

論文 初期材齢での高温養生条件における超高強度コンクリートの強度発現に及ぼす骨材品質の影響

三井 健郎^{*1}, 小島 正朗^{*2}, 米澤 敏男^{*3}

要旨: 超高強度コンクリートの初期材齢での水和発熱を模擬した高温養生条件下での強度発現に温度条件, 水結合材比, 骨材の熱的性質が及ぼす影響について実験を行った。この結果, 水結合材比が小さく, モルタルと骨材の線膨張係数の差が小さいほど高温養生条件下の強度発現が良好であり標準養生に対する強度の低下が小さいことがわかった。

キーワード: 超高強度コンクリート, 高温養生, 水結合材比, 粗骨材, 線膨張係数

1. はじめに

超高強度コンクリートは, 一般に単位セメント量が多いことから, 通常の建築構造物の柱, 梁等の構造体に打設した場合でも, 初期材齢での水和反応に起因する発熱により, 部材の温度上昇が著しく大きくなる。こうした急激な温度上昇による初期材齢での高温養生条件は, 長期材齢での構造体の強度発現を阻害する原因となり, 構造体コンクリート強度が標準養生を施した管理用供試体の強度を下回る場合がある。このため, 建設省総プロ「New R C 施工標準」では, 管理用供試体である標準養生供試体強度と構造体強度との強度差 S の値を実験等により定め, 調合強度を設定することとしている。 S 値は一般に使用材料, 調合, 部材寸法, 打ち込み温度等によって異なるとされるが, 特に設計基準強度が $1,000\text{kgf/cm}^2$ クラスの超高強度コンクリートではこうした要因が強度発現に与える影響について十分な資料が得られていない。

本研究は, シリカフュームを用いた超高強度コンクリートについて, 構造体の強度発現を模擬するように初期材齢において高温養生を行った供試体の強度と標準養生供試体の強度発現に及ぼす調合, 温度条件及び骨材の性質の影響について実験的検討を行った結果を報告するものである。

2. 実験の概要

2. 1 使用材料及びコンクリートの調合

セメントはフライアッシュ B 種セメント, シリカフュームは粉末シリカフューム (比重: 2.38、比表面積: $15.5\text{m}^2/\text{g}$ 、 SiO_2 : 93.7%) を用いた。細骨材は大井川産川砂 (比重: 2.61、吸水率: 1.16%、粗粒率: 2.81) を用いた。粗骨材は表-1 に示す最大粒径 20mm の 3 種類の碎石を用いた。粗骨材の性質のうち, 比重, 吸水率, 粗粒率については JIS に基づき試験を行った。破砕値は B S 812 (骨材の破砕試験) により行い, 40kN 載荷時の 2.5mm ふるい通過量として求めた。粗骨材の圧縮強度及び弾性係数は, 骨材原石より, 異方性を考慮して直交する 2 方向から採取した各 5 本の $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱試験体による一軸圧縮試験結果の平均値である。

*1(株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部副主任研究員, 工修 (正会員)

*2(株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部, 工修

*3(株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部主任研究員, Ph. D. (正会員)

コンクリートの調合を表-2に示す。コンクリートの調合条件はスランプフローが 55 ± 5 cm、空気量が $2.0 \pm 1.0\%$ とし、高性能AE減水剤（特殊ポリカルボン酸系）により調整した。調合は水結合材比を20、25及び30%の3調合として、各構成材料であるペースト、細骨材及び粗骨材の単位容積が調合にかかわらず一定となるよう単位水量、粗骨材量を調整して定めた。

2.2 実験方法

(1) コンクリート及びモルタルの力学性能試験

表-3に実験の因子と水準を示す。実験では、水結合材比を20、25及び30%の3水準とし、粗骨材として3種類の碎石、供試体の養生方法として標準養生及び水和発熱による初期の高温養生を模擬する初期高温養生（最高温度：50、70、90℃）の計4種類とした。

コンクリートの圧縮強度および弾性係数供試体は $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体とした。初期高温養生は供試体を封緘し、既往の構造体の温度履歴測定結果[1]を参考に図-1に示すように最高温度が90℃、70℃及び50℃となる温度条件となるように温度制御型の槽内で所定材齢まで養生したものである。また比較用として練り上がり後のコンクリートを5mmふるいでスクリーニングして $\phi 5 \times 10$ cmのモルタル試験体を作成し、コンクリートと同様の条件で養生し所定の材齢で試験を行った。

