

# 論文 長期間の保湿養生が表層コンクリートの各種性能および細孔構造に与える影響について

頃安 研吾<sup>\*1</sup>・齊藤 亮介<sup>\*2</sup>・片山 雅夫<sup>\*3</sup>・野島 昭二<sup>\*4</sup>

**要旨**：長期養生がコンクリートの耐久性に与える影響を検証するため、養生期間を要因に表面透気試験、表面吸水試験、促進中性化試験、水銀圧入法による細孔径分析を実施した。その結果、養生用保水テープを使用して長期養生を実施した場合、セメントの水和反応が進行することで表層コンクリートが緻密化され、透気性および吸水性の低下、中性化に対する抵抗性の向上が確認された。また、表面透気係数および表面吸水性は表面から10mmの表層コンクリートにおける直径0.1 $\mu$ m以上の細孔容積と高い相関を示した。

**キーワード**：長期保湿養生、表面透気性、表面吸水性、中性化、細孔径分布

## 1. はじめに

我が国の資本たる社会インフラは適切な計画、設計、施工、維持管理によって長期の耐久性および安全性を保つ必要がある。特にこれから建設される土木構造物には長期の供用期間が要求されており、それに伴い高耐久性を有するコンクリート構造物の施工が望まれる。コンクリート構造物の耐久性を確保する上で重要な工程の一つに養生がある。構造物の種類、コンクリート仕様、環境条件等を考慮し、適切な方法・期間の養生を行うことで表層コンクリートのセメントの水和反応を十分に進行させれば、劣化因子の浸入に対する抵抗性を向上できることが知られている<sup>1)</sup>。

養生技術については、近年多くの研究開発が行われている。例として、貼付型のシートにより温度低下や水分逸散を抑制する技術<sup>2), 3), 4)</sup>、型枠内部に配置した透水板によって、打込み時の余剰水排出および硬化後の水中養生を可能とする技術<sup>5)</sup>等が存在する。このように、様々な養生技術の有効性が報告される一方、二村らは、気温20~32 $^{\circ}$ C、相対湿度60~80%の環境においては養生による大幅な品質向上効果は期待できないと報告している<sup>6)</sup>。また、養生による耐久性あるいは強度に与える効果の評価方法は一様でなく、流通している養生技術の中には極端な条件で養生効果が比較され品質向上を掲げている事例も見られる。

新名神高速道路の四日市北ジャンクション（仮称）か

ら菰野インターチェンジ（仮称）間に建設中の小牧高架橋他2橋（PC上部工）工事では、表層コンクリートの緻密化による橋梁上部工の耐久性向上を目的とし、型枠脱型後から強度保証材齢までの期間において養生用保水テープを用いた保湿養生を行っている。本研究では、当該現場において実構造物の打込みと同時に作製し、現場と同様の環境下で長期養生を行った試験体について、採用した養生方法が表層コンクリートの表層品質に与える効果について検証した。評価は表面透気試験、表面吸水試験、促進中性化試験、細孔径分布の分析により行い、細孔構造とその他の各性能との間における相関性について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

#### (1) 配合

試験体の配合を表-1に示す。当配合はマスコンクリートに該当する柱頭部に使用するコンクリートであり、温度ひび割れを抑制する目的から中庸熟ポルトランドセメントを採用し、強度保証材齢を8週（56日）とした。細骨材には石灰石砕砂（S1）、川砂（S2）、粗骨材には石灰砕石を採用し、混和剤に高性能AE減水剤を使用した。試し練り時の圧縮強度試験結果は、材齢4週で41.9 N/mm<sup>2</sup>、材齢8週で53.0 N/mm<sup>2</sup>であった。

表-1 コンクリート配合

Cement Type	f <sub>ck</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Slump (cm)	Air (%)	G <sub>MAX</sub> (mm)	W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					SP (C×%)
							W	C	S1	S2	G	
M	40	13	4.5	20	46.7	48.0	158	338	443	428	972	0.65

