

論文 中性化した実構造物コンクリートの水分浸透性状と空隙構造に関する研究

後藤悠希*1・BOUADOU Nda Yacoub*2・吉田亮*3・岸利治*4

要旨: 本研究では、実構造物から採取したコンクリートを用い、コンクリートの水分浸透性状、透水性状ならびに空隙構造を把握することで、実環境で中性化することによる水分浸透性状および空隙構造への影響について検討を行った。フェノールフタレイン溶液で確認した中性化領域を含む外部試料では、未中性化の内部試料よりも、水分浸透深さ、そして透水係数は小さくなっていった。また、空隙構造分析においても、中性化している外部試料において、1000nm以上の空隙量が減少しており、なかでも連続性の高い空隙が減少していることが確認された。

キーワード: 実構造物, 中性化, 水分浸透, 空隙構造

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書では、中性化に偏重していた耐久性照査が、水分浸透による鉄筋腐食も考慮する体系へと改訂がなされたように、水分浸透を抑制することが重要であると認識が改められている。土木学会で定められた水分浸透予測式などは、実験室で作製された表層と内部で均質な試験体における実験結果を基に構築されたものである。そのため、実構造物の表層から内部に空隙構造が変化するコンクリートの水分浸透予測には適応できないと考えられる。実構造物では、施工や養生による影響、日射や風雨など気象作用、中性化の作用などの影響を受けてきたため、コンクリートの表層から内部に空隙構造が変化している。実構造物のコンクリート耐久性予測の精度を向上させるためには、表層から内部に変化する空隙構造プロファイルの取得と水分浸透への影響を明らかにする必要がある。

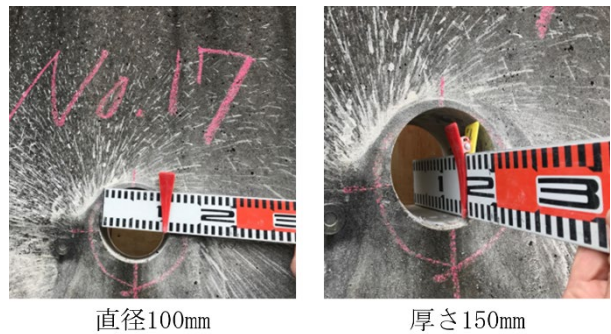
本研究では、実構造物から採取したコンクリートを用い、コンクリートの水分浸透性状、透水性状ならびに空隙構造を把握することで、実環境における中性化による水分浸透性状および空隙構造への影響について検討を行った。

2. 実験概要

本研究では、実構造物から採取したコンクリートコアを用い、以下に示す各種水分浸透試験と空隙構造の分析を行った。

2.1 構造物概要

本研究で対象とした構造物は、愛知県小牧市に位置する鉄道高架橋である。高架部は1981年から1985年に建設され、コア採取時の材齢は38年程度となっている。小



写真—1 コア採取後の壁高欄

牧市から近い名古屋市の年間平均降雨量は1574mmであり、気温は平均16.0℃である。また、対象構造物には凍結防止剤や海からの塩分の飛来の影響はない。

建設時に参考とされていた設計基準強度は24N/mm²であり、耐久性から定められる最大水セメント比は55%である。

コアは厚さ150mmの壁高欄よりφ100mm×150mmの円柱で採取した。コアの採取には水冷式ダイヤモンドコアドリルを用い、採取本数は24本、採取位置は高さ1610mm、端部から1630mm、間隔は4000mmである。コア採取後の実構造物を写真—1に示す。

2.2 試験方法

壁高欄から採取したコアは、両端面に中性化領域をもつ。図—1にコアの中性化領域と各種試験で使用した試料の位置関係を示す。また、表—1に各種試験で使用したコア番号を示す。

