

# 論文 高炉コンクリートの養生相違が乾燥の影響範囲に与える影響

井ノ口 公寛\*1・豊村 恵理\*2・伊代田 岳史\*3

**要旨：**高炉セメントを用いたコンクリートは養生が重要であることは示方書等に明記されている。養生を怠ることで表層部のコンクリートの品質が低下すると考えられるが、水和が停止し粗な空隙構造をとる領域は明確ではない。そこで本研究では養生方法や期間の異なるコンクリートにおいて、内部相対湿度の測定による乾燥の影響範囲を調査すると共に、真空吸水試験ならびに中性化促進試験により表層からの深さ位置と空隙・耐久性の関係を得た。これらの結果を普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較することで高炉セメントを用いる場合の養生の注意点を整理した。

**キーワード：**高炉セメント，養生，乾燥影響範囲，真空吸水試験，耐久性

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物を長寿命化させるためには、十分な耐久性を確保する必要がある。耐久性に及ぼす要因として考えられる項目は配合などの材料要因と施工要因であり、精緻な劣化予測にはこれらの要因を加味した劣化予測式を確立することが必要である。現在、コンクリート標準示方書で提案されている中性化ならびに塩害による鋼材腐食の劣化予測式では、コンクリートは深さ方向に一様であると考慮し、材料特性値としてセメント種類と水セメント比を変数としている。しかしながら中性化や塩害の劣化因子となりうる炭酸ガスや塩化物イオンはコンクリートの表層から浸透・拡散して鉄筋に到達する。このコンクリートの表層部は前述した材料要因のみならず施工要因である養生方法や養生期間、施工条件などに大きく影響をうける。また養生終了後に曝される周囲環境の影響も著しく大きい。しかしながら材料特性値は設計段階において照査可能であることに対し、施工要因は現場による自主管理と環境の影響を受けるため制御することは困難である。このような施工や環境条件によりコンクリート表層部の品質は大きく変動するものと考えられ、それに

付随して劣化因子の浸透状況もコンクリート中で一樣になるとは限らない。さらに混和材が混入されたセメントを用いたコンクリートでは養生の影響を大きく受けることが知られており、その影響は著しく大きいと考えられる。

本研究においては、養生方法や期間の異なるコンクリートを作製し、表層面からの周囲環境の影響を受けた状態での表層と内部の品質の相違を内部湿度分布測定、真空吸水試験、中性化促進試験により調査した。

## 2. 試験概要

### 2.1 試験の流れ

試験は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと高炉セメントを用いたコンクリートの養生方法や期間が異なった条件における水和停止や周囲環境の影響範囲を表層からの深さ位置という観点で整理することを目的とした。そのため、水和に影響を大きく与えると考えられる内部相対湿度分布を深さ位置で測定をすることを第1ステップとした。その後、水和により形成される内部組織構造を顕著に捉えることができると考えられる真空吸水試験により水の吸上げによる緻密度を深さ位置ごとに計測する

\*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*3 芝浦工業大学 工学部土木工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

ことを第2ステップとした。さらに、直接的に耐久性を測定することを目的に反応を伴うガスの浸透を検証すべく、促進中性化試験を実施し養生の影響を評価することを第3ステップとした。その結果を元に高炉セメントを用いた場合の養生の観点からの取扱いの注意点などを議論することを目的とした。

## 2.2 内部相対湿度測定

試験に供したコンクリートは、W/C55%の普通ポルトランドセメント [N] と高炉スラグ微粉末が45%置換された高炉セメント B 種 [BB] を用いたコンクリートとし、表-1 に示す配合で試験を行った。なお、試験体は2体ずつ作製した。内部相対湿度の測定には小型温湿度センサー (Sensirion 社製 SHT75) を用い、センサーがコンクリートに直接接触することを避けるため二重構造の直径 13mm のアクリルパイプをコンクリート打込み時に埋設した。試験体は図-1 に示すように100×100×400mmの角柱試験体を用い、センサーの埋設深さは試験体中央の一律 50mm とし、埋設箇所は試験体端部からそれぞれ 15,20,50,70,100,200mm の位置とした。打込み後、打設面を吸水しないベニヤ板にて封緘し凝結が開始する打込み後3時間からアクリルパイプの内部を空洞にしたうえでセンサーを埋設しゴム栓とゴム製のキャップで密閉して計測を開始した。打込み後18時間で脱型したのち、ただちにアルミ箔テープにて側面4面を封緘し、100×100mmの断面2面だけを解放した状態で温度 20°C、RH40%に管理された試験槽に静置し継続的に材齢56日まで計測を行った。

