

# 論文 蒸気養生を行った水酸化カルシウム微粉末添加コンクリートの強度特性について

新見 龍男<sup>\*1</sup>・加藤 弘義<sup>\*2</sup>・茶林 敬司<sup>\*3</sup>・土井 宏行<sup>\*3</sup>

**要旨**：凝結促進効果のある水酸化カルシウム微粉末を添加したコンクリートを作製し蒸気養生を行った。本研究では、養生温度、前置時間、昇温速度および水セメント比の相違が、蒸気養生コンクリートの強度発現特性に及ぼす影響に関して実験的に検討を行った。その結果、Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末を添加したコンクリートは蒸気養生条件に関わらず高い脱型時強度を確保でき、前置時間を4時間とすることで養生温度および昇温速度に関わらず高い長期強度を得ることが出来ることがわかった。

**キーワード**：水酸化カルシウム微粉末、凝結促進、蒸気養生、前置時間、最高温度

## 1. はじめに

コンクリート製品工場では型枠の回転率の向上と製品の早期出荷を図ることを目的とした促進養生として、一般に常圧蒸気養生が採用されている。常圧蒸気養生を行う場合、コンクリートの品質に悪影響を及ぼさないために蒸気養生条件について十分に配慮する必要がある<sup>1)</sup>。

筆者らは、微粉碎された水酸化カルシウム（以下、Ca(OH)<sub>2</sub>）はポルトランドセメントの凝結を促進する効果があり、セメント中の C<sub>3</sub>S の水和促進がその一因であることを報告した<sup>2), 3)</sup>。また、型枠からの早期脱型を目的として Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末添加コンクリートに蒸気養生を行った結果、Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末による C<sub>3</sub>S の水和促進効果により早期脱型が可能であることを報告した<sup>4)</sup>。しかしながら、Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末の添加が蒸気養生を行ったコンクリートの強度発現性に及ぼす影響に関してはまだまだ不明な点が多い。

そこで本研究では、蒸気養生条件及び水セメント比の相違が Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末添加コンクリートの強度発現特性に与える影響を把握することを目的として、実験的に検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。セメントの化学成分を表-1に示す。なお、密度は 3.16g/cm<sup>3</sup>、ブレン比表面積は 3320cm<sup>2</sup>/g であった。

Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末は、純度 99.4%の Ca(OH)<sub>2</sub> とイオン交換水を Ca(OH)<sub>2</sub> 固形分濃度が 20.0 質量%濃度となるように混合し、湿式粉碎機により平均粒径 0.25 μm になるまで粉碎した。粉碎後のスラリーに、Ca(OH)<sub>2</sub> 固形分に対して 7.0 質量%のポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤を添加した。平均粒径は、レーザー散乱・回折式粒度分析計で測定した結果より算出した。

細骨材は、海砂（表乾密度：2.56 g/cm<sup>3</sup>、粗粒率：2.96）と丘砂（表乾密度：2.61g/cm<sup>3</sup>、粗粒率：1.29）の混合砂（表乾密度：2.57 g/cm<sup>3</sup>、粗粒率：2.71）を使用し、混合割合は、体積比で海砂：丘砂=75：25とした。

表-1 普通ポルトランドセメントの化学成分

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
20.9	5.7	3.1	63.9	0.23	0.41	2.0
mass%						

\*1 (株)トクヤマ セメント開発グループ (正会員)

\*2 (株)トクヤマ セメント開発グループ 博(工) (正会員)

\*3(株)トクヤマ セメント開発グループ

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	kg/m <sup>3</sup>					
		水	セメント	細骨材	粗骨材	Ca(OH) <sub>2</sub> 微粉末	高性能 AE 減水剤
OPC0%	45	160	356	836	1018	0	Cx1.25%
OPC4%				819		14	Cx0.55%
OPC0%	25	160	640	604	1018	0	Cx0.75%
OPC4%				575		26	Cx0.60%

粗骨材は、硬質砂岩砕石（最大寸法：20mm，表乾密度：2.69g/cm<sup>3</sup>，粗粒率：6.72，実績率：61.9%）を使用した。

混和剤は、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。練混ぜ水は、コンクリートには上水道水を、ペーストにはイオン交換水を使用した。