(1) 配合推定

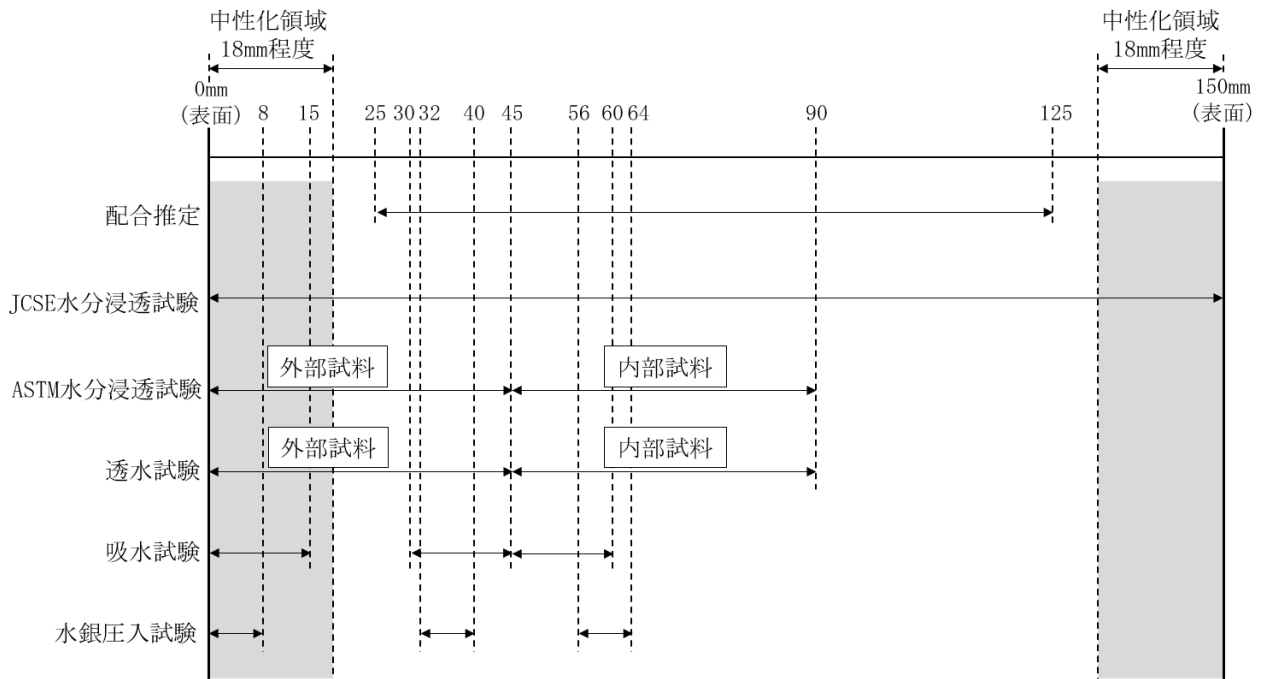
配合推定は、セメント協会「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」¹⁾を基に実施した。また、

*1 名古屋工業大学 社会開発工学科 (学生会員)

*2 名古屋工業大学大学院 環境都市分野 学士(工学) (学生会員)

*3 名古屋工業大学大学院 環境都市分野准教授 博士(工学) (正会員)

*4 東京大学 生産技術研究所教授 博士(工学) (正会員)



図—1 コアの中性化領域と各種試験で使した試料の位置関係

表—1 各種試験で使したコア番号

配合推定	C15	
中性化深さ	C2, C4, C6, C8	
JSCE 水分浸透試験	C1, C7, C16, C22, C23	
ASTM 水分浸透試験	C3, C5, C9, C11, C14, C17, C21	
透水試験	外部	C3, C5, C11, C21
	内部	C1, C5, C11, C21
吸水試験	C10	
水銀圧入試験	C22	

中性化による影響を排除するために、コアの両端 25 mm を切除している。

(2) 中性化深さ

中性化深さは、日本産業規格「コンクリートの中性化深さの測定方法」²⁾を基に計測した。採取したコアを割裂引張試験機によって割裂させ、直後にエアコンプレッサーで割裂面を掃除したのち、フェノールフタレイン溶液を噴霧した。フェノールフタレイン溶液を噴霧してから数分経過しても変色しなかった領域を1つのコアでそれぞれ5か所ずつ測定し、平均値を算出した。

