

# 報告 超高強度・低発熱連壁コンクリートの強度に関する一考察

神代泰道<sup>\*1</sup>・中根 淳<sup>\*2</sup>・青木 茂<sup>\*3</sup>・澗田安浩<sup>\*4</sup>

**要旨**：超高強度・地下連壁コンクリートの配合選定を行い、高ビーライト系セメントで水セメント比を22%としたコンクリートを実機プラントで製造した。その配合を建築における柱部材を想定したマスブロックに締固めを行わず打設し、材齢91日における保証強度（不良率2.3%）として106.6N/mm<sup>2</sup>を得た。これは材齢28日における標準水中養生の圧縮強度にほぼ一致した。また、同時に打設した同配合の地下連続壁（深度33m）との強度比較を行い、マスブロックの方が低く、打設形態や養生条件によって強度性状が異なることが明らかとなった。

**キーワード**：超高強度コンクリート、配合選定、柱模擬部材、地下連続壁、保証強度

## 1. はじめに

近年、土木分野においては地下構造物の大型化・大深度化に伴い、また、建築分野においてはRC構造物の高層化に伴って、コンクリートの超高強度化が進められ、シリカフェームなどの活性微粉末を混和材として用いる研究がなされている[1,2]。本報告では、高ビーライト系セメントを用いて超高強度連壁用に開発された配合を、建築における比較的マスな柱を想定した試験体（以下、マスブロック）に打設し、超高強度・高流動コンクリートの実用化を検討した。本報告では①超高強度連壁コンクリートの配合選定試験における強度性状、②マスブロックを用いた実験結果、③実施工した連壁パネルとマスブロックの強度対比について言及する。

## 2. 配合選定試験

### 2.1 使用材料および配合要因

コンクリートの使用材料を表-1に示す。セメントは流動性に優れ、低発熱の高ビーライト系セメントを2種類（C<sub>2</sub>S含有率と粉末度が異なる）とし、混和剤はポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用した。細骨材および粗骨材は生コンプラントにおける硬質砂岩系の常用骨材と石灰岩碎石を用いた。検討した配合要因を表-2に示す。水セメント比は20,22,25,30%の4段階とした。単位水量は160~175kg/m<sup>3</sup>、粗骨材量は容積で335~365ℓ/m<sup>3</sup>で変化させ、それぞれの水セメント比において、最適となるように検討し、表-3に示すコンクリートの目標性能に最も近い配合を選定した。練混ぜは容量50ℓの二軸強制練りミキサを使用して1バッチの容量を35ℓとして、モルタル先練り方式（図-3参照）で行った。

表-1 使用材料

種類	略称	名称	比重	摘要
セメント	ビーライトA	高ビーライト系 低熱ポルトランドA	3.22	比表面積 3,440 cm <sup>2</sup> /g, C <sub>2</sub> S=54%, C <sub>3</sub> S=29%, C <sub>3</sub> A= 3%
	ビーライトB	高ビーライト系 低熱ポルトランドB	3.20	比表面積 4,080 cm <sup>2</sup> /g, C <sub>2</sub> S=46%, C <sub>3</sub> S=35%, C <sub>3</sub> A= 3%
粗骨材	粗骨材A	硬質砂岩碎石 2005	2.65	吸水率 0.70%, 粗粒率 6.58, 実積率 60.0%
	粗骨材B	石灰岩碎石 2005	2.77	吸水率 0.53%, 粗粒率 6.57, 実積率 63.2%
細骨材	S	鹿島産山砂(粗目)	2.61	吸水率 0.77%, 粗粒率 2.80, 実積率 65.8%
減水剤	S P	高性能AE減水剤	—	ポリカルボン酸系化合物

\*1 (株)大林組技術研究所 建築第二研究室研究員、工修

\*2 (株)大林組技術研究所 建築第二研究室室長、工修

\*3 (株)大林組土木技術部 技術第五部、技術課長

\*4 (株)大林組技術研究所 建築第二研究室研究員、工修

## 2.2 使用材料や水セメント比が圧縮強度に及ぼす影響

### (1)セメントおよび粗骨材の種類

セメントおよび粗骨材の種類が強度発現性状に及ぼす影響をW/C22%で比較した結果を図-1に示す。粗骨材の種類が異なっても材齢91日における圧縮強度には大きな差はなかった。また、セメントとして粉末度の高いビーライトBを用いた場合、材齢28日までの強度が高くなり、材齢56日以降ではその差はなくなった。