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 コンクリート試験

#### (1) コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2に示す。基本となる配合はW/C=45%，スランプは12±1.5cm，空気量は2.5±0.5%とした。また，水セメント比の影響を検討するため，W/C=25%の供試体も作製した。W/C=25%はスランプフローで60±5cm，空気量は2.5±0.5%とした。練上がり温度20±1°Cとし，Ca(OH)<sub>2</sub>微粉末はスラリー状のものをセメント質量の0，4%となるように外割で添加した（以下，OPC0%，OPC4%）。

#### (2) 蒸気養生条件

表-3に蒸気養生条件を示す。基本となる蒸気養生条件は，前置時間を4時間，昇温速度25

表-3 蒸気養生条件

No.	前置時間 (hr)	昇温速度 (°C/hr)	最高温度 (°C)	保持時間 (hr)	降温速度 (°C/hr)	脱型時間 (hr)	二次養生
a-1	4	25	45	4	4.5	24	気中
a-2	1	25	45	4	4.5	24	気中
b-1	4	25	65	4	4.5	24	気中
b-2	1	25	65	4	4.5	24	気中
b-3	4	45	65	2	4.5	24	気中
c-1	4	25	80	4	4.5	24	気中
c-2	1	25	80	4	4.5	24	気中
c-3	4	60	80	4	4.5	24	気中

表-4 ペーストの配合

配合名	W/C (%)	kg/m <sup>3</sup>			
		水	セメント	Ca(OH) <sub>2</sub> 微粉末	高性能 AE 減水剤
OPC0%	45	582	1305	0	Cx0.3%
OPC4%		574	1275	51	—

°C/hrで最高温度45°C，65°Cおよび80°Cまで上昇し，4時間保持した後4.5°C/hrで降温，注水から24時間後に脱型した。また，養生条件の影響を検討するため，前置1時間，最高温度65°Cおよび80°Cに関しては，昇温速度45°C/hr及び60°C/hrとする条件についても蒸気養生を行った。

蒸気養生後の二次養生は，温度20±1°C，湿度60±5%で気中養生を行った。

#### (3) コンクリートの圧縮強度

φ10×20cmの円柱供試体を作製し，JIS A 1108

「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、脱型時、材齢 7, 14, 28 日の圧縮強度を測定した。

## 2.2.2 ペースト試験

### (1) ペースト硬化体の配合

ペーストの配合を表-4に示す。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 微粉末は、コンクリートと同様にセメント質量の 0, 4%として外割で添加した。比較用の OPC0%には、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 微粉末スラリーに添加されているポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を OPC4%と同量になるように添加した。また、供試体のサイズは  $2 \times 2 \times 8 \text{cm}$  とし試験に供した。

### (2) 蒸気養生条件

蒸気養生は、コンクリート試験と同様の条件で行った。

### (3) ペースト硬化体の分析試験

脱型直後の供試体を用いて分析試験を行った。所定の材齢経過後、試料を採取、粉砕して多量のアセトンに 24 時間浸し水和停止を行い、24 時間真空乾燥した後、XRD により硬化体内部の組成を観察した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 コンクリート試験

#### 3.1.1 養生温度が圧縮強度に及ぼす影響

図-1に、前置 4 時間、養生温度  $45^\circ\text{C}$ 、 $65^\circ\text{C}$  および  $80^\circ\text{C}$  で蒸気養生を行ったコンクリートの圧縮強度を示す。

OPC0%の脱型時強度は養生温度と共に増加し、 $80^\circ\text{C}$ 養生は $45^\circ\text{C}$ 養生のおよそ 1.4 倍の強度となった。OPC4%はいずれの養生温度においても OPC0%より高く、 $65^\circ\text{C}$  および  $80^\circ\text{C}$  では  $30 \text{N/mm}^2$  を超える脱型時強度が得られた。養生温度によらず  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  微粉末の添加により脱型時強度の増進効果が認められた<sup>2)</sup>。

