

論文 種々の結合材を用いたコンクリートに対する長期特殊シート養生の効果

温品 達也*1・渡邊 賢三*2・坂井 吾郎*3・石田 哲也*4

要旨：特殊シート養生による長期間の湿潤養生効果が中性化や空隙構造，塩害などに与える影響について，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て，実大規模の柱試験体を作製して検討した。その結果，91 日間の長期湿潤養生により，中性化速度係数，空隙率，塩化物イオン拡散係数が低減され，その程度はセメント種類によって異なる傾向にあった。さらに，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。

キーワード：養生，高炉スラグ，フライアッシュ，中性化，空隙率，透気係数，塩害

1. 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),3)}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，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，図-1に示すように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)を考案している⁴⁾。この養生方法は，せき板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^{5),6)}，長期間の水分逸散抑制養生により中性化抵抗性や塩害抵抗性，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効果が中性化や空隙構造，塩害などに与える影響について，普通ポルトランドセメントだけでなく，高炉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。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本実験では図-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表-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，単位水量および材齢 28 日における圧縮強度がほぼ等しくなるよう W/C を調整した。3種類のコ

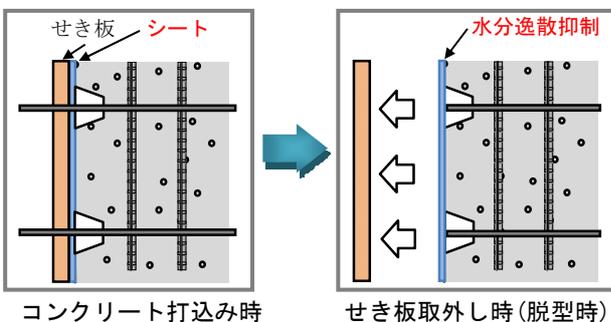


図-1 シート養生の概念図

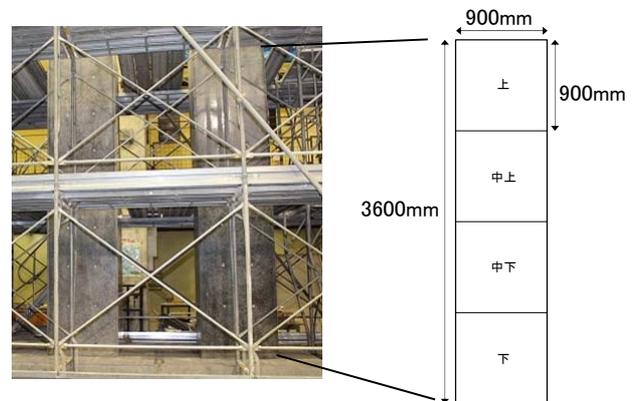


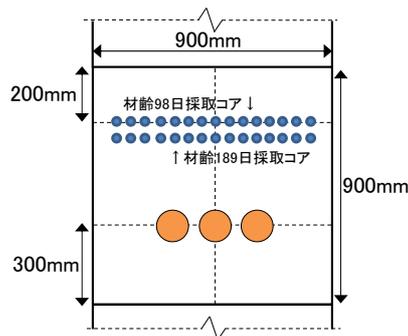
図-2 実規模試験体の概要

*1 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 研究員 修士(工学) (正会員)

*2 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ グループ長 博士(工学) (正会員)

*4 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 博士(工学) (正会員)



● : 小径コア (φ35mm) 採取位置
○ : 非破壊試験(Torrent 法)位置

図-3 小径コア採取と非破壊試験位置(側面図)

コンクリートは同一のレディーミクスト工場で製造・運搬し、1層を約45cmとして全8層で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。養生条件を表-2に示す。打込み後、材齢7日で型枠を取り外し、シート養生したケースは、材齢91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(試験体へ日照あり、雨がかりなし)を設置して静置した。

2.2 試験概要

試験項目を表-3に示す。打込み前に各配合のスランプおよび空気量を試験し、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、中性化試験、空隙率試験、塩分浸透試験に供した。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。試験位置は図-2に示す各柱の中上および中下の面を対象とし、非破壊試験とコア採取位置は図-3に示すとおりとした。

