

## 論文

## [1022] 高ビーライト系セメントを用いた高流動・高強度コンクリートに関する研究

名和豊春\*<sup>1</sup>・深谷泰文\*<sup>2</sup>・鈴木清孝\*<sup>3</sup>・柳田克巳\*<sup>4</sup>

## 1. はじめに

建設作業員の高齢化に伴う現場作業の省力化やコンクリート構造物の高層化に伴う鉄筋の過密化からコンクリートの施工性の改善が社会的に強く望まれている。このような状況の中で、振動締めをせずに型枠に打設できる流動性および分離抵抗性に優れるコンクリート（以下高流動コンクリートと呼ぶ）の基本的理念が岡村ら[1]によって提案され、実用化に向けて活発な研究が行われている。しかし、現在までに提案されている高流動コンクリートは高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材や増粘剤を使用するため、生コン工場でのコンクリートの製造が複雑であり、さらに凍結融解等の耐久性が懸念されている[2]。このような背景から、高性能A E減水剤と組み合わせるだけで高流動コンクリートを生コン工場で容易に製造できるセメントが望まれ、構成鉱物中の $C_3A$ 、 $C_4AF$ 量が少なくビーライト( $C_2S$ )を多く含む分散能力の高い高ビーライト系セメントが開発された[3]。

本研究は、高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの性状を調べたものであり、生コン工場でも高流動・高強度コンクリートの製造が可能であるとの知見が得られたので、ここに報告する。

## 2. 高流動コンクリート中のセメントペーストの要求性能

岡村ら[1]は、コンクリート中の粗骨材間の応力伝達は、骨材間のモルタルまたはペーストの粘性に支配される粘着機構と骨材が接触する摩擦機構の和で表わされ、モルタルの粘性が増し粘着機構が卓越すると骨材間のせん断抵抗が上昇せず粗骨材の集積・分離が妨げられ粗骨材とモルタルが一体となって流動するため、コンクリートの充填性が良好になるとしている。著者ら的一部[4]もコンクリートの充填性とモルタルの粘度との間には相関があり、充填性を最適にするモルタルの粘度の範囲が存在することを示した。一方、モルタルの流動性は主にペーストの流動性に起因すると考えられる。佐野ら[5]は、既報の3種類の高流動コンクリート中のペーストのレオロジー性状について検討し、降伏値は0.8~1.3Pa、塑性粘度は0.45~0.65Pa・sとそれぞれ通常のコンクリート中のペーストの約1/10および8~15倍の範囲であることを示した。なお、塑性粘度を0.4Pa・s以上にするには、普通セメントで $W/C=40\%$ 以下(混和剤無添加)でなければならない[5]。したがって、高流動コンクリート用のセメントは、 $W/C=40\%$ 以下の低 $W/C$ 域で降伏値ができるだけ低減できるものが適切であると言える。

## 3. 高ビーライト系セメントの高流動性とメカニズム

セメントペーストの降伏値の低減は、基本的には高性能A E減水剤等の混和剤分子がセメントに吸着し、「静電的反発力」や「立体障害」等の作用によりセメント粒子を分散させることによる。したがって、混和剤が分散作用を十分に発揮するためにはセメント粒子に混和剤分子が均一に吸着しなければならない。しかし、混和剤は接水後まずセメント中の $C_3A$ や $C_4AF$ に吸着し、その後 $C_3S$ と

\*1 秩父セメント(株)中央研究所研究部副主任研究員、工博(正会員)

\*2 秩父セメント(株)中央研究所研究部主任研究員(正会員)

\*3 鹿島建設(株)技術研究所第4研究部研究員、工修(正会員)

\*4 鹿島建設(株)建築技術本部生産技術部(正会員)

C<sub>2</sub>Sに吸着するため[6]、C<sub>3</sub>SとC<sub>2</sub>Sへの混和剤の吸着はC<sub>3</sub>AやC<sub>4</sub>AFへの吸着に左右され、セメント中のC<sub>3</sub>AおよびC<sub>4</sub>AF量が多いとセメント粒子への混和剤の吸着が不均一になり混和剤の分散作用が発揮されなくなる。高ビーライト系セメントは、低W/Cで降伏値の小さなペーストを得るためにC<sub>3</sub>A