OPC0%の長期強度は、 $45^\circ\text{C}$  条件で  $40 \text{N/mm}^2$  近い高い強度が得られたが、 $65^\circ\text{C}$  および  $80^\circ\text{C}$

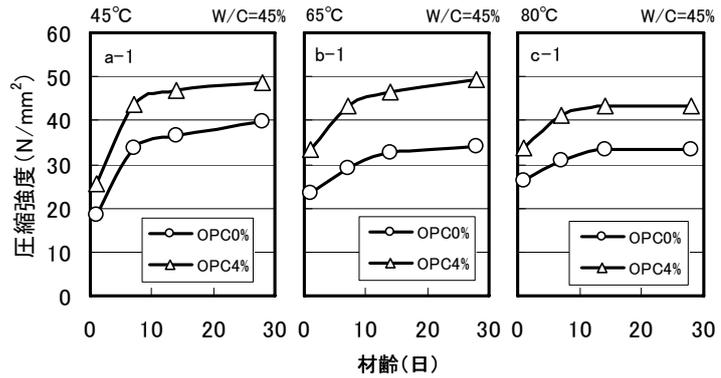


図-1 各養生温度で蒸気養生を行ったコンクリートの圧縮強度

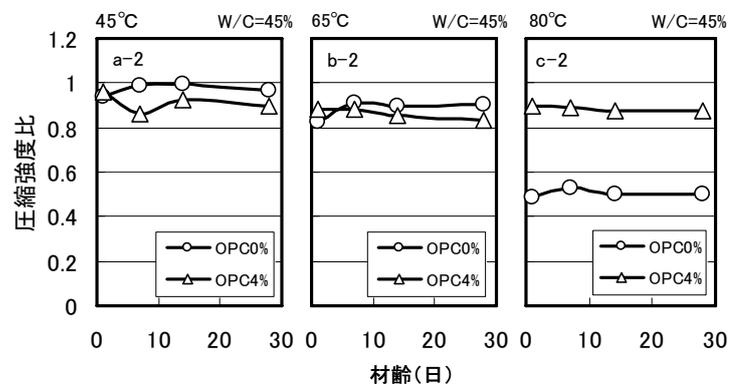


図-2 前置 4 時間の圧縮強度を 1 とした時の前置 1 時間における圧縮強度比

では  $35 \text{N/mm}^2$  程度であり、養生温度の上昇と共に長期強度が低下する傾向が確認された。OPC4%は、 $45^\circ\text{C}$  条件において  $50 \text{N/mm}^2$  近い強度が得られ、同条件で高い強度発現性を示した OPC0%よりさらに  $10 \text{N/mm}^2$  も高くなった。また、 $65^\circ\text{C}$  条件でも長期強度の低下が見られず  $45^\circ\text{C}$  条件と同程度の強度が確認された。 $80^\circ\text{C}$  条件では  $45^\circ\text{C}$  に比べて 10%程度強度の低下したものの、28 日においては  $40 \text{N/mm}^2$  を越える高い強度発現性を示し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  微粉末の添加により養生温度の上昇による長期強度の低下が抑制された。

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  微粉末の添加、無添加に関わらず材齢の経過に伴う強度増進は類似する傾向にあり、 $45^\circ\text{C}$  条件では脱型時強度は低いものの材齢 1 日から 7 日で強度が著しく増加し、材齢 28 日において最も高い強度が得られた。 $65^\circ\text{C}$  条件では、脱型時強度は高くなるものの、その後の強度増

進はやや緩やかになる傾向が見られた。また、80°C 条件では脱型時強度は 65°C より若干高くなるものの、材齢 14 日以降の強度増進はほぼ横ばいとなった。Ca(OH)<sub>2</sub> の添加、無添加に関わらず、同一温度条件内では材齢の経過に伴う強度増進は同様な傾向にあり、OPC0%と OPC4%の長期強度の差には脱型時強度が大きく影響しているものと考えられる。

### 3.1.2 前置時間が強度発現に及ぼす影響

図-2に、前置時間4時間における各材齢の OPC0%および OPC4%の圧縮強度を1とした場合の、前置時間1時間における W/C=45%の供試体の圧縮強度比を示す。

