

論文 表面吸水試験を用いた養生による表層品質の改善効果の検討

A Study on the Effect of Curing Using Surface Water Absorption Test on the Improvement of Surface Layer Quality

○井上 優作*1・名古屋 智樹*2・伊代田 岳史*3
Yusaku INOUE, Tomoki NAGOYA and Takeshi IYODA

要旨：耐久性を有する構造物を実現すべく、コンクリートの表層品質を養生により確保する必要がある。そこで本研究では、異なる W/C での養生による表層品質改善効果を非破壊にて確認すべく、普通ポルトランドセメント（N）と N の 50%を高炉スラグ微粉末に置換した高炉セメント B 種（B）を用いて表面吸水試験を試みた。どの配合でも高 W/C での表層品質改善効果が高く、その傾向は B 配合にて顕著であった。低 W/C では養生初期から空隙量が少なく、養生による改善効果は低いと考えられる。

キーワード：表層品質，W/C，表層品質評価試験，物質移動試験

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において、二酸化炭素や塩化物イオンのような劣化因子がコンクリート内に侵入し鋼材に到達すると、鋼材の不動態皮膜が破壊され、鋼材腐食が進行する。この現象を防ぐべく十分な耐久性を有するコンクリート構造物が望まれる。ここで劣化因子はコンクリート表面から侵入するため、十分な耐久性を確保するためにはコンクリート全体の品質向上も重要であるが、特に劣化因子の侵入経路であるコンクリート表層領域の物質移動特性（以下、表層品質）が重要¹⁾である。ここで表層品質とは表層領域における物質移動抵抗性や美観、強度特性等複数の特性を含んだ品質を示すものと考えられるが、本研究では特に耐久性に影響を与える物質移動抵抗性を表層品質として考えることとした。既往の研究より、表層品質はコンクリートの配合条件だけでなく、施工時に施される養生条件の影響も大きく受け²⁾、養生が不十分であると表層品質が悪化すると考えられる。これはコンクリートの水分逸散は内部から表面に向かって生じ、内部は十分に水和反応する一方で、表層は水和に必要な水分が逸散してしまうため、内部に比べ水和が滞ってしまうことが原因であると考えられる。

2017 年に制定されたコンクリート標準示方書【施工編】³⁾（以下、示方書）では養生について、「コンクリートの湿潤養生期間は使用するセメント種類や養生期間中の環境温度等に応じて適切に定めなければならない。」と記載されており、通常のコンクリート工事にお

表-1 計画配合およびフレッシュ性状

凡例	セメント種	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Shump (cm)	Air (%)	C.T. (°C)
				W	C	S	G			
N35	OPC	35	44	170	486	723	953	5.0	5.0	26.9
N45		45	46		378	796	969	17.0	5.9	25.0
N55		55	48		309	858	964	21.5	4.2	24.0
N65		65	50		262	928	956	20.5	3.7	23.8
B35	BB	35	44	170	486	715	942	20.5	6.0	23.7
B45		45	46		378	790	961	18.5	5.0	24.9
B55		55	48		310	853	959	21.0	3.3	23.6
B65		65	50		262	910	945	17.5	3.8	26.1

けるコンクリートの湿潤養生期間の標準を使用セメント種類と日平均気温から定めている。この湿潤養生期間の標準はコンクリートの強度や初期凍害に及ぼす養生条件の影響を検討した結果等を参考に設定されている。しかし耐久性に着目すると表層品質が養生によって改善した際に耐久性にどれほど影響を与えるかについてはあまり議論されていない。

そこで本研究では、物質移動抵抗性のうち中性化に対する養生日数の延長が表層品質の改善に与える影響を明らかにすることを目的とし、表層品質評価試験と物質移動試験を実施して養生時の様々な条件が表層品質に与える影響の整理を行った。

2. 研究概要

2.1 使用材料と計画配合

本研究では、表層品質に影響を与えと考えられる

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科社会基盤学専攻

*2 元芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻

*3 芝浦工業大学 工学部先進国際課程(兼務 土木工学科)

