

## 論文 PCa コンクリートの促進中性化に関する研究

大和 功一郎\*<sup>1</sup>・増渕 敏行\*<sup>2</sup>・安田 弘喜\*<sup>3</sup>・阿部 道彦\*<sup>4</sup>

**要旨:** 既往の中性化に関する研究は、ほとんどが標準養生したコンクリートを対象としており、蒸気養生したコンクリートの中性化に関する研究は少なく十分な基礎データが整っていない。本研究では、住宅 PCa パネル用コンクリートの中性化を適正に評価するため、蒸気養生したコンクリートについて促進中性化試験を実施した。その結果、蒸気養生した場合も促進期間と中性化深さの関係を表す $\sqrt{t}$ 則が成り立つこと、蒸気養生後に水分が逸散しない養生をした場合、標準養生と同等の中性化を示すことおよび特定の細孔径以上の細孔容積と中性化速度係数に高い相関がみられることがわかった。

**キーワード:** PCa コンクリート, 促進中性化, 蒸気養生, 標準養生, 水セメント比, 細孔径分布

### 1. はじめに

既往の中性化に関する研究は、ほとんどが標準養生したコンクリートを対象としており、蒸気養生したコンクリートの中性化に関する研究は少ない<sup>1),2)</sup>。また、実際のコンクリート製品は蒸気養生により製造し、屋外で保管されることが多いが、蒸気養生後の保管方法の違いによる中性化への影響についても不明な点が多い。

そこで本研究では、蒸気養生により製造した住宅 PCa パネル用コンクリートの中性化を適正に評価するために、水セメント比および養生条件を変化させたコンクリートについて促進中性化試験を実施し、圧縮強度、細孔径分布等との関係を調べた。

### 2. 実験

#### 2.1 実験概要

中性化の進行には調合や養生条件の影響が大きいことが知られていることから、水セメント比および養生条件を変化させて、圧縮強度および細孔径分布を測定した。

水セメント比は、PCa パネル用コンクリートとしてよく用いられている範囲を含む 40~60%とした。

養生条件は、蒸気養生後脱型し、屋外ストックヤードで保管することを想定して、蒸気養生後気中養生するものと、蒸気養生後封かん養生するものとした。蒸気養生後気中養生するものは、屋外で連日降雨がない場合を想定したものであり、水和の進行に対して不利な条件である。蒸気養生後封かん養生するものについては、連日降雨があるなど乾燥しにくい場合を想定したものであり、水和の進行に対して有利な条件である。また、比較用として標準養生した場合についても実施した。

表-1 に実験に用いたコンクリートの水セメント比お

よび促進中性化開始までの養生方法の水準を示す。

#### 2.2 使用材料および調合

表-2 に実験に用いたコンクリートの使用材料を示す。また、表-3 にコンクリートの調合およびフレッシュ性状を示す。目標スランプは、水セメント比 60%および 50%の場合 5.0±1.5cm, 45%および 40%の場合 2.0±1.5cm とした。また、目標空気量は 4.5±1.0%とした。

#### 2.3 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、強制 2 軸練りミキサ (容量 55L) を使用した。1 バッチの練混ぜ量は 35L とした。練混ぜ方法は、細骨材、セメントおよび水 (混和剤含む) をミキサに投入し、30 秒間混合した後、粗骨材を投入し、90 秒間混合することとした。

#### 2.4 促進中性化供試体の成形および促進開始までの養生

促進中性化試験に用いる供試体の寸法は 10×10×40cm とした。脱型は、成形後 1 日で行った。

標準養生する供試体は、20°C水中で 4 週間養生の後、温度 20°C, 相対湿度 60%の恒温恒湿室で 4 週間乾燥させた。蒸気養生する供試体は、図-1 に示す条件で蒸気養生を行なった。蒸気養生後気中養生する供試体は、脱型後、温度 20°C, 相対湿度 60%の恒温恒湿室で 6 週間乾燥させた。蒸気養生後封かん養生する供試体は、脱型後、ポリエチレンフィルムで密封し、温度 20°Cの恒温室で 2 週間封かん養生した後、温度 20°C, 相対湿度 60%の恒温恒湿室で 4 週間乾燥させた。その後、供試体の側面 2 面を残し、上面、下面および両端面をエポキシ樹脂でシールした。

