を受ける箇所では剥落箇所 79 点、無剥落箇所 141 点、雨水等の影響を受けない箇所では剥落箇所 11 点、無剥落箇所 265 点の合計 496 点である。

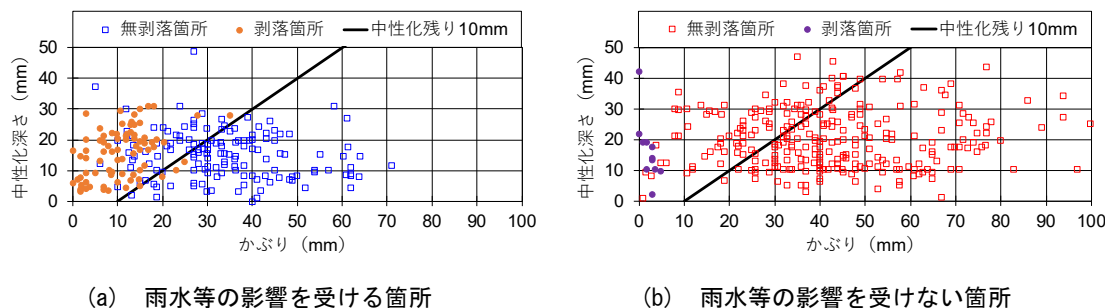


図-2.5 コンクリート片の剥落と中性化残り，雨水等との関係（鉄道構造物）

2.4.2 分析手法

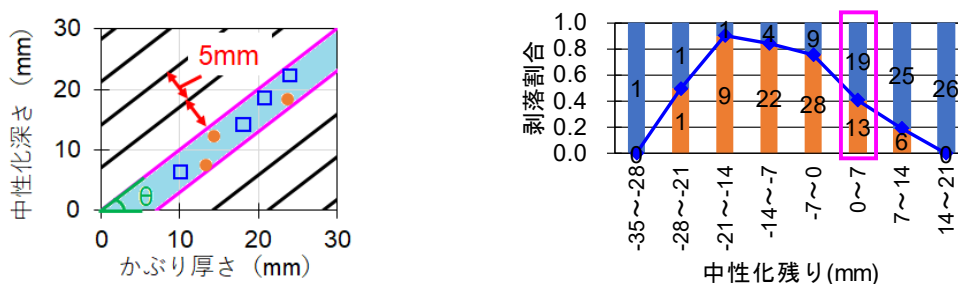
本検討では、以下に示す 3 つの手法によりコンクリート片の剥落に対する中性化深さ、中性化残り、かぶり厚さの各指標の影響度や、それぞれの耐久性指標としての有意性を検討した。

手法 1：検討対象とする構造物より得られた調査結果を中性化深さ、中性化残り、かぶり厚さの各指標を 5mm 間隔で区分し、間隔ごとのコンクリート片の剥落割合を算出することで、コンクリート片の剥落と各指標の相関関係を検討する。本手法を用いた検討では、鉄道構造物の調査結果の中でも鉄筋の腐食リスクが高い、降雨の影響を受ける箇所の測定値を使用し分析を実施した。

手法 2：図-2.6 に検討の概要図を示す。まず、データ化した調査結果を 5 mm 間隔で分割する直線を描き（図-2.6(a)）、2 直線間に含まれる測定値よりコンクリート片の

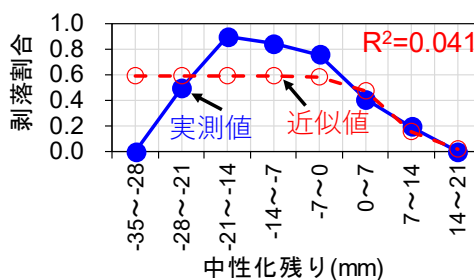
剥落割合を求める (図-2.6 (b)). この際, 直線と x 軸のなす角 θ を一定の変化割合で変化させることで, 角度ごとのコンクリート片の剥落割合が算出できる. その後, 角度ごとのコンクリート片の剥落割合をロジスティック曲線により近似し (図-2.6 (c)), 近似曲線の決定係数からコンクリート片の剥落に対するかぶり厚さと中性化深さの影響度を分析した. なお, コンクリート片の剥落に対し中性化が大きく影響する場合は, 直線の角度 θ が 0° 付近で, かぶり厚さが大きい場合には θ が 90° 付近における近似曲線の決定係数が大きくなる.

直線の角度の検討範囲は $0^\circ \sim 180^\circ$ とし, 近似曲線の決定係数が比較的高い値を示した範囲では角度の変化割合を 1° 刻み, それ以外の範囲では 10° 刻みとした. なお, これに加え中性化残りを示す直線の角度が 45° の場合も検討した.



(a) 任意の角度で一定間隔の直線を描く
(例: $\theta = 45^\circ$ 中性化残り)

(b) 直線間の測定点より剥落割合を算出



(c) 剥落割合を曲線で近似

図-2.6 検討の概要図

手法 3: 医学統計の分野で用いられる統計手法のひとつであるロジスティック回帰分析²⁸⁾により, コンクリート片の剥落に対する影響度の分析を行う. 医学統計の分野にて用いられる統計手法の一つである, ロジスティック回帰分析により分析を行った. ロジスティック回帰分析は, 検討対象である現象の発生確率を P とし, その現象の生起を説明するために観測された量的, 質的な変数群にて, 発生確率 P を説明する場合に用いられる多変量解析の手法である.

ここで, n 個の変数の影響を式(2.2)に示す線形な合成関数とすると, 関数 F に

Z のロジスティック関数を用いた場合、式(2.3)のように表現される。

$$Z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (2.2)$$

(β : 推定値, X : 説明変数)

$$F(Z) = \frac{\exp(Z)}{1 + \exp(Z)} = \frac{1}{1 + \exp(-Z)} \quad (2.3)$$

式(2.2), (2.3)のモデルをもとに、ある事象の発生確率 $p(x)$ を算出するためのロジスティック回帰モデルは、式(2.4)で表すことができる。

$$P(x) = \frac{1}{1 + \exp(-Z)} \quad (2.4)$$

ロジスティック関数による発生確率分布のデータの傾向から算出される、検討対象となる現象の発生確率 $P(x)$ は、0 と 1 の間(0%~100%)の値をとる。本研究では、かぶりの剥落確率 P を目的変数、かぶり厚さを説明変数 x_1 、中性化深さを x_2 、雨水等の影響を x_3 とし、二項ロジスティクス回帰分析を適用することとした。二項ロジスティクス回帰分析は、対象となる現象の生起の有無を表す二値変数（ここではかぶりコンクリートの剥落と無剥落）と、説明変数群との関係をモデル化する場合に適用される二値データの回帰分析法である。

統計学的処理は BellCurve for Excel(Social Survey Research Information Co., Ltd.) を用い、解析においては $p < 0.05$ を有意とした。説明変数の優位性検定には Ward 検定を適用した。

2.4.3 分析により得られた知見の一般性に関する検証

石橋らの調査結果²⁷⁾を分析することで得られた知見の一般性を検証するため、他の既往の研究により得られた調査結果を用い比較検討を行った。ここでは、前原らの調査結果²⁷⁾を比較検討の対象とした。表-2.3 に調査対象の構造物の諸元を示す。前原らは首都圏内の飛来塩分や凍結防止剤など外部からの塩化物イオンの影響が無い一般的な環境下における高架橋、橋梁、擁壁およびトンネルなどの構造物を調査対象とした。材齢は11~87年であり、合計36の構造物の内、23の構造物が竣工から40年以上が経過している。ひび割れや剥離・剥落の有無は目視や打音によって確認している。降雨の影響の有無は、構造物、部材の周辺状況や雨掛かり、漏水による水跡の有無などから判断した。鉄筋位置は、ひび割れや剥離・剥落が生じていない箇所では、電磁レーダ法等の非破壊試験によって把握し、剥離・剥落した箇所では、目視および打音にてその位置を特定している。剥離・剥落箇所では、かぶりコンクリートがなく鉄筋が露出しているために、中性化深さと鉄筋の腐食が剥落発生時に比べ進行していると考えられる。それらの影響を除外するためにも、調査対象とする鉄筋の延長線上で同程度のかぶり厚さがある箇所を、調査の実施箇所とした。かぶり厚さと中性化深さは、調査対象とする位置で、100×100mm程度の範囲を、かぶり側の鉄筋が露出するまではつり、かぶり厚さはノギスを用いて測定し、中性化深さはフェノールフタレイン溶液の噴霧により求めた。特に剥落箇所にてなお、調査結果が図-2.7に示すように「剥離・剥落なし」と「剥離・剥落あり」で区分されていたため、調査結果をデータ化した後、石橋らの調査結果と同様に、図-2.8のように示す雨水等の影響の有無ごとに調査結果を分類した。

表-2.3 調査対象の構造物の諸元²⁷⁾

No.	構造物 種別	部位	竣工年	調査年	経過年数	調査測点
1	高架橋	柱、スタブ下面	1927	1982	55	8
2	高架橋	柱、スタブ下面	1927	2011	84	12
3	高架橋	柱、スタブ下面	1927	2014	87	4
4	高架橋	柱、スタブ下面	1928	2011	83	9
5	高架橋	柱、スタブ下面	1928	2014	86	13
6	擁壁	壁面	1928	2014	86	6
7	高架橋	柱、梁	1929	1999	70	3
8	高架橋	スタブ下面	1929	2014	85	2
9	橋梁	橋台	1932	2012	80	4
10	高架橋	柱	1937	2014	77	5
11	高架橋	柱	1950	2014	64	1
12	高架橋	柱、梁	1957	2008	51	10
13	高架橋	柱、スタブ下面	1961	2010	49	6
14	高架橋	柱、スタブ下面	1964	2010	46	9
15	高架橋	柱、スタブ下面	1964	2014	50	5
16	高架橋	梁	1965	2014	49	1
17	人工物盤	スタブ下面	1966	2008	42	7
18	高架橋	柱、スタブ下面	1966	2011	45	3
19	トンネル	覆工	1966	2014	48	3
20	トンネル	覆工	1966	2014	48	4
21	高架橋	柱、スタブ下面	1968	2010	42	7
22	高架橋	柱、スタブ下面	1968	2010	42	17
23	トンネル	覆工	1972	2014	42	1
24	トンネル	覆工	1977	2010	33	4
25	トンネル	覆工	1977	2014	37	6
26	高架橋	柱、スタブ下面	1982	2014	32	5
27	高架橋	柱、スタブ下面	1984	2011	27	6
28	擁壁	壁面	1987	2008	21	6
29	擁壁	壁面	1987	2013	26	14
30	擁壁	壁面	1987	2014	27	6
31	トンネル	覆工	1987	2014	27	2
32	橋梁	スタブ上面	1989	2008	19	4
33	橋梁	高欄	1989	2010	21	19
34	トンネル	覆工	2003	2014	11	2
35	トンネル	覆工	2003	2014	11	3
36	高架橋	柱、スタブ下面	2003	2015	12	4
	合計					221

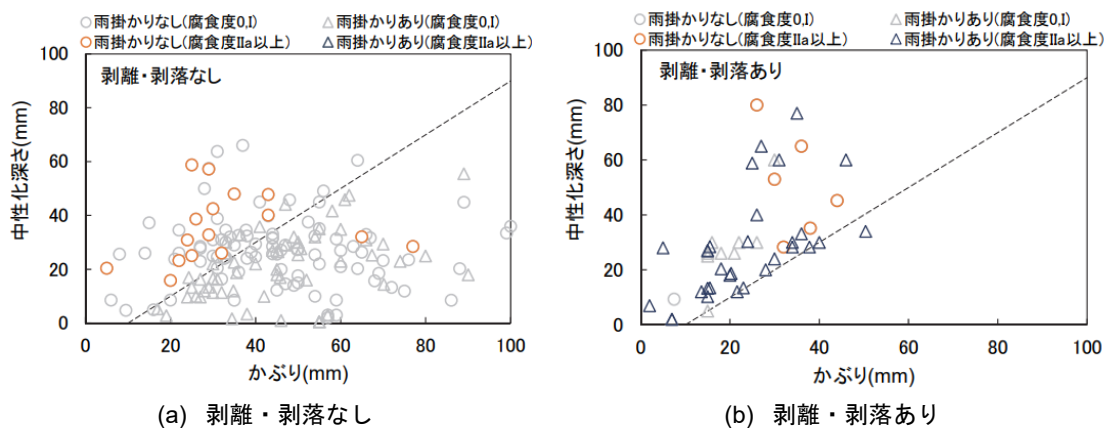


図-2.7 剥離・剥落に及ぼす雨掛かりの影響²⁷⁾

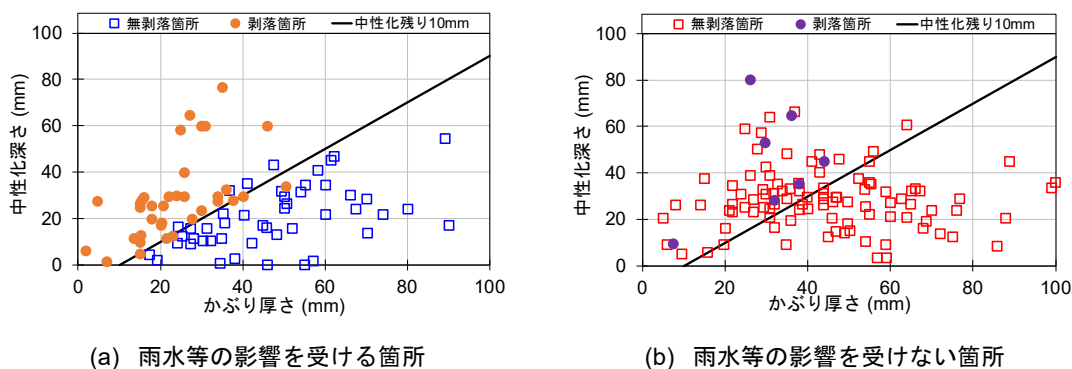


図-2.8 剥離・剥落に及ぼす雨掛かりの影響²⁷⁾

2.5 かぶり厚さ, 中性化深さ, 中性化残りの各指標におけるコンク

リート片の剥落割合の算出

数値化した石橋らの調査結果の中でも、雨水等の影響を受ける箇所の結果を用い、コンクリート片の剥落割合とかぶり厚さ、中性化深さ、中性化残りの関係性について検討を行った。データ化した調査結果はかぶり厚さ、中性化深さ、中性化残りの各指標にて5mm間隔で区分し、間隔ごとのコンクリート片の剥落割合を算出した。図-2.9, 10, 11にコンクリート片の剥落割合とかぶり厚さ、中性化深さ、中性化残りの関係を示す。図の棒グラフ中には剥落または無剥落箇所の数を示す。

図-2.9より、かぶり厚さの増加に伴い剥落割合は低下しており、既往の知見¹⁾と同様の傾向を確認した。かぶりが厚いほど劣化因子が鋼材まで到達しにくく、鉄筋の腐食が抑制されたためと考えられる。一方、図-2.10では、中性化深さの増加に伴って剥落割合が僅かに減少した後に増加するものの、中性化深さと剥落割合には明確な相関関係は見られず、コンクリート片の剥落に中性化がほとんど関与していないことを明確に示している。図-2.11で

は、図中の左端の部分を除けば、中性化残りが増加するにつれて、剥落割合が減少する傾向を示しており、両者の間には相関があるように見えるが、かぶり厚さを指標とした場合（図-2.9）に見られたほどの高い相関は見られない。中性化残りは、かぶり厚さから中性化深さを差し引いた指標であり、かぶり厚さと中性化深さの情報が含まれている。前述したように、かぶり厚さに比べ中性化深さはコンクリート片の剥落へ及ぼす影響がほぼないことから、剥落割合と中性化残りに高い相関が見えるのは、かぶり厚さがコンクリート片の剥落に対して強い相関を持つことが大きく影響しているためと考えられる。

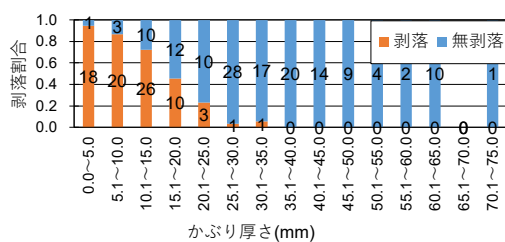


図-2.9 コンクリート片の剥落割合と
かぶり厚さの関係

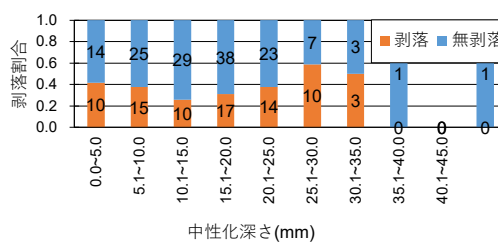


図-2.10 コンクリート片の剥落割合と
中性化深さの関係

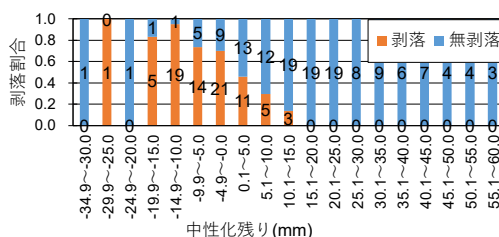


図-2.11 コンクリート片の剥落割合と中性化残りの関係

2.6 近似曲線の決定係数を用いた検討

前項ではかぶり厚さ、中性化深さ、中性化残りの剥落に対する影響を定性的に検討したが、本項では、剥落割合の近似曲線の決定係数を用いて、上記の影響度を定量的に検討する。

図-2.12, 13に直線の角度を45°, 87°とした場合のコンクリート片の剥落割合とかぶり厚さの関係、図-2.14, 15に剥落割合の近似直線、図-12に各角度における近似曲線の決定係数を示す。なお、図-2.14, 15の棒グラフには剥落もしくは無剥落箇所の数を示す。

図-2.12および図-2.14より、直線の角度を45°とした場合、剥落割合の近似曲線の決定係数は低下した。これは、他の測定点に比べて視覚的に中性化深さが大きい2点の影響である。一方、図-2.13および図-2.15に示す直線の角度を87°とした場合は、前述の2点を含んでいても、近似曲線の決定係数は高い。この結果は、中性化残りに比べかぶり厚さがコンクリート片の剥落に大きく影響を及ぼすことを示唆している。図-2.16に示す剥落割合の近似曲線の決定係数に着目する。直線の角度が87°を境に、近似曲線の決定係数は、直線の

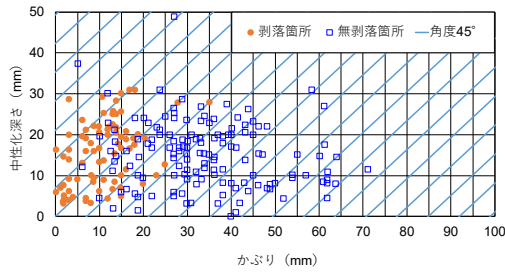


図-2.12 かぶり厚さと中性化深さの関係
($\theta = 45^\circ$)

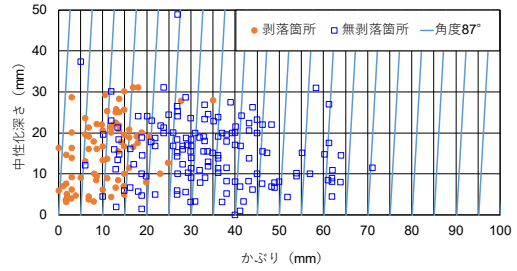


図-2.13 かぶり厚さと中性化深さの関係
($\theta = 87^\circ$)

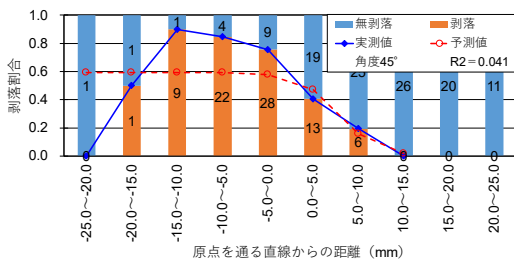


図-2.14 剥落割合の近似曲線 ($\theta = 45^\circ$)

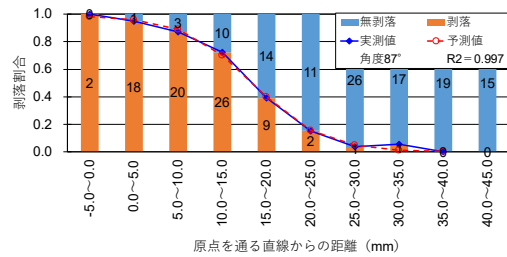


図-2.15 剥落割合の近似曲線 ($\theta = 87^\circ$)

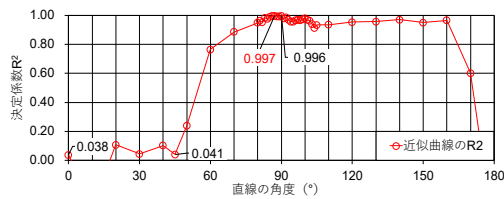


図-2.16 各角度における近似曲線の決定係数

傾きが小さくなるにつれて低下し、角度が 87° を超える範囲では $0.86 \sim 0.997$ を推移している。 90° に近づくほど決定係数が高くなった結果からも、かぶり厚さが剥落に対する有意な指標であると言える。また、直線の角度が 30° 以下で、決定係数が限りなく 0 に近づくことから、中性化の剥落に対する影響度は小さいことがわかる。加えて、中性化深さとかぶり厚さの情報を併せ持つ中性化残り（角度 45° ）の決定係数も低いことが確認できた。実構造物では、雨掛かりの影響があるか否かを判別しづらい部位もある。また、実構造物における中性化の進行は雨水の影響を受けるためばらつきを有する。雨水の影響の有無を明確にできないことから、中性化深さや中性化残りは、剥落に対する有意な指標とは言えない。

2.7 ロジスティック回帰分析による検討

本検討では、コンクリート片の剥落に対する中性化深さ、中性化残り、かぶり厚さの有意性について、分析手法を変え再度検証する。なお、分析手法としては、医学統計分野で用いられるロジスティック回帰分析を使用するとともに、雨水の影響の有無を新たな指標として加え、分析を行った。

ロジスティック回帰分析による解析結果を表-2.4、調査結果と解析によって得られたモデルから算出された予測値との比較を表-2.5に示す。

表-2.4に示す解析結果より、今回の検討にて説明変数として用いたかぶり厚さと雨水等の影響のp値は、それぞれ0.01を下回り、1%の有意水準で有意差が認められた。一方、中性化深さについては、p値が0.264であり0.05に比べ大きく、5%の有意水準では有意差は認められなかった。そのため、今回の解析結果の範囲内では、かぶり厚さと雨水等がかぶりコンクリートの剥落の支配的な因子である可能性が示唆された。

今回の解析にて用いた説明変数の中では、雨水等の影響の係数 β が正の値であり、オッズ比は1より大きくなった。そのため、雨水等の影響は、検討対象となるかぶりコンクリートの剥落の発生確率を増加させる要因であることが解析結果より示された。

一方、かぶり厚さの係数 β は負の値であり、オッズ比は1未満となった。これは、かぶり厚さの増加により、かぶりコンクリートの剥落の発生確率が低下することを意味する。既往の調査結果²⁾においては、かぶりコンクリートの厚さが20mm～25mm以上の場合には、かぶりコンクリートの剥落はほとんど生じておらず、鉄筋の腐食膨張圧によるかぶりコンクリートの剥落は、かぶり厚さの不足や雨水等の影響が主な要因であることが報告されており、今回の解析結果はこれらの既往の知見と整合するものと考えられる。オッズ比の値が1に

表-2.4 回帰分析による解析結果

説明変数	係数 β	オッズ比	p 値
かぶり厚さ	- 0.2643	0.7678	2.81×10^{-14}
中性化深さ	0.0274	1.0278	0.264
雨水等の影響	3.6301	37.7169	1.08×10^{-9}

表-2.5 調査結果と予測値との比較

説明変数	調査結果の測定数		予測値と調査結果が整合した数		判別的中率 (%)	
	有	無	有	無	有	無
雨水の影響						
無剥落	141	264	126	262	89.4	99.2
剥落	79	11	70	6	88.6	54.5
全体	496		464		93.6	

近い値であるほど、対象とする現象の発生に対する説明変数の影響力は小さい。今回の解析によって得られたかぶり厚さと雨水の影響のオッズ比を比較すると、雨水等の影響に比べかぶり厚さのオッズ比はより 1 に近い値である。そのため、かぶりコンクリートの剥落には、かぶり厚さに比べ雨水等の影響がより大きな影響を及ぼすものと考えられる。

表-2.5 より、調査結果と解析によって得られた回帰モデルから算出した予測値を比較すると、雨水等の影響がある場合は、無剥落箇所、剥落箇所ともに判別の中率が 89.4%、88.6% となり、高い精度で予測が可能であるモデルであることが分かる。一方、雨水等の影響を受けない場合では、無剥落箇所については 99.2% と高い判別の中率となったが、剥落箇所ではモデルの判別の中率が 54.5% と低い傾向を示した。この原因としては、雨水の影響を受けない箇所における剥落に関する測定数が少ないことが考えられる。しかし、雨水の影響を受けない環境下でのコンクリート片の剥落リスクは低く、本検討にて使用した調査結果の降雨の影響を受けない箇所で得られた調査結果のうち、コンクリート片の剥落が生じているのはかぶり厚さが約 5mm を下回る範囲のみである。この事実より、かぶり厚さの不足が剥落の直接的な原因として考えられるとともに、かぶり厚さが一定の厚さ以上に確保されている場合においては、本検討で得られたモデルは十分な精度を確保できていると考えられる。

これまでは、石橋らの調査結果を用いてコンクリート片の剥落に対するかぶりと中性化深さの関係性を検討してきたが、この分析により得られた知見の普遍性を検証するため、前原らの調査結果との比較検討を行うこととした。

2.8 調査結果の比較検討

2.8.1 調査結果の比較（降雨の影響を受ける箇所）

図-2.17 に石橋らと前原らの調査結果^{1,27)}を示す。なお、ここでは鋼材腐食のリスクの高い降雨の影響を受ける箇所の調査結果を比較する。石橋らの調査結果（図-2.17(a)）では、本研究の分析結果から剥落リスクに対しかぶり厚さが支配的な因子であるのに対し、前原

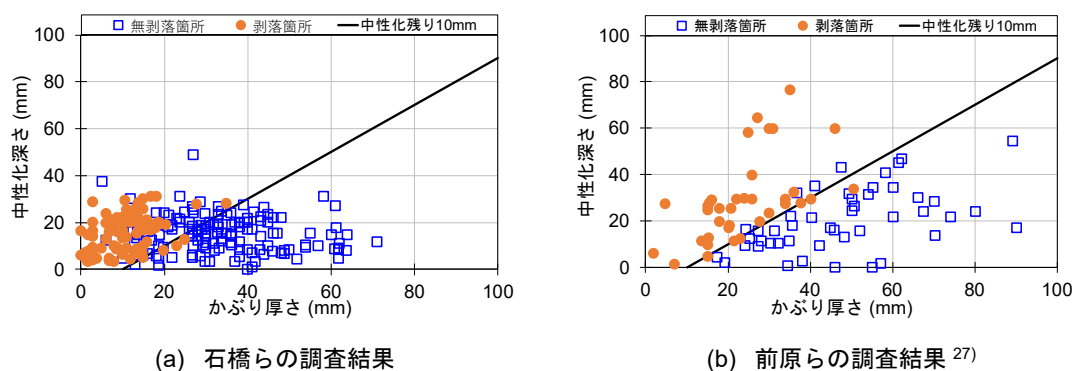


図-2.17 降雨の影響を受ける箇所における調査結果の比較

らの調査結果（図-2.17(b)）では、中性化残り 10mm を境に無剥落箇所と剥落箇所が明確に区分されている。これより、調査結果によりコンクリート片の剥落リスクに対する支配的な要因が異なる可能性が示唆された。

2.8.2 かぶり厚さ、中性化深さ、中性化残りの各指標におけるコンクリート片の剥落割合の算出（前原らの調査結果）

前項でも前原らの調査結果においては、中性化残りがコンクリート片の剥落の支配的な要因であることを確認したが、本項ではコンクリート片の剥落とかぶり厚さ、中性化深さ、中性化残りの各指標の関係性をより詳細に分析するため、前原らの調査結果をかぶり厚さ、中性化深さ、中性化残りの各指標にて 5mm 間隔で区分し、間隔ごとのコンクリート片の剥落割合を算出した。図-2.18, 19, 20 にコンクリート片の剥落割合とかぶり厚さ、中性化深さ、中性化残りの関係を示す。

図-2.18, 19 より、コンクリート片の剥落割合とかぶり厚さには相関が見られる一方、中性化深さに関しては、剥落割合との相関は見られない。この傾向は石橋らの調査結果と同様である。しかし、図-2.20 の中性化残りに着目すると、石橋らの調査結果では明確な相関が見られなかったのに対し、前原らの調査結果ではかぶり厚さに比べ強い相関が確認できる。本検討結果を踏まえ、次項では石橋らと前原らの調査結果によりコンクリート片の剥落に対する支配的な要因が異なる原因を考察することとした。

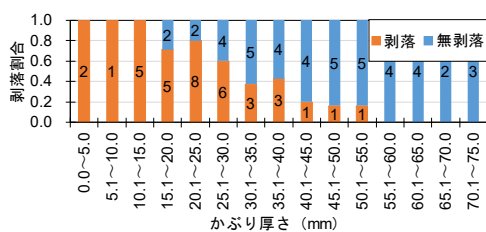


図-2.18 コンクリート片の剥落割合とかぶり厚さの関係

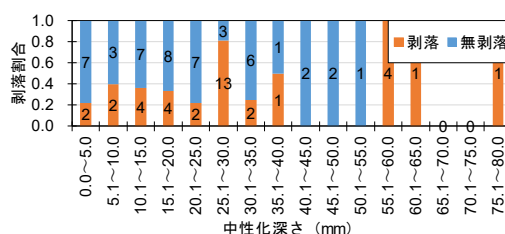


図-2.19 コンクリート片の剥落割合と中性化深さの関係

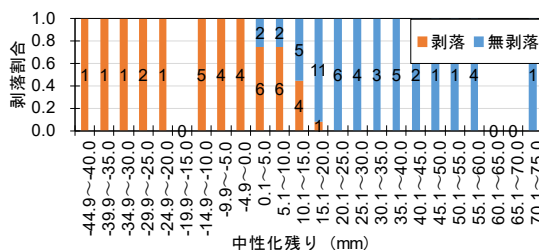


図-2.20 コンクリート片の剥落割合と中性化残りの関係

2.8.3 剥落リスク評価指標としての中性化残りの有効性に関する考察

図-2.21 にコンクリート片の剥落リスクに影響を及ぼす要因に関するイメージ図を示す。一般的には中性化が進行するほど、鉄筋近傍の pH は低下し腐食環境は高まり剥落が発生しやすくなる。一方、中性化深さが顕著に進行しない場合は、コンクリート中は高アルカリ性に保たれ、不導体被膜が破壊されないために剥落リスクは低い。しかし水掛かりの観点では、中性化が進行している場合は、水分の供給量が少なく乾燥し易い環境と考えられ、剥落リスクは低い。中性化が進行していない場合は、水分の供給量が多いため二酸化炭素のコンクリート中への侵入が抑制されていると考えられるため、水掛かりの視点に立つと剥落の危険性が高いと判断される。すなわち、中性化深さを剥落リスクの評価指標とした場合、コンクリート中の pH または水掛かりの観点では反対の意味合いを持つこととなる。この図の解釈を踏まえ、図-2.17 に示す前原らの調査の詳細を分析する。

