

特殊シートを用いた長期間の水分逸散抑制養生によるコンクリートの耐久性向上効果

Long-Term Curing Method Using a Water-Repellent Sheet for Improving the Durability of Concrete

温 品 達 也 渡 邊 賢 三 藤 岡 彩 永 佳 柿 本 啓 太 郎
 芦 澤 良 一 仲 森 稔 晃¹⁾ 坂 井 吾 郎

要 約

特殊シートを用いた長期間の湿潤養生が塩害や中性化などに対する耐久性に与える効果について実験的に評価した。実験では普通セメント、高炉セメント B 種、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートを対象とし、実大規模サイズの柱試験体を実際の施工に則して作製して各種分析及び非破壊試験による評価を行った。その結果、長期の水分逸散抑制養生により、塩化物イオンの拡散係数、中性化速度係数、空隙率が低減し、その低減率はセメント種類によって異なることを明らかにした。さらに、長期間に亘る湿潤養生の効果を耐久性照査に反映させることを想定し、その一例を示した。

目 次

- I. はじめに
- II. 実験概要
- III. 各試験概要と結果
- IV. おわりに

I. はじめに

社会基盤の大規模更新時代を迎えたことで、新設のコンクリート構造物においては建設時に高耐久化し、ライフサイクルコストを低減させることが注目されている¹⁾。その一環として、コンクリートの耐久性を向上させるための様々な養生技術が開発²⁾されている。筆者らもコンクリートの新しい養生技術として、Fig.1 に示すように、予め型枠内面に高撥水性の特殊シート(以下、シートと称す)を貼付してコンクリートを打ち込み、脱型した後もシートをコンクリートに残置させて、できる限り長期間の養生を行う工法(以下、シート養生と称す)を考案した³⁾。この養生方法は、型枠を取り外した後においても、コンクリート表面に接しているシートがそのまま残置されるため、コンクリートの表面を1度も外気に曝すことなく、完全な水分逸散抑制を実現するものである。

このシート養生について、これまでの検討では、シートの撥水性により型枠とコンクリート界面のブリーディングや表面気泡が抑制されることや⁴⁾⁵⁾、長期間の水分逸散抑制養生により塩害抵抗性や中性化抵抗性、収縮ひずみの抑制効果が向上することを確認している⁶⁾。本論文ではシート養生の効果が塩害及び中性化、空隙構造などに与える影響について、普通ポルトランドセメントに加え、高炉

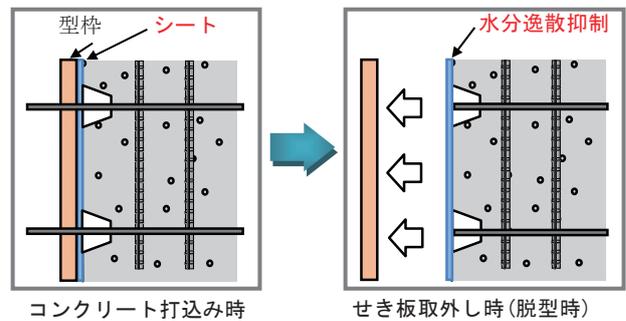


Fig.1 シート養生の概念図
(Method of Sheet Curing)

セメントやフライアッシュセメントを対象として評価した。評価には、実大規模の柱試験体を実際の施工に準じて作製し、非破壊試験を行うとともに、コア採取による分析試験を行い、それらの関係について考察を加えた。

II. 実験概要

1. 試験体概要

本実験では Fig.2 に示す柱状の試験体を作製した。試験体に使用したコンクリートの配合を Table 1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(以下、Nと称す)、高炉セメント B 種(以下、BBと称す)、フライアッシュセメント B 種(以下、FBと称す)の3種類を用いた。これら3種の配合は、単位水量及び材齢28日における圧縮強度がほぼ等しくなるよう水セメント比を調整した。3種類のコンクリートは同一のレディーミクストコンクリート工場で製

1) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード: 養生, 表層品質, 耐久性, 遮塩性, 中性化, 空隙率, 透気係数

Keywords: curing, surface layer quality, durability, chloride interception, neutralization, porosity, coefficient of permeability

