

論文 フライアッシュ混入高強度コンクリートの強度および収縮に及ぼす養生温度の影響

渡辺 新一*¹・菅田 紀之*²

要旨：フライアッシュを用いた高強度コンクリートの初期強度低下対策として温度 50 °C の高温養生を適用し、強度発現性状および乾燥収縮特性に関する検討を行った。高強度コンクリートの水結合材比は 25 % であり、フライアッシュを結合材の内割で 0 % から 30 % 使用した。その結果、温度 50 °C の高温養生を行うことにより初期強度の低下を抑制できることを明らかにした。ただし、高温養生の期間が短い場合、中長期の強度が小さくなることがある。また、養生期間が同じであれば、温度 50 °C の高温養生により乾燥収縮量が半分程度に減少することを明らかにした。

キーワード：フライアッシュ、高強度コンクリート、養生温度、積算温度、強度、乾燥収縮

1. はじめに

石炭火力発電所からの産業副産物である石炭灰はフライアッシュを含め年間約 1 千万トン発生している。石炭灰はその発生量が大量のため、資源のリサイクルの観点などから有効利用が進められており、約 80 % がセメント原料などとして再利用されているが、残りは埋立て処分が行われている。今後も、石炭灰排出量の増加が予想されており、フライアッシュのさらなる有効利用が課題となっている。また、フライアッシュは「再生資源の利用促進に関する法律」における指定副産物になっており、有効利用が義務付けられている。

フライアッシュをコンクリート用混和材として使用した場合、流動性の向上や水和発熱量の低減、化学抵抗性の向上などの効果があることが確認されている¹⁾。しかしながら、初期強度の低下、中性化の促進等の問題があり、コンクリート用混和材としての利用が進んでいない。また、そのような問題から高強度コンクリートへの適用に関する検討例も少ないのが現状である。水結合材比が 30 % 以下の高強度コンクリートの研究としては、比表面積 8000 cm²/g 程度以上の超微粉フライアッシュを混入することによ

り無混入と同程度の強度が得られたもの²⁾、比表面積 4000 cm²/g 程度のフライアッシュを混入したコンクリートで断熱養生により初期強度低下が抑制されたもの³⁾、比表面積 4000 cm²/g および 6000 cm²/g 程度のフライアッシュを用いた場合には混入量の増加とともに強度が低下するとしたもの⁴⁾などがある。また、著者らは、比表面積 4000 cm²/g 程度のフライアッシュを用いた場合の初期強度の低下を、40 °C で養生することにより抑制できることを明らかにした⁵⁾。

本研究では、フライアッシュを混和材として用いた高強度コンクリートをコンクリート製品の製造に使用することを想定し、フライアッシュ混入による初期強度低下にともなう脱型時期の遅れ対策として高温養生を適用した。また、エネルギー消費および施工省力化に配慮し、高温養生時の温度を 50 °C、自己充填性を持つコンクリートとした。高温養生を行う期間は 1 日、3 日、7 日、14 日および 28 日の 5 ケースとした。このような条件下において養生を行ったフライアッシュ混入高強度コンクリートの強度および収縮に関する実験を行った。検討は強度発現特性に及ぼす養生温度およびフライアッシュの影響、乾燥収縮に及ぼす養生温度およびフライア

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助教授 博 (工) (正会員)

表－1 コンクリートの配合

W/B (%)	s/a (%)	FA/B (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	FA	S	G	SP
25	49.0	0	165.5	662	0	787.8	841.4	4.17
		10	162.5	585	65	794.2	837.7	3.9
		20	158.3	506.7	126.7	794.4	838.4	3.49
		30	155	434	186	793.3	836.7	3.1

ッシュの影響、積算温度と圧縮強度の関係について行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

本研究における高強度コンクリートの配合および製作に使用した材料を表－1および表－2に示す。結合材には普通ポルトランドセメント (C) およびフライアッシュ (FA) を用いた。フライアッシュは JIS II 種のものである。細骨材 (S) には陸砂、粗骨材 (G) には砕石 2005、高性能 AE 減水剤 (SP) にはポリカルボン酸系のものを用いた。フライアッシュ置換率 (FA/B, 結合材中の質量比) は 0%, 10%, 20% および 30% の 4 種類であり、水結合材比 (W/B) は 25% である。目標スランプフローは 65 cm, 目標空気量は 1.0% である。高強度コンクリートであっても耐凍害性を確保するためには、エントレインドエアの導入を必要とする場合がある。しかしながら、本研究では耐凍害性の検討を行わないため、目標空気量を 1% として AE 助剤を用いなかった。また、自己充填性をもつように単位粗骨材絶対容積を 300 l として配合を決定した。