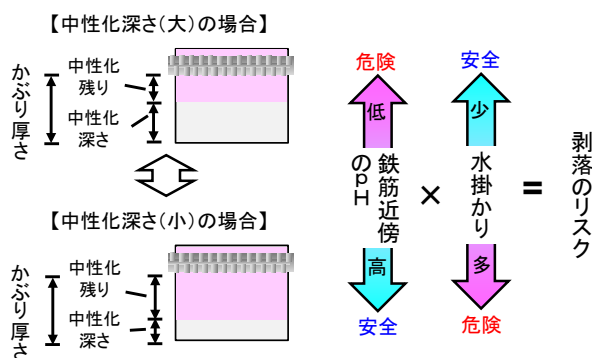


図-2.21 剥落リスクに影響を及ぼす要因に関するイメージ図

前原らの調査概要を整理すると、降雨の影響の有無は、構造物、部材の周辺状況や雨掛かり、漏水による水跡の有無などから判断されていた。そのため、降雨の影響が明確な箇所を選定して実施された調査と考えられ、水分は鉄筋腐食や剥落が生じるのに必要な量が供給されていると推察される。この場合、水掛かりに関しては比較的固定された条件下であるため、剥落リスクは中性化の進行程度に強く左右されることとなり、前原らの調査結果では中性化残り 10mm が剥落リスクの支配的な因子となったと考えられる。

一方、石橋らの調査では、降雨の影響を受ける箇所は、高架橋などの張出部に位置する高欄、地覆、張出スラブ下面（水切りの外側）等に加え、目視で降雨の影響が確認された箇所とされている。降雨の影響を受けない箇所は、張り出しの内側に位置する張出スラブ下面（水切り内側）、中間スラブ下面、縦梁、横梁、柱等と定められており、部材単位で降雨の影響の有無が区分されている。ゆえに調査対象箇所の水分の供給量やその頻度が明確ではなく、降雨の影響を受ける場合でも水掛かりの頻度が少ない箇所が含まれていると考えられる。すなわち、中性化が進行している箇所でも、腐食の発生要因となる水分の供給量が少ない可能性があり、水掛かりの多寡と中性化の進行の両方が鋼材腐食に及ぼす影響が相

殺されるため、中性化残りの観点からは剥落リスクを適切に評価できないものと考えられる。

前原らと石橋らの調査内容と結果を踏まえると、一般的な維持管理の現場では、石橋らの調査のように部材などで降雨の影響の有無は区分されるため、水掛かりの頻度の多寡が不明確となり、中性化残りは剥落リスクの適切な評価指標とはならず、むしろ維持管理の現場の技術者の判断を惑わせる要因となっているものと考えられる。なお、前原らの調査結果では中性化残り 10mm で剥落箇所と無剥落箇所が明確に区分されている。しかし、中性化残り 10mm で剥落するためには、中性化残りが 10mm 以上確保されている段階にて腐食が生じている可能性があり、現状の設計段階で考慮されている中性化残り 10mm を下回ると腐食が生じ始めるという仮定と乖離が生じている。この点については今後、より詳細な検討が必要なものと考えられる。

2.9 まとめ

本研究では、「鉄筋周りのコンクリートが中性化すると鉄筋表面の不動態皮膜が破壊され、鉄筋腐食の進行を許す」というコンクリート工学で常識となった仮定の、根拠となった研究を検証した。そして、実構造物の調査結果を用いて分析することで、中性化深さ、中性化残り、かぶり厚さ、雨水の影響の有無が耐久性指標として有意であるかを検証した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 中性化により鉄筋腐食の進行が許されるという仮定が導き出された実験では、腐食が確認されたのはかぶりが 20 mm 程度の供試体だけであった。供試体は完全に中性化していると考えられるが、かぶり厚さと 20 年間の曝露期間を考慮すれば、鉄筋腐食の因子として、雨水の影響も否定できない実験であった。
- 2) 剥落割合の統計分析の結果では、かぶり厚さは剥落に対し大きな影響度を示した。一方で、中性化深さおよび中性化残りの影響度は小さく、特に中性化深さは変状発生リスク評価の攪乱因子である可能性が示唆された。
- 3) ロジスティック回帰分析では、コンクリート片の剥落に対する中性化深さの有意性は認められず、かぶり厚さと雨水等の影響が支配的な因子であることが示された。また、かぶり厚さに比べ、雨水等の影響は剥落に対してより影響を及ぼす解析結果が得られた。
- 4) 既往の調査結果を比較検討することにより、一般的な維持管理の現場では、水分の供給量の多寡が不明確であるために、中性化残りは剥落リスクの適切な評価指標ではないことを確認した。

以上の結果から、剥落の指標としての中性化、中性化深さ、かぶり厚さ、雨水の影響の有意性について述べる。

本検討にて得られた結果を踏まえると、一般的な維持管理の現場では、水分供給量が不明確であるために、測定意図に反し、中性化深さは変状発生リスク評価の攪乱因子となると考えられる。したがって、不必要な予防保全を行わないように、特に鉄筋の腐食リスクの高いと思われる雨水等の影響を受ける箇所においては、中性化残りを耐久性の評価指標とすべきではない。一方で、降雨の影響が明確な箇所のみを維持管理の対象とする場合は、中性化残りは剥落リスクの評価指標となり得る。そのため、中性化の観点から耐久性を判断する際には、水の影響を適切に把握することが重要であると言える。

耐久設計段階では、水などの劣化因子の侵入に対する抵抗性の代替評価指標として中性化深さを採用することの暫定的な意義はあると考えられるが、将来的には、鋼材の腐食とかぶりコンクリートの剥離・剥落現象を直接支配する劣化現象の影の主役である水の浸透を評価する設計体系に移行すべきである。

第2章の参考文献

- 1)石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人: 高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.125-134, 2002.8
- 2)土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2012.3
- 3)廣井勇: 海中工事に於ける鉄筋混凝土, 土木学会誌, 第一巻, 第一号, pp.5-10, 1915.
- 4)佐野利器: 鋼材腐食試験第一回報告, 震災予防調査会報告, 第74号, pp.25-41, 1911.
- 5)内田祥三: 鋼材腐食試験第二回報告, 震災予防調査会報告, 第76号, pp.1-31, 1913.
- 6)内田祥三, 濱田稔: 鋼及びコンクリートの耐久試験, 建築雑誌, 516号, pp.1287-1303, 1928.
- 7)Minoru Hamada: Neutralization (Carbonation) of Con-crete and Corrosion of Reinforcing Steel, Proceedings of The Fifth International Symposium on Chemistry of Ce-ment Tokyo, Vol.3, pp.343-384, 1968.
- 8)A. M. Neville: Properties of Concrete, Pitman Publishing Limited, 1973.
- 9)V. S. Ramachandran, R. F. Feldman, J. J. Beaudoin: CONCRETE SCIENCE, 1982.
- 10)P. K. Mehta, P.J.M. Monteiro: CONCRETE, College Custom Series, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1985.
- 11)土木学会: 昭和六年土木学会鉄筋コンクリート標準示方書, 1931.
- 12)土木学会: 昭和61年制定コンクリート標準示方書[設計編], 1986.
- 13)土木学会: 昭和61年制定コンクリート標準示方書[施工編], 1986.
- 14)土木学会: 昭和61年制定コンクリート標準示方書[舗装・ダム編], 1986.
- 15)土木学会: 土木学会規準(昭和61年版), 1986.
- 16)土木学会: コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)コンクリートライブラリー65, 1989.
- 17)土木学会: コンクリート構造物の耐久設計指針(案)コンクリートライブラリー82, 1995.
- 18)土木学会: コンクリート標準示方書改訂に関する中長期ビジョンーコンクリート委員会・示方書小委員会幹事会報告ーコンクリート技術シリーズ32, 1999.
- 19)土木学会: 平成11年版コンクリート標準示方書ー耐久性照査型ー, 1999.
- 20)岸谷 孝一, 檜野 紀元: コンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究 その1 コンクリートの中性化深さが鉄筋腐食に及ぼす影響について, 日本建築学会論文報告集, Vol.283, pp.11-16, 1979.
- 21)小林一輔: コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No.433, V-15, pp.1-14, 1991.
- 22)土木学会: 2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], 2001.1
- 23)土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2008.3
- 24)土木学会: コンクリート標準示方書に基づく設計計算例(鉄道構造物編)コンクリートライブラリー118, 2005.4
- 25)土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2013.3

- 26)土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2018.3
- 27)前原聡，伊与田岳史：雨掛かりの有無が中性化によるかぶりの剥離・剥落に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.74，No.2，pp.80-87，2018.
- 28)栗原伸一，丸山敦史，ジグレイブ：統計学図鑑，オーム社，pp.207，2017.9

第3章 材齢初期の養生による品質向上効果の検証

3.1 はじめに

コンクリート構造物の長期耐久性は材料や配合，施工方法，周辺環境，養生など複数の要因による影響を受ける．その中でも養生については近年様々な手法が開発されるとともに^{1,2)}，東北地方の復興道路・復興支援道路では耐久性向上の取組みの一環としてトンネルの坑口部分の型枠存置期間が1週間に設定されるなど，数多くの実構造物にて養生による品質確保に向けた積極的な工夫が施されている³⁾．

養生の影響を受けるコンクリート表層部の品質評価には透気性や吸水性等に着目した試験方法^{4,5)}が提案されており，国内外で研究が行われている．これらの試験方法を用いて表層品質を検討する場合，実構造物を対象とした既往の研究⁶⁾や海外の規格⁷⁾では材齢28～91日の竣工時点での表層品質が主な検討対象とされている．しかし数十年あるいは100年を超える構造物の寿命を想定すると，これらの検討における試験期間はごく初期の材齢に留まっており，長期の耐久性を議論するには不十分である．

そのため，養生期間の長期化や新たな養生手法の構造物への適用が進む中でも実構造物の長寿命化に対して養生が担う役割は十分に明らかになっておらず，養生に必要以上の労力や費用，時間が割かれている可能性も考えられる．

3.2 養生に関する既往の研究

コンクリート構造物の耐久性を確保するには，鋼材の腐食因子となる液状水や塩化物イオンなどの劣化因子の移動経路となるかぶりコンクリートの品質を向上させることが重要である．コンクリート表層部の品質を高めるため，近年では複数の養生技術が提案され，養

生による品質向上効果は、多くの場合非破壊試験により評価されている。このような状況を踏まえ、2005年には「構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム小委員会」(第一期 335 委員会)⁸⁾が設置された。この活動は、「構造物表層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」(第二期 335 委員会)⁹⁾まで継続され、コンクリート表層品質の定量評価技術や、構造物の耐久性能を検証する体系を確立するために、国内にある数多くの実構造物を用いて現場調査が行われるなど、精力的な活動が実施された。養生による品質向上効果の評価に関する研究は、近年積極的に取り組まれており、室内試験にとどまらず実構造物の竣工時における表層部の品質を非破壊試験により評価する活動⁶⁾も行われている。

しかし、数年オーダーで養生による効果を検証している例はほとんどなく、表層品質の継続的な計測も実施されている場合でも、試験期間が1年を超える検討は僅かであるため、養生によりコンクリート構造物の長期的な耐久性が確保されているかは定かではない。1年を超える検討例として、Sanjuánらが床版の模擬試験体を用い20年間継続的に透気試験を実施しているが、養生による影響は検討されていない¹⁰⁾。Parrottはセメントの種類や養生条件が透気係数に及ぼす影響を検討しているが、温湿度一定の室内で試験が行われており、試験期間は最長で18ヵ月である¹¹⁾。Nakaraiらはボックスカルバートやその模擬供試体を用い、材齢39ヵ月まで表層透気試験やコンクリート中の含水率、中性化深さの測定を継続的に実施している¹²⁾。しかし、降雨の影響を直接受ける箇所での検討や表層部の吸水性、空隙構造などの分析は行われていない。以上のように長期的かつ実環境下での養生に関する検討が不足しているのが現状である。

3.3 本検討の目的

以上のような背景を基に本研究では、複数の養生条件・材料配合で作製され屋外に暴露された中規模柱試験体もしくは室内で作製した試験体を用い、継続的な計測を実施することで、降雨の影響の有無も含めた表層品質の経年変化を検討した。ここでは表層透気試験(Torrent法)⁴⁾によって得られる表層透気係数と、林、細田らによって開発された表面吸水試験(Surface Water Absorption Test, 以下、SWAT)⁵⁾で得られる吸水量に着目することで、実環境下または乾湿繰り返しの作用下における表層品質の変化を把握することとした。非破壊による表層品質の検討に加え、劣化因子の移動経路となる空隙構造を分析することで、養生方法や材料配合がコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響を多角的に分析することとした。

3.4 検討概要

3.4.1 試験体概要

本検討では材齢初期に施す養生による耐久性向上に寄与する効果を検証するため、屋外に暴露された中規模試験体と室内にて作製された試験体を使用した。表-3.1 に本検討にて使用した中規模試験体の概要を示す。

表-3.1 3章の検討にて使用した屋外に暴露された中規模試験体

試験体名	暴露箇所	試験期間	試験内容
矩形試験体	関東地方 (塩害, 凍害の影響を受 けない環境)	2012. 2~2012. 10	・表透気透気試験 ・表面吸水試験
ボックスカルバート模 擬試験体		2014. 11~2018. 1	・表透気透気試験 ・表面吸水試験 ・空隙構造分析
中規模柱試験体 (RC ラーメン模擬高架 橋の一部を構成)		2011. 3~2018. 2 (夏季作製試験体) 2010. 4~2018. 2 (冬季作製試験体)	・表透気透気試験 ・表面吸水試験 ・空隙構造分析

3.4.2 表層透気試験 (Torrent 法)

本検討では、コンクリート構造物の表層品質の評価手法として表層透気試験 (Torrent 法)⁴⁾により得られる表装透気係数 kT を用いた。1992 年に提案された Torrent 法は、非破壊でコンクリート表層部の透気性を測定することが可能である。内部チャンバーと外部チャンバーの二つの構造を有する装置からなるセルをコンクリート表面に設置し、内部チャンバーの気圧変化から kT を算出することで、シングルチャンバー法の欠点であったコンクリートのごく表層部が試験結果へ及ぼす影響の排除が可能である¹⁾。本手法を使用した際のチャン

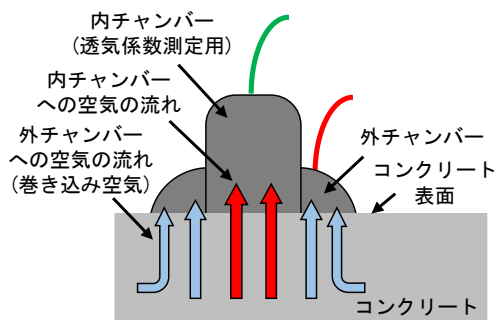


図-3.1 表層透気試験 (Torrent 法) の装置の概要

写真-3.1 表層透気試験 (Torrent 法) の実施状況

バー内の空気が流入する様子を図-3.1 に示す。内部と外部のチャンバー内の圧力を管理することで、図に示す栓流が形成される。本試験法により生じる空気の流れは、RILEM TC 116-PCD により提案された CEMBUREAU 法¹²⁾と近いものとなり、試験結果として得られる kT と CEMBUREAU 法間には一定の相関が得られることも報告されている⁴⁾。

表 - 3.2 表層透気係数に基づく品質クラス分け

表層透気係数 kT ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	品質指数	品質クラス
10~100	5	極劣
1~10	4	劣
0.1~1	3	一般
0.01~0.1	2	良
0.001~0.01	1	優

表 - 3.3 表層透気試験実施時のコンクリートの状態

試験材齢	材齢 28~90 日 (反応の遅い粉体の場合は 60~90 日)
温度	コンクリートの表面温度は 10°C 以上であること。 熟練者の場合、必要であれば 5~10°C の範囲でも測定可能。 また、試験装置に直接日光が当たらないように注意する。
水分状態	表面接触電気抵抗試験により計測されたコンクリートの絶対含水率が 5.5% 以下であること。 養生終了時から 3~4 週間が経過し、降雨等による水の接触から 2~5 日以上経過したときに満たされるのが標準である。
測定箇所、測定数	局所的な影響や試験の影響を避けるため、測定対象区域の上端から各 150mm、左右端から 50mm は測定対象としない、またそれぞれの測定点の間隔は 200mm 以上とする。 測定範囲で無作為に抽出した 6 点の測定結果より評価を行う。
埋設物の有無	コンクリート表層から 20mm 以内に鉄筋などの埋設物が無い箇所を選定する。
ひび割れの有無	測定前にアルコールの噴霧などによりひび割れ調査を行い、ひび割れが確認された場合には、測定箇所をずらす。
表面保護処理の有無	表面保護処理が施されている場合は、可能な範囲で除去し、コンクリートそのものの品質と保護処理の効果を測定する。

トレント法により得られる透気特性に基づき、かぶりコンクリートの品質は表 - 3.2 により 5 段階で評価される。しかし、コンクリート中の含水状態によって測定結果が変動するため、降雨の影響を受ける箇所などにおいては留意が必要である。

本測定手法はスイスにおいて規格化¹³⁾されており、表 - 3.3 に示す測定条件のもとで測定を実施することが推奨されている。

3.4.3 表面吸水試験 (Surface Water Absorption Test, SWAT)

SWAT⁵⁾は、コンクリート表面に設置されたカップを水で満たした場合の吸水特性を水位減少から評価する試験である。具体的には、図-1.1 に示すような内径 80mm の吸水カップをコンクリート表面に設置し、10 秒以内に吸水カップおよびシリンダー内に注水を行う。注水が完了した時点を試験開始時刻とし、その後約 10 分間吸水カップに取り付けられた圧力センサにて、コンクリートへの吸水量を水位減少として計測する。コンクリートの表面に多少の凹凸面がある場合にも測定を可能にするため、吸水カップとコンクリート面の設置箇所にはゴムスポンジを使用している。ゴムスポンジは多孔質であるため、事前に吸水させた後に使用する。真空によりコンクリート表面に吸着させたパッドにてフレームを固定し、このフレームからの反力を取り吸水カップをコンクリートに密着させる。吸水カップの中心からシリンダーの上部までの寸法は 300mm であるため、吸水カップの中央には 300mm の水頭が作用する構造となっている。

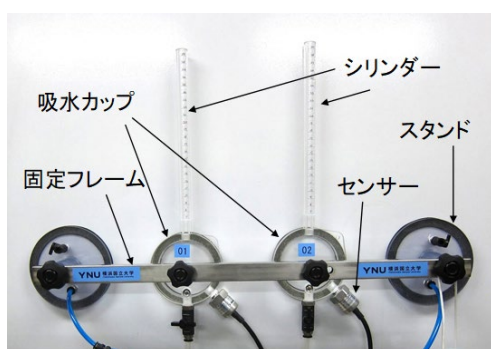


図-3.2 表面吸水試験の装置の概要

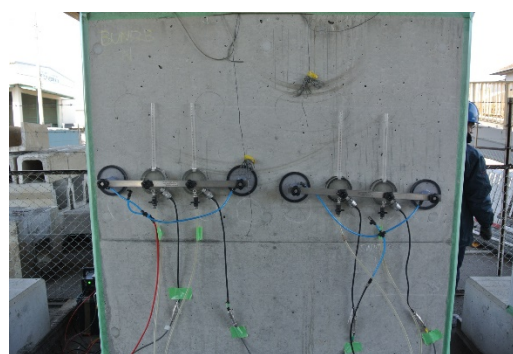


写真-3.2 表面吸水試験の実施状況

表 - 3.4 Initial Surface Absorption Test における表面吸水速度のクラス分け

時間	10分	30分	60分	120分
High	>0.50	>0.35	>0.20	>0.15
Average	0.25-0.50	0.17-0.35	0.10-0.20	0.07-0.15
Low	<0.25	<0.17	<0.10	<0.07

SWAT では表 - 3.4 に示す Levitt により提案された、測定開始から 10 分時点での表面吸水速度による 3 段階のグレードを用いて、コンクリート表層部の品質が評価されてきた。

なお、表面吸水速度は、圧力センサで計測されたシリンダー内の水位の変化から算出された単位面積あたりの吸水量と、注水完了からの経過時間の関係を式(3.1)により回帰分析し、定数 a , n および注水完了からの時間 t を代入して得られた値である。

$$p = a \cdot t^{-n} \quad (3.1)$$

ここに、

p : 表面吸水速度(ml/m²/s), t -m 秒の時の表面吸水速度を p_m で示す

a : 1 秒時点での表面吸水速度を表す

n : 表面吸水速度の時間変化の程度を表す

t : 注水を完了（給水を開始してから 10 秒）してからの時間(s)

グレードに関しては、British Standard1881-5 に規定されている Initial Surface Absorption Test(以下、ISAT)を用いて得られた試験結果によるものである。しかし、ISAT の試験条件は水頭が 200mm で一定である一方、SWAT ではコンクリートへ水が吸水されることで、経時的に水頭が変化する。また、ISAT では注水に要する時間は必ずしも明らかではないが、SWAT では 10 秒以内で注水を完了することが規定されており、ISAT と SWAT の試験条件には複数の違いが見られる。

以上の理由を背景に、SWAT を用いた表層品質の評価基準を確立すべく井川ら¹⁴⁾は、これまで評価指標として用いられてきた 10 分時点の吸水速度と 10 分間の吸水量の関係や、測定時間の短縮について検討を実施した。その結果、図-3.3 に示すように 10 分時点の吸水速度と 10 分間の吸水量は比例の関係にあることや、1~10 分間の任意の測定時間によって得られた吸水量から、10 分時点における吸水速度を算出できることを明らかにした。

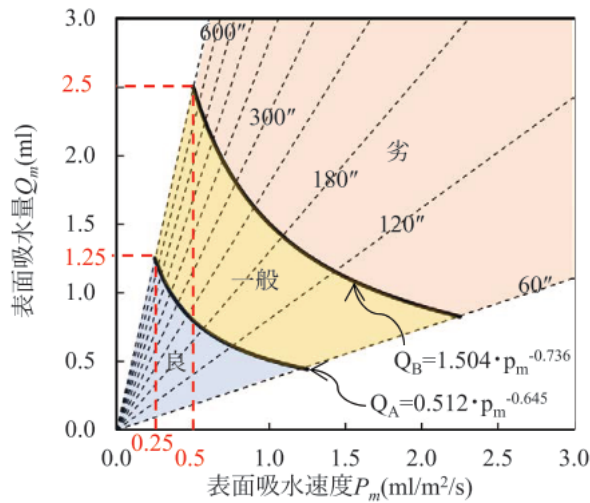


図-3.3 測定時間に応じた表層品質の判定基準範囲¹⁴⁾

吸水量に関しては以下の式によって算出される。

$$Q = \frac{\Delta h \times DT}{1000}$$

ここに、

Q : 吸水量(ml), $t=m$ 秒の時の表面吸水量を Q_m で示す。

Δh : 測定時間前後の水頭差(mm)

DT : シリンダーの内径面積(mm²)

本研究では、コンクリート中への水の浸透量を直接的に判断するのに容易な吸水量に着目するとともに、試験に費やす時間の短縮を図るため、測定時間を10分から6分へ変更した。すなわち、従来は10分時点の表面吸水速度であった評価指標を6分間の吸水量に変えて検討を進めることにした。なお、表-3.5に6分間の吸水量を評価指標とした場合のコンクリート表層部のクラス分けを示す。

表-3.5 6分間の吸水量を評価指標とした場合のクラス分け

表層品質のクラス	6分間の吸水量
劣	>2.0ml
一般	1.0-2.0ml
良	<1.0ml

3.4.4 空隙構造分析 (MIP)

空隙構造を分析するため写真-3.3に示す水銀圧入ポロシメーター (MIP) を用いた。MIP で使用するコアサンプルは、材齢 96 ヶ月の時点で各柱試験体の高さ 1000mm の箇所より採取した。コアサンプルの採取後、表層から深さ 50mm までを 10mm 間隔で切断し、粗骨材が含まれていないことや細骨材が大半を占めていないことに注意しつつ、5mm 角程度の立方体となるよう整形した。その後、試料をアセトンに 24 時間浸漬し、D-dry 法により 24 時間乾燥させ分析した。細孔径が 10nm に相当する圧力を超えると細孔が破壊される可能性が指摘されているため¹⁵⁾、本検討で測定する空隙の最小径は 10nm とした。本検討では、累積細孔量、細孔径分布のピーク径に加え、細孔空隙の中でも物質移動に関与すると考えられている連続空隙量と閾細孔径を評価指標とした。閾細孔径を算出するに当たっては、本検討では酒井らの手法¹⁶⁾を参考とし、セメントペースト体積の 16% に相当する水銀が圧入された時点の細孔直径を閾細孔径とした。また、細孔空隙の中でもインクボトル空隙と、物質移動に関与する連続空隙を区分するため、図-3.4 に示すように 1 回目の細孔径分布測定後 (130MPa まで加圧)、0.15MPa 程度まで減圧し、再度 130MPa まで加圧し 2 回目の細孔径分布の測定を行った。



写真-3.3 水銀試験圧入ポロシメーター (MIP)
POREMASTER 60-GT

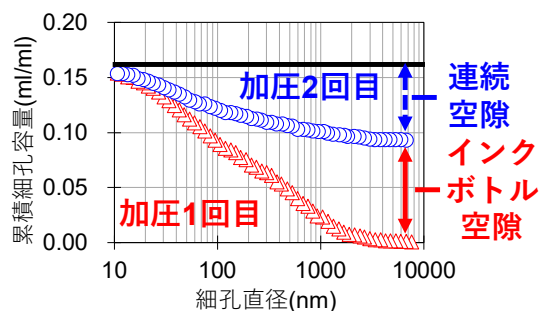


図-3.4 連続空隙とインクボトル空隙量の
測定結果のイメージ図

3.5 屋外に暴露された試験体を用いた検討

3.5.1 矩形試験体

3.5.1.1 実験概要

3.5.1.2.1 ボックスカルバート模擬試験体の概要

表-3.6 に本検討で用いた試験体の概要、表-3.7 に配合、図-3.5 に試験体の形状・寸法、写真-3.4 に試験体作製後における養生の様子を示す。ここでは、関東地方の内陸部に暴露した4体の矩形試験体を対象として、kTの経年変化を検討した。試験体の寸法および形状は、厚さ400mm、高さ1.5m、横幅900mmの矩形となっている。鉄筋がkTに与える影響も考慮するため、無筋(PL)と有筋(RC)の2種類の供試体を用意した。有筋の試験体はかぶり厚さを112mmとし、主筋はD32を300mm間隔3本、配力筋にはD22を300mm間隔で4本配した。セメントには高炉セメントB種(BB)を使用し、水セメント比W/Cを54.5%、細骨材率s/aを46.3%、目標スランブを8cm、目標空気量を4.5%とした。細骨材には、栃木県佐野市産の砕砂S1と千葉県成田市産の陸砂S2を7:3で混合した砂、粗骨材Gには栃木県佐野市産の砕石、混和剤Adにはリグニンスルホン酸とオキシカルボン酸の複合AE減水剤を用いた。試験体の作製にはレディーミストコンクリートを使用し、ポンプ圧送による打込み後、振動締固めを実施している。一連の作業は屋外で実施しており、試験体は降雨や日射の影響を受ける環境に暴露した。養生方法は、早期脱型(材齢1日にて脱型)とコンクリート標準示方書相当の養生(材齢7日にて脱型)の2水準に設定した。

表-3.6 矩形試験体の概要

試験体名	養生条件	脱型時期	鉄筋の有無
Poor-PL	1日脱型	1日	無
Std-PL	示方書相当	7日	
Poor-RC	1日脱型	1日	有
Std-RC	示方書相当	7日	

表-3.7 矩形試験体の配合表

粗骨材の最大寸法	セメント種類	スランブ	水セメント比W/C	空気量Air	細骨材率s/a	単位量(kg/m ³)					
						水	セメント	砂1	砂2	粗骨材	混和剤
(mm)		(cm)	(%)	(%)	(%)	W	C	S1	S2	G	Ad
20	BB	8	54.5	4.5	46.3	160	294	610	249	1012	2.94

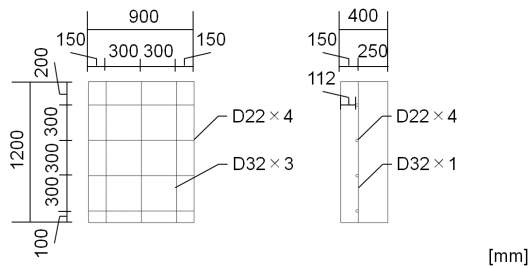


図-3.5 試験体の形状・寸法



写真-3.4 試験体作製後における養生の様子

3.5.1.2.2 表層品質に関する非破壊試験の概要

本検討では、コンクリート構造物の表層品質の評価手法として表層透気試験 (Torrent 法)^{2),3)}により得られる表層透気係数 kT を用いた。表層透気試験は、試験体の材齢が 1 か月、2 か月、6 か月、10 か月の時点にて実施した。1 試験体につき 3 箇所を測定しており、その kT の平均値を測定値として採用した。

3.5.1.2 表層透気試験(Torrent 法)の結果

本実験より得られた表層透気係数 kT の経時変化を図-3.6 に示す。横軸は材齢、縦軸が kT である。本実験結果より、材齢 1 か月においては早期脱型した供試体 (Poor-PL, RC) に比べ、標準養生を実施した供試体 (Std-PL, RC) の kT の値が小さくなった。標準養生を実施した中でも、無筋コンクリートである供試体 Std-PL の kT は、有筋の Std-RC よりも小さな値となった。一方、早期脱型をした供試体間では、鉄筋による影響は、材齢 1 か月の時点では確認できない。また材齢が経過するに伴い、養生方法や鉄筋による kT の差は小さくなり、材齢 1 か月では $0.0026 \sim 0.09 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と約 35 倍の差があった kT は、材齢 10 か月には、 $0.003 \sim 0.008 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と約 3 倍の範囲にまで減少している。材齢 6 ヶ月以降は、早期脱型した供試体の kT が標準養生を下回るという挙動も見られる。

時間の経過によって、養生方法による kT の差が小さくなった要因として、乾湿の繰り返しによるコンクリート中の含水状態の変化が挙げられる。材齢 1 か月時点では、養生方法によってコンクリート中の含水状態や空隙構造は大きく異なる。すなわち、早期脱型した供試体の表層部は乾燥しているとともに、標準養生を与えた供試体に比べ水和が進行していないため、 kT が大きくなる。一方、標準養生を与えた供試体では湿潤しており、水和も進行するため kT が小さくなる。しかし、材齢が経過するにつれ、乾湿の繰り返しにより含水状態に顕著な差がなくなったことや、水和反応が同程度に進行し、空隙構造に大きな違いがなくなり、養生方法による kT の差が小さくなったという可能性が考えられる。

鉄筋が kT へ与える影響については、標準養生の場合には、材齢 1 か月時点で鉄筋の有無による差が表れたが、早期脱型した供試体では見られなかった。また、標準養生の場合も材

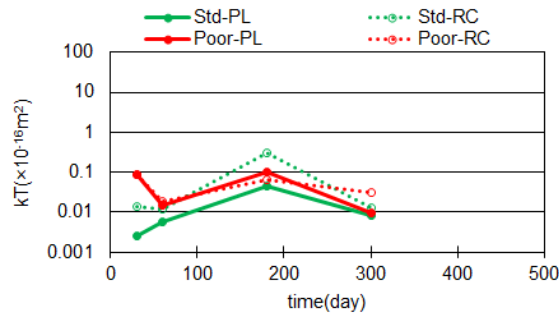


図-3.6 表層透気係数 kT の経年変化

齢 10 か月では差が見られない。このような結果が得られた原因は、本検討では明らかにならなかったため、今後の検討課題とする。

早期脱型した供試体の材齢 1 か月での kT が $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下と、極めて良い養生を行わない場合でも kT の値が良好な結果を示したが、これは降雨の影響による可能性が考えられる。材齢の経過に伴う kT の増減も見られるが、材齢 2 か月時点での kT の減少は測定日の直前に降った雨の影響と考察した。