#### 2.5 促進中性化試験方法

中性化の促進は、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じ、温度 20±2°C, 相対湿度 60±5%,

\*1 (株) 宇部三菱セメント研究所 宇部センターコンクリートグループ主任研究員 工修 (正会員)

\*2 レスコハウス (株) 企画・技術部部长 (非会員)

\*3 百年住宅西日本 (株) 技術設計部課長 (非会員)

\*4 工学院大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

二酸化炭素濃度 5±0.2%の環境で行った。促進期間は26週までとした。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
促進中性化開始までの養生	標準養生4週間, その後4週間乾燥
	蒸気養生後6週間乾燥
	蒸気養生後2週間封かん, その後4週間乾燥
水セメント比(%)	40, 45, 50, 60

表-2 使用材料

材料名	銘柄・品質
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	・海砂, 北九州市産, 表乾密度:2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.34%, 粗粒率:2.66 ・砕砂(硬質砂岩), 北九州市産, 表乾密度:2.68g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.36%, 粗粒率:2.79 (海砂と砕砂の比率は1:1とした。)
粗骨材	砕石 2005(硬質砂岩), 山口県山口市産, 表乾密度:2.70g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.56%, 実積率:60.6%
混和剤	高性能減水剤:ポリカルボン酸エーテル系 AE減水剤:リグニンスルホン酸系 空気量調整剤

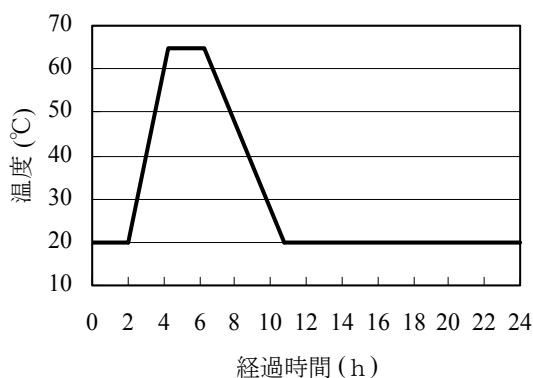


図-1 蒸気養生条件

中性化深さの測定は, JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準じて行った。測定時期(4, 8, 13, 26週)に達した時点で供試体端部から4cmの位置で割裂し, 割裂面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧後, コンクリート表面から着色部までの距離をノギスで計測した。計測箇所は1側面につき6等分した5箇所とし, 中性化深さの値は3個の供試体, 合計30箇所の中性化深さの平均値とした。

## 2.6 圧縮強度試験方法

圧縮強度試験は, JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。供試体はφ10×20cmの円柱供試体とした。

## 2.7 細孔径分布の測定方法

細孔径分布の測定に用いる供試体は, φ10×20cm円柱供試体とした。促進中性化開始材齢(乾燥期間終了時)において, 供試体の中央付近からモルタル部の試料を採取し, 2.5~5.0mmに破碎して, アセトンによる水和停止およびD-dry法による乾燥を行い, 水銀圧入式ポロシメーターによって, 直径7.5~7500nmの範囲の細孔径分布を測定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 中性化進行に及ぼす養生条件の影響

図-2に各水セメント比, 各養生条件における促進中性化深さの経時変化を示す。

各養生条件を比較すると, 標準養生および蒸気養生後封かん養生した場合は同様の傾向にあり, 蒸気養生後気中養生した場合は, 他の養生条件に比べて中性化深さが大きいことがわかる。これは, 2週間の気中養生により供試体の表面の乾燥が進み, 養生が不十分になり, その分, 初期の中性化が進んだためと考えられる。