やC<sub>4</sub>AF量を表-1に示すように調整したセメントである[3]。図-1に、表-1に示した鉱物組成の異なる4種類のセメントを用いてポリカルボン酸系の高性能A E減水剤(Ad)を添加したモルタルのレオロジー一定数を示す。図より、降伏値は普通>早強>中庸熱>高ビーライトの順になり、C<sub>3</sub>A+C<sub>4</sub>AF量が減少するとともに著しく低下し、高ビーライト系セメントでは0近くまで達するのが認められる。一方、塑性粘度は降伏値ほど減少しないことも同時に認められ、高流動コンクリート用セメントとして高ビーライト系セメントが最適であることが確認される。

表-1 セメントの鉱物組成

セメントの種類	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	鉱物組成 (%)			
			C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
普通	3.16	3040	52	23	9	9
早強	3.15	4360	65	10	8	8
中庸熱	3.21	3040	43	35	3	12
高ビーライト系	3.20	4080	35	46	3	9

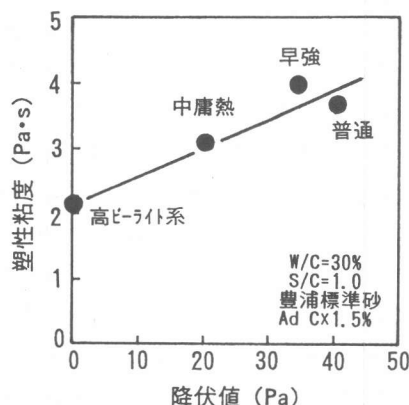


図-1 クリンカー組成の異なるセメントを用いたモルタルのレオロジー一定数

#### 4. 高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの性状

##### 4.1 使用材料およびコンクリートの作製

セメントは、高ビーライト系セメント(B)および普通セメント(N)を用いた。骨材は前報[4]で使用した混合砂(S<sub>1</sub>)と両神産2005碎石(G<sub>1</sub>)の他に、生コン工場で使用している混合砂(S<sub>2</sub>)と皆野産2005碎石(G<sub>2</sub>)を用いた。表-2に使用した骨材の品質を示す。混和剤はポリカルボン酸系の高性能A E減水剤(Ad)を用いた。コンクリートは55ℓパン型強制練りミキサを用い、セメント、細骨材および水(W+Ad)を加え30秒練り混ぜを行った後、粗骨材を投入し90秒間練り混ぜ作製した。

表-2 使用骨材の品質

骨材	記号	種類	比重	粗粒率
細骨材	S <sub>1</sub>	鹿島産陸砂70%	2.62	2.67
		皆野産砕砂30%		
	S <sub>2</sub>	上里産陸砂70%	2.61	3.06
		皆野産砕砂30%		
粗骨材	G <sub>1</sub>	両神産2005碎石	2.70	6.59
	G <sub>2</sub>	皆野産2005碎石	2.66	6.61

##### 4.2 実験項目および方法

ペーストの流動性はJASS5左官工事M-13に準じたフロー値にて、コンクリートの流動性はスランプフローにより評価した。コンクリートの充填性は前報[4]にて報告した試験装置(図-2)を用いて、充填高さH<sub>0</sub>より評価した。また、コンクリートの断熱温度上昇を空気循環式の断熱温度上昇試験装置(供試体容量4ℓ)を用いて測定した。

硬化コンクリートの性状としては、圧縮強度と耐凍結融解性を測定した。なお、圧縮強度は20℃水中養生の他に予め測定した断熱温度上昇と同じ温度履歴により養生(断熱養生)したコンクリートの圧縮強度を測定した。

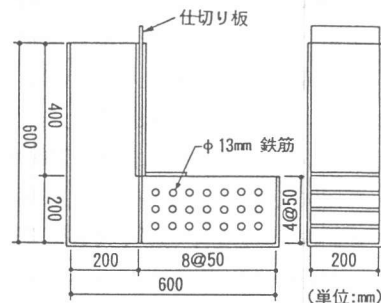


図-2 充填性試験装置

表-3 コンクリートの配合

配合 No.	セメントの種類	骨材の種類		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
		粗	細			W	C	S	G
1	B	G <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>	30	51	160	533	875	864
2		G <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	30	50	170	567	826	842
3	N	G <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>	30	50	170	567	823	839

