

論文 せき板の存置期間や配合条件がコンクリート表層部の品質および耐久性に及ぼす影響

桜井 邦昭*1・平田 隆祥*2・竹田 宣典*3・十河 茂幸*4

要旨：せき板の存置期間や配合条件を変化させた試験体を製作し、コンクリート表層の透気係数や表面吸水速度を測定するとともに、コア供試体を採取して促進試験を行い中性化や塩分浸透に対する抵抗性を調べた。その結果、せき板の存置期間の延長により表層部の品質や耐久性は緩やかに向上するが、標準養生した場合や躯体中心部に比べ耐久性は劣ること、打上がり面を湛水させることで、せき板を設置した側面でも表層品質が大幅に向上すること、表層品質とせき板を取り外した時の圧縮強度ならびに耐久性との間には相関が認められることを示した。

キーワード：湿潤養生、せき板、湛水、透気係数、表面吸水速度、中性化、塩分浸透

1. はじめに

耐久性に優れたコンクリート構造物を構築するには、塩分、水分等の外的要因の浸入経路となるコンクリート表層部の品質を高めることが重要である。

2012 年制定コンクリート標準示方書【施工編】では、「打込み後のコンクリートは、一定期間は十分な湿潤状態に保たなければならない」とし、セメント種類および日平均気温に応じた湿潤養生期間の目安を示している。このため、多くの土木分野の施工現場では、示方書に示される期間にわたり側面にせき板を存置するとともに、打上がり面には吸水させた養生マットを敷設した「湿潤養生」を実施している現状にある。

しかしながら、上記の養生を所定の期間行うことで、同書【設計編】に示される算定式から得られる中性化速度係数や見掛けの拡散係数などの特性値が確保できていることを調査した事例は少ない。耐久的なコンクリート構造物を構築する上では、実際の施工段階においてどのような養生を行うことで、設計段階においてコンクリートに期待された特性値が確保できるかを把握し、その結果を実施工へ反映することが重要と考えられる。

一方で、近年では透気試験（トレント法）や表面吸水試験（SWAT）など原位置でコンクリートの表層品質を非破壊で試験する方法が実用化されている。これらの試験で得られる値は、コンクリートの耐久性との相関があることが多くの文献で示されており、表層部分の品質や耐久性を直接的に推定・把握する手法として、今後活用されていくものと考えられる。しかし、これらの測定値は、測定時期や環境条件（表面の水分率など）の影響により値が変動することも指摘されており、リバウンドハンマーによる推定強度のように施工現場での品質管理

の手法として広く適用する上では課題も残されている。

そこで、本研究では、汎用的な配合条件のコンクリートに対して標準的に行われている養生を施したときのコンクリート表層部分の品質や耐久性を調べ、耐久的なコンクリート構造物を構築する上で、施工段階ではどのような管理を行うべきかを考察することを目的とした。なお、本文では、かぶりコンクリートの表面側の部分（概ね数 cm の範囲）を意図し、「表層」という語句を用いた。

2. 実験概要

2.1 検討ケースおよび試験体の概要

検討ケースを表-1 に示す。検討要因は、せき板の存置期間に加え、水セメント比、セメント種類および環境温度とした。一部の配合でせき板を取り外した後に非透水・非透湿性のポリオレフィンフィルム（公称厚さ 0.11mm、以下、保水テープという）を貼り付ける場合、打上がり面を湛水（水深 3cm）させる場合も検討した。

試験体には、断面寸法 60×60cm、高さ 40cm の直方体を用いた。側面のせき板と底面には一般的な工事で使用する厚さ 12mm の化粧合板を用いた。

2.2 実験の流れ

実験の流れを図-1 に示す。実験は以下の手順で行った。まず、コンクリートを製造し、試験体に打ち込んだ。コンクリートの締固めにはφ40mm の棒状バイブレータを用い、中心および四隅の 5 箇所それぞれ 15 秒間締め固めた。打込み後、浮き上がったブリーディング水は取り除いて、こて仕上げを行った後に、打上がり面には水を十分に含ませた養生マットを設置し、その外周をビニールシートで覆った。湛水させる場合は、打上がり面に水を張り、その外周をビニールシートで覆った。また、

