

# 論文 長期間供用された構造物より採取したコンクリートの短期的な水分浸透性に関する研究

前原 聡\*1・鈴木 将充\*2・早川 健司\*3

**要旨:** 近年, 中性化による鉄筋腐食では, 中性化の進行程度のみならず, コンクリートの短期的な水分の浸透性に着目した研究がなされている。本研究では, 長期間供用された実構造物のコンクリートにおける短期的な水分浸透性に関する知見を得ることを目的として, 実構造物より採取したコア供試体の水分浸透速度係数および空隙率を求めた。その結果, 中性化することで空隙率が変化し, 空隙率が大きいと水分浸透深さが大きくなることが示された。また, 中性化深さと水分浸透速度係数の実験値から水分浸透速度係数の予測値に用いられる養生と外部環境の影響を表す係数を算出して比較検討した。

**キーワード:** 中性化, 鉄筋腐食, 水分浸透, 空隙率

## 1. はじめに

2012 年制定コンクリート標準示方書【設計編】<sup>1)</sup>での中性化に伴う鋼材腐食に対する照査では, かぶりから中性化深さを減じた中性化残りが 10mm になると鉄筋腐食が開始し, 一般的にその時点が中性化の劣化過程における限界状態として取り扱われてきた。そして, 2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】<sup>2)</sup>では, 従来の中性化の進行に着目した方法と, 新たに水分浸透に着目した鉄筋腐食の照査方法が示され, 鉄筋腐食の程度を限界状態の指標とする考え方が追加された。これは, 水の浸透程度により鉄筋の腐食深さを算出して照査する手法であり, 代表的な環境作用である降雨の影響によりコンクリート内部に水が浸透し, それによる鉄筋腐食の進行を考慮する場合の取扱い方を示している。ここでは, 中性化が進行すると腐食速度が大きくなると言われているが, 設計時において安全側の算定をするために, 中性化が鋼材近傍に達する前段階から鋼材腐食が一定の速度で進行するものと仮定している<sup>3)</sup>。これにより, 新設構造物の設計において, 鉄筋腐食の程度を限界状態の指標とする考え方による照査がすることができるものである。

これに対して, 既設構造物では, 既に中性化または鉄筋腐食が進行している構造物が多く存在している。それらを対象として維持管理するうえで, 鉄筋腐食の程度を限界状態の指標とする考え方をういて, ひび割れの発生やかぶりコンクリートの剥離・剥落などを予測し, ひび割れ発生時期などを設定し, 適切な時期に補修などの対策を実施することが合理的であると考えられる。これまで, 例えば, 鉄道構造物等維持管理標準<sup>4)</sup>では, 中性化の進行による鉄筋腐食の開始時期と, その後, 腐食の進行程度によるひび割れおよびかぶりコンクリートの剥

離・剥落の発生時期の劣化過程を予測する手法が示されている。ただし, 雨掛かりの有無などの環境条件の違いや水分浸透程度を考慮した鉄筋腐食の進行を定量的に示した事例は少ない。

例えば, 筆者らは, これまでに実構造物を対象として調査を実施し, 中性化深さ, かぶりおよび鉄筋の腐食程度から雨掛かりの有無が鉄筋腐食の進行とかぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響を整理してきた<sup>5)</sup>。鉄筋コンクリート構造物において, 中性化が進行すると鉄筋は腐食条件となるが, 雨掛かりのない環境条件では, 中性化がある程度進行していても鉄筋腐食による劣化が顕著化していない構造物が多く見受けられた。また, 実構造物より鉄筋を採取・分析して, 雨掛かりの有無による鉄筋腐食程度の違いとコンクリート中の含水率分布を調べた。その結果, かぶりコンクリートが剥離・剥落に至るまでの期間において雨掛かりの有無が大きく影響することが示唆され, 雨掛かりがある場合には水分供給による乾湿繰り返しの影響を受け, 鉄筋の腐食速度はかぶりが小さいほうが大きくなることを示した<sup>5)6)</sup>。また, 轟ら<sup>7)</sup>は, 実構造物を対象に変状予測モデルを用いて剥落発生状況に基づく鉄筋腐食速度を算出し, 中性化残りが 10mm 程度以下で水分が供給される場合には鉄筋腐食速度が大きくなることを示している。