\*1 清水建設(株) 名古屋支店 土木部 新名神高速道路小牧高架橋他2橋（PC上部工）工事（正会員）

\*2 清水建設(株) 技術研究所 社会基盤技術センター（正会員）

\*3 中日本高速道路(株) 名古屋支社 四日市工事事務所

\*4 中日本高速道路(株) 名古屋支社 四日市工事事務所（正会員）

表-2 試験項目および試験材齢

試験項目	装置・方法	試験材齢	測定位置	測点数	試験体数
表面透気性	Torrent 法 <sup>7)</sup>	材齢 8 週, 12 週, 14 週, 16 週	評価面中央部	1 点	1 体
表面吸水性	SWAT 法 <sup>8)</sup> を参考	材齢 17 週			
中性化深さ	促進中性化試験方法 JIS A 1153	材齢 12 週に促進開始 促進期間: 4 週, 8 週, 13 週	評価面に 垂直に割裂	10 点の 平均値	1 体
細孔径分布	水銀圧入法	材齢 9 週	0~10mm 20~30mm 45~55mm 70~80mm	各試料 10	1 体

(2) 試験体概要および養生方法

試験体は図-1 に示すような 200×150×200mm の角柱試験体とした。型枠には実構造物に使用したものと同種の合板を使用した。打込み後の打込み面については、養生マットにより後述の脱型日まで湿潤養生を行った。

図-2 に各ケースの養生方法と本研究の流れの簡略図を示す。CASE1 は早期脱型を想定して材齢 3 日で脱型し、材齢 8 週まで現場敷地内にて気中養生を行った。CASE2 はコンクリート標準示方書に記載されている標準湿潤養生期間に則り<sup>1)</sup> 材齢 12 日まで型枠を存置させ、脱型後は CASE1 と同様に材齢 8 週まで現場敷地内にて気中養生を行った。CASE3 は CASE2 と同様に材齢 12 日に脱型し、その後ただちに養生用保水テープを貼り付け材齢 8 週まで現場敷地内に静置した。各試験体は、脱型後の評価面以外からの水分逸散および供給を防止するため、評価面を除く 5 面をアルミ粘着テープにて密封し、屋根の下に存置した。

試験体作製日は平成 26 年 1 月 9 日、現場存置期間は平成 26 年 1 月 9 日～平成 26 年 3 月 6 日で、存置中の平均気温および相対湿度はそれぞれ 4.5℃、65%であった。

2. 2 試験方法

材齢 8 週（現場存置終了）後に実施した試験項目と試験材齢を表-2 に示す。

(1) 表面透気試験

材齢 8 週以降は温度 20℃、相対湿度 60%一定の室内に存置し、所定の材齢にてダブルチャンバーを用いた Torrent 法<sup>7)</sup>による表面透気試験を実施した。測点は評価面中央部の 1 点とした。本試験から得られる表面透気係数 (kT 値) によってコンクリート表層の透気性を評価した。また、表面透気性はコンクリート中の水分の影響を受けるため、同測定位置にてコンクリートの表面水分率を併せて計測した。水分率計は高周波式水分計を使用した。

(2) 表面吸水試験

写真-1 に示すように、SWAT 法<sup>8)</sup>を参考とした試験方法を採用した。容量 5ml のピペットを設置したアクリル製の円筒容器をシリコンシール材により評価面中央に固定し、水頭高さを円筒容器中心部から 300mm として 10

分間の吸水量を測定した。コンクリートの表面含水率の影響を小さくするため、表面透気試験が終了した材齢 17 週にて試験を実施し、得られた吸水量の結果からコンクリート表面における水分の浸入抵抗性を評価した。