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 副部長 博士(工学) (正会員)

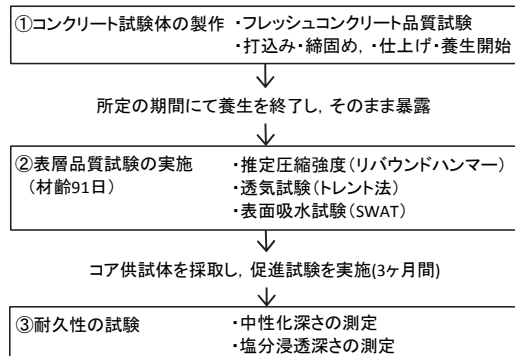
*3 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 上級主席技師 博士(工学) (正会員)

*4 広島工業大学 工学部 環境土木工学科 教授 工博 (正会員)

表－1 検討ケース

No.	検討要因	セメント 種類	W/C (%)	環境 温度 (℃)	養生方法		せき板の存置期間(日)			
					側面	上面	3	5	7	28
1	水セメント比	N	55	20	合板	養生 マット*2	○	○	○	○
2		N	65				○	○	○	○
3		N	45				○	○	○	○
4	環境温度	N	55	10	合板		○	○	○	○
5	セメント 種類	BB	55	20	合板		○	○	○	○
6		FB					○	○	○	○
7	保水テープ*1	N	55	20	保水テープ		○	○	○	○
8	湛水	N	55	20	合板	湛水	—	—	○	○

*1 材齢3日でせき板を取外し保水テープを貼付け。 *2 水を吸水させ外周をシートで被覆。



図－1 実験の流れ

表－2 コンクリートの配合

記号	目標 スランブ (cm)	目標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤 (C×%)		スラ ンブ (cm)	空気 量 (%)	ブリー ディング 率 (%)	凝結時間 (h-m)	
					W	C			S	G						WR	HWR
						N	BB	FB									
N-55	12±2.5	4.5±1.5	55.0	45.5	165	300			825	1004	1.0		13.5	4.6	4.1	5-55	8-40
N-65			65.0	46.6	165	254			864	1004	1.0		13.0	4.5	4.5	6-20	9-20
N-45			45.0	43.8	165	367			770	1004		0.8	12.5	5.2	2.9	5-20	7-40
BB-55			55.0	45.2	165		300		816	1004	1.0		13.5	4.7	3.8	6-30	9-40
FB-55			55.0	45.6	160			291	829	1004	1.0		13.5	4.5	3.9	6-40	9-30

N: 普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm³, BB: 高炉セメントB種, 密度3.04g/cm³

FB: フライアッシュセメントB種 (普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)とフライアッシュ(JIS II 適合品, 密度2.32g/cm³)とを質量比80:20で混合して使用)

S: 陸砂, 表乾密度2.61g/cm³, G: 砕石2005, 表乾密度2.64g/cm³, WR: AE減水剤, HWR: AE減水剤(高機能タイプ)

表－3 試験項目

分類	試験項目	準拠規準など
フレッシュ コンク リートの 品質	スランブ試験	JIS A 1101
	空気量試験	JIS A 1128
	ブリーディング試験	JIS A 1123
	凝結試験	JIS A 1147
強度特性	圧縮強度	JIS A 1108 封緘および標準養生供試体
表層品質	リバウンド ハンマー	JIS A 1155 [測定数]1側面当たり9箇所測定し平均値を採用 [測定材齢]材齢91日
	透気試験 (トレント法)	[測定数]1側面当たり3箇所測定し平均値を採用 [測定材齢]材齢91日
	表面吸水試験 (SWAT)	[測定数]1側面当たり2箇所測定し平均値を採用 [測定材齢]材齢91日
耐久性	中性化深さ	JIS A 1152, JIS A 1153 [促進条件]CO ₂ 濃度5%, 20℃60RH [促進期間]3ヶ月
	塩分浸透深さ	JSCE-G572 [促進条件]NaCl濃度10%水溶液(20℃) [促進期間]3ヶ月