2.2 養生方法

養生温度は 20 °C および 50 °C とした。養生温度 20 °C の場合は材齢 24 時間まで温度 20±1 °C に制御された恒温室内で封緘養生し、それ以降は温度 20±1 °C の水中養生とした。養生温度 50 °C の場合は、封緘状態で材齢 2 時間まで 20 °C で前養生を行い、材齢 2 時間から 5 時間の間に 50 °C まで温度を上げ、材齢 1 日まで封緘状態を維持した。その後、脱型し水中養生とした。50 °C の高温養生の期間はフライアッシュ置換率 0% お

表－2 使用材料

材料	特性等
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 g/cm ³
フライアッシュ (FA)	JIS A 6201 II 種 密度：2.17 g/cm ³ 比表面積：3,960 cm ² /g
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度：2.65 g/cm ³
粗骨材 (G)	砕石 2005 表乾密度：2.68 g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系

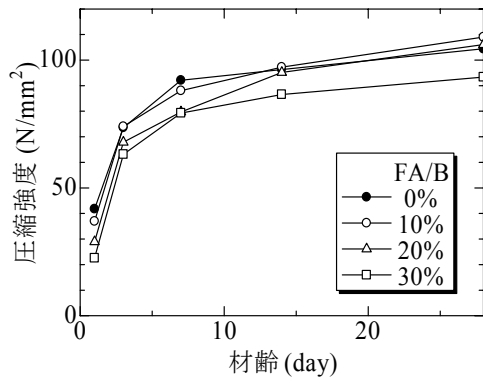
よび 10% では材齢 1 日, 3 日および 28 日までとし、フライアッシュ置換率 20% および 30% では材齢 1 日, 3 日, 7 日, 14 日および 28 日までとし、その後 20 °C の水中で養生を継続した。

2.3 強度試験

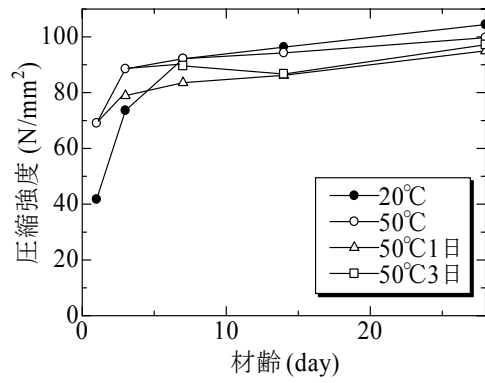
圧縮強度試験は JIS A 1108 に従って行った。試験に用いた供試体はφ100×200 mm の円柱供試体であり、3 体の平均値で強度の検討を行っている。試験材齢は 1 日, 3 日, 7 日, 14 日および 28 日であり、全ての養生条件で試験を行った。全ての供試体の端面処理は、研磨機を用いて行った。

2.4 乾燥収縮試験

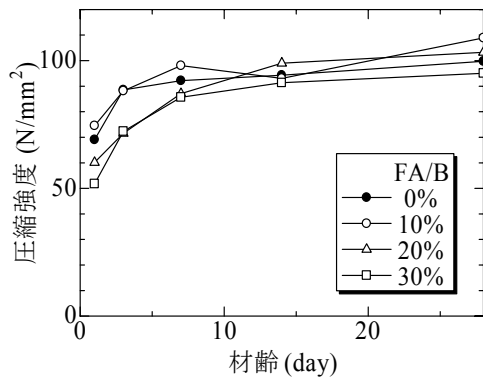
乾燥収縮試験は、100×100×250 mm の角柱供試体を用い、中央軸方向にひずみゲージを配置して行った。また、上面と底面をアルミテープで覆い、乾燥面を側面のみとした。試験材開始齢は 7 日および 28 日であり、一定温度で養生を行ったものについて試験を行った。試験は、温度 20±1 °C, 湿度 55±5% に設定された室内において乾燥収縮ひずみの測定を 10 日間行った。