(3) JSCE 水分浸透試験

土木学会「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法(案)」³⁾に準拠して試験を行った。本試験では、採取したφ100mm×150mmのコンクリートコアを用いて試験を行った。

浸漬 48 時間後に割裂引張試験機を用いてコアを割裂させ、割裂面に水漏れ検査薬を噴霧し、水分浸透高さをそれぞれのコアで5か所ずつ測定した。

(4) ASTM 水分浸透試験

ASTM C1585⁴⁾に準拠して水分浸透試験を行った。本試験では、採取したφ100mm×150mmのコンクリートコアを長さ45±3mmとなるようにダイヤモンドカッターでカットし、中性化による水分浸透性の影響を調べるために中性化領域を含む外部試料と未中性化の内部試料の2種類に分けて、それぞれ試験を行った。また、吸水面は図—1において、外部試料は0mmの面、内部試料は45mmの面とした。

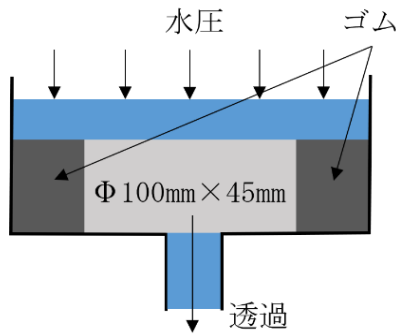
浸漬後、1分後、5分後、10分後、20分後、30分後、60分後に質量の変化を測定した。

(5) 透水試験

ASTM 水分浸透試験と同様に、採取したφ100mm×150mmのコンクリートコアを長さ45±3mmとなるようにダイヤモンドカッターでカットし、中性化による透水性の影響を調べるために中性化領域を含む外部試料と未中性化の内部試料の2種類に分けて、それぞれ試験を行った。試験前に試料側面からの水分浸透を防ぐために側面にエポキシ樹脂を塗布し、20℃±2℃の室温下で24時間水酸化カルシウム溶液にて試料を真空吸水させ、前処理とした。

透水試験は、丸東製作所製：透水透気試験装置(CH-155)を用いて実施した。本試験機は図—2に示すようにゴムの弾性を利用して試料側面をシールし、試料断面に所定の水圧を作用させ、試料内部を通過した流量から式(1)を用いて透水係数を算出した。試験水圧は2.0MPaとし、試料内部を通過した流量を24時間測定した。また、透水には温度20±2℃の部屋で24時間以上汲み置き、温度を安定させた水道水を使用した。

$$K_w = \frac{ly_w}{P_1 - P_2} \times \frac{Q}{A} \quad (1)$$



図—2 透水試験概要

ここに、 k_w ：透水係数[mm/s]

l ：試料の高さ[mm]

γ_w ：水の単位体積重量[N/mm³]

P_1 ：試験水圧[N/mm²]

P_2 ：大気圧[N/mm²]

Q ：単位時間流量[mm³/s]

A ：試料の断面積[mm²]

(6) 吸水試験

φ100mm×150mm のコンクリートコアを表面から厚さ15mm ごとにダイヤモンドカッターでカットし、それぞれカットした試料を砕いた。さらに、砕いた試料から粗骨材を取り除いて大きさ8mm 程度のモルタル小片試料を作製した。モルタル小片試料は、作製直後にイソプロパノールに7日間試料を浸漬させ、その後、7日間真空乾燥を行い、乾燥質量を測定した。

以上の過程が終了した後、試験を行った。吸水試験は試料を水に浸漬させ、浸漬後、1分後、5分後、10分後、20分後、30分後に質量の変化を測定した。さらに浸漬24時間後にアルキメデスの原理を用いて、試料の体積を測定し、以下の式(2)から浸漬後それぞれの時間での試料の吸水率を算出した。

$$w_a = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (2)$$

ここに、 w_a ：吸水率[g/mm³]

m_1 ：吸水後の質量[g]

m_2 ：吸水前の乾燥質量[g]