なお、表－2 中に併記したように、各種コンクリートのブリーディング率は 2.9～4.5%程度と小さく、凝結時間も配合による違いはほとんど認められなかった。

2.4 試験項目

試験項目を表－3 に示す。試験体の製作に合わせて採取して封緘もしくは標準養生した供試体を用いて、各材齢の圧縮強度を測定した。表層品質試験として、材齢 91 日に、リバウンドハンマーによる推定圧縮強度、トレント法による透気試験および SWAT による表面吸水試験を行った。これらの試験に合わせて水分計にて試験体表面の含水率を測定したところ、4.1～4.9%の範囲であった。

中性化促進試験および塩分浸漬試験は、試験体より採取したコア供試体により行った。試験は、JIS および土木学会規準に従い、促進期間は 3 ヶ月間とした。

打上がり面の湛水状態を定期的に確認し、適宜、水を補充して水深が 3cm になるようにした。

所定の材齢経過後に、側面のせき板を取り外すとともに、上面の養生も終了し、そのまま暴露した。保水テープを貼り付けるケースは、材齢 3 日でせき板を取り外した後にすぐに保水テープを貼り付け、所定の材齢で保水テープを剥がして暴露した。

一連のコンクリートの製造や試験体の養生（せき板取り外し後の暴露期間も含む）は温度 20℃・湿度 60%の室内で行った。一部の試験体は 10℃の環境で試験した。

材齢 91 日に、後述する各種の表層品質試験を行ったのち、試験体からコア(φ100mm)を採取して、中性化促進試験および塩分浸漬試験を行った。

また、試験体の製作に合わせて、円柱供試体も採取して、同一の環境条件で封緘養生を行った。さらに、標準養生(20℃水中)の供試体も採取した。

2.3 コンクリートの配合および使用材料

コンクリートの配合を使用材料およびフレッシュ時の試験結果と合わせて表－2 に示す。汎用的なコンクリートを想定して練上り時の目標スランブは 12cm とした。水セメント比は 55%を標準とし、一部では 45 ないし 65%も検討した。全ての配合で単位粗骨材容積は一定とした。セメントは普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を用いたほかに、フライアッシュセメント B 種を想定して普通ポルトランドセメントと JIS II 種に適合するフライアッシュを質量比 80:20 で混合して用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 せき板の存置期間と表層品質

(1) リバウンドハンマーによる推定圧縮強度

せき板の存置期間と推定圧縮強度の関係を図-2 に示す。推定圧縮強度は、いずれの配合ともせき板の存置期間を3日から7日に延長した場合において若干の増加が認められるものの、その値は僅かであった。また、存置期間を28日まで延長しても推定圧縮強度はほぼ一定であった。さらに、セメント種類の違いによる差異もほとんど認められなかった。

封緘状態で存置した円柱供試体の圧縮強度の推移を図-3 に示す。当然の結果であるが、材齢の進行に伴い圧縮強度は増加している。このため、せき板を取り外した材齢に応じて脱型時点における試験体表面の圧縮強度も増加していたと考えられるが、図-2 のように材齢91日での推定圧縮強度では、せき板の存置期間による差異は認められなかった。これらの結果から、リバウンドハンマーによる試験では、湿潤養生期間の延長等による表層部の品質の違いを把握することは困難と考えられる。

(2) 透気係数および表面吸水速度

せき板の存置期間と透気係数ならびに表面吸水速度との関係を図-4 および図-5 に示す。

透気係数は、いずれの配合とも、せき板の存置期間が3日から7日に延長するのに伴い小さくなっている。また、それ以降の材齢28日にかけても緩やかであるが小さくなっている。普通ポルトランドセメント(N)の水セメント比に着目すると、いずれの存置期間においても水セメント比の小さい配合ほど透気係数は小さくなっている。また、同一の水セメント比55%で養生温度が異なる場合では、環境温度が20℃と高い場合の透気係数が小さくなっている。次に、セメント種類に着目すると、高炉セメントB種やフライアッシュセメントB種では、存置期間3日から7日にかけての透気係数の減少が顕著であり、存置期間28日ではセメント種類による違いはほとんど認められなくなっている。