OPC0%は、45°C 条件においては前置時間短縮の影響は少なく、脱型時強度、長期強度共に前置4時間と同程度であった。しかし、養生温度が高くなるに連れて前置時間短縮の影響が明確に確認され、65°C 条件では脱型時強度が20%程度、28日強度も10%程度の低下が見られ、80°C 条件においては大幅に強度が低下し、脱型時および28日強度で前置4時間の50%程度の強度しか得られなかった。OPC4%は、OPC0%と同様に前置時間が短くなることにより脱型時強度及び長期強度の低下が確認されたが、80°C 条件においても強度の低下はわずか10%程度であった。

C<sub>3</sub>S は、核生成が十分であると養生温度に応じて急激に水和が進行する<sup>5)</sup>。80°C 条件において、無添加の場合は昇温時の核生成が不十分であり、また、高温養生によりエトリンガイトがモノサルフェートへ転化<sup>6)</sup>したために強度が著しく低下したと考えられる。一方、Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末を添加すると、C<sub>3</sub>S の水和促進により前置時間が1時間でも核生成が十分に進行しているため、また、モノサルフェートへの転化よりも C<sub>3</sub>S の水和による CSH の生成が卓越した<sup>4)</sup>ために、強度発現性が高かったと考えられる。

### 3.1.3 昇温速度が強度発現に及ぼす影響

図-3に、昇温速度25°C/hrにおける各材齢の

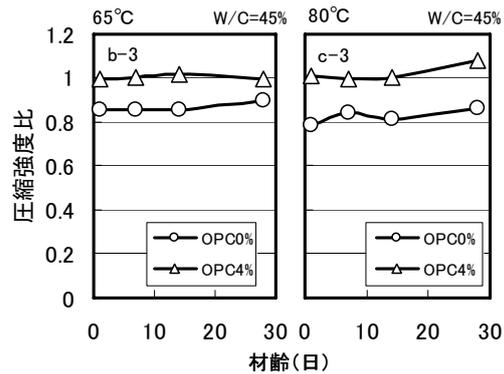


図-3 昇温速度25°C/hrの圧縮強度を1とした時の45°C/hrおよび60°C/hrにおける圧縮強度比

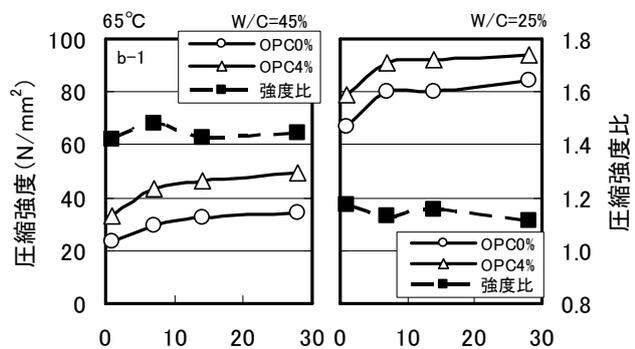


図-4 各 W/C における圧縮強度および圧縮強度比 (各 W/C における OPC の強度を1とする)

OPC0%および OPC4%の圧縮強度を1とした場合の、昇温速度45°C/hr及び60°C/hrにおける W/C=45%の供試体の圧縮強度比の関係を示す。なお、前置時間は4時間である。

OPC0%は昇温速度を上げることにより、いずれの養生温度においても強度の低下が確認され、65°C、80°C で共に脱型時強度で20%、28日強度は10~20%低下した。

一方、OPC4%は昇温速度の影響は小さく、脱型時強度は25°C/hrの条件と同程度であった。その後の強度増進も同様の挙動を示し、28日強度は条件b-1およびc-1と同程度の値が得られた。Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末の添加により、昇温速度の上昇による強度低下が抑制されるものと考えられる。

### 3.1.4 蒸気養生条件による強度発現性の比較

養生温度、前置時間及び昇温速度の影響を比較した場合、OPC0%で長期強度が最も高くなった条件は最高温度45°C、前置4時間、昇温速度

25°C/hr であり、脱型時強度は若干低いものの材齢 28 日において 40N/mm<sup>2</sup> 近い強度が得られた。OPC0%は、養生温度を高くすると脱型時強度は高くなるものの長期強度は低下した。また、65°C および 80°C 条件では前置時間の短縮や昇温速度の増加により著しく強度が低下する傾向にあるため、OPC0%の強度を良好に発現させるためには、養生条件に十分に注意する必要があると考えられる。