以上のように, 中性化による鉄筋腐食の進行では, 水分の供給程度が大きく影響すると考えられる。そこで, 本研究では, 雨掛かりなどで短期的に水分がコンクリート中に浸透する範囲を把握することと, 長期間供用された実構造物のコンクリートにおける短期的な水分浸透性に関する知見を得ることを目的として, 実構造物より採取したコア供試体を用いて実験的検討を行った。

\*1 東急建設(株)技術研究所土木材料グループ 博(工)(正会員)

\*2 東急建設(株)技術研究所土木材料グループ 修(工)(正会員)

\*3 東急建設(株)技術研究所土木材料グループグループリーダー 博(工)(正会員)

## 2. 実験概要および結果

### 2.1 水分浸透性

#### (1) コア供試体

コア供試体は、実構造物（A 高架橋）からスラブの一部を切出して、屋外に保管していたものより採取した。A 高架橋のスラブ試験体は、1961 年（昭和 36 年）の供用開始から 45 年経過した時点で実構造物より 1m×2m 程度（スラブ厚さ 200mm 程度）を切出して、スラブ下面が上側となるように屋外に暴露し、その後、中性化深さやかぶり、鉄筋の腐食度などを調査している<sup>5)</sup>。なお、A 高架橋のスラブ試験体の下面は、供用開始から試験体を切出した時点までの 45 年間は雨掛かりがない環境で、それ以降は雨掛かりがある環境で暴露していた。また、同スラブ試験体より採取したコア供試体の圧縮強度は 10.6～14.1N/mm<sup>2</sup>（平均値 13.0N/mm<sup>2</sup>）であり、一般的な鉄筋コンクリート構造物に用いるコンクリートよりも低品質なものであった<sup>5)</sup>。

今回は、供用開始から 57 年経過した時点で A 高架橋のスラブ試験体よりコア供試体を 9 本採取して検討を行った。コア供試体の採取位置は、電磁波レーダ法により鉄筋位置を探索し、鉄筋と目視で確認できるひび割れなどを避けるように、コア径を約 80mm、長さ 200mm 程度でスラブ試験体を貫通して採取した。採取位置によって中性化の進行が異なることが想定されたため、採取後にコア供試体側面を対象として、フェノールフタレイン溶液を噴霧し、中性化深さを把握した。中性化深さの程度からグループⅠ～Ⅲの 3 つに分類し、中性化の進行程度が異なる場合のコンクリート内部における水分浸透性を把握した。なお、グループⅡとⅢのコア供試体は、近傍の位置より採取し、グループⅡとⅢで、スラブ下面と上面の違いの影響を把握した。コア供試体は、採取後に一定の乾燥状態とするため、150 日間程度、温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿度室に静置して乾燥させた。

#### (2) 実験方法

水分浸透速度係数は、「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-G 582-2018」を参考として試験を実施した。

コア供試体は、乾燥後に側面をアルミテープにより被覆し、その後、図-1 に示すように吸水対象面を下端として下端から 10mm 程度の高さまでを水道水に浸漬させた。吸水時間は 5、24、48 時間の 3 水準として、各吸水時間において各グループの 1 本ずつを終了させ、水分浸透深さを求めた。水分浸透深さは、所定の吸水時間後、速やかにコア供試体を割裂し、市販の水漏れ検査剤（JIP612 ウォーターチェック）を割裂面に噴霧し、濃い青色に呈色した範囲の深さを測定した。測定方法は、コア供試体割裂面の両側面端 10mm ずつを除き、コア供試体中央の約 60mm の範囲を 5 点等間隔に測定し、その平均値を水分浸透深さとした。