### (2)水セメント比

図-2にセメントとしてビーライトAを用いた場合の圧縮強度と水セメント比（以下W/C）の関係を示す。この場合、単位水量は170kg/m<sup>3</sup>一定とした。7日までの初期材齢においてはW/Cの低下とともに強度は高くなる傾向を示すが、28日以降の長期材齢においてはではW/C20%では強度の頭打ちがみられた。フレッシュ性状においても粘性が高く、十分な値が得られなかったことから[3]、今回の使用材料の場合、実施工に適したW/Cの最小値は22%が適切であると判断できる。

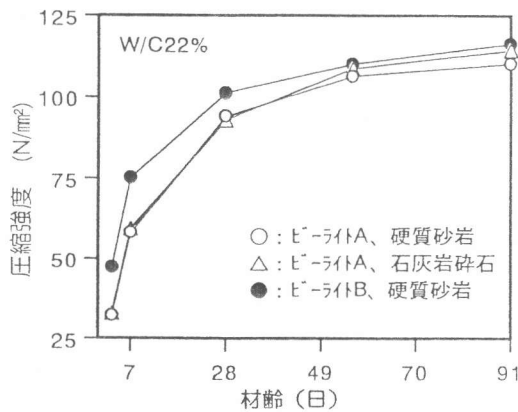


図-1 使用材料の影響

### (3)単位水量と単位粗骨材量

単位水量および粗骨材量が圧縮強度に及ぼす影響をW/C30%において比較を行ったところ、大きな差はなく、単位水量で165kg/m<sup>3</sup>、粗骨材容積で350 ℓ/m<sup>3</sup>とした場合、長期強度が若干増大した。

## 3.実機試験

### 3.1製造方法

実施工に適用が予定されるビーライトAを用いたW/C30%とW/C22%の配合について、実機試験練りを行った。コンクリートの製造は階層式二軸強制練りミキサ（上段1.75m<sup>3</sup>+下段3.00m<sup>3</sup>）で行った。1バッチの容量は通常の出荷より小さく、1.83m<sup>3</sup>とした。練り混ぜの手順は図-3に示すフローに従い、練り混ぜ時間はそれぞれの配合でフレッシュ性状が良好でミキサの負荷電流が安定した状態となるように

表-2 配合要因

配合要因	比較水準
セメント種類	ビーライトA, ビーライトB
粗骨材種類	硬質砂岩碎石, 石灰碎石
単位水量	160, 165, 170 kg/m <sup>3</sup> *1 (170 kg/m <sup>3</sup> ) *2 (170, 175 kg/m <sup>3</sup> ) *3
単位粗骨材量	335, 350, 365 ℓ/m <sup>3</sup> *1
水セメント比	20, 22, 25, 30 %

\*1) W/C=30%, \*2) W/C=20, 25%, \*3) W/C=22%

表-3 目標性能

目標強度* (N/mm <sup>2</sup> )	スラフ* 70-(cm)	O-ト 流下時間 (秒)	空気量 (%)
80以上	60~70	10~20	1.5~2.0
100以上	65~75	20~30	1.5~2.0