(2) 粗骨材の線膨張係数試験

粗骨材の線膨張係数の測定は、粗骨材原石より、力学試験と同様な2方向から切削し採取した $5 \times 5 \times 15$ mmの試験体を用い、押棒式熱膨張計により25℃から100℃までの温度範囲での線膨張係数を求めた。

(3) コンクリート及びモルタルの熱膨張歪み試験

試験は、JCI（仮称）高流動コンクリートの自己収縮試験方法[2]に準じて作成した $10 \times 10 \times 40$ cmの型枠内に、変形を拘束しないように内側に厚さ4mmのスチロールを敷き、埋め込み型歪み計

表-1 粗骨材の品質試験結果

岩質	産地	比重	吸水率 (%)	粗粒率	40kN 破砕値 (%)	原石の 圧縮強度 (kg/cm ²)	原石の 弾性係数 ($\times 10^5$ kg/cm ²)
石灰岩	鳥形山	2.71	0.38	6.42	17.9	1267	6.15
硬質砂岩	青梅	2.64	0.83	6.62	9.4	2356	6.50
石英片岩	段戸	2.63	0.70	6.63	11.4	2734	6.10

表-2 コンクリートの調合（石灰岩使用の場合）

水結合 材比 (%)	細骨 材率 (%)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)				
			水	結合材		細骨材	粗骨材
				セメント	シリカ フューム		
30	41.6	2.0	165	495	55	688	998
25			149	536	60		
20			130	585	65		

表-3 実験の因子と水準

因子	水準
粗骨材種類	なし（モルタル） 石灰岩、硬質砂岩、石英片岩碎石
水結合材比 (%)	20、25、30%
試験体の養生方法	標準養生、初期高温養生 (最高温度50℃、70℃、90℃)

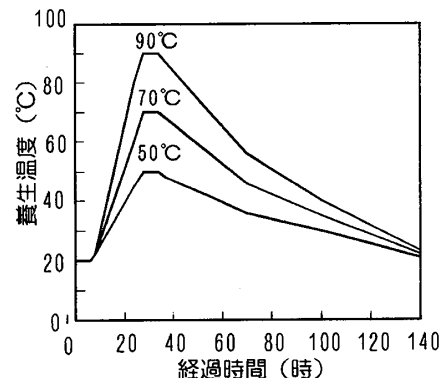


図-1 初期高温養生の温度履歴

を設置したのちコンクリートまたはモルタルを充填したものを用いて行った、試験体は打設直後から、力学性能試験と同様の温度条件で高温槽内で養生し、埋め込み型歪み計及び熱伝対により歪み及び温度変化を計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 標準養生供試体強度に及ぼす水結合材比及び粗骨材種類の影響

図-2には標準養生したモルタル及びコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。いずれの水結合材比においてもコンクリート供試体の強度はモルタル供試体よりも小さく、粗骨材の使用が強度の低下をもたらしている。硬質砂岩碎石と石英片岩碎石を用いたコンクリートではモルタルとの強度差は比較的小さいのに対し、石灰岩碎石を用いたコンクリートでは、モルタルとの強度差が大きく、硬質砂岩及び石英片岩に比較して強度が低い。材齢91日では硬質砂岩及び石英片岩を用いたコンクリートではモルタルとほぼ同程度の強度を示すのに対し、石灰岩コンクリートでは材齢28日で骨材自身の強度に近い $1,250\text{kgf/cm}^2$ を示し、材齢91日までの強度の伸びはほとんどみられない。これは石灰岩が硬質砂岩、石英片岩に比べ破砕値が大きく骨材自身の強度が低いことに起因すると考えられる。