4. 3 実験結果および考察

(1) ペーストおよびコンクリートのフレッシュ特性

図-3に、BおよびNセメントを用いたペーストのフロー値と混和剤添加量の関係を示す。混和剤添加量を増すとペーストのフロー値は増大するが、添加量を増してもフロー値が伸びないプラトー領域が存在する。この最大フロー値の大小からセメントの分散能力すなわちペーストの降伏値を評価することができる。BセメントはNセメントに比べ少ない混和剤添加量で最大フロー値が著しく大きくなり、低C<sub>3</sub>A化によりセメントの分散能力が著しく改善されペーストの降伏値が低下するのが認められた。

図-4に、コンクリート(表-3配合1, 3)の結果を示す。Bセメントは混和剤の添加量および単位水量ともに少ないにもかかわらずスランプフローが60~70cmとNセメントより高い流動性を示し、ペーストの結果が確認された。また、Bセメントを用いた場合スランプフローが70cmまではモルタルと粗骨材の分離が認められずペーストが適正な塑性粘度を有していると考えられたため、次に充填性状を調べた。

充填性試験結果の例を表-4に示す。Bセメントを用いたコンクリートの充填高さは16~14cmと前報[4]で示した高炉スラグ微粉末を添加した2成分系の高流動コンクリートとほぼ同程度の充填性を示した。なお、スランプフローが60~70cmの範囲では65cmとほぼ同じ充填高さが得られた。

以上より、高ビーク系セメントを用いると降伏値および塑性粘度のバランスの取れたペーストが得られ、高炉スラグ微粉末等の混和材を用いずにセメント単味でも高流動コンクリートを製造できることが見いだされた。

(2) 断熱温度上昇

図-5にBおよびNセメントを用いたコンクリート(表-3配合2, 3)の断熱温度上昇を示す。BセメントはNセメントに比べ発熱量および発熱速度の大きなC<sub>3</sub>AとC<sub>3</sub>Sの含有量が少ないため温度上昇量が小さく、かつ初期の温度上昇速度が小さいのが認められた。

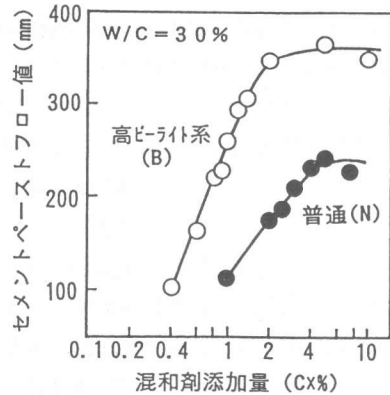


図-3 混和剤添加量によるペーストフロー値の変動

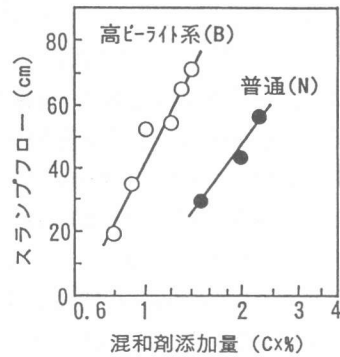


図-4 混和剤添加量によるコンクリートのスランプフローの変動

表-4 コンクリートの流動性および充填性

配合 No.	セメント種類	混和剤 (Cxwt%)	スランプフロー (cm)	充填高さ (cm)
1	B	1.3	65.0	16.0
2		1.4	65.5	14.0
2成分系※)		1.0	67.5	16.4

※) 文献[2]のデータ(高炉スラグBI'6000cm<sup>2</sup>/g)