3. 各試験概要と結果

3.1 フレッシュ性状

各配合のスランプは 10 ± 1.0 cm、空気量は $5.0 \pm 0.3\%$ 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。

3.2 圧縮強度

各配合の圧縮強度を表-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

表-1 コンクリートの配合

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%

表-2 養生条件*¹

養生条件	材齢(日)			
	7	7~91	91	91~189
合板 7日	型枠	気中曝露* ²		
シート 91日	取外し	シート残置	シート取外し	気中曝露

*1: 中性化試験のみシート182日の養生条件も実施(詳細後述)

*2: 打込みから材齢189日までの平均養生温度は13℃

表-3 試験項目

種別	試験項目	摘要
フレッシュ性状	スランプ・空気量	打込み前に実施
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	中性化試験	材齢 98・189日にコア採取
	空隙率試験	材齢 98日にコア採取
	塩分浸透試験	材齢 98日にコア採取
非破壊試験	透気係数(Torrent)	材齢 98・189日試験

表-4 圧縮強度試験結果

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

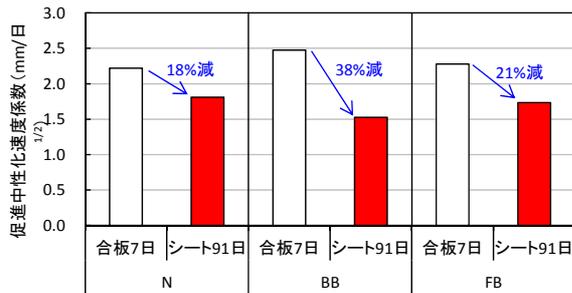
を受けたため多くの水分が逸散し、水和反応が停滞したからと考えられる。

3.3 中性化試験

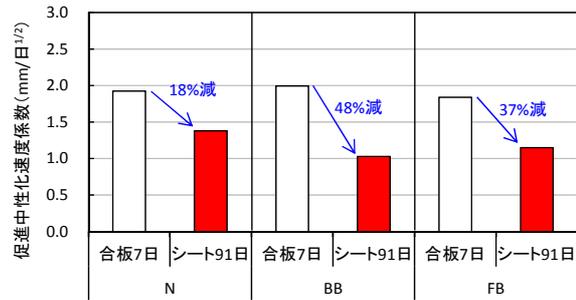
(1) 試験概要

① 合板7日とシート91日の比較

試験はコア採取後に温度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、全て材齢105日から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曝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。コアは柱の中上、中下から9本ずつ採取し、中上および中下で中性化速度係数を



(a) 材齢 98 日採取コア試験結果



(b) 材齢 189 日採取コア試験結果

図-4 中性化試験結果(合板 7 日とシート 91 日比較)

算出し、その平均値を求めた。

② 養生期間と中性化速度係数の検証

本項目においてのみシートの残置期間を 91・182 日とし、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および中下で中性化速度係数を算出し、その平均値を求めた。

(2) 試験結果

① 合板 7 日とシート 91 日の比較

図-4 に材齢 98 日および材齢 189 日に採取したコアの試験結果を示す。まず、図-4(a) の材齢 98 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、本材齢の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、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図-4(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 98 および 189 日のコアにおいて、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、各配合強度が同等となるように水セメント比を調整した結果と考える。さらに、全ケースにおいて材齢 189 日コアの中性化速度係数が材齢 98 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 189 日における BB および 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み、養生完了後においても水和の進行によって表層の緻密化の程度が高まった可能性があるためと考えられる。

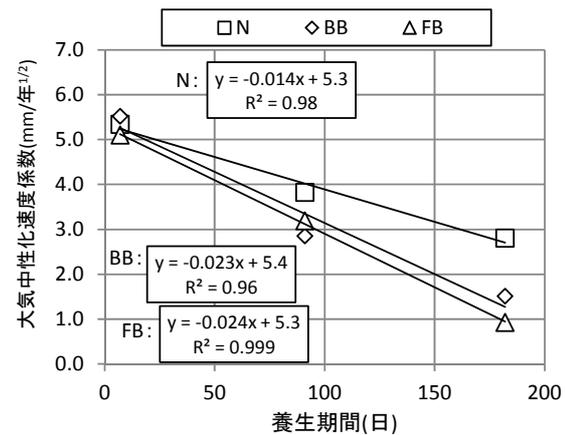


図-5 養生期間と大気中性化速度係数

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⁷⁾から得られた CO₂ 濃度と中性化深さの式(3)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図-5 に示す。