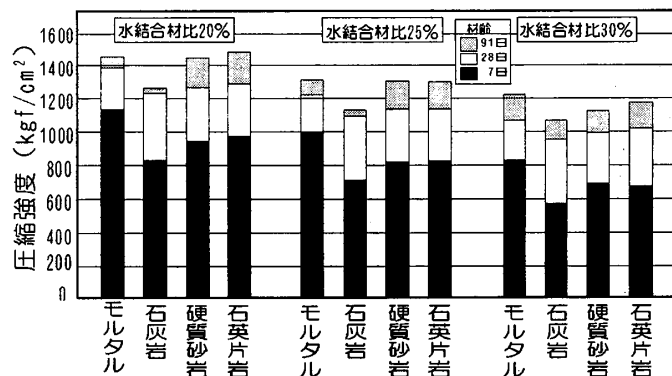


図-2 標準養生試験体の圧縮強度

3.2 初期材齢での高温養生条件がモルタルの強度発現に及ぼす影響

図-3には標準養生及び最高温度50、70及び90℃の初期高温養生を行ったモルタルの圧縮強度試験結果を示す。初期高温養生供試体は初期材齢で強度が急激に発現し、材齢7日では標準養生よりも大きい強度を示すが、その後の材齢の経過に伴う強度の増進が標準養生に比べて小さいため、材齢91日までに両者の強度差は小さくなり逆転する場合もある。材齢7日では、水結合材比30%の場合は、標準養生に対して初期高温養生の強度は $82\sim 91\text{kgf/cm}^2$ 高いのに対し、水結合材比20%では $112\sim 287\text{kgf/cm}^2$ と高温による強度の増加が大きい。初期材齢では温度が高いほど水和反応が促進され強度が高くなる[3]とされるが、この傾向は水結合材比が小さい場合、特に顕著になると考えられる。このため水結合材比が20%の場合は、材齢91日まで経過しても初期高温養生の強度は標準養生よりも大きく、水結合材比25、30%の場合のような強度の逆転はみられない。

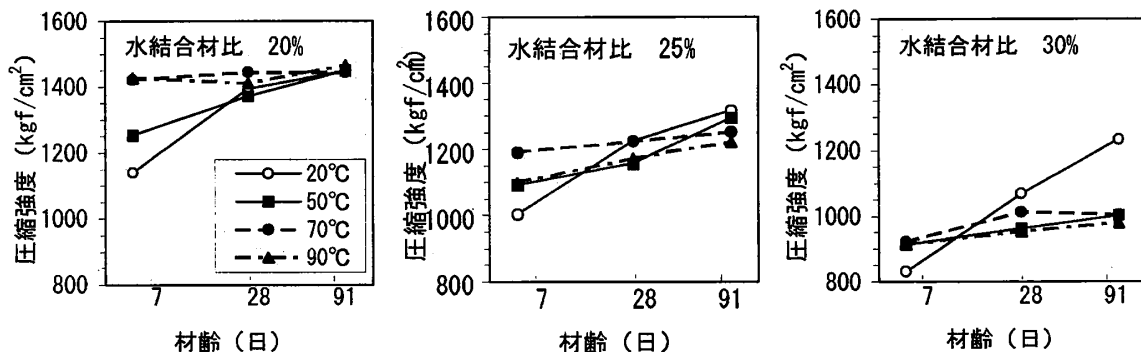


図-3 各種温度条件によるモルタルの圧縮強度

3.3 初期材齢での高温養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響

図-4には、標準養生供試体の強度に対する初期高温養生を行ったモルタル及びコンクリート供試体の強度の比を材齢、水結合材比別に示す。材齢7日ではモルタル及びコンクリート供試体ともに、高温で養生した供試体の強度が標準養生供試体の強度を上回っている。材齢28, 91日では標準養生供試体強度に対する初期高温養生供試体強度の低下の傾向は、モルタル及びいずれの骨材を用いたコンクリートとも、水結合材比が30%の場合に最も大きく低下し、次いで25%の場合であり、水結合材比20%では、石灰岩コンクリートを除いては初期高温養生を施した供試体の方が逆に標準養生よりも高い強度を示している。このように水結合材比がある程度より低い高強度コンクリートの場合には、標準養生よりも初期材齢で高温を受けた構造体のコア強度の方が強度が高いという傾向は既往の実験でも確認されており[4]、モルタルの場合と同様、水結合材比により初期高温養生が水和反応に与える影響が異なることによると考えられる。

また、材齢28, 91日での初期高温養生の標準養生に対する強度比は、硬質砂岩及び石英片岩コンクリートではモルタルの場合と同様な値を示しており、初期高温養生による長期材齢でのモル