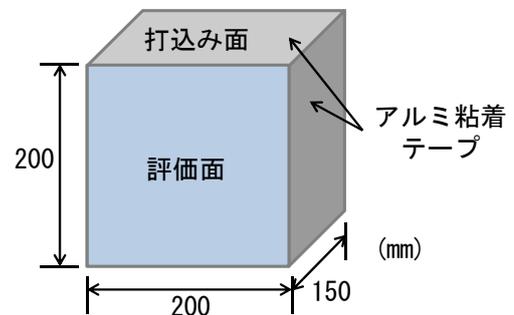


図-1 試験体概要

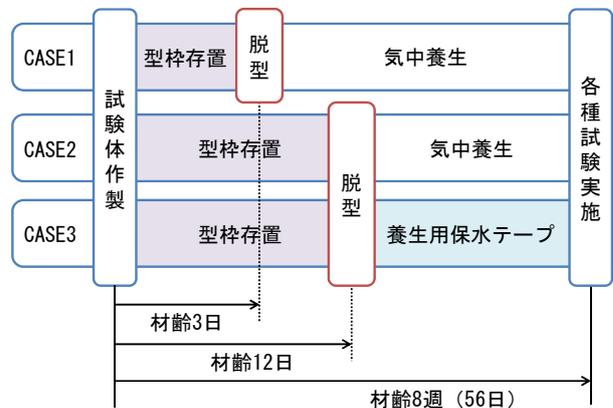


図-2 養生方法



写真-1 表面吸水試験

### (3) 促進中性化試験

試験体を温度 20℃、相対湿度 60%一定の室内で材齢 8 週から 4 週間乾燥させ、温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%の環境下で中性化を促進させた。促進中性化期間 4 週、8 週および 13 週において、JIS A 1152 に準じて試験体を割裂し、フェノールフタレイン法によりノギスを用いて中性化深さを 0.1mm まで測定した。測定箇所は粗骨材の影響を受けていない 10 点とし、平均値によって中性化に対する抵抗性を評価した。試験体は 1 ケースにつき 1 体とした。また、促進中性化期間中も評価面以外はアルミ粘着テープを用いてシールした。

### (4) 水銀圧入法による細孔径分布の分析

湿式のコアボーリングを用いて、試験体評価面からコンクリートコアを採取し、評価面から深さ方向に、0～10mm、20～30mm、45～55mm、70～80mm の 4 測定位置において 5mm 程度の小片試料を採取した。試料をアセトン処理および D-dry 処理した後、水銀圧入式ポロシメータにより細孔径分布の分析を行った。試験体は各ケース 1 体とした。各位置各試験体の細孔径分布から、養生効果および効果の影響範囲を評価し、平均細孔直径から養生方法の違いによる表層コンクリートの緻密度を評価した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 表面透気試験

各試験体の試験結果を図-3 に示す。CASE3 の kT 値はどの材齢においても CASE1 および CASE2 よりも小さく、養生期間が長いほど表面透気性は低下することが確認できる。表面透気性はコンクリート表面性状や表面水分率による影響が大きく、いずれの試験体も表面にひび割れや目視可能な気泡等の変状はないが、養生期間が異なるため表面水分率には差異が生じた。CASE3 は養生期間が長く、材齢 8 週時における表面水分率（表-3）は、他ケースよりも約 3%高い値を示した。ただし、材齢 14 週時には他ケースと同等まで水分率が低下しており、それ以降の試験については水分率の影響は無いと考えられる。材齢 16 週の結果を比較すると、CASE3 の kT 値は、CASE1 の約 30%、CASE2 の約 50%であり、長期養生によって表層コンクリートが緻密化され、透気性が低下したと考えられる。

### 3.2 表面吸水試験

表面吸水量を図-4 に示す。養生期間が長くなるほど吸水量は減少し、CASE2 は CASE1 の約 75%、CASE3 は CASE1 の約 60%であった。表面吸水試験は表面透気試験終了後に実施しており、試験時の各試験体の表面水分率は同等であった。