$$X = (2.804 - 0.847 \log C) A \sqrt{C \cdot t} \quad (3)$$

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、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 の順に大きくなり、全てのセメント種類において養生期間延長による中性化速度係数の低減度が大きく、混合セメントではより低減度が大きいことが分かる。本結果を考慮して、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(4)・(5)を考案した。

$$\alpha_x = \gamma_c \times \{-3.57 + 9.0W / (C_p + k \cdot A_d)\} \quad (4)$$

$$\gamma_c = -A \cdot I + B \quad (5)$$

ここに、 α_k ：中性化速度係数の特性値(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)、 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、 $A \cdot B$ ：養生期間を中性化速度係数に考慮する係数、 I ：湿潤養生期間(日)、($0 \leq I \leq 182$)を表す。

示方書設計編における中性化速度係数 α_k は養生期間 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図-5 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図-6 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 および B を表-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適用させることで、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。

中性化速度係数の示方書式に養生期間を考慮させる場合は、本検討のように α_k を γ_c で低減させる方法のほか、養生期間に応じて α_k 算出式内の k (混和材の種類により定まる係数)を補正させる方法、 γ_c の低減と k の補正を併用する方法などが考えられる。本論文では各セメント種類において一つの k や A_d のもと養生期間の影響を考察したため、養生期間による k の変化を考慮できていない。そのため、式(4)・(5)で示した中性化速度係数の低減係数は養生の影響を過大に評価している可能性が考えられる。この解決には、混和材の置換率を要因とした低減係数の検証が必要であり、今後の課題である。

3.4 空隙率試験

(1) 試験概要

試験はコア採取後に表面から 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および細孔径分布を測定した。さらに連続細孔容積⁸⁾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(連続細孔容積および分布)を測定した。柱の中上、中下から 3 本ずつコアを採取し、中上および中下で累積細孔容積、細孔径分布、連続細孔容積・分布を算出し、その平均値を求めた。

(2) 試験結果

図-7 に材齢 98 日で採取したコアの累積細孔容積およ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

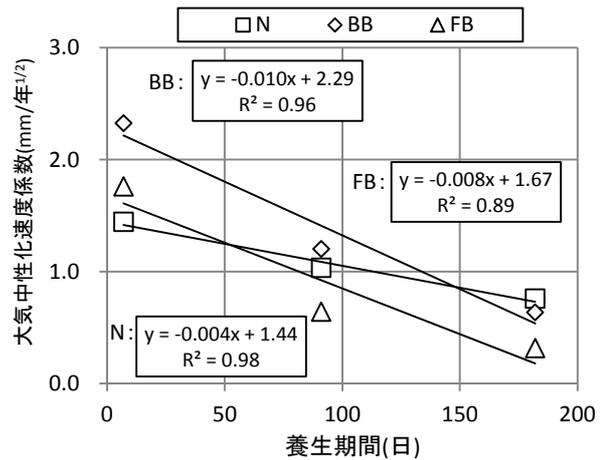


図-6 養生期間と大気中性化速度係数(示方書式考慮)

表-5 湿潤養生期間を中性化速度係数に考慮する係数

セメント種類	A (養生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

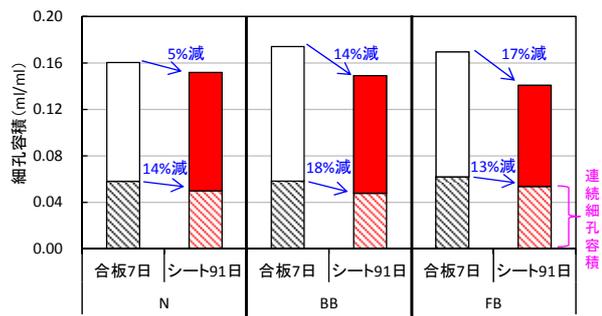


図-7 累積細孔容積と連続細孔容積 (材齢 98 日採取コア)