3.5.2 ボックスカルバート模擬試験体

3.5.2.1 実験概要

3.5.1.2.1 ボックスカルバート模擬試験体の概要

ボックスカルバート模擬試験体の配合を表-3.8、概要を表-3.9、試験体の形状・寸法を図-3.7、試験体の作製状況および設置環境を写真-3.5 に示す。ここでは、試験体名をセメント種類 - 養生方法として示す。本検討では、ボックスカルバートの一部を模擬した 6 体の試験体を用い、 kT の経時変化を検討した。使用セメントは、普通ポルトランドセメント (N) または高炉セメント B 種 (BB) の 2 水準とした。W/C は、N を使用した試験体では 55.0%、BB を用いた試験体は 52.5% とした。試験体の厚さは 600mm (N)、または 400mm (BB)、高さは 1.5m (50cm×3 層)、横幅は 1.5m である。型枠には木製型枠を用いた。かぶり厚さは 74.5mm とし、主筋は D19 を 12 本、配筋には D13 を 7 本配した。試験体はそれぞれ同一バッチのコンクリートを打込むこととし、締固めは 50cm 間隔×3 か所にて実施した。雨掛かりや日射の影響を排除するため、脱型直後から材齢 8.2 か月までは、単管パイプにより組まれた足場にブルーシートをかけ (写真-3.5 左)、材齢 8.2 か月以降は、試験体を高架橋下に設置した (写真-3.5 右)。養生方法は、早期脱型 (材齢 1 日にて脱型)、コンクリート標準示方書相当の養生 (N では 5 日脱型、BB では 7 日脱型)、密封養生 (材齢 1 日にて脱型後、N は材齢 91 日、BB は材齢 114 日までフィルムにより密封) の 3 水準とした。ここでは、試験体名をセメント種類 - 養生方法として示している。

表-3.8 ボックスカルバート模擬試験体の配合表

セメント 種類	水セメント比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水	セメント	砂	粗骨材	混和剤*
			W	C	S	G	Ad
N	55.0	44.0	162	295	816	1029	2.803
BB	52.5	43.0	159	303	795	1042	2.954

*AE 減水剤

表-3.9 ボックスカルバート模擬試験体の概要

試験名	セメント 種類	水セメント比 W/C (%)	養生条件	脱型時期	養生終了時 の材齢
N-Poor	N	55.0	早期脱型	1日	1日
N-Std			示方書相当の養生	7日	7日
N-Seal			密封養生	1日	91日
B-Poor	BB	52.5	早期脱型	1日	1日
B-Std			示方書相当の養生	5日	5日
B-Seal			密封養生	1日	114日

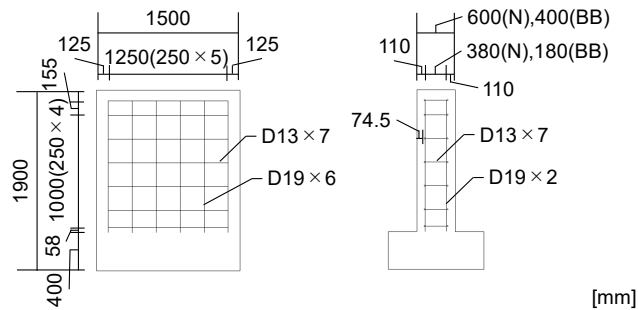


図-3.7 ボックスカルバート試験体の形状・寸法



写真-3.5 ボックスカルバート模擬試験体の暴露環境

3.5.1.2.2 表層品質に関する非破壊試験

本検討では表層透気試験（Torrent 法）⁴⁾に加え，林，細田らによって開発された表面吸水試験（Surface Water Absorption Test）⁵⁾を用いボックスカルバート模擬試験体の表層品質を評価した。

(1) 表層透気試験（Torrent 法）

透気性の観点から表層品質を評価するため表層透気試験を実施した。本検討では，表層透気試験により得られる表層透気係数 kT を評価指標としている。試験は材齢の 1.3, 2.6, 7.4, 13, 27, 38 ヶ月時点にて実施した。密封養生を施した供試体は，材齢約 3 か月までフィルムにより密封されていた。そこで，材齢 1.3, 2.6 か月の測定時には，可能な限りこの状態を保つために，供試体とフィルムの隙間へセルを挿入し測定した。測定高さは 750mm であり，6 点の測定箇所の kT の平均値を用い表層品質を評価した。

(2) 表面吸水試験（Surface Water Absorption Test）

吸水性の観点からも表層品質を評価するため表面吸水試験を実施した。本検討では，注水完了時から 6 分間の吸水量¹⁴⁾を評価指標としている。試験は材齢 2.6, 13, 27, 38 か月の時点にて実施した。測定位置の高さは 1150mm とし，4 点の測定点数の平均値により評価した。

3.5.1.2.3 空隙構造分析

空隙構造を分析するため，水銀圧入ポロシメトリー（MIP）を用いた。MIP で使用するコアサンプルは，表層品質に関する非破壊試験を実施した面と反対側の面より，材齢 2.6, 39 ヶ月の時点で採取した。コアサンプルを採取する位置は，供試体の高さ 1150mm，供試体端部より 750mm の箇所とした。コアサンプルの採取後，粗骨材が含まれていないことや，細骨材が大半を占めていないことに注意しつつ 5mm 角程度の立方体となるよう整形した。その後，試料をアセトンに 24 時間浸漬し，D-dry 法により 24 時間乾燥させ分析を行った。なお，細孔径が 10nm に相当する圧力を超えると細孔が破壊される可能性が指摘されているため¹⁵⁾，本検討で測定する空隙の最小径は 10nm とした。本検討では材齢 2.6 ヶ月では，表層から 0~1, 15cm，材齢 39 ヶ月の時点では，表層から 0~1, 2~3, 4~5, 8~10cm の深さから試料を作製し，空隙構造分析を実施した。空隙構造に関しては，累積細孔量，閾細孔径に着目し評価した。

3.5.2.2 試験結果

3.5.2.2.1 表層透気試験(Torrent 法)の結果

ボックスカルバート模擬試験体を用いて得られた kT の経年変化を図-3.8，含水率の経年変化を図-3.9 に示す。グラフ中の横軸は材齢，縦軸は kT または含水率である。

N を使用した試験体の場合（図-3.8(a)），材齢 1.3 ヶ月では密封養生を実施した試験体（N-Seal）の kT が最も小さく，標準養生，早期脱型と養生日数が少なくなるにつれ kT の値は大きくなった。市販の水分計により測定したコンクリート内部の含水率は，早期脱型，標

準養生，密封養生の順に小さい値を示した．しかし材齢が経過するに伴い，養生条件による kT と含水率の差が小さくなり，材齢 1.3 ヶ月の時点で $5.5\sim 6.9\%$ であった含水率は，材齢 39 ヶ月では $4.2\sim 4.4\%$ となった．これに伴い，材齢 1.3 ヶ月に $0.02\sim 0.29\times 10^{-16}m^2$ と，約 15 倍の差があった kT は，材齢 39 ヶ月には約 5 倍まで減少した．

BB の場合 (図-3.8(b))，材齢 1.3 ヶ月の段階では早期脱型した試験体 (B-Poor) の kT が最も大きく，標準養生，密封養生を行った供試体 (B-Std, Seal) は同程度の値となった．その後，材齢が 2.6 ヶ月の時点では養生方法による kT の差異が見られたが，長期的に見ると N の場合と同様に，材齢の経過に伴い養生条件による kT と含水率の差異が小さくなる傾向を示し，材齢 1.3 ヶ月にて $5.0\sim 5.1\%$ であった含水率は材齢 38 ヶ月の時点には $3.8\sim 3.9\%$ ，材齢 1.3 ヶ月に $0.2\sim 6.5\times 10^{-16}m^2$ と約 32 倍の差があった kT は，材齢 38 ヶ月には $2.7\sim 22.0\times 10^{-16}m^2$ と約 3 倍の差にまで減少した．

養生方法による kT の差が小さくなった要因の一つとして，前項の検討と同様に，材齢の経過に伴うコンクリート中の含水状態の変化が挙げられる．材齢 1.3 ヶ月時点では，養生方法によって含水率が異なるが，材齢が経過するにつれコンクリート表層部の乾燥が進行し，含水状態に大きな差がなくなったため， kT の差が小さくなったと考えられる．コンクリー

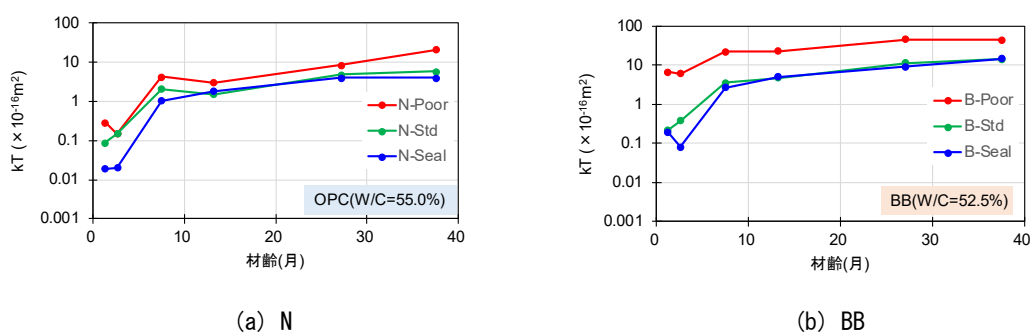


図-3.8 表層透気係数 kT の経年変化

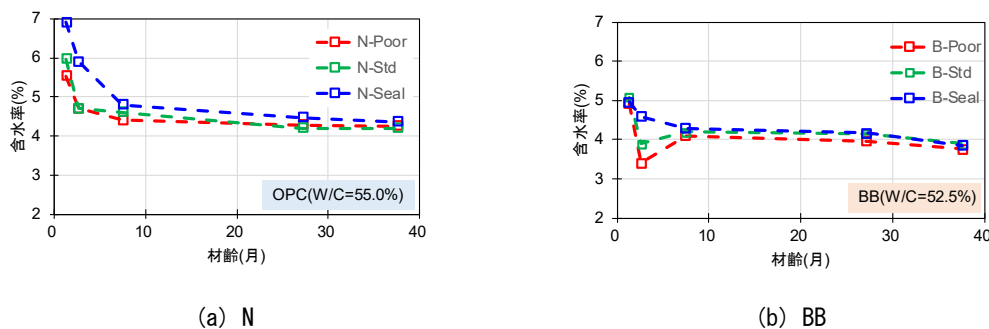


図-3.9 含水率の経年変化

ト中の含水率と kT の間に高い相関があることは、蔵重らや早川らにより報告されている^{17,18)}。前項の検討とは異なり、今回の検討で使用したボックスカルバート模擬試験体は、雨水の影響を受けない環境に設置されている。外部より液状水が浸透する可能性がないことから、コンクリート内部は比較的安定したために、矩形試験体の場合に比べ、降雨の影響による kT の不規則な増減が抑制されたものと考えられる。

3.5.2.2.2 表面吸水試験 (SWAT) の結果

ボックスカルバート模擬試験体を用いて得られた6分間の吸水量の経年変化を図-3.10に示す。なお、試験は材齢2.6, 13.2, 27.2, 37.6ヵ月時点で実施している。

図-3.10 (a) に示すNに着目すると、材齢2.6ヵ月時点では養生方法により吸水量に差異が見られる。しかし、材齢13.2ヵ月では密封養生を施した試験体の吸水量が顕著に増加し、養生による差異は確認できない。また、その後は吸水量に大きな変化は見られない。 kT の結果においても、養生の差異は材齢2.6ヵ月から13.2ヵ月の間にて顕著に縮小しており、上述したように水分逸散に伴う含水率の変化がこれらの結果が得られた原因と推察される。

一方、図-3.10 (b) に示すBBの試験体では、材齢2.6ヵ月時点の養生による吸水量の差がNに比べ大きく、その差は約5倍であった。材齢が経過するに伴い、示方書相当の養生または密封養生を施した試験体の吸水量は増加し、養生による差は減少している。しかし、材齢38ヵ月においても養生方法による吸水量の違いは1.4倍程度の差として確認でき、Nと比較すると養生の差は残存していることが分かる。なお、材齢27.2ヵ月では吸水量が小さい傾向を示している。測定を実施した数日前に降雨があったことがこの要因として考えられる。

BB中に含まれるスラグの反応率は、打込みの翌日に脱型した場合は著しく低く、養生日数が長くなるに伴い反応率は高まるなど、養生による影響を強く受けることが報告されている¹⁹⁾。本検討結果においても、養生による吸水量の差異は縮小しているものの、Nと比較するとその差は大きく、上記の知見と整合する。

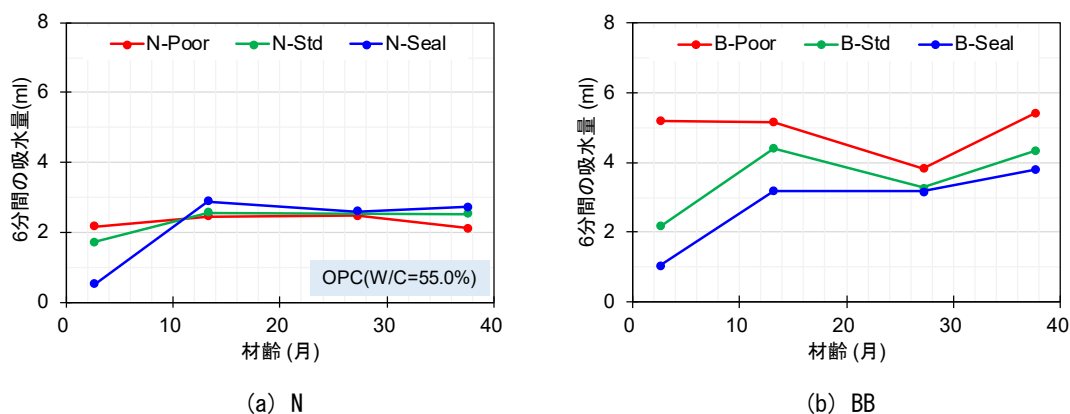


図-3.10 6分間の吸水量の経年変化

しかしながら、kT に着目すると、示方書相当の養生と密封養生を施した試験体間では、kT の値に差がほとんど見られず、吸水量の結果と僅かながらも乖離が見られる。kT と吸水量にはコンクリート中の含水率に加え、空隙構造が影響を及ぼす。含水率に関しては、示方書相当の養生と密封養生を施した試験体間では 0.004% しか差がなく、同一の含水状態にあると考えられる。したがって、示方書相当と密封養生の空隙構造が異なれば、Torrent は SWAT に比べ含水率に強く依存しているという仮説の裏付けとなる。言い換えると、Torrent と比較した場合、SWAT は空隙構造の変化に鋭敏であることの一つの証拠にも成り得る。透気と透水では関与する空隙径の大きさが異なることも考えられるが、以上の仮説を検証するためにも各試験体より採取したコアサンプルを用い、空隙構造を分析することとした。

3.5.2.2.3 空隙構造分析の結果

3.5.2.2.3.1 累積細孔量（養生方法の比較）

図-3.11, 12 に N, 図-3.13, 14 に BB の累積細孔量を示す。

まず N について考察する。図-3.11 (a) より、材齢 2 ヶ月時点のごく表層部では養生条件が良くなるにつれ、空隙構造が緻密になっている。一方で、図-3.11 (b) に示す表層から深さ 15cm の箇所では、密封養生を施した試験体の累積細孔量が最も大きくなるなど、養生による差異は細孔径分布には見られない。既往の研究によると、養生の影響を受ける範囲は、一般的に表層から 3cm 程度と考えられており²⁰⁾、材齢 2 ヶ月の時点では深さ方向に詳細な検討は実施していないが、本検討においてもおおよそ同様の範囲が養生の影響を受けていると推察される。

材齢 39 ヶ月時点の空隙構造に着目する。図-3.12 (a) に示す、ごく表層部の空隙構造においては、材齢 2.6 ヶ月時点と比較し変化は少ないものの、早期脱型や示方書相当の養生では累積細孔量が増加し、密封養生を施した試験体では 100nm 程度の細孔径に着目すると、空隙構造が粗大化していることが確認できる。ごく表層部の空隙構造が粗大化した要因は複数考えられる。その中でも、本検討内で最も養生条件が良い密封養生を施した試験体にて空隙が粗大化した要因としては、50nm 以上の空隙に存在する水分は壁面と物理的な結合をしていないため、水分が逸散した場合においても収縮に対する影響は小さいが、50nm 以下の空隙に存在する水分が逸散した場合、収縮に与える影響は極めて大きいことが知られており、この現象が関連しているものと思われる²¹⁾。さらに郭らにより、乾燥前の総空隙量に対する 50nm 以下の空隙量の割合と、乾燥による 50nm 以上の空隙量と増加率の間には相関があることが知られており²²⁾、緻密な空隙構造を有するものほど乾燥による影響を受けることが確認されている。本検討で密封養生を施した試験体は、材齢 2.6 ヶ月時点ではピーク径が 50nm 程度であり、郭らの知見における乾燥の影響を大きく受ける空隙構造を有している。これらのことから、本実験で密封養生を施した試験体の空隙構造が粗大化した主な要因は乾燥の影響によるものと考えられる。一方、早期に脱型した場合のように空隙構造が粗大な試験体では、乾燥による影響は小さいと考えられるため、空隙構造の顕著な変化は生じな

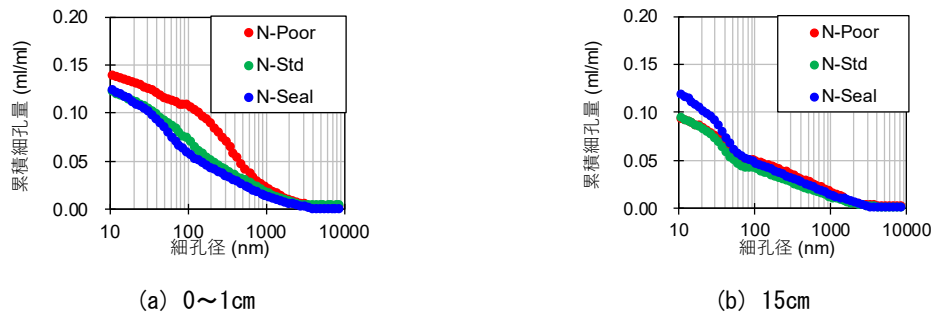


図-3.11 累積細孔量 (N:2.6 ヲ月)

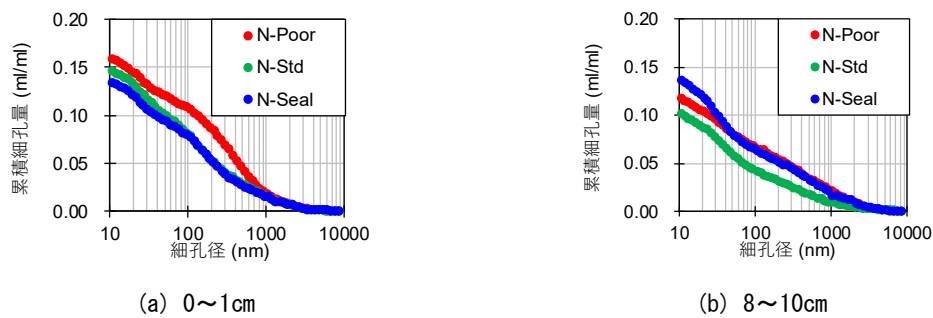


図-3.12 累積細孔量 (N:38 ヲ月)

かったと推察した。

図-3.11 (b)に示す材齡 2 ヲ月の時点における表層から 15cm の深さの空隙構造に関しては、養生の差は見られない。これは上述したように養生の影響を受ける範囲は表層から数 cm 程度であるためである。実験の都合上、空隙構造分析に使用した試料の採取位置は異なるが、図-3.12 (b)に示す材齡 38 ヲ月の時点における表層から 8~10cm の深さの空隙構造に着目すると、養生の影響が見られず、密封養生を施した試験体の累積細孔量が最も大きい傾向は材齡 2.6 ヲ月時点と変わらなかった。

続いて BB について考察する。図-3.13 (a)より、N の場合と同様に、材齡 2.6 ヲ月時点のごく表層部では養生条件が良くなるにつれ、空隙構造が緻密になっている。一方、図-3.14 (a)に示す、材齡 38 ヲ月時点におけるごく表層部の空隙径分布においては、材齡 2.6 ヲ月と比較すると、いずれの養生条件も累積細孔量が増加しており、さらに養生方法の差異もより明確になっている。密封養生を施した試験体は、早期脱型や示方書相当の養生と比較し、50nm 以下の空隙が占める割合が多く、N の考察で述べたように緻密な空隙構造が乾燥の背協によって粗大化したことが考えられる。また、金らの報告²³⁾によると、Ca/Si 比の低い C-S-H は炭酸化により細孔構造の粗大化をもたらすことが示唆されており、西川らは W/C が高く、養生が不十分である場合に C-S-H の Ca/Si 比が低下する知見を得ている²⁴⁾。高炉スラグ微粉末を置換した場合は、普通ポルトランドセメントに比べ Ca/Si 比が低い C-S-H が生成されることが知られているとともに、上原らによると、実環境と同程度の CO₂ 濃度で炭酸

化を進行させた場合、W/C や高炉スラグ微粉末の混合の有無によらず空隙構造は粗大化することが確認されている²⁵⁾。本検討においても早期に脱型した試験体では、高炉スラグ微粉末の混合と養生が不十分であることで低 Ca/Si 比の C-S-H が生成されていることが予想され、材齢の経過に伴い炭酸化が進行することで、空隙構造が粗大になったと考えられる。以上より、既往の研究から得られた知見を踏まえると、乾燥の影響に加え炭酸化も空隙構造が変化した要因の一つとして考えられる。

一方、図-3.13 (b)に示す表層から深さ 15cm の箇所では、養生による差異は細孔径分布には見られず、全ての養生方法で同一のピーク径を有している。この結果より、BB の場合においても、養生の影響を受ける範囲は表層から数センチであることが推察される。材齢 38 ヶ月時点の細孔径分布に着目する。その傾向は早期脱型下試験体にて顕著に見られ、材齢の経過に伴いピーク径は最大で約 32 倍増加した。BB の試験体では、養生条件にかかわらずピーク径が 50nm 以下であることから、N の考察で述べた乾燥による影響が空隙構造の粗大化の要因として考えられる。

なお、kT の値と比較した場合、N はごく表層部の空隙構造の分析結果と同様の傾向が示されており、BB に関しては kT では示方書相当と密封養生に差異が見られないものの、空隙構造では違いが見られ、セメント種類により kT と空隙構造の相関に差が見られる結果となった。言い換えると、降雨の影響を受けない箇所に N を用いたコンクリート構造物を暴露した場合、数年経過しても空隙構造と kT には相関が見られる可能性が示唆された。

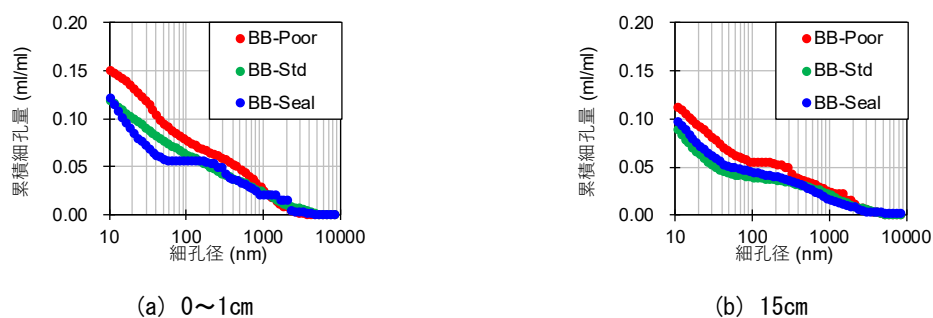


図-3.13 累積細孔量 (BB:2.6 ヶ月)

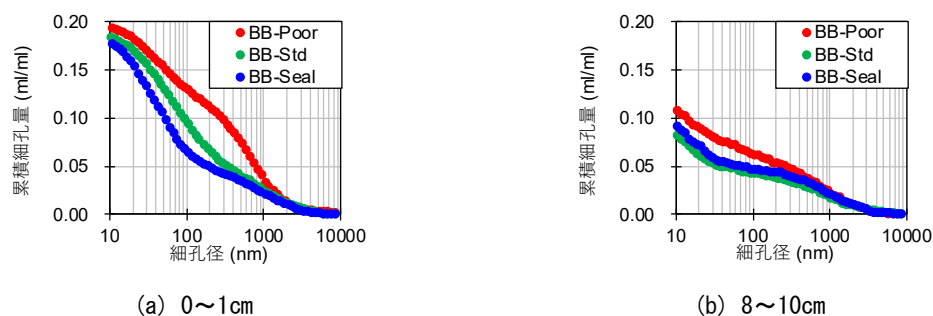


図-3.14 累積細孔量 (BB:38 ヶ月)

3.5.2.2.3.2 インクボトル空隙量と連続空隙量

図-3.15 に材齢 38 ヶ月時点のインクボトル空隙量と連続空隙量，図-3.16 に連続空隙率を示す。

図-3.15(a)，(b)より，特にごく表層部 (0~1cm) の累積細孔量には養生による差異が見られ，その傾向は BB で顕著である。しかし物質移動抵抗性に関与するのは，累積空隙量からインクボトル空隙量を差し引いた連続空隙量である。そこで各試験体の連続空隙率に着目する。図-3.16(a)より，連続空隙率は養生条件による明確な差異は見られず，SWAT の結果と整合している。図-3.16(b)に示す BB に関しても，SWAT により得られた吸水量の結果と同様の傾向が見られた。これらの結果より，SWAT が物質移動抵抗性を評価する上で有効な試験方法であることが確認されるとともに，N に至っては材齢 1 年以内の連続空隙に関する測定データが不足しているものの，材齢が経過するに伴い密封養生を施した試験体の表層品質は，粗悪になる可能性が示唆された。しかし，本検討で用いた試験体は降雨の影響がない箇所に暴露されており，コンクリート中に埋設された鋼材の腐食リスクは極めて低い。この検討結果を踏まえ，次項では降雨の影響の有無も考慮したうえで，養生が構造物の耐久性に与える効果を詳細に検証することとした。

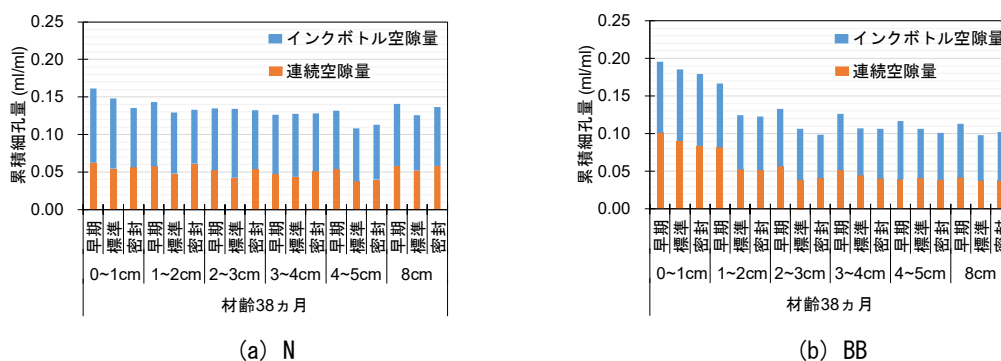


図-3.15 材齢 38 ヶ月時点のインクボトル空隙量と連続空隙量

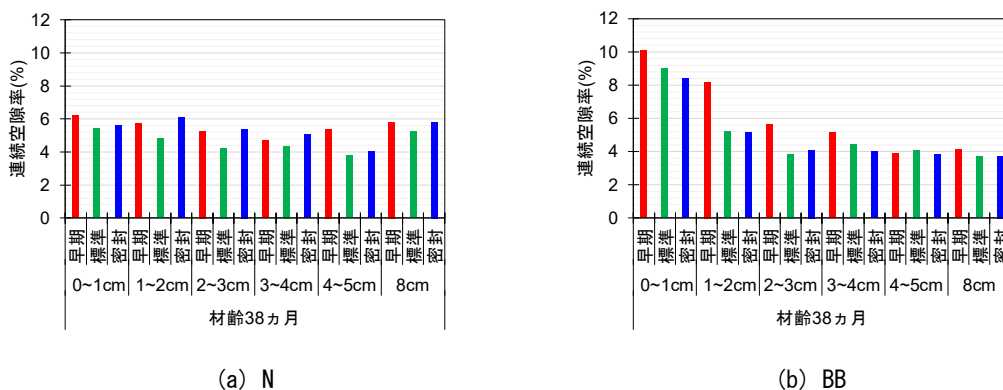


図-3.16 材齢 38 ヶ月時点の連続空隙率

3.5.2.2.3.3 閾細孔径

図-3.17 に材齢 2, 38 ヶ月時点の閾細孔径を示す。図-3.17(a) より, N では早期脱型した試験体の閾細孔径は材齢が経過しても 1nm も変化しておらず, 一方で示方書相当, 密封養生を施した試験体は 20nm ほど粗大化していた。その結果, 材齢 79 日では約 4 倍であった養生による差は材齢 3 年 2 ヶ月では約 2.8 倍となり, 僅かながらも縮小している。上述したピーク径を見ても同様の傾向を示しており, これまでの結果を踏まえると, N を使用したコンクリートを降雨の影響を受けない箇所に暴露すると, 材齢の経過により表層品質が粗悪になる可能性が示唆された。

BB を用いた試験体の場合は, N とは異なり, 養生条件によらず閾細孔径は粗大になった。早期脱型した試験体でその傾向は顕著であり, 材齢 79 日で 133nm であった閾細孔径は, 材齢 3 年 2 ヶ月時点で 526nm まで増加している。その他の試験体も閾細孔径は粗大になっており, 養生による差異は材齢 79 日では 4.4 倍であったが, 材齢 3 年 2 ヶ月では 6.2 倍まで拡大し, BB に関しては養生による空隙構造の差は残存する結果となった。なおこの閾細孔径結果は上述したピーク径と同様の傾向を示すものである。

以上, 降雨の影響を受けない箇所に設置されたボックスカルバート模擬試験体を使用し, 継続的にコンクリート表層部の透気性, 吸水性, 空隙構造を分析することにより, 材齢初期に施した養生による品質向上効果を検証した。その結果, N においては, 緻密な空隙構造を有するコンクリートは材齢の経過に伴い表層品質が劣化し, 養生による差は縮小する。一方で, BB は養生条件にかかわらず材齢が進むことで表層品質は劣化し, 養生による差はむしろ拡大する可能性が示唆された。