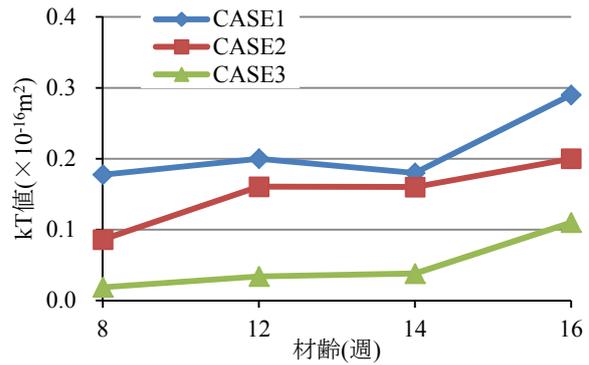


図-3 表面透気試験結果

表-3 試験体表面の水分率

材齢	8週	12週	14週	16週
CASE1	5.2	4.7	4.7	4.7
CASE2	5.5	4.8	4.8	4.7
CASE3	8.4	5.3	5.0	4.7

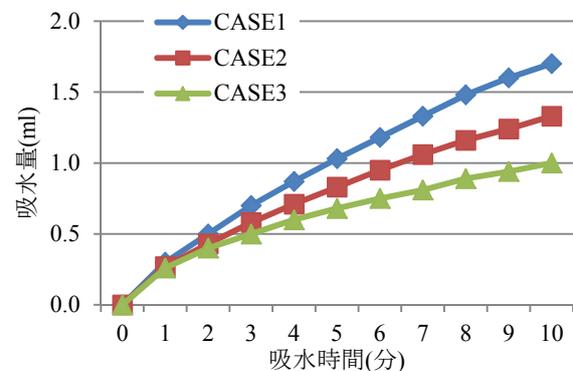


図-4 表面吸水試験結果

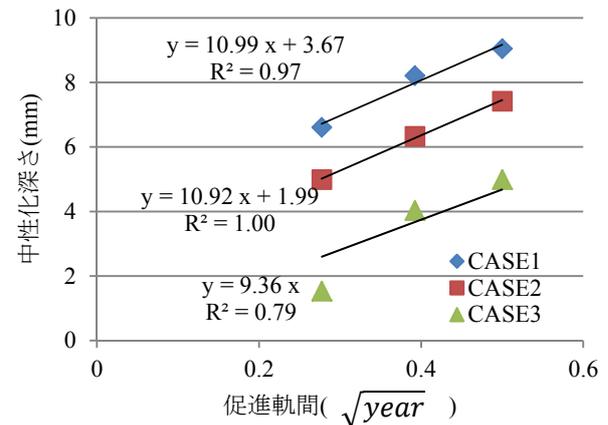


図-5 促進中性化試験結果

### 3.3 促進中性化試験

促進中性化試験結果を図-5 に示す。養生期間を長くするほど中性化に対する抵抗性が増加する傾向が見られた。促進期間 13 週における各ケースの中性化深さを比較すると、CASE2 の中性化深さは CASE1 の約 80%、CASE3 の中性化深さは CASE1 の約 50%であり、8 週間の長期養生によって、中性化に対する抵抗性が早期脱型の概ね 2.0 倍になることが確認された。長期養生によってコンクリ

ートが緻密化され、中性化に対する抵抗性が向上したと考えられる。なお、促進中性化試験は材齢 12 週時に開始し、各ケースの表面水分率は同等であったため水分率による影響は少ないものと考えられる。

また、養生期間が長くなるにつれ中性化速度は減少し、本研究では CASE3 が最も小さいことが確認できた。なお、CASE3 は評価面が養生用保水テープで被覆されるため現場存置中に中性化する可能性は低い、CASE1 および CASE2 は脱型から材齢 8 週まで評価面が気中にさらされることから、現場存置中に中性化する可能性が考えられる。よって、CASE1 および CASE2 については中性化速度を線形近似にて算出する際に切片を 0 とせず、CASE3 のみ切片を 0 として算出した。

日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説」に示される中性化速度の関係式<sup>9)</sup>によると、中性化速度は存置環境の炭酸ガス濃度の平方根にほぼ比例し、屋外環境の二酸化炭素濃度を 0.05% とした場合、促進中性化試験の試験期間の 100 倍が屋外環境に相当するとされ、式(1)で表せる。また、雨掛りとなる屋外環境における許容中性化深さは、前述の指針に記載される式(2)から 25.6mm となる。

$$t = 100/A^2 \cdot C^2 \quad (1)$$

$$d' = d - (\bar{D} - \bar{C}_t) / \sqrt{\bar{C}_t^2 \cdot v + \sigma^2} \quad (2)$$