表面吸水速度の値も、透気係数と同様に、水セメント比が小さいほど、環境温度が高いほど小さくなるとともに、同一材齢では普通ポルトランドセメントを用いた方が、混合セメントの場合に比べ値が小さくなっていた。

以上の結果を踏まえると、透気試験や表面吸水試験を行うことで、リバウンドハンマーによる試験では把握できなかった配合条件（水セメント比やセメントの種類）および湿潤養生期間によるコンクリート表層部の品質の違いを適切に把握できると考えられる。

(3) 封緘養生供試体の圧縮強度と表層品質

図-4 および図-5 に示した透気係数および表面吸水速度の試験結果では、配合条件などによらずせき板の

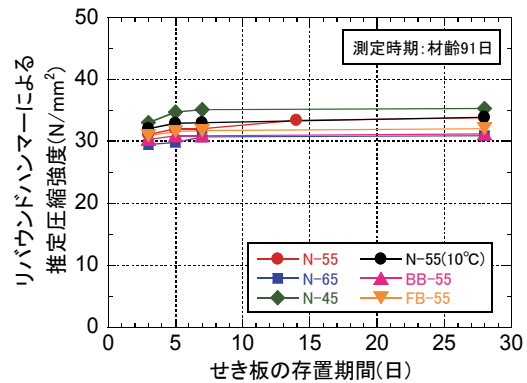


図-2 せき板の存置期間と推定圧縮強度

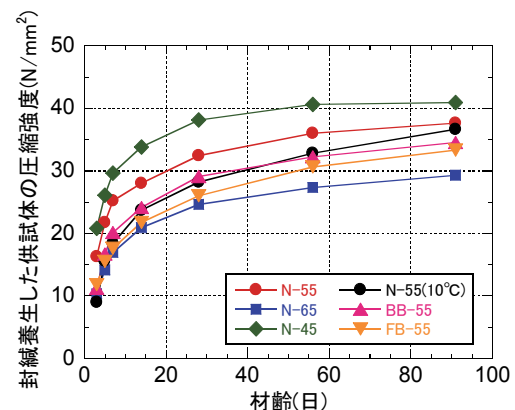


図-3 封緘養生した供試体の圧縮強度の推移

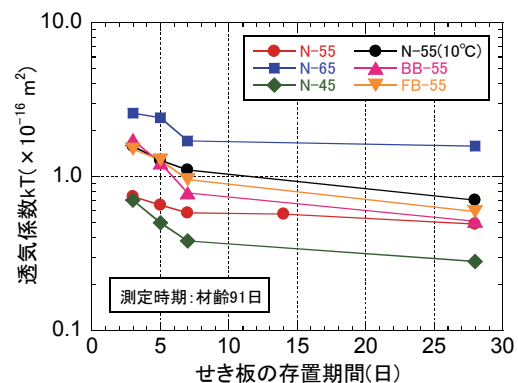


図-4 せき板の存置期間と透気係数

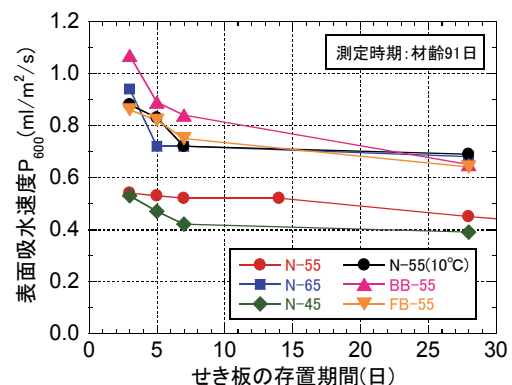


図-5 せき板の存置期間と表面吸水速度

存置期間が3～7日にかけては値が急激に小さくなり、7日以降の傾きは比較的緩やかになっている。一方、図-3

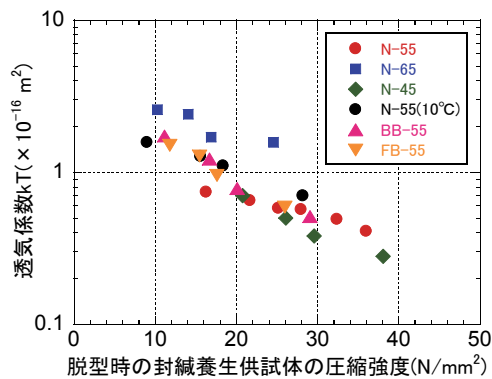


図-6 せき板を取り外した材齢における封緘養生供試体の圧縮強度と透気係数

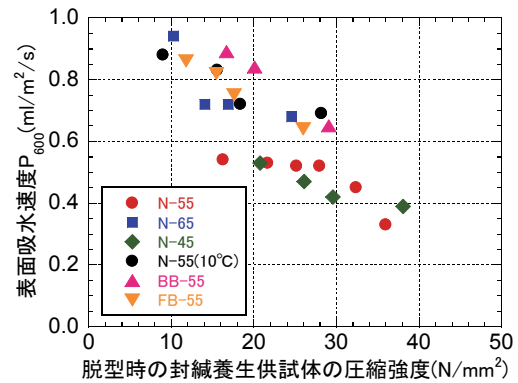


図-7 せき板を取り外した材齢における封緘養生供試体の圧縮強度と表面吸水速度

