論文　細孔構造に着目した蒸気養生コンクリートの中性化特性および塩化物イオン浸透性の評価

佐々木　優衣 *1・宇治　公隆 *2・上野　敦 *3・原 洋介 *4

要旨：本研究は，蒸気養生コンクリートを取り上げ，二次養生条件ならびに水セメント比が蒸気養生コンクリートの細孔構造や中性化特性に及ぼす影響の検討と，塩化物イオン拡散係数の把握を目的としている。実験より，二次養生として気中保管でなく水中養生を行った蒸気養生コンクリートは中性化深さが約 60%低減すること，水セメント比を 10%低減させて二回蒸気養生を行うことで水中養生と同等の中性化特性ならびに表層部の細孔構造を有すること，暴露実験より材齢進行に伴い蒸気養生コンクリートの塩化物イオン拡散係数が減少すること，が明らかとなった。

キーワード：蒸気養生，細孔構造，コンクリート製品，中性化速度係数，塩化物イオン拡散係数

1. はじめに

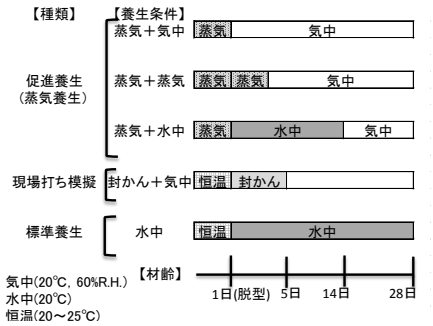
蒸気養生を行ったプレキャストコンクリート製品（以下，蒸気養生コンクリート）は早期強度が高く工期短縮に寄与する。しかし，蒸気養生後の乾燥による細孔構造の不均質化や，耐久性の低下が懸念される。これまでの研究により，蒸気養生コンクリートの細孔構造は，同一配合の標準養生コンクリートと比較して粗大になること，強度と耐久性が低下することが明らかとなっている [1)]。また，蒸気養生後気中保管したコンクリートは，水セメント比を 10%低減することで，現場打ちにおける養生を模擬して作製したコンクリート（以下，現場打ち模擬コンクリート）と同等の強度および細孔構造を有することが明らかになっている [2)]。

本研究の目的は，二次養生条件ならびに水セメント比が蒸気養生コンクリートの細孔構造や中性化特性に及ぼす影響の検討と，暴露実験による塩化物イオン拡散係数の把握である。中性化特性に関しては，蒸気養生，現場打ち模擬，標準養生の 3 種類において，耐久性が同等となる水セメント比および二次養生条件を検討した。塩化物イオン拡散係数の把握に関しては，5 年間海岸暴露した供試体を用いて，塩化物イオン分布の把握と拡散係数の算出を行い，塩化物イオンの透過性状を検討した。

2. コンクリートの細孔構造および中性化特性に関する実験

2.1 検討要因

供試体は，**図－１**および**表－１**に示す通り，蒸気養生，現場打ち模擬，標準養生の 3 種類とした。蒸気養生コンクリートについては，蒸気養生後のコンクリート表層からの乾燥が，強度発現や耐久性に与える影響を検討するため，蒸気養生後に気中保管するもの，蒸気養生後に水中養生するもの，新しい養生条件として二回蒸気養生をするもの，の 3 水準とした。水中養生は，製品出荷時の目安となる材齢 14 日まで行い，以降，気中保管とした。なお，二回蒸気養生を行った供試体は，水蒸気による水分供給を期待している。現場打ち模擬コンクリートについては，実際の現場施工で，最低，材齢 5 日まで湿潤養生するよう土木学会コンクリート標準示方書[施工編]で規定されていることから，水分供給が少ない環境を模擬する封緘養生(5 日間)とし，その後気中保管とした。



図－１　検討要因および養生条件

表－１　供試体諸元

種類	養生条件				W/C (%)	記号
	一次養生	二次養生				
促進養生	蒸気養生 (s)	気中（d）			40	s40-d
					45	s45-d
					50	s50-d
		蒸気養生 (s)	最高温度保持時間	4時間	45	s45-s1
				11.5時間	45	s45-s2
		水中(14日まで)（w）			45	s45-14w
					55	s55-14w
現場打ち模擬（n）	封緘(5日間)→気中（rd）				45	n45-5rd
					55	n55-5rd
標準養生(n)	水中(28日まで)				55	n55

