

解析温度履歴養生による高強度コンクリートの構造体強度の推定

技術本部 技術研究所 中瀬博一
 技術本部 技術研究所 藤井和俊
 技術本部 技術研究所 渡邊一弘

概要:本報告は、標準期に高強度コンクリートを実大柱模擬試験体に打ち込み、そこから採取したコアの圧縮強度と温度追従養生供試体の圧縮強度を比較検討した。模擬柱部材の標準期での温度履歴を温度解析により求め、これを用いて冬期に温度制御装置で解析温度履歴養生を行い、その供試体の圧縮強度と冬期実験結果のコアの圧縮強度とを比較検討し、その再現性の確認と解析温度履歴養生による高強度コンクリートの構造体強度の推定方法の有効性について、実験的に確認したものである。その結果、解析温度履歴養生供試体強度とコア強度との相関性は高く、解析温度履歴養生強度を用いることにより構造体強度を推定でき、施工時期に見合う実験の実施時期にとらわれることなく、通常の円柱供試体によって高強度コンクリートの強度補正值 S を決定できる可能性がある。

Key Words: 解析温度履歴, 高強度コンクリート, 構造体強度, 強度推定

1. はじめに

高強度コンクリートを実建物に使用する際には、構造体コンクリート強度としてのコア供試体の材齢 n 日の圧縮強度と標準養生供試体の材齢 m 日の圧縮強度との差として定義される強度補正 (mSn) 値を実験などで確認し、それをを用い調合強度を求める必要がある。これらの実験は、実際の工事条件に合わせた試験時期(冬期, 標準期, 夏期)での実施を必要とするため、時間的な制約も伴う。これに対し、高強度コンクリートの構造体の温度履歴を精度よく解析から求め、得られた温度履歴を専用の温度制御装置内で忠実に再現した養生(以下解析温度履歴養生)を行うことにより、任意の季節に通常の円柱供試体で施工時期の変動を考慮した構造体強度の推定が行えると考えられる。しかし、生コン工場に設置された専用の温度制御装置を用いた報告は、筆者らの知る限りではまだ無く、解析した温度履歴データを入力し加熱装置を用いた養生についての報告^{1),2)}も少ない。本報告は、標準期に高強度コンクリートを実大模擬柱試験体に打ち込み、それから採取したコアの圧縮強度と、実大柱模擬試験体内部の温度履歴に追従した温度履歴を与えた温度追従養生供試体の圧縮強度を比較検討した(ステップ)。標準期の解析温度履歴を求め(ステップ)、これを入力データとして冬期に温度制御装置を用いて標準期を想定した解析温度履歴養生を行い、その供試体の圧縮強度とステップの標準期の実験結果でのコア強度とを比較検討し、円柱供試体を用いた

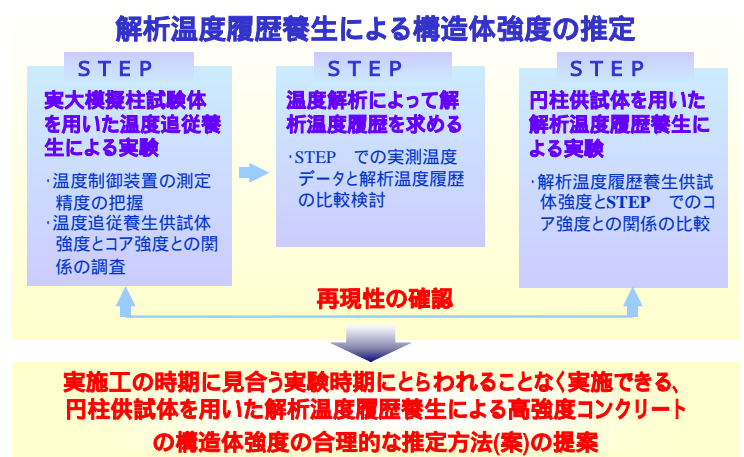
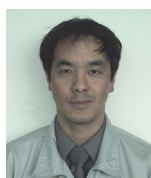