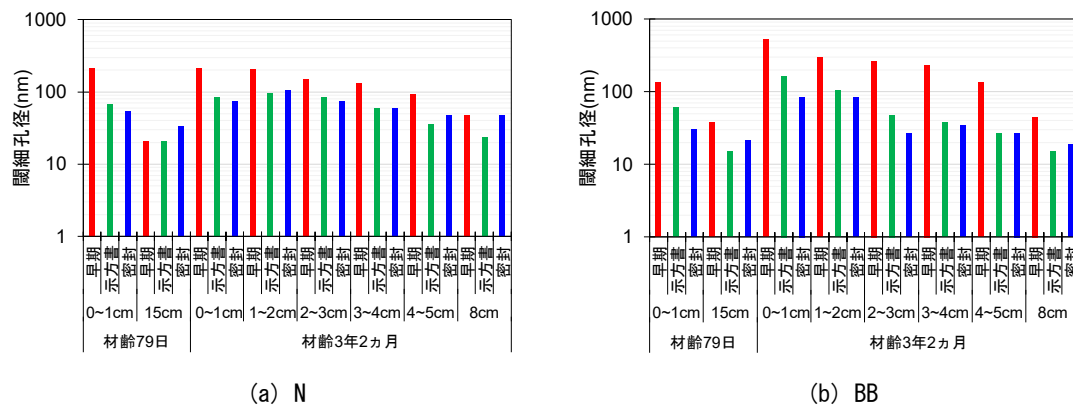


図-3.17 材齢 2, 38 ヶ月時点の閾細孔径

なお本検討では、試験環境を降雨の影響がない状態として設定しており、構造物の耐久性を議論する上で重要な鉄筋の腐食リスクは極めて低い条件である。また、検討に用いた試験体の材料・配合も限られている点に留意する必要がある。本検討結果を踏まえ、次項ではより複数の材料・配合により作製された試験体を使用するとともに、降雨の影響の有無も考慮し、さらに材齢 8 年と本検討以上に長期にわたって継続的に表層品質の試験を実施することで得られた結果を用い、養生が耐久性の向上に担う役割を検証することとした。

3.5.3 中規模柱試験体

3.5.3.1 実験概要

3.5.3.1.1 中規模柱試験体の概要

本検討では屋外に暴露された中規模 RC ラーメン模擬高架橋も使用した（写真-3.6）。この模擬高架橋は、複数の養生条件・材料配合で作製された柱試験体 20 本から構成されている。柱試験体の概要を表-3.10、配合を表-3.11、形状・寸法を図-3.18、試験体の配置を図-3.19、スランプ、空気量、材齢 28 日時点の圧縮強度の試験結果を表-3.12 に示す。

試験体の半分（写真-3.6 の左奥側）は夏季に、半分（写真-3.6 の右手前側）は冬季（2010 年 3 月 4 日）に施工されており、上部はスラブで覆われている。夏季施工分のスラブ下面には水切りが設置されており、冬季施工分には水切りがない。本検討では、同一の柱試験体で降雨の影響の比較検討が可能である冬季施工の柱試験体を検討対象とした。セメントには、普通ポルトランドセメント（N、密度：3.15g/cm³）または高炉セメント B 種（BB、密度：3.04g/cm³）が使用されている。水セメント比（W/C）は、N を使用した試験体では 32.0%、58.0%、64.8%（W/C58.0%の打込み時に約 20kg/m³加水）の 3 種類（以下 N32、N58、N64.8 と略記）、BB を用いた試験体では 57.5%の 1 種類に設定されている（以下 BB57.5 と略記）。柱試験体の高さは 2800mm、断面は 300×400mm、かぶり厚さは 47mm である。主筋は D13 を 6 本、配筋筋には D10 を 15 本配し、型枠にはコンクリート型枠用合板を使用している。N32 の目標スランプフローは 60cm、その他の柱試験体の目標スランプは 12cm、目標空気量は全ての試験体で 4.5%に設定されている。細骨材には茨城県神栖市産の砂 S1（表乾密度 2.60g/cm³、FM2.20）と栃木県佐野市産の砕砂 S2（表乾密度 2.70g/cm³、FM3.20）を 7：3 で混合した砂、粗骨材 G には茨城県笠間市産の砕石 G1（表乾密度 2.65g/cm³、実積率 60.0%）と栃木県佐野市産の石灰砕石 G2（表乾密度 2.70g/cm³、実積率 60.0%）を 1：1 で混合したものを使用した。混和剤 Ad1 にはリグニンスルホン酸とオキシカルボン酸の複合 AE 減水剤、混和剤 Ad2 にはポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を用いた。試験体の作製にはレディーミストコンクリートを使用し、ポンプ圧送による打込み後、振動締固めを実施している。打込み時のコンクリートの温度は 11.2～13.6℃、外気温は 7.6～9.6℃であった。気象庁の観測（千葉）によると、試験体を作製した 2011 年の年間降水量は 1258.5mm、平均気温は 16.3℃、平均湿度は 66%であった。試験体の打込みと並行して圧縮強度試験用のテストピースを作製した。テストピースは材齢 1 日で脱型し、材齢 28 日に圧縮強度試験を行

うまで封緘養生を施した。養生方法は、早期脱型（材齢 1 日にて脱型）とコンクリート標準示方書相当の養生（N では 5 日脱型，BB では 7 日脱型）の 2 水準を基本とした。養生による影響を比較するため，N58 の柱試験体では密封養生（材齢 5 日にて脱型後，フィルムにより材齢 28 日まで密封）や給水養生（材齢 1 日にて脱型後，養生マットにより材齢 28 日まで水を供給）の条件も加えている。なお後述するように，柱試験体では過去に表層品質に関する複数の試験が実施されている^{26,27)}。

表-3.10 柱試験体の概要

配合名	セメント種類	水セメント比 W/C (%)	養生方法	養生終了時の材齢 (日)
N32	N	32.0	早期脱型	1
			示方書相当	5
N58		58.0	早期脱型	1
			示方書相当	5
			密封	28
			給水	28
N64.8		64.8	示方書相当	5
BB57.5	BB	57.5	早期脱型	1
			示方書相当	7



写真-3.6 中規模 RC ラーメン模擬高架橋

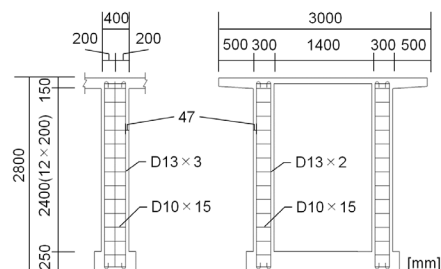


図-3.18 柱試験体の形状・寸法

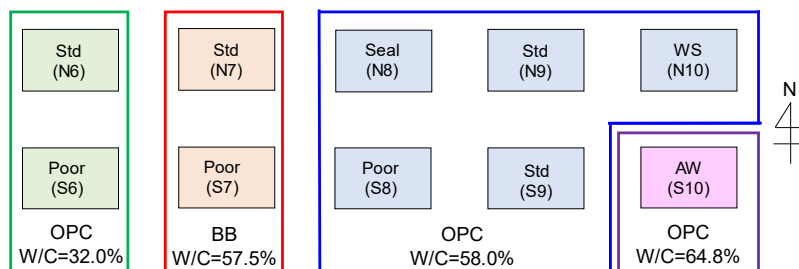


図-3.19 柱試験体の配置

表-3.11 柱試験体の配合，スランプ，空気量，圧縮強度の試験結果

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	セメ ント 種類	スラ ンプ (cm)	水セメ ント比 (%)	空 気 量 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)							
						水 W	セメ ント C	細骨 材 1 S ₁	細骨 材 2 S ₂	粗骨 材 1 G ₁	粗骨 材 2 G ₂	混和 剤 1 Ad ₁	混和 剤 2 Ad ₂
20	N	59.5* ¹	32.0	4.5	47.4	170	532	530	238	429	437	-	8.78
		13.0	58.0	4.7	45.2	168	290	572	254	506	513	2.90	-
		22.0	64.8* ²	5.8	45.2	184	284	560	249	496	503	2.84	-
	BB	14.5	57.5	5.1	44.9	167	291	567	251	506	513	2.91	-

*1：スランプフロー値，*2：W/C58%の配合の打込み時に外割で 20kg/m³加水したものを 1m³に換算

*3：材齢 1 日で脱型後，材齢 28 日まで封緘養生を実施，表中の試験結果はテストピース 3 体の平均値

3.5.3.1.2 表層品質に関する非破壊試験

本検討でも表層透気試験（Torrent 法）⁴⁾と林，細田らによって開発された表面吸水試験（Surface Water Absorption Test）⁵⁾を用い柱試験体の表層品質を評価した。

(1) 表層透気試験（Torrent 法）

透気性の観点から表層品質を評価するため表層透気試験を実施した。また本検討では，表層透気試験により得られる表層透気係数 kT を評価指標としている。試験は材齢の 1～6，9～10，56，94 ヶ月時点にて，試験体の外側に面した降雨の影響がある箇所と，試験体の内側に面した降雨の影響が無い箇所を実施した。測定位置の高さは 1000～1350mm とし，1～3 点の測定点数の平均値を用いて評価した。検討対象となる冬季施工の柱は，材齢半年までの降雨の影響が無い箇所における kT の経時変化が蔵重ら²⁶⁾，材齢 10 ヶ月時点での kT が家辺ら²⁷⁾により報告されている。測定を実施する季節により kT の値が変動することも予想されるが，材齢 9～10，56，94 ヶ月の測定は 11～1 月の期間で実施している。

(2) 表面吸水試験（Surface Water Absorption Test）

吸水性の観点からも表層品質を評価するため表面吸水試験を実施した。本検討では，注水完了時から 10 分間の吸水量¹⁴⁾を評価指標としている。試験は材齢 95 ヶ月の時点にて実施し，測定箇所は，表層透気試験と同様に降雨の影響のある箇所と降雨の影響のない箇所とした。測定位置の高さは 1000mm，1350mm の 2 か所とし，2 点の測定点数の平均値を用いて評価した。

3.5.3.1.3 空隙構造分析

空隙構造を分析するため水銀圧入ポロシメトリー（MIP）を用いた。MIP で使用するコアサンプルは，材齢 96 ヶ月の時点で各柱試験体の高さ 1000mm の箇所より採取した。コアサンプルの採取後，表層から深さ 50mm までを 10mm 間隔で切断し，粗骨材が含まれていないことや細骨材が大半を占めていないことに注意しつつ，5mm 角程度の立方体となるよう

整形した。その後、試料をアセトンに 24 時間浸漬し、D-dry 法により 24 時間乾燥させ分析した。細孔径が 10nm に相当する圧力を超えると細孔が破壊される可能性が指摘されているため¹⁵⁾、本検討で測定する空隙の最小径は 10nm とした。また、細孔空隙の中でも物質移動に関与すると考えられている閾細孔径²⁰⁾を算出するに当たり、本検討では酒井らの手法¹⁶⁾を参考とし、セメントペースト体積の 16%に相当する水銀が圧入された時点の細孔直径を閾細孔径とした。

3.5.3.2 試験結果

3.5.3.2.1 表層透気試験 (Torrent 法) の結果

図-3.19 に N58,64.8、図-3.20 に N32、図-3.21 に BB57.5 の各柱試験体の kT の経年変化を示す。なお、図ごとに降雨の影響を受けない箇所と受ける箇所における kT の経年変化を示している。

まず N58, 64.8 に着目する。降雨の影響が無い箇所 (図-3.19(a)) の場合、材齢 1, 2 ヶ月の時点では早期脱型の試験体を除き、kT に養生方法や打込み時の加水による違いは見られない。しかし材齢 3 ヶ月の時点から kT は増加し、養生や加水による差異が kT の値に表れ始め、材齢 94 ヶ月では養生や加水による kT の差は最大で約 13 倍となっている。以上の結果より、降雨の影響が無い箇所では材齢が数年経過した後でも kT に養生や加水による影響の差異が見られることを確認した。降雨の影響がある箇所 (図-3.19(b)) においても、材齢 1 ヶ月では養生や加水による明確な差異は kT に見られない。さらに養生や加水による違いは、材齢 2 ヶ月以降から kT に表れ、材齢 6 ヶ月まで kT は増加している。しかし材齢 6 ヶ月以降、kT は減少する。これは降雨の影響が無い箇所では見られなかった傾向である。その後、養生方法により kT の増減は異なるが、材齢 94 ヶ月時点の養生による kT の差は約 2 倍に収まっている。現時点で上記のような結果が得られた原因は明らかになっていない。そのため 1 つの仮説ではあるが、試験体作製から間もない材齢 1, 2 ヶ月では、コンクリート中の含水率は比較的高く養生による差は表れにくい。しかしながら材齢の経過に伴いコンクリート中の水分が逸散し含水率が低下するため、kT は増加する。材齢が 1 年以上経過すると、水分逸散に伴う含水率の変化に比べ、降雨などの周辺環境が kT へ及ぼす影響が卓越する。その結果、材齢 94 ヶ月時点では降雨の作用の有無により kT は異なる傾向を示したと推察した。

N32 (図-3.20 (a), (b)) では、材齢により変動はあるが養生による差は kT に見られない。また降雨の影響の有無に関しても kT の値には表れていない。W/C が低く空隙構造が緻密であるために、養生や降雨の影響による差異が確認されなかったと考えられる。また N58,64.8 では kT の値は材齢の経過に伴い増減したが、N32 では 1 ヶ月から 94 ヶ月の期間の間、おおよそ横ばいの傾向を示している。郭らの研究により、水セメント比が低いほど質量変化率は小さくなることが確認されており、細孔組織が緻密になるにつれ、内部に存在する水の移動速度が遅くなるのが原因として挙げられている。本検討でも、N32 の試験体

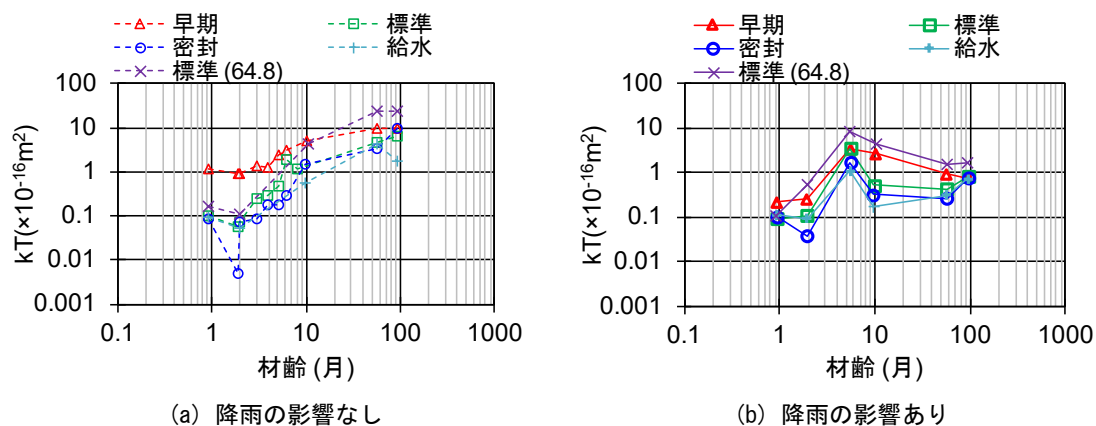


図-3.19 表層透気係数 kT の経年変化 (N58, 64.8)

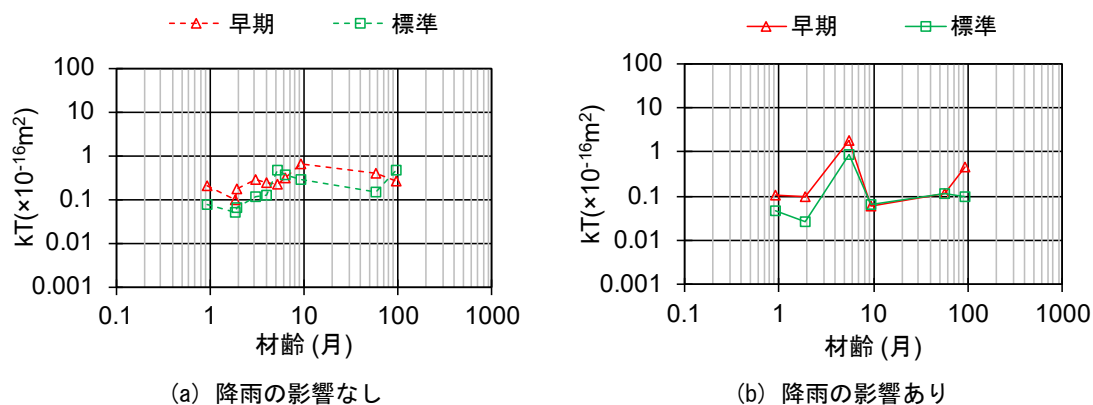


図-3.20 表層透気係数 kT の経年変化 (N32)

の空隙構造は N58, 64.8 と比較して密であると予想され、 kT に影響を及ぼす水分逸散量も大きく変化せず、さらに空隙構造も材齢により顕著に変化していないために、 kT は材齢によらずおおそ一定の値であったと考えられる。

BB57.5 (図-3.21 (a), (b)) に関しては、降雨の影響の有無によらず、材齢 1, 2 ヶ月では養生方法による差異が kT に見られる。しかし材齢の経過とともに標準養生の kT は増加し、材齢 1 ヶ月の時点で最大 55 倍であった養生による差は材齢 94 ヶ月で約 2 倍にまで縮小している。BB は N に比べ養生による影響を受けやすい¹⁹⁾。そのため、材齢 1, 2 ヶ月では養生方法により含水率や空隙構造に差が生じ、 kT にもそれらの違いが反映されたと考えられる。また N を使用した場合と同様に、材齢の経過とともに、降雨や日射などによる乾湿繰り返し作用によって養生による含水率や表層部の空隙構造の差が減少したために、 kT の差異は縮小したものと思われる。

続いて降雨が kT に与える影響について考察する。図-3.19, 20, 21 より、試験体の配合によって違いはあるもののほぼ全ての試験体において、降雨の影響がない箇所に比べ降雨の影響がある箇所の kT は小さくなった。これは降雨の作用を受けることでコンクリート中

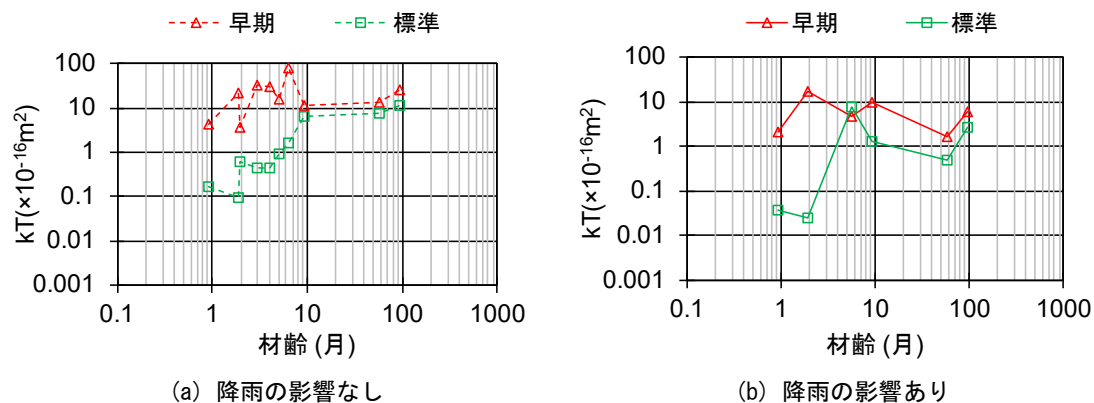


図-3.21 表層透気係数 kT の経年変化 (BB57.5)

の含水率や水和反応の進行程度が変化し、より緻密な空隙構造が形成されたことが要因として考えられる。

3.5.3.2.2 表面吸水試験 (SWAT) の結果

図-3.22 に材齢 95 ヶ月時点における各試験体の 10 分間の吸水量を示す。

まず養生が 10 分間の吸水量に及ぼす影響を考察する。N32 (図-3.22 左) に関しては、吸水量は 0.6ml 以下と他の材料配合の試験体に比べ少なく、養生による差異は明確には見られない。W/C が低く緻密な空隙構造が形成されたことが影響していると考えられる。

N58, 64.8 (図-3.22 中央) に注目する。降雨の影響が無い箇所では、早期脱型と打込み時に加水した試験体の吸水量は 3.0ml 以上である。これに対し、給水養生の試験体は他の養生方法に比べ吸水量が 2.0ml 以下であり、養生や加水による影響を確認することができる。一方降雨の影響がある箇所は、吸水量が 2.0ml 以上である打込み時に加水した試験体を除くと、それ以外の試験体には養生による明確な差異は見られない。降雨の影響の考察で述べたように、含水状態や水和度、空隙構造が降雨の作用により変化したことが要因として考えられる。

BB57.5 (図-3.22 右) は、降雨の影響の有無に関わらず、標準養生を施した試験体の吸水量は、早期脱型した試験体に比べ 1ml 程度減少している。本検討では材齢 1 年以内に吸水試験を実施していないため、吸水量の経年変化は不明である。しかしながら kT の結果を踏まえると、養生による吸水量の差異は材齢の経過に伴い縮小した可能性がある。

次に降雨が 10 分間の吸水量へ与える影響を考察する。試験体の配合により吸水量に差はあが、降雨の影響が無い箇所に比べ降雨の影響がある箇所の吸水量は小さい。 kT と 10 分間の吸水量は同様の傾向を示しており、降雨の影響を受ける箇所では、含水率や水和反応の進行程度が変化し、空隙構造がより緻密になったことが影響したと考えられる。

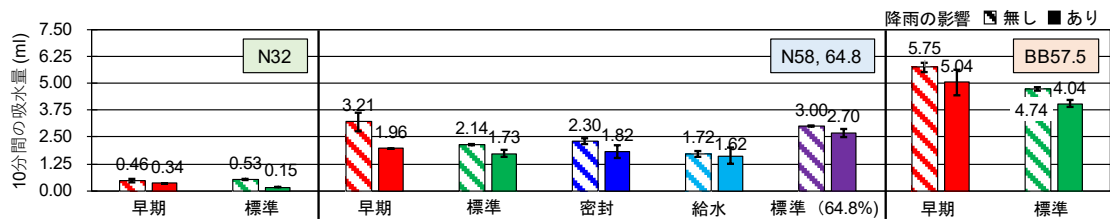


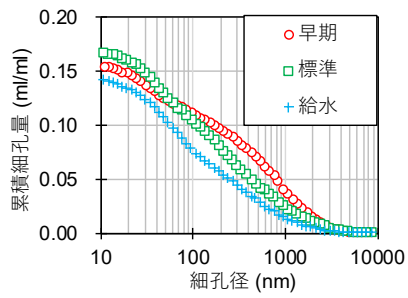
図-3.22 材齢 95 ヶ月時点の 10 分間の吸水量

3.5.3.2.3 空隙構造分析

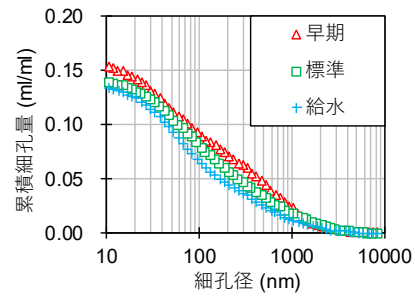
3.5.3.2.3.1 累積細孔量 (0~1cm における養生方法の比較)

図-3.23, 24 に N58, 64.8, 図-3.25, 26 に N32, 図-3.27, 28 に BB57.5 のごく表層部 (0~1cm)における累積細孔量を示す。

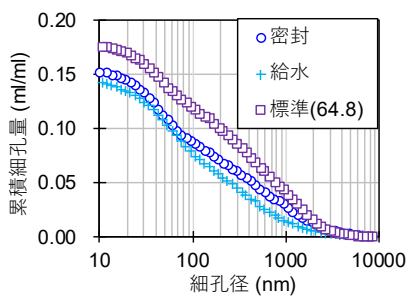
まず N58, 64.8 の空隙構造に着目する。図-3.23 (a), (c) に示す降雨の影響がない場合、打込み中に加水し、W/C を 58%から 64.8%へ増加させた試験体の累積細孔量が最も大きく、給水養生を施した試験体は最も密な空隙構造を有している。一方、図-3.23 (b), (d) に示す降雨の影響がある場合は、降雨の影響を受けない箇所に比べ養生による差が減少しており、28 日間密封養生と給水養生を施した試験体はほぼ同様の空隙構造である。この結果より、材齢 96 ヶ月経過した時点でも降雨の影響を受けない箇所では、養生方法による差は空隙構造に残存しており、一方で、図-3.23 (b), (d) に示す降雨の影響がある場合は、降雨の影響がない場合と比較し、養生の差異は減少することを確認した。既往の研究より、乾湿繰り返しのうち乾燥が空隙の粗大化に影響を及ぼすとの知見^{28, 29)}が得られている。青野らの検討²⁸⁾では、空隙構造の粗大化を 50℃の環境下で効果セメントペーストに乾燥を与えた際に確認しており、30℃の乾燥を実施した条件では空隙構造に変化は確認されていない。また影山ら²⁹⁾は、モルタル供試体を使用して乾湿繰り返しの作用が空隙構造の変化に及ぼす検討を行っているが、この場合の乾燥条件は 40℃に設定されている。本検討で使用した試験体の降雨の影響を受ける箇所は、RC ラーメン模擬高架橋を構成する柱部材のなかでも外側に面しており、日射や風の影響も直接受ける。そのため、模擬高架橋の内側である降雨の影響を受けない箇所に比べ、コンクリート表面の温度変化は大きく、これまで空隙構造の粗大化の要因として考えられていた温度条件にも達することが予想される。またボックスカルバート模擬試験体を使用した検討結果の考察でも述べたように、既往の研究によって 50nm 以下の空隙に存在する水分が逸散した場合、収縮に与える影響は極めて大きいこと、乾燥前の総空隙量に対する 50nm 以下の空隙量の割合と、乾燥による 50nm 以上の空隙量と増加率の間には相関があることが知られており、緻密な空隙構造を有するものほど乾燥による影響を受けることが確認されている。これらの知見を踏まえると、降雨により定期的に液状水がコンクリート内部へ浸透することで、空隙構造の粗大化の要因となる乾燥の影響



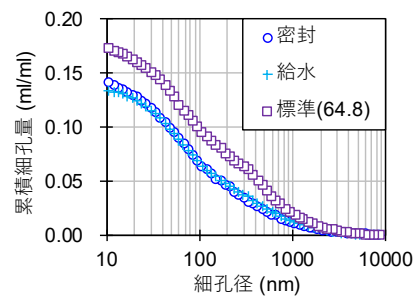
(a) 降雨の影響なし(早期, 標準, 給水)



(b) 降雨の影響あり(早期, 標準, 給水)

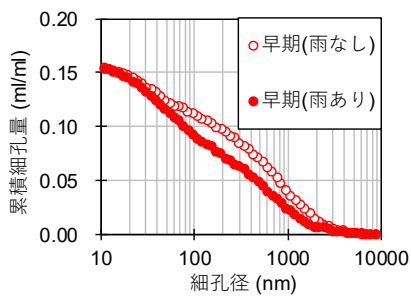


(c) 降雨の影響なし(密封, 給水, 標準 64.8)

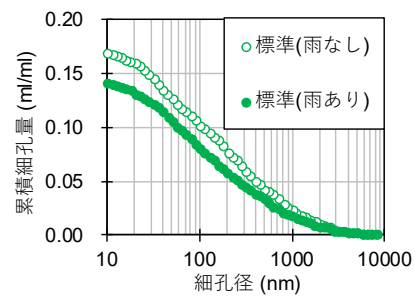


(d) 降雨の影響あり(密封, 給水, 標準 64.8)

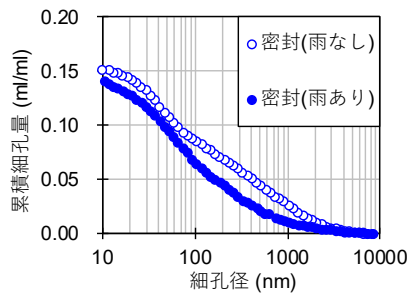
図-3.23 N58.5, 64.8の累積細孔量 (0~1cm: 養生方法の比較)



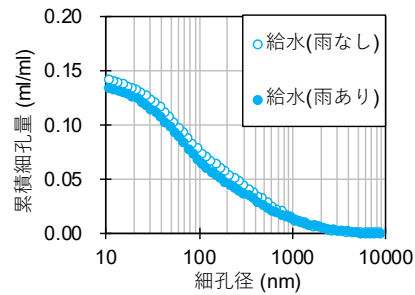
(a) 早期



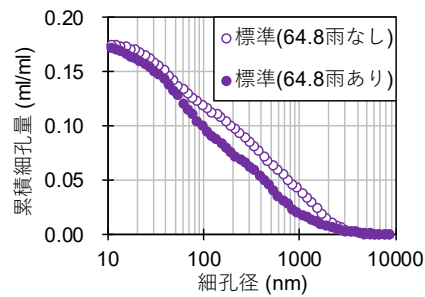
(b) 標準



(c) 密封



(d) 給水



(e) 標準 (64.8)

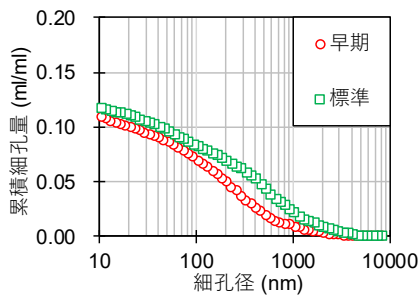
図-3.24 N58.5, 64.8の累積細孔量 (0~1cm: 降雨の影響の比較)

が緩和されたことや、養生方法による含水状態や水和の進行程度に顕著な相違がなくなっただけのために、降雨の影響がない箇所に比べ空隙構造に差異が見られなくなったと考えられる。

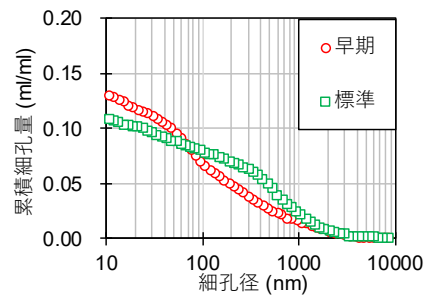
また、図-3.24 (d) に示す給水養生を施した試験体より得られた累積細孔量に着目すると、降雨の影響の有無にかかわらず同様の空隙構造が形成されている。その他の養生条件では、降雨の受けない箇所が降雨の影響を受ける箇所に比べ粗大な空隙構造となっており、給水養生のような外部より水を供給し、十分に水和反応が進行するような養生条件の場合、材齢7~8年程度であれば外部環境の影響を受けにくいことが本検討結果より示された。

以上より、鉄筋の腐食リスクが高い降雨の影響を受ける箇所では、降雨の影響を受けない箇所と比較して養生による差異が減少することに加え、密封養生のような水分逸散を防ぐ養生と給水養生のようなセメントの水和反応を十分に進行させる養生との違いが、外部環境の影響による空隙構造の変化に表れることを確認した。

続いてN32について考察する。図-3.25 (a), (b) より、降雨の影響の有無によらず、早期脱型した試験体に比べ、示方書相当の養生を施した試験体は空隙構造が粗大である。N58, 64.8%の累積細孔量の考察でも述べたが、緻密な空隙構造を有するものほど乾燥によって粗大化することが考えられる。既往の研究より、青野らは水中養生を1または4週間施したW/Cが35, 55%のセメントペーストの試験体を使用し、乾湿繰り返しの作用を与えた結果、いずれの試験体でも空隙構造が粗大になっていることを確認している。本検討でも本検討では、降雨の影響を目視で確認したうえでコアサンプルを採取した。しかし本検討結果を踏まえると、示方書相当のコアサンプルにおいては、早期脱型した場合に比べ降雨の影響が少ないために、空隙構造に顕著な変化が生じなかったと推察される。また、低W/Cの場合であっても降雨の影響により、更に緻密な空隙構造が形成される可能性も本実験結果より示唆された。

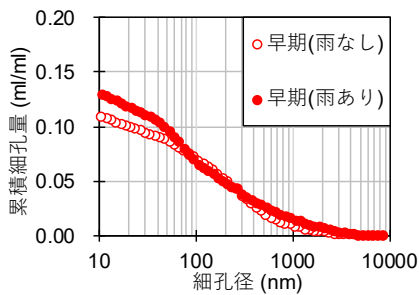


(a) 降雨の影響なし(早期, 標準)