一方、OPC4%は、前置時間を 4 時間とした条件においては昇温速度および養生温度に関わらず概ね高い脱型時強度と長期強度が得られ、最高温度 65°C、前置 4 時間、昇温速度 25°C/hr の条件において脱型時強度 30N/mm<sup>2</sup> 以上、28 日強度で 50N/mm<sup>2</sup> 近い強度が得られた。また、前置 1 時間においても、10%程度の強度低下は認められたが、いずれの温度においても良好な強度発現を示した。以上より、Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末をコンクリートに添加することにより、蒸気養生条件に関わらず高い脱型時強度を確保でき、前置時間を 4 時間とすることで養生温度および昇温速度に関わらず高い長期強度を得ることが出来ると考えられる。

### 3.1.5 水セメント比が Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末の効果に及ぼす影響

図-4 に、条件 b-1 で蒸気養生を行った W/C=45%および 25%の圧縮強度および圧縮強度比を示す。圧縮強度比は各材齢における OPC0%の圧縮強度を 1 とした時の OPC4%の値とした。

Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末を添加することにより、普通強度域だけでなく高強度域の水セメント比においても圧縮強度が増加する結果が得られた。W/C=45%では脱型時、長期強度共に 40%以上も強度が増加し、W/C=25%においては脱型時、長期強度共に 20%の強度増加であった。

前置時間を 1 時間にすることにより (図-5)、W/C=45%では OPC0%、OPC4%共に脱型時強度が 10%、長期強度で 20%低下した。W/C=25%においては OPC0%の強度低下は著しかったが、

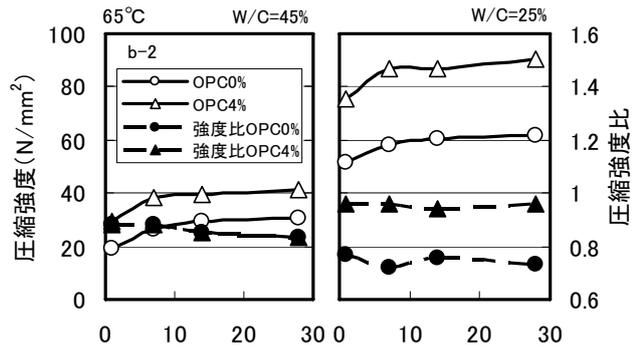


図-5 前置 1 時間における各 W/C のコンクリートの圧縮強度および圧縮強度比 (前置 4 時間における各供試体の強度を 1 とする)

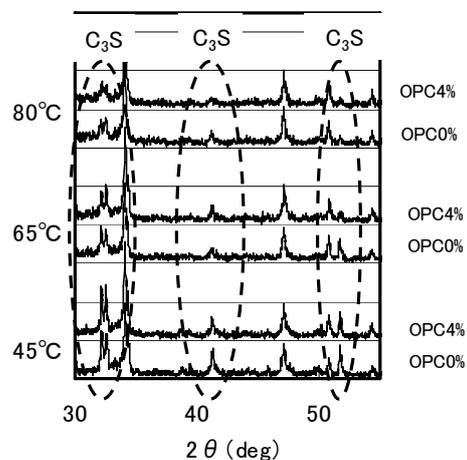


図-6 各養生温度における X 線回折分析結果

OPC4%の強度低下は小さく、脱型時、長期強度共にわずか 10%未満であった。

このことより、Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末添加による強度増進効果は高水セメント比だけでなく低水セメント比のコンクリートにおいても有効に作用するものと考えられる。

### 3.2 ペースト分析試験

ペースト硬化体内部の組成の変化から、Ca(OH)<sub>2</sub> 微粉末の添加及び蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響について考察した。

図-6 に、条件 a-1, b-1 および c-1 で蒸気養生を行った W/C=45%の OPC0%および OPC4%の、脱型時における X 線回折分析結果を示す。