図-1 本報告のフロー



中瀬博一



藤井和俊



渡邊一弘

解析温度履歴養生による高強度コンクリートの構造体強度の推定方法の有効性について実験的に確認した(ステップ)。本報告のフローを図-1 に示す。なお、本温度制御装置を用いた温度追従養生と解析温度履歴養生の基本的な違いは、入力データの違い、および材齢7日以降の養生が現場封緘養生と平均気温による定温封緘養生の違いで、高温履歴を受ける材齢7日までの養生方法それ自体は同様なものである。

2. 温度制御装置

実験に用いた温度制御装置は、コンクリートの打込み時から実大試験体の内部温度が外気温とほぼ同様になる時期までの養生期間を想定し、常時温度を 0 ~ 100 の範囲で制御できる 3 つの変温養生箱(内法 D600 × W800 × H350mm)と、実大試験体の内部温度が外気温とほぼ同様になる時期から試験材齢までの養生期間を想定し、一定の温度保持ができる 3 つの定温養生箱(D600 × W800 × H300mm)を備えている。1 つの養生箱にはそれぞれ 15 本の封緘した供試体を設置でき、それら養生箱内の温度を装置内に内蔵している冷凍機とヒータ(P.I.D 制御)で制御している。温度制御装置を図-2 に示す。



図-2 温度制御装置

3. 標準期での実大模擬柱試験体を用いた温度追従養生による実験 (ステップ)

(1) 実験概要

a) 実験の要因と水準

実験要因と水準を表-1 に示す。

表-1 実験要因と水準

実験要因	水準
水セメント比	34, 29, 22%
供試体	標準養生、コア、温度追従養生

b) 使用材料と調合

コンクリートの使用材料を表-2 に、計画調合を表-3 に示す。

表-2 コンクリートの使用材料

種類	産地・性質
セメント	シリカフェームセメント 密度 3.08g/cm ³ , 比表面積 5600 cm ² /g,
細骨材	君津産山砂: 表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 1.63%
粗骨材	鳥形山石灰石砕石: 表乾密度 2.70g/cm ³ , 吸水率 0.41%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

コンクリートの目標スランプフローは 65cm, 目標空気量は 2.0%とした。

c) 実大模擬柱試験体

実大模擬柱試験体の形状およびコアの採取位置を図-3 に示す。

d) コンクリートの製造・打込み

コンクリートは所定の調合を 6m³の二軸強制練りミキサーで混練したものをアジテータトラックに投入し、現場までの想定時間 30 分経過後にフレッシュ性状の確認を行った。その後、図-3 に示す実大模擬柱試験体に 2 層に分けて打込み、各層に棒状バイブレーターを約 5 ~ 10 秒間挿入し締め固めた。

e) 温度追従養生供試体の製作

温度追従養生供試体は、10cm × 20cm の軽量モールドにコンクリートをつめてポリエチレンフィルムとビニールテープを用いて封緘した後、専用の鋼製の円筒容器に入れ、それを図-2 に示す装置内の可変養生箱に設置し、材齢7日までは実大模擬柱試験体のコア近傍部と同一の温度履歴に追従し、養生をおこなった。材齢7日以降は試験材齢まで現場封緘養生とした。供試体は、1つの養生箱に調合ごとに材齢 7, 28, 56, 91 日用で 3 本ずつ、合計 12 本設置した。

f) 圧縮強度試験

コア供試体の圧縮強度試験は、JIS A 1107 に、温度追従養生供試体の圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じて行った。

表-3 コンクリートの計画調合

W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
34	43.6	143	421	793	1067
29	41.8	146	504	728	1053
22	37.3	150	682	590	1031

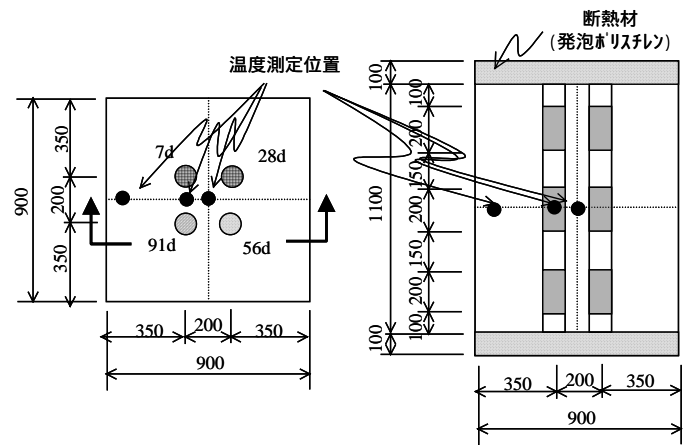


図-3 実大模擬柱試験体 (単位 mm)