に示した封緘養生した供試体の圧縮強度の推移は、配合条件によらず、材齢数日程度の若材齢では強度の増加が顕著であり、その後は材齢の経過に伴い緩やかに強度が増加している結果となっている。

そこで、せき板を取り外した材齢における封緘養生した供試体の圧縮強度と透気係数もしくは表面吸水速度との関係で整理して図-6 および図-7 に示す。

セメント種類、水セメント比および養生温度の条件によらず、せき板を取り外した時点の圧縮強度と透気係数もしくは表面吸水速度には相関が認められる。このことは、せき板を取り外す時点の圧縮強度を大きくするほど表層品質は高くなること、言い換えると、十分に強度発現しない状態でせき板を取り外した場合には、表層品質は低くなることを示していると考えられる。

本実験での暴露条件は温度 20℃、相対湿度 60% であるが、文献²⁾によると、相対湿度が 60% 以下の場合には水和反応が停滞することが示されている。本実験結果および文献²⁾の知見を踏まえると、一般的な土木構造物が曝される環境条件(湿度の条件)の場合、せき板を取り外した後では、表層部のコンクリートの水和反応はほぼ停止してしまい、表層品質は向上しにくいものと推測される。

(4) せき板の取り外し後に保水テープを設置した効果

材齢 3 日でせき板を取り外し、直後に保水テープを貼り付けて所定の材齢で剥がした場合の透気係数および表面吸水速度の測定結果を図-8 および図-9 に示す。

透気係数および表面吸水速度とも、保水テープを貼り付けた場合とせき板を存置した場合での値は同様であった。このことは、コンクリート表面を湿潤状態に保つ期間を長くすることで表層品質が向上することを示しており、次工程への転用のため、早期にせき板を取り外す場合には保水テープを貼り付けるなどして湿潤状態を保持すれば良いことを表していると考えられる。