*1 首都大学東京大学院　都市環境科学研究科　都市基盤環境学域　(学生会員)
*2 首都大学東京大学院　都市環境科学研究科　都市基盤環境学域　教授　博士(工学)　(正会員)
*3 首都大学東京大学院　都市環境科学研究科　都市基盤環境学域　准教授　博士(工学)　(正会員)
*4 東京セメント工業株式会社　開発事業部　(正会員)

2.2 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を**表－２**に，配合を**表－３**に示す。配合は，実際に用いられているものを参考に決定した。水セメント比は，40，45，50，55%の４種類である。なお，水セメント比 45%の蒸気養生コンクリートと，水セメント比 55%の現場打ちコンクリートが一般的に施工されている水セメント比である。

2.3 蒸気養生条件

一回目の蒸気養生における温度履歴は，**図－２**(a)に示すように，比較的大型のプレキャストコンクリート製品に適用される１日１サイクルの条件とした[3)]。また，蒸気養生を二回行う場合，**図－２**(a)の蒸気養生後に脱型し，その供試体に**図－２**(b)の二回目の蒸気養生を行った。

2.4 試験項目

(1) フレッシュ性状

JIS A 1101，JIS A 1128 および JIS A 1156 に従ってスランプ，空気量，練上がり温度の測定を行った。

(2) 細孔径分布試験

100×100×400mm の角柱供試体を作製し，細孔径分布試験を行った。供試体は，気中保管開始時点において，打設側面を一面のみ残し，その他の面をエポキシ樹脂でシールし，材齢 28 日まで養生を継続した。コンクリート表層部(0～10 mm)は内部に比べ乾燥の影響により細孔構造の変化が顕著である[4)]ことを考慮し，**図－３**に示すように，深さごとに試料(採取範囲:0mm～30mm)を採取し，水銀圧入式ポロシメーター(測定範囲:5nm～400μm)を用い，細孔直径および細孔容量を測定した。

(3) 促進中性化試験

JIS A 1152 および JIS A 1153 に準拠し，促進中性化試験を実施した。供試体は，100×100×400mm の角柱供試体である。所定の養生の後，材齢 8 週時点で，打設時の 1 側面を除く 5 面をエポキシ樹脂でシールした。その後，供試体を二酸化炭素 5%，温度 20℃，湿度 60%の促進中性化槽内に移動して促進中性化試験を行い，中性化速度係数を促進材齢 16 週で求めた。

(4) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠し，φ100×200mm の円柱供試体を各 3 体用いた。試験は材齢 28 日で行った。

2.5 フレッシュ性状試験結果

コンクリートのフレッシュ性状を**表－４**に示す。あらかじめ目標スランプ 10cm，空気量 4.5%で試験練りを行って配合を決定したが，実際には多少のばらつきが生じ，スランプ 8～14.5cm，空気量 3.6～5.0%であった。

2.6 水セメント比に着目した検討

水セメント比 40，45，50%で蒸気養生後に気中保管したコンクリート(s40-d，s45-d，s50-d)と，水セメント比 45，55%で二次養生として水中養生を行い，水分供給を受けた蒸気養生コンクリート(s45-14w，s55-14w)の比較を行った。

(1) 細孔構造

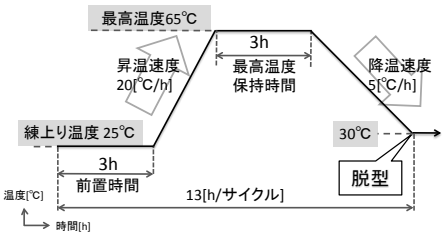
既往の研究で，中性化の進行に支配的な影響を及ぼすのは 40nm 以上の細孔量であるとされている[5), 6)]こと