V ：体積[mm³]

(7) 水銀圧入試験

吸水試験と同様にφ100mm×150mm のコンクリートコアを表面から厚さ8mm ごとにダイヤモンドカッターでカットし、カットした試料を砕き、粗骨材を取り除いて大きさ8mm 程度のモルタル小片試料を作製した。同様にモルタル小片試料はイソプロパノールに7日間の浸漬と、7日間の真空乾燥を行い前処理とした。

水銀圧入試験は、AntonPaar 製：水銀圧入孔径分析装置 (PoreMaster) を用いて実施した。測定は、圧入と再圧入をそれぞれ行い、全空隙量と連続空隙量について計測を行った⁵⁾。

表—2 コア分析結果

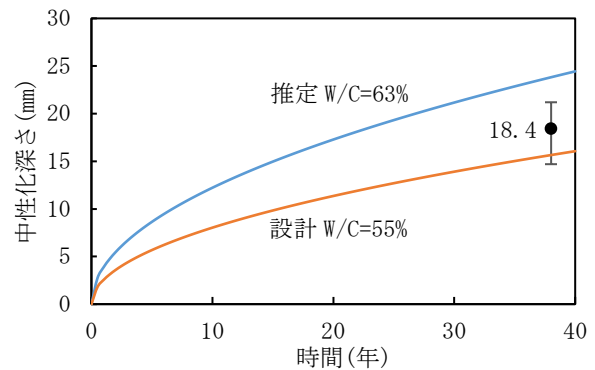
強熱減量[%] (600℃)	強熱減量[%] (1000℃)	骨材の不溶 残分[%]	骨材の CaO[%]
3.9	4.7	79.7	8.0

表—3 配合推定結果

単位容 積質量 [kg/m ³]	材料単位量[kg/m ³]			水セメ ント比 [%]
	セメント量	水量	骨材量	
2322	264	167	1891	63

表—4 中性化深さ測定結果

コア番号	中性化深さ[mm]			
	C2	C4	C6	C8
平均値	14.7	21.2	20.1	17.6
全平均	18.4			



図—3 中性化深さの予測値と実測値の比較

3. 実験結果および考察

3.1 配合推定

コア分析結果を表—2、配合推定結果を表—3に示す。設計水セメント比が55%であったことから、その値よりも配合推定の水セメント比は大きい結果となった。配合推定の水セメント比が設計値よりも大きくなった要因にコア採取時に発生した微小なひび割れや巻き込み空隙により、単位水量が実際よりも多く推定され、水セメント比が大きくなったことが考えられる。また、施工を要因とする差異ではないと考えられる。

3.2 中性化深さ

中性化深さ測定結果を表—4に示す。また、図—3に中性化深さの予測値と実測値の比較を示す。予測値は以下の土木学会標準示方書の式(3)に、水セメント比の設計値(55%)と配合推定より求めた値(63%)を用いた。

$$\gamma_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t} \quad (3)$$

ここに、 γ_d ：中性化深さの設計値[mm]

γ_{cb} ：中性化深さの設計値のばらつき安全係数

α_d : 中性化速度係数の設計値 [mm/ $\sqrt{\text{年}}$]
 $= \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$
 α_k : 中性化速度係数の特性値 [mm/ $\sqrt{\text{年}}$]
 β_e : 環境作用の程度を示す係数
 γ_c : コンクリートの材料係数
 t : 中性化期間 [年]

実構造物の4本のコアにおいて計測された中性化深さは、最小値が14.7mm、最大値が21.2mmであり、その平均値は18.4mmであった。実測値は、設計水セメント比を用いた予測値よりやや大きく、配合推定より求めた予測値よりも小さいことがわかった。