\*材齢91日

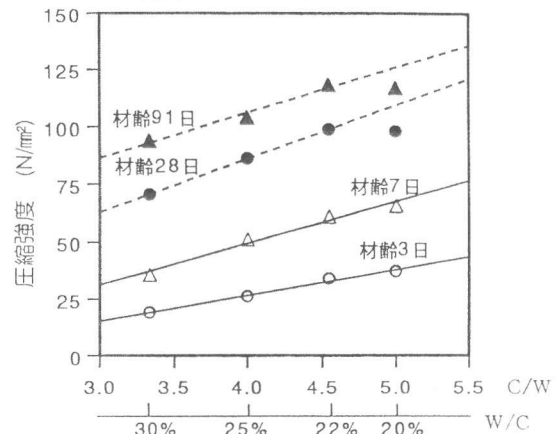


図-2 圧縮強度と水セメント比の関係（室内試験）

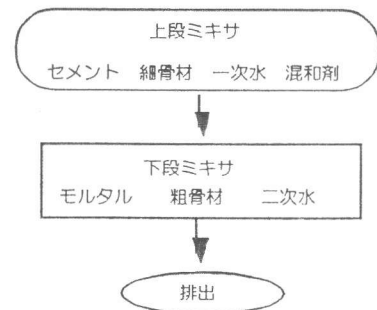


図-3 練混ぜのフロー

定めた。

### 3.2 練混ぜ時間や水セメント比が圧縮強度に及ぼす影響

#### (1) 練混ぜ時間の影響

実機試験における練混ぜ時間の検討として強度と練混ぜ時間の関係を調べた。それぞれの配合において比較して図-4に示す。なお、空気量は練混ぜ時間を長くした方がいずれの配合も1%程度増大した。

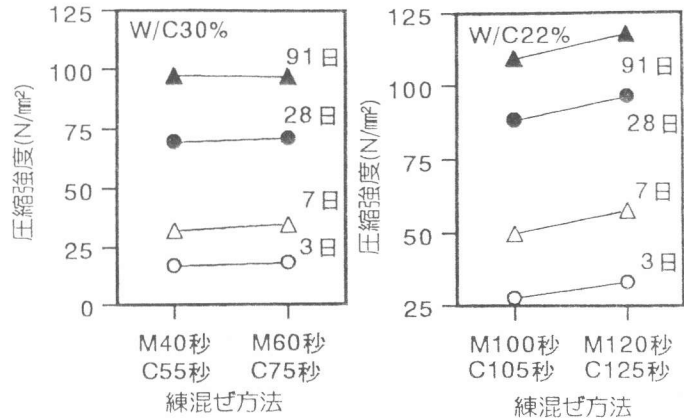


図-4 練混ぜ時間が圧縮強度に及ぼす影響

W/C30%では練混ぜ時間を長くした場合、7日までの初期強度においては若干の増大があるが、28日以降の長期材齢ではその差はほとんどない。一方、W/C22%の場合では練混ぜ時間を長くした方が、全材齢において強度が増大する結果となった。

#### (2) 水セメント比

図-5に実機試験における圧縮強度と水セメント比の関係を示す。圧縮強度はW/C22%までほぼ線形に増加することが室内の場合と同様に確認できた。図-6に室内試験と実機試験での圧縮強度の相関を示すが、同一配合の場合、実機と室内の強度差はほとんどなく、実機ミキサで充分製造できる配合であることが確認された。

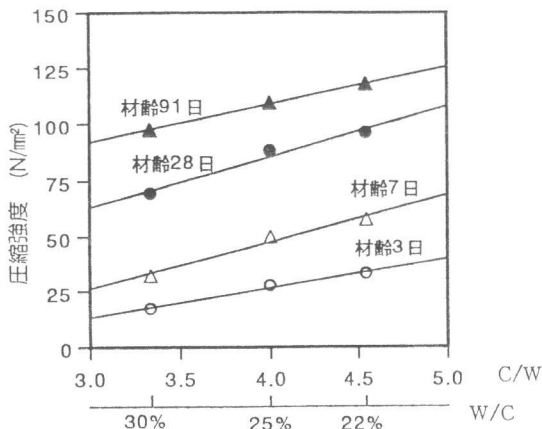


図-5 強度と水セメント比の関係 (実機試験)

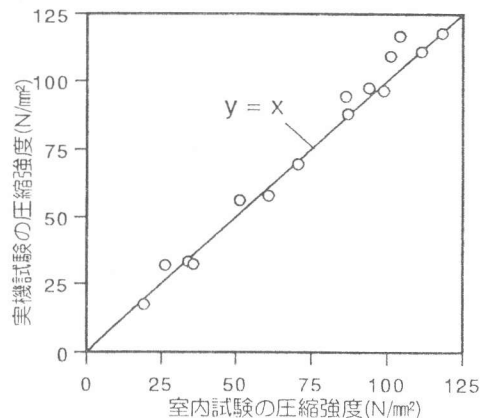


図-6 実機試験と室内試験の強度比較

## 4. マスブロックへの打設

### 4.1 配合とマスブロックの概要

配合を表-4に示す。配合は実機試験練りの結果を踏まえ、目標強度を80N/mm<sup>2</sup>以上とした配合A (W/C30%) および目標強度を100N/mm<sup>2</sup>以上とした配合B (W/C22%) の2種類とした。