表－２　使用材料

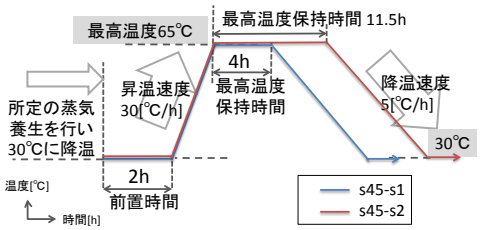
結合材	普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm^3
細骨材	砕砂，表乾密度 2.63g/cm^3
粗骨材	砕石，表乾密度 2.66g/cm^3
混和剤	AE剤：アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
	AE減水剤：ポリカルボン酸エーテル系

表－３　コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C(%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3) 水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE剤
20	40	44	170	425	750	970	3.20	0.86
	45	46	170	378	801	955	2.66	1.14
	50	47	170	340	834	954	2.03	1.03
	55	48	170	309	864	950	1.54	0.91

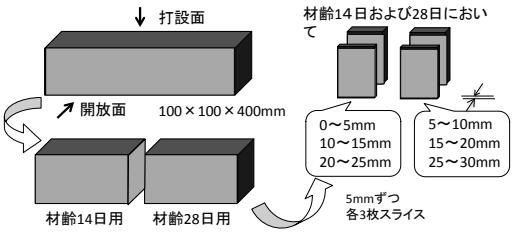


(a)　一回目の蒸気養生



(b)　二回目の蒸気養生

図－２　蒸気養生条件



図－３　細孔径分布試験用試料作製

表－４　コンクリートのフレッシュ性状

W/C(%)	練上がり温度	スランプ	空気量
40	28.3℃	14.5cm	5.0%
45	28.8℃	12.0cm	4.5%
50	27.6℃	9.0cm	4.6%
55	28.9℃	8.0cm	3.6%

から，コンクリートの表層部である開放面から深さ0-10mm 部分における，40nm 以上の細孔量を平均した値に着目して比較を行う。気中保管または水中養生を行った蒸気養生コンクリートの，材齢 28 日における深さ0-10mm 部分の 40nm 以上の細孔量を**図－４**に示す。

水セメント比 45%で蒸気養生後に気中保管したコンクリート s45-d を基準に比較する。図より，s40-d と s45-14w の値が同等であり，水中養生を行うことで水セメント比 5%分を補うと考えることができる。また，s45-14w は s45-d より細孔量が約 15%減少している。なお，s45-d と s50-d に大きな差はなく，水セメント比の低減による細孔量の変化は一定でないことが分かる。

なお，水セメント比 55%で水中養生を行った s55-14w は s45-d や s50-d よりも細孔量が少なくなり，蒸気養生後の水中養生の効果が認められる。

(2) 中性化速度係数

促進材齢 16 週における中性化速度係数を**図－５**に示す。図から，蒸気養生コンクリートは水セメント比を5%低減するごとに、中性化速度係数が 30%程度減少すると言える。また，蒸気養生後に水中養生を行うことにより，中性化特性が大きく改善している。

(3) 圧縮強度

材齢 28 日の圧縮強度を**図－６**に示す。気中保管した蒸気養生コンクリート s50-d の圧縮強度が最も低く，水中養生を行った s55-14w の方が高い値を示した。

2.7 二回蒸気養生の効果

(1) 細孔構造

二回蒸気養生を行ったコンクリートの，材齢 28 日における深さ 0-10mm 部分の 40nm 以上の細孔量を**図－７**に示す。s45-d と比較すると，二回蒸気養生を行った s45-s1, s45-s2 は 10%細孔量が減少し，蒸気養生後水中養生を行った s45-14w は 15%細孔量が減少した。また，s45-s1 と水セメント比が 10%大きい s55-14w の値が同等であり，二次養生の効果は両者同程度と考えられる。

(2) 中性化速度係数

促進材齢 16 週時点の中性化速度係数を**図－８**に示す。s45-d と s55-14w の値が同等であり，水中養生の効果は水セメント比 10%相当と見込まれる。また s45-d と比較すると，二回蒸気養生を行った s45-s1，s45-s2 は 20%減少し、水中養生を行った s45-14w は 60%中性化速度係数が減少した。このことからも，中性化抵抗性の向上に対する蒸気養生後の水中養生が有効であると言える。