このとき

t : 材齢 (year)

A : 促進中性化試験における中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )

C : 中性化深さ(mm)

d' : d を正規化した場合の確率変数

d : 鉄筋が腐食し始めるときの鉄筋かぶり厚さと中性化深さの差

$\bar{D}$  : 鉄筋のかぶり厚さの平均値

$\bar{C}_t$  : 中性化深さの平均値

v : 中性化深さの変動係数

$\sigma$  : 鉄筋かぶり厚さの標準偏差

かぶり厚さの平均値は設計値 (45mm)、かぶり厚さの標準偏差は 10mm とし、その他のパラメータは指針を参考に中性化深さの変動係数 10%、鉄筋が腐食し始めるときの鉄筋かぶり厚さと中性化深さの差を 0、腐食確率を 3.0% とした。この許容中性化深さまで中性化が進行すると予測される材齢は、CASE1 で材齢約 400 年、CASE2 で材齢約 460 年であるのに対し、CASE3 は材齢約 750 年と中性化に対する抵抗性は CASE1 の約 2.0 倍に向上した。材齢の算出にあたり、中性化深さ C は、許容中性化深さと図-5 中の中性化速度式の切片の差を使用した。ただし、これらは促進環境と屋外環境の二酸化炭素濃度比から算出した値であり、気温、風、雨等の自然要因による影響は考慮していない。