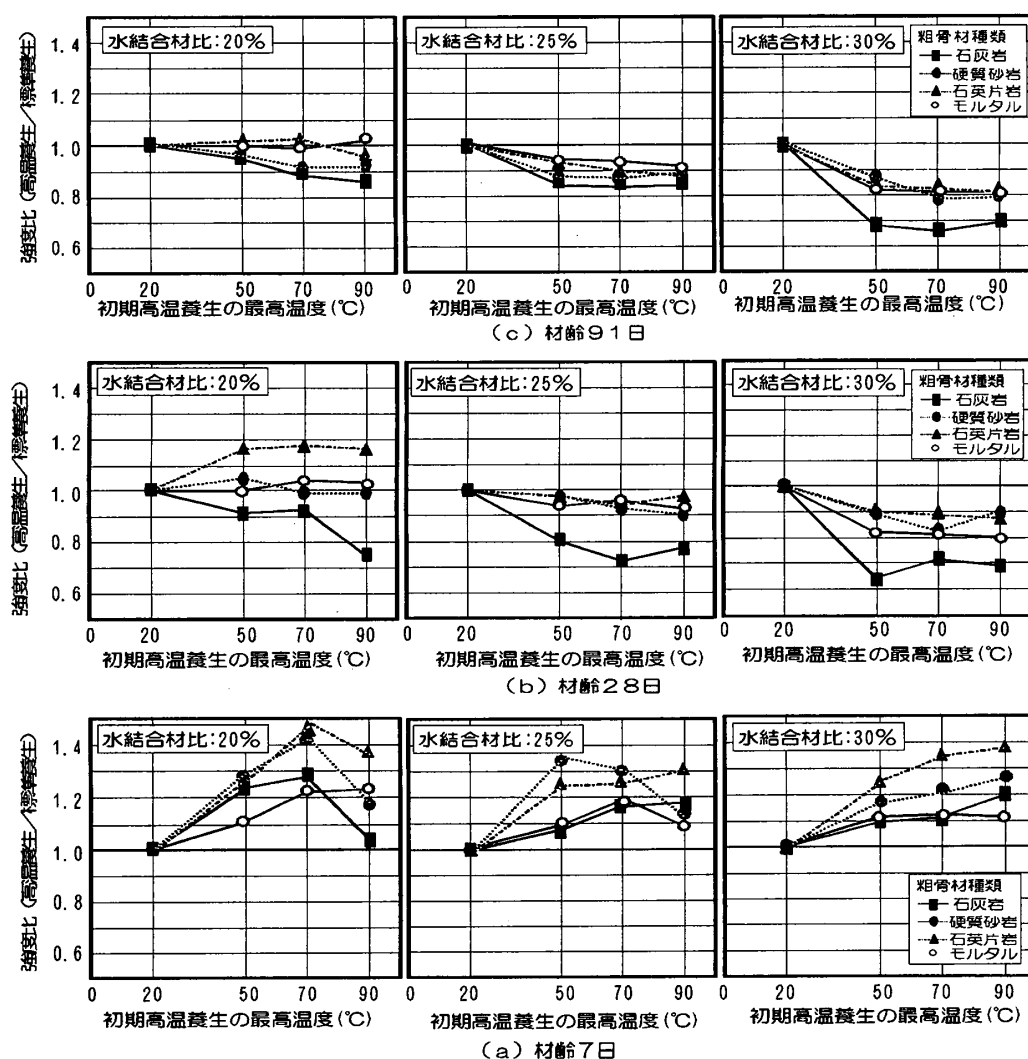


図-4 初期高温養生と標準養生の強度比

タルの強度増進の低下がコンクリート強度の低下に結びついているといえる。これに対して石灰岩コンクリートでは初期高温養生による強度の低下がモルタルよりも大きい。これはモルタルの強度低下に加えて、骨材の熱的な品質の違いが強度低下に影響していると考えられる。

3.4 粗骨材の熱的性質が初期材齢でのコンクリートの熱変形及び力学的性質に及ぼす影響

図-5には各温度条件下での骨材の線膨張係数の試験結果を示す。石英片岩及び硬質砂岩の線膨張係数は試験体の採取方向による差異は小さく、線膨張係数の平均値は石英片岩で $8.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、硬質砂岩で $7.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。一方、石灰岩の場合は、試験体の採取方向によりそれぞれ、 $7.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $4.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と線膨張係数が大きく異なっている。したがって石灰岩は、線膨張係数が小さいと同時に熱変形に対して異方性を持っているといえる。このため、コンクリートが高温の温度履歴を受けた場合、骨材の熱による変形が不均一となり、水和反応の過程でモルタル部分との変形が他の骨材と異なると推測される。

