

論文 高強度モルタルの凝結および強度発現に及ぼすシリカフュームと高性能 AE 減水剤の影響

菅田 紀之^{*1}・寺澤 貴裕^{*2}

要旨: 水結合材比が 25 % である高強度モルタルのシリカフューム置換率および高性能 AE 減水剤添加率を変化させて凝結試験および圧縮強度試験を行い、次の結果を得た。凝結の始発、終結時間および強度の発生時期は、シリカフューム置換率あるいは高性能 AE 減水剤添加率が大きいほど遅くなる。材齢 24 時間までの圧縮強度は、高性能 AE 減水剤添加率が大きいほど小さく、材齢 3 日以後の強度は添加率が大きいほど大きくなる。また、高性能 AE 減水剤の添加量が等しければ、シリカフューム置換率が多いほど材齢 24 時間までの圧縮強度は大きくなり、材齢 3 日以後の強度は置換率が多いほど小さくなる。

キーワード: 高強度モルタル, シリカフューム, 高性能 AE 減水剤, 凝結, 強度発現

1. はじめに

近年、より大きな強度を持つコンクリートをコンクリート構造物に使用する事例が増加してきている。しかしながら、高強度コンクリートを用いた場合には、自己収縮量が多いこと¹⁾および水和発熱量が多いことにより、マスコンクリートではなくても、若材齢時におけるひび割れの発生が問題になることがある。このようなひび割れの発生有無を精度よく評価するためには、コンクリートの収縮および発熱特性のほか、クリープ特性や強度特性が明らかになっていなければならない。ひび割れの発生が問題となる若材齢時における高強度コンクリートのクリープに関する研究としては、シリカフュームの影響を検討した著者ほかの研究^{2), 3)}や小澤ほかの研究⁴⁾、伊藤ほかの研究⁵⁾がある。

コンクリートの高強度化あるいは高流動化のためには、シリカフュームや高性能 AE 減水剤等の混和材料の使用が不可欠である。これらの混和材料は、フレッシュ性状に影響を及ぼすばかりではなく、ポズラン反応やセメント粒子の分散効果等により、凝結硬化特性にも影響を及ぼすものと考えられる。

そこで本研究では、高強度モルタルの凝結特

性および強度発現特性に及ぼすシリカフューム置換率の影響、さらに高性能 AE 減水剤の添加率の影響を明らかにする目的で、プロクター貫入抵抗試験装置による凝結試験および凝結直後からの圧縮強度試験を行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料およびモルタルの配合

本研究に用いた高強度モルタルの製作に使用した材料および配合を表-1および表-2に示す。モルタルの単位水量は、単位水量が 140 kg/m³ 程度の高強度コンクリートの配合から換算して 230 kg/m³ とし、目標空気量は 1.5 % とした。実際の空気量は 0.7 % から 2.6 % であった。結合材に

表-1 使用材料

材 料 (記号)	性質等
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15 g/cm ³
シリカフューム (SF)	比表面積: 230,000 cm ² /g 密度: 2.2 g/cm ³
細骨材 (S)	陸砂 密度: 2.69 g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系

*1 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)

*2 北海道開発局 札幌開発建設部 修 (工) (正会員)

表－２ モルタルの配合

W/B (%)	SF/B (%)	単位量 (kg/m ³)				SP/B (%)
		W	C	SF	S	
25	0	230	920	0	1245	0.45, 0.50, 0.55
25	5	230	874	46	1228	0.6, 0.7, 0.8, 1.0
25	10	230	828	92	1211	0.6, 0.8, 1.0, 1.2
25	20	230	736	184	1178	1.0, 1.2, 1.4, 1.8