## 2.3 真空吸水試験による緻密度調査

試験体のセメント種類は、普通ポルトランドセメント [N] と高炉スラグ微粉末が50%置換された高炉セメント B 種 [BB] を用いたコンクリートとし、W/C=45, 60%で試験を実施した。試験に使用した配合を表-2 に示す。養生条件は表-3 に示すように、気中 (20°C, RH60%)、封緘、湿布、大気暴露 (温湿度を制御していない屋外暴露)、養生期間は1, 3, 5, 7日

表-1 内部湿度測定用配合表

	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					フレッシュ		
			W	OPC	BFS	S	G	SL (cm)	Air (%)	
N	55	47	172	313	—	—	855	982	9.5	3.5
BB				172	141	861	976	12	4.9	

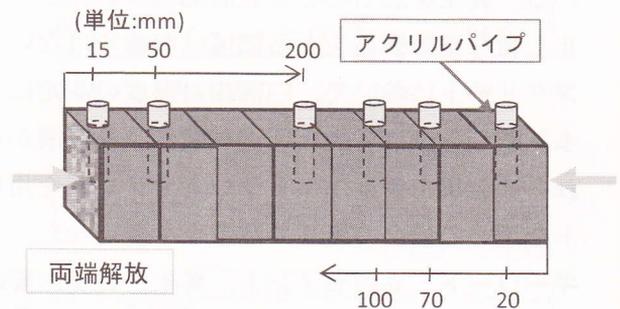


図-1 深さ方向影響度測定試験体

表-2 真空吸水試験用配合表

	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					フレッシュ		
			W	OPC	BFS	S	G	SL (cm)	Air (%)	
N45	45	48	168	373	—	—	822	946	13.0	5.0
BB45		47		187	187	799	957	11.5	4.6	
N60	60	51	168	280	—	—	647	931	11.0	5.3
BB60		50		140	140	942	945	11.5	4.9	

表-3 真空吸水試験の養生条件

養生方法	養生期間(日)			
気中	1			
封緘	1	3	5	7
湿布				7
大気暴露	1			

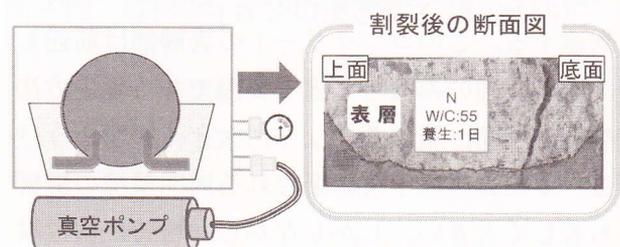


図-2 真空吸水試験概要と試験結果の一例

で行った。また、試験体は構造物からのコア試験体を模擬するため、寸法をφ100×200mmとし、脱型時期を1,3,5,7日後とし、外部環境の影響を受けるように上面と底面を解放させた。脱型後は恒温恒湿槽 (20°C, RH60%) で暴露し、14日経過後に試験を実施した。

試験の前処理として、試験体を試験材齢時に40℃の乾燥炉で5日間乾燥させ、内部水分を逸散させた。試験は試験体側面からの水の浸入を防ぐため、両側面にアルミテープを張った。次に、バットに試験体を3cm浸漬させるように水を張り、デシケーターに設置した。その後、デシケーター内を真空ポンプで3時間吸引した後、試験体を割裂し、水の吸い上げられた領域と試験前後の重量変化を確認した。

本研究では、全断面積に対する吸水面積割合を画像解析で算出し、真空吸水面積率と定義した。また、1cmごとで真空吸水面積率を算出し、深さ方向の影響を確認した。真空吸水試験概要と割裂後の試験体断面の一例を図-2に示す。

### 2.4 促進中性化試験による耐久性試験

試験体の配合は表-4に示すように2.3同様、セメント種類を普通ポルトランドセメント[N]、置換率50%とした高炉セメントB種[BB]の2種類とし、水セメント比30、45、60%に変動させた試験体(100×100×400mm)を作製した。養生条件は表-5に示すように封緘、気中、水中、養生期間は1、3、5、7、28日で行った。供試体は翌日に脱型し、打設面と底面を含む4側面をシールした。養生条件として、上面を封緘養生、下面を気中養生した試験体と両面を水中養生した試験体を用意し、所定の期間養生を行った後、試験に供した。