(5) 打上がり面を湛水した効果

材齢 7 日ないし 28 日まで打上がり面を深さ 3cm で湛水した場合の表層品質試験結果を表-4 に示す。なお、

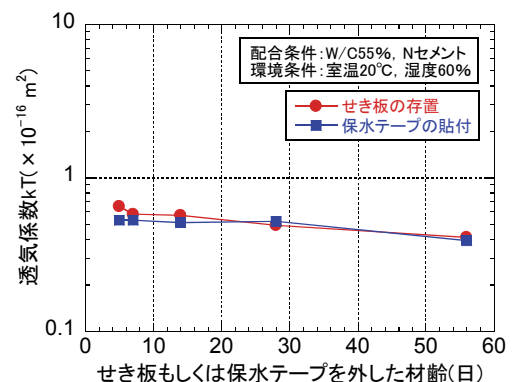


図-8 保水テープの貼付け期間と透気係数

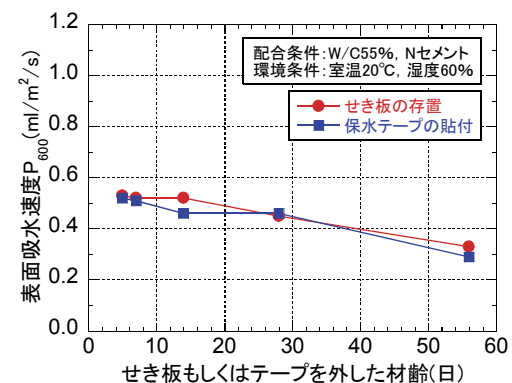


図-9 保水テープの貼付け期間と表面吸水速度

表-4 仕上がり面を湛水した場合の側面の表層品質
(普通ポルトランドセメント、W/C55%の配合)

表層品質試験の種類	単位	上面の養生方法			
		養生マット		湛水	
		7日	28日	7日	28日
リバウンドハンマーによる推定圧縮強度	N/mm ²	32.0	33.8	31.2	33.8
透気係数kT	× 10 ⁻¹⁶ m ²	0.58	0.49	0.14	0.06
表面吸水速度P ₆₀₀	ml/m ² /s	0.52	0.45	0.30	0.18

*表層品質試験は、材齢91日に実施

*表中の7日および28日は、上面の養生を実施するとともに、側面にせき板を存置した日数を表す

試験したコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 55% の配合である。

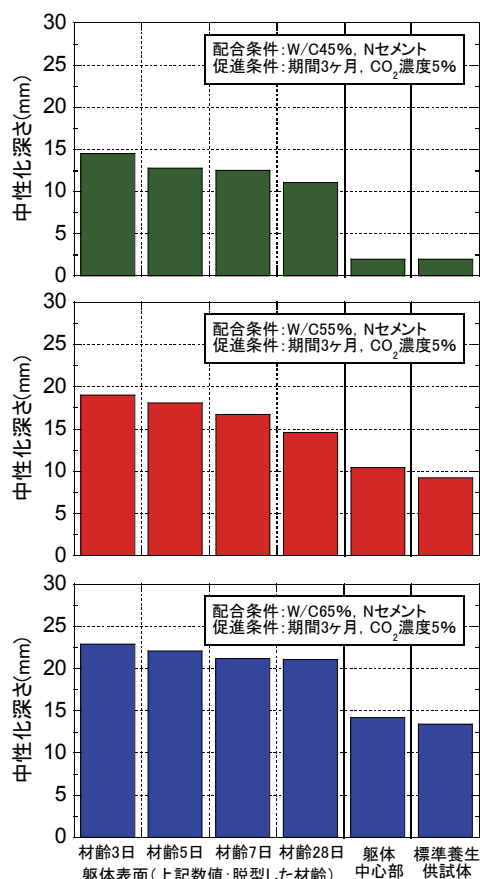


図-10 せき板の存置期間と中性化深さ

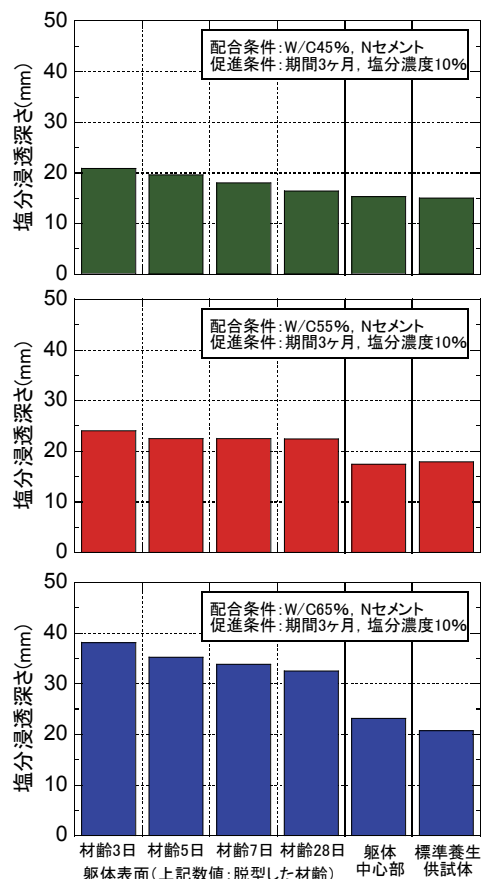


図-11 せき板の存置期間と塩分浸透深さ

リバウンドハンマーによる推定圧縮強度は、打上がり面に養生マットを設置した場合との顕著な違いは認められない。一方で、透気係数や表面吸水速度は湛水することにより大幅に改善する結果が得られた。