Dept. of Civil Engineering, Shibaura Institute of Technology

Dept. of Civil Engineering, Shibaura Institute of Technology

Dept. of Civil Engineering, Shibaura Institute of Technology

要因のうち、材料因子である使用セメント種類と施工要因である養生日数を変化させ、コンクリートで試験を実施した。

本研究の計画配合およびフレッシュ性状を表-1に示す。セメント種類は普通ポルトランドセメント（N：密度 3.16g/cm^3 ，粉末度 $3080\text{cm}^2/\text{g}$ ），普通ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末（BFS：密度 2.91g/cm^3 ，粉末度 $3970\text{cm}^2/\text{g}$ ）で置換して作製した高炉セメントB種を使用し，W/Cを35，45，55，65%とした。

2.2 供試体寸法・養生条件

本研究に用いた供試体の寸法を図-1に示す。試験体寸法は用途別に $150\times150\times260\text{mm}$ の角柱供試体（以下I型）と $100\times100\times400\text{mm}$ の角柱供試体（以下II型）， $\Phi100\times200\text{mm}$ の円柱供試体を作製した。

表面吸水試験に用いるI型の角柱供試体は打込み翌日に脱型し，試験面となる2面を実務でも使用される3M社の強粘着タイプの保水養生シートで1，2，3，5，7，10，14，28日間封緘養生し，それ以外の4面はアルミテープで封緘養生した。促進中性化試験に用いるII型の角柱供試体は打込み翌日に脱型し，6面すべてアルミテープで1，3，5，7，10，28日間封緘養生を施し，養生終了後打込み面に対して側面の2面のアルミテープをはがして試験に用いた。I型の供試体は約 20°C の実験室内に脱型後静置した。

2.3 試験項目

(1) 表面吸水試験（SWAT）

表面吸水試験は林らにより開発された手法⁴⁾で，コンクリート表面にシリンダーを装着させ，注水後，その吸水挙動よりコンクリート表層を評価する手法である。実構造物においても非破壊で実施することができ，10分間という短時間で評価が可能である⁵⁾。I型供試体の養生終了後，試験面を開放してから7，14，28，56，91日後に表面吸水試験機を用いた表面吸水試験を行い，その計測サイクルを図-2に示す。試験方法は，まず供試体表面に試験機を取り付け，真空ポンプを始動させ供試体に試験機を密着させる。そしてチューブから水を注入し，注入開始から10秒以内に水頭 300mm まで注入し，注入バルブを閉め，注入完了後15，30，45秒，1分と2分から1分ごとに10分までにおける減水量を目視で高さの変化として計測した。その計測結果から吸水速度を算出し，10分時点における吸水速度をその供試体の吸水速度とした。

(2) 真空吸水試験

筆者らのグループが考案したコンクリートの深さ方向の物質移動抵抗性を連続的に把握することができる真空吸水試験^{6,7)}を1，3，5，7，10，28日間封緘養生した $\Phi100\times200\text{mm}$ の供試体で実施した。供試体は養生終