試験はJIS A 1153:2003に基づき、温度20℃、湿度60%、CO<sub>2</sub>濃度5.0%とした。試験体は所定の劣化促進期間(1、2、3、4、6、8、10、15週)において40mm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た。中性化深さの測定は一側面5点の平均値で算出した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 内部湿度測定試験結果

図-3は測定材齢ごとの深さ方向と内部湿度の関係を示す。NならびにBBで示したものである。これよりN、BBともに表層から近い距離においては相対湿度が早い経過日数時点で大きく低

表-4 促進中性化試験用配合表

	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					フレッシュ	
			W	OPC	BFS	S	G	SL (cm)	Air (%)
N30	30	47	172	573	752	867	22	5.3	
BB30		46		287	727	872	24	5	
N45	45	50		382	881	900	13	4.5	
BB45		49		191	856	911	10.5	4.5	
N60	60	51		287	939	923	10.5	3.6	
BB60		50		143	916	936	14	4.8	

表-5 促進中性化試験の養生条件

養生方法	養生期間(日)				
気中	1	3	5	7	28
封緘	1	3	5	7	28
水中				7	28

下していることが分かる。一方で深い位置では測定開始から緩やかに減少するものの急激な湿度低下は認められない。よって、Nにおいては表層部分で湿度が著しく低下しているのに対し、深さ50mmでその影響は小さくなり、100mm以深ではほとんど認められない。またBBにおいては表層から75mm程度までは乾燥の影響が大きく、それ以深でも材齢とともに相対湿度が緩やかに低下している様子が認められる。このことから深さ方向への周囲環境の影響はNと比較してBBが大きいといえる。

### 3.2 真空吸水試験結果

#### (1) 材料要因(W/Cとセメント種類)の影響

図-4に各セメントを用いた封緘養生1日で恒温室に暴露したW/C45%ならびに60%の試験結果を示す。なお、打設面から深さ60mmまでの結果を示した。いずれのセメントにおいても、W/Cが大きくなるほど真空吸水面積率が大きくなっていることがわかる。また、表層に近い領域ほど真空吸水面積率が大きくなっている傾向を示していた。さらに、セメント種類で比較すると、硬化が早いNでは全体的に小さな真空吸水面積率であるのに対し、硬化が遅延するBBでは大きな真空吸水面積率となっていることがわかる。

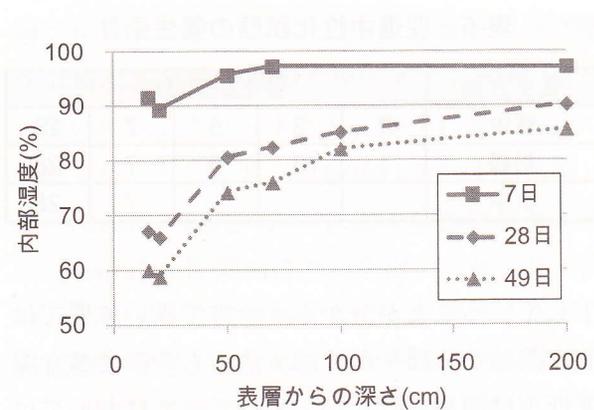
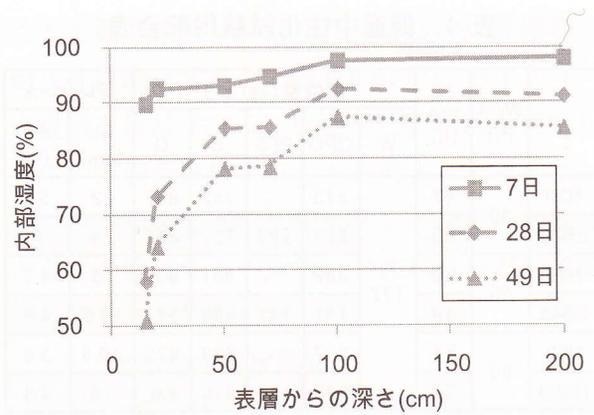


図-3 深さ方向と内部湿度の関係

(上 : N 使用, 下 : BB 使用コンクリート)