(3) 圧縮強度

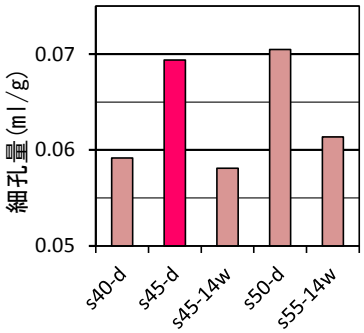
材齢 28 日における圧縮強度を**図－９**に示す。水セメント比 45%の蒸気養生コンクリートにおいて，圧縮強度向上に対する二回蒸気養生の効果は明確でなかった。

2.8 現場打ち模擬と蒸気養生の比較

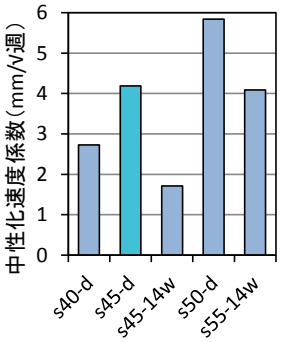
水セメント比 55%の n55（標準養生）を基準に，蒸気養生と現場打ち模擬のコンクリートについて検討する。

(1) 細孔構造

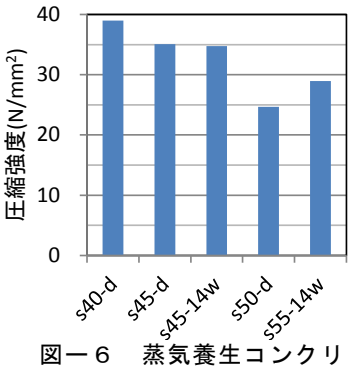
図－１０に，蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬



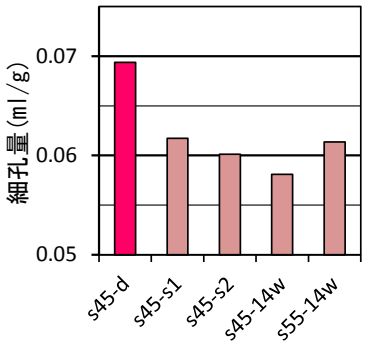
図－４　蒸気養生コンクリート表層部の 40nm 以上の細孔量



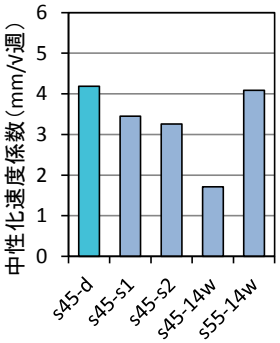
図－５　蒸気養生コンクリートの中性化速度係数



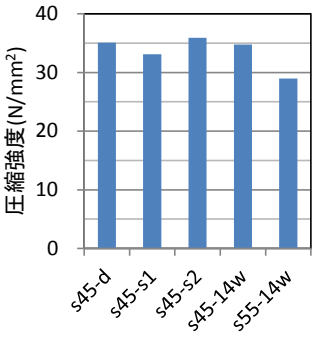
図－６　蒸気養生コンクリートの圧縮強度



図－７　二回蒸気養生をしたコンクリート表層部の 40nm 以上の細孔量



図－８　二回蒸気養生をしたコンクリートの中性化速度係数



図－９　二回蒸気養生をしたコンクリートの圧縮強度

コンクリートの，材齢28日における深さ0-10mm部分の40nm以上の細孔量を示す。s45-dはn55-5rdと同様の細孔量で，蒸気養生コンクリートは現場打ち模擬コンクリートよりも水セメント比を 10%程度低減することで同等の細孔構造となる。また，s45-14wはn45-5rdならびにn55とほぼ同じである。s45-dに対してs45-14wは15%，n55-5rdに対して n55は20%細孔量が少ないことから，蒸気養生，現場打ち模擬ともに、水中養生が細孔構造を緻密にするために重要であると言える。