なお、吸水開始前および各吸水時間直後のコア供試体質量を測定し、各吸水時間における吸水量も併せて求めた。また、水分浸透深さを求めたコア供試体の割裂面の対面では、フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを求めた。

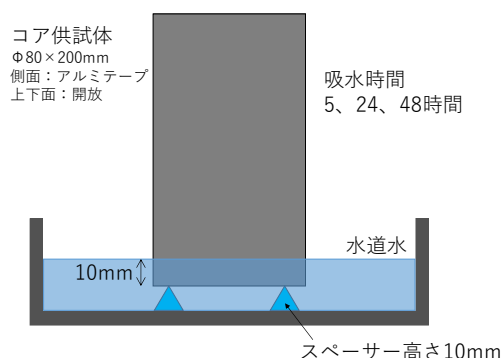


図-1 水分浸透速度係数試験の概要

表-1 コア供試体の概要と実験結果

グループ	コア供試体 No.	中性化深さ(mm)		吸水時間 (hour)	水分浸透深さ (mm)	吸水対象面
		コア側面	割裂面			
Ⅰ	No.1	37.7	40.1	5	25.9	スラブ 下面
	No.2	35.6	36.2	24	36.2	
	No.3	34.4	36.8	48	48.2	
Ⅱ	No.4	51.4	57.5	5	31.7	スラブ 下面
	No.5	44.8	49.2	24	47.1	
	No.6	44.8	46.7	48	52.6	
Ⅲ	No.7	61.4	72.4	5	24.0	スラブ 上面
	No.8	69.2	69.5	24	66.5	
	No.9	66.1	67.1	48	79.9	

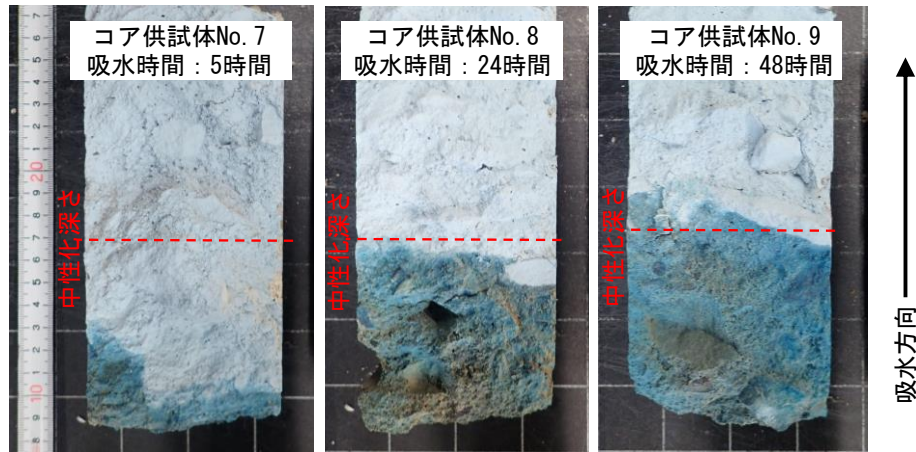


図-2 水分浸透速度係数試験の状況

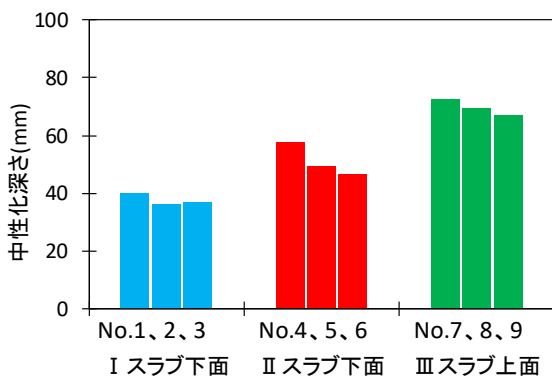


図-3 中性化深さ (割裂面)