図-6には、 20°C 一定温度及び最高温度 70°C までの初期高温養生を行った水結合材比25%の試験体の、打ち込み直後からの全歪み測定結果を示す。試験体のみかけの全歪み量(ε)は水和反応に伴う自己収縮歪み(ε_s)と温度変化による歪み(ε_t)の和と仮定すると、歪みの測定値 ε は以下の式で表せる。

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_t = \varepsilon_s + \alpha \cdot \delta T \quad (\alpha: \text{線膨張係数}, \delta T: \text{温度変化}) \quad (1)$$

今回の計測では、 ε_s 及び α とも水和反応の進行に伴って変化するため、これらの項を明確に分離することはできない。このため、みかけの全歪み ε の材齢による変化をモルタル及び各骨材コンクリートについて比較した。 20°C の場合は温度変化が小さいため、見かけの歪み量の大部分は自己収縮 ε_s と考えられるが、歪み量の経時変化の骨材種類による差異は小さい。 70°C までの初期高温養生の場合は、水和反応が急速に進行するため自己収縮量が大きく、温度が下降域に入ると、温度降下による熱収縮と自己収縮により試験体は急速に収縮する。硬質砂岩及び石英片岩コンクリートでは温度降下時の歪みの変化量がモルタルに近い値となることからモルタルと骨材の線膨