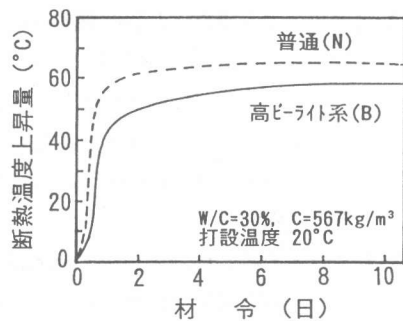


図-5 材令と断熱温度上昇量の関係

### (3) 強度発現性

図-6, 7に20℃水中養生および断熱養生でのNおよびBセメントを用いたコンクリート(配合2, 3)の強度発現を示す。20℃水中養生における材令7日までの初期圧縮強度は、 $C_3S$ 量の差により $N > B$ であるが、7日以降の伸びは $C_2S$ 量が多いBセメントの方が優れ、14日以降はNセメントより大きな強度発現を示し1000kgf/cm<sup>2</sup>を超える高強度を示した。一方、断熱養生ではほぼ材令2日でNと同等となり、3日以降はNより大きい強度で推移しやはり1000kgf/cm<sup>2</sup>以上に達した。浅賀ら[7]は7日以降の水和には $C_2S$ が大きく寄与し、さらに $C_2S$ の水和は温度が高いと促進され80℃昇温養生では材令2.5日で20℃養生の材令28日相当の水和率に達することを示した。これより、高ビーライト系セメントにおける高強度発現は $C_2S$ の水和によるものと推論される。

図-8は、図-6, 7の結果を積算温度で整理したものである。BおよびNセメントともに、水和初期では水和の促進される断熱養生の方が20℃養生に比べ同じ積算温度での強度は大きい。しかし、長期ではNセメントの場合20℃養生より約100kgf/cm<sup>2</sup>低く推移するのに対し、Bセメントでは20℃養生より高い強度で推移した。

$C_2S$ の水和は20~80℃の温度域では高温ほど促進される[7]。しかし、Katoら[8]は、低水セメント比における断熱養生ではセメント中の $C_3A$ ,  $C_3S$ 量が多いとエトリングイトや $Ca(OH)_2$ 等の結合水量の多い水和物を生成するため自由水が減り、液相中のCaイオン濃度が高まるため $C_2S$ の水和が抑制されることを示した。Bセメントの $C_3A$ および $C_3S$ 量は3%および46%とNセメントの約1/3および2/3と少ない。したがって、Bセメントが断熱養生下でも際立った強度発現を示したのは、 $C_2S$ の水和に必要な自由水が十分に得られ、かつ高温下でその水和が促進されたためと推論される。

以上の結果より、高ビーライト系セメントを用いたコンクリートでは圧縮強度が1000kgf/cm<sup>2</sup>程度の高強度発現が得られ、高流動・高強度コンクリートの作製が可能であることが見いだされた。

### (4) 耐凍結融解性

Bセメントを用いたコンクリート(配合2)について凍結融解試験をASTM C-666に準じて行った。コンクリートの空気量は1.6%と少ないにもかかわらず強度発現が良好なため凍結融解200サイクルおよび300サイクル後の相対動弾性係数はそれぞれ95%および89%と十分な耐凍結融解性を示した。

