

# 論文 各種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>・荒川 琢也<sup>\*2</sup>・蜂須賀 元文<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に関する研究は少ない。本研究では、蒸気養生して製造する住宅用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、調合条件、セメント種類、蒸気養生後の養生条件を変化させ、普通コンクリートおよび軽量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、絶対値の差はあるが、蒸気養生した場合も標準養生した場合と同様に、調合条件、セメント種類が中性化に影響することが確認された。また、蒸気養生後の水分の逸散を少なくすると中性化が小さくなることが確認された。

**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、普通コンクリート、軽量コンクリート

## 1. はじめに

これまでの中性化に関する研究は、ほとんどが水中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)</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も不明な点が多い。

本研究では、蒸気養生して製造する住宅用PCaパネル用コンクリートを対象とし、普通コンクリートおよび軽量コンクリート1種について、水セメント比、セメント種類および蒸気養生条件を変化させて促進中性化試験を行い、中性化と質量減少率（水分の逸散量）、圧縮強度および細孔径分布等との関係を調べた。

不利な条件である。蒸気一封かんは、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（以下、標準）した場合についても実施した。

シリーズIIは、N-Nに加え、早強ポルトランドセメントを用いた普通コンクリート（以下、H-N）および普通ポルトランドセメントを用いた軽量コンクリート（以下、N-L）についても試験を実施した。水セメント比は35～60%とした。このうち、40%および60%は、シリーズIと同一の調合とし、N-NについてシリーズIの再現性を検討した。

## 2. 実験

### 2.1 実験概要

中性化の進行には調合、セメント種類および養生条件などの影響があることが知られていることから、各種コンクリートについて、水セメント比、セメント種類および養生条件を変化させて、質量減少率（水分の逸散量）、圧縮強度および細孔径分布を測定した。

表-1に実験の要因と水準を示す。

シリーズI<sup>2)</sup>では、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリート（以下、N-N）について、水セメント比の範囲を40～60%として試験を実施した。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（以下、蒸気一気中）と、蒸気養生後封かん養生するもの（以下、蒸気一封かん）とした。蒸気一気中は、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

表-1 実験の要因と水準

要因		水準
コンクリートの種類	シリーズI	セメント：普通，粗骨材：普通(N-N)
	シリーズII	セメント：普通，粗骨材：普通(N-N) セメント：早強，粗骨材：普通(H-N) セメント：普通，粗骨材：軽量(N-L)
水セメント比(%)	シリーズI	40, 45, 50, 60
	シリーズII	35, 40, 60
養生方法		蒸気養生，標準養生
蒸気養生後の条件	シリーズI	14日間気中または封かん
	シリーズII	14日間気中または 2, 3, 7, 14日間封かん (封かんは、断らない限り14日間)

### 2.2 使用材料

表-2に実験に用いたコンクリートの使用材料を示す。

### 2.3 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

表-3にコンクリートの調合とフレッシュ性状を示す。

\*1 宇部興産（株） 技術開発研究所コンクリート開発部 主席研究員 工修（正会員）

\*2 大成建設ハウジング（株） 企画設計部構法技術室次長 工修（非会員）

\*3 日本ハウス（株） NC事業部技術開発課課長補佐（非会員）

\*4 工学院大学 工学部建築学科教授 工博（正会員）

目標スランプは、水セメント比50%以上では6.0±1.5cm、45%以下では2.0±1.5cmとした。また、目標空気量は普通コンクリートで4.5±1.5%、軽量コンクリートで5.0±1.5%とした。混和剤は、水セメント比50%以上ではAE減水剤を、水セメント比45%以下では高性能減水剤を用いた。

スランプは、水セメント比50%以上（AE減水剤を用いるもの）では単位水量の増減により調整し、水セメント比45%以下（高性能減水剤を用いるもの）では高性能減水剤の添加量の増減により調整した。

## 2.4 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜには、強制2軸練りミキサ（容量55L）を使用した。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。

## 2.5 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℃水中で4週間養生の後、温度20℃、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、表-4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℃、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℃の恒温室で2週間封かん養生した後、温度20℃、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。

## 2.6 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℃、相対湿度60±5%、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。

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。

## 2.7 質量変化率の測定方法

質量変化率は、乾燥開始時と促進中性化開始時（乾燥期間終了時）との質量の差から求め、百分率で表した。供試体は、促進中性化試験に用いるものと同一とした。

表-2 使用材料

材料	種類・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> 早強ポルトランドセメント、密度 3.14g/cm <sup>3</sup>
細骨材	海砂：福岡県北九州市産 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 海砂と砕砂の使用比率は1：1とした。
粗骨材	普通骨材：碎石 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% 軽量骨材：メサライト、日本メサライト工業製 表乾密度 1.64g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 26.0%、実積率 64.9%
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