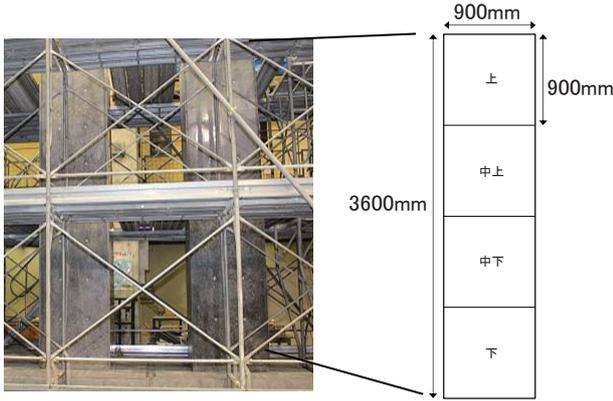


Fig.2 実規模試験体の概要
(Overview of Full-scale Specimen)

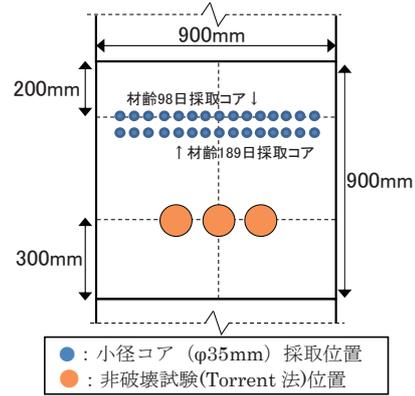


Fig.3 小径コア採取と非破壊試験位置(側面図)
(Position of Core Boring and Non-destructive Test)

造・運搬し、1層を約45cmとして全8層をポンプ車を用いて打ち込み、φ50mmのバイブレータで1層につき、外縁鉄筋内側の角部を60cm間隔で4か所、各20秒ずつ締め固めた。10分後、φ30mmのバイブレータで2層(90cm)につき、かぶり部を30cm間隔で12か所、各15秒ずつ再振動締め固めを実施した。養生条件をTable 2に示す。打ち込み後、材齢7日で型枠を取り外しシート養生したケースでは、材齢91日及び182日までシートをコンクリート表面に残置させた。シートは厚さ0.2mmの熱可塑性樹脂で、接触角が90°以上となる高撥水性のものを使用した。なお、試験体は屋外に雨避けの樹脂製屋根を設置して静置した。

2. 試験概要

試験項目をTable 3に示す。打ち込み前に各配合のスランブ及び空気量を試験し、圧縮強度試験体を採取した。小径コア試験として、φ35mmのコンクリートコアを採取し、塩分浸透試験、中性化試験、空隙率試験に供した。コアの採取材齢はシートによる養生完了(91及び182日)から7日後、すなわち材齢98及び189日で実施した。本報においては表記の煩雑さを回避するために、材齢98日で採取したコアを「材齢91日コア」、材齢189日で採取したコア「材齢182日コア」と称する。また、コア採取前にTorrent法に基づく表層透気試験を実施した。試験位置はFig.2に示す各柱の中上及び中下の面とし、非破壊試験とコア採取位置はFig.3に示すとおりとした。

III. 各試験概要と結果

1. フレッシュ性状

各配合のスランブは10±1.0cm、空気量は5.0±0.3%の範囲内であり、適切なフレッシュ性状を有するコンクリートであった。

2. 圧縮強度

各配合の圧縮強度をTable 4に示す。水中養生において、材齢28日に対する材齢91日の強度増加率はNで12%、BBで15%、FBで23%となった。また、気中曝露において、材齢28日に対する材齢91日の強度増加率はNで5%、BBで7%、FBで-1%となった。これは、若材齢時に乾燥を受けて多くの水分が逸散し、水和反応が停滞したためと考えられる。

3. 塩分浸透試験

(1) 試験概要

材齢189日で柱試験体の「中下」から小径コアを採取し、温度20℃、

Table 1 コンクリートの配合

(Mix Proportions of Concrete)

セメント	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
N	55.0	48.3	165	300	889	950
BB	53.9	47.8	165	306*1	871	952
FB	49.8	46.7	165	331*2	838	958

*1: 混和材置換率 43%, *2: 混和材置換率 15%

Table 2 養生条件

(Seal Curing Period)