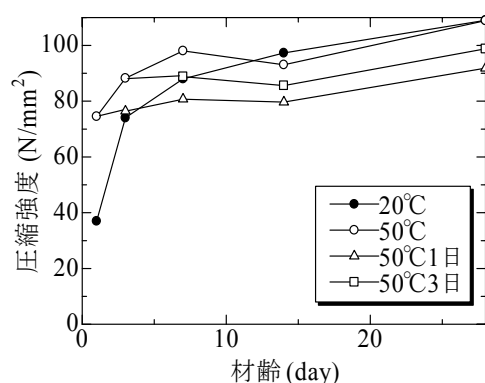
(a) 20°C養生



(a) FA/B = 0%



(b) 50°C養生



(b) FA/B = 10%

図-1 材齢と圧縮強度の関係

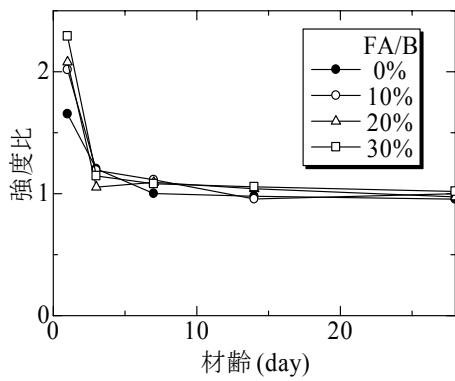
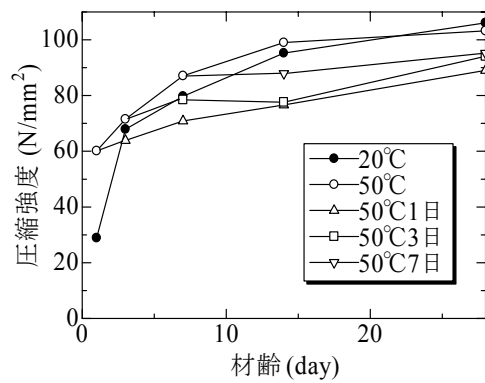


図-2 20°C養生の圧縮強度に対する50°C養生の圧縮強度の比

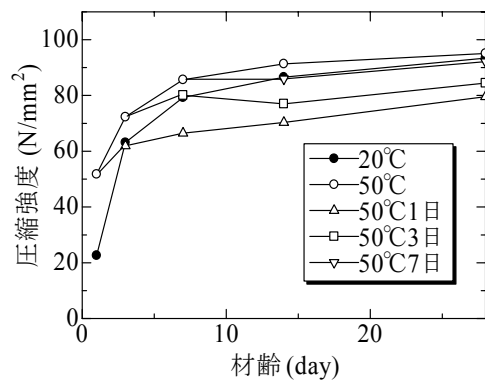


(c) FA/B = 20%

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-1は材齢と圧縮強度の関係を示している。図(a)は養生温度20°C、図(b)は材齢28日までの養生温度を50°Cとした結果である。図より、20°C養生の場合、初期強度はフライアッシュ置換率が大きいほど小さくなる傾向があることがわかる。フライアッシュ置換率10%では、材齢3日から0%とほぼ同様な強度に、フライアッシュ