表-3 コンクリートの調合とフレッシュ性状

	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						フレッシュ性状		
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	高性能減水剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	
シリーズ I	N-N	40	138	345	925	965	—	3.11	2.5	4.6
		45	145	322	925	965	—	2.26	3.0	4.7
		50	160	320	888	965	0.80	—	5.0	4.2
		60	164	273	916	965	0.68	—	5.5	5.0
シリーズ II	N-N	35	130	371	925	964	—	1.2	1.0	3.9
		40	138	345	925	964	—	0.9	1.0	3.8
		60	164	273	917	964	0.25	—	5.0	5.6
	H-N	35	130	372	922	966	—	1.2	2.0	3.6
		40	138	345	922	966	—	0.9	1.5	3.6
		60	164	274	914	966	0.25	—	5.5	5.0
	N-L	35	130	371	914	588	—	1.5	7.5	4.5
		40	138	345	914	588	—	1.2	7.0	5.1
		60	158	263	930	588	0.25	—	5.0	5.0

表-4 蒸気養生条件

	N-N, N-L	H-N
前置き	20℃, 2h	20℃, 2h
昇温速度	20℃/h	20℃/h
最高温度	65℃, 2h	40℃, 1h
降温速度	10℃/h	10℃/h
脱型時期	打設後 22~26 時間	打設後 22~26 時間

## 2.8 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、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の円柱とした。

## 2.9 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、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$  円柱供試体とした。促進中性化開始時および終了時において、供試体の中央付近および表面から1cmの深さまでのモルタル部の試料を採取し、2.5~5.0mm に破砕して、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. 実験結果と考察

### 3.1 シリーズ I

#### (1) 中性化進行に及ぼす養生条件の影響

図-1 に各養生条件、各水セメント比における促進中性化期間 ( $\sqrt{t}$  週) と中性化深さとの関係を示す。各養生条件を比較すると、標準および蒸気-封かんが同様の傾向にあり、蒸気-気中が他の養生条件に比べて中性化深さが大きくなった。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中性化深さは大きくなった。水セメント比 40% の場合、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傾向がみられたが、45% 以上では、養生条件によらず、ほぼ直線的な関係がみられ、全体としては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>。

#### (2) 圧縮強度と中性化速度係数

図-2 に促進中性化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-封かんは、他の養生条件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。

#### (3) 細孔径分布と中性化速度係数

図-3 に促進中性化開始時における供試体中心部の細孔直径毎の細孔容積を示す。水セメント比が大きいほど総細孔容積は多くなったが、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-気中の細孔容積は、7.5~75nm が少なく、75~750nm が多くなった。標準および蒸気-封かんの細孔容積は、7.5~75nm が多く、75~750nm が少なく、小さい直径の細孔容積が多くなった。これは、標準および蒸気-封かん

が蒸気-気中よりも水和が進行しているためと考えられる。

図-4 に促進中性化開始時における 100nm 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は養生条件によらず直線的な関係を示した。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いわれており<sup>4)</sup>、本試験においても細孔容積と中性化速度係数との間に高い相関がみられた。

### 3.2 シリーズ II

#### (1) 養生条件およびコンクリートの種類の影響

図-5 に各種コンクリートの促進中性化期間 ( $\sqrt{t}$  週) と中性化深さとの関係を示す。なお、N-N についてはシリーズ I の結果を併せて示した。

N-N において養生条件の影響をシリーズ間で比較すると、標準養生では中性化深さの差がなく、蒸気-気中および蒸気-封かんではシリーズ間でばらつきがみられたが、標準 $\leq$ 蒸気-封かん $<$ 蒸気-気中の順に中性化が大きくなる傾向にあった。H-N, N-L においても同様に、標準 $\leq$ 蒸気-封かん $<$ 蒸気-気中の順に中性化が大きくなる傾向がみられた。