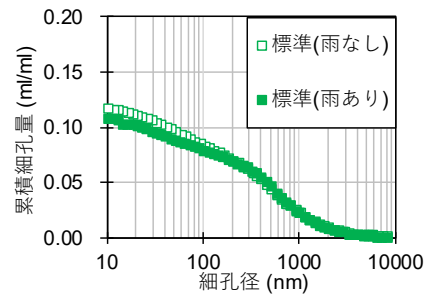


(b) 降雨の影響あり(早期, 標準)

図-3.25 N32の細孔径分布(0~1cm:養生方法の比較)



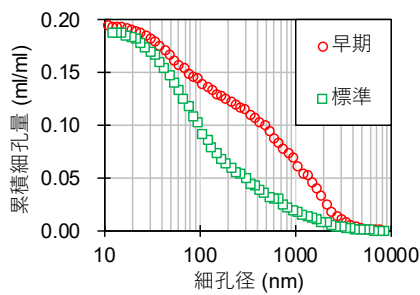
(a) 降雨の影響なし(早期, 標準)



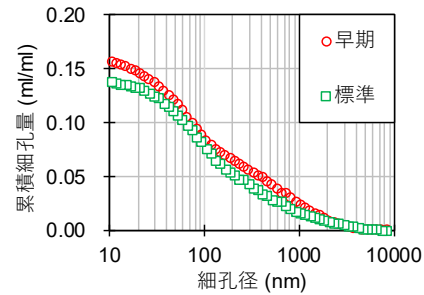
(b) 降雨の影響あり(早期, 標準)

図-3.26 N32の細孔径分布(0~1cm:降雨の影響の比較)

BB57.5に着目する。図-3.27 (a)に示す降雨の影響がない場合、早期脱型と示方書相当の養生を施した試験体間には養生による明確な差異が確認できる。降雨の影響を受けない場所に静置させ、継続的に表層品質に関する試験を実施したボックスカルバート模擬試験体より得られた結果でも、BBを使用した場合は養生による差が見られており、本検討結果と整合する。一方、図-3.27 (b)に示す降雨の影響を受ける場合には、降雨の影響を受けない箇所に比べ養生による差異が顕著に減少しており、養生方法によらずおおよそ同程度の空隙構造が形成されている。空隙構造に養生による違いが見られなくなった理由としては、降雨によりコンクリート表層部に液状水が浸透し、空隙構造の粗大化の要因となる乾燥の影響が緩和されたことや、特に早期脱型した試験体では、未水和セメントや長期的な反応性を有する高炉スラグ微粉末の反応が進行し、空隙構造が緻密化したことが考えられる。

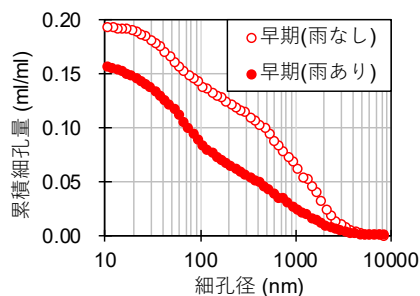


(a) 降雨の影響なし(早期, 標準)

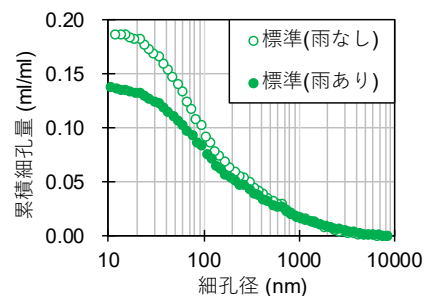


(b) 降雨の影響あり(早期, 標準)

図-3.27 BB57.5の細孔径分布(0~1cm:養生方法の比較)



(a) 降雨の影響なし(早期, 標準)



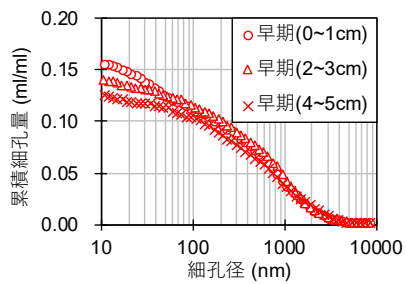
(b) 降雨の影響あり(早期, 標準)

図-3.28 BB57.5の細孔径分布(0~1cm:降雨の影響の比較)

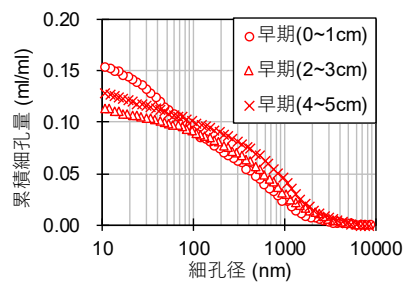
3.5.3.2.3.2 累積細孔量(深さ方向の比較)

図-3.29にN58, 図-3.34にN32, 図-3.37にBB57.5の0~5cmにおける累積細孔量を降雨の影響の有無ごとに示す。また, 図-3.30, 31, 32, 33にN58, 図-3.35, 36にN32, 図-3.38, 39にBB57.5の累積細孔量を深さ方向ごとに示す。

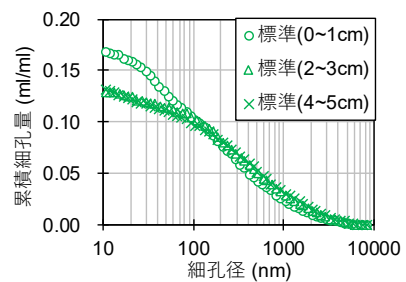
まずN58の降雨の影響を受けない箇所の結果を考察する。図-3.30(a), (c), (e)より, 降雨の影響を受けない場合は, 養生方法によらず, ごく表層部(0~1cm)の累積細孔量が多く, 表層から深くなるにつれ空隙構造は緻密になる。これは表層部ほど乾燥による影響が大きいため, 表層から0~1cmの累積細孔量が増加したと考えられる。図-3.30(b), (d), (f)に示す降雨の影響を受ける箇所においても, ごく表層における空隙構造が粗大である傾向は変わらない。しかし, 表層から2~3cmでは, 累積細孔量が減少する結果が標準養生以外の試験体より得られている。降雨の作用がある場合は, ごく表層部では定期的に液状水が浸透するものの, 日射や外気温などによる温度変化が顕著であり, 水分が逸散し易いと考えられるが, 表層から数センチ内部では温度変化の影響が緩和され, コンクリート内の湿度が比較的高い状態に維持されやすく, 水和反応が進行し空隙構造が緻密になったと推察される。Powersの研究³⁰⁾により, 相対湿度が80%を下回ると水和反応の速度が極めて遅くなることが知られており, この知見を踏まえると本検討で使用した試験体の中でも降雨の影響を受



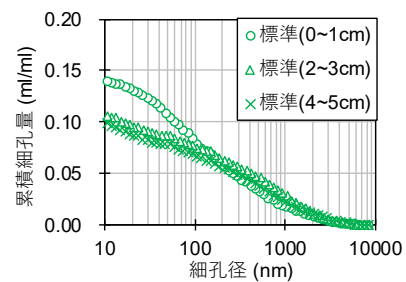
(a) 降雨の影響なし



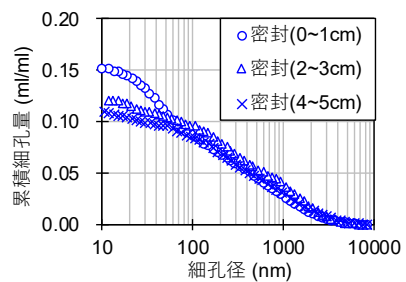
(b) 降雨の影響あり



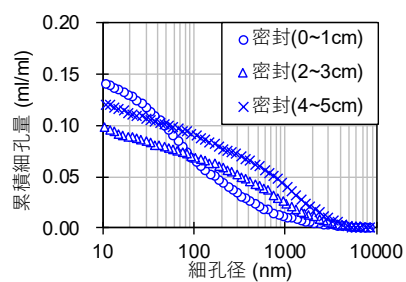
(c) 降雨の影響なし (標準)



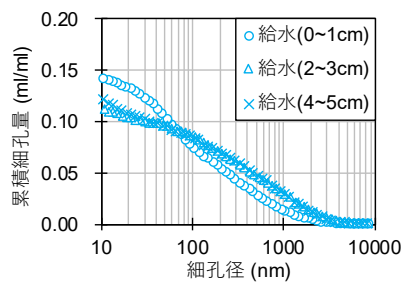
(d) 降雨の影響あり (標準)



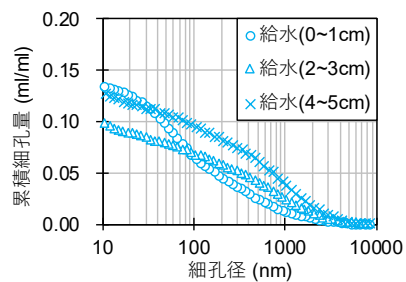
(e) 降雨の影響なし (密封)



(f) 降雨の影響あり (密封)



(g) 降雨の影響なし (給水)



(h) 降雨の影響あり (給水)

図-3.29 N58の細孔径分布 (降雨の影響の有無ごとに分類)

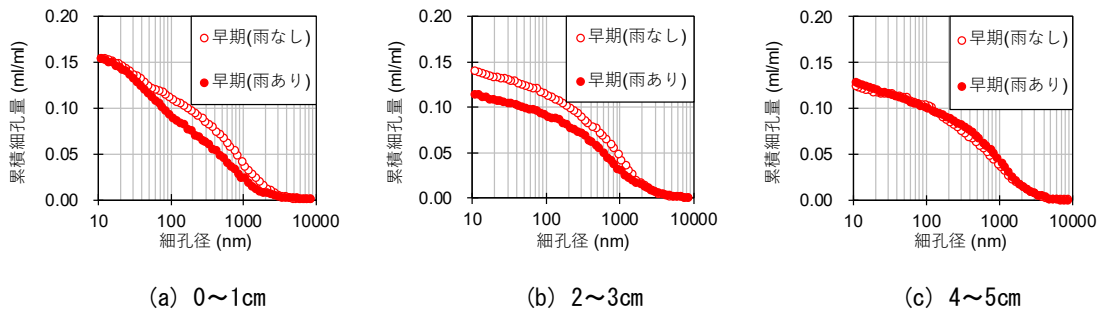


図-3.30 N58の細孔径分布（表層からの深さにより分類：早期脱型）

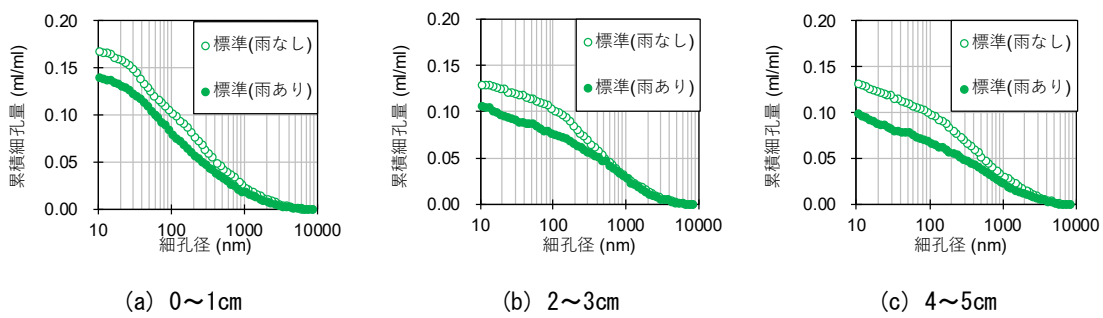


図-3.31 N58の細孔径分布（表層からの深さにより分類：標準）

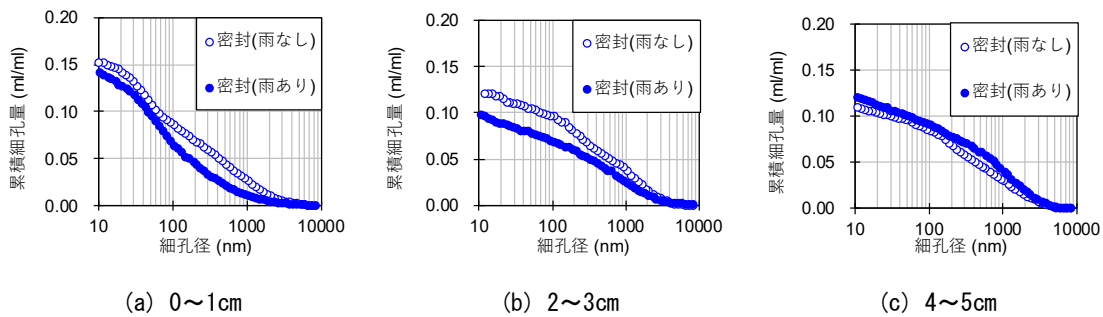


図-3.32 N58の細孔径分布（表層からの深さにより分類：密封）

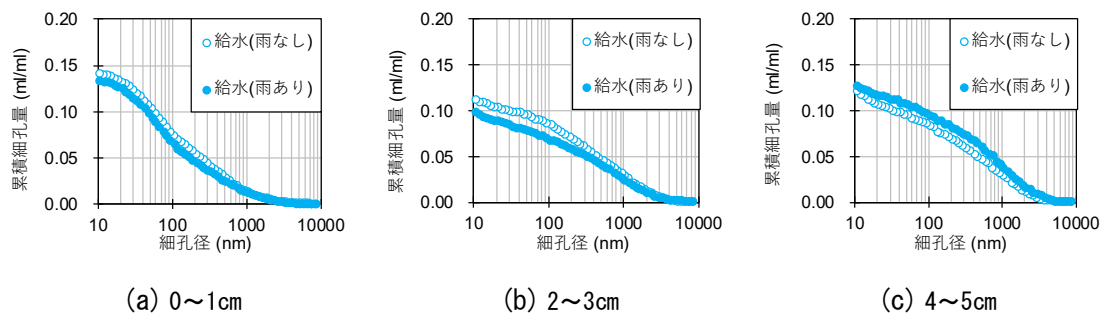
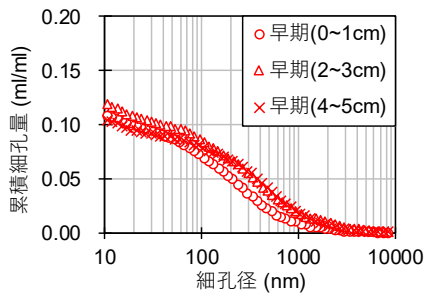


図-3.33 N58の細孔径分布（表層からの深さにより分類：給水）

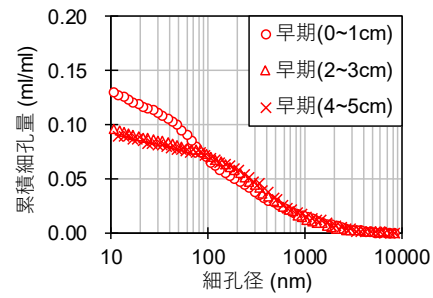
ける箇所は、表層から 2~3cm では 80%以上の相対湿度が維持されやすい状態にあったと考えられる。なお、標準養生を施した試験体は表層から 2~3cm と 4~5cm の箇所にて空隙構造に明確な差異が認められないことから、他の試験体に比べよりコンクリートの内部まで液状水が浸透した可能性が考えられる。また、図-3.29, 30, 31 より、養生方法によって違いはあるものの、表層からの深さにかかわらず、おおむね降雨の影響を受ける箇所は降雨の影響を受けない箇所に比べ、累積細孔量が減少している。降雨の影響の有無による差異は、給水養生を施した試験体にて最も小さく、密封養生を施した試験体では降雨の影響が見られることから、同一の養生期間であっても、水分逸散を抑制する密封養生と外部から水を供給する給水養生では、養生終了後に外部環境から受ける影響に対する抵抗性は異なると考えられる。

続いて N32 の降雨の影響を受けない箇所の結果に着目する。図-3.34(a), (c) より、ごく表層部から 4~5cm まで空隙構造に大きな変化は見られない。一方図-3.34(b), (c) に示す降雨の影響を受ける箇所の空隙構造には、深さ方向に差異が見られる。早期脱型した試験体のごく表層部における累積細孔量が、降雨の影響を受けない箇所と比較して多い理由は定かではない。しかし、図-3.35, 36 より、表層から 2~3cm の箇所では早期脱型、標準養生ともに空隙構造が緻密になっており、4~5cm では明確な差異が見られないことから、N32 のような密な空隙が形成されている場合であっても、N58 と同様に表層から数センチの深さでは比較的高い相対湿度が維持されたものと考えられる。

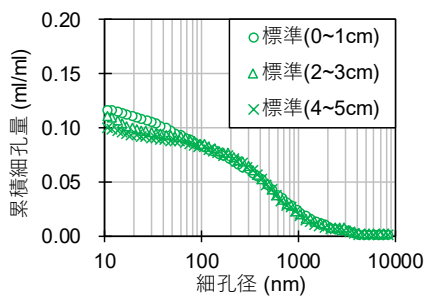
BB57.5 の降雨の影響を受けない箇所の結果に着目する。図-3.37(a), (c) より、養生方法にかかわらず、ごく表層部 (0~1cm) の累積細孔量が他の深さに比べ顕著に多いことが分かる。図-3.37(b), (d) に示す降雨の影響を受ける箇所では、降雨の影響を受けない箇所と比較し、ごく表層部 (0~1cm) の累積細孔量が減少している。また 2~3, 4~5cm でも降雨の影響を受ける箇所では、乾燥のみの作用を受ける箇所と比較し、累積細孔量は減少しているものの、その減少量は 0~1cm に比べ小さい。BB57.5 は N 以上に降雨の影響により空隙構造が緻密化しているが、これは高炉スラグ微粉末の反応が長期にわたり反応する性質を有していることが要因と考えられる。図-3.38, 39 より、早期脱型では深さ方向によらず降雨の影響を受ける箇所が、降雨の影響を受けない箇所に比べ緻密な空隙構造が形成されており、標準養生では、0~1, 2~3cm まで同様の傾向が見られ、4~5cm では、降雨の影響の有無による差異は見られない。これは標準養生を施すことにより、コンクリート表層部の空隙が密になり、降雨による液状水の浸透が抑制されたことが要因の一つとして考えられる。



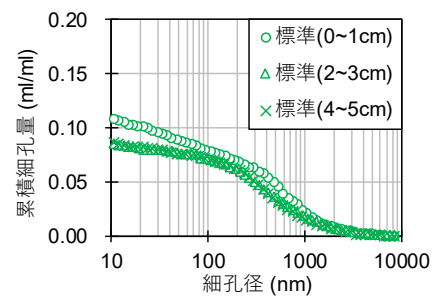
(a) 降雨の影響なし（早期）



(b) 降雨の影響あり（早期）

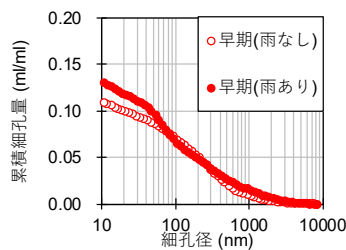


(c) 降雨の影響なし（標準）

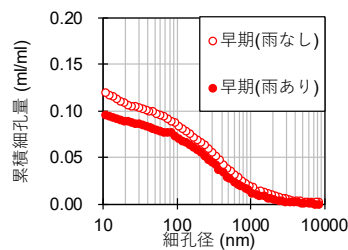


(d) 降雨の影響あり（標準）

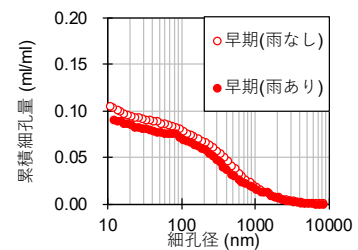
図-3.34 N32の細孔径分布（深さ方向の比較）



(a) 0~1cm

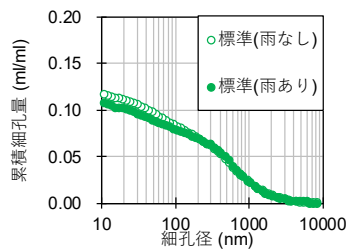


(b) 2~3cm

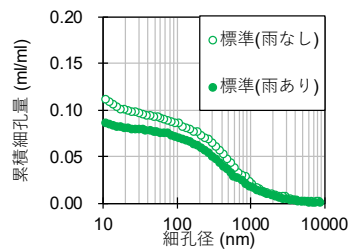


(c) 4~5cm

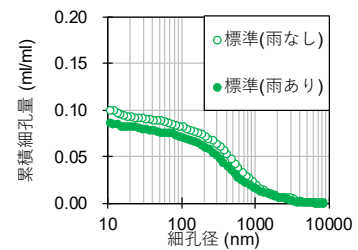
図-3.35 N32の細孔径分布（表層からの深さにより分類：早期脱型）



(a) 0~1cm

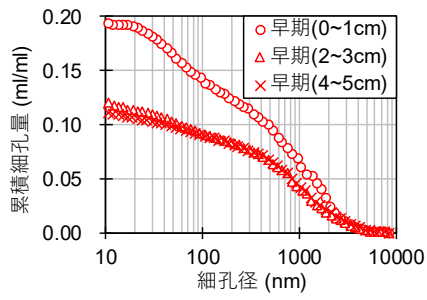


(b) 2~3cm

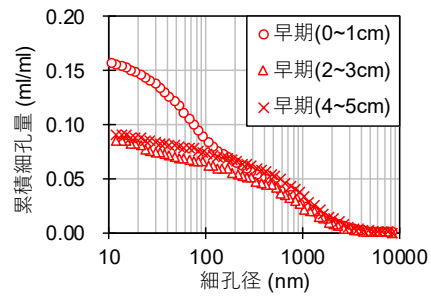


(c) 4~5cm

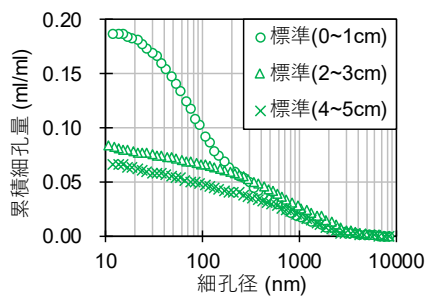
図-3.36 N32の細孔径分布（表層からの深さにより分類：標準）



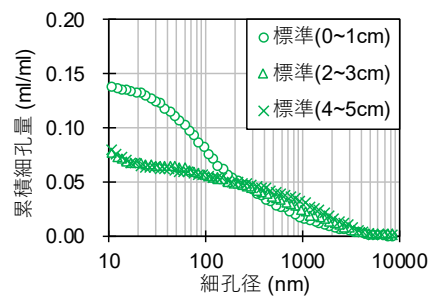
(a) 降雨の影響なし（早期）



(b) 降雨の影響あり（早期）

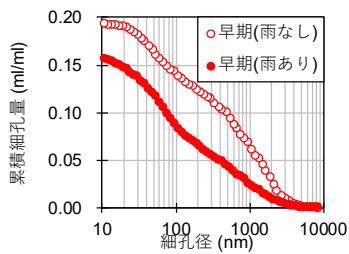


(c) 降雨の影響なし（標準）

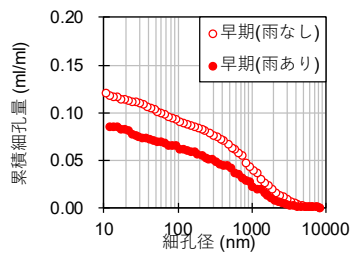


(d) 降雨の影響あり（標準）

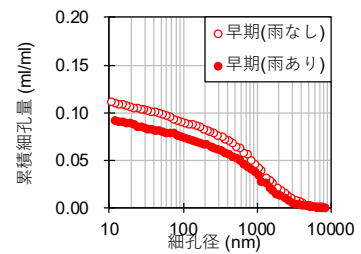
図-3.37 N57.5の細孔径分布（深さ方向の比較）



(a) 0~1cm

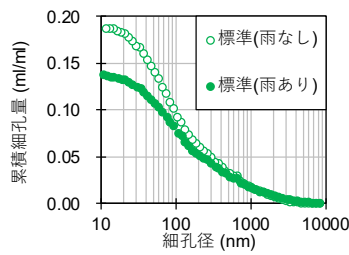


(b) 2~3cm

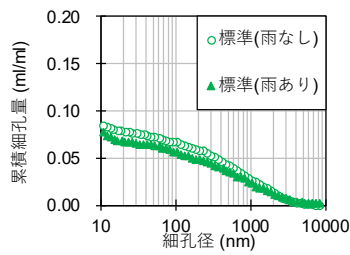


(c) 4~5cm

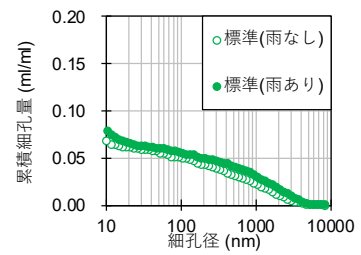
図-3.38 BB57.5の細孔径分布（表層からの深さにより分類：早期脱型）



(a) 0~1cm



(b) 2~3cm



(c) 4~5cm

図-3.39 BB57.5の細孔径分布（表層からの深さにより分類：標準）

3.5.3.2.3.3 インクボトル空隙と連続空隙

図-3.26 に N58, 64.8 のインクボトル空隙と連続空隙量, 図-3.27 に連続空隙率を示す。

まず, 降雨の影響がない場合について考察する。図-3.26 (a) より, 養生条件が良くなるにつれ累積細孔量は減少しており, その傾向は表層から 2~3cm の深さまで確認することができる。したがって本検討で使用した試験体においては, 表層から 2~3cm まで養生の影響を受けていると考えられる。連続空隙率でもその差は僅かであるが, 同様の傾向が見られる。降雨の影響を受けない場合は, 透気性や吸水性, 細孔径分布のピーク径の観点からは養生による差を確認している。今回検討に用いた連続空隙率は水銀の圧入を 2 回繰り返すことで算出している結果であり, 漸次繰り返しなどによって得られる連続空隙率であれば, 養生による差異が明確に見られる可能性がある。

降雨の影響がある場合についても, 降雨の影響がない場合と同様に図-3.26 (b) に示す累積細孔量では, ごく表層部では養生による差異は見られる。しかし, 表層から 2~3cm の深さでは, 降雨の影響を受けない箇所と比較し, 養生による差異が縮小している。連続空隙率に関しても, 表層から 2~3cm 以降では養生による明確な差異は見られない。

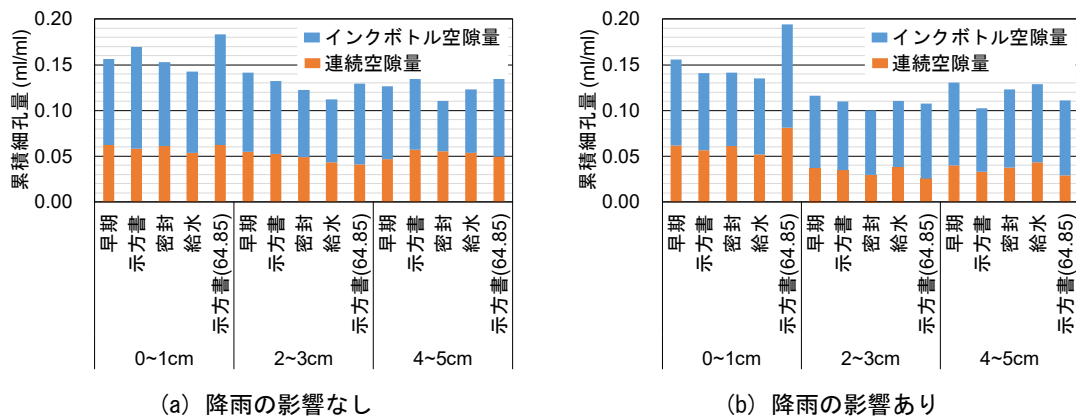


図-3.26 N58, 64.8 のインクボトル空隙量と連続空隙量 (0~5cm)

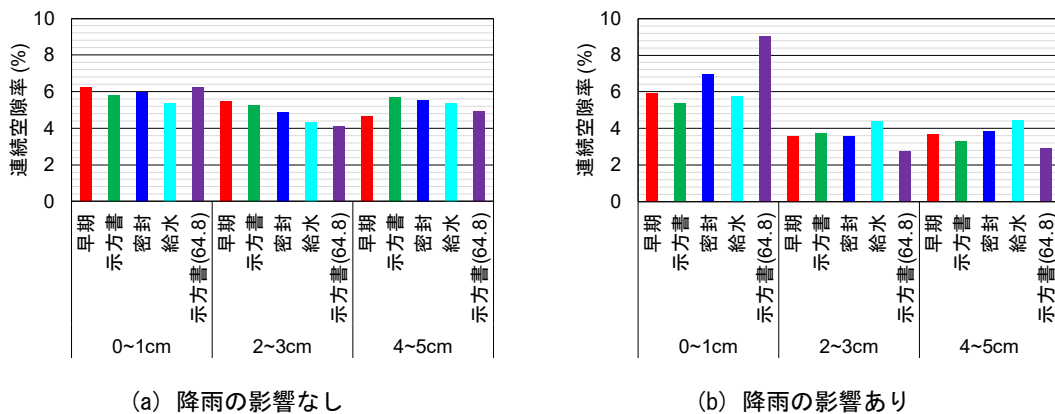


図-3.27 N58, 64.8 の連続空隙率 (0~5cm)

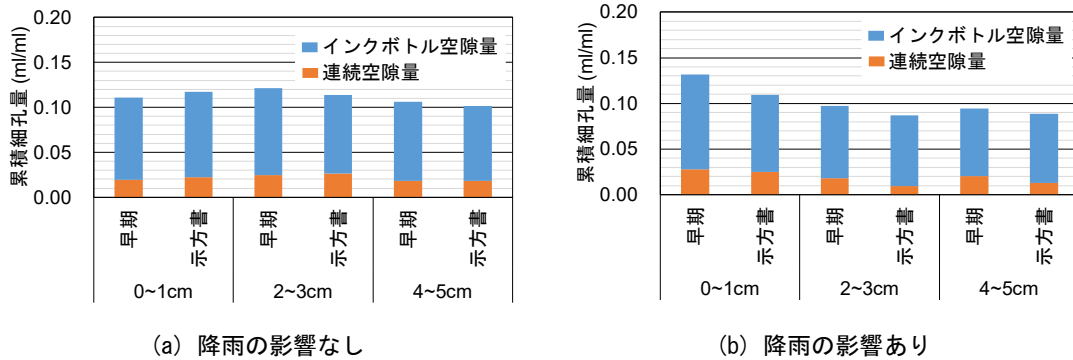


図-3.28 N32のインクボトル空隙量と連続空隙量(0~5cm)

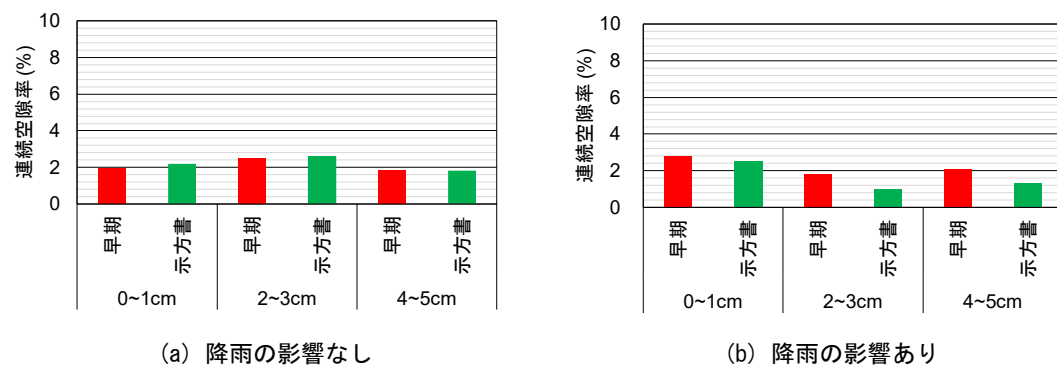


図-3.29 N32の連続空隙率(0~5cm)