3.3 JSCE 水分浸透試験

表—5に水分浸透深さ測定結果、図—4に水分浸透深さの予測値と実測値の比較を示す。予測値は以下の土木学会標準示方書の式(4)に、水セメント比の設計値(55%)と配合推定より求めた値(63%)を用いた。

$$x_d = \gamma_c \cdot q_k \sqrt{t} \quad (4)$$

ここに、 x_d : コンクリートの水分浸透深さの設計値 [mm]
 γ_c : コンクリートの材料係数
 q_k : 水分浸透速度係数の特性値 [mm/ $\sqrt{\text{h}}$]
 $= 31.25 \cdot (W/B)^2$
 W/B : 水結合比
 t : 時間 [h]

実構造物の5本のコアにおいて計測された水分浸透深さは、最小値が29.3mm、最大値が43.6mmであり、その平均値は35.0mmであった。実測値は、設計水セメント比の予測値よりも小さいことがわかった。

上記の差異は、実環境で中性化の影響を受けたことによると考えられる。以下の検討では図—1に示すように、フェノールフタレイン溶液で確認した中性化領域を含む外部試料と、未中性化の内部試料に分けて、水分浸透性状と空隙構造について検討する。

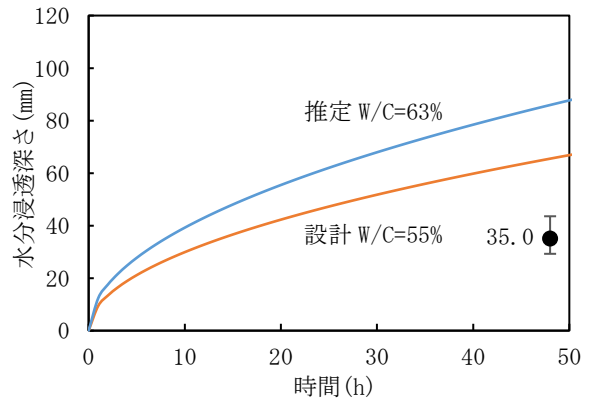
3.4 ASTM 水分浸透試験

図—5、6にASTM水分浸透量の試験結果を示す。図中には、外部試料、内部試料の水分浸透量の最大値、最小値と中央値を示した。それぞれ水分浸透量の最大値、最小値について見てみると、内外試料での大きな差異はない。本研究では、試験前の試料の乾燥条件はASTMに定められた通りに行っており、試料の質量変化は0.01%wt以下になっていることを確かめている。そのため、最大値と最小値の幅は、コア採取位置のコンクリートの違いを示していると考えている。具体的には、構造物コンクリートにおける粗骨材の分布などを要因とすると考えている。

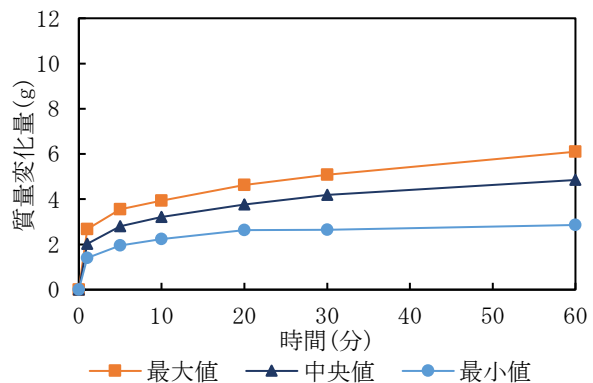
また、図—7に水分浸透量の平均値を示し、外部試料と内部試料の比較を行った。浸透開始より5分間は、内外試料の浸透量に大きな差異は見られなかった。この内外試料の浸透量の差は、5分以降より徐々に増えてい