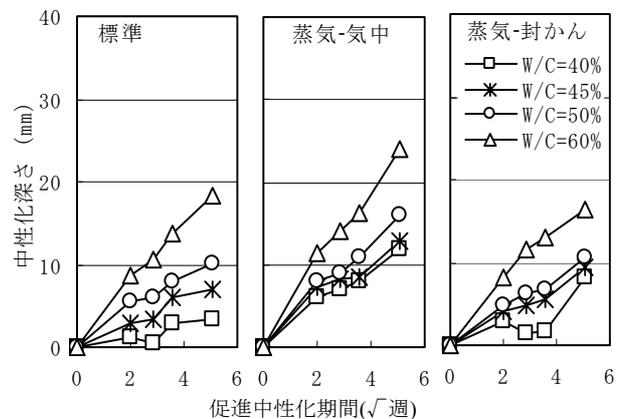


図-1 促進期間と中性化深さ (N-N)

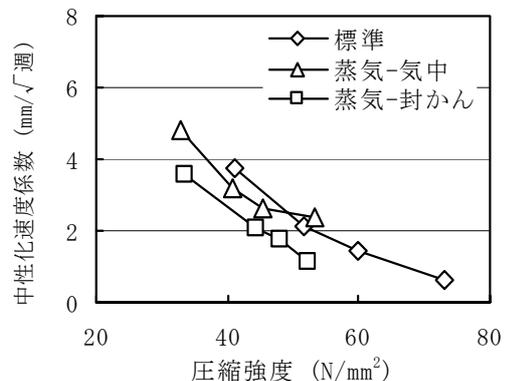


図-2 圧縮強度と中性化速度係数 (N-N)

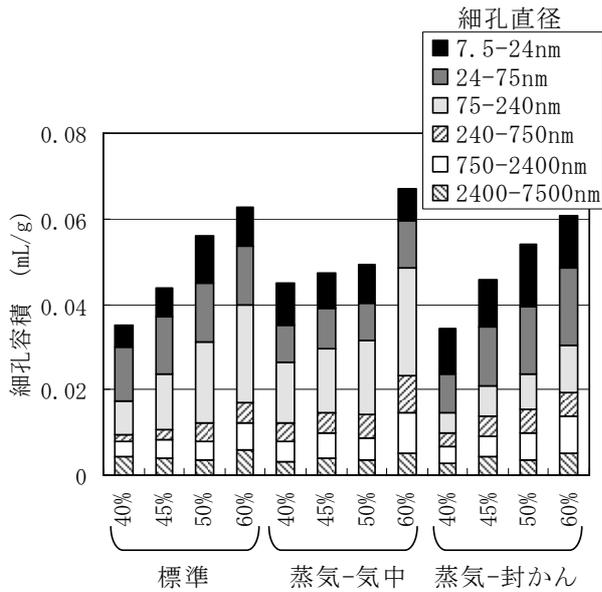


図-3 細孔直径毎の細孔容積 (N-N)

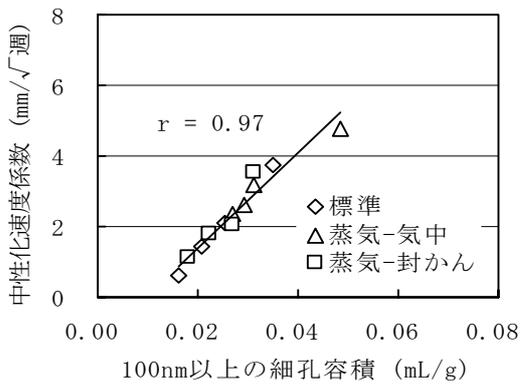


図-4 累積細孔容積と中性化速度係数 (N-N)

コンクリートの種類で比較すると、同一水セメント比では、H-Nは既往の研究<sup>5,6)</sup>にもあるように、N-Nよりも中性化深さは小さい値を示した。これはH-Nの組織が初期に緻密化し、中性化が抑制されたためと考えられる。N-LとN-Nとを比較すると、N-Lを蒸気養生した場合は、水セメント比60%については中性化深さが大きくなったが、その他の水セメント比では大差なかった。既往の研究<sup>7)</sup>では、促進期間が進むにつれて供試体の乾燥が進み、N-LのほうがN-Nよりも中性化が進むことが報告されており、一部について一致する結果となった。水セメント比が大きい60%の場合、空隙が多く乾燥が進みやすいことから、この傾向が明確に表れたと考えられる。

図-6に各種コンクリートの蒸気-封かんにおける封かん期間を変えた場合の促進中性化期間(√週)と中性化深さとの関係を示す。コンクリートの種類によらず、封かん期間が長いほど中性化深さが小さくなる傾向がみられた。