(d) FA/B = 30%

図-3 材齢と圧縮強度の関係

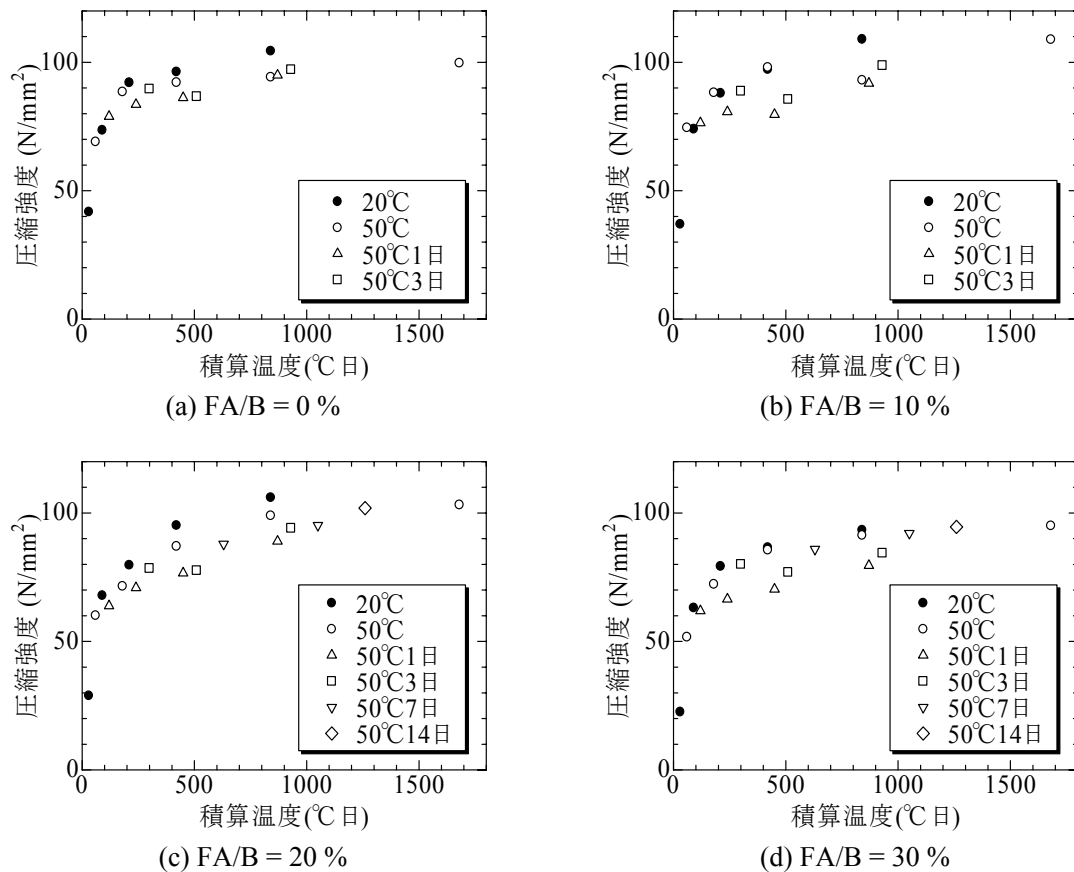


図-4 積算温度と圧縮の関係

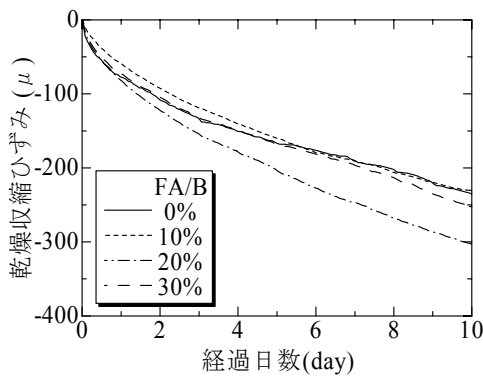
置換率 20%では、材齢 14 日から 0%とほぼ同様な強度になっているが、フライアッシュ置換率 30%の強度は材齢 14 日以後も小さいままである。50℃で養生した場合においても、フライアッシュ置換率が大きいほど初期強度が小さいという傾向は 20℃養生と同様である。50℃養生の結果を 20℃養生と比較すると、初期強度が高くなっており、材齢 1 日では全てのケースで 20 N/mm² 以上大きく、材齢 3 日ではフライアッシュ置換率 0%および 10%において 15 N/mm² 程度大きく、フライアッシュ置換率 30%では 10 N/mm² 程度大きくになっている。

図-2 は養生温度 20℃の圧縮強度に対する養生温度 50℃の圧縮強度の比を示している。材齢 1 日における強度比は 1.65~2.29、であり、フライアッシュ置換率が大きいほど大きくなっている。また、材齢 3 日における強度比は 1.05~1.21、材齢 7 日では 1.01~1.11、となり材齢とともに強度比は小さくなっており、材齢 14 日からの強度比は 1 前後になっている。このように高温養生