セメント	条件名	養生期間	脱型材齢
N, BB, FB	合板7日	7日	7日
	シート91日	91日	
	シート182日	182日	

Table 3 試験項目

(Test Item)

種別	試験項目	摘要
フレッシュ性状	スランブ・空気量	打ち込み前に実施
テストピース	圧縮強度	材齢7・28・91・182日試験
φ35mm 小径 コア試験	塩分浸透試験	材齢182日コアを分析
	中性化試験	材齢91・182日コアを分析
	空隙率試験	材齢91日コア採取を分析
非破壊試験	透気係数(Torrent)	材齢91・182日試験

Table 4 圧縮強度試験結果

(Test Results of Compressive Strength)

養生条件	セメント種類	圧縮強度(N/mm ²)			
		材齢(日)			
		7	28	91	182
水中浸漬 (1日脱型)	N	—	45.0	50.3	—
	BB	—	45.6	52.4	—
	FB	—	46.8	58.0	—
気中曝露 (7日脱型)	N	24.2	36.7	38.4	35.5
	BB	20.9	34.2	36.6	38.6
	FB	21.6	34.9	34.5	33.3

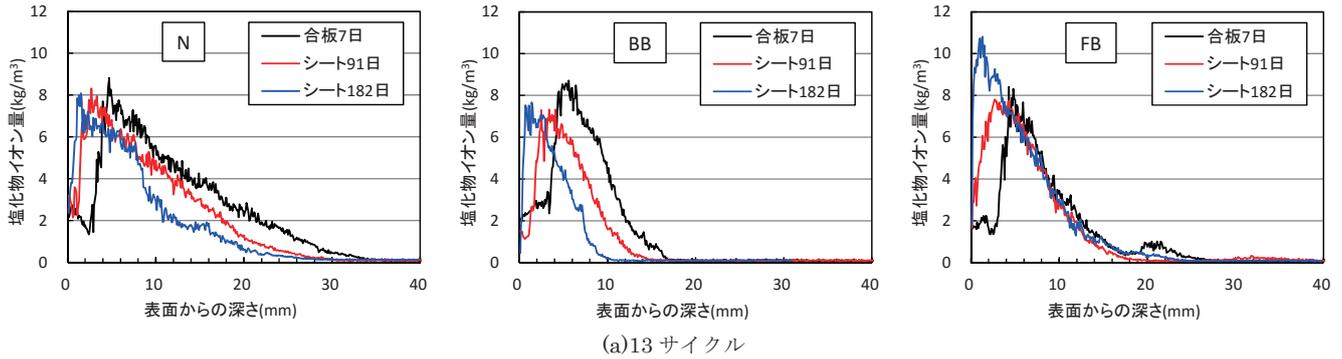


Fig.4 表面からの塩化物イオン量分布
(Test Results of Chloride Ion Penetration)

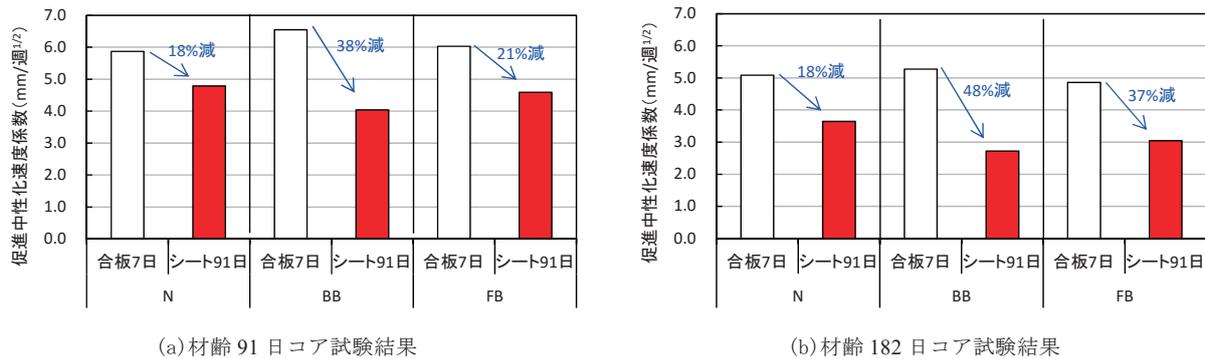


Fig.5 中性化試験結果(合板 7 日とシート 91 日比較)
(Test Results of Carbonation)