水セメント比の影響については, 水セメント比が大きいほど, 初期の中性化の伸びが大きくなっているが, 促進中性化期間が長くなると伸びが緩やかとなった。標準養生および蒸気養生後封かん養生した場合, 水セメント比40%では, 4週から8週の間で中性化深さはほぼ横ばいもしくは減少し, その後再び増加している。

図-3に各水セメント比, 各養生条件における促進中

表-3 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

水セメント比 (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )						スランブ (cm)	空気量 (%)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤			
					AE減水剤	高性能減水剤		
60	164	273	916	965	0.683	—	5.5	5.0
50	160	320	888	965	0.80	—	5.0	4.2
45	145	322	925	965	—	2.256	3.0	4.7
40	138	345	925	965	—	3.105	2.5	4.6

性化期間 ( $\sqrt{t}$  週) と中性化深さとの関係を示す。また、**図-3** には、 $\sqrt{t}$  則が成り立つとして試験結果から算出した中性化速度係数およびその相関係数を示した。

各養生条件を比較すると、**図-2** と同じく、標準養生および蒸気養生後封かん養生した場合と同様の傾向にあり、蒸気養生後気中養生した場合が、他の養生条件に比べて中性化深さが大きくなった。

水セメント比の影響については、50%および60%の場合、養生条件に関わらず、ほぼ直線的な関係が認められた。水セメント比40%の場合、上述のとおり、促進中性化期間4週から8週にかけて、中性化深さが横ばいもしくは小さくなる現象がみられた。このため、促進中性化期間 ( $\sqrt{t}$  週) と中性化深さとの回帰式の相関が低くなった。しかし、全体としては養生条件に関わらず、ほぼ直線的であり、蒸気養生した場合についても、標準養生した場合と同様に $\sqrt{t}$  則が成り立つと考えられる<sup>3)</sup>。

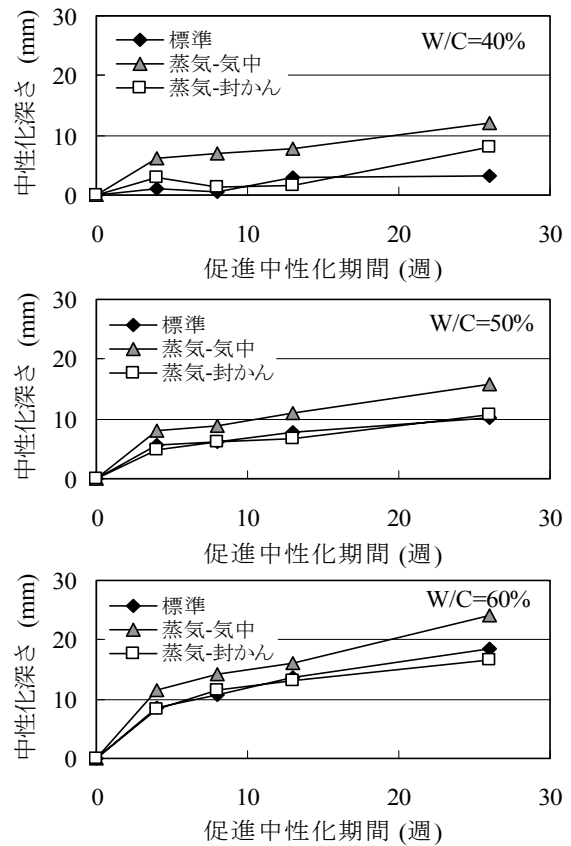
### 3.2 水セメント比と中性化速度係数

**図-4** に水セメント比と中性化速度係数との関係を示す。水セメント比が大きいほど、中性化速度係数は大きくなる傾向が認められた。標準養生した場合は、水セメント比と中性化速度係数の関係は、ほぼ直線的な関係であることが確認された。蒸気養生後封かん養生した場合は、水セメント比40、45%の場合、標準養生した場合よりもやや中性化速度係数が大きくなる傾向がみられたが、その差は小さく、ほぼ同等と考えられる。また、蒸気養生後気中養生した場合は、水セメント比に関わらず、標準養生および蒸気養生後封かん養生した場合よりも中性化速度係数が大きくなり、水セメント比が小さいほど顕著となる傾向がみられた。このことから、蒸気養生する場合、その後の養生において水分の逸散を防止することにより、中性化の進行を抑制できることが確認された。