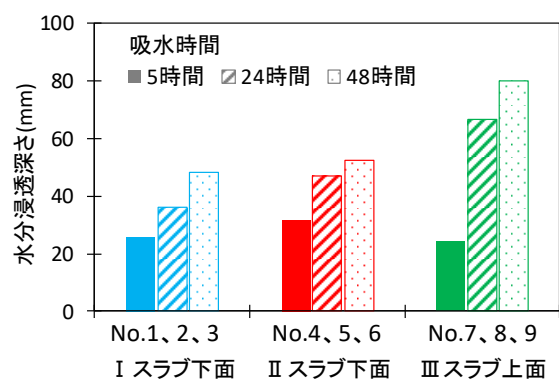


図-4 水分浸透深さ

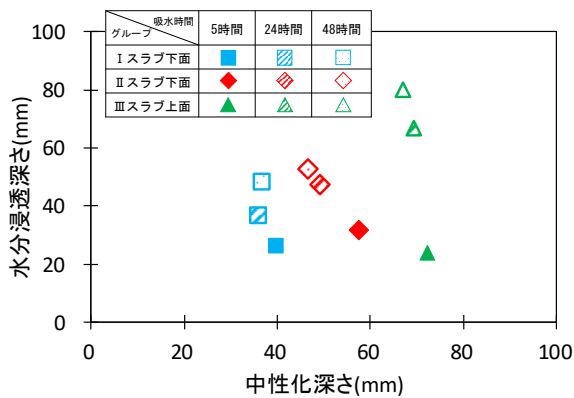


図-5 中性化深さと水分浸透深さの関係

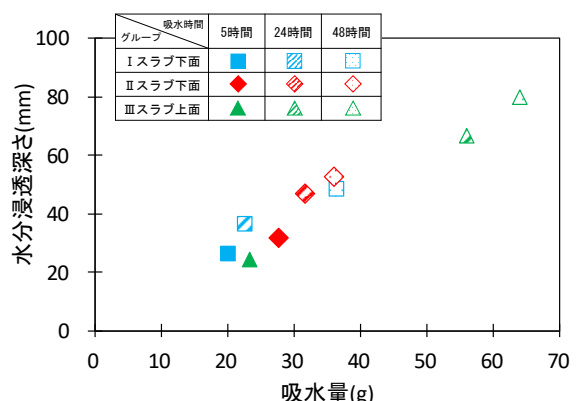


図-6 吸水量と水分浸透深さの関係

### (3) 実験結果

図-2 に水分浸透速度係数試験の状況を、表-1、図-3、4 に中性化深さおよび水分浸透深さの結果を、図-5 に中性化深さと水分浸透深さの関係を示す。グループ I ~ III の吸水時間 5 時間における水分浸透深さは 24.0~31.7mm で同程度であった。その後、吸水時間 24 時間での水分浸透深さは、グループ I ~ III のいずれにおいても、各々の中性化深さ程度まで水分が浸透し、中性化深さの大きいグループ III (No.8) では、24 時間で水分浸透深さが 66.5mm となった。なお、吸水時間 48 時間では、すべてのグループにおいて中性化深さより深まで水分が浸透し、

グループ I, II で水分浸透深さが 50mm 程度、グループ III は吸水時間 48 時間で 80mm 程度まで水分が浸透し、スラブ上面と下面で異なる結果となった。吸水時間 24, 48 時間で中性化深さが大きいと水分浸透深さが大きくなった。これにより、中性化の進行程度によって、水分浸透性が異なる傾向になることが考え、次節 2.2 では、アルキメデス法によってコア供試体の空隙率を把握した。

図-6 に水分浸透速度係数試験における水分浸透深さと吸水量の関係を示す。グループ I, II の水分浸透深さは、同吸水量において、グループ III よりも大きくなる傾向を示した。