相対湿度 60%室内にて 7 日間乾燥させながら、コアの周囲をエポキシ樹脂でシールした。その後、塩化物イオン濃度 2%の人工海水に 1 日間浸漬し、20℃常時送風環境にて 6 日間乾燥させる工程を 1 サイクルとして、13 サイクルまで乾湿繰り返し環境に曝した。乾湿後のコアは EPMA により表面からの全塩化物イオン量を測定した。

(2) 試験結果

Fig.4 に EPMA により定量したコンクリート表面から深さ方向における塩化物イオン量を示す。N について、合板 7 日のケースでは 35mm 程度の深度まで塩化物イオンが浸透しているのに対し、シート 91・182 日のケースは浸透深さが 30mm 未満であり、塩化物イオンの浸透量も養生期間が長いほど少ない結果となった。さらに、シート 91・182 日のケースは合板 7 日より塩化物イオンの浸透深さと浸透量が顕著に小さくなった。

4. 中性化試験

(1) 実験概要

① 合板 7 日とシート 91 日の比較

柱の「中上」及び「中下」からコアを 9 本ずつ採取し、温度 20℃、相対湿度 60%の室内にて 7 日間乾燥させ、コアの周囲をアルミテープでシールした後に促進中性化試験を開始した。促進条件は温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂濃度 5%とし、養生完了後から乾燥暴露や前養生中に進行した中性化深さを含めた 7・14・28 日間の中性化深さを測定して中性化速度係数を算出した。3 本×3 材齢の中性化深さの結果より中上及び中下において中性化速度係数を算出し、その平均値を試験結果とした。

② 養生期間と中性化速度係数の検証

ここではシートの養生期間 91・182 日を対象とし、材齢 189 日において、合板 7 日、シート 91 日、シート 182 日の各面の中上、中下から 9 本ずつコアを採取し、①試験と同様の方法にて中上及び中下で中性化速度係数を算出し、その平均値を試験結果とした。

(2) 実験結果

① 合板 7 日とシート 91 日の比較

Fig.5 に材齢 91 日及び材齢 182 日コアの試験結果を示す。まず、Fig.5 (a)の材齢 91 日の結果に着目すると、合板 7 日に対してシート 91 日の中性化速度係数は、N で 18%、BB で 38%、FB で 21% 減少した。これより、全てのセメントにおいてシートの長期湿潤養生の効果により中性化抵抗性が向上することが分かった。しかし、材齢 91 日コアにおけるシート養生したケースは、養生完了後 7 日でコアを採取し、その後 7 日間乾燥させているため、実質 14 日間しか乾燥期間がない。このため、中性化抵抗性の評価は、硬化体の密実さだけでなく養生による湿潤度が影響している可能性が否めない。そこで、養生完了 7 日後のコア採取であっても中性化抵抗性の評価が問題ないことを確認するために、同対象部位に対して、さらに乾燥期間を 91 日間延長し採取したコアの試験結果を Fig.5 (b)に示す。この場合、合板 7 日に対してシート 91 日の中性化速度係数は、N で 18%、BB で 48%、FB で 37%減少した。なお、材齢 91 日及び 182 日コアにおいて、セメント種類による中性化速度係数の差が小さい。これは、合板 7 日における各セメント種における中性化速度係数を同等にして養生期間による中性化抑制効果のみを比較するために、配合強度が同等となる水セメント比に調整した結果と考える。さらに、全ケースにおいて材齢 182 日コアの中性化速度係数

が材齢 91 日コアよりも小さくなったのは、表面から乾燥が進むものの、試験体内部に含まれる水分によって、水和が緩やかに継続したためと考えられる。そして、材齢 182 日における BB 及び FB のシート 91 日による中性化速度係数の低減度が顕著となったのは、91 日間の湿潤養生により混合セメントの水和反応が充分進んだためと考えられる。