$$B = C + SF$$

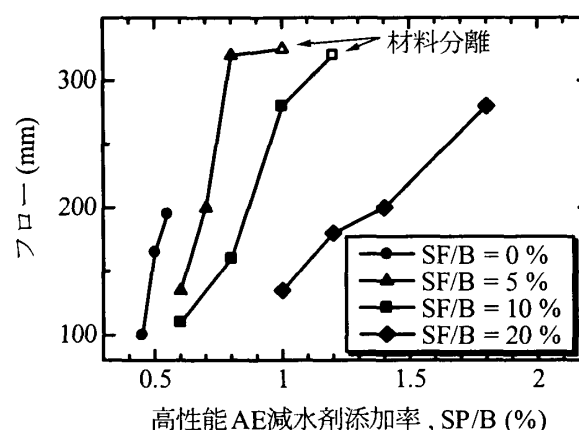
は普通ポルトランドセメントおよびシリカフュームを用い、シリカフューム置換率 (SF/B, 結合材中の質量比) を 0 % (無混入), 5 %, 10 %, 20 % の 4 種類とした。水結合材比はすべてのケースで 25 % である。混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用い、添加量については、スランプフローが 600 mm 程度の高強度コンクリートをスクリーニングして得られたモルタルのフロー (落下運動なし) が 200 mm 程度であったので、モルタルのフローが 200 mm を中心として得られるようにした。高性能 AE 減水剤の添加率 (SP/B, 結合材に対する質量比) は、シリカフューム置換率 0 % では 0.45 % から 0.55 %, シリカフューム置換率 5 % では 0.6 % から 1.0 %, シリカフューム置換率 10 % では 0.6 % から 1.2 %, シリカフューム置換率 20 % では 1.0 % から 1.8 % である。

2.2 フロー試験

モルタルのフロー試験は JIS R 5201 に従い、上部内径 70 mm, 下部内径 100 mm, 高さ 60 mm のフローコーンを用いて行った。しかしながら、モルタルの流動性が大きい場合、15 回の落下運動によりモルタルがフローテーブルからこぼれ落ちたため、本研究ではフローコーンを上に取り去った後のモルタルの広がり径をフロー値として検討を行っている。

2.3 凝結試験

凝結試験は JIS A 1147 に規定されているプロクター貫入抵抗試験により行った。貫入抵抗値が 3.5 N/mm² になるまでの練混ぜ時からの経過時間を始発時間とし、28.0 N/mm² になるまでの



図－１ フロー試験結果

経過時間を終結時間として検討している。試験環境は、20 °C ± 1 °C に制御された室内である。

2.4 圧縮強度試験

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直径 100 mm, 高さ 200 mm の円柱供試体であり、3 体の平均値で検討を行っている。試験材齢は終結直後 (終結から 1, 2 時間程度), 12 時間, 16 時間, (20 時間), 24 時間, 3 日, 7 日, 28 日とした。また、材齢 24 時間までは 20 ± 1 °C に制御された室内において封緘養生、それ以降は、20 ± 1 °C の水中養生を行った。供試体端面の処理は、材齢 24 時間未満では硬質セッコウを用いたキャッピング、材齢 24 時間からは研磨機を用いた研磨により行った。