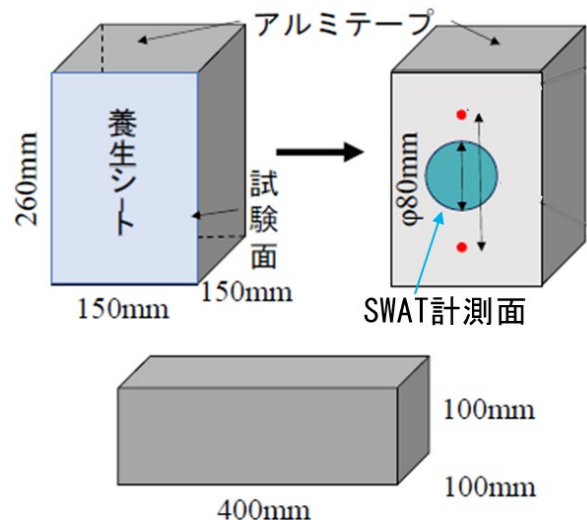


図-1 供試体寸法

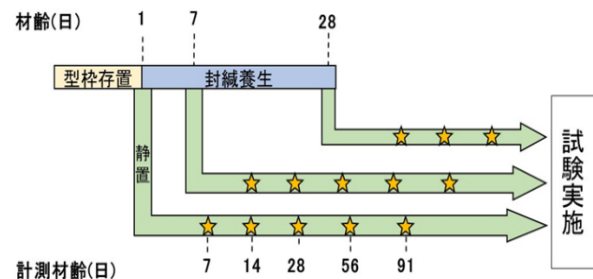


図-2 計測サイクルの概略（表面吸水試験）

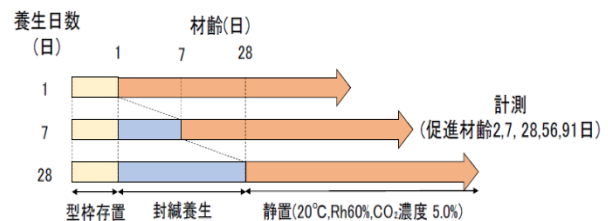


図-3 計測サイクルの概略（促進中性化試験）

了後，供試体側面をアルミテープで封緘し，両端面を開放した試験体を温度 20°C ，相対湿度 60% 環境下の恒温恒湿室に28日間静置した。その後，試験の前処理として，アルミテープを全て取り除いた試験体を温度 40°C ，相対湿度 30% 環境下の乾燥炉で5日間乾燥させて試験に用いた。なお試験では，試験面以外からの水の侵入を防ぐため，アルミテープで両端面と側面一部を封緘した。そして，円柱供試体を高さ 26mm まで水に浸漬するように真空デシケーター内に静置し，真空ポンプで1時間吸引，2時間真空保持をして吸水させた。試験終了後，供試体を割裂し，円柱底面側から 10mm 間隔でノギスを用いて計21点の吸水高さを測定し，その平均値を真空吸水深さとした。

(3) 促進中性化試験

養生終了後の供試体の打込み面に対し，側面の2面以外の4面をアルミテープで封緘し，JISA1153に基づ

き、温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂ 濃度 5.0%環境下に設定した促進中性化試験槽に静置した。促進中性化試験の計測サイクルを図-3 に示す。Ⅱ型供試体を促進材齢 2, 7, 28, 56, 91 日にそれぞれ 50mm 間隔で割裂し、断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して表面から赤紫色に呈色した部分の距離を一面あたり 6 点、計 12 点計測し、その平均値を促進中性化深さとした。

(4) 空隙率試験

真空吸水試験の結果をもとに算出した養生の影響範囲より、図-4 のように表層と内部に区別した。養生の影響を受けた表層のサンプルは橙色で示す部分から採取し、内部のサンプル採取位置は、どの配合でも養生の影響を受けていなかった底面からの距離が 90～110mm 付近の緑色で示す部分から採取した。サンプルは以下の式(1) を用いてアルキメデス法により養生日数 7 日と 28 日の空隙率を算出した。採取した試験体を水に浸漬させ、真空デシケータを用いて真空飽水処理を行い、飽水状態となった試験体から水中質量と飽水質量を計測。その後温度 40℃、相対湿度 30%環境下の乾燥炉にて質量が恒量となるまで静置し、絶乾質量を計測した。

$$\text{空隙率(\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \times 100 \quad (1)$$

W₁ : 絶乾質量, W₂ : 飽水質量, W₃ : 水中質量

3. 試験結果

3.1 表面吸水試験

図-5、図-6 に N 配合と B 配合における吸水速度および近似曲線を示す。どちらの配合においても W/C が低くなるほど養生期間による吸水速度の差は小さく、W/C が高いと特に養生初期における表層品質改善効果が高く、N 配合よりも B 配合において顕著にみられた。これは W/C が低いと養生初期から空隙量が少なく、養生期間を長くしても水和により緻密化された空隙が少ないため、養生による品質効果改善効果が低かったのではないかと考えられる。