マスブロックは図-7に示すように1m角の柱を模した試験体とした。柱部材を想定し、上部および下部には断熱材 (発泡ポリスチレ

表-4 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> ) (単位容積 (ℓ/m <sup>3</sup> ))				SP (C×%)
			W	C	S	G	
A	30	45.7	165	550 (171)	771 (296)	928 (348)	2.0
B	22	40.0	175	795 (247)	584 (224)	888 (334)	2.7

ン板)を配し、断熱境界とした。内部温度測定的位置は図中に示す5点とし、打設後2週間程度まで測定した。打設はアジテータ車から直接コンクリートを流し込んだ。型枠の取り外しは打設後2日目で行い、以後雨水のかからない状態とした。また、構造体強度確認用のコア供試体は図中に示すように柱の高さ方向に抜き取り、コア1本につき4本の圧縮試験用供試体(φ10×h20cm)を作成した。

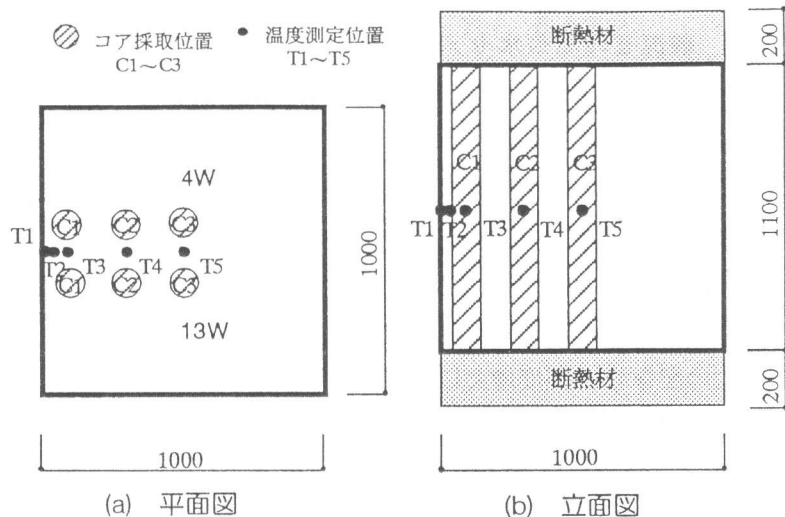


図-7 マスブロックの概要

コアの抜き取り時期は強度試験材齢28、91日の直前とした。

#### 4.2 打込み時のフレッシュ性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5にまとめる。

表-5 フレッシュコンクリートの試験結果

配合	スラップフロー (cm)	70-時間 (秒)	オート流下時間 (秒)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m <sup>3</sup> )	コンクリート温度(°C)	外気温 (°C)
A	67.0	8.9	16.1	1.9	2.42	20.5	13.0
B	72.5	11.2	29.8	1.8	2.45	24.0	15.0

スラップフロー値は目標値以内であった。水セメント比の小さいB配合は、オート流下時間が約30秒であり、A配合と比較してコンクリートの粘性は高く、型枠中に流し込む時間が長くなったが、A配合、B配合とも締め固めなしで型枠の隅々まで充填できた。

#### 4.3 温度計測結果

マスブロックの温度計測結果を図-8(a)(b)に示す。A配合の実測値の最高温度は50°C(上昇量28°C)、B配合の実測値の最高温度は68°C(上昇量41°C)であった。追加して行った断熱温度上昇の試験結果(表-6)を用いて2次元FEMによる温度分布解析を行った。解析に用いたその他の定数として、コンクリートの比熱を0.25(kcal/kg・°C)、熱伝導率を2.2(kcal/m・h・°C)および密度を2.4(t/m<sup>3</sup>)とした。外気温は実測値を用いた。A配合、B配合とも部材の外周部では実測値と解析値は一致した。中心部ではA配合の場合、解析値の方が8°C程度高めの結果なり、B配合の方が差は小さかった。また、中心部の最高温度に達する時間は解析値の方が若干遅くなる結果となった。

表-6 断熱試験による温度上昇推定式の定数

$$T = K \cdot (1 - e^{-\alpha(t-t_0)})$$

T:断熱温度上昇量、K:最終断熱温度上昇量  
α:温度上昇速度に関する定数  
t:材齢(日)、t<sub>0</sub>:遅れ特性(日)