表—5 水分浸透深さ測定結果

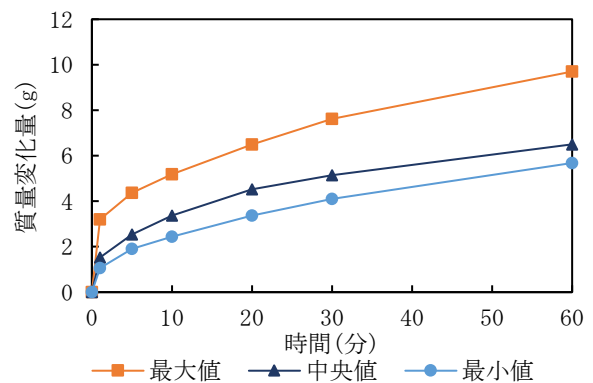
水分浸透深さ [mm]					
コア番号	C1	C7	C16	C22	C23
平均値	31.7	34.0	36.6	43.6	29.3
全平均	35.0				



図—4 水分浸透深さの予測値と実測値の比較



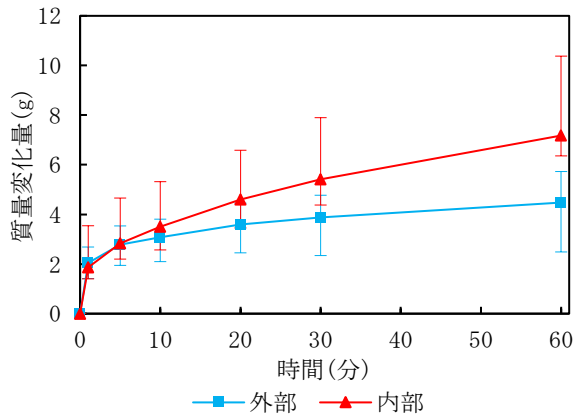
図—5 ASTM 水分浸透量 (外部試料)



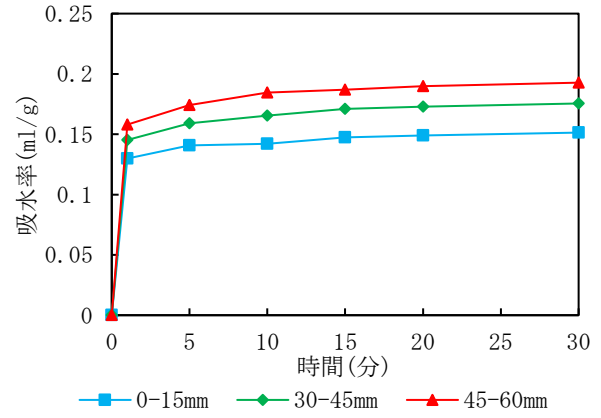
図—6 ASTM 水分浸透量 (内部試料)

くことが確認された。浸透開始より60分間では、内部試料は外部試料よりも1.7倍程度大きい浸透量が確認された。

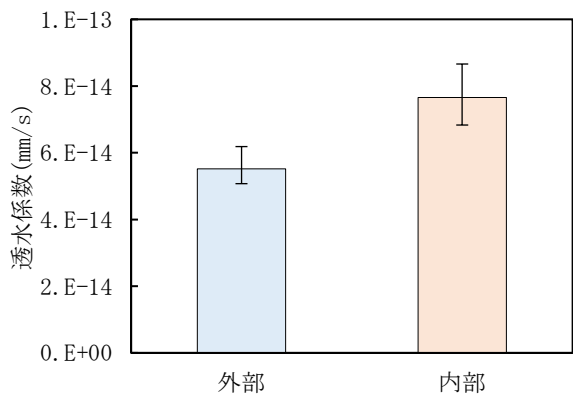
上記の結果からは、外部試料では中性化したことにより、組織が緻密となり、浸透量が小さくなったことが示唆される。