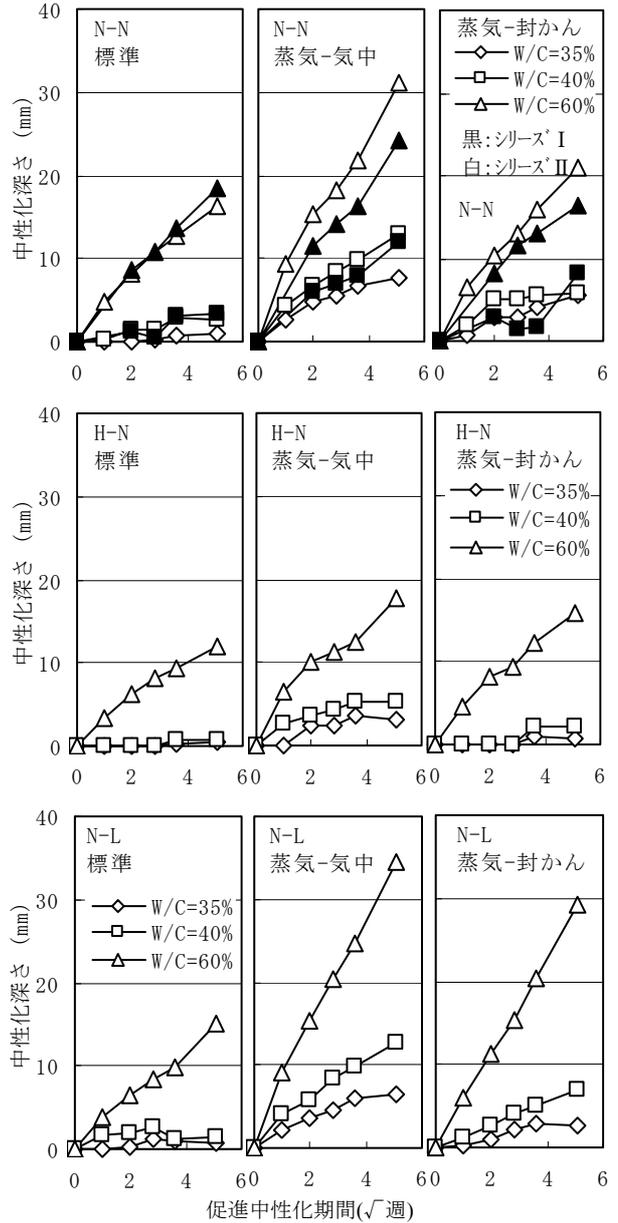


図-5 促進期間と中性化深さ

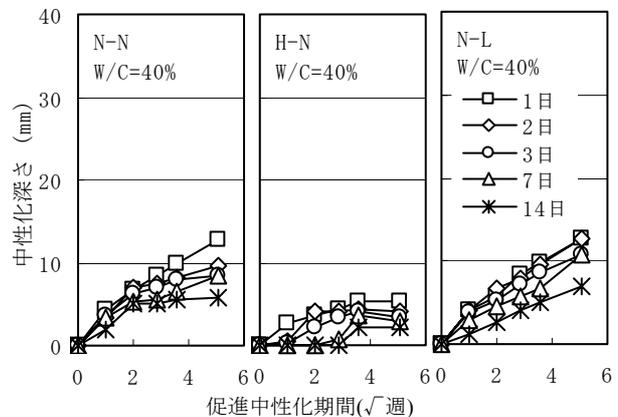


図-6 促進期間と中性化深さ(封かん期間の影響)

## (2) 質量減少率と中性化速度係数

図-7 に乾燥開始から促進中性化開始までの間の供試体の質量減少率と中性化速度係数との関係を示す。いずれのコンクリートについても、質量減少率が小さいほど中性化速度係数は小さくなった。このことから乾燥を抑制することが中性化抑制に効果があると考えられる。

## (3) 圧縮強度と中性化速度係数

図-8 に促進中性化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。なお、N-NについてはシリーズIの結果を併せて示した。

コンクリートの種類、養生条件およびシリーズによらず、圧縮強度が小さいほど中性化速度係数は大きくなった。シリーズIIにおいて、同一圧縮強度における中性化速度係数は、コンクリートの種類によらず、標準<蒸気-封かん<蒸気-気中の順に大きくなる傾向がみられた。既往の研究<sup>5)</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、標準養生した場合、ほぼ直線的であり高い相関を示すことが報告されている。蒸気養生したコンクリートにも直線的な関係はみられるが、その関係は養生条件毎に異なると考えられる。養生条件の影響をシリーズ間で比較すると、標準の場合、差がなくほぼ同一直線上にあった。蒸気-封かんおよび蒸気-気中は、シリーズ間で差がみられ、蒸気養生の場合はある程度のばらつきがあることが考えられる。