## 2.2 空隙率

### (1) 実験方法

空隙率の測定では参考文献<sup>8)~10)</sup>を参考に以下の方法で求めた。中性化深さを求めたコア供試体を用いて、コア供試体の中性化深さを境界として切断し、中性化域と未中性化域の範囲に分け、さらに、コア側面から10mm程度の範囲を除外して試料を採取した。試料は、10mm角程度に粗粉碎し、可能な限り粗骨材を除き、モルタル分を用いた。なお、試料質量を300g程度とするため、各グループでコア供試体3本より採取した試料を混合させて、一つの試料とした。そして、水中に浸漬させ24時間真空脱気することで飽水状態とした。その後、40℃の乾燥炉内に7日間静置して乾燥状態とした。空隙率は、飽水状態と乾燥状態の試料質量およびピクノメータによる試料体積から式(1)を用いて算出した。

$$V = \frac{W_1 - W_2}{W_3} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $V$ ：空隙率(%),  $W_1$ ：飽水状態の試料質量(g),  $W_2$ ：乾燥状態の試料質量(g),  $W_3$ ：ピクノメータにて飽水状態の試料が追出した水の量(g)

### (2) 実験結果

表-2、図-7に空隙率の結果を示す。空隙率は、グループI~IIIのいずれにおいても未中性化域よりも中性化域のほうが大きくなり、中性化することで空隙構造が変化している可能性がある。

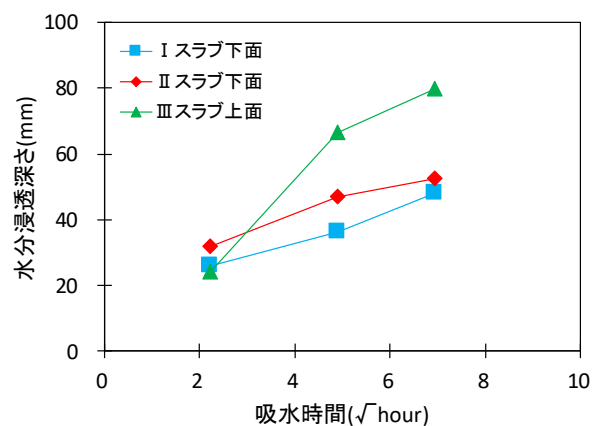
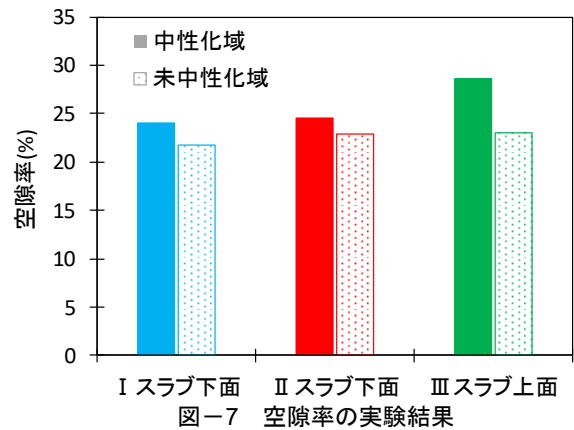
既往の研究<sup>10)</sup>によれば、促進中性化環境下にて中性化させた高炉セメントを用いたコンクリートでは、中性化したほうが未中性化よりも空隙構造が疎となり、水分浸透性が大きくなることを示している。ここでは、促進中性化環境下にて中性化させた普通ポルトランドセメントを用いた場合では、中性化の有無によって、空隙率および水分浸透性の変化は顕著には見られていない。ただし、実環境下において長期間供用したコンクリート構造物では、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートにおいても空隙構造の変化が示唆されている<sup>11)~14)</sup>。本検討に用いたコア供試体は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートであり、既往の研究<sup>11)~14)</sup>と同様に中性化することで空隙構造が変化して空隙率が大きくなったと推察する。