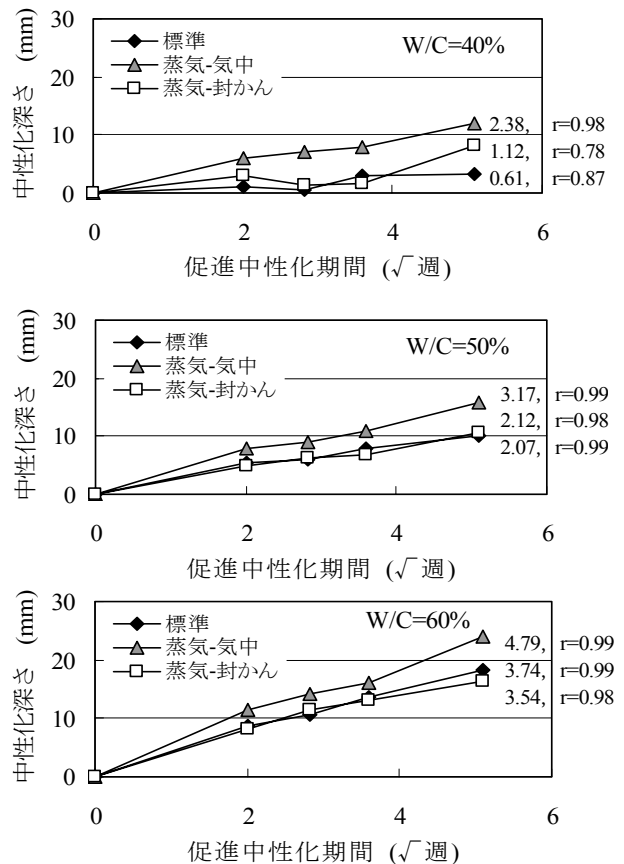
### 3.3 圧縮強度と中性化速度係数

**図-5** に促進中性化試験開始時における、圧縮強度と中性化速度係数との関係を示す。いずれの養生条件についても、圧縮強度が大きいほど中性化速度係数は小さくなったが、その関係は養生条件によって異なり、蒸気養生後封かん養生した場合は、他の養生条件の場合と比べて同一圧縮強度でも中性化速度係数が小さくなる傾向がみられた。

既往の研究<sup>4)</sup>では、コンクリートの圧縮強度と中性化速度係数との関係は、水中養生を行った場合、ほぼ直線的な関係であり、非常に高い相関を示すことが報告されている。蒸気養生した場合のコンクリートの圧縮強度と中性化速度係数との関係は、蒸気養生後の養生条件に応じて、両者の関係がやや異なる可能性があると考えられる。



**図-2** 促進中性化深さの経時変化



**図-3** 促進中性化期間と中性化深さ

(**図中数字**は中性化速度係数  $\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$ 、相関係数)