3.2 真空吸水試験

図-7、図-8 に真空吸水試験結果を示す。どちらのセメ

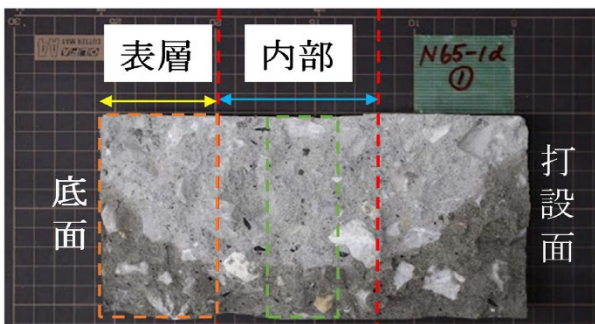


図-4 サンプル採取位置

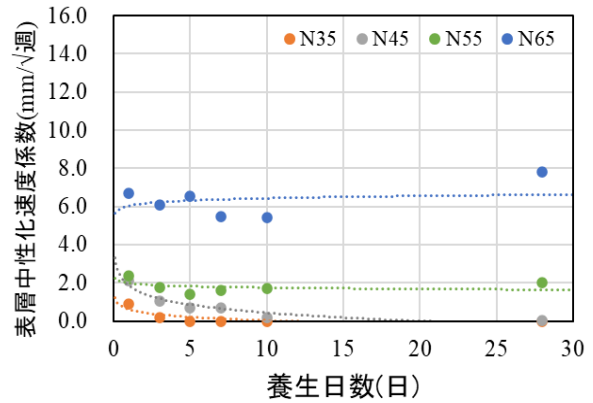


図-5 吸水速度 (N 配合)

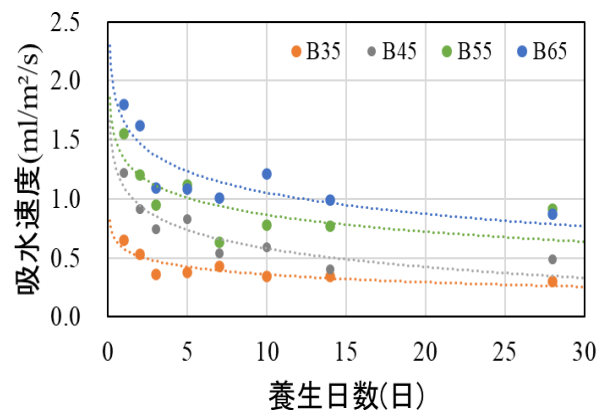


図-6 吸水速度 (B 配合)

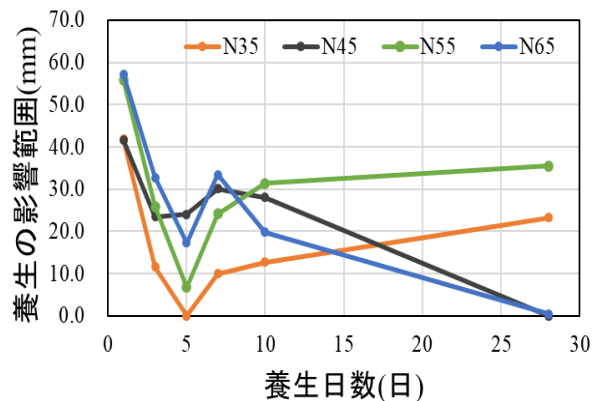


図-7 真空吸水試験結果 (N 配合)

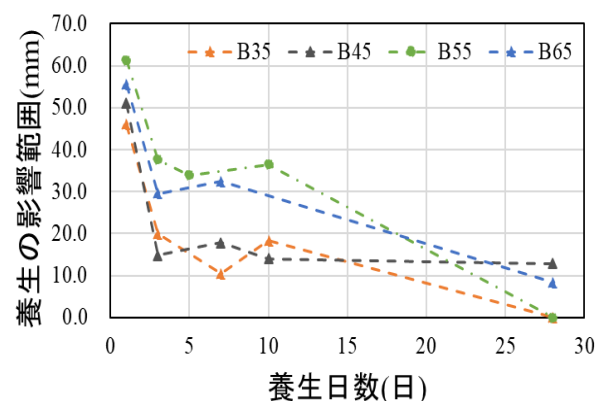


図-8 真空吸水試験結果 (B 配合)

ント種類においても W/C が高いほど養生初期の影響範囲が大きいことが確認できた。また、養生を施すことで W/C が低いものと同等かそれよりも影響範囲が縮小することがわかった。したがって、養生の影響範囲は W/C により異なり、空隙が多いと考えられる配合では養生初期において水和が停滞している領域が大きいと考えられる。

3.3 促進中性化試験

真空吸水試験で算出した養生の影響範囲に中性化深さが到達するまでの中性化速度係数を表層中性化速度係数と定義し、図-9、図-10 に養生日数ごとの表層中性化速度係数を示す。N 配合に着目すると N35 は養生日数によらず中性化速度係数が最も小さい。これは前述したように養生初期から空隙量が少ないことに加え、養生を施すことで中性化が進行しない程緻密になっていると考えられる。N45 や N55 も N35 より速度係数が少し大きいものの、養生を施すことで中性化抵抗性が向上していた。N65 は表層中性化速度係数が養生日数によらず同程度であるが、これは W/C が高く、表層領域の物質移動抵抗性が低いためだと考えられる。また、B 配合は N 配合よりも中性化速度係数は大きいものの、W/C によらず養生を施したことで中性化抵抗性が向上することが確認できた。