## (2) 養生方法の影響

図-5 に W/C45% で封緘養生 1 日後に各種養生条件を施した N の材齢 28 日での試験結果を示す。湿布養生や封緘養生では水分の逸散が考えられないため、打設面位置における真空吸水面積率も小さく抑えられている。なお、両者においても内部と比較して打設面に向かって真空吸水面積率が大きくなっている理由としてブリーディング等による局所的な材料分離が考えられる。一方、気中ならびに大気暴露では表層面からの水分逸散により真空吸水面積率が著しく大きくなっていることがわかる。ただし、気中と比較して大気暴露では雨水や湿度変化により 2.5cm 位置以降での真空吸水面積率が気中と比較して小さくなっていることが認められる。

## (3) 養生期間の影響

図-6 は W/C45% の各種コンクリートにおける脱型時期を変化させた試験体の結果を示す。内部のコンクリートにおいては、若干のばらつき

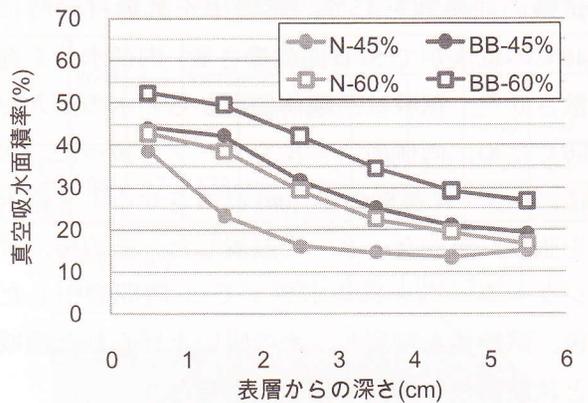


図-4 材料要因 (W/C とセメント種類) の影響

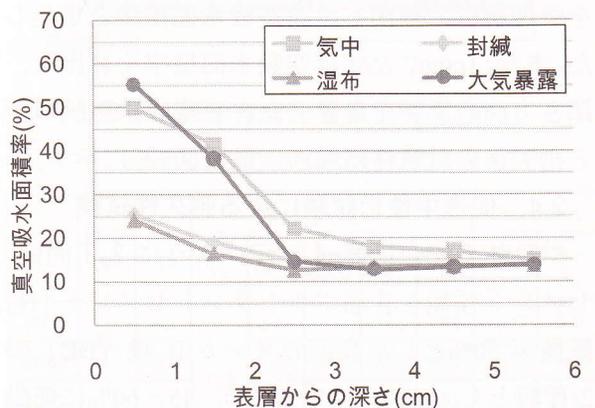


図-5 養生条件の影響 (N, W/C=45%)

はあるものの、セメント種類ごとにある程度同等の吸水面積率を示しており、材料特性値である W/C ならびにセメント種類により物質移動抵抗性が決定されることが想定される。一方、いずれのセメントにおいても表層では真空吸水面積率が大きくなっており、その影響範囲はセメント種類により異なり、N では 2.5cm 程度、BB では養生 1 日では 4.5cm 程度だが、養生 3 日以降は N と同等であった。養生期間を長く設定することで表層の真空吸水面積率は小さくなっており、表層コンクリートにおける養生の重要性が明らかとなった。

## 3.3 促進中性化試験

### (1) 材料要因の影響

各セメントにおける水セメント比と中性化深さの関係を図-7 に示す。セメント種類によらず水セメント比の増加に伴い中性化深さは増加する傾向を示した。BB (破線) は N (実線) に比べ傾きが大きく、また水セメント比の増加につ