② 養生期間と中性化速度係数の検証

各条件において得られた中性化速度係数は、促進条件における値であり、実現象における自然中性化へ適用できないため、得られた結果を大気 CO₂ 濃度に換算して議論を進める。魚本らの研究⁹⁾から得られた CO₂ 濃度と中性化深さの式(1)を用いて、大気 CO₂ 濃度(約 0.04%)に対する CO₂ 濃度 5%の促進倍率を 6.54 として算出した養生日数と大気 CO₂ 濃度における中性化速度係数の関係を Fig.6 に示す。

$$X = (2.804 - 0.847 \log C) A \sqrt{C \cdot t} \quad (1)$$

ここに、X：中性化深さ(mm)，C：炭酸ガス濃度(%)，A：屋内自然環境下における中性化速度係数(mm/√年)，t：経過時間(年)を表す。

図より、全てのセメント種類において中性化速度係数は養生期間が長いほど減少することが分かる。その低減度は、N, BB, FB の順に顕著になり、混合セメントではより効果が大きいことが分かる。本結果から、コンクリート標準示方書設計編で示される中性化速度係数の式に養生期間を考慮した新しい式(2)・(3)を考案した。

$$\alpha_k = \gamma_c \times \{-3.57 + 9.0W / (C_p + k \cdot A_d)\} \quad (2)$$

$$\gamma_c = -A \cdot I + B \quad (3)$$

ここに、 α_k ：中性化速度係数の特性値(mm/√年)，W：単位体積あたりの水の質量，C_p：単位体積あたりのポルトランドセメントの質量，A_d：単位体積あたりの混和剤の質量，k：混和材の種類により定まる定数， γ_c ：湿潤養生期間によるコンクリートの中性化速度係数の低減係数，A・B：養生期間の結果を中性化速度係数に反映する係数，I：湿潤養生期間(日)，(0 ≤ I ≤ 182)を表す。

示方書設計編における中性化速度係数 α_k は湿潤養生期間 14 日のコンクリートを対象に算定された式であることから Fig.6 の各セメントにおける養生期間 14 日の中性化速度係数が示方書の α_k と同値になるよう、その倍率で除して補正した結果を Fig.7 に示す。本検討より得られたセメント種類による湿潤養生期間を中性化速度係数に考慮する定数 A 及び B を Table 5 に示す。以上より、コンクリートの養生期間を示方書の中性化速度係数式に考慮することで、コンクリートの耐久性照査をより合理化できる可能性があると考えられる。具体的には混合セメントについて、現在の示方書に則り中性化における耐久性を照査すると、普通ポルトランドセメントよりも耐久性が劣る結果となるため、混合セメントの実用において課題となっている。この課題に対して、養生期間と中性化速度係数の検証から得られた式を用いて、長期養生の効果を中性化の耐久性照査に反映させることで、過度に保守的になることなく中性化抵抗性を検討することができ、混合セメントの実用性が向上するものと考えられる。

5. 空隙率試験

(1) 実験概要

柱の上中、中下から 3 本ずつコアを採取し、表面から 0~10mm 部分を湿式コンクリートカッターで採取して、5mm 以上の骨材を除去し、アセトン浸漬により水和反応を停止させた。その後、24 時

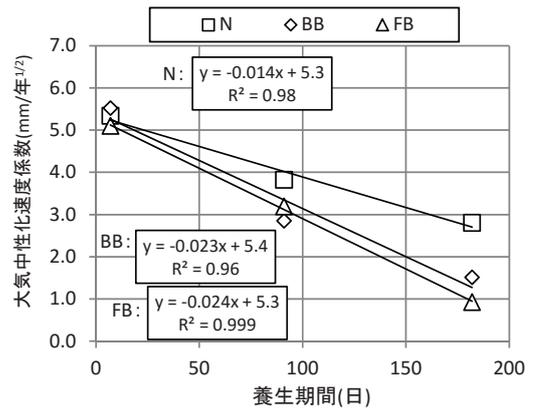


Fig.6 養生期間と大気中性化速度係数 (Curing Time and Coefficient of Carbonation:1)