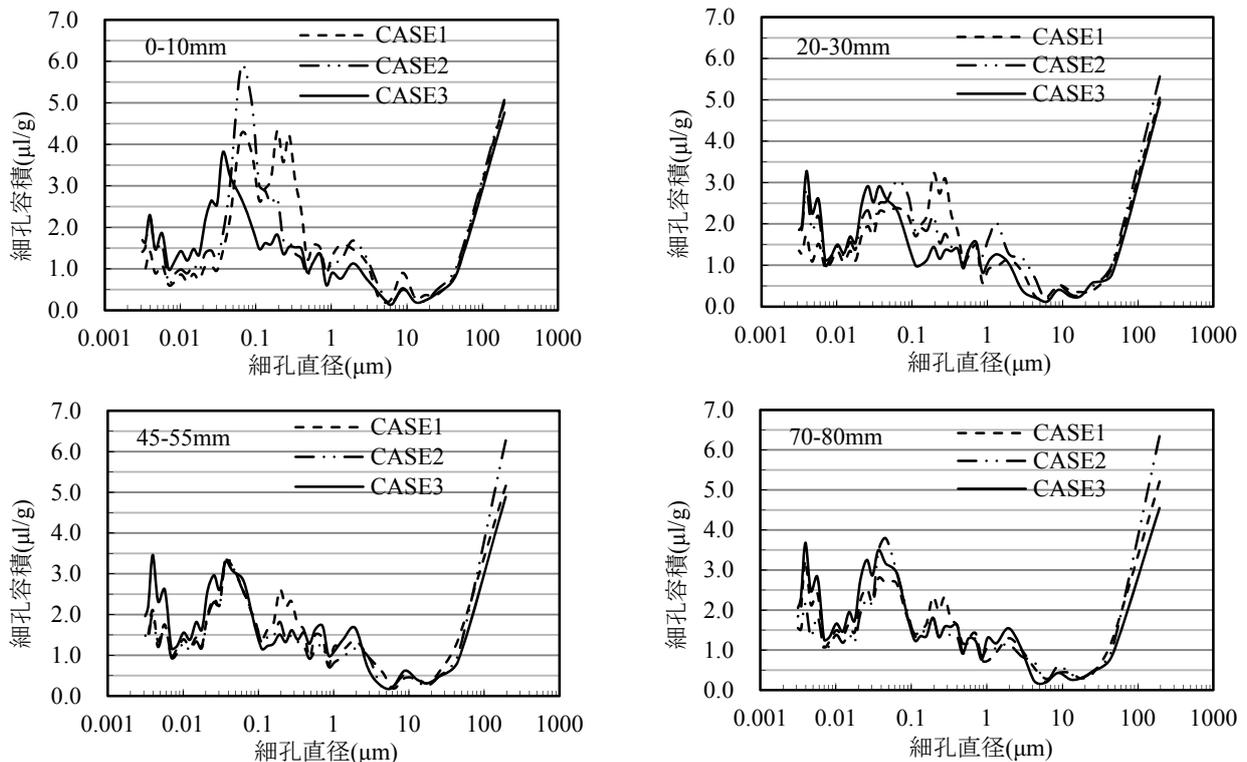


図-6 細孔径分布分析結果

### 3. 4 細孔径分布

各測定位置における細孔径分布測定結果の比較を図-6に、各測定位置における平均細孔直径を図-7に示す。かぶり以深となる45-55mm, 70-80mmではいずれのケースも概ね同様の細孔径分布を示すが、0-10mm および20-30mm では養生期間により細孔径分布の異なる結果となった。また、表面から30mmまでは養生期間が長くなるほど平均細孔直径は減少する傾向が認められるが、45-55mm についてはそのような傾向が小さくなり、70mm 以深では上記の傾向は認められなかった。以上より、本研究の範囲内では8週間の長期養生の影響範囲は表面から30mm程度といえる。

CASE1のように早期脱型後に気中養生とした場合、セメントの水和反応が十分に進行していない状態でコンクリート表面が気中にさらされるため、水分逸散によってその後のセメントの水和反応の進行が不十分となり、内部コンクリートと比較すると表層コンクリートの耐久性が低下する恐れがある。CASE1およびCASE3の細孔径分布の深さ方向の比較を図-8および図-9に示す。CASE1では測定深さによって細孔径分布曲線は大きく異なり、平均細孔直径は内部になるにつれて減少するのに対し、CASE3では細孔径分布曲線および平均細孔直径ともに大きな変化は無い。以上のことから、長期養生によって表層コンクリートの品質が表面から80mm程度の内部コンクリートと同等近くまで向上したといえる。

また、0-10mmの細孔径分布結果から、養生期間によって細孔径のピークが異なることが分かる。CASE1では0.2 $\mu\text{m}$ にピークが存在するが、CASE2では0.06 $\mu\text{m}$ 、CASE3では0.03 $\mu\text{m}$ にピークが生じている。この傾向は20-30mmの細孔径分布結果にも確認でき、養生期間が長い程、約0.1 $\mu\text{m}$ 以上の細孔量が減少し、0.1 $\mu\text{m}$ よりも微小な径の細孔が増加することが確認された。長期養生によりセメントの水和が十分に進行したと考えられる。

### 3. 5 各試験結果の比較

既往の研究<sup>10)</sup>によると、透気性および吸水性はコンクリート中の細孔が連続か不連続かによって決定され、細孔入口の径が100nm(0.1 $\mu\text{m}$ )以上の場合は連続している可能性が高く、100nm以下の空隙は閉塞していることが多いとされている。また、田中ら<sup>11)</sup>は表面透気係数には半径約0.056 $\mu\text{m}$ 以上の細孔量との相関があるとしている。透気性は表面から数mmのごく表層のコンクリートの影響を受け<sup>2)</sup>、10分間の吸水試験における水の浸入深さは10~30mmである<sup>12)</sup>という報告もある。また、前述のとおり、養生期間の差により表層コンクリートにおける細孔径分布のピークは異なる。以上より、本研究の範囲内では、各種試験結果と相関が高い細孔構造は、細孔径が0.1 $\mu\text{m}$ 以上の細孔容積と考えられる。