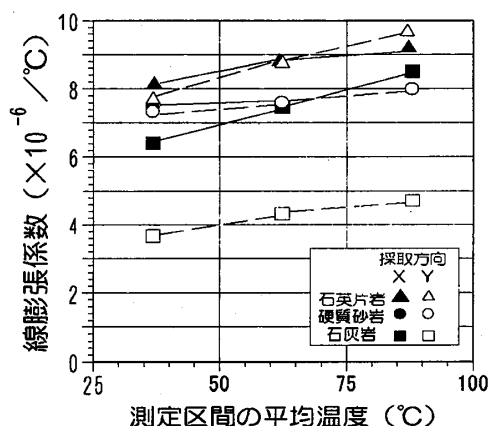


図-5 粗骨材の線膨張係数試験結果

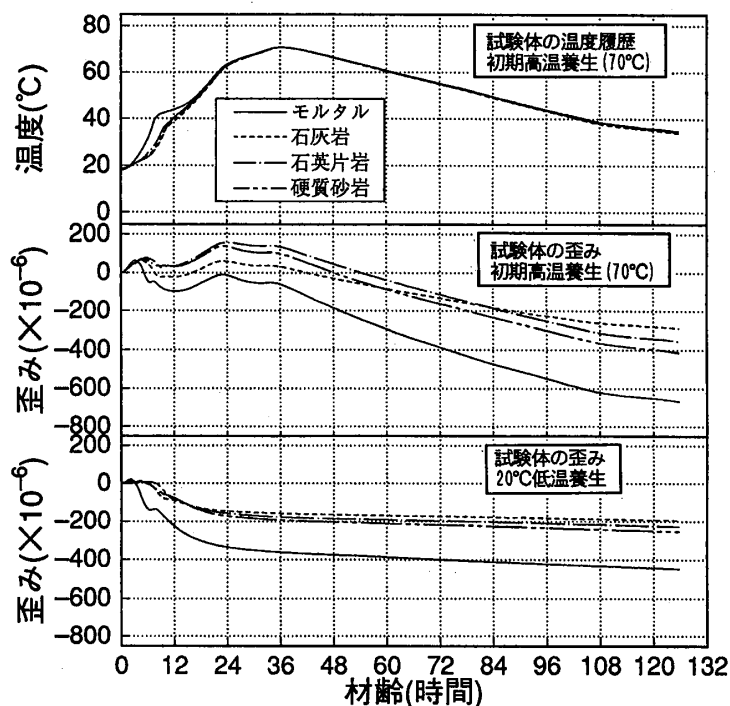


図-6 初期材齢での温度条件と歪みの関係

張係数が比較的近い値と考えられるのに対し、石灰岩コンクリートでは骨材の線膨張係数が小さいため、モルタルとの収縮歪みの差が大きい。図-7には材齢28日での静弾性係数と養生条件の関係を示す。高温養生の養生温度が高くなるほどモルタルの静弾性係数が増加するのに対し、石灰岩コンクリートの静弾性係数は大きく低下する。硬化したコンクリートの骨材の線膨張係数の違いが高温時に微少ひびわれを生じさせることは田沢ら [5] が指摘しているが、初期材齢でのコンクリートの水和反応による硬化過程においても、骨材とモルタルとの線膨張係数の差異によりコンクリート内部に熱応力が発生し、微細なひびわれ等の欠陥を誘発されるため、コンクリートの内部構造が弛緩され、静弾性係数や強度が低下すると考えられる。

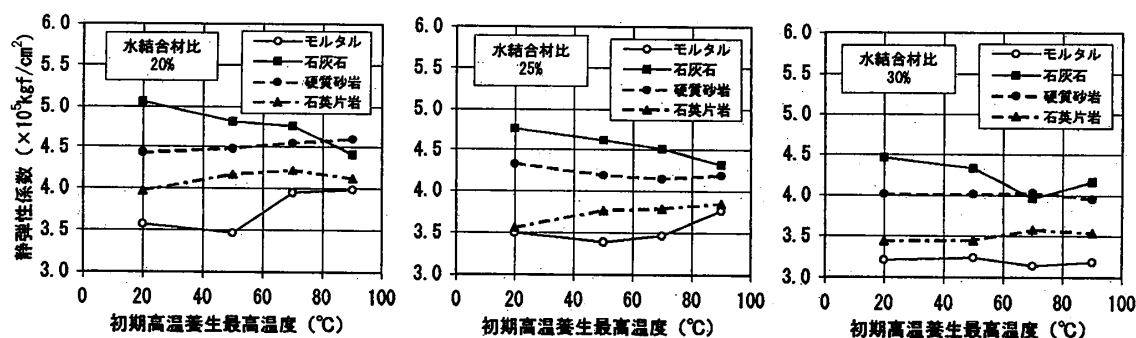


図-7 静弾性係数に及ぼす養生温度の影響

4. まとめ

初期材齢に高温を受ける高強度コンクリートの圧縮強度の標準養生に対する強度の低下に及ぼす影響について実験的検討を行った結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 初期高温養生を施したモルタルでは初期材齢で強度が急速に発現し、長期材齢での強度の増加は小さいが、水結合材比が小さいほど、初期高温養生時の強度発現が大きいいため、標準養生に対する強度低下は見かけ上小さくなる。これは水結合材比が小さい程初期材齢での高温条件により水和反応が促進されるためと考えられる。
- 2) 粗骨材の線膨張係数がモルタルに近い硬質砂岩、石英片岩を用いたコンクリートの初期高温養生時の標準養生に対する強度低下は、モルタルの場合と同様な比率となり、モルタルの強度低下がコンクリートの強度低下の原因となる。
- 3) 石灰岩は線膨張係数がモルタルに比べ小さく熱変形に異方性があるため、初期高温養生条件下での標準養生に対する強度及び静弾性係数の低下はモルタルよりも大きい。これは両者の線膨張係数の差異によりコンクリート中に熱応力が発生し、微細な欠陥を生じさせるためと考えられる。

(参考文献)

- [1] 奥野, 米澤, 三井, 岩清水, シリカフェームを用いた高強度コンクリートの構造体強度に関する検討, 日本建築学会大会梗概集, A, pp465-466, 1992
- [2] 超流動コンクリート研究委員会報告書(II), 日本コンクリート工学協会, 1994年2月
- [3] 丸島, 戸祭, 黒羽, 高強度コンクリートの水和発熱による温度上昇がセメントの水和と強度発現に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp457-462, 1992
- [4] 西崎, 米澤, 岩清水, 永嶋, 超高強度コンクリートの夏期構造体強度に関する実験, 日本建築学会大会梗概集, A, pp463-464, 1992
- [5] 田沢, 南, 影山, 渡辺, 高温の影響を受けるコンクリートの力学的特性に及ぼす骨材種類の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, pp13-18, 1987