## (4) 細孔径分布と中性化速度係数

図-9 に N-N の促進中性化開始時における供試体中心部の細孔直径毎の細孔容積を示す。なお、図-9 にはシリーズIの結果を併せて示した。総細孔容積は、シリーズ間で最大 0.01mL/g 程度の差がみられたが、細孔容積に及ぼす水セメント比の影響や養生条件の影響は、各シリーズともに同様の傾向がみられた。

図-10 に促進中性化開始時および終了時における供試体中心部および表層部の細孔直径毎の細孔容積を示す。標準については、促進中性化開始時と終了時、供試体の中心部と表層部とで細孔容積の差はみられなかった。蒸気-気中および蒸気-封かんについては、促進中性化終了時の供試体中心部と表層部との細孔容積に差がみられ、表層部のほうが中心部よりも小さくなった。これは、標準の場合の促進中性化終了時の供試体中心部の中性化深さは 2mm 程度であるのに対し、蒸気-封かんの場合 6mm 程度、蒸気-気中の場合 13mm 程度であり、蒸気養生した場合の試料採取位置での中性化が進んでいたためと考えられる。

図-11 に促進中性化開始時における 100nm 以上の細孔容積と中性化速度係数との関係を示す。なお、図-11 にはシリーズIの結果を併せて示した。100nm 以上の細孔容積と中性化速度係数との間には、養生条件、シリー

ズによらず高い相関がみられた。

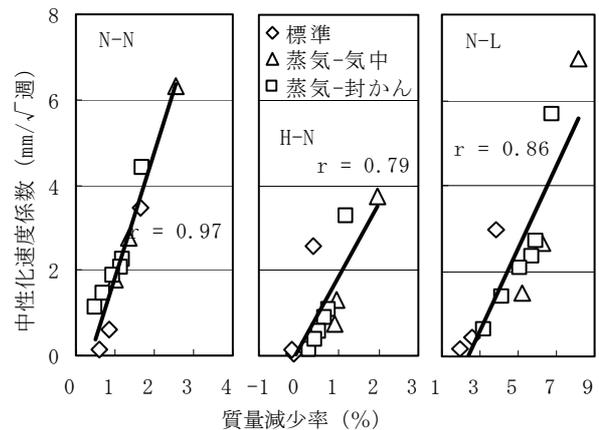


図-7 質量減少率と中性化速度係数

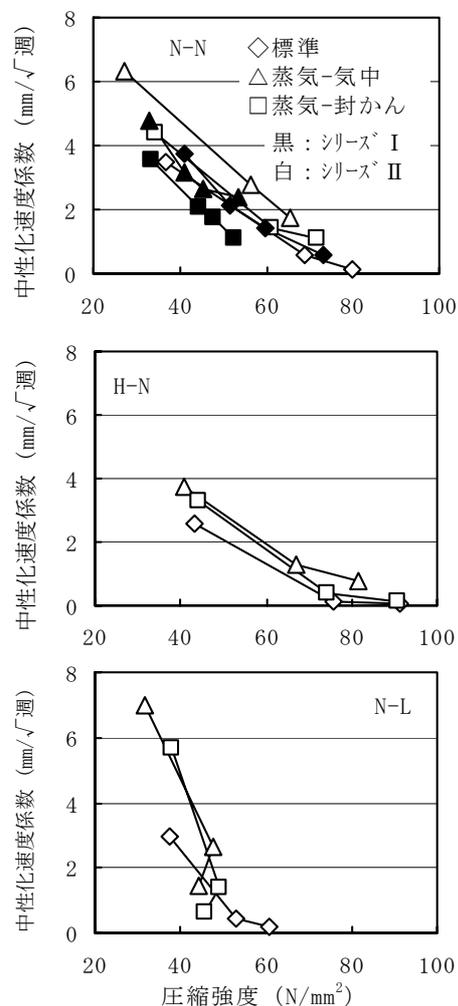


図-8 圧縮強度と中性化速度係数

## 4. まとめ

本研究では、蒸気養生して製造する住宅用 PCa パネル用コンクリートの中性化を適正に評価することを目的とし、水セメント比、セメント種類および蒸気養生後の養生条件を変化させて促進中性化試験を実施し、各種物