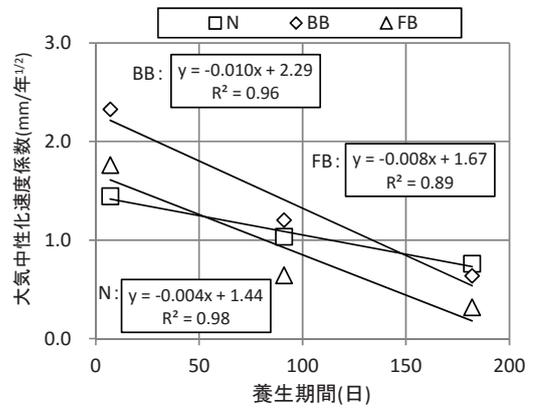


Fig.7 養生期間と大気中性化速度係数(示方書式考慮) (Curing Time and Coefficient of Carbonation:2)

Table 5 湿潤養生期間を中性化速度係数に考慮する係数 (Compensating Rate of Carbonation)

セメント種類	A (養生期間による中性化速度の低減係数)	B (中性化速度の低減直線の切片)
N	0.004	1.44
BB	0.010	2.29
FB	0.008	1.67

間の真空凍結乾燥を実施し、水銀圧入式ポロシメータにより累積細孔容積及び細孔径分布を測定した。さらに、連続細孔容積 η を測定するために、水銀圧入式ポロシメータにより 420MPa まで水銀を加圧注入し減圧、再度 420MPa まで再加圧注入することで、インクボトル効果の影響を排除した水銀注入量(連続細孔容積及び分布)を測定した。各コアの累積細孔容積、細孔径分布、連続細孔容積・分布を算出し、その平均値を試験結果とした。

(2) 実験結果

Fig.8 に材齢 91 日コアの累積細孔容積及び連続細孔容積を示す。図中の斜線棒グラフが連続細孔容積を指す。まず、累積細孔容積に着目すると合板 7 日に対してシート 91 日は、N で 5%、BB で 14%、

FBで17%減少した。全てのセメントにおいてシートの長期湿潤養生効果により、累積細孔容積が減少し、特にBBやFBの混合セメントでは10%以上減少した。

次に、連続細孔容積に着目すると合板7日に対してシート91日の連続細孔容積は、Nで14%、BBで18%、FBで13%減少した。これより、Nの累積細孔容積の減少分のほとんどは連続細孔容積であり、BBやFBにおいては連続細孔容積の減少分以上に累積細孔容積が減少した。

Fig.9に材齢91日コアの細孔径分布を示す。全てのセメント種類において、合板7日に対してシート91日の細孔容積は約0.3~0.05 μm の範囲で減少し、約0.05~0.001 μm の範囲で増加傾向にあった。さらにFig.10に連続細孔径の分布を示す。図より約0.1~0.2 μm の連続細孔容積が顕著に減少し、小さい径における細孔容積の増大しない結果となった。したがって、長期の養生効果により、毛細管空隙における比較的粗大な連続空隙が減少し、比較的小さい径である独立空隙が増加することによって、空隙組織が緻密化されたものと考えられる。

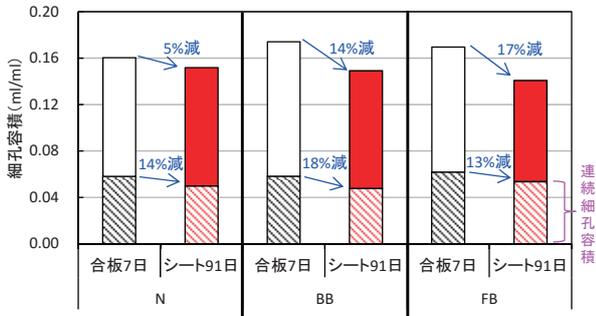


Fig.8 累積細孔容積と連続細孔容積(材齢91日コア)
(Total Porosity and Succession Porosity)

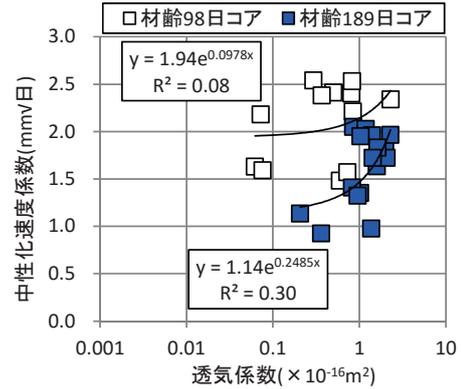


Fig.11 透気係数と中性化速度係数の関係(材齢91日コア)
(Permeability and Coefficient of Carbonation)