累積細孔量の考察でも述べたように、降雨の影響を受ける場合、液状水がコンクリート表層部に浸透するが、ごく表層では日射による気温の上昇などの要因により水分が逸散し易い。しかしながら、表層から数センチの深さでは乾燥の影響は減少し、比較的高い含水状態が維持されるために、養生による差異は材齢の経過に伴い縮小したと考えられる。

図-3.28にN32のインクボトル空隙と連続空隙量、図-3.29に連続空隙率を示す。降雨の影響を受けない場合、図-3.28(a)に示す累積細孔量、図-3.29(a)に示す連続空隙率の両方で養生による差は見られない。上述したように低W/Cであり緻密な空隙構造が形成されていたことが要因として考えられる。一方、降雨の影響を受ける場合では、図-3.28(b)に示す累積細孔量には養生による差を確認した。降雨の影響の有無によりコンクリート中の含水率や水和反応の程度が変化し、空隙構造が緻密化したものと考えられる。

図-3.30にBB57.5のインクボトル空隙と連続空隙量、図-3.31に連続空隙率を示す。まず降雨の影響を受けない場合に注目する。図-3.30(a)より、ごく表層部では累積細孔量に養生による差異は見られないものの、表層から2~3、4~5cmでは示方書相当の養生を施した試験体は、早期脱型に比べ累積細孔量は減少している。一方、図-3.31(b)に示す連続空隙率では明確な差異は見られない。図-3.30(b)、図-3.31(b)に示す降雨の影響を受ける場合は、

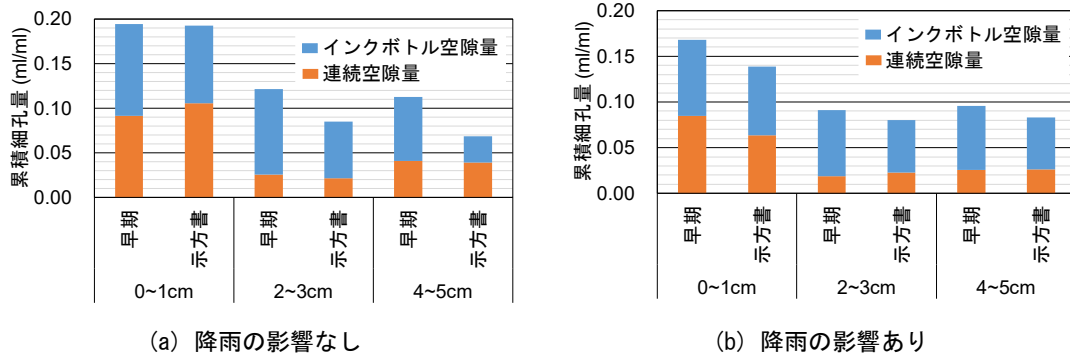


図-3.30 BB57.5のインクボトル空隙量と連続空隙量(0~5cm)

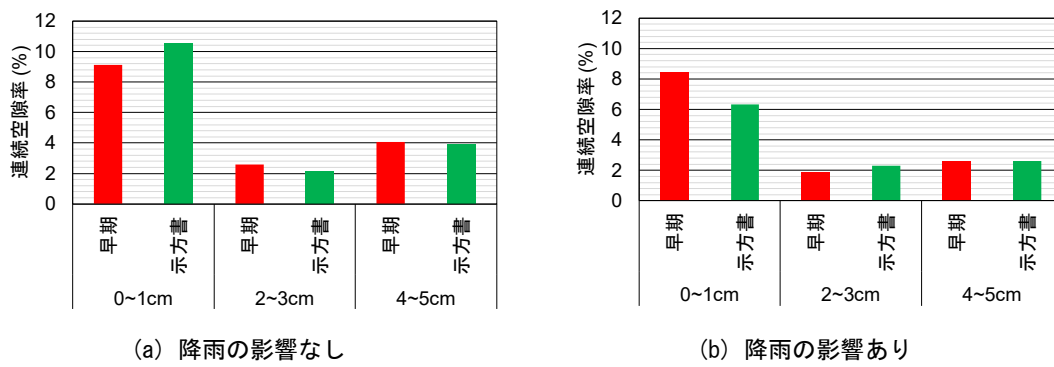


図-3.31 BB57.5の連続空隙率(0~5cm)

累積細孔量、連続空隙率ともにごく表層部では、乾燥のみの影響を受ける箇所と比べ、減少している。ピーク径の結果においても同様の傾向を示す結果が得られており、異なる空隙の評価指標を用いても、養生による差異がNに限らずBBでも降雨の影響を受ける場合は空隙構造が緻密化していることを確認した。

3.5.3.2.3.4 閾細孔径

図-3.32にN58, 64.8より得られた材齢96ヵ月時点の表層から深さ5cmまでの閾細孔径を示す。まず図-3.32(a)に示す降雨の影響がない箇所について考察する。この場合、表層から4~5cmの深さまでおおむね養生による差異が残存していることが確認できる。その傾向は特にごく表層部で顕著であり、閾細孔径の差異は最大で約4倍であった。上述した細孔分布のピーク径においても同様の結果が得られており、降雨の影響がないことや、設置個所が日陰であり日射などによる温度上昇も顕著ではなかったことなどが養生の差が残存していた要因として考えられる。

一方、図-3.32(b)に示す降雨の影響がある箇所の場合、降雨の影響がない箇所と比較して養生による差異が縮小している。特に早期脱型や打込み時に加水した試験体の閾細孔径が緻密になっており、養生の差異は約2.8倍であった。降雨の作用を受ける場合、液状水が

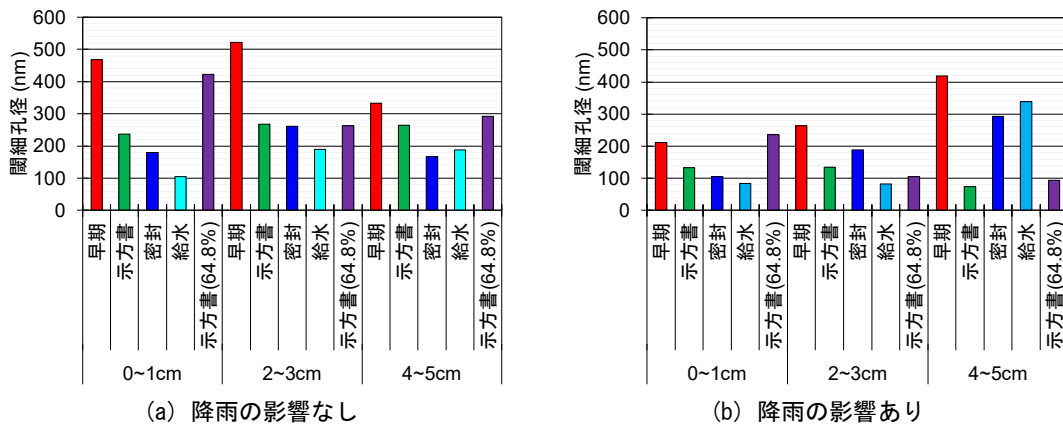


図-3.32 材齢 96 ヶ月時点の閾細孔径 (N58, 64.8)

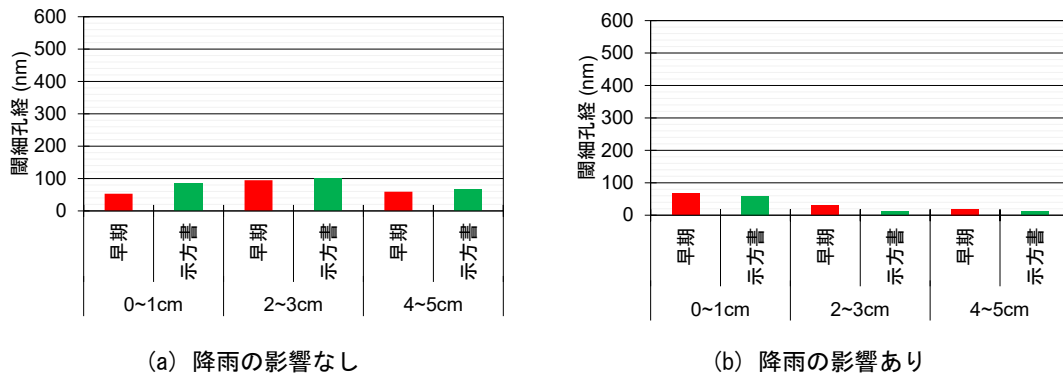


図-3.33 材齢 96 ヶ月時点の閾細孔径 (N32)

定期的にコンクリート内へ浸透するため、表層から数センチの深さの相対湿度は比較的高い状態に保たれる。この影響によって未水和セメントの反応が進み、空隙構造がより緻密になり、養生の差異が縮小した可能性が考えられる。

図-3.33 に N32 より得られた材齢 96 ヶ月時点の表層から深さ 5cm までの閾細孔径を示す。本検討結果より、N32 では降雨の影響の有無によらず 100nm 以下の緻密な閾細孔径が形成されていた。また、僅かな差ではあるが、降雨の影響を受ける箇所の表層から 2~5cm の閾細孔径は、降雨の影響を受けない箇所の同一の深さの閾細孔径に比べ緻密である。ごく表層部に関しては液状水が浸透しても乾燥により水分は逸散し易いが、一定の深さまで浸透した液状水はコンクリート中に留まり、比較的高い含水状態が維持され、セメントの水和反応が進行し、より緻密な空隙構造が形成されたと推察した。

図-3.34 に BB57.5 より得られた材齢 96 ヶ月時点の表層から深さ 5cm までの閾細孔径を示す。図-3.34 (a) に示す降雨の影響を受けない場合は、材齢 96 ヶ月経過した時点でも閾細孔径に養生による明確な差を確認することができ、ごく表層部にてその差は約 5.7 倍である。一方、図-3.34 (b) に示す降雨の影響を受ける場合は、降雨の影響を受けない場合と比

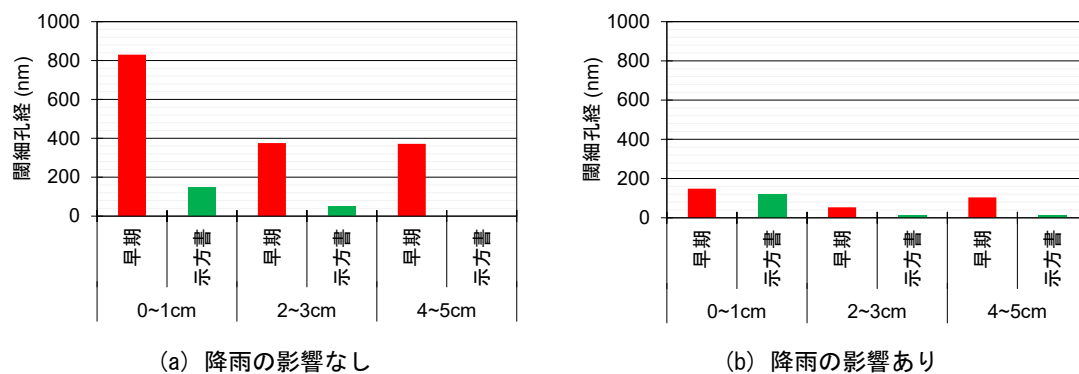


図-3.34 材齢96ヵ月時点の閾細孔径 (BB57.5)

較し、養生による差異は著しく縮小しており、その差は約1.2倍である。N32, 58, 64.8でも述べた液状水の浸透による未水和セメントの水和に加え、使用材料に含まれる高炉スラグ微粉末の長期反応性によって、降雨の影響を受ける箇所では緻密な空隙構造が形成されたものと考えられる。

3.6 室内にて作製した試験体を用いた検討

これまでの屋外に暴露された試験体を用いた検討結果を踏まえ、室内で作製した試験体を用い、現象の再現性を確認するとともに、これまで実施してきた透気性、吸水性、空隙構造の分析に加え、質量や含水状態の変化やフライアッシュを混合した場合など新たな材料を追加し、養生による差異が縮小する現象の機構について検討を行うこととした。

3.6.1 実験概要

3.6.1.1 供試体の概要

表-3.12 に本検討で使用した試験体の概要、表-3.13 に配合、図-3.35 に本検討における試験体の作製から各種試験の実施に至るまでの流れ、図-3.36 に試験体の概要を示す。本検討ではモルタル試験体を使用した。セメント種類は N、BB（高炉スラグ微粉末 50%内割置換）、FA（フライアッシュ 20%内割置換）の 3 種類とし、いずれも水結合材比 W/B は 50% とした。本検討ではまず、Φ150×300mm の円柱供試体を作製し、材齢 1 日にて脱型後、6 等分になるように切断した。ここで供試体の高さ方向の影響を排除するため、打込み面と下面となった箇所を排除し、それ以外の部分を供試体（150×50mm）として使用した。切断後は、一面開放となるようにプライマーとエポキシ樹脂を塗布し、材齢 4 日時点から各種養生を施した。なお、プライマーとエポキシ樹脂を塗布する際に、可能な限り水分の逸散を抑制するため、開放部分となる箇所にはビニールテープを貼っている。本検討では早期脱型（材齢 4 日以降、20℃の室内に気中暴露）、密封養生（材齢 4 日以降、アルミテープで封緘）、水中養生（材齢 4 日以降、20℃の水中に浸漬）の 3 水準の養生条件を設定しており、材齢 32 日まで 28 日間養生を行った。

表-3.12 試験体の概要

試験名	セメント種類	水結合材比 W/B (%)	養生条件	養生開始時の材齢	養生終了時の材齢
N-Poor	N	50.0	早期脱型	—	1 日
N-Seal			密封養生	4 日	32 日
N-Water			水中養生	4 日	32 日
BB-Poor	BB		早期脱型	—	1 日
BB-Seal			密封養生	4 日	32 日
BB-Water			水中養生	4 日	32 日
FA-Poor	FA		早期脱型	—	1 日
FA-Seal			密封養生	4 日	32 日
FA-Water			水中養生	4 日	32 日

表-3.13 試験体の配合表(モルタル)

セメント種類	水結合材比 W/B (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)								
			水	セメント	高炉スラッグ微粉末	フライッシュ	砂	混和剤 1	混和剤 2	混和剤 3	混和剤 4
			W	C	BB	FA	S	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4
N	50.0	2	412	897	—	—	1794	9	26	0.7	0.8
BB			412	449	449	—	1794	9	26	0.7	0.8
FA			412	718	—	179	1794	9	26	0.7	0.8

Ad1:AE 減水剤, Ad2:増粘剤, Ad3:消泡剤, Ad4:AE 剤

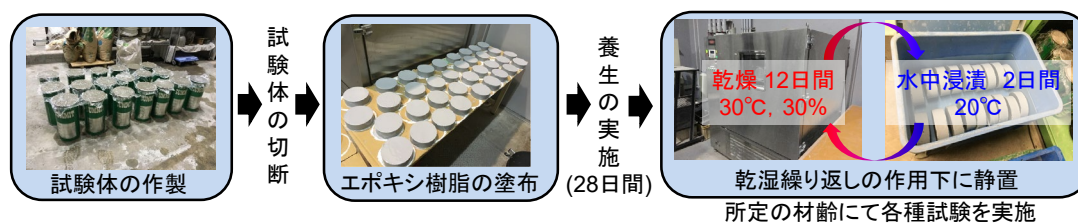


図-3.35 試験体の作製から各種試験の実施に至るまでの流れ

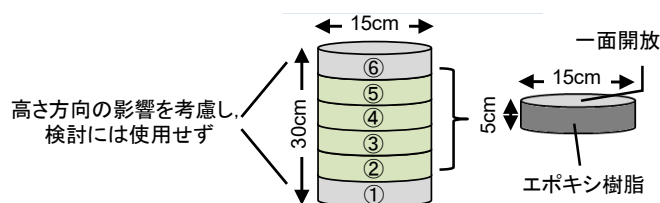


図-3.36 試験体の概要

養生終了後、試験体を乾湿繰り返しの環境下に置いた。本検討では、乾燥は 30°C、30% に設定した恒温恒湿槽にて 12 日間、湿潤は 20°C 水中に 2 日間試験体を静置することで、乾湿繰り返しの作用を与えた。

3.6.1.2 実験概要

本検討で実施した各試験の概要を表-3.14 に示す。ここでは、所定の乾湿繰り返しのサイクル数に達した際に、試験体の質量変化、含水率、空隙構造、透気性、吸水性に関する試験を実施した。

3.6.1.2.1 質量変化

養生終了時の試験体の質量を基準として、その後の変化量を乾湿繰り返しの各サイクルの乾燥と湿潤後に測定することで検討した。本検討では 3 体の試験体の平均値を用い質量変化を算出している。測定精度は小数点第 2 位までとした。

3.6.1.2.2 含水率

1,2,4 サイクル時の乾燥と湿潤後に、試験体を乾式切断機により 1cm 間隔で切断し、1cm 間隔で得られた試料を 105°C の乾燥炉で 24 時間乾燥することで測定した。

3.6.1.2.3 空隙構造

1,2,4 サイクル時に水銀圧入試験装置 (MIP) により、空隙構造を分析した。物質移動抵抗性は、特に乾燥過程終了後の空隙構造に影響を受けるため、本検討では乾燥過程終了時の試験体より試料を採取し、水銀圧入試験を実施した。MIP で使用する試料は、含水率と同様に供試体の表層から深さ 5cm までを乾式切断機により 1cm 間隔で切断し、粗骨材が含まれていないことや細骨材が大半を占めていないことに注意しつつ、5mm 角程度の立方体となるよう整形し、作製した。その後、試料をアセトンに 24 時間浸漬し、D-dry 法により 24 時間乾燥させ分析した。なお本検討でも、累積細孔量と細孔径分布のピーク径に加え、細孔空隙の中でも物質移動に関与すると考えられている連続空隙量と閾細孔径²¹⁾を評価指標とした。本検討で測定する空隙の最小径はこれまでと同様に 10nm とした。閾細孔径を算出するに当たっては、本検討では酒井らの手法¹⁶⁾を参考とし、セメントペースト体積の 16% に相当する水銀が圧入された時点の細孔直径を閾細孔径とした。また、細孔空隙の中でもインクボトル空隙と、物質移動に関与する連続空隙を区分するため、1 回目の細孔径分布測定後 (130MPa まで加圧)、0.15MPa 程度まで減圧し、再度 130MPa まで加圧し 2 回目の細孔径分布の測定を行った。

表-3.14 試験概要

試験項目	試験実施時の サイクル数	測定対象の範囲	試験体数
質量変化	各サイクルにて実施	—	3 体
含水率	1, 2, 4	0~5cm (1cm 間隔で測定を実施)	1 体
空隙構造	1, 2, 4 (乾燥過程終了後)		(1 体の試験体を 1cm 間隔で切断)

3.6.2 試験結果

3.6.2.1 質量変化

図-3.37にN, BB, FA ごとの養生終了時から乾湿繰り返しを4サイクル終了した時点までの質量変化を示す。図-3.37より、セメント種類によらず、乾湿繰り返しのサイクルが増えるに従い、養生による質量変化の差異が減少している。この結果より、乾燥により逸散する水分量と、水中浸漬により供試体中に浸透する水の量には養生による差異が見えなくなると考えられるが、実際にはどの程度の深さまでの水分が逸散もしくは浸透しているかは定かではない。そのため、本検討結果を踏まえ表層から1cm 間隔で供試体中の含水状態を検討することとした。

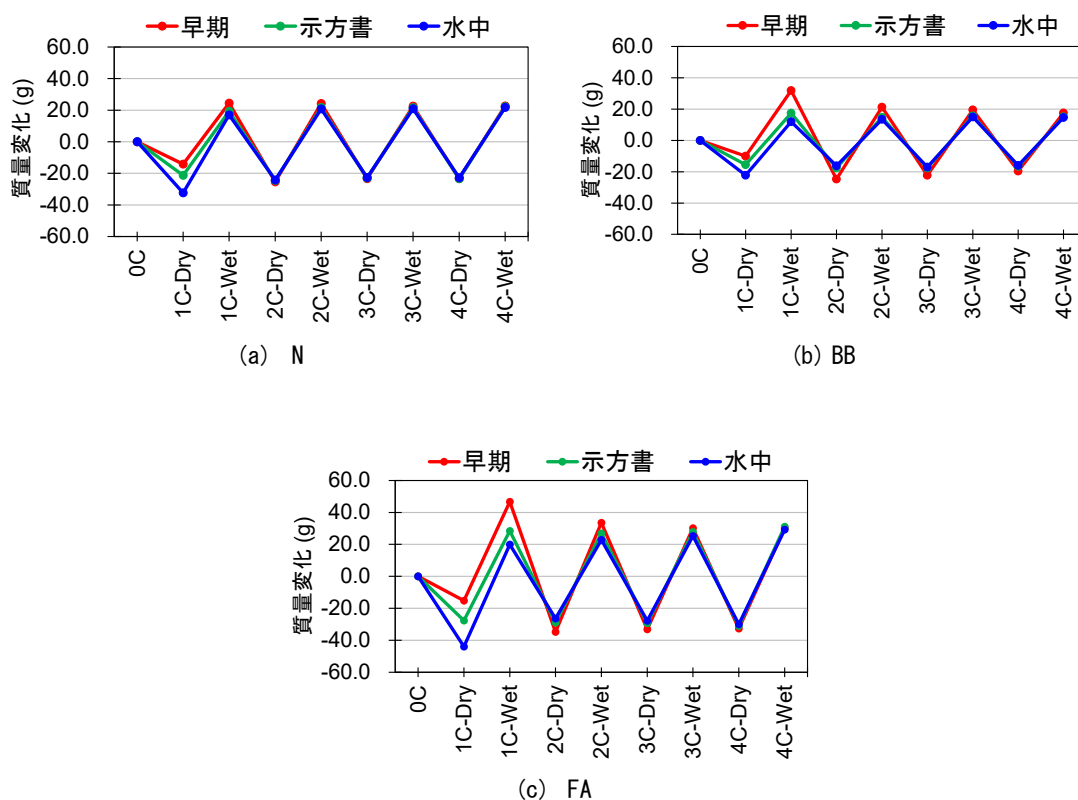
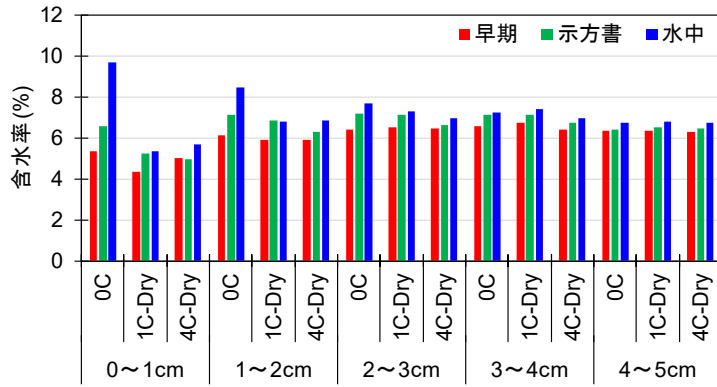


図-3.37 質量変化

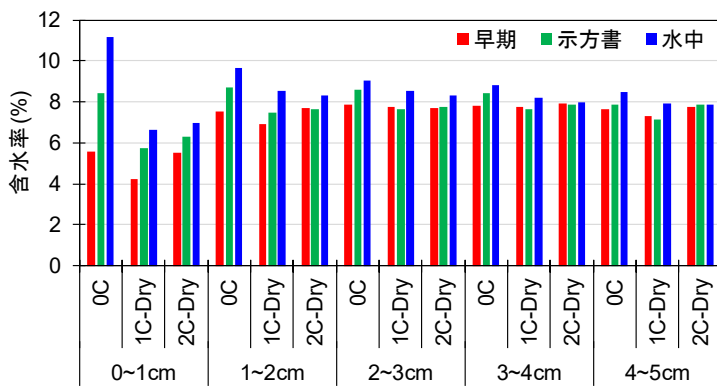
3.6.2.2 含水率

図-3.38にN, BB, FA ごとの養生終了時から乾湿繰り返しを4サイクル終了した時点までの含水率を示す。なお、含水率は表層から1cm 間隔で測定している。

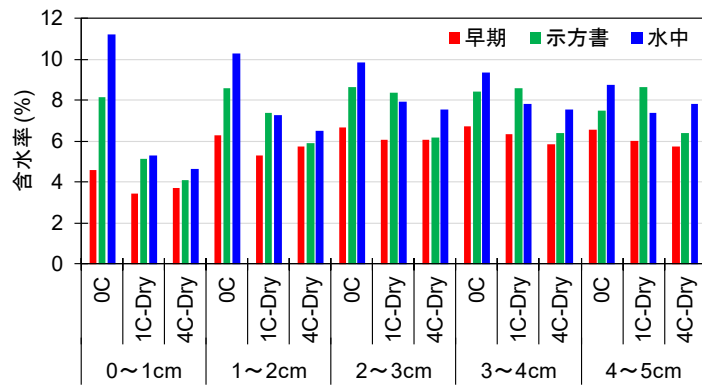
N の場合 (図-3.38(a)), 0C の時点では養生条件が良いほど含水率が高く、その傾向は表層部になるにつれ顕著であり、0~1cm の深さでは4.3%の差が生じている。しかし12日間の乾燥を終えた1C-Dry では養生による差異は減少し、ごく表層部である0~1cm の深さでも含水率の養生による差は1%まで減少しており、さらに乾湿繰り返しのサイクルを重ねた



(a) N



(b) BB



(c) FA

图-3.38 含水率 (0~5cm)

4C-Dry では養生の差異は 0.7%である。BB, FA の場合 (図-3.38 (b), (c)) も同様に、乾湿繰り返しのサイクルを重ねるごとに養生による含水率の差は減少しており、BB では養生を終えた直後の 0C で、0~1cm の深さでは含水率の差が 5.6%であったが、4C-Dry では 1.4%、FA に関しては 0C で 6.6%であった含水率の差は 0.9%まで減少している。これらの結果より、N に比べ、混和材を混合した場合は養生を終えた直後の含水率の差異は大きいものの、乾湿繰り返しの作用を受けるとそれらの差異は、セメントの種類によらず減少することを確認した。なお質量変化の結果でも乾湿繰り返しを繰り返すことで養生による差が減少する結果が得られており、本検討結果も質量変化の結果に整合するものと考えられる。

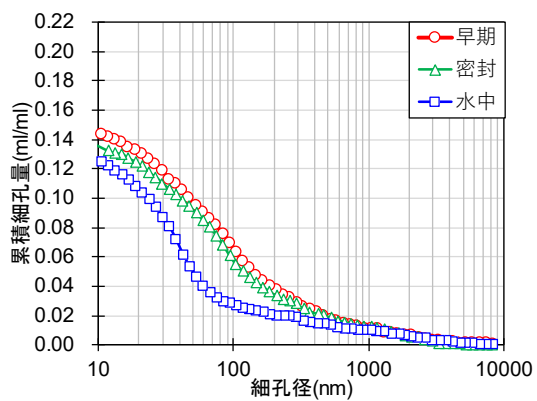
3.6.2.3 累積細孔量

図-3.39 に N, BB, FA ごとの 0C と 4C-Dry の累積細孔量を示す。

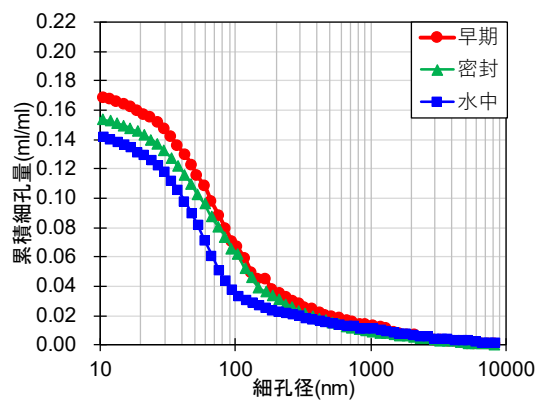
図-3.39 (a), (b)に示す N に着目する。0C では早期脱型と密封養生に大きな差異は見られないものの、養生条件が良くなるにつれ累積細孔量が減少している。早期脱型と密封養生に明確な差異が確認されなかったのは、養生を材齢 4 日より施したことが要因と考えられる。しかし、伊与田らの検討³¹⁾では、乾燥環境にセメントペーストの試験体を暴露した後、十分な水分の供給を行うことにより、再水和反応が生じ、乾燥期間を設けた場合でも水中養生を施した試験体と同程度の空隙構造が形成されることが確認されていることから、水中養生に関しては脱型直後から養生を実施した場合と比較し、セメントの反応率は低いものの、早期脱型と比較すると水和反応の進行の程度は大きく異なると考えられる。4C-Dry ではセメントの種類によらず累積細孔量は増加し、さらに物質移動抵抗性に関与すると考えられる 100nm 以上の細孔径では 0C に比べ養生の差が減少している。青野ら²⁸⁾や黒澤ら³²⁾の研究より、空隙構造の粗大化には乾燥が強く影響を及ぼすことが報告されており、特に 50nm 以下の緻密な空隙を有するものほどその影響が大きいことが知見として述べられている。本検討でも乾湿繰り返しの作用を受けることで累積細孔量が増加し、空隙構造が養生終了時と比べ粗大になっていることから、主に乾燥が空隙構造の粗大化に影響を及ぼしていると考えられる。加えて、累積細孔量が最も少なく、緻密な空隙構造が形成されていた水中養生を施した試験体が、他の養生方法に比べ空隙構造が大きく変化している点も既往の研究より得られた知見と整合している。

続いて図-3.39 (c), (d)に示す BB の結果より、早期脱型した試験体は乾湿を繰り返すことで空隙構造が緻密化している一方、密封、水中養生を施した試験体は空隙構造が粗大になっている。早期に脱型した試験体は、未反応のセメントや高炉スラグ微粉末が他の養生方法に比べ多く残存しており、乾湿のサイクルを重ねる中でセメントや高炉スラグの反応率が高まり、空隙構造が緻密化したと考えられる。密封、水中養生を施した試験体に関しては、N の考察で述べたように緻密な空隙構造を有するために乾燥による空隙構造の粗大化の影響をより強く受け、養生の差異が減少したと考えられる。

図-3.39 (e), (f)に示す FA に関しては、N, BB と比較し養生による差異が顕著に減少し

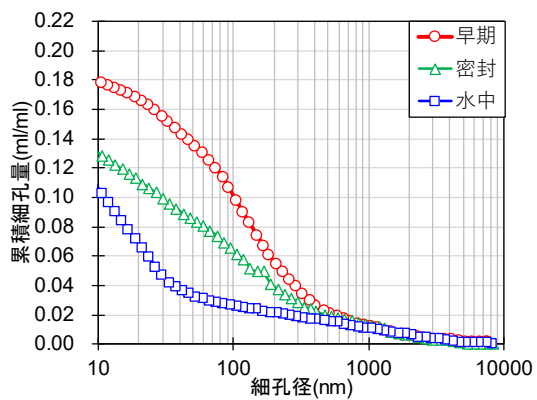


(a) OC

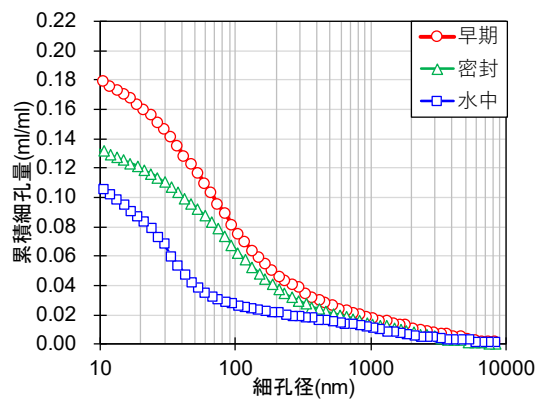


(b) 4C-Dry

(N)