定数	A配合	B配合
K(°C)	57.79	69.87
α	1.00	1.11
t <sub>0</sub> (日)	0.21	0.38

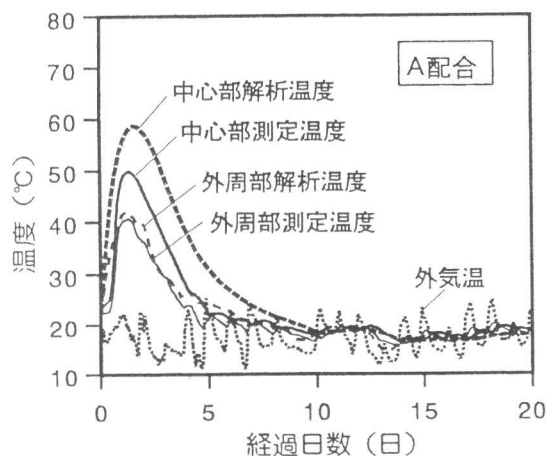


図-8(a) 温度測定および解析結果

#### 4.4 マスブロックの強度性状

マスブロックのコア供試体による圧縮強度試験を材齢28日、91日で実施した。コア供試体の強度試験結果を内部温度との関係で図-9に示す。内部温度はコア採取位置におけるコンクリートの最高上昇温度とした。図中には標準供試体の材齢28日における圧縮強度についても示した。A配合の場合、部材中心部で強度が高く、温度上昇による強度の増進がみられた。B配合については部材中心部で強度が若干低下する傾向であった。

材齢91日におけるマスブロックの強度確認の結果を表-7に示す。

コア供試体の平均強度は標準供試体の材齢28日における強度より高い。また、マスブロックの保証強度を不良率2.3%として、コア供試体の平均強度および標準偏差から算定した結果、A配合およびB配合の保証強度はそれぞれ78.0N/mm<sup>2</sup>と106.6N/mm<sup>2</sup>となり、材齢28日における標準供試体の強度にほぼ一致した。

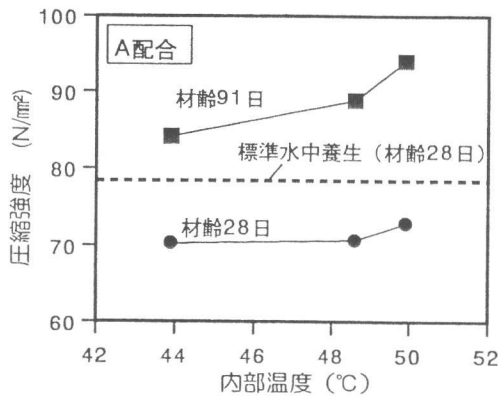


図-8(b) 温度測定および解析結果

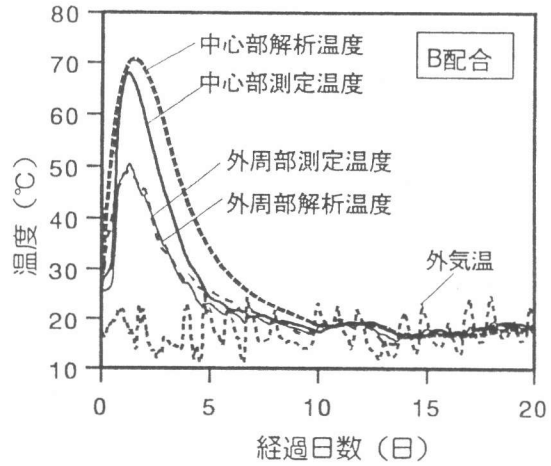


図-9 コア強度と内部温度の関係

表-7 マスブロックの強度確認

配合	標準供試体			コア供試体 (材齢91日)			
	材齢28日 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢91日 (N/mm <sup>2</sup> )	S値 (N/mm <sup>2</sup> )	個数 (個)	平均強度 $\bar{m}$ (N/mm <sup>2</sup> )	標準偏差 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	保証強度 $m - 2\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
A	78.4	104.8	10.5	12	88.9	5.44	78.0
B	104.9	126.7	14.3	12	119.2	6.30	106.6