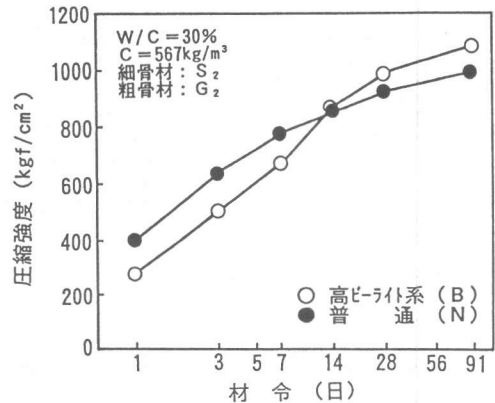


図-6 20℃水中養生での強度発現性

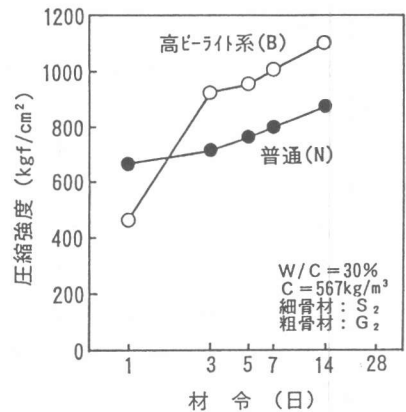


図-7 断熱養生下での強度発現性

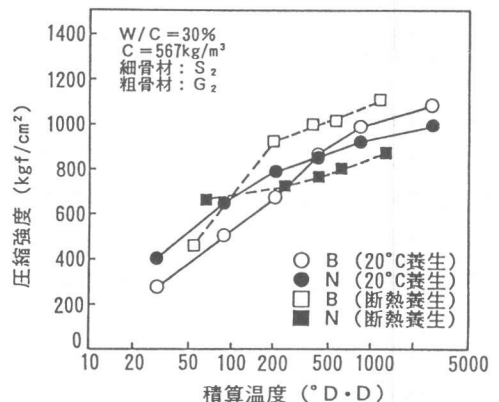


図-8 積算温度と圧縮強度の関係

## 5. 高ピーライト系セメントを用いた高流動・高強度コンクリートの生コン工場での製造実験

### 5. 1 実験の概要

前節に示した室内実験の結果に基づいて高ピーライト系セメントを用いた高流動・高強度コンクリートの実際の生コン工場での製造を検討した。骨材は表-2に示した $S_2$ および $G_2$ を使用し、コンクリートの配合は表-3の配合2を基準とし、目標スランプフローを $65 \pm 5$ cmとした。

使用したミキサは、パン型強制練り(容量 $2.5m^3$ )であり、練り混ぜ量は $1.5m^3$ とした。また、練り混ぜ時間は90~180秒で変化させた。コンクリートの流動性は前節と同様の方法で測定し、さらにコンクリートの流動曲線を既報[9]の回転翼型粘度計を用いて測定した。また、標準水中養生を行ったコンクリートの圧縮強度も測定した。

### 5. 2 実験結果および考察

#### (1) 練り混ぜ性状およびフレッシュコンクリートの性状

図-9にコンクリートの練り混ぜ中のミキサの負荷の変化を示す。負荷は約60秒後に最大となった後ゆるやかに減少した。練り混ぜ時間は混和剤の添加量によって変化した。添加量が1.3%の場合には練り混ぜ時間は90秒で十分であり、スランプフローは65cmに達した。また、スランプフローが65cmのコンクリートについて充填性試験を行ったところ充填高さは17cmとなり良好な充填性を示した。

図-10に砂の表面水率が変動した時のコンクリートのスランプフローと練り混ぜ終了時のミキサ負荷の関係を示す。両者の間には直線関係が認められ、コンクリートの流動性をミキサ負荷により管理できる可能性が示唆された。図-11に回転翼型粘度計により求めたスランプフローが同じコンクリートの流動曲線を示す。図より10rpmの低せん断速度では両者のせん断応力(トルク)は一致し、スランプフローは低せん断速度での流動挙動を示すことが分かる。また、図-11の結果はスランプフローが同じでも混和剤添加量が異なると塑性粘度も異なることを示し、図-10においてスランプフローとミキサ負荷との関係が混和剤添加量により異なることに良く対応する。コンクリートの粘性はコンクリートのポンプ圧送性や打設速度と密接に関連することが予想される。従って、コンクリートの流動性をより厳密に管理するにはスランプフローとミキサ負荷の2つの指標による管理が望ましいものと考えられる。