(2) 結果および考察

a) フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状を表-4 に示す。フレッシュコンクリートは、各調合においても目標通りの良好な性状であった。

b) 温度履歴

模擬柱部材コア近傍部および温度追従養生箱内部の温度推移を図-4 に示す。模擬柱部材のコア近傍部および温度追従養生箱内部の温度は、打ち込み後 24 ~ 32 時間で最高温度に到達した。その後温度は下降し、材齢 6 日程度で外気温とほぼ同様となった。模擬柱部材のコア近傍部最高温度は水セメント比 22% では 65.9、29% で 56.1、34% では、49.0 であった。模擬柱部材コア近傍部の温度に追従した温度追従養生箱内部での最高温度は、模擬柱部材コア近傍部最高温度の -0.6 ~ +1.9 の範囲で精度良く追従しており、文献^{4),5)}などと同様な結果であった。また、温度履歴の傾向も下降勾配については温度の制御にややばらつきが認められたが、概ね模擬柱部材コア近傍部と同様であった。このように本温度制御装置を用いることにより、精度よく模擬柱部材コア近傍部の温度履歴を再現できることが確認できた。なお、コア近傍部の温度履歴は、コアを採取した位置が模擬柱部材の中心とは約 10cm 離れているが、模擬柱部材中心部の温度履歴とほぼ同様の推移を示した。

表-4 フレッシュコンクリートの性状

W/C (%)	スランプフロー (cm)	50 cmフロー-時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 ()
34	67.0 × 67.0	2.4	1.6	25.0
29	68.5 × 68.5	3.1	1.5	26.0
22	69.0 × 68.5	4.4	1.9	26.0

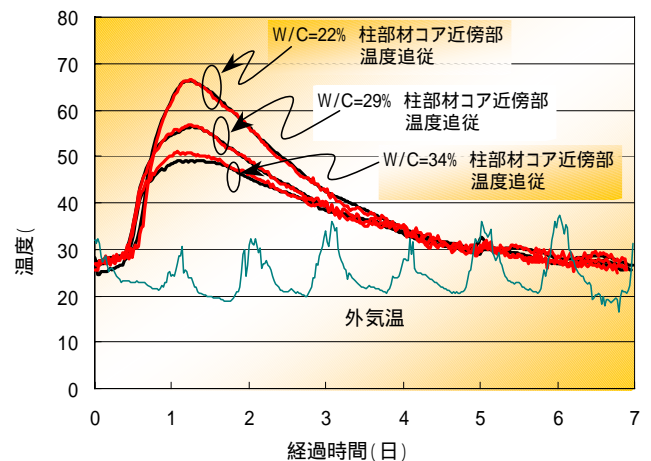


図-4 模擬柱部材のコア近傍部および温度追従養生の温度履歴

c) 圧縮強度

積算温度と各種圧縮強度の関係を図-5 に示す。養生条件によらず積算温度に対する圧縮強度は増加する傾向にあるが、標準養生強度の増加に対する温度追従養生及びコア強度の増加は小さかった。また、水セメント比が大きいほど構造体の最高温度が低いため、温度追従養生及びコア強度の増加が大きかった。温度追従養生強度はコア強度とほぼ同等の推移を示した。これは、模擬柱部材のコア近傍部の温度推移と、温度追従養生箱内部の温度推移を比較した場合、最高温度の差は -0.6 ~ +1.9 と小さく、同様な温度履歴となったことが原因であると考えられる。

d) 温度追従養生供試体強度とコア強度

温度追従養生強度とコア強度の関係を図-6 に示す。各調合により若干の違いは認められたものの、温度追従養生強度とコア強度は高い相関性を示した。その回帰式の勾配がほぼ1に等しいことから、温度追従養生強度はコア強度とほぼ同一とみなすことができる。