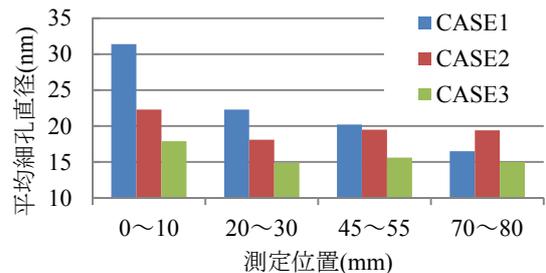


図-7 平均細孔直径

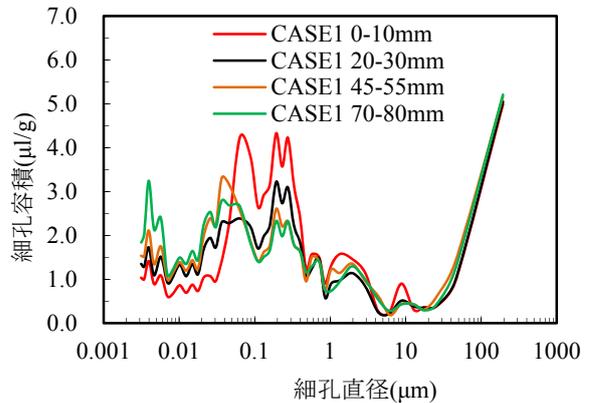


図-8 CASE1の細孔径分布

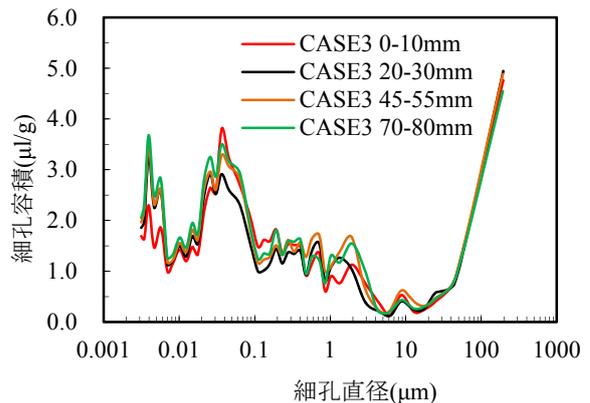


図-9 CASE-3の細孔径分布

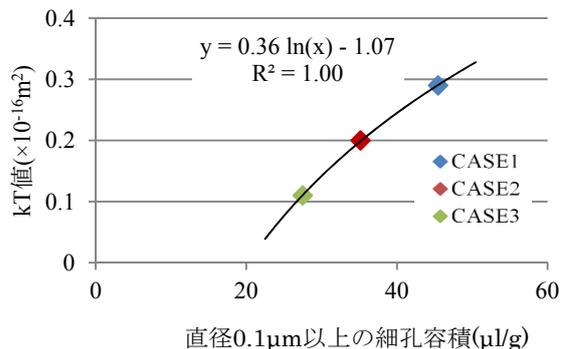


図-10 表面から10mmの深さにおける表面透気性と細孔容積の関係

そこで、0-10mmにおける0.1 $\mu\text{m}$ 以上の細孔容積と表面透気性および吸水量の関係を図-10および図-11に示す。細孔容積の減少に伴い表面透気係数および吸水量ともに減少しており、長期養生を実施することで、連続する細孔が減少し気体および水分の浸入に対する抵抗性が

向上すると考えられる。また、0-10mm の表層コンクリートにおける  $0.1\mu\text{m}$  以上の細孔容積と表面透気係数および吸水量は非常に相関が高いことが分かった。ただし、測点が少ないため、さらなるデータの蓄積が必要である。

同様に、促進中性化試験における中性化速度係数と0-10mm における  $0.1\mu\text{m}$  以上の細孔容積の関係を図-12 に示す。中性化速度係数については相関係数が 0.77 と、表面透気係数および吸水量と比較して相関の低い結果となった。この原因として、促進中性化試験開始前の中性化深さを計測していなかったことが考えられる。現場存置中に試験体の表層部が中性化した可能性があり、促進中性化試験を開始するまでにある程度の期間を設ける場合は中性化の初期値を把握する必要がある。