3. 試験結果および考察

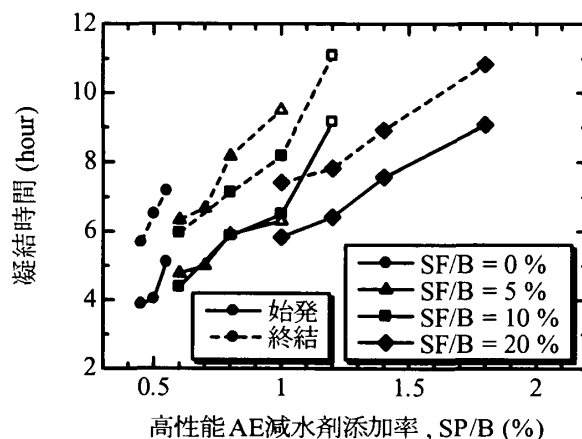
3.1 フロー試験結果

図－１に各配合のモルタルのフロー試験結果を示す。シリカフューム置換率 (SF/B) が 0 % の場合には、200 mm 以上のフローを得るために高

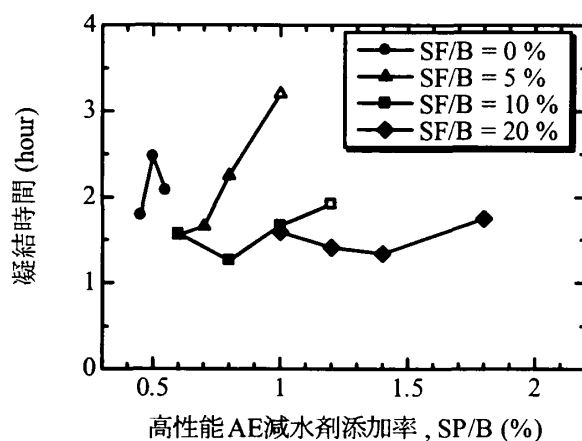
性能 AE 減水剤を増加させると、著しい材料分離が発生し供試体の製作が困難であったため、試験を行わなかった。また、SF/B が 5 % で高性能 AE 減水剤添加率 (SP/B) が 1.0 % および SF/B = 10 % で SP/B = 1.2 % のモルタルでは、若干の材料分離が発生していた。図より、シリカフューム置換率が大きくなるほど、高性能 AE 減水剤の必要量が増加することがわかる。200 mm のフローを得るために必要な添加率 (SP/B) は、SF/B = 0 % に対しては 0.55 %、SF/B = 5 % に対しては 0.7 %、SF/B = 10 % に対しては 0.87 %、SF/B = 20 % に対しては 1.4 % である。ただし、SF/B = 10 % に対する値はデータ間を直線補間して求めた。また、コンシステンシーの変化に及ぼす高性能 AE 減水剤の添加率の影響はシリカフューム置換率が小さいほど大きいことがわかる。

3.2 凝結試験結果

凝結試験の結果を図-2に示す。図(a)は始発時間および終結時間、図(b)は始発から終結までに要した時間を示している。図(a)より、材料分離が発生したケースを除くと、高性能 AE 減水剤添加率と始発時間および終結時間の関係は、ほぼ一つの直線を用いて表すことができるといえる。この関係は、高性能 AE 減水剤添加率が大きくなるに従い、つまりフローが大きく流動性が大きくなるに従い、凝結時間が遅くなるというものであり、高性能 AE 減水剤による遅延作用を表している。3.1 で求めた 200 mm のフローを得るために必要な高性能 AE 減水剤添加率での凝結時間を表-3に示す。表より、シリカフューム置換率 (SF/B) が 0 % と 5 % で始発時間が同程度になっているが、フローが同程度の場合、シリカフューム置換率が多くなるほど始発時間が遅くなるといえる。また、終結時間についても同様にシリカフューム置換率が多くなるほど遅くなるといえる。次に、始発から終結までに要する時間について検討を行う。始発から終結までに要する時間は、若干の材料分離が発生したケースを除くと、1.3 時間から 2.5 時間程度である。また、シリカフューム置換率 (SF/B) が 10 %



(a) 始発および終結



(b) 始発から終結までの時間

図-2 凝結試験結果

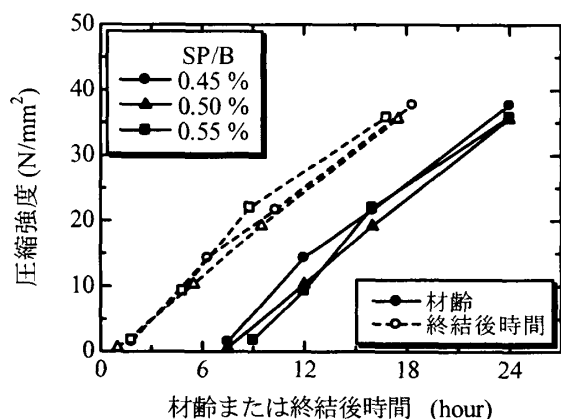
表-3 フロー200 mm の場合の凝結時間

SF/B (%)	SP/B (%)	始発時間 (時間)	終結時間 (時間)
0	0.55	5.1	7.2
5	0.7	5.0	6.7
10	0.87	6.1	7.5
20	1.4	7.6	8.9

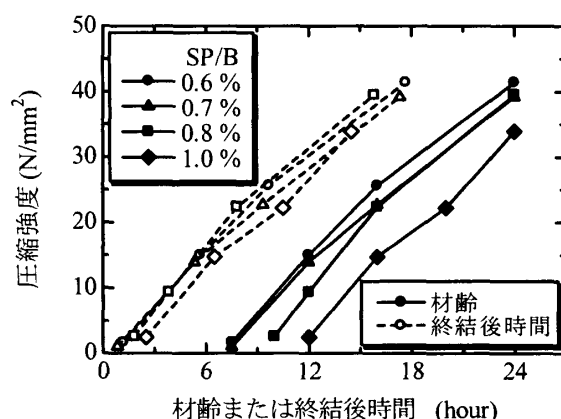
と 20 % で、同程度の時間になっているが、0 % から 10 % の置換率では、シリカフューム置換率が多いほど始発から終結に要する時間が短くなる傾向にあることがわかる。