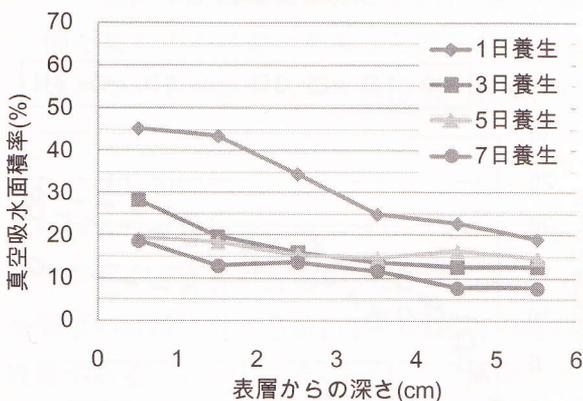
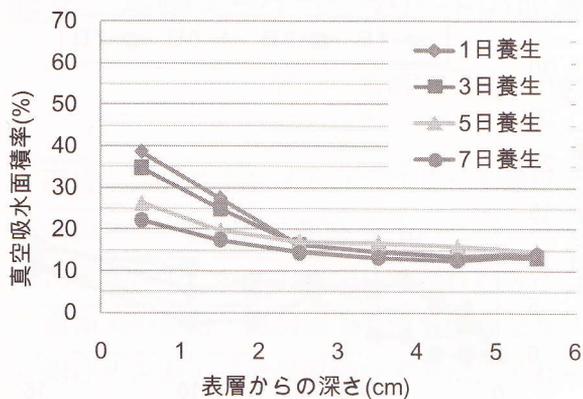


図-6 養生期間の影響

(上 : N 使用, 下 : BB 使用コンクリート)

れ, その傾きも増加することを確認した。

### (2) 養生方法の影響

各セメントにおける水セメント比45%の封緘養生7日と中性化深さの関係を図-8 に示す。中性化深さは封緘, 水中養生に比べ, 気中養生は顕著に大きくなった。しかしながら, 4週目以降の傾き(中性化速度係数)はセメント種類ごとに養生方法によらずほぼ同等であった。これは, コンクリートの表層部分において養生の影響による水和反応の進行度合いが異なり, 養生に良否によってその領域も異なる。また, 養生不足によって水和反応の進行していない領域において二酸化炭素進行程度も大きいことから,

気中養生では中性化深さが大きくなったと考えられる。これより, 養生方法ごとに中性化深さは異なるが, ある深さ以降の中性化進行挙動は水セメント比に依存すると考えられる。

### (3) 養生期間の影響

N と BB の水セメント比 45%の封緘養生にお

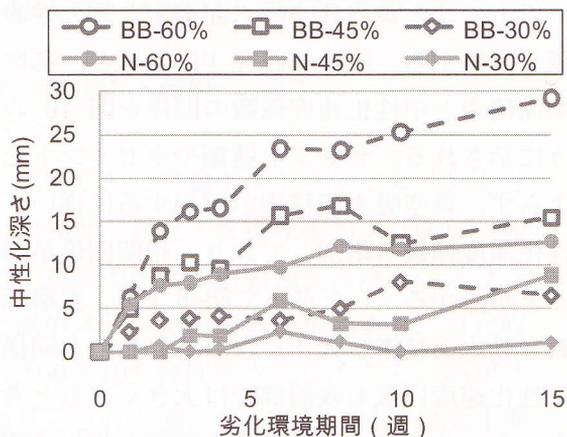


図-7 材料要因 (W/C とセメント種類) の影響

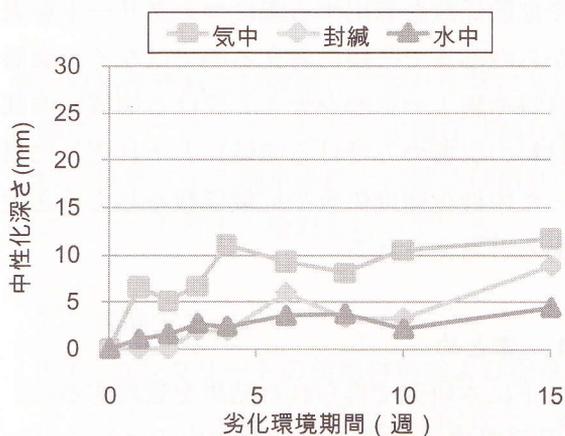


図-8 養生条件の影響

(上 : N 使用, 下 : BB 使用コンクリート)

ける養生期間と中性化深さの関係を図-9 に示す。いずれのセメントにおいても, 中性化深さは養生期間の増加に伴い減少する傾向を示した。これは養生期間の相違により養生不足の領域が変動したため中性化深さが異なったとめと考えられる。