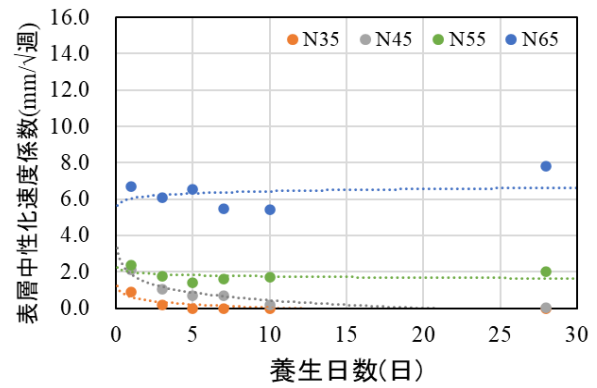


図-9 表層中性化速度係数 (N 配合)

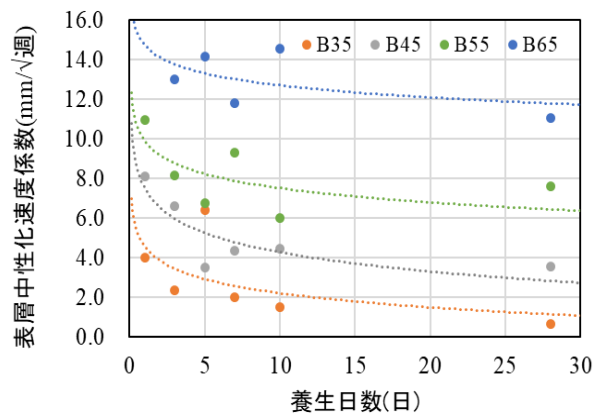


図-10 表層中性化速度係数 (B 配合)

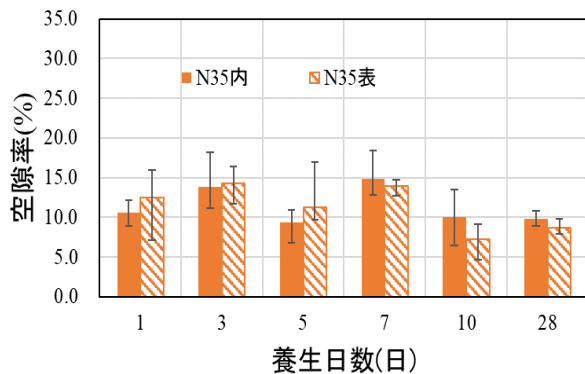


図-11 空隙率 (N35)

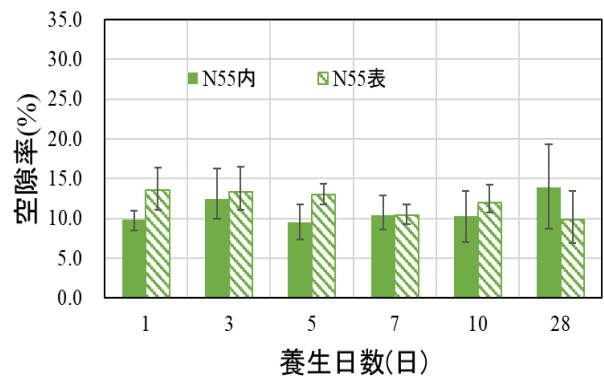


図-13 空隙率 (N55)

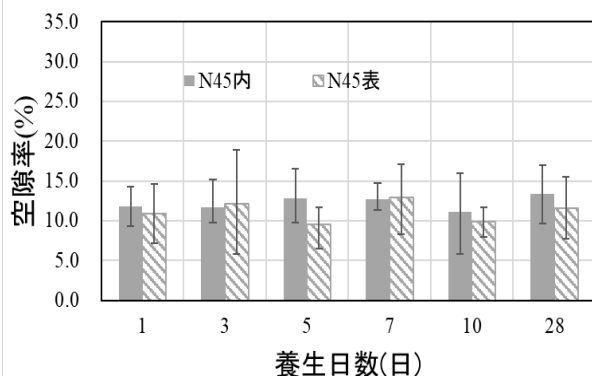


図-12 空隙率 (N45)