## 2.3 水分浸透性と空隙率

図-8に水分浸透速度係数試験の水分浸透深さの経時変化を示す。グループIIIでは、中性化深さが大きく空隙率の大きいことで水分浸透深さが大きくなったと考えられる。また、グループI、IIでは不明瞭であるが、グループIIIでは吸水時間5時間から24時間の水分浸透速度係数(傾き)が、吸水時間24時間から48時間での水分浸透速度係数(傾き)よりも大きくなった。これは吸水

表-2 空隙率の実験結果

グループ	空隙率(%)	
	中性化域	未中性化域
I	24.1	21.8
II	24.5	22.9
III	28.7	23.0



時間24時間から48時間の間に中性化域から空隙率の小さな未中性化域にかけて水分が浸透していくことで、水分が浸透する速度が遅くなったと考える。つまり、中性化の進行程度によって、短期的に水分が浸透する範囲が変化する可能性がある。

次に、式(2)により水分が浸透した範囲のコア供試体内の空隙に対する飽水率を算出した。

$$S = \frac{Q \cdot 1000}{A \cdot \gamma_w \cdot V / 100} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $S$ ：飽水率(%),  $Q$ ：吸水量, 水分浸透速度係数試験における実験値(g),  $A$ ：コア供試体断面積(mm<sup>2</sup>),  $\gamma_w$ ：水分浸透深さ, 水分浸透速度係数試験における実験値(mm)

図-9に飽水率の結果を示す。飽水率は49.3~66.9%であり、グループI~IIIのいずれにおいても同様の傾向を示した。図-6の吸水量と水分浸透深さの関係において、空隙量の小さいグループI、IIでは、同吸水量で空隙量

の大きいグループⅢよりも水分浸透深さが大きくなったことを考慮すると、空隙内で水分が占める割合(飽水率)はグループⅠ～Ⅲのいずれにおいても同程度であったと推測する。また、短期的な水分浸透では、コンクリート中の空隙内で水分が占める割合(飽水率)が一定以上にはならず水分浸透深さが大きくなることが確認された。これより、コンクリートの中酸化深さ、中性化域と未中性化域のそれぞれの空隙率を把握し、その空隙に対する飽水率を設定することで、短期的な水分浸透深さを推定できると考える。

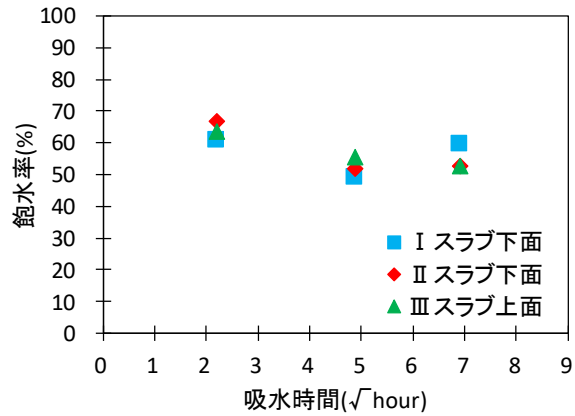


図-9 飽水率の結果

### 3. 短期的な水分浸透予測に関する考察

参考文献<sup>3)</sup>では、W/Cが40～80%の実験結果を用いて検討した式(3)による水分浸透速度係数の予測値の設定方法が示されている。ここで、表-3にコンクリートの養生および外部環境の影響を表す係数<sup>3)</sup>を示す。