このことは、打上がり面を湛水させることで、せき板の設置された側面にも水が供給され、側面の表層品質が向上することを示していると考えられる。

3.2 せき板の存置期間と耐久性

表層品質試験の実施後に試験体からコアを採取して、中性化促進試験および塩分浸漬試験を3ヶ月間行い、中性化深さおよび塩分浸透深さを測定した。測定結果を図-10および図-11に示す。なお、図中には試験体の中心部から採取したコア、および試験体の製作に合わせて採取して材齢91日まで標準養生した円柱供試体で同様の促進試験を行った結果を併記している。

中性化深さは、水セメント比が大きく、せき板の存置期間が短いものほど大きくなっている。せき板の存置期間の延長により中性化深さは緩やかに小さくなるものの、材齢28日まで存置させた場合でも、躯体中心部のコアや標準養生した供試体と比べると大きな値となっている。塩分浸透深さも同様であり、せき板の存置期間の延長に伴い値は緩やかに低下するが、躯体中心部のコアや標準養生した供試体と比べると大きな値となっている。

表-5 中性化速度係数の算出結果

W/C (%)	中性化速度係数(mm/√年)						
	躯体表面部*1 (下記数値: せき板の設置期間)				躯体 中心部*1	標準養生 供試体*1	示方書 算定式*2 特性値 α_k
	3日	5日	7日	28日			
45	2.2	2.0	2.0	1.7	0.6	0.6	0.5
55	3.0	2.8	2.6	2.2	1.6	1.5	1.4
65	3.6	3.4	3.3	3.3	2.3	2.1	2.3

*1 促進中性化試験で得られた中性化深さを文献³⁾に準じて換算した値

*2 コンクリート標準示方書【設計編】の算定式から算出した特性値

中性化促進試験結果から文献³⁾に準じて実環境における中性化速度係数に換算した結果を表-5に示す。なお、表には下記の式(1)に示す2012年制定コンクリート標準示方書【設計編】に示される算定式によって求めた中性化速度係数の特性値 α_k を併記した。

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \cdot W/B \quad (1)$$

ここに、 W/B : 水結合材比 (今回は水セメント比)

いずれの水セメント比においても、躯体中心部および標準養生供試体における中性化速度係数は、示方書の算定式より求めた特性値とほぼ等しい値であるのに対し、躯体表層部の中性化速度係数は大きな値となっている。なお、文献⁴⁾によれば、せき板の存置期間が短いほど表層部の細孔量が増加し、中性化速度係数が大きくなることが示されている。

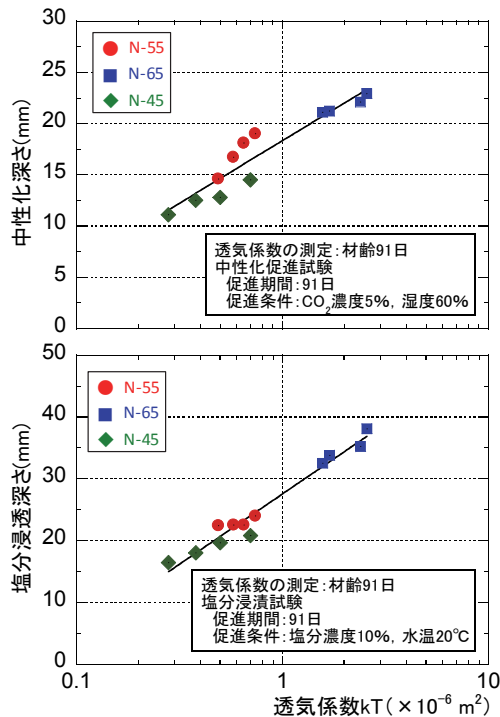


図-12 透気係数と中性化深さ、塩分浸透深さの関係

限られた試験結果の範囲ではあるが、設計段階で想定した耐久性を確保するには、単にせき板を存置した湿潤養生のみでは不十分であり、表層部の品質や耐久性を高めるため、例えば前節で示したように、湛水により水を外部から供給する等の対策を講じることが望ましいと考えられる。