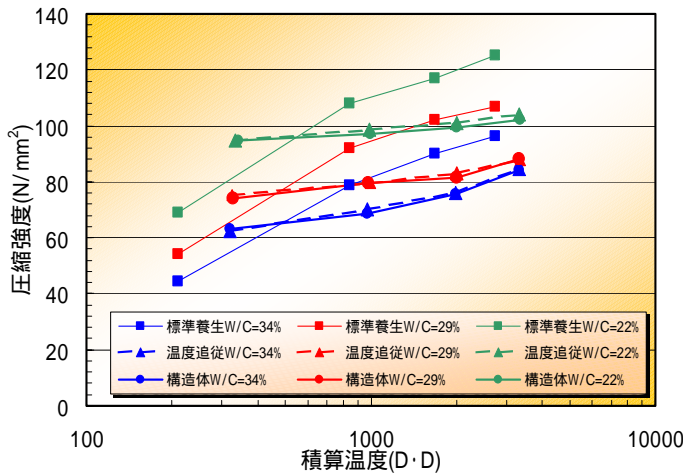


図-5 積算温度と各種圧縮強度

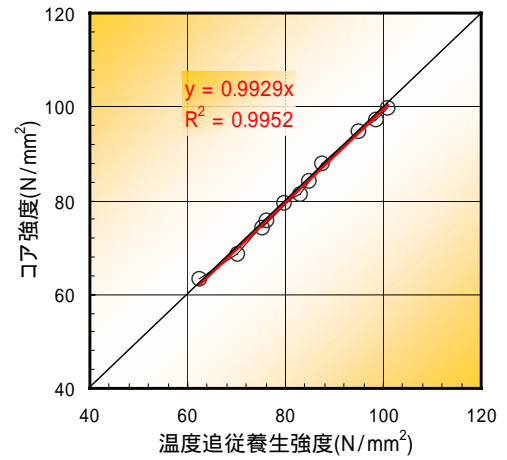


図-6 温度追従養生強度とコア強度

4. 標準期を想定した温度履歴の解析 (ステップ)

(1) 温度履歴解析条件

コンクリートの温度履歴の解析は、(株)計算力学研究センター ASTEA - MACS を使用した 3 次元 FEM 解析を行った。解析モデルを図-7 に、解析条件を表-5 に示す。

(2) 解析結果

模擬柱部材コア近傍部の温度履歴の解析値を図-8 に示す。部材内部温度履歴の解析温度は、打ち込み後 24~36 時間で最高温度に到達した。その後温度は下降し、材齢7日程度で外気温とほぼ同様となった。ステップでの模擬柱部材のコア近傍部最高温度は、水セメント比 22% では 65.9、29%で56.1、34%では、49.0 であ

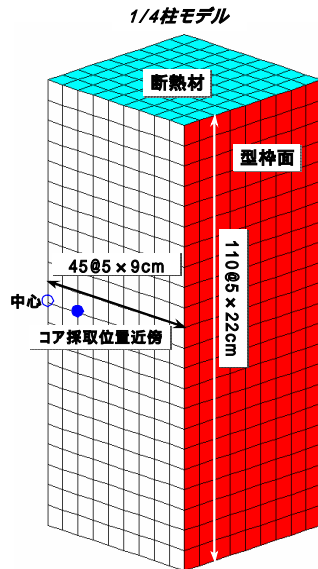


図-7 解析モデル

表-5 温度解析条件

区分	項目	条件	
コンクリート	熱伝導率 (W/m・)	2.7	
	単位体積質量 (kg/m³)	W/C=34%	2424
		W/C=29%	2431
		W/C=22%	2453
	比熱 (kJ/kg・)	1.15	
	断熱温度上昇定数	W/C=34% C:421kg/m³	Q = 44.5 = 0.7620 = 0.8414
W/C=29% C:504kg/m³		Q = 47.5 = 0.9447 = 1.0076	
W/C=22% C:682kg/m³		Q=53.74 =1.3765 = 1.3576	
その他	熱伝達率 (W/m²)	型枠面 5日目まで: 3.5 断熱材 5日目まで: 2.0 空気 6日目以降: 14.0	
	解析期間	2002/5/30 ~ 6/5	
	初期温度 ()	25.9 ~ 28.3 (各調合での打設温度)	
	外気温	実測値	

