

論文 フライアッシュを45%まで内割使用したコンクリートに関する実験的研究

船本 憲治*1・宝口 繁紀*2・永松 武教*3・小谷 一臣*4

要旨: フライアッシュをセメントの45%まで内割使用したコンクリートを用い、断熱温度特性、強度発現性状、耐久性状に関する検討を行った。その結果、フライアッシュ内割使用は、コンクリートの高温環境下における強度発現性状において特に有効であることが明確になった。また、フライアッシュ内割使用は、塩分浸透性および透水性において有効であるが、一方、促進中性化においては中性化速度を速めるためフライアッシュ置換率の上限値の設定を十分考慮する必要があることが明確になった。

キーワード: フライアッシュ, コンクリート温度, 強度発現, 促進中性化, 塩分浸透性

1. はじめに

全国の石炭火力発電所等から発生する石炭灰の量は現在年間約500万トンに達し、近年のエネルギー事情を反映して今後更に増加し、2010年には1090万トンに増大すると予測されており、今後、石炭灰は環境保護あるいは資源の有効利用といった観点から、大量かつ有効に利用する方法を確立する時期にきているといえる。

そこで、本研究は、フライアッシュの大量有効利用が見込まれるマスコンクリートに着目し、フライアッシュをセメントの45%まで内割使用したコンクリートを用い、断熱温度特性、強度発現性状、耐久性状に関する実験検討を行った。

2. 実験概要

2.1 要因と水準

表-1に実験の要因と水準を示す。室内試験は、水結合材比(W/B)を45~60%の範囲で4水準、フライアッシュ置換率(FA/B)を通常の20%を越え0~45%の範囲で4水準とした。

また、今後の実機基礎マットスラブ(70m×

70m×H2.6m)の施工を想定した実機試験は、W/B=55%で一定とし、FA/Bを0~45%の範囲で3水準とした。なお、室内試験の内、温度特性、耐久性試験はW/B=55%のみとした。

2.2 使用材料および割合

使用材料を表-2に、フライアッシュの品質を表-3に示す。フライアッシュは、九州地区のR発電所より発生した分級細粉であり、JIS規格ではフライアッシュII種に適合している。

割合表を表-4に示す。所定のスランプ(15cm)および空気量(4%)を満足するように、単位水量および空気量調整剤を用いて調整を行った。なお、目標スランプ15cmはマスコンクリートを想定したものである。

表-1 実験の要因と水準

項目	要因と水準
室内試験	W/B=45, 50, 55, 60%, FA/B=0, 15, 30, 45% (温度特性, 促進中性化, 塩分浸透性, 透水試験はW/B=55%のみで実施) (養生温度は20℃としW/B=55%のみ10, 30℃でも実施)
実機試験	W/B=55%, FA/B=0, 30, 45% (1m×1m×H2, 6m 模擬供試体を使用)

*1九州電力(株) 苓北発電所建設所土木建築課長 工修(正会員)

*2九州電力(株) 苓北発電所建設所土木建築課

*3西日本技術開発(株) 耐震調査部土木試験室課長(正会員)

*4西日本技術開発(株) 耐震調査部土木試験室

2.3 試験項目および方法

試験項目および方法を表-5に示す。簡易断熱試験体は、φ12.5cm×H25cmの金属製型枠を用いて作成し図-1に示すような容器に入れ、熱伝対により供試体中心温度を測定するとともに材齢7,28,91日の圧縮強度を測定した。模擬供試体は、今後の実機基礎マットスラブ(70m×70m×H2.6m)を想定し、図-2に示すように熱伝対により各点の温度を測定するとともに材齢28,91日のコア供試体(φ12.5cm×H25cm)の圧縮強度を測定した。なお、1m×1m×H2.6mの側面(4面)には厚さ100mmの発泡スチロールを巻きその上から木製型枠を設置した。また、今回の実験では公称容量150ℓ傾胴式ミキサー(室内試験)およびレディミクストコンクリート工場(実機試験)を用いた。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリートの性状