3.3 表層品質と耐久性

前節までに得られた結果を表層品質と耐久性の関係で整理して図-12 および図-13 に示す。

透気係数および表面吸水速度とも、中性化深さおよび塩分浸透深さと相関がある結果が得られた。このことは、これらの表層品質試験を行うことで、コンクリート表層部における外的要因の通りにくさ（水和組織が緻密であること）を評価できることを示していると考えられる。

また、上記の試験結果、および3.2節(3)で示したように、せき板を取り外した時点の圧縮強度と表層品質とも相関がある結果を踏まえると、今回想定したような標準的に行われている養生方法（側面にせき板を設置して、打上がり面に養生マットを敷設する方法）を行う場合、施工段階においてコンクリート表層部が適切な品質および耐久性を確保していることを、せき板を取り外す時点における圧縮強度（現場で類似の条件で養生した供試体を用いて圧縮強度試験を行って得られる圧縮強度）から類推して管理できる可能性があるものと考えられる。

4. まとめ

せき板の存置期間や配合条件を種々に変化させた試験体を製作し、コンクリート表層部の透気係数や表面吸水

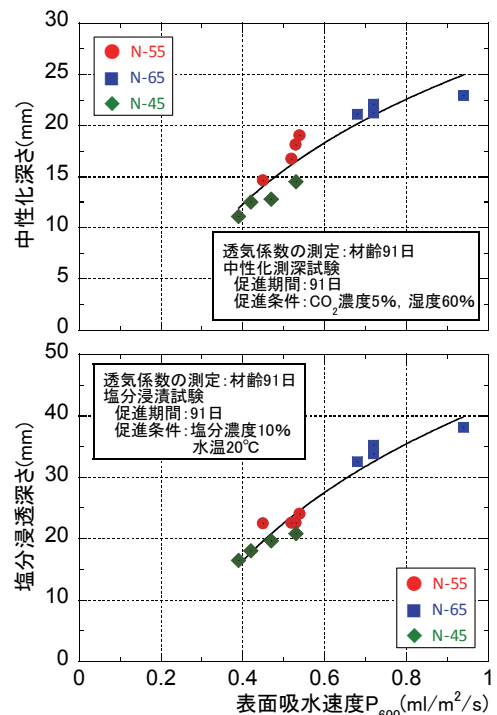


図-13 表面吸水速度と中性化深さ、塩分浸透深さの関係

速度を測定するとともに、コア供試体採取して促進試験を行い中性化や塩分浸透に対する抵抗性を調べた。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 側面にせき板を存置する養生方法を実施した場合、表層部の耐久性は、躯体中心部や標準養生した供試体に比べて劣るものの、せき板の存置期間を延長するほど緩やかに向上する。
- (2) せき板を存置する代わりに非透水・非透湿性のフィルムを貼り付けることでも同様の表層品質の改善効果が得られる。
- (3) 打上がり面を湛水することで、せき板を存置した側面においても表層品質が大幅に向上する。
- (4) 配合条件によらず透気係数や表面吸水速度は、せき板を取り外した時の圧縮強度、ならびに中性化深さや塩分浸透深さと相関がある。

参考文献

- 1) 加藤佳孝・早川健司：表面透気試験を用いた中性化に伴う鋼材腐食の耐久性設計と検査の連携に関する一考察，土木学会論文集 E2，Vol.68，No.4，pp.410-421，2012
- 2) 伊代田岳史他：養生とその後の環境による内部湿度の相違が乾燥収縮に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.425-430，2010
- 3) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，p.87，1991.7
- 4) 日本建築学会：構造体コンクリートの品質に関する研究の動向と問題点，pp.87-92，2008.2