#### 4. まとめ

長期養生がコンクリートの耐久性に与える影響を把握するため、養生期間を要因として、表面透気性、表面吸水性、中性化抵抗性および細孔径分布のコンクリート品質について検証したところ、以下の結果が得られた。

- (1) 養生期間が長くなるほど表面透気性および吸水性が低下し、中性化に対する抵抗性が向上した。
- (2) 養生期間によって細孔径分布は異なり、養生期間が長くなるにつれてピーク値となる細孔径が減少した。また、長期養生によって直径  $0.1\mu\text{m}$  以上の細孔容積が減少し、 $0.1\mu\text{m}$  以下の細孔容積が増加した。
- (3) 長期養生した場合、表層コンクリートが緻密化し、表面から 80mm の深さのコンクリートと同等近くの品質まで向上すると考えられる。
- (4) 表面透気係数および表面吸水性は表面から 10mm の表層コンクリートにおける直径  $0.1\mu\text{m}$  以上の細孔容積と非常に高い相関を示した。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2013.3
- 2) 田中博一ら：貼付型保水・保温養生シートを用いた長期養生がコンクリートの耐久性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.136，No.1，pp.790-795，2014
- 3) 温品達也ら：長期間の水分逸散抑制養生による表層品質向上効果，土木学会第 69 回年次学術講演会，V-061，pp.121-122，2014
- 4) 近松竜一ら：コンクリートの表面貼付型養生テープの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1035-1040，2002
- 5) 宮原茂禎ら：排水・水中養生したコンクリート耐久性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，

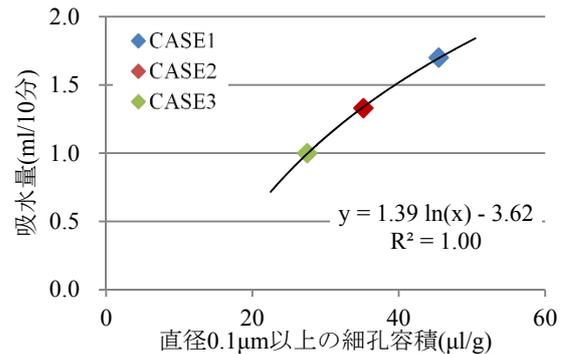


図-11 表面から 10mm における吸水量と細孔容積の関係

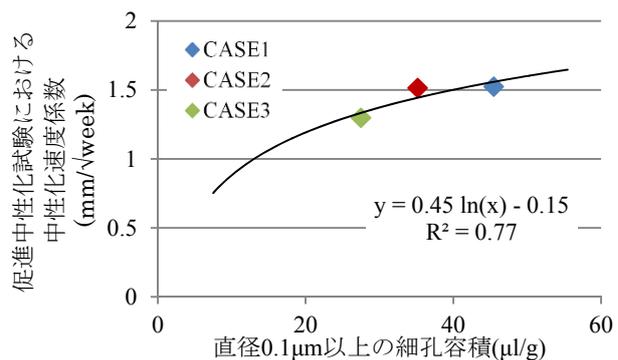


図-12 表面から 10mm における  
中性化速度係数と細孔容積の関係

pp.767-772，2011

- 6) 二村憲太郎ら：好環境下の実施工におけるコンクリート養生用製品の強度・耐久性および施工性比較，土木学会第 68 回年次学術講演会，V-109，pp.217-218，2013
- 7) R.J.Torrent，“A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site”，Materials and Structures，Vol.25，No.6，pp.358-368，1992
- 8) 林和彦ら：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，2004
- 10) 羽原俊祐：硬化コンクリートの阻止区及び空隙構造と物性に関する研究，慶応大学学位論文，1992
- 11) 田中彰夫ら：ダブルチャンバー法を用いた既存鉄筋コンクリート造建築物の中性化予測に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1691-1696，2011
- 12) 林和彦ら：埋込みセンサーを用いたコンクリートの表面吸水試験における水分移動の分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1789-1794，2013