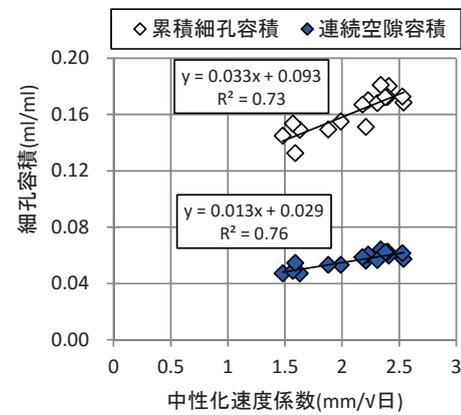


Fig.12 中性化速度係数と細孔容積の関係(材齢91日コア)
(Coefficient of Carbonation and Porosity)

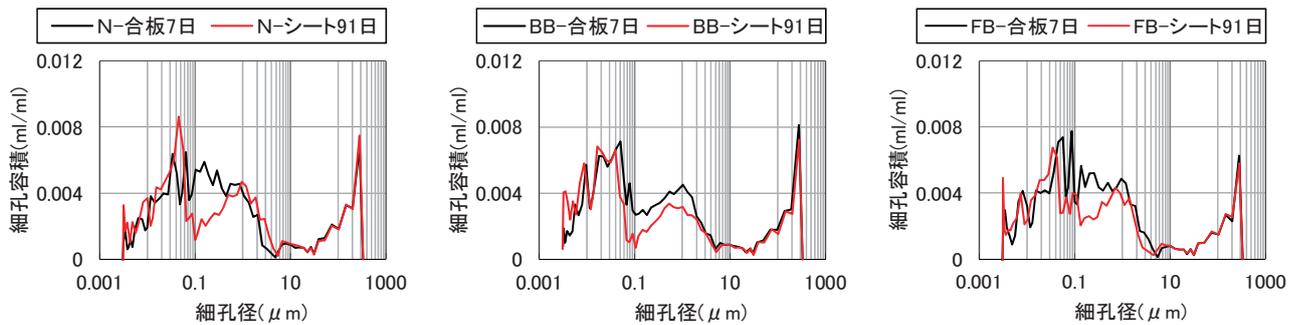


Fig.9 細孔径分布(材齢91日コア)
(Test Results of Pore Size Distribution)

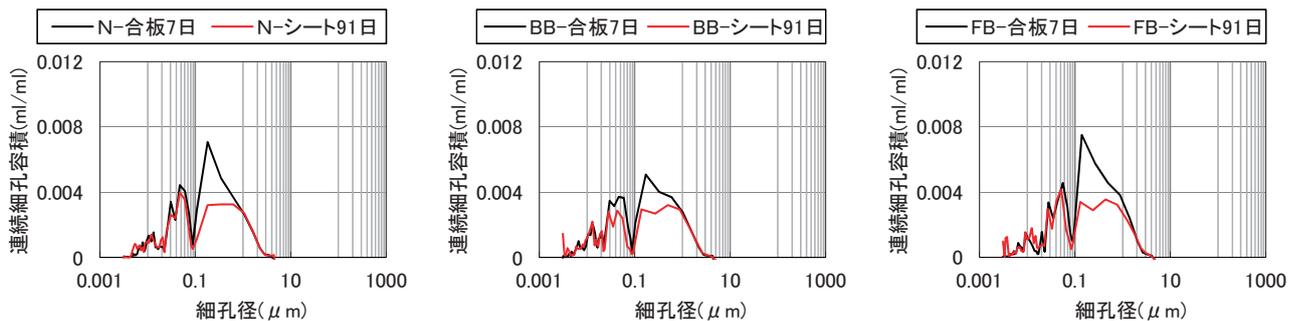


Fig.10 連続細孔径分布(材齢91日コア)
(Test Results of Succession Pore Size Distribution)