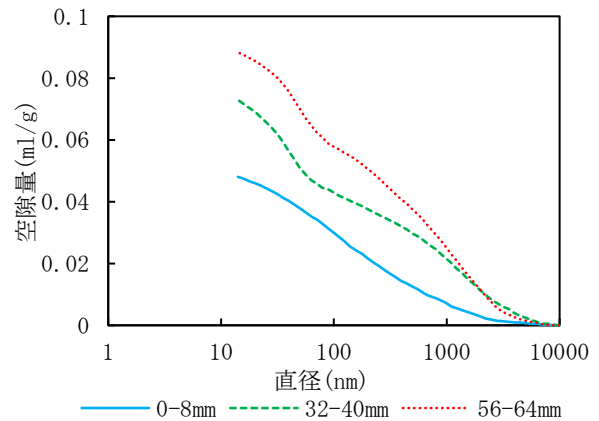
図—7 ASTM 水分浸透量比較



図—9 吸水試験結果



図—8 透水試験結果



図—10 全空隙の比較

3.5 透水試験

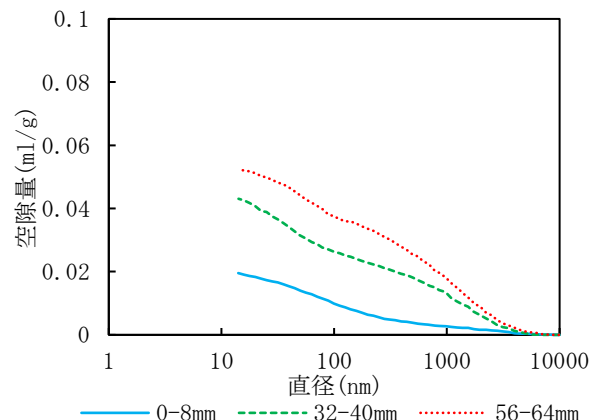
図—8に外部試料と内部試料の透水係数を示す。それぞれの透水係数を見ると、前述した浸透試験の結果と同様に、外部試料の方がわずかに最大最小値の幅が小さくなっている。また、透水係数の平均値を比較すると、外部試料では 5.5×10^{-14} mm/s、内部試料では 7.7×10^{-14} mm/sであり、ASTM 水分浸透試験と同様に、外部試料の方が小さいことが確認された。

外部・内部試料における透水係数の比較においても、中性化することで外部試料の方が透水しにくくなっていることから、中性化による組織の緻密化が示唆される。

3.6 吸水試験（30分までの曲線）

図—9に各深さにおけるモルタル小片試料の吸水試験結果を示す。モルタル試料はコア表面から内部方向へ計測して、0-15mm、30-45mm、45-60mmの位置から採取している。コアの中性化深さは平均で18mm程度であり、0-15mmから採取した試料も中性化していることを、フェノールフタレイン溶液の噴霧により確認している。

小片試料の吸水曲線を見ると、吸水開始より1分で30分までの吸水量のおよそ83%まで吸水していることが確認できる。また、小片試料における吸水曲線は、前述したASTM水分浸透試験の吸水曲線よりも短時間で、緩やかな勾配となっている。



図—11 連続空隙の比較

各深さにおける吸水曲線を比較すると、吸水開始より1分では、45-60mmを基準とすると、0-15mmでおよそ82%、30-45mmでおよそ91%となっており、また吸水開始より30分では0-15mmでおよそ86%、30-45mmでおよそ91%となっている。

上記のように、小片試料の吸水試験においても中性化した外部試料は内部試料よりも吸水しにくくなっており、中性化により組織が緻密化していることが示唆される。

3.7 水銀圧入試験

図—10、11に各深さにおけるモルタル小片試料の

水銀圧入試験による累積空隙量曲線(全空隙と連続空隙)を示す。モルタル試料はコア表面から内部方向へ計測して、0-8mm, 32-40 mm, 56-64mmの位置から採取している。全空隙とは一般的な水銀圧入法で得られる空隙量であり、連続空隙とは水銀の再圧入が可能な空隙量のことである。同図において、各深さにおける累積空隙量曲線を比較すると、全空隙および連続空隙において、コア表面に近いほど緻密であり、内部ほど粗大になっていることがわかる。