表-4の調査で所定のスラブおよび空気量

表-2 使用材料一覧表

材料名	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント (密度=3.15g/cm ³)
粗骨材	芦北産砕石(砂岩), 最大骨材寸法40mm (表乾密度=2.65g/cm ³ , 吸水率=0.47%)
細骨材	粗砂 崎戸産海砂 (表乾密度=2.58g/cm ³ , 吸水率=2.13%)
	細砂 八代産海砂 (表乾密度=2.60g/cm ³ , 吸水率=2.45%)
水	水道水
混和剤	A E減水剤, 空気量調整剤

表-3 フライアッシュの品質

項目	分級細粉	
二酸化けい素 (%)	53.1	
湿分 (%)	0.1	
強熱減量 (%)	1.7	
密度 (g/cm ³)	2.40	
粉末度	45μmふるい残量 (%)	2
	比表面積 (cm ² /g)	3,950
フロー値比 (%)	108	
活性度指数 (%)	材齢28日	88
	材齢91日	107

が確保されており、単位水量は、いずれの水結合材比においてもフライアッシュ置換率の増加に伴い、ほぼ直線的に減少している。また、空気量調整剤の添加率は、フライアッシュ置換率の増加に伴い高くなる傾向を示し、フライアッシュ置換率45%では無置換に対して5倍程度の添加率を要した。

3.2 コンクリートの発熱特性

図-3に簡易断熱温度上昇量試験(室内試験)における温度履歴を、図-4に模擬供試体温度上昇量試験(実機試験)における温度履歴を示す。最高温度はフライアッシュ置換率が大きくなるのに伴い低下しているが、一方、最高温度到達時間は逆に長くなっている。また、模擬供試体は簡易断熱試験体と比較して、最高温度が

表-4 調査表

W/B (%)	FA/B (%)	S/A (%)	単位水量 (kg/m ³)	AE減水剤 (B×%)	空気量調整剤 (B×%)
45	0	42	187	1.0	0.003
	30	42	179	1.0	0.012
	45	43	176	1.0	0.016
50	0	43	185	1.0	0.003
	30	43	179	1.0	0.010
	45	44	175	1.0	0.016
55	0	44	185	1.0	0.003
	15	43	180	1.0	0.007
	30	44	178	1.0	0.009
60	45	45	175	1.0	0.015
	0	45	186	1.0	0.003
	30	45	180	1.0	0.007
	45	46	177	1.0	0.016

表-5 試験項目および方法

試験項目		試験方法	
室内試験	フレッシュコンクリート	スラブ	JIS A 1101
		空気量	JIS A 1128
	温度上昇特性	簡易断熱温度上昇量	簡易断熱温度試験による
		断熱温度上昇量	断熱温度上昇試験装置による
	硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108による(材齢7,28,91日)
		ヤング係数	コンプレッションメータによる
		促進中性化	建築学会(案)(温度20℃,湿度60%,CO ₂ 5%)
		乾湿繰り返しによる塩分浸透性	コンクリート工学協会編による(20℃海水浸漬4日,50℃風乾3日)
		透水試験	JIS A 1132による
		温度上昇特性	内部温度
実機試験	硬化コンクリート	簡易断熱温度上昇量	簡易断熱温度試験による
		標準水中圧縮強度	JIS A 1108による(材齢7,28,91日)
	簡易断熱コア供試体	JIS A 1108による(材齢7,28,91日)	
	促進中性化	打込アロックからコア採取(材齢28,91日)	
	促進中性化	建築学会(案)(温度20℃,湿度60%,CO ₂ 5%)	

かなり高くなるとともに最高温度到達時間もかなり長くなっている。このことは、コンクリート打込温度に差はあるものの（簡易断熱 20～21℃，模擬供試体 23～24℃），模擬供試体に比べて簡易断熱試験体は多くの熱を外部へ放出していることを意味している。

図-5にフライアッシュ置換率と単位結合材当りの温度上昇量の関係を示す。フライアッシュ

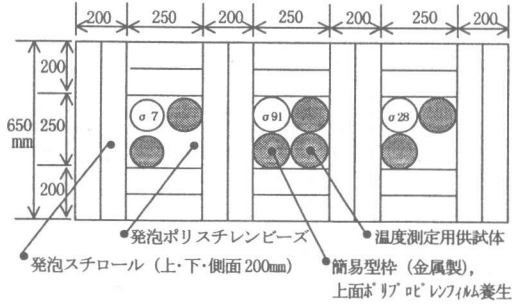
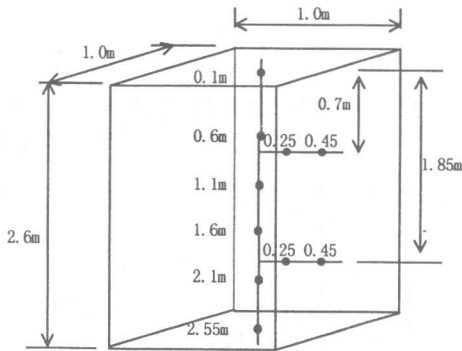