(2) 中性化速度係数

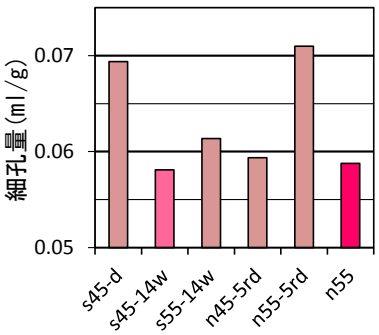
促進材齢16週時点の中性化速度係数を**図－１１**に示す。n55と近い値となる蒸気養生コンクリートは，水セメント比を10%低減したs45-dと，水セメント比55%で蒸気養生後水中養生したs55-14wであることが分かる。すなわち，蒸気養生コンクリートにおいては，水セメント比の低減または蒸気養生後の水中養生を適切に考慮する必要がある。

(3) 圧縮強度

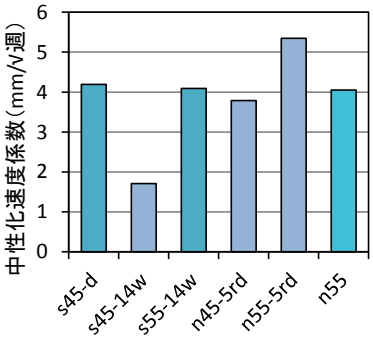
蒸気養生と現場打ち模擬コンクリートの材齢28日における圧縮強度を**図－１２**に示す。水セメント比を10%低減することで，圧縮強度は約30%増加する。なお，圧縮強度の観点からは，蒸気養生と現場打ちによる大きな差は見られない。

2.9 コンクリートの深さ方向の細孔径分布

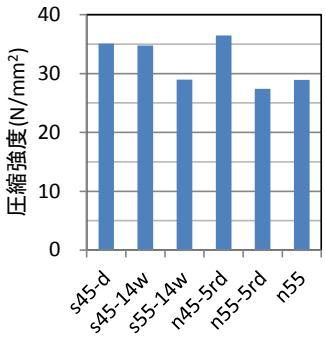
材齢 28 日における深さ方向の細孔径分布を**図－１３**に示す。全体の傾向として，水セメント比が低い，二次養生を行う，現場打ち模擬，などの要素を含むコンクリートは 100nm-1μm の細孔量が少なく，また総細孔量も少なくなる。**図－１３**(a)～(g)の蒸気養生コンクリートの細孔径分布において，(a)s40-d 以外は深さ方向で細孔



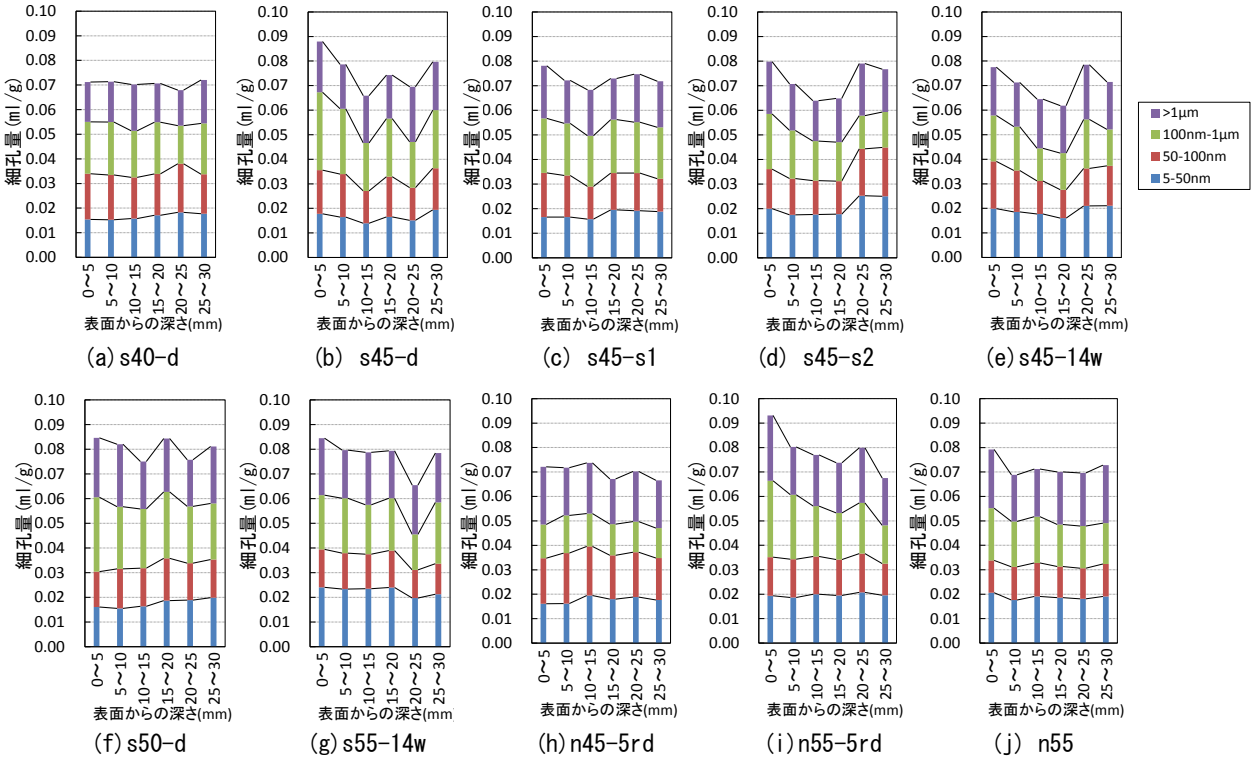
図－１０　蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの表層部の 40nm 以上の細孔量