った。図-8 に模擬柱部材内部温度履歴と解析値との関係を示す。温度解析における模擬柱部材コア近傍部の最高温度は、実測値に比べて0.7~2.9 の範囲で低く、最高温度到達時間は、3~5時間遅かった。また、解析値の方が実測値に比べて昇温時期が早く、降温勾配がやや緩やかであった。しかし、いずれの調合においても比較的実測値との相関性の高い解析結果が得られた。

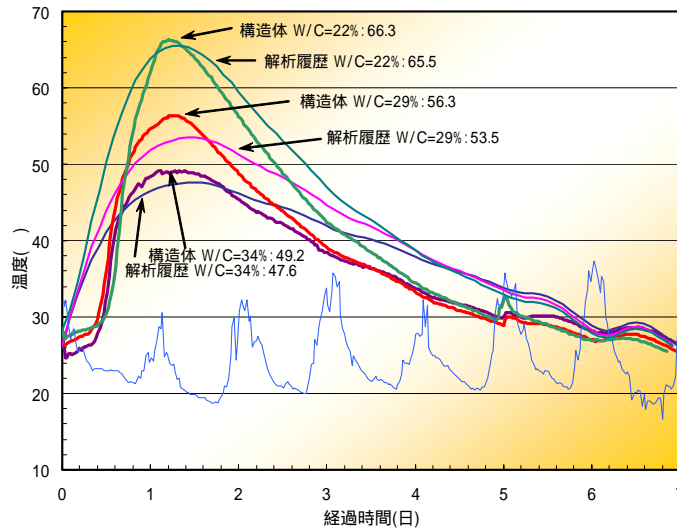


図-8 模擬柱部材内部温度履歴と解析値との関係

5. 標準期を想定した冬期での円柱供試体を用いた解析温度履歴による実験 (ステップ)

(1) 実験概要

a) 使用材料と調合

コンクリートの使用材料および計画調合は、ステップ の実験と同様とした。

b) コンクリートの製造

コンクリートは、ステップ の実験と同様に所定の調合を 6m³ の二軸強制練りミキサで混練し、現場までの想定時間 30 分経過後にフレッシュ性状を確認した。その後供試体の製作を行った。

c) 解析温度履歴養生供試体の製作

解析温度履歴養生供試体の製作は、ステップ の温度追従養生供試体と同様に行った。

d) 解析温度履歴養生

供試体の養生は、コンクリートの打ち込み時から実大試験体の内部温度が外気温とほぼ同様になる材齢 7 日までは、図-8 の解析温度履歴で可変養生箱を用いて行い、材齢 7 日から試験材齢までは、ステップ の実験での外気温の平均値(材齢 7~28 日:21 , 材齢 28~56 日:24 , 材齢 56~91 日:25)を用いて、定温養生箱で行った。

(2) 結果と考察

a) フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状を表-6 に示す。フレッシュコンクリートは、各調合においても目標通りの良好な性状であった。

表-6 フレッシュコンクリートの性状

W/C (%)	スランブフロー (cm)	50 cmフロー時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
34	65.5 × 64.5	4.8	2.1	11.0
29	69.5 × 67.0	5.6	2.1	12.0
22	67.5 × 67.0	9.4	2.0	13.5

b) 圧縮強度

積算温度に対する各種圧縮強度の関係を図-9 に、解析温度履歴養生強度とコア強度の関係を図-10 に示す。積算温度に対する解析温度履歴養生強度は、コア強度とほぼ同様に推移する。解析温度履歴養生強度はコア強度に対して、-1.2 ~ 5.5N/mm² の範囲にあり、水セメント比の高い調合の場合に、解析温度履歴養生強度の方がやや高い傾向にある。しかし、その相関性は比較的高いといえる。