3.3 圧縮強度試験結果

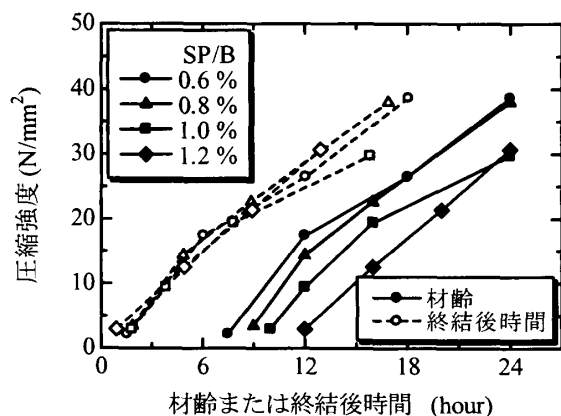
図-3に材齢24時間までの圧縮強度の発現状況をシリカフューム置換率別に示す。横軸に材



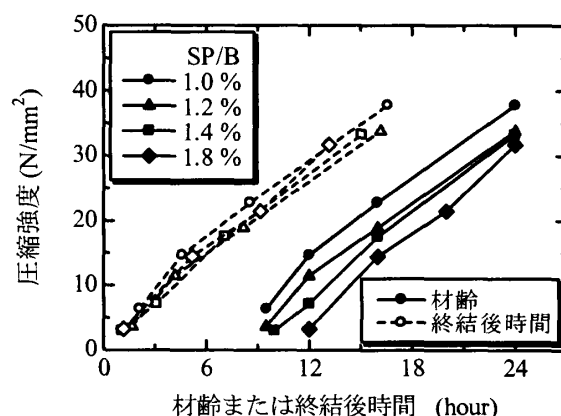
(a) SF/B = 0 %



(b) SF/B = 5 %



(c) SF/B = 10 %



(d) SF/B = 20 %

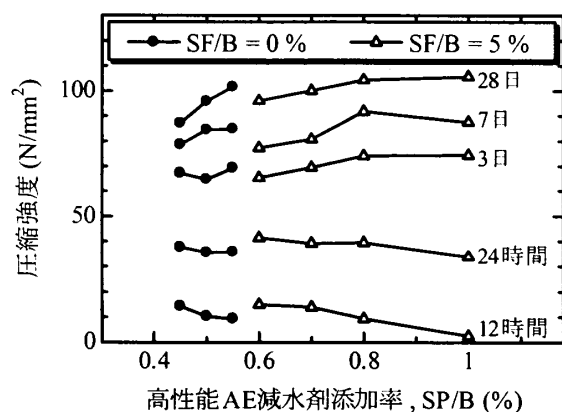
図-3 材齢 24 時間までの圧縮強度の発現状況

齢を取った強度変化を黒マークと実線で示し、横軸に終結からの時間を取った強度変化を白抜きマークと破線で示している。まず、横軸に材齢を取った場合の強度発現性状について検討を行う。図より、シリカフューム置換率 (SF/B) が 0 % の場合には、高性能 AE 減水剤添加率 (SP/B) の差が小さいこともあり、強度発生材齢に大きな差が現れていない。しかしながら、SF/B が 5 % 以上の場合では、強度発生材齢に 4 時間程度の差が現れている。また、材齢 24 時間までの圧縮強度は、いずれのシリカフューム置換率においても高性能 AE 減水剤添加率が少ないほど大きくなっていることがわかる。セメントペーストの硬化および強度の発現が終結付近からであることを考慮すると、単純に材齢で比較した場合

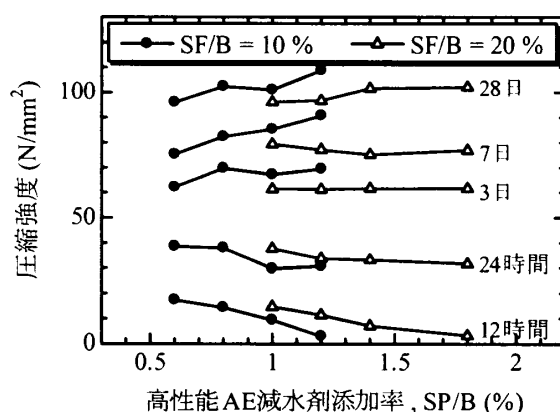
表-4 強度の発生時期 (終結後時間)