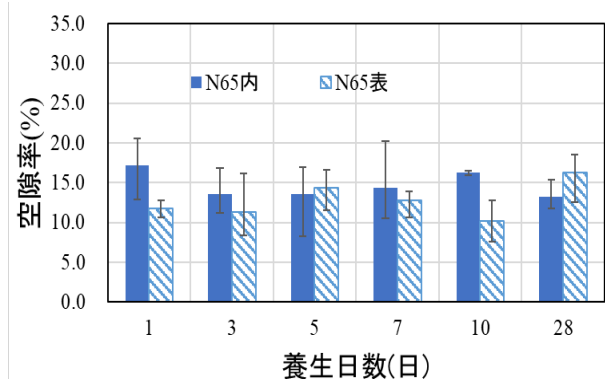


図-14 空隙率 (N65)

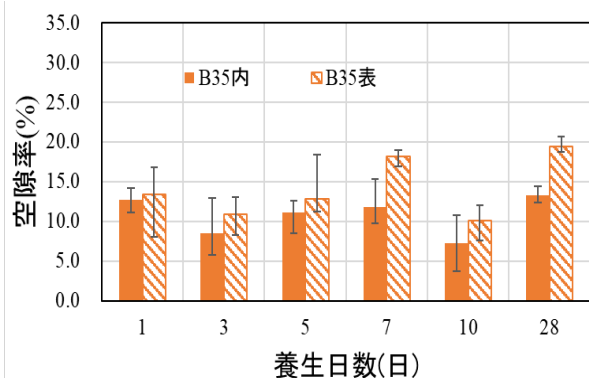


図-15 空隙率 (B35)

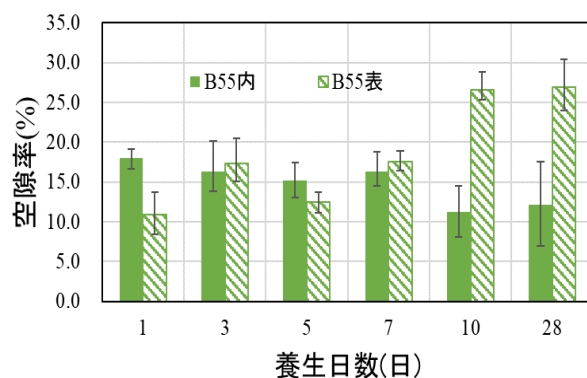


図-17 空隙率 (B55)

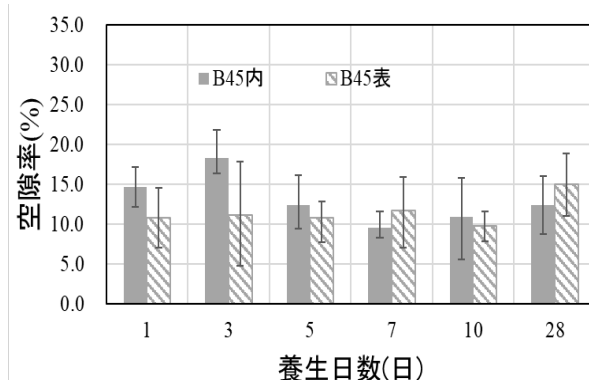


図-16 空隙率 (B45)

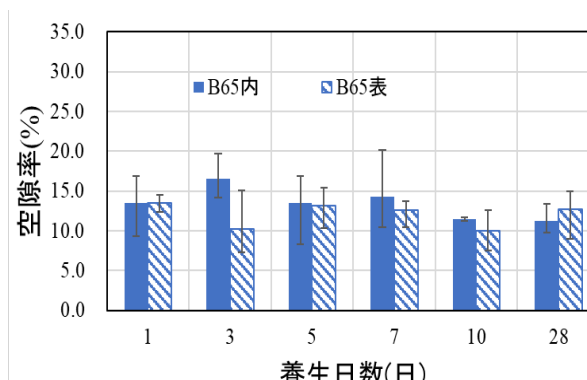


図-18 空隙率 (B65)