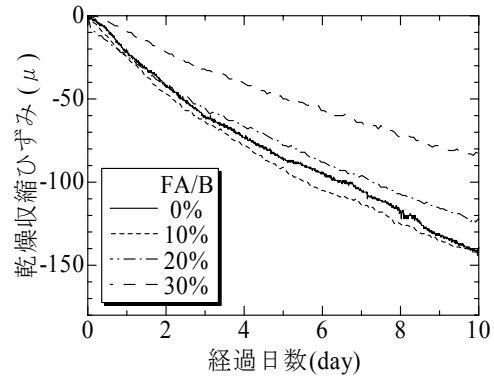
の効果はフライアッシュ置換率が大きい程大きく、また、材齢 3 日程度までの限定されたものであることがわかる。

図-3 はフライアッシュ置換率ごとの材齢と圧縮強度の関係を示している。28 日間 20℃および 50℃で養生を行ったもののほか、50℃で材齢 1 日まで、50℃で材齢 3 日までおよび 50℃で材齢 7 日まで養生を行い、その後 20℃養生を行った結果も示している。50℃で材齢 28 日まで養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、20℃養生よりも大きくなっており強度の改善効果が確認できる。しかしながら、50℃養生の養生期間を限定して 20℃養生にもどしたコンクリートの 20℃養生以後の強度増加は少なく、20℃養生よりも強度が小さくなっており、強度の改善効果が得られていない。また、50℃養生の期間が短いほど強度は小さくなっている。

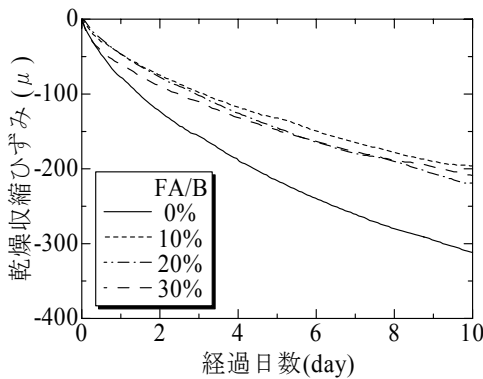
図-4 は積算温度と圧縮強度の関係を示している。図(a)はフライアッシュ置換率 0%のケースである。20℃で養生した場合の強度と 50℃



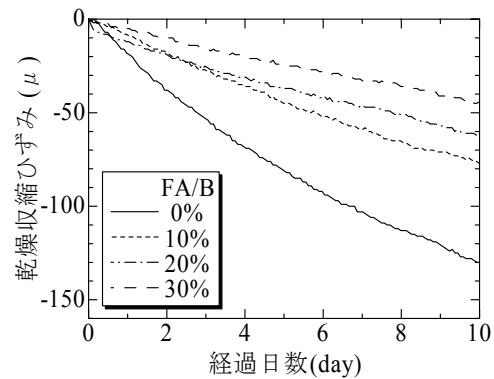
(a) 7日間 20°C養生



(b) 7日間 50°C養生



(c) 28日間 20°C養生



(d) 28日間 50°C養生

図-5 乾燥収縮ひずみの経時変化

で28日間養生した場合を比較すると、積算温度が400°C日までは同程度の強度であるが、それよりも大きな積算温度では20°Cで養生した方が大きな値を示していることがわかる。一定期間のみ50°Cで養生した場合の強度は、20°Cおよび50°Cで28日間養生した場合より小さくなっている。図(b)はフライアッシュ置換率10%のケースである。積算温度400°C日までは20°C養生と50°C養生の強度は同程度であるが、それよりも大きな積算温度では20°C養生の強度が大きくなっていることがわかる。一定期間のみ50°Cで養生を行ったコンクリートの強度は20°Cおよび50°Cで28日間養生を行った場合より小さくなっている。図(c)はフライアッシュ置換率20%のケースである。20°Cで養生した場合の強度と50°Cで養生した場合を比較すると、積算温度が200°C日程度より大きい場合に20°Cで養生した方が大きな値を示していることがわかる。一定期間のみ50°Cで養生した場合の強度

は、20°Cおよび50°Cで養生した場合より小さくなっている。図(d)はフライアッシュ置換率30%のケースである。20°C養生の強度と50°Cで28日間養生を行ったコンクリートの強度はほぼ同じであることがわかる。50°Cで材齢1日および3日まで養生を行った場合の強度は、フライアッシュ置換率20%までのケースと同様に20°Cおよび50°C一定養生の強度より小さいが、50°Cで材齢7日および14日まで養生を行った場合の強度は、一定温度養生とほぼ同じになっている。