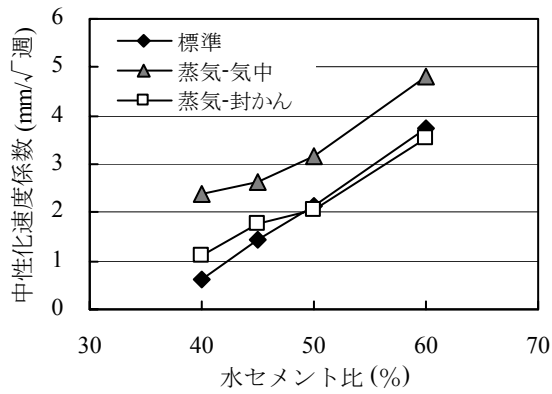


図-4 水セメント比と中性化速度係数

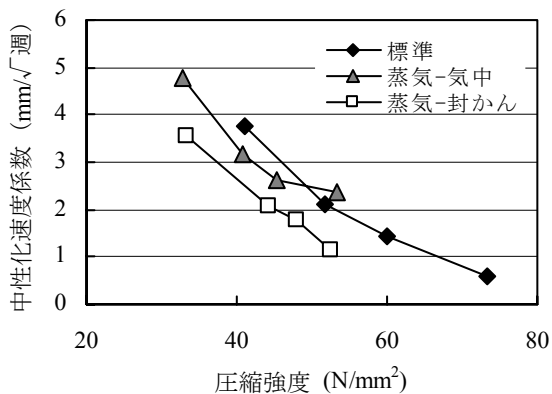


図-5 圧縮強度と中性化速度係数

### 3.4 細孔径分布に及ぼす養生条件の影響

図-6 に各水セメント比、各養生条件における促進中性化試験開始時の細孔径分布を示す。また、図-7 に各水セメント比、各養生条件における細孔直径毎の細孔容積を示す。

図-6 から、ピークとなる細孔直径は、蒸気養生後気中養生 > 標準養生 > 蒸気養生後封かん養生の順に大きくなった。これは、蒸気養生後気中養生した場合、乾燥の影響により、標準養生または封かん養生した場合よりも水和の進行が遅くなったためと考えられる。水セメント比の影響については、これが大きいほど、ピークとなる細孔直径は大きくなった。これは、水セメント比が大きいほど、水和物で充填されていない空隙が多く残っているためと考えられる。

図-7 から、水セメント比が大きいほど、総細孔容積は多くなった。総細孔容積に及ぼす養生条件の影響は判然としなかった。ただし、細孔直径毎の細孔容積は、養生条件により異なる傾向を示した。蒸気養生後気中養生した場合、細孔容積は 7.5~75nm が少なく、75~750nm が多くなった。標準養生および蒸気養生後封かん養生した場合の細孔容積は、7.5~75nm が多く、75~750nm が少なくなった。

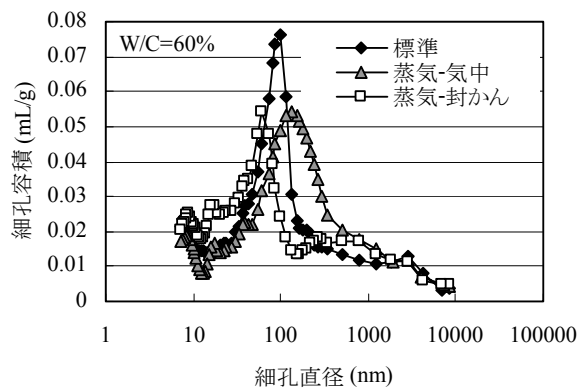
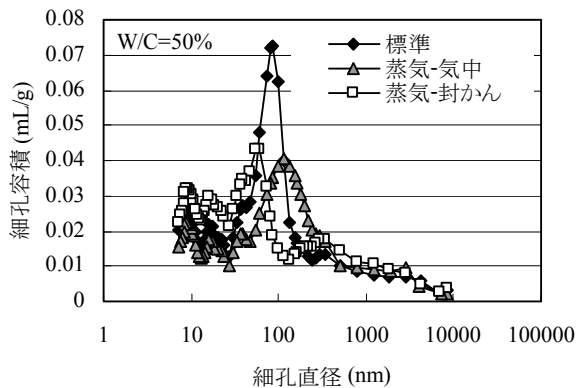
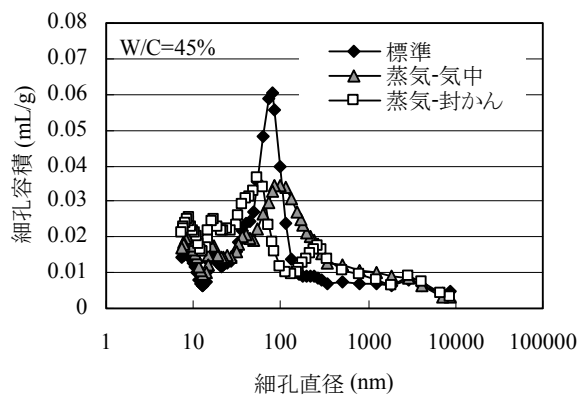
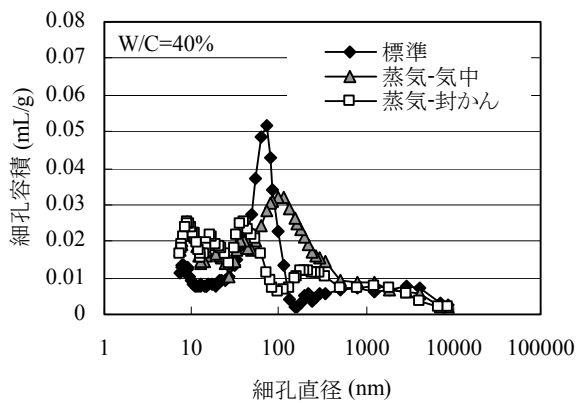