図-1 簡易断熱試験体 (φ12.5cm×H25cm)



※ ●は、熱伝対の設置位置
 ※ 側面(4面)に厚さ100mmの発泡スチロールを巻く
 ※ 数字は、縦方向は上面から、横方向は中心からの距離

図-2 模擬供試体 (1m×1m×H2.6m)

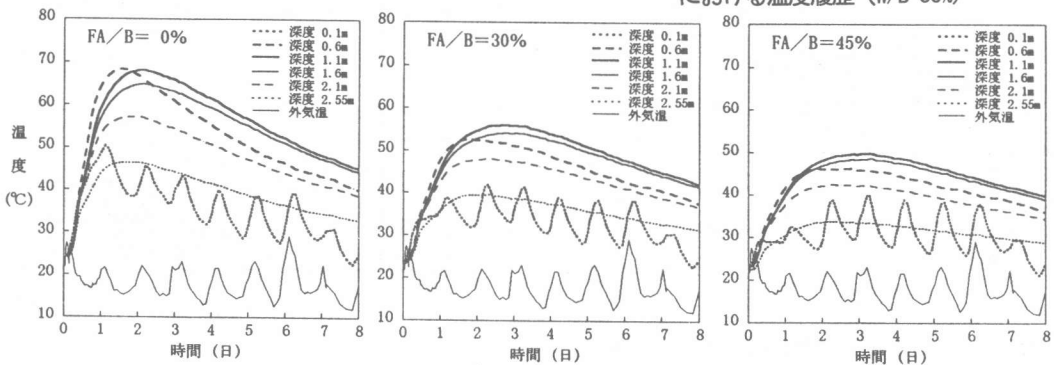


図-4 模擬供試体温度上昇量試験(実機試験)における温度履歴(W/B=55%)

置換率が大きくなるのに伴い単位結合材当りの温度上昇量は小さくなり、簡易断熱試験体の場合、水結合材比(W/B)に関係なくほぼ一定の値になっている。なお、模擬供試体は、同じ水結合材比55%でも簡易断熱試験体に比べて単位結合材当りの温度上昇量が大きい値となっている。

図-6にフライアッシュ置換率とコンクリートの最高温度到達時間の関係を示す。フライアッシュ置換率が大きくなるのに伴い最高温度到達時間は長くなるが、簡易断熱試験体の場合、水結合材比(W/B)に関係なくほぼ一定の値になっている。なお、模擬供試体は同じ水結合材比55%でも簡易断熱試験体に比べて最高温度到達時間が長くなっている。

3.3 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

図-7にフライアッシュ置換率および養生温

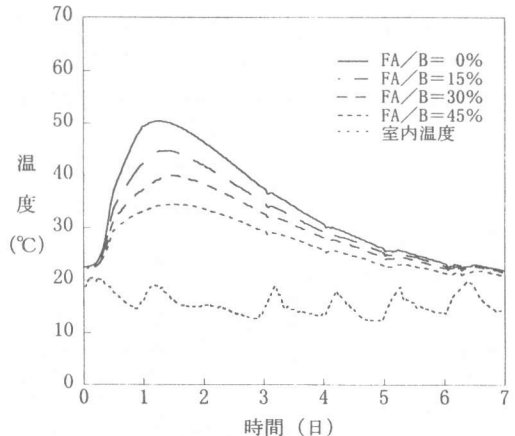


図-3 簡易断熱温度上昇量試験(室内試験)における温度履歴(W/B=55%)