図－１１　蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの中性化速度係数



図－１２　蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの圧縮強度



図－１３　コンクリートの材齢 28 日における深さ方向の細孔径分布試験結果

径分布が変化している。また，**図―１３(h)～(j)**の現場打ち模擬コンクリートは(i)n55-5rdを除いた2ケースで深さ方向に均一であり，特に 100nm-1μm の細孔量が少ない。(h)n45-5rd のように深さ方向に均一で細孔量の少ない供試体は，乾燥開始前に水和反応が進み組織形成されていたものと推察される。

なお，(b)s45-d と(i)n55-5rd は，表面からの深さの中でも特に 0~10mm の細孔量が多くなっている。これは，細孔構造が疎である早期材齢の間に表層部が乾燥したためと推測される。(a)s40-d (b)s45-d (f)s50-d を比較すると，水セメント比が低い供試体ほど，100nm 以上の細孔量が少なく，総細孔量も少ないため，密な細孔構造が形成されていると言える。ただし，s45-d と s50-d は，表層部の 40nm 以上の細孔量が近い値であり，水セメント比の低減と疎な細孔量の減少には明確な比例関係はないと判断できる。

2.10 細孔径分布の深さ方向の特異的変化

材齢 28 日の s45-s2 と s45-14w においては，開放面から 20-30mm 部分の細孔量が 10-20mm 部分に比べて多いという傾向がある。これについて，既往の研究をも参考に，表層近くの湿度・温度分布に着目し検討する。佐藤ら [7]は，普通コンクリートの湿度分布について，水セメント比に関わらず表層から 50mm までは湿度が低下し，概ね，深さ 20mm まで乾燥の影響が大きいとしている。また齋藤ら [8]は，相対湿度と表面からの温度について検討し，表面では相対湿度 75%，深さ 10mm 位置では同 90%，30mm 位置では同 98-100%となり，内部温度は 50℃の養生槽内で 40-45℃という低い値であったとしている。

これらを踏まえて今回の測定結果について考えると，s45-s2 と s45-14w の供試体においては，開放面から深さ 0-20mm 部分までが乾燥の影響を受けるものの，20-30mm 程度は温度と湿度が適当に確保され，水和反応が進行したものと考えられる。

3. 塩化物イオン浸透性に関する実験

海洋環境下にある鉄筋コンクリート構造物の塩害は，蒸気養生コンクリートにおいても重要な課題である。蒸気養生コンクリートの塩化物イオン分布の把握と拡散係数の算出により，塩化物イオン透過性状を検討した。

W/C=40%，50%の試験体（100×100×400mm の角柱供試体）を，飛来塩分量が多い伊豆海洋公園内の暴露場に設置した。暴露材齢 5 年の測定結果に関して考察し，さらに，暴露材齢 1 年および 2 年における結果と合わせて比較検討を行う。

3.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を**表－５**に，配合を**表－６**に示す。配合は実際のプレキャストコンクリート製品を参考に決定した。