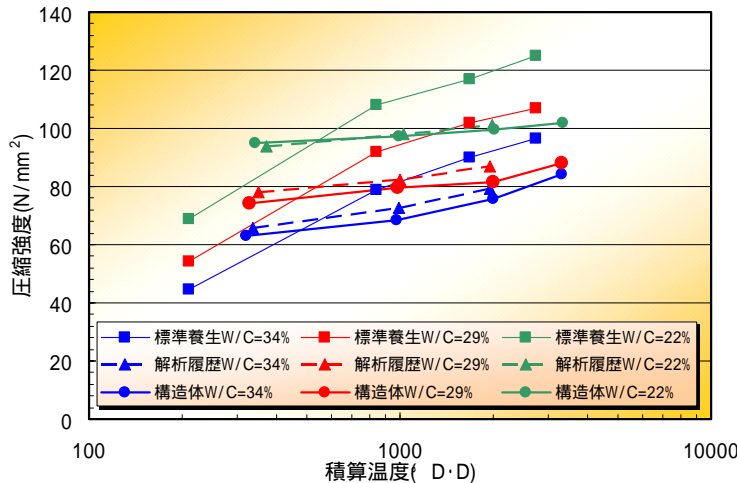


図-9 積算温度と各種圧縮強度

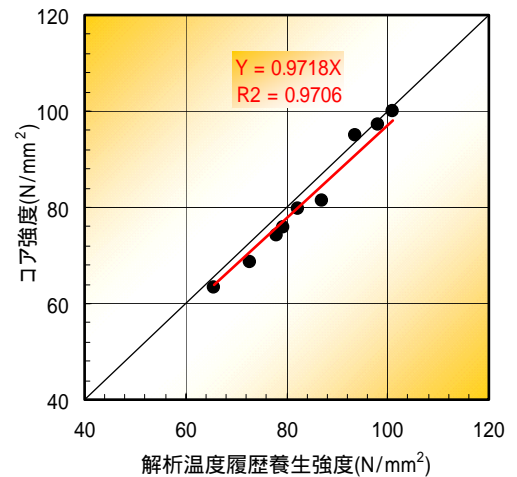


図-10 解析温度履歴養生強度とコア強度

6. まとめ

本研究の結果をまとめると、以下の通りである。

温度追従養生箱内部の最高温度は、模擬柱部材コア近傍部での最高温度の-0.6 ~ +1.9 の範囲で精度良く追従しており、概ね模擬柱部材コア近傍部と同様であった。

積算温度に対する温度追従養生強度は、コア強度とほぼ同様なものであった。

温度追従養生強度とコア強度との相関性は高く、温度追従養生強度は、コア強度とほぼ同一とみなせる。

温度解析における模擬柱部材コア近傍部の最高温度は、実測値に比べて 0.7 ~ 2.9 の範囲で低く、最高温度到達時間は、3 ~ 5 時間遅かったが、いずれの調査においても比較の実測値との相関性の高い解析結果が得られた。

積算温度に対する解析温度履歴養生強度は、コア強度とほぼ同様に推移し、同等かやや高い傾向にあった。

解析温度履歴養生強度とコア強度の相関性は比較的高い。

以上解析温度履歴養生を行うことにより、施工時期の変動を考慮した高強度コンクリートの構造体強度の推定を、通常の円柱供試体で任意の季節に行うことが可能であると考えられる。

謝辞

本研究を行うに当たり、前足利工業大学工学部建築学科 教授毛見虎雄博士にはご指導を頂き、(株)宇部三菱セメント研究所 鳴瀬浩康主席研究員、(株)東京菱光コンクリート 佐藤光男技術部長および竹本油脂(株)金井健一氏の協力を得ました。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大倉真人, 西村進, 古賀一八: 高強度コンクリートへの低熱ポルトランドセメントの適応性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP11 ~ 12, 1999.9
- 2) 牧野真之, 江口清, 中込昭: 高強度コンクリートの調合設計におけるS値の算定法 推定温度履歴を用いた構造体コンクリート強度の確認, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP901 ~ 902, 2000.9
- 3) 藤井和俊, 鳴瀬浩康, 渡邊一弘, 佐藤光男, 毛見虎雄: 高強度コンクリートの簡易断熱養生方法に関する一考察, 日本建築学会技術報告集第 17 号, 2003.6
- 4) 山崎庸行, 宮下剛士, 酒井芳文: 高強度コンクリートにおける部材温度追従供試体の強度発現性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp319 ~ 320, 1992.8
- 5) 太田達見, 山崎庸行, 黒田泰弘, 法量良二: 高強度コンクリートの強度発現性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp797 ~ 798, 1998.9