#### 5. 連壁パネルと

##### マスブロックの強度比較

同時に打設した連壁パネルとマスブロックのコア強度の結果から、安定液中及び気中で打設された構造体の強度比較を行った。連壁パネルは幅2.4m、壁厚0.9m、深さ33mであり、パネル中央に設置したトレミー管で安定液中に打設した[3,4]。比較方法は各部材のコア強度を正規母集団とし、それぞれの母平均の差を有意水準0.01 (棄却域±2.58) で検定した。

##### 5.1 連壁パネルとマスブロック

連壁パネルのコア供試体の強度データ[4]とマスブロックを比較した場合、表-8に示すようにA,B配合ともに連壁パネルの方が平均強度は10N/mm<sup>2</sup>程度高い。検定の結果でも有為差ありで、青木らが[4]で指摘するように、連壁パネルの深さ方向での自重加圧による硬化組織の緻密化と地中と気中の放熱条件の違いによるものと考えられる。

## 5.2 連壁地表部とマスブロック

連壁パネルの地表付近ではトレミ一管打設の場合、コンクリートは安定液と混ざり、せい弱になりやすい。連壁パネルの地表付近(3m以上とした)のコア強度とマスブロックのコア強度と比較した結果、平均強度はほぼ同等で、表-9に示す検定の結果でも有為差はなく、連壁の地表部と気中に打設したマスブロックの強度は同等である、とみなせる。このことは、本実験で使用した配合のコンクリートは比較的粘性が高く、安定液中でも気中と同等以上の品質が確保できることを示すものである。

表-8 連壁とマスブロックの強度比較

配合	対象部材	平均強度 (N/mm <sup>2</sup> )	標準偏差 (N/mm <sup>2</sup> )	個数	検定 統計量	有為差 の判定
A	連壁パネル	98.8	6.7	66	5.58	あり
	マスブロック	88.9	5.4	12		
B	連壁パネル	129.0	8.2	63	4.68	あり
	マスブロック	119.2	6.3	12		

表-9 連壁地表部とマスブロックの強度比較

配合	対象部材	平均強度 (N/mm <sup>2</sup> )	標準偏差 (N/mm <sup>2</sup> )	個数	検定 統計量	有為差 の判定
A	連壁地表部	90.3	6.5	12	0.55	なし
	マスブロック	88.9	5.4	12		
B	連壁地表部	122.2	14.6	12	0.66	なし
	マスブロック	119.2	6.3	12		

## 6.まとめ

高ビーライト系セメントを用いた超高強度連壁コンクリートの配合選定において、強度発現性状の観点から配合の絞り込みを行った。さらに実施配合を柱を模したマスブロックに打設し、保証強度を確認するとともに同時に打設した地下連壁との強度発現の対比を行った。本報告で得られた知見をまとめると以下のようなものである。

- (1)高ビーライト系セメントとポリカルボン酸系高性能AE減水剤の組み合わせと配合選定や練混ぜ方法の改善により、110N/mm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートが実機においても製造できた。
- (2)その場合、W/C22%程度の低水セメント比の配合では、練混ぜ時間はフレッシュ性状だけでなく、強度発現にも影響を与える。
- (2)柱を模したマスブロックの材齢91日における保証強度(不良率2.3%)はA配合で78.0N/mm<sup>2</sup>、B配合で106.6N/mm<sup>2</sup>であり、標準水中養生の材齢28日の供試体強度にほぼ一致した。
- (3)地下連続壁とマスブロックの強度比較の結果、気中に打設したマスブロックの強度は安定液中に打設した連壁の地表付近の強度と一致し、連壁全体の壁体強度はマスブロックより高くなる。

## 参考文献：

- [1]青木茂、三浦律彦、十河茂幸：各種鉱物微粉末を用いた低発熱超高強度連壁コンクリートに関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、1993
- [2]久保田昌吾、中根淳、斉藤祐司、一瀬賢一：超高強度コンクリートを用いた実大柱形模擬部材の強度発現性に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、1993
- [3]三浦律彦、青木茂、神代泰道、川村秀紀：超高強度・低発熱連壁コンクリートの配合選定と実施工時のフレッシュ性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、1996
- [4]青木茂、三浦律彦、神代泰道、長谷川宏：超高強度・低発熱連壁コンクリートの実施工における壁体の硬化特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、1996