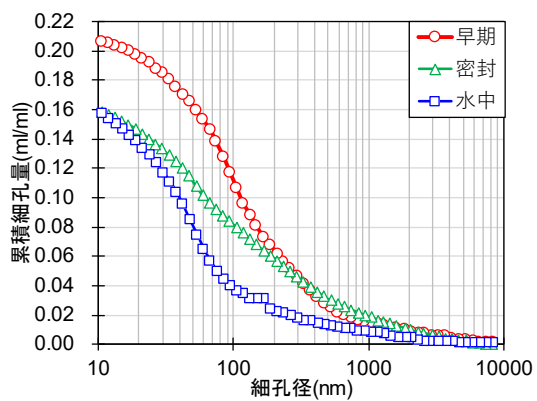


(c) OC

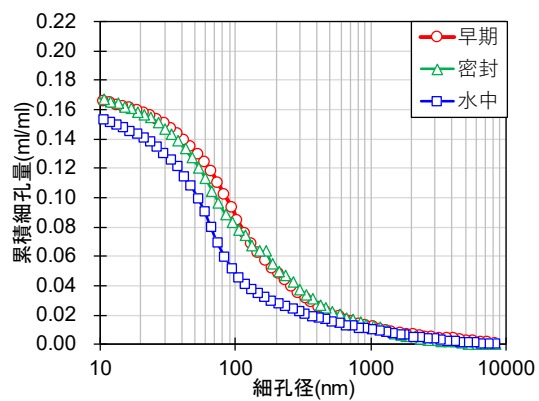


(d) 4C-Dry

(BB)



(e) OC



(f) 4C-Dry

(FA)

圖-3.39 累積細孔量 (0~1cm)

ている。これまで述べたようにセメントや混和材の反応が進行したことや、乾燥の影響により、緻密な空隙を有する試験体では空隙構造が粗大化したことが乾湿の作用を繰り返し与えたのちに養生の差が減少した要因と考えられる。しかし、FA は N や BB に比べ反応速度が緩やかであり、材齢が 3 年経過した段階でも反応が継続しているといった事例も報告されている。そのため、今回設定した養生期間では未反応の FA が多く残存しているものと予想され、他のセメント種類の試験体と比較し、乾湿繰り返しで容易に養生による明確な差異が見られなくなったと考えられる。現場では本検討で設定した以上の養生期間を確保することは難しいため、今回得られた結果は実構造物を想定した場合には十分有用な知見になるかと考えられるが、より正確に FA が乾湿繰り返しの影響を受ける場合の養生効果の持続性を検証するためには、より長期にわたる養生期間を設け、同様の検討を実施する必要があると考えられる。

3.6.2.4 閾細孔径

図-3.40 に N, BB, FA ごとの 0C と 4C-Dry の閾細孔径を示す。

N (図-3.40 (a)) に関しては、0C で養生による違いが閾細孔径に表れており、その差は 37nm である。しかし、乾湿繰り返しを重ねた 4C-Dry では養生による差は 10nm まで減少し、明確な違い見られない。本検討では、材齢 4 日から養生を施しているため、0C 時点における養生の差異は、脱型直後から養生を行った場合と比較し小さいと考えられる。しかし、本検討内で水中養生を施した試験体であっても、早期脱型と同程度の閾細孔径になっていることから、脱型直後から養生を施した場合でも、乾湿繰り返しの作用を受けることで養生による差異が見えなくなる可能性が考えられる。

BB (図-3.40 (b)) では、0C の時点における養生による閾細孔径の差は 145nm であり、乾湿繰り返しを重ねた後では 104nm と、養生の差異は 40nm 程度減少しているものの、N に比べると 4C-Dry では養生による閾細孔径の差は残存している。累積細孔量の考察でも述べたように、BB は N に比べ養生による影響を強く受けるため、0C 時点での養生方法による閾細孔径の差が大きい。そのために、4C-Dry でも養生の差が残存していたものと思われる。しかし、早期脱型は閾細孔径が減少しており、一方で水中養生を施した試験体は閾細孔径が増加しており、N とは異なる傾向を示している。水中養生を施した試験体の空隙構造が粗大化したのは、N と同様に乾燥前の総空隙量に対する 50nm 以下の空隙量の割合が多いことが要因のひとつとして考えられる。早期脱型した試験体の閾細孔径が減少したのは、養生を終えた段階で 100nm 以上の粗大な空隙構造を有していることや、長期的な反応を有する高炉スラグ微粉末が混和材として使用されており、液状水が試験体表層部から浸透し、反応が進行したことなどが原因と推察した。

FA (図-3.41 (c)) においても、0C では養生の差が 115nm と明確に差異が見られるものの、4C-Dry では 45nm まで養生方法による閾細孔径の差が減少している。FA に関しては、他のセメント種類に比べ反応速度が遅く、本検討では空隙構造が変化し易い試験条件とな

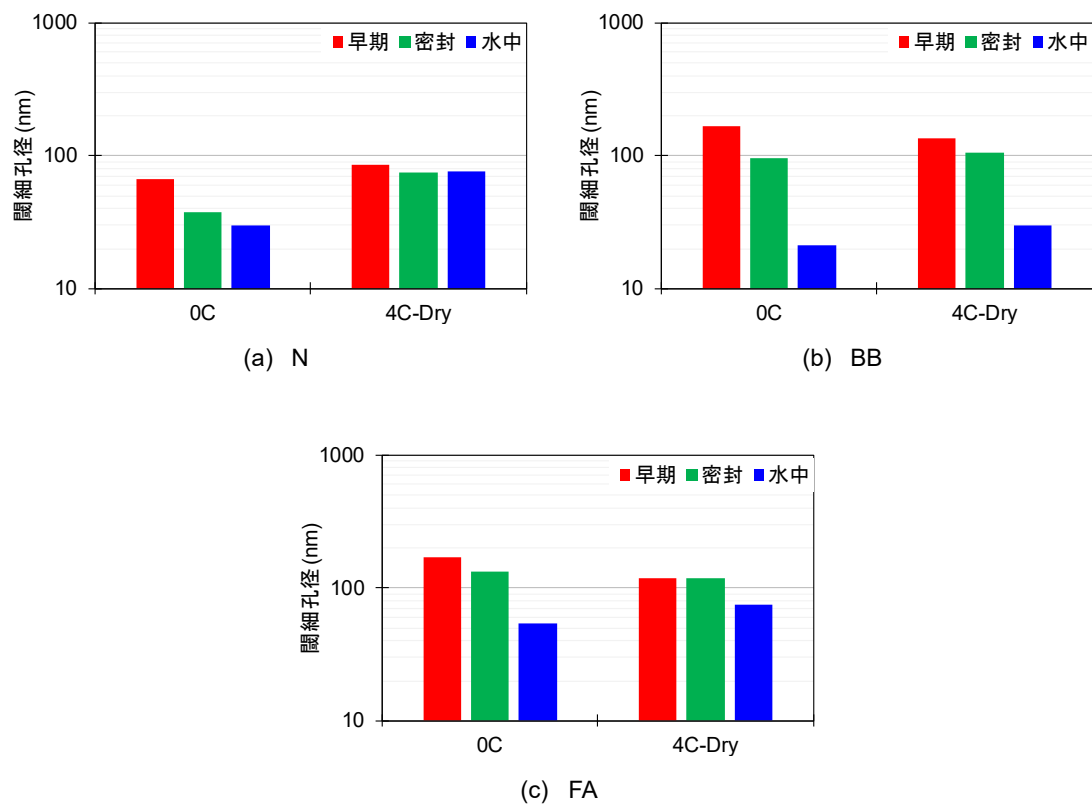


図-3.40 閾細孔径 (0~1cm)

っていた可能性が考えられ、乾湿繰り返しの環境下にて養生の差異が縮小する現象を検討するためには、養生条件をより長期に設定し、FA の反応率を高めた状態で乾湿繰り返しの作用を与える必要があるかと考えられる。しかし、実構造物では 28 日以上養生期間を設定することが予算や工期の都合上難しく、FA を使用した場合には本検討結果が示すような養生の差異が減少する可能性が考えられる。

以上の本検討結果より得られた知見を以下に整理する。

(1) 降雨の影響が無い場合

N32 の場合、閾細孔径には養生による影響は見られない。これは W/C が低く緻密な空隙構造であることが原因と思われる。

N58, 64.8, BB57.5 に関しては、閾細孔径に養生や打込み時の加水による差異が見られる。N32 と比べ W/C が高く空隙構造が粗大であるため、養生による差異が閾細孔径に見られたと推察される。したがって本実験結果より、W/C が 60%程度の場合、降雨の作用を受けない箇所では材齢が 96 ヶ月経過した時点でも養生や打込み時の加水による影響が閾細孔径の差として表れることを確認した。

(2) 降雨の影響がある場合

N32 の場合、降雨の影響の有無によらず閾細孔径には養生の影響は見られず、空隙構造が緻密であることが原因と考えられる。

N58, 64.8 の場合、早期脱型、打込み時に加水した試験体の閾細孔径は、降雨の影響を受けない箇所に比べ顕著に緻密になった。また、示方書、密封、給水養生が施された試験体に関しても、降雨の影響を受けない場合に比べ養生による差異は減少した。本検討は、材齢 96 ヶ月時点にて実施している。コンクリート構造物は数十年あるいは 100 年を超えるオーダの耐久性を要求されるため、N を使用し水セメント比を約 60%としたコンクリートを想定すると、鉄筋の腐食リスクの高い降雨の作用を受ける箇所では、材齢が経過するに伴い養生による差は見られなくなる可能性が示唆された。

BB57.5 に関しては、表層から深さ 2~3cm の閾細孔径が 50nm 以下となり、N32 と同程度の緻密な空隙構造が形成されている。使用材料により乾燥や降雨による乾湿繰り返し作用が含水率や空隙構造の変化に及ぼす影響の程度が異なることが要因の一つとして考えられるが、詳細なメカニズムは明らかになっていない。

なお BB57.5 の中でも、示方書相当の養生が施され、降雨の影響を受けなかった箇所では、表層から深さ 4~5cm の閾細孔径の値が得られていない。これは酒井らの方法 16)で閾細孔径として定義される、セメントペースト体積の 16%に相当する水銀が圧入された時点の細孔直径が、本検討における最小の空隙径である 10nm を下回ったためである。

以上の検討結果より、透気性、透水性のみならず細孔径分布のピーク径、閾細孔径の観点からも、材齢が経過するに伴い養生方法による差異が縮小する現象を確認した。

3.7 まとめ

本研究では、施工の最終段階である養生に着目し、国内の複数個所に屋外に暴露された中規模試験体を用い、数年間にわたり実施した表層透気係数の経年変化に加え、表面吸水試験、空隙構造分析を実施することで、脱型直後に施した養生による品質向上効果の残存性について検証した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 表層透気試験(Torrent 法)により数年間にわたり、コンクリート表層部の透気性を測定した結果、降雨の影響を受けない場合は材齢の経過に伴い、透気係数が増加する傾向が見られ、材齢が3~7年程度経過した時点では養生による差異は透気性に残存していた。一方で降雨の影響を受ける箇所では、材齢が1年程度経過した時点より透気係数が減少し、その後養生による差は縮小した。なお、低水セメント比の場合は透気係数の経年変化は小さい結果が得られたことから、養生による表層透気係数への影響は短期的であるのに対し、水セメント比は長期的にも影響を及ぼすと思われる。
- 2) 表面吸水試験(SWAT)により、表層品質を吸水性の観点から検討したところ、透気性と同様に降雨の影響を受けない箇所では、材齢が数年経過した後でも養生による差異を確認した。降雨の影響を受ける箇所に関しても、透気性の結果と同じく、吸水量には養生による違いは見られなかった。しかし、一部の試験体では降雨の影響を受けない箇所にて養生の差は見られなかった。緻密な空隙構造を有する場合、乾燥により空隙は粗大化することが報告されており、本検討でも、同様の現象が生じたと推察した。
- 3) 空隙構造分析の結果、透気性、吸水性の結果と同様に、降雨の影響を受けない箇所は、細孔径分布のピーク径や閾細孔径に養生による差が残存していることが確認された。また降雨の影響を受ける箇所についても、乾燥のみの影響を受ける場合と比べ、養生の差異が減少していることを確認した。特に表層から深さ2~3cmの箇所では、養生の明確な差異は見られず、定期的に液状水が浸透する環境下では、有害な初期欠陥が生じない程度の養生で所定の耐久性を確保することができ、かつかぶりの厚さを確保することがコンクリート表層部の品質の向上にも寄与する可能性が示唆された。

以上の結果を踏まえると、塩害や凍害などの劣化環境を除いた、一般的な内陸部の環境では、示方書相当の養生を施すことで所要の耐久性は担保されることが考えられる。特に鋼材腐食のリスクが高い降雨の影響を受ける箇所では、乾燥の影響のみを受ける箇所と比べ、養生による差異は減少する。加えて、透気性や吸水性には養生による違いが見られず、表層から2~3cmの深さにおける空隙構造にも養生方法の違いは表れなかったことから、適切にかぶり厚さが確保されている場合は、ひび割れなどの有害な初期欠陥が生じない程度の養生を施すことが合理的に耐久性を確保するためには有効な手段であると考えられる。表層部の品質をより向上させたい場合は、外部より水を供給する給水養生や、工費なども考慮し、水セメント比を減少させることが構造物の長寿命化に繋がると思われる。なお、養生による差異が縮小する現象の発生に関しては、コンクリート構造物の置かれる環境により、発生するタイミングの違いは異なるものと考えられる。そのため、本検討で確認された現象については今後、室内試験等で詳細に検証を行う必要がある。

第3章の参考文献

- 1) 臼井達哉, 宮原茂禎, 坂本淳, 岸利治: 排水・湿潤連続養生によるコンクリートの耐久性向上技術, コンクリート工学, Vol.53, No.10, pp.867-873, 2015.10
- 2) 渡邊賢三, 坂井吾郎, 坂田昇, 石田哲也: 水分逸散抑制養生が表層品質に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.74, No.4, pp.247-255, 2018.
- 3) 佐藤和徳: 復興道路・復興支援道路に関する取組み, コンクリート工学, Vol.53, No.1, pp.15-20, 2014.1
- 4) Torrent, R.J. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992.
- 5) 林和彦, 細田暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013.
- 6) 細田暁, 小松怜史, 中川恵理, 佐藤和徳: コンクリート構造物の品質向上の取組みと非破壊試験による効果の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1273-1278, 2015.
- 7) 井健一郎, 蔵重勲, 岸利治: かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査—スイスにおける指針—, コンクリート工学, Vol.49, No.3, pp.3-6, 2011.3
- 8) 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コンクリート技術シリーズ 80, 2008.4
- 9) 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) 第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集コンクリート技術シリーズ 97, 2012.7
- 10) Sanjuán, M.A., Muñoz-Martialay, R. : Variability of the concrete air permeability coefficient with time, *Building and Environment*, Vol.32, No.1, pp.51-55, 1997.
- 9) Parrott, L.J. : Influence of cement type and curing on the drying and air permeability of cover concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol.47, No.171, pp.103-111, 1995.6
- 10) Nakarai, K. et al. : Long-term permeability measurements on site-cast concrete box culverts, *Construction and Building Materials*, Vol.198, pp.777-785, 2019.2
- 11) 今本啓一: コンクリートの表層透気試験方法の現状と課題, コンクリート工学, Vol.53, No.7, pp.606-613, 2015.
- 12) RILEM TC 116-PCD, Recommendations of TC 116-PCD, Tests for gas permeability of concrete. B. Measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM-CEMBUREAU method, *Mater. & Struct.*, 32, pp.176-179, 1999.
- 13) 半井健一郎, 蔵重勲, 岸利治: かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査—スイスにおける指針—, コンクリート工学, Vol.49, No.3, pp.33-36, 2011.3
- 14) 井川倫宏, 玉岡優児, 細田暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価基準に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol.29, pp.101-109, 2018.

- 15)吉田亮, 岸利治: 水銀の漸次繰返し圧入による空隙の連続性抽出と有効圧力範囲に関する研究, 生産研究, Vol.60, No.5, pp.516-519, 2008.
- 16)酒井雄也, 岸利治: 臨界浸透確率に基づく閾細孔径の抽出とコンクリート中の液状水移動の定量評価, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.72, No.2, pp.83-96, 2016.
- 17)蔵重勲, 山田一夫, 小川彰一: 非破壊透気試験等を用いたコンクリート品質管理の可能性検討—指定廃棄物の最終処分に向けて—, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, No.1, pp.225-232, 2011.
- 18)早川健司, 水上翔太, 加藤佳孝: 表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.385-398, 2012.
- 19)檀康弘ほか: 高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.431-441, 2009.
- 20)Parrott, L.J.: Moisture profiles in drying concrete, *Advances in Cement Research*, Vol.1, No.3, pp.164-170, 1988.
- 21)P. Kumar Mehta and Paulo J. M. Monteiro: *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, Fourth Edition, McGraw-Hill Professional, pp.31-33, 2014.
- 22)郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦: 乾燥によるコンクリート組織の不均質化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.711-716, 2002.
- 23)金尚奎ほか: 高炉スラグ微粉末を混和したセメント硬化体の炭酸化反応, セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, No.21, pp.29-34, 1994.
- 24)西川直宏, 鈴木一孝: ケイ酸カルシウム水和物の炭酸化, セメント・コンクリート, No.528, pp.32-39, 1991.
- 25)上原丈児, 李春鶴, 半井健一郎, 石井祐: 若材齢時から炭酸化したセメント硬化体の細孔構造および酸素拡散係数に及ぼす CO₂濃度の影響, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.111-118, 2010.
- 26)蔵重勲, 西田孝弘, 秋山仁志, 岸利治: 中規模柱試験体を対象とした非破壊評価による表層品質の要因分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1835-1840, 2011.
- 27)家辺麻里子, 秋山仁志, 蔵重勲, 岸利治: 表層透気試験による養生条件を変化させた中規模柱試験体の表層品質詳細把握, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.659-664, 2011.
- 28)青野義道ほか: 乾湿繰返しに及ぼすコンクリートの耐凍害性への影響とその劣化メカニズムに関する研究, 日本建築学会論文集, No.607, pp.15-22, 2006.11
- 29)影山雄哉: 乾湿繰返し作用が養生の異なるセメント硬化体の空隙構造に与える影響, 東京大学卒業論文, 2018.3
- 30)T.C. Powers, A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete, *Proc. Highw. Res. Bd.*, 27, pp.178-188, 1974.
- 31)伊与田岳史, 魚本建人: 若材齢における乾燥がセメント硬化体の内部組織構造に及ぼす

影響，土木学会論文集，pp17-26，2003.

32)黒澤利仁，湊大輔，服部廉太，名和豊春：C-S-H の構造変化に及ぼす外的要因の影響，セメント・コンクリート論文集，No.65，2011.

第4章 表層透気係数と物質移動抵抗性及び空隙構造の関係

4.1 はじめに

コンクリート構造物の耐久性の確保には、鉄筋腐食の劣化因子となる液状水や酸素の侵入を防ぐ役割を担うかぶりコンクリートが重要となる。近年、特にかぶりコンクリートの密実性（表層品質）の向上への意識が高まっており¹⁾、各種試験方法²⁻⁵⁾が提案されるに至っている。例えば、3章で述べた表層透気試験(Torrent法)²⁾や、林、細田らによって開発された表面吸水試験³⁾、鉄道総合研究所にて提案されている散水試験⁴⁾などがある。これらの試験方法は、コンクリート構造物の竣工時点（材齢1～3ヵ月程度）にて実施されることが多く^{6,7)}、表層透気試験に関してはスイスにて試験材齢が規格化されるに至っている⁸⁾。

4.2 表層品質に関する既往の研究

4.2.1 コンクリート標準示方書における表層品質の扱い

土木学会のコンクリート標準示方書⁹⁾では、「施工編」の中に表層品質に関する検査の例が示されている。具体的には、「検査標準 8章コンクリート構造物の検査」の「8.3 表面状態の検査」にて、表-4.1に示すような表面状態の検査の例が記述されている。この表中には、露出面の状態やひび割れ、空洞、浮きなどの項目があり、目視や打音などの手法が検査方法として記載されている。また「8.4 構造物中のコンクリートの検査」では、構造物中のコンクリート表面に対して実施する非破壊試験（強度推定）として、テストハンマー強度の試験や超音波等の非破壊試験が紹介されているが、測定結果の信頼性には未だに課題が残されているとされている。コンクリートの物質の透過性に対する抵抗性を評価する試験と

表-4.1 表面状態の検査の例（コンクリート標準示方書「施工編」⁹⁾より）

項目	検査方法	判定基準
露出面の状態	目視	露出面が平坦であり、欠けた箇所、鉄筋の露出、かぶり不足の兆候、コールドジョイント、豆板、砂すじ等の初期欠陥が認められず、外観が正常であること
ひび割れ	目視およびクラックスケールによる測定	ひび割れ幅が、あらかじめ定められた許容ひび割れ幅以下であること
空洞、浮き	打音	異音が生じないこと
打継目の状態	目視	打継目において、新旧コンクリートの一体性が保たれていると判断されること

しては、表層透気試験や表面吸水試験が紹介されている。しかし、物質の透過に対する抵抗性を評価する場合には、単一の試験方法によって得られた結果のみでは品質を適切に判定することが困難な場合があるため、複数の試験結果から総合的に判断すると記述されているにとどまっている。近年では、コンクリート表層部の品質と耐久性の関係性を検証する委員会¹⁾が設置されるなど、表層品質に関する研究が精力的に行われているものの、国内では物質移動抵抗性を評価する検査手法は確立されるに至っていない。

4.2.2 表層透気試験

表層透気試験に関しては、削孔法や表面法（シングルチャンバー法、ダブルチャンバー法）が提案されている¹⁰⁾。削孔法はコンクリートの表層を削孔し、プラスチック製のプラグにより栓をする。その後、プラグの中に針を挿入し孔内の圧力を下げ、規定された圧力変化に要する時間を求める手法である。表面法は、真空チャンバーをコンクリート表面に取り付け、かぶりコンクリートの透気性を評価する手法である。シングルチャンバー法は、簡便かつ短時間で試験結果が得られるものの、コンクリートのごく表層部の影響を強く受けることから、近年では二重構造のチャンバーを有するダブルチャンバー法が主に使用されている。ダブルチャンバー法の中でも使用実績が高いのが Torrent 法²⁾であり、国内では規格は定まっていないものの、スイスでは試験の実施材齢、温度、コンクリート内部の水分状態、測定区間、測定箇所の選定方法、測定点数などが規格化されている⁸⁾。

4.2.3 表面吸水試験

表面吸水試験は、コンクリート表面に吸水カップを設置し、そこへ水を注水した後、一定時間における吸水量の時間変化を測定する手法である。国内外で複数の試験方法が提案されているが、国内では林、細田らにより開発された SWAT(Surface Water Absorption Test)³⁾が数多くの実構造物の表層品質を調査する際に使用されている。

4.2.4 散水試験

簡易的にコンクリート表層部の品質を吸水性の観点から評価することを目的とし開発された手法として、鉄道総合技術研究所の西尾らにより開発された散水試験⁴⁾がある。本手法は、安価であるとともに、電源を必要としないことや作業人数も1人であることなどから、限られた作業スペースでも試験が実施可能であることが特徴である。試験専用のスプレーと水を噴射する範囲を定める散水ガイドを用い、一定量の水を定められた時間間隔でコンクリートの鉛直面に噴射し、コンクリート表面を水が流下するまでの散水回数により、表層部の品質の評価を行う。高品質なコンクリートの場合は、コンクリート内部へ水が浸透しにくいいため、少ない散水回数で水が流下し、低品質なコンクリートでは、散水回数を増やしても噴射した水がコンクリート内部へ浸透するため壁面を流下しない場合もある(図-4.1)。特別な技能を必要とせず、表層透気試験や表面吸水試験と比べ、短時間で試験の実施が可能である。

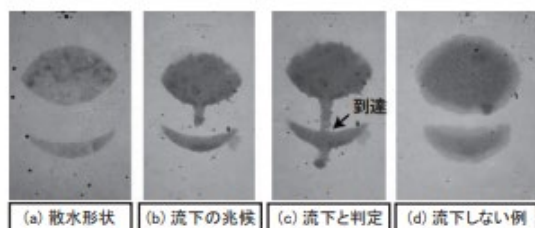


図-4.1 散水試験による流下判定の規準⁴⁾

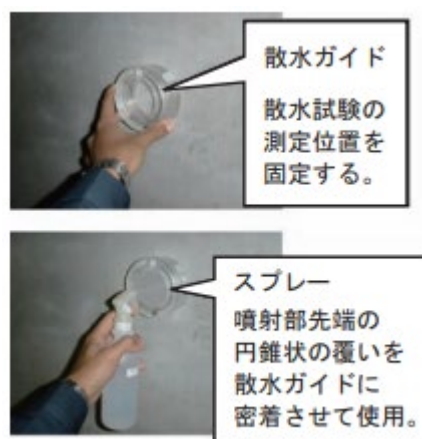


図-4.2 散水試験の専用器具⁴⁾

4.2.5 目視調査に基づく表層品質評価手法

「美しいコンクリート＝耐久性の高いコンクリート」であることを前提とした、「見栄え」を尺度とした評価手法として、目視調査に基づく表層品質評価手法⁵⁾がある。コンクリートの表層部の品質を評価する際には、①表面の色つや、②表面気泡、③収縮ひび割れ、④砂すじ、⑤打重ね線、⑥豆板に着目し、判定基準表に基づいて0～5点の点数付けを行う。

評価項目	一般的に「良」の範囲				不適合 E (不適合)	主な改善方策 「Action」
	S (最優)	A ⁺ (優)	A (良)	A ⁻ (可)		
表面の色つや					(構造物オーナーから「不具合」と判定された状況で、補修を要するもの)	型枠の清掃・変更, 剥離剤変更, 打設方法の変更, コンクリート材料・配合の修正
沈降ひび割れ	表面に光沢があり色むら, あばたがない					打込み速度変更, 締固め方法の変更, 凝結時間の調整, コンクリートの材料・配合の修正
表面気泡	標本ブロックの品質は基本的に「A ⁺ 」と設定する					剥離剤変更, 締固め方法の変更, スベディング実施, コンクリートの材料・配合の修正
プラスチック収縮ひび割れ						締固めの変更, タンピング・抑え仕上げの実施, 気象条件に適した初期養生の実施
砂すじ						コンクリートの材料・配合変更, 打込み速度・振動締固め方法の変更
打重ね線						振動締固め方法, 打重ね時間間隔の変更, 外気温に応じた配合修正(凝結時間)

図-4.3 目視評価の判定基準表⁵⁾

図-4.3 に示すような判定基準表とコンクリート表層部の状態を比較し, S, A⁺, A, A⁻, E の5段階で評価を行う。評価者によって経験や知識量が異なるため, 目視評価の結果もバラツキが生じることが考えられる。そこで, 評価を行う前に, 事前に複数人による評価の実施をすることで, 評価の基準を確認にすることが推奨されているほか, 本評価手法を実施する前には講習会などが開催され, 手法の理解を深める取組みも行われている。これまで述べてきた試験方法では, 測定箇所が限定されるため, 得られるデータは構造物の一部分の評価になってしまう一方で, 本評価手法は構造物全体を評価対象とすることができ, 迅速かつ定量的に評価できる手法となっている。さらに特別な試験器具などを必要としないことも特色である。

4.3 表層品質に関する試験方法の課題

表層品質評価の試験は, 近年複数の手法が提案されるなど精力的に研究が行われている分野であるが, 課題がいくつか存在する。まず, コンクリート表層部の物質移動抵抗性を,

非破壊により得られた測定結果を用いて評価する点にある。既往の研究より、例えば表層透気試験により得られる表装透気係数 kT は、コンクリート中の含水率に強く影響を受けることが知られている。そのため表層透気試験を実施する際には、市販の水分計によって算出されたコンクリートの含水率が 5.5%以下であることが規定により定められている⁸⁾。しかし、5.5%の含水率を下回った場合においても表層透気係数は乾燥の進行に伴い増加すること^{10,11)}や、コンクリート中に含まれる水分の逸散量とも高い相関関係にあることが報告されており^{12,13)}、コンクリートの表層品質の適切な評価がされていない可能性も懸念される。また数十年あるいは 100 年を超えるコンクリート構造物の寿命を想定した場合、現状の試験材齢(1~3 か月程度)では、長期耐久性を議論するには不十分であると考えられる。

4.4 本検討の目的

以上の背景をもとに本研究では、表層品質を評価する試験の一つとして表層透気試験(Torrent 法)に着目し、表層透気係数 kT と物質移動抵抗性や空隙構造の相関を検証することにより、表層透気試験を材齢の初期段階にて実施する意義・必要性を検証した。

4.5 検討概要

4.5.1 試験体概要

本検討では、3 章の検討で使用した表-4.2 に示す屋外に暴露された中規模模擬試験体を使用した。各試験体の概要については 3 章に示す。

表-4.2 3章の検討にて使用した屋外に暴露された中規模試験体

試験体名	暴露箇所	試験期間	試験内容
中規模柱試験体 (RC ラーメン模擬高架 橋の一部を構成)	千葉県稲毛区弥生町	2011.3~2018.2 (夏季作製試験体)	・表透気透気試験 ・塩水浸漬試験 ・空隙構造分析
ボックスカルバート模 擬試験体	群馬県館林市	2014.11~2018.1	・表透気透気試験 ・空隙構造分析

4.5.2 塩分浸漬試験

物質移動抵抗性の指標として中規模柱試験体での塩分浸透深さを測定した。塩水浸漬試験の概要は図-4.4 に示す。材齢 13 か月時点では高さ 1400mm 付近、材齢 91, 96 か月時点では高さ 1000mm 付近からコアサンプルを採取した。その後、コアサンプルを 10cm の長さに切断、さらに軸方向に 4 分割し、柱の壁面に対応する 1 面のみを残してエポキシ樹脂を塗布した後、10%塩水に浸漬した。浸漬期間 10 日間で供試体を割裂して、割裂面に硝酸銀

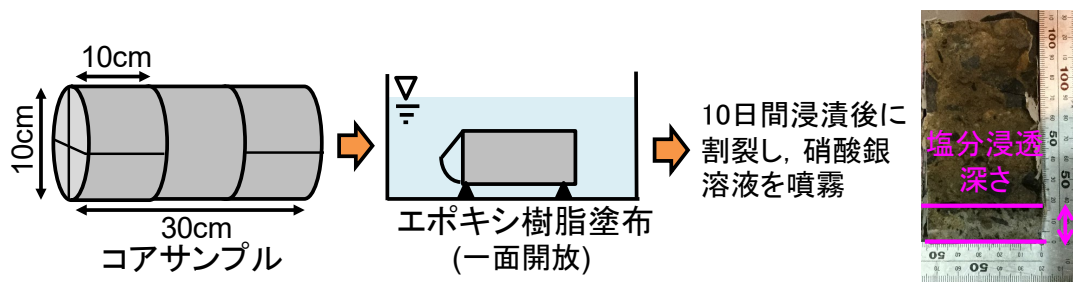


図-4.4 塩水浸漬試験の概要

水溶液を噴霧し、目視で変色域を確認している。コア一体当たり4か所で変色域の長さを測定し、その平均値を塩分浸透深さとした。なお、材齢13か月の時点では降雨の影響がない箇所にて採取したコアサンプルを使用した。