度の違いによる材齢と圧縮強度の関係を示す。フライアッシュ置換率の影響としては、一般に置換率が大きくなるほど強度は低くなるが、材齢 91 日の養生温度 30℃における F A/B=0% と 30%は逆の結果となっている。養生温度の影響としては、材齢 91 日の強度が、F A/B=0% の場合は 10, 20, 30℃の順に、F A/B=30% の場合は 20℃と 30℃がほぼ同等で 10℃の順に、F A/B=45%の場合は 30, 20, 10℃の順に高い値を示した。このことは、フライアッシュ混入が特に暑中環境下の強度発現性状において有効であることを示している。

図-8にコンクリートの最高温度と圧縮強度比(簡易断熱試験体強度/標準養生試験体強度, 模擬供試体強度/標準養生試験体強度)の関係を示す。一般に、コンクリートが 50℃以上の高温履歴を受けると構造体強度の増進の割合が低下するが²⁾, 今回の試験結果においても各材齢においてコンクリートの最高温度が高くなるほど圧縮強度比が小さくなっている。また、簡易断熱試験体では、材齢 7 日の圧縮強度比が材齢

28 日および 91 日の圧縮強度比と比べて大きくなっているが、材齢 28 日と 91 日では材齢による差異は見受けられない。

図-9にフライアッシュ置換率と圧縮強度比(簡易断熱試験体強度/標準養生試験体強度, 模擬供試体強度/標準養生試験体強度)の関係を示す。どの材齢(7, 28, 91 日)においてもフライアッシュ置換率が大きくなるほど圧縮強度比も大きくなっているが、このことはフライア

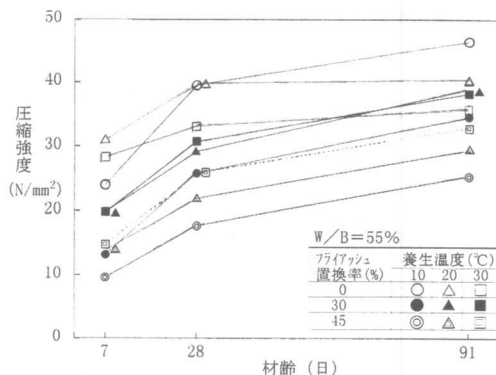


図-7 材齢と圧縮強度の関係 (フライアッシュ置換率, 養生温度の影響)