3.2 供試体

供試体は，水セメント比 40%および 50%で蒸気養生後に気中保管した蒸気養生コンクリート s40-d，s50-d と，水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリート n50-5rd である。蒸気養生は比較的大型のプレキャストコンクリート製品に適用される 1 日 1 サイクルの条件とした。

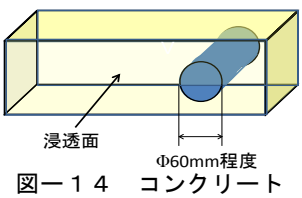
全塩化物イオン量分布は，**図―１４**に示す通り、φ60mm 弱のコアを採取し，**図―１５**のように，乾式のコンクリートカッターを用いてスライスして測定した。

表－５　使用材料（塩化物イオンの検討）

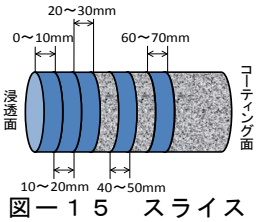
項目	品質
結合材	普通ポルトランドセメント，密度 3.16 g/cm³
粗骨材	砕石2005，表乾密度 2.62 g/cm³
細骨材	砕砂，表乾密度 2.62 g/cm³
混和剤	高性能減水剤(WR)：ポリカルボン酸エーテル系
	AE助剤(AE)：変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表－６　コンクリートの配合（塩化物イオンの検討）

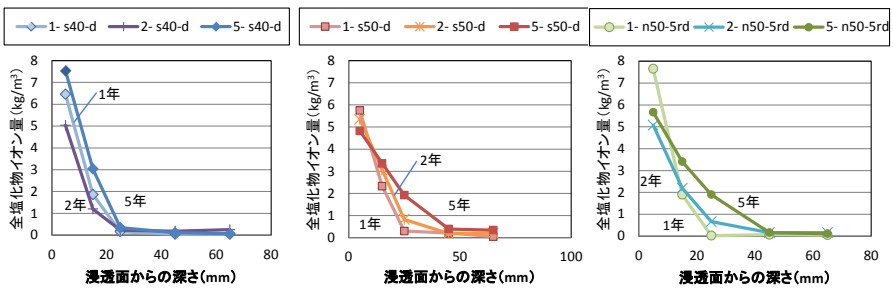
粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C(%)	s/a (%)	単位量(kg/m³) 水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE剤
20	40	43	170	425	733	971	1.70	0.02
	50	44		340	781	994	1.36	0.02



図－１４　コンクリートコアの採取



図－１５　スライス箇所と塩分測定位置

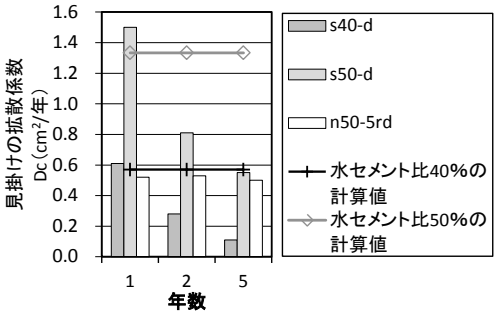


(a) s40-d　(b) s50-d　(c) n50-5rd

図－１６　全塩化物イオン量の分布

表－７　見掛けの拡散係数と水セメント比による拡散係数の計算値

材齢	記号	見掛けの拡散係数Dc (cm²/年)	W/Cによる計算値 (cm²/年)
1年	s40-d	0.61	0.57
	s50-d	1.50	1.33
	n50-5rd	0.52	1.33
2年	s40-d	0.28	0.57
	s50-d	0.81	1.33
	n50-5rd	0.53	1.33
5年	s40-d	0.11	0.57
	s50-d	0.55	1.33
	n50-5rd	0.50	1.33