この係数 $\beta$ は、1.0～3.0とされており、その設定する値により水分浸透速度係数の予測値が大きく異なるように設定されている。2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】<sup>2)</sup>では、標準的な養生とした場合、 $\beta=2.0$ (封緘養生)と3.0(気中養生)の中間であると考えられ、 $\beta=2.5$ と設定されている。

$$q_p = 5 \cdot (W/B)^2 \cdot \beta^2 \quad (3)$$

ここで、 $q_p$ :水分浸透速度係数の予測値(mm/√hour),  $W/B$ :水結合材比,  $\beta$ :養生と外部環境の影響を表す係数  
 ここでは、実験より得られた中性化深さから式(4)、(5)<sup>3)</sup>を用いて水セメント比を推定した。表-4に中性化深さより求めた水セメント比を示す。 $W/C_c$ は68.6～85.7%で、近傍の位置より採取したグループⅡとⅢの平均値は、80.6%と82.5%と同程度となった。また、スラブ試験体の圧縮強度は13.0N/mm<sup>2</sup>で、水セメント比と圧縮強度の関係式Abrams式<sup>15)</sup>を用いて水セメント比を推定すると85%程度である。このことから、中性化深さより求めた水セメント比は妥当な範囲であると考えられる。

$$y = \gamma_{cb} \cdot \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \cdot W/C_c \quad (5)$$

ここで、 $y$ :中性化深さの実験値(mm),  $\gamma_{cb}$ :ばらつきを考慮した安全係数1.15,  $\beta_e$ :環境作用係数1.6,  $\gamma_c$ :材料係数(スラブ下面,グループⅠ,Ⅱで $\gamma_c=1.0$ ,スラブ上面,グループⅢで $\gamma_c=1.3$ ),  $t$ :経過年数57年,  $W/C_c$ :中性化深さから求めた水セメント比

次に、中性化深さから求めた水セメント比と水分浸透速度係数試験の結果から式(3)を用いて養生と外部環境の影響を表す係数 $\beta$ を算出して比較した。なお、水分浸透速度係数は、水分浸透深さの経時変化より以下のケー

表-3 養生および外部環境の影響を表す係数<sup>3)</sup>

養生条件と乾燥条件	係数 $\beta$
打設後24時間で脱型して水中養生	1.0
封緘養生もしくは高湿度での養生	2.0
打設後24時間で脱型して気中養生	3.0
養生によらず、数年におよぶ乾燥や105℃乾燥などの強い乾燥を受けた場合	3.0

表-4 中性化深さより求めた水セメント比

グループ	コア供試体 No.	中性化深さ(mm)	中性化速度係数(mm/√year)	中性化深さから求めた水セメント比 (%)
Ⅰ	No.1	40.1	2.89	71.7
	No.2	36.2	2.61	68.6
	No.3	36.8	2.65	69.1
Ⅱ	No.4	57.5	4.14	85.7
	No.5	49.2	3.54	79.0
	No.6	46.7	3.36	77.0
Ⅲ	No.7	72.4	4.01	84.2
	No.8	69.5	3.85	82.4
	No.9	67.1	3.72	81.0

表-5 水分浸透速度係数および係数 $\beta$ の算出結果

グループ	ケース	水分浸透速度係数(mm/√hour)	切片	係数 $\beta$
Ⅰ	①	4.67	14.94	1.4
	②	8.14	0	1.8
	③	5.87	7.51	1.6
Ⅱ	①	4.48	22.82	1.2
	②	10.42	0	1.8
	③	2.72	33.76	0.9
Ⅲ	①	12.06	0.43	1.9
	②	13.13	0	2.0
	③	6.61	34.17	1.4

ス①～③の場合を想定して設定した。

ケース①：吸水時間 5, 24, 48 時間での水分浸透深さの近似直線（中性化域と未中性化域の違い考慮なし<sup>16)</sup>）

ケース②：吸水時間 5, 24 時間での水分浸透深さの近似直線（中性化域での水分浸透を想定, 切片 0）

ケース③：吸水時間 24, 48 時間での水分浸透深さの近似直線（未中性化域での水分浸透を想定）

表-5 に各ケースでの水分浸透速度係数および算出した係数  $\beta$  を示す。係数  $\beta$  は中性化域での水分浸透を想定したケース②のほうが未中性化域でのケース③よりも大きくなった。ここでも、未中性化域にかけて水分が浸透していく際に、水分が浸透し難くなっていることがわかる。また、すべてのケースにおける係数  $\beta$  は 0.9~2.0 となり、2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】<sup>2)</sup> で設定している  $\beta=2.5$  よりも安全側となり、概ね、水中養生  $\beta=1.0$  と封緘養生  $\beta=2.0$  の間であった。