以上のことから真空吸水面積率と耐久性の関係性を考察する。既往の研究<sup>1)</sup>によると、真空吸水面積率と中性化速度係数の関係を図-10のように示される。セメント種類や水セメント比によらず、真空吸水面積率が増加するに従い、中性化速度係数も増加しており、相関関係があることが分かる。したがって図-6より、表層部で真空吸水面積率が大きくなっていると同様に、中性化速度係数も表層部では大きくなると考えられる。そこで、現在よりも精緻な劣化予測をする場合、現在の示方書のように中性化速度係数や拡散係数を算出する際にコンクリートを表層から内部まで一様に考えるのではなく、表層(材料や施工の影響を大きく受ける領域)、内部(材料の影響のみ受ける領域)とそれぞれに異なった中性化速度係数や拡散係数を与える必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

以下に本研究で得られた結果を整理する。

- (1) 周囲環境が表層から深さ方向のコンクリート内部湿度に影響を与える領域は N では 50mm 程度、BB では 75mm 程度まで影響を受けていた。
- (2) 養生期間が深さ方向の真空吸水面積率に与える影響は、N では 25mm 程度であったのに対し、BB は養生 1 日では 35mm まで影響し、その後は 25mm となることから、BB では N よりも養生の影響を大きく受けていることが確認できた。
- (3) 中性化促進試験から、セメント種類によらず、養生方法ごとに中性化深さは異なっていた。また、BB は N よりも水セメント比の影響を大きく受けていた。

#### 参考文献

- 1) 檀康弘, 伊代田岳史, 大塚勇介, 佐川康貴, 濱田秀則 : 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

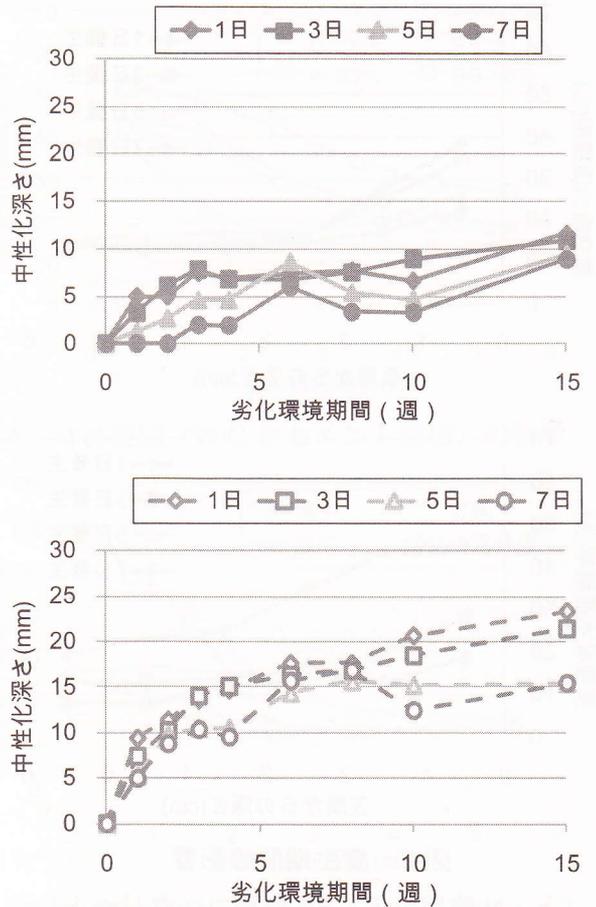


図-9 養生期間の影響

(上 : N 使用, 下 : BB 使用コンクリート)

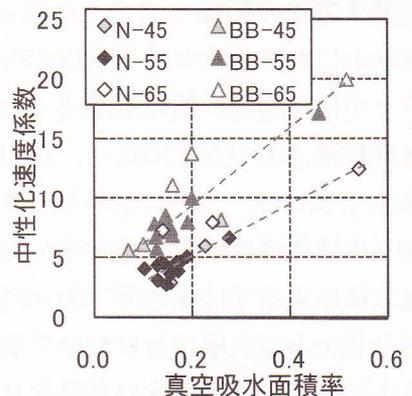


図-10 吸水面積率と中性化速度係数の関係<sup>1)</sup>

- 2) 松崎晋一朗, 鈴木肇, 伊代田岳史 : 養生期間がコンクリート表層から深さ方向への吸水性に与える影響, 第 64 回土木学会年次学術講演会, V-580, 2010
- 3) 井ノ口公寛, 歌川紀之, 伊代田岳史 : コンクリートの表層と内部の湿度の相違が乾燥収縮と耐久性に与える影響, コンクリート工学年次論文集 Vol.33, No.1, pp.563-568, 2011