3.2 乾燥収縮

図-5は、乾燥収縮ひずみの経時変化を示している。試験期間は10日である。図(a)は20°Cで7日間養生後、試験を開始したものである。フライアッシュ置換率10%の乾燥収縮ひずみは材齢5日まで若干小さく、フライアッシュ置換率30%の乾燥収縮ひずみは材齢5日から若干大きい、0%、10%および30%の乾燥収縮ひず

みはほぼ等しいといえる。フライアッシュ置換率 20%のコンクリートの乾燥収縮ひずみは、他のフライアッシュ置換率のひずみより大きくなっている。図(b)は 50℃で 7 日間養生後、試験を開始したものである。図(a)と比較すると、養生温度を高くしたことにより、乾燥収縮ひずみが半分程度まで小さくなっていることがわかる。また、フライアッシュ置換率 0%とフライアッシュ置換率 10%のコンクリートの乾燥収縮ひずみは同程度であるが、置換率を 20%以上にすることにより乾燥収縮ひずみが小さくなっている。図(c)は 20℃で 28 日間養生後、試験を開始したものである。フライアッシュ置換率 10%、20%および 30%の乾燥収縮ひずみはフライアッシュ置換率 0%のひずみの 6 割から 7 割まで小さくなっている。図(a)と比較すると、フライアッシュを混入したケースでは乾燥収縮ひずみが小さくなっているが、無混入の場合では乾燥収縮ひずみが大きくなっていることがわかる。図(d)は 50℃で 28 日間養生後、試験を開始したものである。フライアッシュ置換率が高いほど乾燥収縮ひずみが小さくなっている。図(c)と比較すると、養生温度を高くしたことにより、全ケースにおいて乾燥収縮ひずみが半分以下に減少していることがわかる。また、図(b)と比較すると、養生期間を長くしたことにより、フライアッシュを混入させたケースでは乾燥収縮量が減少していることがわかる。一般にフライアッシュを混入した場合、減水効果により乾燥収縮量が減少するといわれている⁶⁾。本研究における 28 日養生後の結果はフライアッシュを混入することにより乾燥収縮量が少なくなった。しかしながら、20℃で 7 日間養生後に試験を行った場合には、フライアッシュ混入コンクリートの収縮ひずみがフライアッシュを混入していない結果と同程度以上になった。これはフライアッシュを混入した場合、水和の進行が遅くなり、材齢 7 日程度では未水和水が多く残っていることが要因として考えられる。

4. まとめ

本研究では、フライアッシュを混和材として用いた高強度コンクリートの初期強度低下の抑制方法として 50℃の高温養生を適用し、強度発現および乾燥収縮特性に関する検討を行った。本研究から得られた強度特性に関する結果をまとめると、以下ようになる。

- (1) フライアッシュ置換率が大きいほど強度発現が緩慢になり、圧縮強度が小さくなる。
- (2) 養生温度を 50℃にした場合、フライアッシュ混入による初期強度の低下を抑制できる。
- (3) 一定期間のみ 50℃養生とした場合、20℃養生より強度が低下する場合がある。

参考文献

- 1) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），土木学会，1999.4
- 2) 石井光裕・浮田和明・東邦和・山田和夫：分級フライアッシュを混入した高強度コンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13，No. 1，pp.263–268，1991.6
- 3) 船本憲治・村上英治・黒羽健嗣・並木哲：フライアッシュが高強度コンクリートの流動性および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. 18，No. 1，pp.357–362，1996.6
- 4) 深川正浩・中村成春・榊田佳寛・阿部道彦：分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの力学特性及び耐久性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19，No. 1，pp.205–210，1997.6
- 5) 菅田紀之・相澤義徳：フライアッシュを用いた高強度コンクリートの強度および収縮特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 28，No. 1，pp.1205–1210，2006.6
- 6) 浮田和明・石井光裕・重松和男・野尻陽一：分級フライアッシュを混入したコンクリートの基礎物性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 10，No. 2，pp.1–6，1988.6