空隙を10-100nm, 100-1000nm, 1000nm以上に分類し、促進中性化による空隙構造の変化に関する既往研究との比較を行う。水セメント比60%のセメントペースト⁶⁾では10-100nm, 100-1000nmで減少, 1000nm以上で増加している。また、水セメント比55%のモルタル⁷⁾では、10-100nmで減少, 100-1000nmで増加, 1000nm以上は減少している。水セメント比65%のモルタル⁷⁾では10-100nm, 100-1000nmで増加, 1000nm以上で減少している。セメントペーストとモルタルにおける1000nm以上における空隙量の変化は、セメントペーストでは増加, モルタルでは減少と逆の傾向を示しており、骨材の有無により中性化による空隙変化の傾向が異なることが示唆される。

しかし、水セメント比55%以上のコンクリート⁸⁾では、10-100nmで減少, 100nm以上で増加することも示されている。また、本研究の実環境で中性化したコンクリートの空隙構造の変化では以下に示すように、中性化することで全範囲の空隙量が減少となっており、既往研究と傾向が異なっている。

図-10に示す全空隙では、56-64mmを基準とすると、0-8mmの10-100nmで37%, 100-1000nmで34%, 1000nm以上で73%の減少となった。また、図-11に示した連続空隙では、全空隙と同様に比較を行うと、10-100nmで33%, 100-1000nmで68%, 1000nm以上で83%の減少となった。

水銀圧入試験で測定される1000nm以上の空隙には細骨材周りの遷移帯などが考えられるが、水酸化カルシウムが豊富である遷移帯が中性化によって緻密化されたこと考えられる。また、連続空隙においては、1000-1000nmの空隙も7割近い減少率となっており、毛管空隙のなかでも連続性の高い空隙が緻密化することにより、前述の各種水分浸透抵抗性を付与していたことが想像される。

4. まとめ

本研究では、実構造物から採取したコンクリートを用い、コンクリートの水分浸透性状、透水性状ならびに空隙構造を把握することで、実環境における中性化による水分浸透性状および空隙構造への影響について検討を行った。

実構造物コンクリートで測定された水分浸透深さと土木学会の水分浸透予測式で得た予測値には大きな差があることを確認した。これは、予測式が実験室で作製された組織が均一な試験体を基に構築されているのに対し、実構造物コンクリートでは、表層から内部へと組織が変化することに起因している。

今回使用した設計水セメント比55%の実構造物コンクリートでは、中性化した外部試料では未中性化の内部試料よりも、水分浸透深さ、および透水係数も小さくなっていった。また、空隙構造分析においても、中性化部において、1000nm以上の空隙量が減少していることが確認された。実環境において中性化した空隙構造の変化は、促進環境で実施された既往研究と異なる傾向が示された。

謝辞

本研究は、愛知県より現場のご提供と、尾張建設事務所道路整備課の皆様のご協力を賜りました。また、名古屋工業大学大学院のMacharia Peter Kuira氏(現、清水建設)、Lai Lai Mon氏の協力を得て、実験を実施いたしました。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会：コンクリート専門委員会報告F-18, 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告, 1967
- 2) 日本産業規格：コンクリートの中性化深さの測定方法 (JISA1152:2018)
- 3) 土木学会：短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法(案) (JSCE-G582-2018)
- 4) Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic - Cement Concretes Designation:C1585 - 04
- 5) 吉田亮, 岸利治, 水銀圧入過程における内部空気泡の関与と水銀圧入の有効圧力範囲に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol. 60, pp. 68-75, 2006
- 6) 上原丈児, 李春鶴, 半井健一郎, 石井祐輔, 若材齢時から炭酸化したセメント硬化体の細孔構造および酸素拡散係数に及ぼすCO₂濃度の影響, セメント・コンクリート論文集, No. 64, pp. 111-118, 2010
- 7) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長滝重義, 中性化によるコンクリートの微細組織の変化, 土木学会論文集, 420号, pp. 33-42, 1990. 8
- 8) 鄭載東, 平井和喜, 三橋博三, 中性化速度に及ぼすコンクリートの調合及び細孔構造の影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, vol. 1, No. 1, pp. 61-73, 1990. 1