3.4 空隙率試験

図-11～図-14 に W/C ごとの N 配合の空隙率を示す。N 配合では養生日数によらず内部の空隙率は大きく変化しないことがどの W/C でも確認できた。また、表層と内部の空隙率を比較すると W/C が低いものは両者の差が小さいことから、養生による水和への影響は W/C が高いものよりも受けにくいといえる。

図-15～図-18 に W/C ごとの B 配合の空隙率を示す。B 配合では N 配合とは異なり、内部の空隙率は養生を施すことで小さくなっており、これは B 配合の内部においては水和が遅いため、養生をすることで内部のコンクリートが緻密になるためではないかと推定される。また、どの W/C においても N 配合よりも内部と表層の空隙率の差が大きくなっていったことから、B 配合では養生を施さない場合、より一層表層の水和が滞ってしまうことが考えられる。

4. 表層品質と耐久性の関係

図-19 に N 配合と B 配合の吸水速度と中性化速度係数の関係を示す。どちらの配合においても表層品質が良好であるほど中性化抵抗性が高いことが確認できた。N 配合に着目すると、N35、N45、N55 は吸水速度と中性化速度係数の関係は一定であると考えられる。一方

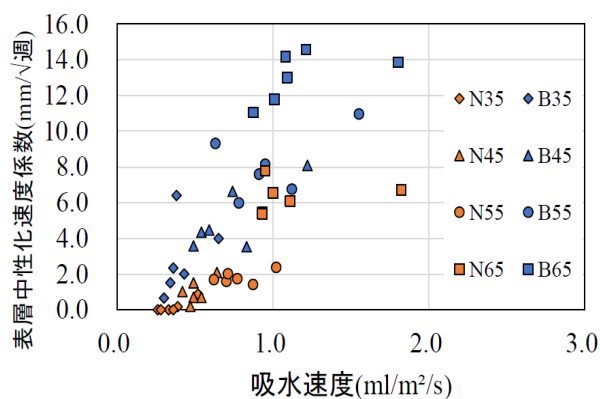


図-19 吸水速度と表層中性化速度係数の関係

で N65 は吸水速度に対する表層中性化速度係数が大きい。これは養生により表層が改質され、W/C が低いものと同程度の表層品質が得られたとしても、内部コンクリートの物質移動抵抗性が W/C が低いものよりも小さくなり、コンクリート全体の中性化抵抗性が低いのではないかと考えられる。また、B 配合では W/C ごとにそれぞれの吸水速度と中性化速度係数の関係には良好な相関が認められた。

5. まとめ

本研究は養生による表層品質改善効果を定量的に評

価し、表層品質改善が中性化に与える影響を明らかにすることを目的として、養生時の諸条件が表層品質に与える影響を整理するとともに養生による表層品質改善効果の定量的評価に向けた考察を行った。以下に本研究から得られた知見を示す。

- (1) 表面吸水試験はいずれの配合においても、W/C が低くなるほど養生期間による吸水速度の差は小さく、W/C が高いと特に養生初期における表層品質改善効果が高く、養生したことによる表層品質の改善効果を計測できていると考えられる。
- (2) W/C に着目すると低 W/C は養生初期から表層の物質移動抵抗性が高い一方、高 W/C になるほど養生による品質改善効果が高い。
- (3) N 配合の W/C が 35, 45, 55% では吸水速度と中性化速度係数の関係は一定であると考えられ、B 配合では W/C ごとにそれぞれの吸水速度と中性化速度係数の関係には良好な相関が認められた。

参考文献

- 1) 白根勇二, 舟橋政司, 松尾健二: 施工条件や養生条件がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1313-1318, 2010
- 2) 豊村恵理, 伊代田岳史: 養生条件が中性化速度式に及ぼす影響と評価方法の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集, 第 11 巻, pp.401-406, 2011
- 3) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書【施工編】, pp.124-128, 2018
- 4) 林和彦, 細田暁: コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.2804-1809, 2011
- 5) 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評価基準に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, 第 29 巻, pp.101-109, 2018
- 6) 伊代田岳史, 青木浩也, 井ノ口公寛, 村上祐: 材料・施工要因が表層コンクリートの物質移動抵抗性に与える影響, 第 65 回セメント技術大会講演要旨, pp.258-259, 2011
- 7) 伊代田岳史, 井ノ口公寛: 簡易な真空吸水試験を用いた中性化進行予測手法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, 2012