SF/B (%)	SP/B (%)	発生時期 (時間)	SF/B (%)	SP/B (%)	発生時期 (時間)
0	0.45	1.3	10	0.6	0.9
	0.50	0.8		0.8	0.9
	0.55	1.1		1.0	0.9
				1.2	-0.3
	平均	1.1		平均	0.6
5	0.6	0.6	20	1.0	0.2
	0.7	0.5		1.2	0.5
	0.8	1.1		1.4	-0.1
	1.0	1.7		1.8	0.0
	平均	1.0		平均	0.2

には終結時間の差が圧縮強度に影響し、特に強度発現が著しい若材齢時にはその影響が



(a) SF/B = 0 %, SF/B = 5 %



(b) SF/B = 10 %, SF/B = 20 %

図-4 材齢 12 時間以降の圧縮強度の変化

大きく現れた結果であると考えられる。次に、横軸に終結からの時間を取った場合の検討を行う。図より、いずれのシリカフェーム置換率においても強度の発生時期がそろっており、強度発現が終結から 2 時間以内に開始していることが確認できる。この強度の発生時期を終結からの時間で示すと表-4 のようになる。この強度発生時期は、強度のデータ間を直線補間して求めた直線が横軸と交わる時間である。表より、シリカフェーム置換率が大きくなるに従い、強度発生時期の終結からの時間が短くなっていることがわかる。また、図-3 からわかるように、横軸を終結からの時間にとった場合には、高性能 AE 減水剤の添加率の差による強度差は少ないことがわかる。図から、材齢あるいは終結後時間と強度の関係は、材齢 24 時間程度までは若干上に凸になる曲線を用いて表すことが可能であるといえる。

図-4 に材齢 12 時間以降の圧縮強度の変化を横軸に高性能 AE 減水剤添加率を取って示す。図(a) は、シリカフェーム置換率 (SF/B) が 0 % および 5 % , 図(b) は、SF/B が 10 % および 20 % の結果である。材齢 24 時間までは、前述のように終結時間の影響により、高性能 AE 減水剤添加率が多くなると圧縮強度が低くなっていることがわかる。しかしながら、材齢が 3 日以後になるとシリカフェーム置換率 (SF/B) が 0 % , 5 % および 10 % の場合に、高性能 AE 減水剤添加率

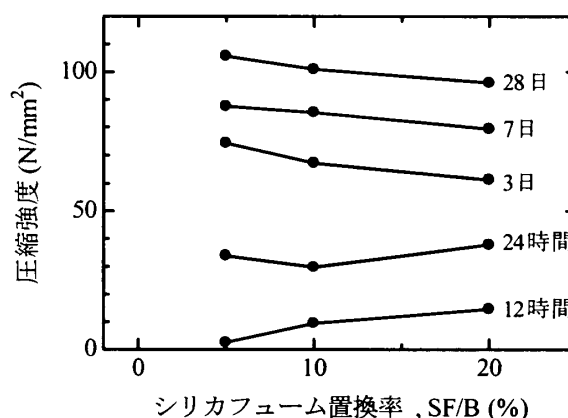


図-5 SP/B = 1.0 % の場合の圧縮強度

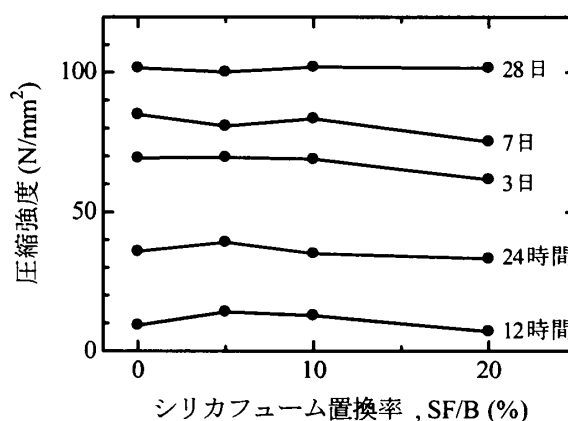


図-6 フロー 200 mm の場合の圧縮強度

が多いほど圧縮強度が大きくなっている。また、材齢 28 日では SF/B = 20 % の場合においても高性能 AE 減水剤添加率が多いほど圧縮強度が大きくなっている。以上のことより、高性能 AE 減水剤が強度発現に及ぼす影響をまとめると次のようになる。材齢 24 時間程度までの初期の段