養生温度が高くなると OPC0%、OPC4%共に C<sub>3</sub>S のピークが低くなる傾向が確認され、養生温

度が高いほうが  $C_3S$  の反応性は高く、そのためにコンクリートの脱型時強度の増加に繋がったものと考えられる。OPC4%は、いずれの養生温度においても脱型時における  $C_3S$  の回折ピークが OPC0%よりも低くなっており、養生温度に関わらず、 $Ca(OH)_2$  微粉末の添加により  $C_3S$  の水和が促進し、脱型時の強度が増加したものと考えられる<sup>2)</sup>。

図-7に、前置時間および昇温速度を変えた場合のセメント硬化体の X 線回折分析結果を示す。前置時間は4時間のまま昇温速度を  $45^\circ C/hr$  とした条件 b-3 における  $C_3S$  の回折ピークは、条件 b-1 と同様な傾向を示している。一方、昇温速度は  $25^\circ C/hr$  で前置時間を短くした条件 b-2 は、 $30^\circ$  および  $50^\circ$  付近に b-1 よりも高い  $C_3S$  のピークが確認された。これらの結果は、前置時間を長く取ることにより  $C_3S$  の水和が十分に進行するものと考えられる。これらの結果は、コンクリートの圧縮強度において昇温速度よりも前置時間の影響が大きいという結果との関連を示唆するものと考えられる。

#### 4. 結論

蒸気養生における養生条件および水セメント比の相違が  $Ca(OH)_2$  微粉末添加コンクリートの強度発現特性に与える影響を把握することを目的として実験的に検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1)  $Ca(OH)_2$  微粉末を添加することにより、いずれの養生温度においても高い強度発現性を示した。また、同一養生温度内では  $Ca(OH)_2$  微粉末の添加、無添加に関わらず材齢の経過に伴う強度増加の挙動は類似し、長期の強度発現性には脱型時強度が大きく影響する。
- (2)  $Ca(OH)_2$  微粉末を添加することにより、前置時間を1時間としても高い強度発現性を得ることが出来る。
- (3)  $Ca(OH)_2$  微粉末を添加したコンクリートの強度発現性に対する昇温速度の影響は小さい。
- (4)  $Ca(OH)_2$  微粉末添加による強度増進効果は、

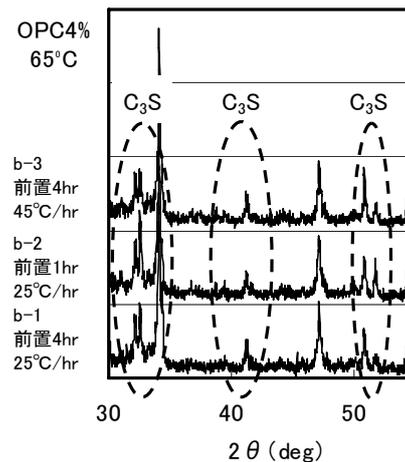


図-7 前置時間及び昇温速度が異なる場合の X 線回折分析結果

高水セメント比だけでなく低水セメント比のコンクリートにも有効に作用する。

#### 参考文献

- 1) 小林哲夫ほか：短時間脱型用混和剤を用いたコンクリートの諸特性，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.134-139，1990.12
- 2) 加藤弘義ほか：微粉碎水酸化カルシウムによるポルトランドセメントの凝結促進効果に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.58，pp.17-22，2004.2
- 3) 中村成春ほか：水酸化カルシウム微粉末を混入したモルタル及びコンクリートの凝結及び力学特性，セメント・コンクリート論文集，No.59，pp.117-124，2005.2
- 4) 新見龍男ほか：水酸化カルシウム微粉末を添加したコンクリートの強度発現に及ぼす蒸気養生条件の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.233-238，2006
- 5) 内川浩，宇智田俊一郎：加熱養生における超速硬セメントの水和，セメント技術年報，No.29，pp.61-66，1975.12
- 6) 坂部大ほか：高ビーライト系セメントを用いたモルタルの蒸気養生における強度発現性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.469-474，1995.6