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 の混合セメントについては、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。

図-8 に材齢 98 日で採取した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。さらに図-9 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

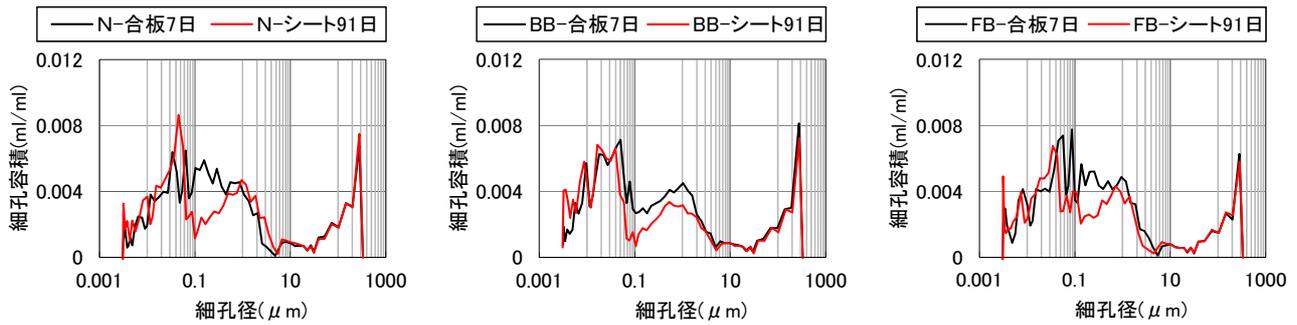


図-8 細孔径分布(材齢 98 日採取コア)

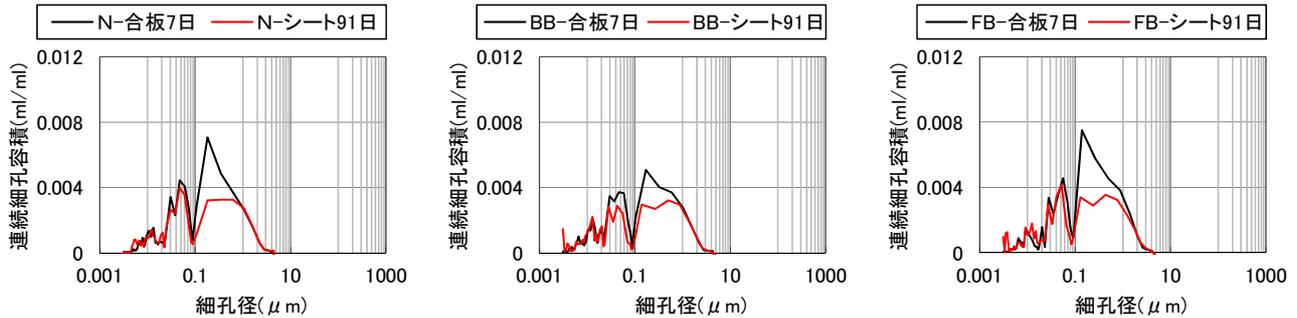


図-9 連続細孔径分布(材齢 98 日採取コア)

の増大は認められなかった。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。

3.5 透気係数と中性化速度ならびに空隙率の相関

図-10に材齢98日に測定した透気係数とコアの中性化速度係数、材齢189日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⁹⁾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98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189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。

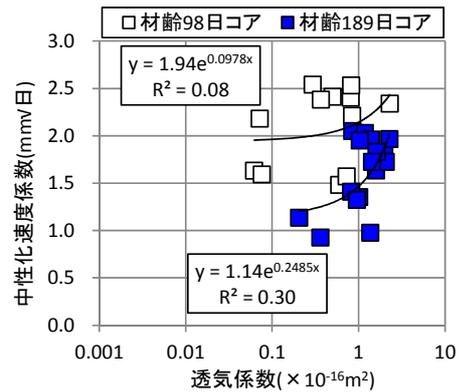


図-10 透気係数 KT 値(Torrent) と中性化速度係数の関係

図-11に材齢98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および連続細孔容積の関係を示す。累積細孔容積およ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。