6. 透気係数と中性化速度ならびに空隙率の相関

Fig.11 に材齢 91 日コア採取前に測定した透気係数とコアの中性化速度係数, 材齢 182 日コア採取前に測定した透気係数とコアの中性化速度係数をそれぞれ示す。それぞれのプロットにおいて, 蔵重らの研究⁸⁾を参考に透気係数と中性化速度係数の相関を対数近似式により検証した。材齢 91 日における透気係数と中性化速度係数の相関は極めて低いが, 材齢 182 日まで乾燥期間を延長することにより透気係数と中性化速度係数の相関は若干向上した。これより, 養生完了後 3 か月程度の長期に乾燥させることによって, 表層透気試験による耐久性評価の精度が向上するものと考えられる。

Fig.12 に材齢 91 日に採取したコアの中性化速度係数に対する累積細孔容積及び連続細孔容積の関係を示す。累積細孔容積及び連続細孔容積はどちらも中性化速度係数と比較的高い相関が得られていることから, 湿潤養生の延長によりコンクリート中の空隙が緻密化し, 中性化抵抗性が増加したものと考えられる。

VI. おわりに

本検討では, 実規模柱を対象として普通ポルトランドセメント, 高炉セメント B 種, フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートのコアを採取し, 特殊シートによる湿潤養生期間と耐久性について評価した。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) FB を除く N 及び BB においては, 養生期間の延長に伴い, 塩化物イオンの浸透深さ及び浸透量が低減された。
- (2) 91 日間養生した場合, 7 日間養生に対し中性化速度係数は 2~4 割程度抑制された。また, 養生期間を延長すると中性化速度係数はさらに減少し, BB 及び FB への影響度は N に対する影響度より顕著であった。
- (3) セメント種類毎に養生期間と中性化速度係数の関係を示し, 中性化速度係数の示方書設計編式に養生期間を考慮するための新しい式を考案した。

- (4) 91 日間養生した場合, 7 日間養生に対し連続細孔容積は 1~2 割程度減少し, 毛細管空隙における比較的粗大な連続空隙が減少し, 比較的小さい径である独立空隙が増加した。

参考文献

- 1) 田村隆弘, 細田暁, 中村秀明, 二宮純: データベースを核としたコンクリート構造物の品質確保に関する研究委員会報告, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013, pp.22-30.
- 2) 古川幸則, 福留和人, 庄野昭: テクニカルレポート「コンクリートの浸水養生システム—型枠取りはずし後の給水養生工法の実用化とその効果—», コンクリート工学, Vol.49, No.3, 2011.3, pp.21-28.
- 3) 温品達也, 渡邊賢三, 坂田昇, 石田哲也: 熱可塑性樹脂シートによる長期間の水分逸散抑制養生の効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, 2015, pp.21-28.
- 4) 細井雄介, 石田哲也, 温品達也: 熱可塑性樹脂シート養生による型枠近傍のブリーディング抑制機構, 土木学会第 70 回年次学術講演集, 2015, pp.1897-1902.
- 5) 石田哲也, 坂田昇, 藤岡彩永佳, 温品達也: セメント種類が異なる実規模試験体による熱可塑性樹脂シートを用いた養生効果の検討, 土木学会第 70 回年次学術講演集, 2015, pp.559-560.
- 6) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす要因, 土木学会論文集, No.451/V-17, 1992, pp.119-128.
- 7) 吉田亮, 岸利治: 水セメント比及び養生が異なるセメントペーストにおける水銀圧入過程の相違に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, 2007, pp.729-734.
- 8) 蔵重勲, 廣永道彦: コンクリートの中性化抵抗性と表層透気係数の関連分析に基づいた品質検査判定基準の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, 2012, pp.718-723.

Long-Term Curing Method Using a Water-Repellent Sheet for Improving the Durability of Concrete

Tatsuya Nukushina, Kenzo Watanabe, Saeka Fujioka, Keitaro Kakimoto, Ryouichi Ashizawa, Toshiaki Nakamori¹⁾ and Goro Sakai

The authors studied the effects of long-term curing on full-scale posts made of ordinary portland cement, blast furnace slag cement, and fly ash cement using a new curing method using a water-repellent sheet. The experiments showed that long-term curing reduces chloride migration, the carbonation rate, and porosity. The curing was more effective when blended cements requiring long-term curing, such as blast furnace slag cement and fly ash cement, were used. Furthermore, the authors proposed a new formula for carbonation rate, which is factored into the calculation of the curing period.