図-6 細孔径分布

### 3.5 細孔径分布と中性化速度係数

図-8 に促進中性化試験開始時における 10, 40, 100, 200nm 以上の細孔容積と中性化速度係数との関係を示す。100nm 以上の細孔容積と中性化速度係数との関係は、他の細孔直径に比べて、より高い相関を示した。このため、図-7 において、75~750nm の細孔容積が多かった蒸気養生後気中養生した場合は、図-3 で示したとおり、中性化速度係数が大きくなったと考えられる。一般に、透気、透水性は硬化体の一定径（数十 nm~数百 nm）以上の細孔容積との関係が深いと考えられている。気体分子

の移動に必要な連続空隙は、数百 nm 以上の空隙で形成されるといわれ<sup>5)</sup>、今回の試験においても中性化速度係数と、この領域の細孔容積に密接な関係がある結果となった。

なお、既往の研究<sup>6),7)</sup>では、40nm 程度以上の細孔容積と中性化速度係数との相関が高いことが示されており、これらとは異なる傾向を示した。これらの研究では、蒸気養生した場合については取り扱われていないことから、図-9 のように、40nm 以上および 100nm 以上の細孔容積と中性化速度係数との関係について、養生条件毎

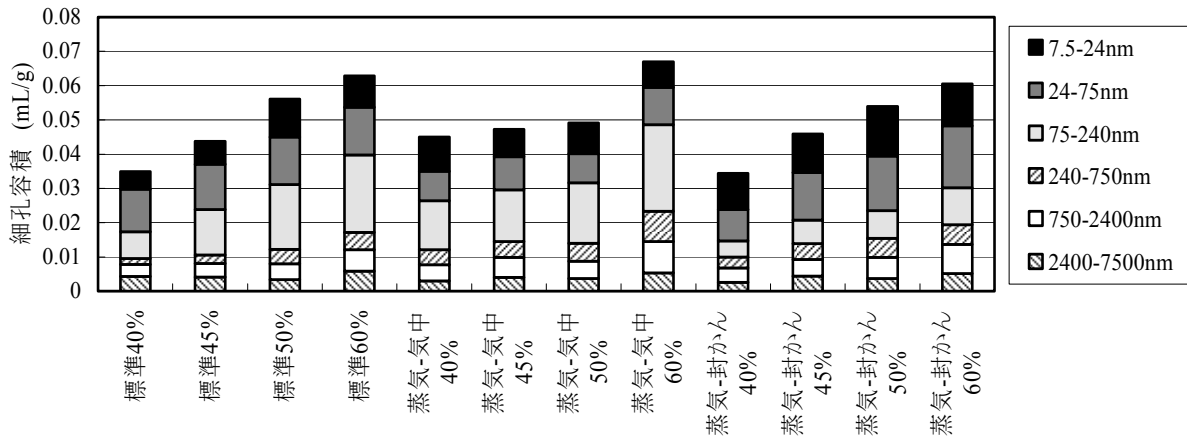


図-7 総細孔容積および細孔直径毎の細孔容積

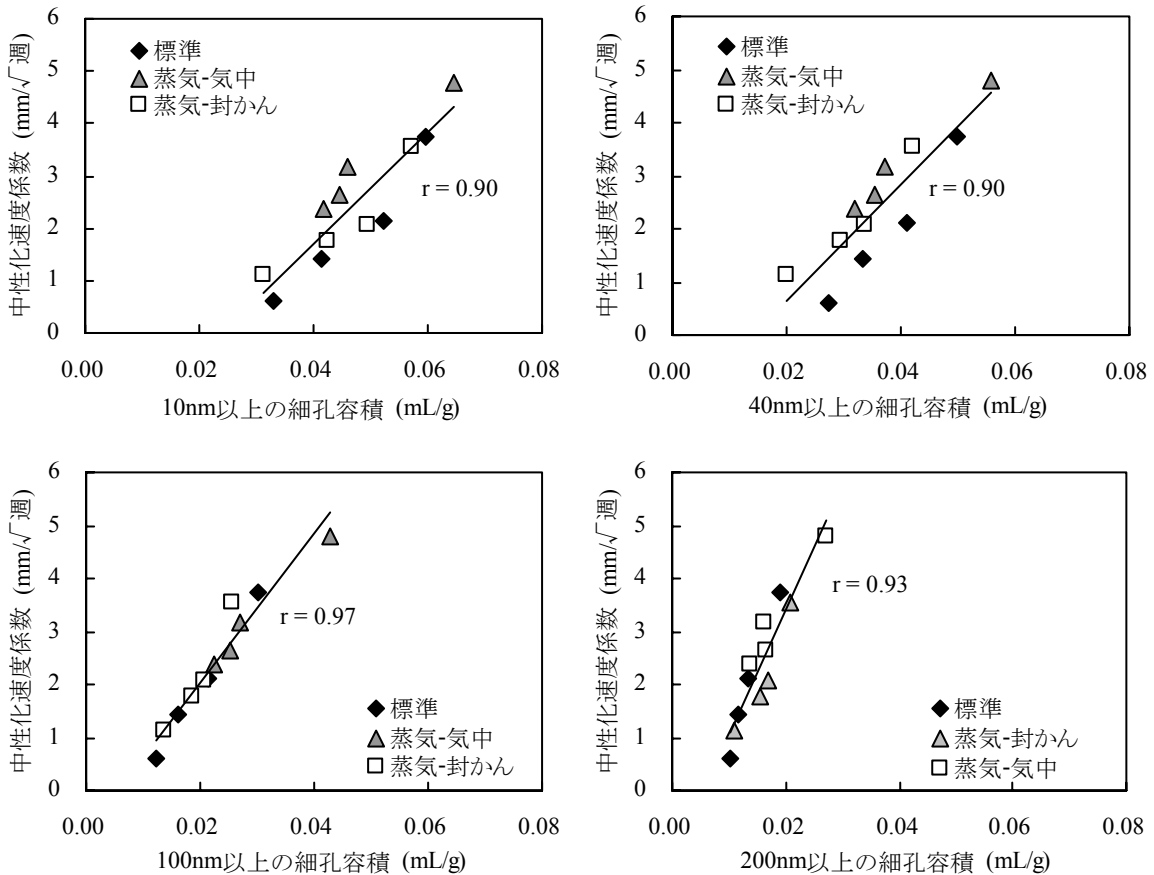
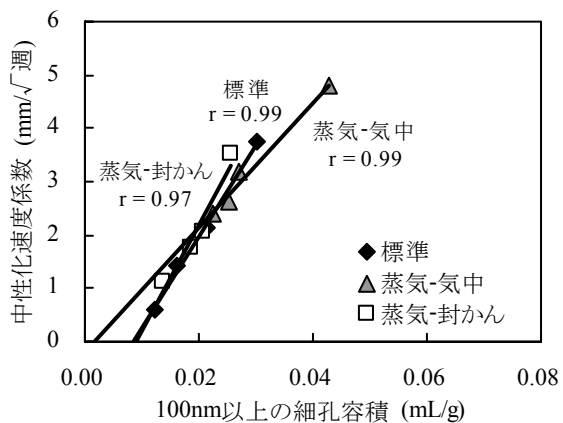
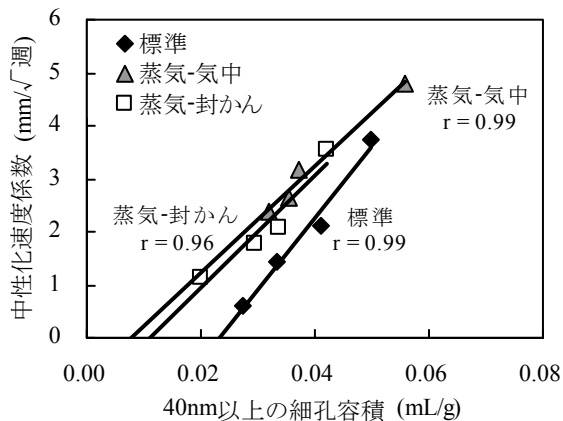