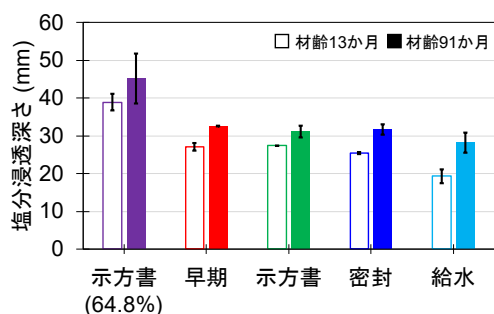
4.5.3 空隙構造分析

空隙構造を分析するため、水銀圧入ポロシメーター（MIP）を用いた。MIPで使用するコアサンプルは、ボックスカルバート模擬試験体では、材齢2, 38ヵ月、中規模柱試験体では材齢96ヵ月の時点で採取した。コアサンプルの採取後、表層から深さ50mmまでを10mm間隔で切断し、粗骨材が含まれていないことや細骨材が大半を占めていないことに注意しつつ、5mm角程度の立方体となるよう整形した。その後、試料をアセトンに24時間浸漬し、D-dry法により24時間乾燥させ分析した。細孔径が10nmに相当する圧力を超えると細孔が破壊される可能性が指摘されているため¹³⁾、本検討で測定する空隙の最小径は10nmとした。本検討では、累積細孔量と細孔径分布のピーク径に加え、細孔空隙の中でも物質移動に関与すると考えられている連続空隙量と閾細孔径¹⁴⁾を評価指標とした。閾細孔径を算出するに当たっては、本検討では酒井らの手法¹⁵⁾を参考とし、セメントペースト体積の16%に相当する水銀が圧入された時点の細孔直径を閾細孔径とした。また、細孔空隙の中でもインクボトル空隙と、物質移動に関与する連続空隙を区分するため、1回目の細孔径分布測定後（130MPaまで加圧）、0.15MPa程度まで減圧し、再度130MPaまで加圧し2回目の細孔径分布の測定を行った。なお、材齢による影響を比較するため、中規模柱試験体と並行し作製された小型試験体（材齢28日まで封緘養生）より試料を採取し、材齢28日時点の空隙構造の情報を得た。

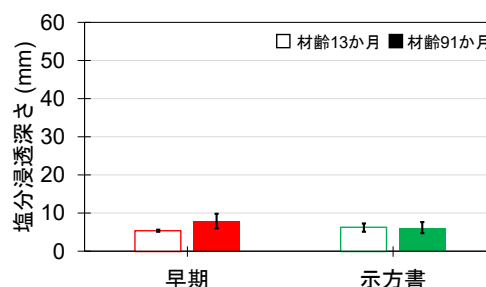
4.6 試験結果

4.6.1 塩水浸漬試験

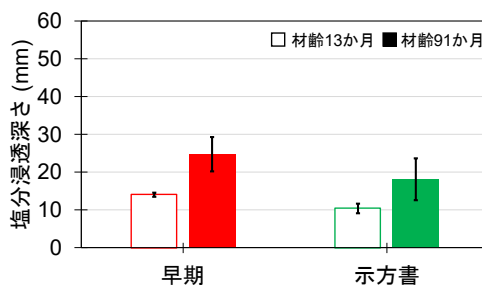
図-4.5 に中規模柱試験体の降雨の影響を受けない箇所にて採取したコアサンプルより得られた塩分浸透深さを示す。図-4.5 (a) に示す N58, 64.8 に着目すると、材齢の経過に伴い養生方法や打込み時の加水の有無によらず、塩分浸透深さは増加している。早期脱型、示方書相当、密封養生を施した試験体では、浸透深さに明確な差異が見られなくなる一方で、給水養生の場合が 3mm ほど浸透深さは小さい。また打込み時に加水した試験体の塩分浸透深さは、材齢にかかわらず他の試験体と比較し、10mm 以上大きい傾向にある。図-4.6 は、空施工時期は異なるものの、降雨の影響を受けない箇所における同一配合の空隙構造分析（累積細孔量）の結果を示している。この結果より、材齢が数年経過した後も空隙構造に養生の差異が見られたのに対し、塩分浸透深さでは早期脱型、示方書相当、密封養生の間には明確な差を確認することはできなかった。図-4.6 に示す空隙構造分析の結果の深さ方向に着目すると、ごく表層部から 1cm の範囲では明確に養生による差が空隙構造に表れている。しかし、表層から深くなるにつれ養生による差が縮小し、4~5cm ではほぼ同一の空隙径分布となった。材齢 91 か月時点の早期脱型、示方書相当、密封養生の塩分浸透深さは、31~32mm である。本検討では 3~4cm の深さにおける空隙構造の分析はできていないものの、ほぼ同程度の緻密さの空隙が形成されていたと推察され、加えて材齢 13 か月では養生方法により



(a) N58, 64.8



(b) N32



(c) BB57.5

図-4.5 塩水浸透深さの経年変化

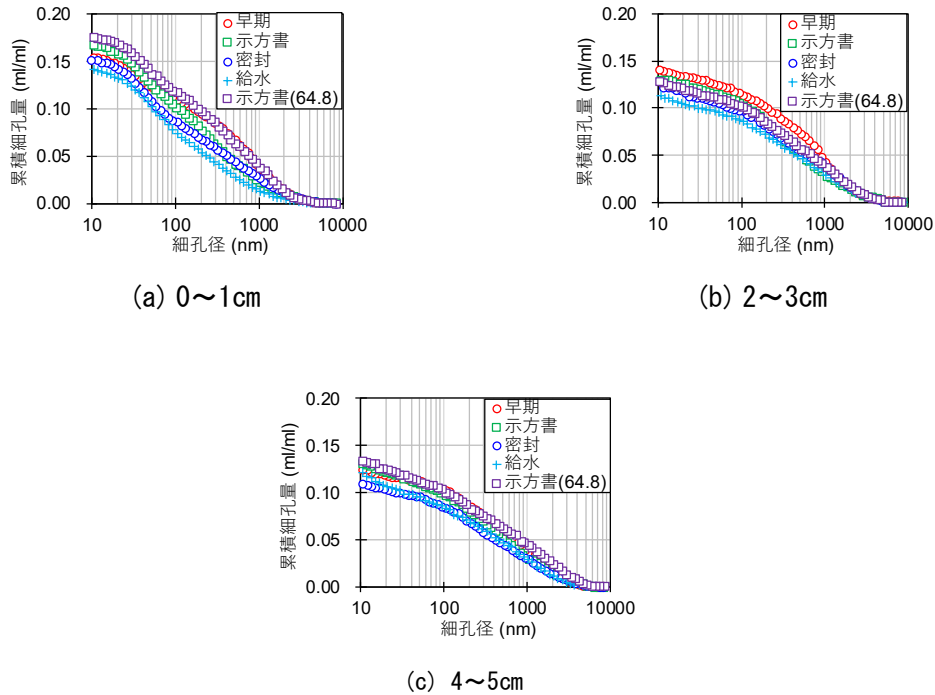


図-4.6 累積細孔量(材齢96か月)

試験体中の含水状態に差があったと思われるが、材齢の経過に伴い水分が逸散し、同程度の含水状態となったことなどが、塩分浸透深さにも養生による差異が生じなかった要因と考えられる。

図-4.5 (b) に示す N32 では、塩分浸透深さは 10mm 以下と他の配合に比べ著しく小さい。養生による差異も明確ではなく、材齢の経過による変化も僅かであった。これらは緻密な空隙構造であることが影響したものと考えられる。

図-4.5 (c) に示す BB57.5 では、材齢の経過に伴い塩分浸透深さは増加し、養生による差異を確認できる。さらに N58, 64.8 に比べ塩分浸透深さは小さい。高炉セメント硬化体は、セメント硬化体より交際間空隙の細孔径分布が小径側にいることや、高炉スラグ微粉末に含有されている酸化アルミニウム(Al_2O_3)成分が塩化物イオンを固定する生成物であるフリーデル氏塩 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) を生成しやすくするため、塩素イオンを多く捕捉する性質を有することなど¹⁶⁾が影響していると考えられる。

4.6.2 塩分浸透深さと表層透気係数の関係

図-4.7 に本検討で得られた塩分浸透深さと表層透気係数の関係を示す。図-4.7 (a) より、N の場合、材齢が経過するにつれ決定係数が増加し、材齢 91 か月の時点では決定係数は 0.8 以上となり、塩分浸透深さと表層透気係数の間に相関があることが確認できる。図-4.7 (b) に示す BB の場合は、測定点数が少なく検討の余地はあるものの、N と同様に材齢の経過に伴い決定係数が増加する傾向にあった。表層透気試験を材齢初期に実施する際には、ゴンク

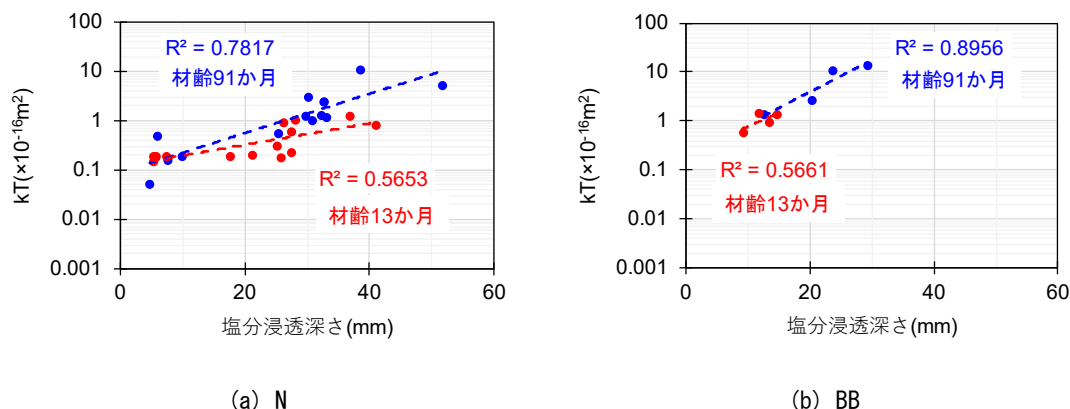


図-4.7 塩分浸透深さと表層透気係数の関係(材齢 13, 91 か月)

リート内部の含水状態が測定結果に強く影響を及ぼすことが既往の研究^{17, 18)}より報告されており、本検討においても材齢 13 か月の時点にて、塩分浸透深さと表層透気係数の間に相関が見られなかったのは、コンクリート中の含水率が比較的高い状態にあったことが原因と考えられる。

4.6.3 空隙構造と表層透気係数の関係

図-4.8 に閾細孔径と表層透気係数の関係を示す。図-4.8 (a) に示す N に着目すると、材齢が 1~3 か月時点では閾細孔径と kT にはほとんど相関が見られない。一方、材齢 38, 96 か月時点では相関は高くはないものの、閾細孔径と kT の間の相関は高まる傾向を示している。材齢 1~3 か月では、空隙構造と透気性には関係性が見られなかったのは、コンクリート中の含水率が比較的高いことが透気係数へ影響を及ぼしたためだと考えられる。材齢の経過に伴い次第にコンクリート表層部の水分が逸散することで、 kT に空隙構造の情報も適切に表れるようになり、その結果として材齢 38, 96 か月の時点では、材齢 1~3 と比較し、空隙構造との相関は高まったと推察した。

図-4.8 (b) に示す BB に関しては、材齢の経過に伴い相関が低下するという、N とは反対の傾向を示している。既往の知見より¹⁹⁾、高炉スラグ微粉末を混合した場合は N と比較して水分逸散量が多くなることが、報告されている。そのため、材齢 1~3 か月では表層透気試験の結果に影響を及ぼさない程度まで水分状態が低下しており、 kT と空隙構造に高い相関が見られたと考えられる。一方で、材齢 38, 96 か月の時点では、相関は低下し、閾細孔径はオーダー単位を超える範囲で存在するのにもかかわらず、 kT には顕著な変化は見られない。酒井らの検討結果²⁰⁾によると、ガスの透過試験結果は傾きの異なる 2 本の直線上に分布され、その直線の境界は透過代表径が 130nm であることが報告されている。気体の拡散挙動は、透過代表径が 130nm 以下である場合はクヌーセン拡散、130nm 以上では分子拡散に従うとの結果が得られており、本検討結果でも閾細孔径が 130~160nm の範囲から kT の挙動が変化しているため、既往の結果²⁰⁾とも整合する。これらの知見と本検討結果を踏

まえると、気体の挙動が変化する 130~160nm 以上の閾細孔径の場合は、 kT と空隙構造の関係性は明瞭ではなくなると考えられ、適切に表層品質を評価できない可能性が考えられる。表層透気試験の評価基準)によると、 kT が $10\sim 100(\times 10^{-16}m^2)$ の範囲は極劣とされており、この評価判定が下された部分の表層品質は、透気試験の結果からは正確な空隙構造の情報を得られないと判断するのが賢明だと思われる。加えて、表層透気試験は含水率の影響を強く受けるため、竣工時点では含水率が 5.5%以下であることが試験の規定⁸⁾に定められている。そのため、一定の材齢が経過し含水率の変動が小さくなった時点では、表層品質を適切に評価することが可能だと考えられた。しかし、本検討結果より数年の材齢が経過した場合、水セメント比が 60%程度の試験体の多くは kT が 10 程度の値に収束しており、空隙構造に差異があるにもかかわらず、 kT のみではそれらの違いを検出することは難しい。したがって、表層透気試験のみの結果より、適切にコンクリート表層部の品質を把握することができるのは、W/C 30%などの低水セメント比の場合を除き、材齢 1~2 年程度であることや、 kT はコンクリート中の水分状態のみを検出している可能性が示唆された。

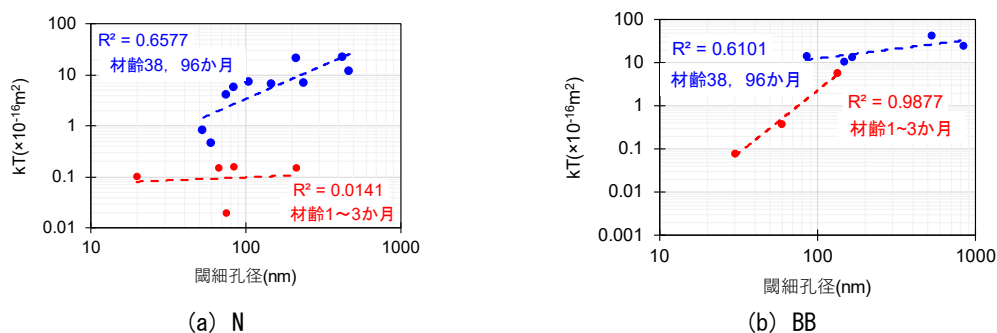


図-4.8 閾細孔径と表層透気係数の関係(材齢 1~3, 38, 96 か月)

4.7 まとめ

本研究では、表層品質の非破壊試験のひとつである表層透気試験(Torrent 法)によって得られる表層透気係数 kT とコンクリート構造物の耐久性の評価指標である物質移動抵抗性(塩分浸透深さ)、空隙構造の関係性を、数年にわたり屋外に暴露された試験体より得られた結果より検証した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 10 日間の塩水浸漬試験より得られた塩分浸透深さと表層透気係数の関係性を検討した実験では、材齢 13 か月と比べ材齢 91 か月にて相関が高まった。材齢の経過に伴い、コンクリート表層部の乾燥が進行し、含水率が表層透気係数へ及ぼす影響が減少したことが要因と考えられる。
- 2) 空隙構造分析より得られる閾細孔径と表層透気係数の関係性を検証した結果、普通ポルトランドセメントの場合、材齢 1~3 か月の時点では明確な相関は見られなかった。一方で、材齢 38, 96 か月では材齢 1~3 か月に比べ、閾細孔径と表層透気係数の相関が高まることを確認した。高炉セメントの場合は、普通ポルトランドの結果と異なり、材齢 38, 96 か月と比較し、材齢 1~3 か月にて閾細孔径と表層透気係数は高い相関にあった。高炉セメントは普通ポルトランドより水分逸散し易いため、含水率が材齢 1~3 か月の時点で表層透気係数へ大きな影響を及ぼさない程度まで低下したことが原因のひとつであると推察した。

以上の結果を踏まえると、現状では竣工時点におけるコンクリート表層部の品質評価を行うために使用されている表層透気試験であるが、材齢 1~3 か月の時点にて Torrent 法により得られた測定値は、コンクリート構造物の耐久性との相関は低いとともに、含水率の影響を取り除くことが難しい不確かな値であることに留意する必要がある。また、構造物の主な劣化である鋼材腐食のリスクが高いのは、降雨の影響を受ける箇所である。その場合、液状水の浸透に伴いコンクリート表層部の含水率は変動するため、表層透気係数は含水率により大きく変動することも予想され、測定値の信憑性は低い。したがって、非破壊による品質評価を竣工時点で実施する場合は、高価な試験機材により精緻な測定をする必要性は低く、西尾らにより提案されているような散水試験などの安価で、簡易的な試験により品質を把握する程度で十分であると考えられる。

一方、室内試験など含水状態を一定の条件で管理できる環境では、表層透気試験により得られる結果はコンクリート表層部の透気性を評価する上で意義はあると考えられ、本検討結果が示すような試験結果の性質を考慮した上で活用することが望まれる。

第4章の参考文献

- 1)土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集コンクリート技術シリーズ 97, 2012.7
- 2)Torrent, R.J. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992.
- 3)林和彦, 細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013.
- 4)西尾壮平：散水によるコンクリート表層品質の簡易評価, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp.5-10, 2016.6
- 5)渡邊賢三ほか：目視調査に基づくコンクリートの表層品質評価手法と品質向上に資する取り組み, コンクリート工学年次論文集, No.134, No.1, 2012.
- 6)細田暁, 小松怜史, 中川恵理, 佐藤和徳：コンクリート構造物の品質向上の取り組みと非破壊試験による効果の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1273-1278, 2015.
- 7)熱血ドボ研 2030：新設コンクリート革命—長持ちするインフラの作り方, 日経 BP 社, 2017.
- 8)半井健一郎, 蔵重勲, 岸利治：かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査—スイスにおける指針—, コンクリート工学, Vol.49, No.3, pp.33-36, 2011..3
- 9)土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2018.
- 10)今本啓一：コンクリートの表層透気試験方法の現状と課題, コンクリート工学, Vol.53, No.7, pp.606-613, 2015.
- 11)横山勇氣, 酒井雄也, 岸利治, 中規模供試体を対象としたコンクリートの表層透気係数の経年変化, 第72回セメント技術大会講演要旨, 3207, 2018.5
- 12)Nakarai, K. et al. : Long-term permeability measurements on site-cast concrete box culverts, *Construction and Building Materials*, Vol.198, pp.777-785, 2019.2
- 13)吉田亮, 岸利治：水銀の漸次繰返し圧入による空隙の連続性抽出と有効圧力範囲に関する研究, 生産研究, Vol.60, No.5, pp.516-519, 2008.
- 14)Mehta, P.K., Manmohan, D. : Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes, *7th Int. Congress on Cement Chemistry*, Vol.3, pp.71-75, 1980.3
- 15)酒井雄也, 岸利治：臨界浸透確率に基づく閾細孔径の抽出とコンクリート中の液状水移動の定量評価, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.72, No.2, pp.83-96, 2016.
- 16)土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333委員会)報告書ならびにシンポジウム講演概要集 74, 2007.
- 17)蔵重勲, 廣永道彦：透気係数の含水状態を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価

- 法の一提案, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.225-232, 2011.
- 18)蔵重勲, 廣永道彦: Torrent 法透気試験により評価される表層透気係数に関する再考, 第66回セメント技術大会講演要旨, pp.90-91, 2012.5
- 19)加藤優典, 辻貴大, 浅本晋吾: 高炉スラグ微粉末を用いたモルタル供試体の水分逸散と収縮特性に与える養生及び乾燥温度履歴の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010.
- 20)酒井雄也, 中村兆治, 岸利治: コンクリートの物質移動抵抗性を代表する空隙構造指標の抽出と検証, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.4, pp.390-401, 2014.

第5章 結論

本研究では、コンクリート構造物の計画から維持管理にわたる各段階の課題の中でも、設計、維持管理では、中性化による耐久性照査と現場における乖離、施工としては材齢初期に施す養生効果の持続性、評価では表層品質の試験結果と耐久性の関係性について、実験や既往の調査結果の分析を行った。本章では各章で得られた知見をまとめるとともに、それらを踏まえ、より合理的に構造物の耐久性を確保するために有効と考えられる設計、施工、評価、維持管理体系を提案し、本研究の結論とする。

第1章では、本研究の背景と目的、ならびに本論文の構成についてまとめた。コンクリート構造物の計画から維持管理、解体に至る過程にて、生産性向上に向けた取組みが実施されている中でも、今まで以上に合理的にかつ信頼性の高い構造物を建造するためには、未だに解決されていない課題が複数存在していることを述べ、それらの具体例を挙げた。

第2章では、設計、維持管理の観点から、コンクリート構造物の劣化の代表的な指標である中性化に着目し、まずは中性化が耐久性照査に用いられるに至るまでの既往の研究を整理した。加えて、実構造物の調査結果を用いて、中性化深さ、かぶり厚さ、中性化残りがコンクリート片の剥落に及ぼす影響を分析した。本検証では、かぶり厚さ並びに雨水の影響の有無が剥落リスクに対する支配的な要因である結果が得られ、中性化に関してはコンクリート片の剥落に対する有意性は認められなかった。また、明確な水掛かりが認められる箇所では中性化残りは剥落リスクの評価指標となり得るが、一般的な維持管理の現場では水分供給量の多寡が不明確であり、鋼材腐食に影響を及ぼす水掛かりの多寡と中性化の進行の両方が相殺し合うために、中性化残りは剥落リスクの適切な評価指標とならず、維持管理に携わる技術者の判断を惑わせる要因となっていることを明らかにした。

第3章では、施工の最終段階である養生に着目し、養生による表層品質の向上効果の持続性について検証した。本章では、屋外に暴露された実構造物の模擬試験体を用い、数年間にわたり継続的に実施されてきた表層透気試験(Torrent法)の結果を分析した。さらに、表面吸水試験(SWAT)や、空隙構造分析を実施し、透気、吸水、空隙構造の3つの観点から、養生による効果を分析した。その結果、降雨の影響を受けない箇所では養生による差が確認された一方で、鉄筋腐食リスクの高い降雨の影響を受ける箇所では養生効果が減少し、その差異が乾燥の影響のみを受ける箇所と比較して縮小していることを確認した。

第4章では、評価の観点から、表層品質の非破壊試験のひとつである表層透気試験(Torrent法)によって得られる表層透気係数 kT とコンクリート構造物の耐久性の評価指標である物質移動抵抗性(塩分浸透深さ)、空隙構造の関係性を検証した。本章においても、数年にわたり屋外に暴露された試験体から採取したコアサンプルを用いて得られた結果を基に検討した。その結果、材齢1~3か月では表層透気係数と耐久性には相関は見られず、竣工時点で得られる表層透気係数では適切に耐久性を評価できない可能性が示唆された。

第5章は本章であり、これまでの章についてまとめるとともに、得られた知見より考えられる耐久性をより合理的に確保するための新たな設計、施工、評価、維持管理体系について述べ、さらに信頼性を高めるために必要と思われる検討および試験について言及した。

以上の本研究結果より、コンクリート構造物の耐久性をより合理的に確保する上で有効と思われる考えを述べる。

かぶりコンクリートは、構造物の劣化因子のバリアとなるため耐久性を担保するためには重要な役割を果たす。かぶりコンクリートは「厚さ」と「品質」の両方から成り立っているが、まずはこのかぶり厚さを適切に確保することが重要と思われる。具体的には石橋らの調査結果では、3cm以上のかぶり厚さでは降雨の影響を受ける箇所でも剥落がほとんど発生していない事実を踏まえると、所定の品質が担保されたうえで3~5cm程度のかぶり厚さを確保すれば、剥落は生じないものと思われる。なお、前原らの調査では、3以上のかぶり厚さでも剥落が発生しているが、コンクリート内部に空洞や豆板、材料分離などが発生していた可能性も指摘されており、粗悪な品質の場合はかぶり厚さを適切に確保していたとしても、材齢の経過に伴い中性化が進行するとともに、水分の供給量も増え、剥落が生じるものと考えられる。

次に「品質」を確保するためには、本検討結果より示方書相当の養生を施すことで所要の耐久性は担保されると考えられる。特に鋼材腐食のリスクが高い降雨の影響を受ける箇所では、降雨の影響を受けない箇所と比べ養生による差異は減少する結果が本研究より得られている。透気性や吸水性には養生による違いが見られず、表層から2~3cmの深さにおける空隙構造にも養生方法の違いは表れなかったことから、適切にかぶり厚さが確保されて

いる場合は、ひび割れなどの有害な初期欠陥が生じない程度の養生を施すことが合理的に耐久性を確保するためには有効な手段であると考えられる。表層部の品質をより向上させたい場合は、外部より水を供給する給水養生や、工費なども考慮し、水セメント比を減少させることが構造物の長寿命化に繋がると思われる。

養生効果を評価する方法として、国内外で用いられている表層透気試験(Torrent 法)については、実構造物を対象とした既往の研究や、海外の規格などで規定されている竣工時点で測定を実施した場合、得られた結果は物質移動抵抗性、空隙構造との相関は低く、含水率の影響を除外できない不確かな値であることに留意する必要がある。鋼材が腐食する確率が高い降雨の影響を受ける箇所では、特に含水率の変動が大きく測定値の信憑性が低く、加えて本検討結果からも養生による差異が材齢の経過に伴い減少することが確認されていることから、竣工時に高価な試験機材を使用し、精密な検討を実施する意義は小さい。そのため、材齢 1~3 か月で表層品質の評価を行う場合は、安価で簡易的な散水試験などの手法によりコンクリート表層部の品質を把握する程度に留めておくことが賢明だと思われる。

謝辞

本論文を審査していただきました主査 岸利治博士（東京大学生産技術研究所教授）、副査 石田哲也博士（東京大学大学院工学系研究科教授）、副査 半井健一郎博士（広島大学大学院工学研究科教授）、副査 酒井雄也博士（東京大学生産技術研究所講師）、副査 高橋佑弥博士（東京大学大学院工学系研究科講師）に御礼申し上げます。

主査である岸先生には、研究を遂行するために必要な能力が不足していた私に対し、「常識となった仮説を疑う」という強い信念のもと、熱い情熱を持ってご指導いただいたことに心より御礼申し上げます。本研究に取り組む過程では、既存の常識に捉われ研究の本質を見失うことが何度もありました。しかし、その都度先生ご自身の人生観も含め叱咤激励のお言葉を頂き、精神的、肉体的に限界を迎えた局面ではそのお言葉が大きな励みとなりました。岸研究室で学んだことを糧に、先生の研究スタイルを体現できるような研究者を目指し邁進する所存であります。3年間ご指導いただき誠にありがとうございました。

副査である石田先生、半井先生、酒井先生、高橋先生には、研究を進めるにあたり、大変貴重なご示唆を頂きました。石田先生には、研究の核に迫るご意見を頂戴するとともに、本研究にて得られた知見の適用範囲を判断するうえで重要な知見もご紹介いただきました。またTAを通じ先生の授業方法も学ばせて頂きました。半井先生には、学部の頃から博士課程に至るまで数多くの助言を頂き、研究者、教育者の両方から常に温かくご指導いただきました。先生との出会いが無ければ今日まで研究に取り組むことは無かったかと思います。心より感謝申し上げます。酒井先生には、研究活動や論文執筆、ジョイントミーティングを通じ、研究に対するご助言を頂くとともに、岸研究室出身の先輩として、研究への取り組み姿勢や将来の進路に関しても、様々なアドバイスを頂きました。高橋先生には、本研究を纏めるにあたり貴重なご示唆を頂くとともに、同郷の先輩として真摯に研究と教育に力を注がれる姿に常に刺激を受けておりました。先生方に改めまして感謝の意を表します。

後藤誠二先生（山口大学名誉教授）には、セメント化学の観点から貴重なご意見を頂きました。長井宏平先生（東京大学生産技術研究所准教授）、水谷司先生（東京大学生産技術研究所准教授）、松本浩嗣先生（北海道大学大学院工学研究院准教授）には、ジョイントミーティングにてご示唆を頂きました。また細田暁先生（横浜国立大学大学院都市イノベーション学府教授）には、修士課程、社会人時代、博士課程と各段階にて自分が夢を追えるよう幾度も背中を押していただきました。今後も先生にご納得いただけるような研究者になれるよう日々精進する所存です。

秘書の田畑和泉様には、日常の研究活動や出張申請、本論文の取り纏めなどを通じ多大なご協力を頂きました。内藤壽久氏には、現場調査や試験体の作製、実験設備の管理など様々な場面でお世話になりました。宮園雅裕氏、齋藤尚氏（住友大阪セメント）、山本州大氏（東日本旅客鉄道株式会社）には、研究に関してご助言を頂きました。鎌田知久先生（東京大学生産技術研究所助教）には、研究室の教員としてご指導いただくだけでなく、身近な先輩と

して、博士課程における悩みを親身に相談に乗っていただき、励ましのお言葉を数多く頂戴いたしました。博士課程の後輩である田中俊成氏には、研究に関する議論や研究室の運営に係わる仕事のみならず、公私にわたり大変お世話になりました。田中氏の力添えがあったからこそ乗り越えられた壁がいくつもあったかと思えます。鎌田先生、田中氏の2人とともに過ごした研究室での生活を誇りに思います。大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

岸・長井・酒井研究室のメンバー、秘書の方々には研究室での生活を過ごすうえで様々な面で支えていただきました。岩瀬代志恵様(長井研秘書)、高崎博子様(酒井研秘書)、Kayondo Muzafalu 氏、Tarekegne Biruktawit Taye 氏、佐藤成幸氏、Vishakha Shankar 氏、Tep Meta 氏、影山雄哉氏、中山功暉氏、Vu Viet Cuong 氏、GADDAM Pruthvi Raj 氏、鈴木啓太氏、YOUFANI Abdul Mannan 氏、Guangfeng Ou 氏、高原進語氏、Liyanto Eddy 氏、Punyawut Jiradilok 特任助教、Yi Wang 特別研究員、Meng Yushi 氏、柏貴裕氏、Ahmed Okeil Mohamed Atia 氏、Osama Abdelfattah Hegeir 氏、May Thazin Tun 氏、Rajamurugan Sundaram 氏、佐々木勇凱氏、梶原建人氏、Mohamed Adel 氏、Vikas Singh Kuntal 氏、Kumar Avadh 氏、Bhargavi Thakur 氏、Eam Sovisoth 氏、Hafiza Fatima Zahid 氏、Ahmad Aki Muhaimin 氏、國分宏朗氏、井沢祐貴氏、Ivwananji SIKOMBE 氏、LIN Hanjing 氏、伊藤遥子氏、MENG Phalkong 氏、菊地晃平氏、Ahmad Farahani 氏、青木彰吾氏、出口航季氏、寺田裕次郎氏、皆川佳惟氏、町田紘太氏、Nikhil Mittal 氏、皆様の存在が私の励みとなり、研究に取り組むことが出来ました。皆様のご支援に深く感謝申し上げます。

最後に、私の博士課程進学に対し理解を示してくれるだけでなく、どのような状況に陥っても温かく見守ってくれた家族に感謝します。