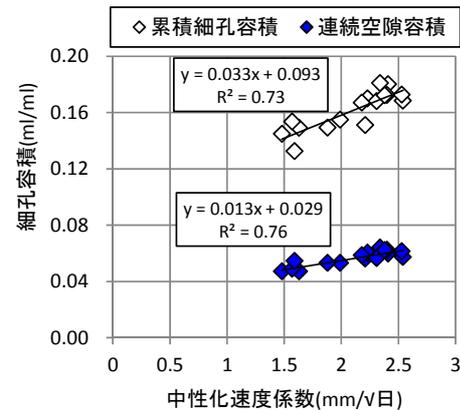


図-11 中性化速度係数と細孔容積の関係
(材齢 98 日採取コア)

3.6 塩分浸透試験

(1) 試験概要

試験はコア採取後に温度 20℃、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、13 サイクルまで乾湿繰返し環境に曝した。コアは柱の中下から 3 本ずつ採取し、そのうちの 1 本から 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

図-12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については採取したコア表面部に粗骨材が集中して分析に適さずデータを取得できなかったため、BBおよびFBの結果を示す。BBおよびFBの合板7日に着目すると、どちらも中性化の影響で表面から5mm深度の塩分量が小さく、それ以深においては塩分が濃縮され、26mm深度まで塩化物イオンが浸透した。シート91日においては、塩分量が表面側に移行し、遮塩性が向上していることを確認した。

4. まとめ

本検討では、実規模柱を対象として普通セメント、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検証した。得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 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減少し、BBおよびFBの影響度はNに対しさらに顕著であった。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) Torrent法に基づく透気係数と中性化速度係数の関係は養生完了7日後よりも養生完了98日後の相関が高い、表層透気試験によりコンクリートの耐久性を評価する場合は養生完了後から3か月程度の乾燥期間の設けることにより精度が向上する。

謝辞：本研究の実施にあたり、積水成型工業(株)矢野英伸氏をはじめとする、多くの皆様に多大な御協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

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, pp.22-30, 2013.
- 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

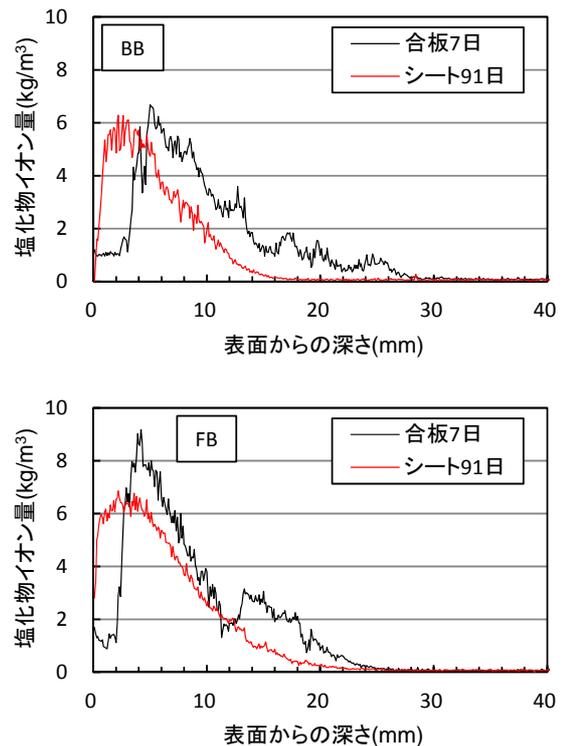


図-12 表面からの深さ方向における塩化物イオン量

リート工学, Vol.49, No.3, pp.21-28, 2011.3

- 3) 臼井達哉, 宮原茂禎, 坂本淳, 岸利治: テクニカルレポート「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」Vol.53, No.10, pp.867-873, 2015.10
- 4) 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, pp.1897-1902, 2015.
- 5) 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, pp.557-558, 2015.
- 6) 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, pp.559-560, 2015.
- 7) 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, pp.119-128, 1992.
- 8) 吉田亮, 岸利治: 水セメント比およ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, pp.729-734, 2007.
- 9) 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, pp.718-723, 2012