#### (2) 圧縮強度

標準水中養生した供試体の材令7日、28日および91日での圧縮強度は、それぞれ平均で644、951および1138 $kgf/cm^2$

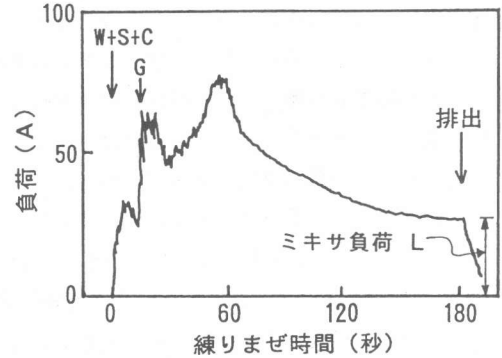


図-9 練り混ぜ時のミキサ負荷の変動

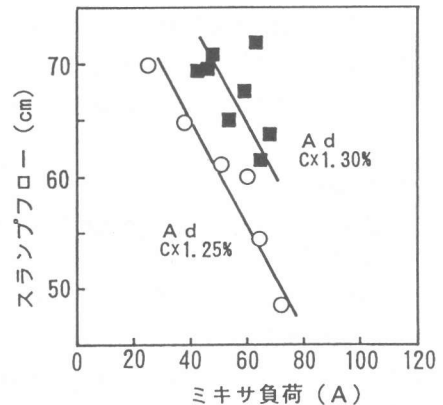


図-10 ミキサ負荷とスランプフローの関係

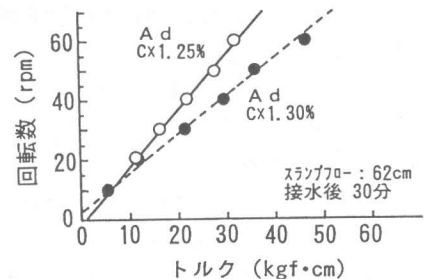


図-11 コンクリートの流動曲線

となり、材令28日までは室内試験より30~40kgf/cm<sup>2</sup>程度低い値を示したが、材令91日では逆に約50 kgf/cm<sup>2</sup>ほど高い値を示した。この理由としては、材令1日で脱型するまでの室温が15℃と20℃以下の低温であったことに起因すると考えられ、脱型までの室温が20℃では室内試験と同等の強度発現が得られるものと推測される。

## 6. まとめ

C<sub>3</sub>A量が少なくC<sub>2</sub>S量の多い高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの流動性、断熱温度上昇および強度発現について検討し、高流動・高強度コンクリートの製造の可能性を考察した。本研究で得られた結果をまとめると次の通りである。

- 1) 高ビーライト系セメントと高性能A E減水剤を組み合わせたコンクリートの充填性状は、高炉スラグ微粉末を添加した2成分系の高流動コンクリートとほぼ同程度の充填性を示した。
- 2) 高ビーライト系セメントを用いたコンクリートは普通セメントに比べ断熱温度上昇量が小さく、かつ水和初期の温度上昇速度も小さかった。
- 3) 高ビーライト系セメントを用いたコンクリートは、20℃水中養生の場合初期強度は普通セメントより低いものの7日以降の伸びが優れ14日以降は普通セメントより大きな強度発現を示し1000kgf/cm<sup>2</sup>以上の強度を示した。一方、断熱養生でもC<sub>3</sub>AおよびC<sub>3</sub>S量が少ないためC<sub>2</sub>Sの水和に必要な自由水が十分に得られ、長期でも強度が伸び20℃水中養生と同等以上の高強度を示した。
- 4) 生コン工場でも室内実験とほぼ同様なコンクリートの品質が得られ、高ビーライト系セメントを用いることによりW/C=30%において圧縮強度が1000kgf/cm<sup>2</sup>程度の高流動・高強度コンクリートの製造が可能であることが見いだされた。

謝辞：実験に行うのにあたり秩父セメント(株)江口、大久保両氏を始め竹本油脂(株)、埼玉秩父コンクリート(株)の多くの方々にご協力いただきました。ここに、感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 岡村 甫, 小沢一雅: 締固め不要コンクリートの可能性と課題, コンクリート工学, Vol. 30, No. 2, pp. 5-14, 1992
- [2] 濱園喜代一, 生野千力, 大矢一夫, 西山直洋: ハイパフォーマンスコンクリートの実構造物における製造と品質管理, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 39-44, 1992
- [3] 「チチブハイフローセメント」技術資料, 秩父セメント(株), 1992
- [4] 名和豊春, 江口 仁, 大久保正弘, 深谷泰文: 高流動コンクリートの配合と流動性に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 369-374, 1992
- [5] 佐野充輝, 万木正弘, 坂田 昇: 締固め不要コンクリート中のペーストの性状に関する実験的検討, 土木学会第46回年次学術講演会梗概集, pp. 596-597, 1991,
- [6] 名和豊春, 江口 仁: 高性能減水剤の吸着挙動に及ぼす硫酸塩の影響, セメント・コンクリート論文集, No. 43, pp. 90-95, 1989
- [7] 浅賀喜与志, 大門正機, 小西和夫, 吉田孝三郎: 低熱セメントの各構成鉱物の水和反応に及ぼす養生温度の影響, セメント・コンクリート論文集, No. 45, pp. 58-63, 1991
- [8] K. Kato et al.: Hydration Property of Various Cements under Adiabatic Condition, Proc. of 9th int. Congress on the Chemistry of Cement, Vol. IV, pp. 124-130, New Delhi, 1992
- [9] 和美広喜, 笠井 浩, 柳田克巳, 亀田泰弘: 回転翼型粘度計による高強度コンクリートの流動特性測定方法に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol. 1, No. 1, pp. 133-141, 1990