階では、高性能 AE 減水剤の凝結遅延効果により添加率が多いほど強度の発生時期が遅くなり強度が小さくなる。しかしながら、終結からの時間で整理した場合には、強度差は少なくなる。材齢が 24 時間を過ぎると、セメントおよびシリカフューム粒子の分散効果による水分との接触面積の増大により、添加率が多いほど水和反応が活発になり強度が大きくなる。

図-5 は、シリカフューム置換率 (SF/B) が 5 % から 20 % で共通して試験の行われた高性能 AE 減水剤添加率 (SP/B) が 1.0 % における圧縮強度の変化を、シリカフューム置換率を横軸に取り示している。材齢 12 時間では、終結時間の差が大きく影響するため、シリカフューム置換率が多いほど強度が大きくなっている。しかしながら、材齢 12 時間から 3 日までの強度増加は、シリカフューム置換率が小さいほど大きく、材齢 3 日以後の強度はシリカフューム置換率が多いほど小さくなっている。

図-6 は、200 mm のフローを得るために必要な高性能 AE 減水剤添加率における圧縮強度の変化を示している。ただし、シリカフューム置換率 (SF/B) が 10 % のケースでは、データ間を直線補完して強度を求めている。材齢 24 時間までは SF/B = 5 % のケースで圧縮強度が最も大きく、SF/B がそれよりも大きくても小さくても強度は小さくなっている。材齢 3 日および 7 日の圧縮強度は、SF/B が 10% 以下の場合、ほぼ等しくなっているが、SF/B = 20 % では 10 N/mm^2 程度小さくなっている。しかしながら、材齢 7 日から 28 日にかけての強度増進は SF/B = 20 % でもっとも大きく、材齢 28 日においては他のケースと同程度の圧縮強度になっている。

4. ま と め

本研究では、高強度モルタルの凝結および強度発現特性に及ぼすシリカフュームと高性能 AE 減水剤の影響について検討を行った。本研究から得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) コンシステンシーの変化に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響はシリカフューム置換率が小さいほど大きい。
- (2) 高性能 AE 減水剤の添加率と凝結時間は正の相関をもつ直線関係にある。
- (3) フローが同程度であれば、シリカフューム置換率が多いほど凝結時間が遅くなる。
- (4) 高性能 AE 減水剤の添加率が多いほど、強度の発生時期が遅れ、材齢 24 時間までの圧縮強度は小さくなる。また、高性能 AE 減水剤の添加率が多いほど、材齢 3 日程度からの圧縮強度は大きくなる。
- (5) 高性能 AE 減水剤の添加率が同じ場合、シリカフューム置換率が多いほど材齢 24 時間までの圧縮強度は大きくなり、材齢 3 日程度からの圧縮強度は小さくなる。

参考文献

- 1) 田澤栄一・宮沢伸吾・重川幸司：水和反応による硬化セメントペーストのマクロな体積収縮，セメント・コンクリート論文集，No. 45，pp.122 - 127，1991.12
- 2) 菅田紀之・佐藤克俊：シリカフュームを用いた若材齢高強度コンクリートの圧縮クリープ，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 1，pp.387 - 392，2002.6
- 3) 菅田紀之・寺澤貴裕：若材齢高強度コンクリートの圧縮クリープに及ぼすシリカフュームの影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No. 1，pp.425 - 430，2003.6
- 4) 小澤満津雄・国森亮平・車戸勝巳・森本博昭：若材齢高強度コンクリートのクリープ特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 2，pp.631 - 636，2000.6
- 5) 伊藤秀敏・田澤栄一・米倉亜州夫・大島邦裕：高強度コンクリートの若材齢引張クリープ，セメント・コンクリート論文集，No.53，pp.635 - 641，1999.12