本検討の結果のみで、水分浸透速度係数の予測値における養生および外部環境の影響を表す係数  $\beta$  を決定することは困難であるが、今後、様々な知見を蓄積することで、より適切な係数設定および正確なコンクリート中への短期的な水分浸透の予測につながり、中性化による鉄筋腐食に対し、水分浸透の影響を考慮して、実状に応じた劣化予測および現状の劣化程度の把握をすることが可能になると考える。

#### 4. まとめ

実構造物から採取したコア供試体を用いて検討した結果、本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) スラブ下面を対象としたグループ I と II のコア供試体では、吸水時間 48 時間で 50mm 程度、スラブ上面を対象としたグループ III では 80mm 程度までコンクリート内部に水分が浸透し、空隙率の違いが影響し、スラブ上面と下面で異なる傾向を示した。
- (2) グループ I ~ III の空隙率は、いずれにおいても未中性化域よりも中性化域のほうが大きくなり、中性化することでコンクリートの空隙構造が変化することが確認された。
- (3) 中性化域から未中性化域にかけて水分が浸透していく際には、空隙率の小さい未中性化域では水分が浸透する速度が遅くなり、中性化の進行程度によって、短期的に水分が浸透する範囲が変化する可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2013.

- 2) 土木学会：2017 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2018.
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー149 2017 年制定コンクリート標準示方書改訂資料設計編・施工編，2018.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，2007.
- 5) 前原聡，伊代田岳史：雨掛かりの有無が中性化によるかぶりの剥離・剥落に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.74, No.2, pp.80-87, 2018.
- 6) 前原聡，伊代田岳史：中性化により腐食した鉄筋の詳細分析，土木学会第 71 回年次学術講演会，V-412, pp.823-824, 2016.
- 7) 轟俊太郎，石田哲也，上田洋，田所敏弥：水と中性化によるコンクリート中の鉄筋腐食速度への影響要因分析，コンクリート工学年次論文集 Vol.41, No.1, pp.509-514, 2019.
- 8) 平本真也，大塚勇介，植村幸一郎，檀康弘：高炉スラブ微粉末を用いたコンクリートの水分浸透性に関する評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.41, No.1, pp.77-82, 2019.
- 9) 三坂岳広，伊代田岳史：計測される電気抵抗が強度及び耐久性と相関がる原因の解明，コンクリート工学年次論文集，Vol.41, No.1, pp.1307-1312, 2019.
- 10) 水野博貴，伊代田岳史：炭酸化した高炉セメント硬化体の空隙構造変化が水分浸透性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.41, No.1, pp.665-670, 2019.
- 11) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集 No.433/V-15, pp1-14, 1991.8
- 12) コンクリート工学協会：炭酸化研究委員会報告書コンクリートの炭酸化に関する研究の現状，1993.3
- 13) 前原聡，鈴木将充，伊藤正憲，山田久美：施工年の異なる構造物より採取したコンクリートの力学的特性および細孔構造に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.2, pp.1303-1308, 2015.
- 14) 社団法人セメント協会セメント化学専門委員会：セメント硬化体の炭酸化，セメント・コンクリート，No.574, pp.26-32, 1994.
- 15) 日本建築学会：コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説，pp.148, 1976.
- 16) 前原聡，鈴木将充，早川健司，伊藤正憲：長期間供用したコンクリート構造物の短期的水分浸透に関する検討，土木学会第 74 回年次学術講演会，V-466, 2019.