図ー１７　各養生条件の見掛けの拡散係数

3.3 塩化物イオン量分布

全塩化物イオン量の分布を**図ー１６**に示す。水セメント比が低くなると，コンクリート内部にかけて塩化物イオン量の低下割合が大きいことがわかる。

3.4 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

実験より得られた塩化物イオン量分布から，フィックの第 2 法則に基づく拡散方程式の解[9]を用いて回帰分析を行い，示方書[施工編]から水セメント比によって拡散係数を計算した。暴露材齢 1，2，5 年における見掛けの拡散係数(Dc)と，水セメント比による拡散係数の計算値を，**表ー７**と**図ー１７**に示す。実験から得た見掛けの拡散係数の値は，水セメント比による予測値を大きく下回っており，材齢 5 年では予測値の 20～40%となっている。

設計段階で用いる塩化物イオンの拡散係数は，一般に，水セメント比をもとに計算され，経過年数は考慮しないが，供試体の測定からは，設置初期では材齢進行に伴い変化することが伺われる。すなわち，蒸気養生コンクリートは現場打ちコンクリートより，塩化物イオンの拡散係数は大きいが，材齢進行に伴って拡散係数が減少し，暴露材齢 5 年では両者ともほぼ同等とみなしてよい。

4. まとめ

蒸気養生コンクリートの養生条件や水セメント比が細孔構造や中性化特性に及ぼす影響の検討と，塩化物イオン拡散係数の把握を行った。本研究で設定した試験条件下で，以下のことが明らかとなった。

(1) 蒸気養生コンクリートは，水セメント比を 5%低減するごとで中性化速度係数が 30%程度減少する。

(2) 蒸気養生後に気中保管した水セメント比 45%のコンクリート s45-d は，水セメント比が 10%高い（55%）一般的な現場打ちコンクリート n55-5rd と，概ね，細孔量および中性化特性が等しいと言える。

(3) 二次養生として水中養生を行った s45-14w は，s45-d と比べて，40nm 以上の細孔量が約 15%減少し，中性化速度係数が約 60%減少しており，蒸気養生後の水中養生による中性化抵抗性の向上が認められた。

(4) 二回蒸気養生を行った蒸気養生コンクリート s45-s1 および s45-s2 は，s45-d と s45-14w の中間の中性化速度係数を示した。s45-s1，s45-s2 は，s45-d と比較して，40nm 以上の細孔量が約 10%減少し，中性化速度係数が約 20%減少する。

(5) 二回蒸気養生を行ったコンクリート(s45-s1，s45-s2)と，水セメント比が 10%高く材齢 14 日まで水中養生を行った蒸気養生コンクリート(s55-14w)は，中性化特性，表層部の細孔構造が同等である。

(6) 塩化物イオン拡散係数 Dc を把握した。初期段階において，蒸気養生コンクリートは現場打ち模擬コンクリートより塩化物イオンの拡散係数は大きいが，材齢の進行に伴って拡散係数が減少し，暴露材齢 5 年では同等の値を示すことが明らかとなった。

参考文献

1) 住吉　宏，窪山　潔，今橋太一，塩谷　勝：コンクリートの組織や物性におよぼす蒸気養生の影響，セメント技術年報，Vol.35，pp.290-293，1981.12

2) 寺川麻美，宇治公隆，上野敦，大野健太郎：プレキャストコンクリート製品の細孔構造に及ぼす養生条件の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.469～474，2012

3) 丸山晃平，宇治公隆，上野　敦，大野健太郎：蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.571-576，2011.6

4) 郭度連，宇治公隆，國府勝郎，上野　敦：乾燥によるコンクリート組織の不均質化，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.711-716，2002.6

5) 関　健吾，宇治公隆，上野　敦，原　洋介：蒸気養生を実施したコンクリートの細孔構造および中性化性状，土木学会第 65 回年次学術講演会，pp.605-606，2010.9

6) 郭度連，宇治公隆，國府勝郎，上野　敦：養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価，土木学会論文集，Vol.57，No.718，pp.59-68，2002.11

7) 佐藤 健太朗，伊代田 岳史：養生方法やセメントの相違がコンクリートの内部湿度・乾燥収縮に与える影響，第 37 回土木学会関東支部技術研究発表会 No. 05，pp. V-1，2010

8) 齋藤 寛泰，小澤 満津雄，阪口 裕紀，森本 博昭：蒸気養生を行ったプレキャストコンクリート部材の初期応力に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，2011

9) コンクリート標準示方書【規準編】土木学会規準および関連規準，p.332，2010