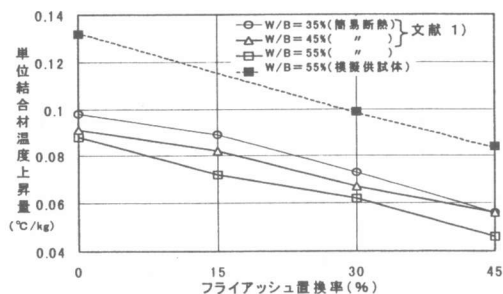


図-5 フライアッシュ置換率と単位結合材当りの温度上昇量の関係

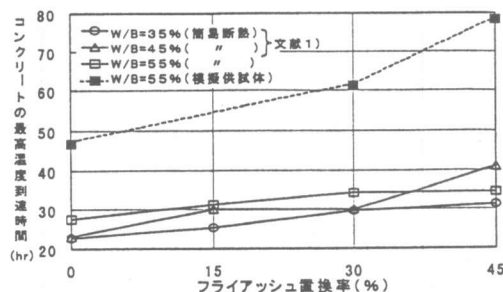


図-6 フライアッシュ置換率とコンクリートの最高温度到達時間の関係

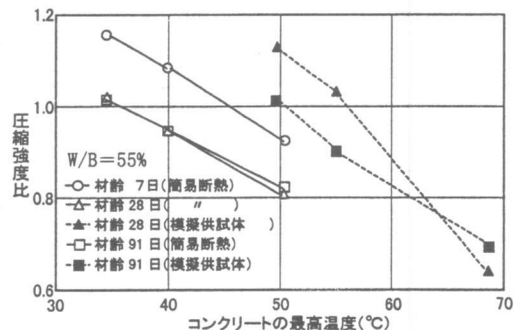


図-8 コンクリートの最高温度と圧縮強度比の関係

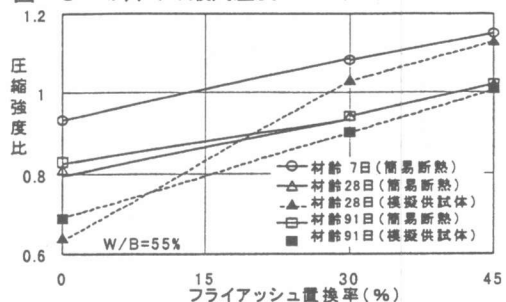


図-9 フライアッシュ置換率と圧縮強度比の関係

ツシュの混入によりコンクリートの最高温度が低下し圧縮強度比が増加したことに起因している。また、現在、建築工事標準仕様書（JASS5）では、マスコンクリートにおける構造体強度の管理は標準養生で実施することになっており、図-9によるとフライアッシュ置換率が45%では問題無いが、フライアッシュ置換率0～30%では、現手法に基づき適切な強度補正が必要なことを示している。

図-10に簡易断熱試験体における積算温度と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は、フライアッシュ置換率毎に積算温度と高い相関が認められる。また、フライアッシュ無置換の調合では積算温度が高くなってそれほどの強度の伸びは認められないが、フライアッシュを混入した調合ではその置換率が大きいほど強度の伸びも大きい。このことは、フライアッシュによるポゾラン反応が長期に渡り進行し強度増進が図られていることを示している。

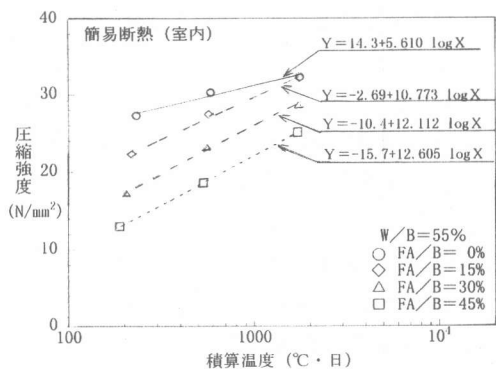


図-10 積算温度と圧縮強度の関係

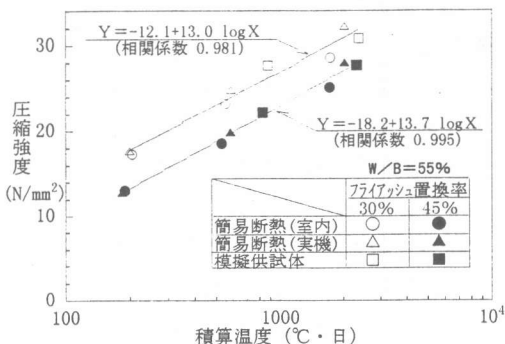


図-11 積算温度と圧縮強度の関係

図-11にフライアッシュ置換率30%および45%における積算温度と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は積算温度の対数と直線的な関係があり、このことは初期に高温履歴を受けたフライアッシュコンクリートの強度が積算温度により精度よく推測できることを示している。なお、フライアッシュ無置換の場合は、図-11のような相関は認められなかった。

(2) 促進中性化

促進中性化試験は、建築学会（案）により温度20℃・湿度60%・CO₂濃度5%の雰囲気とし材齢と中性化深さの関係を図-12に示す。中性化深さの進行は、フライアッシュ置換率が大きいほど大きく、JASS5「高流動コンクリート」の中での中性化深さに関する規定値25mmを参考にすると、水結材比55%のフライアッシュ置換率の上限は20%程度となる。これは文献1)による「フライアッシュ置換率の上限値は、水

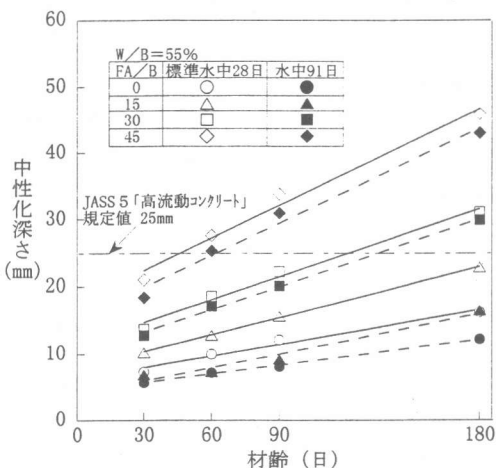


図-12 促進中性化試験結果 (室内試験)