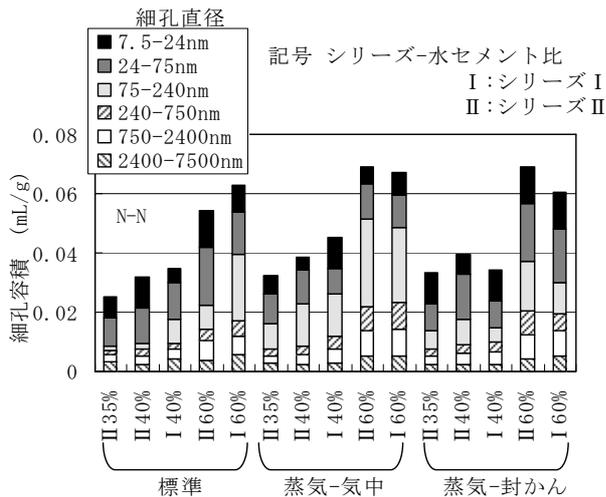


図-9 細孔直径毎の細孔容積 (養生・W/Cの影響)

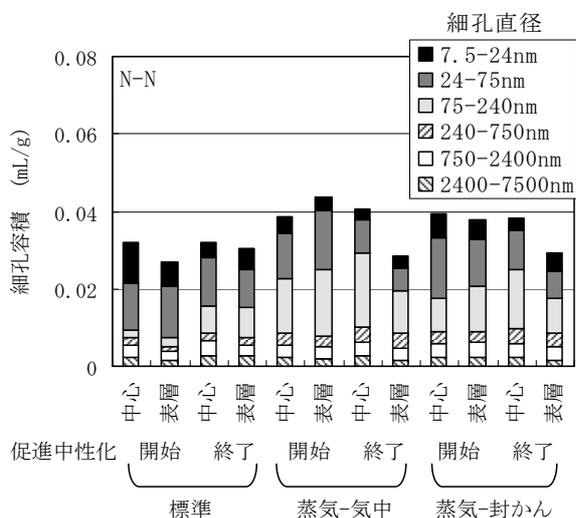


図-10 細孔直径毎の細孔容積 (促進前後の影響)

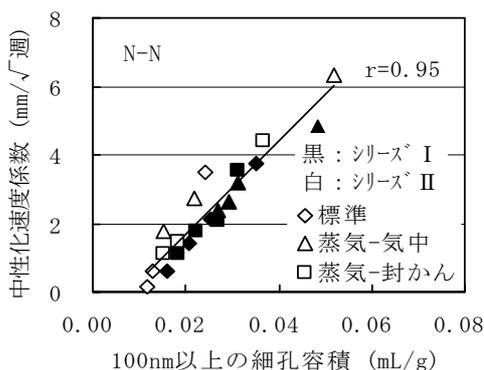


図-11 累積細孔容積と中性化速度係数

性との関係を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 水セメント比が大きいくほど、また、圧縮強度が小さいほど中性化速度係数は大きくなった。
- (2) セメント種類およびコンクリート種類で比較すると、H-N は、N-N よりも中性化が小さくなった。N-N と N-L とでは、水セメント比が大きい場合、N-L が中性

化が大きくなった。

- (3) 養生条件で比較すると、標準≦蒸気-封かん<蒸気-気中の順に中性化が大きくなる傾向がみられた。また、蒸気-封かんの封かん期間が短いほど中性化が大きくなった。蒸気養生する場合、その後の養生において水分の逸散を抑制することにより、中性化の進行を抑制できると考えられる。
- (4) 乾燥開始から促進中性化開始の間の質量減少率および促進中性化開始時における 100nm 以上の細孔容積と中性化速度係数には、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、質量減少率や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。
- (5) シリーズ間のばらつきは、標準養生の場合、中性化の差がみられなかったが、蒸気養生の場合、差がみられたことから、蒸気養生ではある程度のばらつきがあることが考えられる。

#### 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、工学院大学とプレハブ建築協会所属のコンクリート系プレハブ住宅メーカーとの共同研究として実施されたものである。なお、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梗概集, pp.125-126, 1985
- 2) 大和功一郎, 阿部道彦ほか: PCa コンクリートの促進中性化に関する研究, コンクリート工学年次講演会論文集, pp.943-948, 2009
- 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) セメント協会: わかりやすいセメント科学, p.97, 1997.3
- 5) 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, コンクリート工学年次講演会論文集, pp.117-120, 1985
- 6) 依田彰彦, 横室隆: 8種類セメントを用いた AE コンクリートの中性化速さについて, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.896-901, 1998
- 7) 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3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.403-404, 1988