図-8 細孔容積と中性化速度係数

の相関係数を求めた。40nm 以上の細孔容積と中性化速度係数との関係は、蒸気養生と標準養生とで異なる傾向を示したが、標準養生した場合の切片は0から乖離している。100nm以上の細孔容積の場合は、蒸気養生後気中養生した場合に、傾きがやや小さいものの、ほぼ、同一の直線で表せると考えられる。このことから、100nm以上の細孔容積と中性化速度係数との相関が高くなったのは、蒸気養生とは別の要因の影響と考えられる。



図一9 40nm 以上および 100nm 以上の細孔容積と中性化速度係数との関係の養生条件毎の相関係数

#### 4. まとめ

本研究では、住宅 PCa パネル用コンクリートの中性化を適正に評価するために、水セメント比、養生条件を変化させて、促進中性化試験を実施し、圧縮強度、細孔径分布等との関係を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 蒸気養生を行ったコンクリートについても、一般的に言われている促進期間と中性化深さの関係を表す  $\sqrt{t}$  則が成り立つと考えられる。
- (2) 同一水セメント比における中性化速度係数は、標準

養生と蒸気養生後封かん養生した場合は、ほぼ等しかったが、蒸気養生後気中養生した場合はこれらよりも大きくなった。蒸気養生する場合、その後の養生において水分の逸散を防止することにより、中性化の進行を抑制できる。

- (3) 中性化速度係数は、水セメント比が大きいほど、また圧縮強度が小さいほど大きくなった。また、養生条件によりやや異なるものの、圧縮強度と中性化速度係数には密接な関係がみられた。
- (4) 100nm 以上の細孔容積と中性化速度係数の間には、水セメント比および養生条件によらず、ほぼ直線的な関係が得られた。このため、細孔径分布を測定することにより、中性化速度係数が予測できる可能性がある。

#### 謝辞

本研究は、学術フロンティア事業として文部科学省の助成を受け、工学院大学と社団法人プレハブ建築協会に所属するコンクリート系プレハブ住宅メーカーおよび宇部三菱セメント研究所との共同研究として実施されているもので、実験に際しては、工学院大学卒論生島崎学氏の協力を得た。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 馬場明生, 羽木宏: プレキャストコンクリートの促進中性化実験, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.125-126, 1985
- 2) 島崎学, 阿部道彦: PCa コンクリートの促進中性化に関する実験, 日本建築学会関東支部第 78 回研究報告集 I, pp.37-40, 2008.3
- 3) 田中斉, 柳啓ほか: コンクリートの中性化進行予測に関する実験(その 1), (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.245-248, 1987
- 4) 和泉意登志, 嵩英雄ほか: コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類, 調査および養生条件の影響について, 第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.117-120, 1985
- 5) セメント協会: わかりやすいセメント科学, pp.97, 1997.3
- 6) 郭度連, 國府勝郎ほか: 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, No.718, pp.59-68, 2002.11
- 7) 飛坂基夫: 高性能減水剤を使用した低水セメント比コンクリートの中性化, 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.193-196, 1984