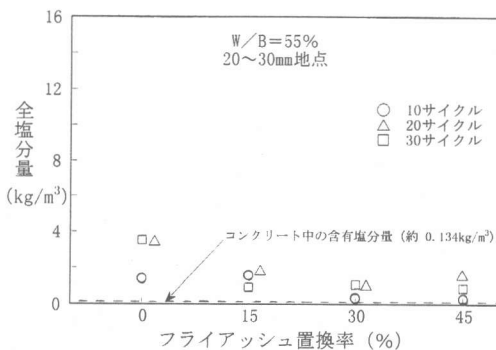


図-13 フライアッシュ置換率と全塩分量の関係

結合材比 35%で 50%, 水結合材比 55%で 20%」の結論とも一致した。なお、標準水中養生 91 日供試体は、標準水中養生 28 日供試体に比べていずれも中性化深さが若干小さくなる傾向にある。

(3) 塩分浸透性

塩分浸透性試験は、20℃の海水に 4 日間浸漬と 3 日間の風乾 (50℃) を 1 サイクルとして繰り返し行った。図-13 に供試体表面から 20~30 mm 地点のフライアッシュ置換率と全塩分量の関係を示す。フライアッシュを混入したコンクリートの方が混入しないものに比べて塩分浸透抑制効果が認められ、フライアッシュ置換率が大きくなるに伴って塩分量が少なくなっている。これは、フライアッシュのポゾラン反応によって、不溶性の安定したカルシウムシリケート水和物を生成し、これがコンクリート硬化体中の大きな毛細管空隙を充填することにより、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が増大したものと考えられる。

(4) 透水性

図-14 にフライアッシュ置換率と拡散係数の関係を示す。フライアッシュ混入により、拡散係数は大幅に減少し、コンクリートの水密性は大幅に向上する。

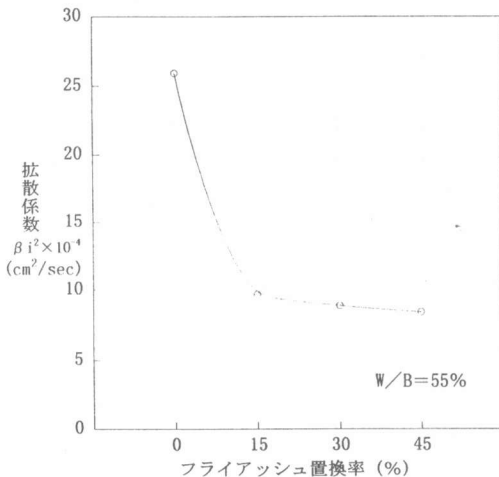


図-14 フライアッシュ置換率と拡散係数の関係

4. まとめ

本実験により得られた知見を以下に記す。

- (1) フライアッシュ置換率が大きくなるのに伴い、コンクリートの最高温度は低く、単位結合材当りの温度上昇量は小さく、コンクリート最高温度到達時間は長くなる。また、簡易断熱試験体の場合、水結合材比に関係なく、単位結合材当りの温度上昇量およびコンクリートの最高温度到達時間は各フライアッシュ置換率毎にほぼ一定の値となる。
- (2) 圧縮強度比 (初期高温履歴試験体強度/標準養生試験体強度) は、コンクリート最高温度が高いほど、また、フライアッシュ置換率が小さいほど小さくなる。マスコンクリートにおける構造体強度の管理を標準養生で実施するときの強度補正は、フライアッシュ置換率 45% の場合は零でもよいが、フライアッシュ置換率 30% 以下では適切な補正を行う必要がある。
- (3) フライアッシュ置換率 30% および 45% の初期高温履歴を受けたコンクリートにおける圧縮強度と積算温度の対数には直線的な関係がある。
- (4) 建築学会 (案) による試験方法で中性化深さ 25 mm を満足するには、フライアッシュ置換率は、水結合材比が 55% の場合 20% が上限となる。
- (5) 塩分浸透性および透水性は、フライアッシュの混入により大幅に改善される。

[謝辞] 本研究の計画に際し、九州東海大学森永教授、前田建設工業(株)江口副部長に御協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 牧野真之他：フライアッシュを用いたマスコンクリートの諸性状に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 103-108, 1998
- 2) 松木雅之他：高強度コンクリートを用いた構造体コンクリートの強度発現性状に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 559-560, 1989