

# フライアッシュコンクリートの初期強度低下対策に関する研究

Study on improvement method for early strength deterioration of fly ash concrete

北海道電力(株)総合研究所 正員 山城洋一 (Youichi Yamashiro)  
 北海道電力(株)土木部 正員 林 透 (Toru Hayashi)  
 北海道電力(株)総合研究所 正員 笠井秀男 (Hideo Kasai)  
 北電総合設計(株)土木部 正員 齋藤敏樹 (Toshiki Saito)

## 1. まえがき

当社石炭火力発電所で排出されるフライアッシュの多くは土木材料等で利用されているが、いまだ全量の有効利用には至らず、灰捨てへと処分されているのが現状である。

フライアッシュコンクリートは、普通コンクリートと比べ流動性が良く、水和発熱量の低減による温度応力ひび割れの防止にも有効であり、アルカリ骨材反応が抑制される効果があること等が利点として挙げられるものの、初期強度発現が小さく、配合によっては中性化が進行しやすいなどの欠点も兼ね備えている。そのためフライアッシュコンクリートを普及拡大させるには、上記の欠点を改善する対策が重要と考えられる。

このような背景から、フライアッシュの置換率等がフライアッシュコンクリートの配合や初期強度に与える影響を把握し、初期強度の低下対策を考慮した配合設計手法の確立を目的に実施した実験内容について報告するものである。

## 2. 実験概要

本実験では、フライアッシュコンクリートの初期強度の低下対策として、普通ポルトランドセメントを分級によって細粒化(比表面積 3,840cm<sup>2</sup>/g)しフライアッシュを内割20%置換した配合(以下分級 OPC+FA)、普通ポルトランドセメントにフライアッシュを内割20%置換して二水石膏を粉体量の3%添加した配合(以下 FA+二水石膏)、およびフライアッシュを外割20%,30%置換した配合(以下外割20,外割30)、と普通コンクリート(以下 OPC)について配合試験及び圧縮強度試験を行った。なお、圧

縮強度試験では養生温度 2水準(10,20 )において4材齢(1,3,7,28日)の圧縮強度を測定した。

### 2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1に、コンクリート配合条件を表-2に、コンクリート配合ケースを表-3に示す。コンクリート試験に用いたフライアッシュは、苫東厚真発電所4号機産 JIS 種品を使用し、配合はスランプ 18±1.5cm、空気量 4.5±0.5%、単位粗骨材かさ容積 0.62m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>、単位水量 185kg/m<sup>3</sup>以下、水セメント比を3水準とした。

表-1 使用材料

種類		品質	
セメント	普通ポルトランド	密度 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3,390cm <sup>2</sup> /g, フロー値 201mm	
	普通ポルトランド(分級)	密度 3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3,840cm <sup>2</sup> /g, フロー値 197mm	
フライアッシュ	WA-B	苫東厚真 JIS 種	強熱減量 1.6%, 密度 2.22g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3,830cm <sup>2</sup> /g, フロー値比 110%, MB吸着量 0.51mg/g, 活性度指数 28日:85%, 91日:99%
細骨材	陸砂	厚真産	粗粒率 2.70, 密度 2.73g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.65% 単質 1.835kg/L, 実積率 68.3%
粗骨材	砕石2005	手稲産	粗粒率 6.60, 密度 2.67g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.66% 単質 1.642kg/L, 実積率 62.5%
混和剤	A E 減水剤		リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体
	A E 剤		高アルキリカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤
二水石膏	苫東厚真発電所産		密度 2.60g/cm <sup>3</sup>

表-2 コンクリート配合条件

スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位粗骨材かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
18±1.5	4.5±0.5	185以下	0.62

表-3 コンクリート配合ケース

配合ケース	セメント種類	フライアッシュ置換率 外割:F/C 内割:F/(c+f) (%)	水セメント比		水粉体比 W/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位水量 W (kg/m <sup>3</sup> )	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤		フレッシュ性状	
			W/C (%)	W/C (g/g)				セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 (g/m <sup>3</sup> )	AE剤 (g/m <sup>3</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)
OPC	普通ポルト	-	55.0	55.0	43.6	170	309		818	1.035	773	30.9	17.5	4.6	
			50.0	50.0	42.5	172	344		782	1.035	860	34.4	18.5	4.3	
			45.0	45.0	41.1	174	387		740	1.035	967	38.7	17.5	4.8	
分級OPC+FA	分級普通ポルト	内割20	62.5	50.0	41.4	174	278	70	746	1.035	870	174.0	18.0	4.1	
			56.2	45.0	38.6	183	325	81	666	1.035	1,017	366.0	17.5	4.8	
			50.0	40.0	36.5	185	370	92	608	1.035	3,469	416.2	17.5	4.0	
FA+二水石膏	普通ポルト	内割20	62.5	50.0	42.8	162	259	65	793	1.035	810	145.8	18.5	4.7	
			56.2	45.0	41.4	164	292	73	748	1.035	911	164.0	17.5	4.7	
			50.0	40.0	37.8	176	352	88	642	1.035	1,100	255.2	17.5	4.3	
外割20	普通ポルト	外割20	55.0	45.8	41.2	170	309	62	742	1.035	773	111.3	18.5	4.2	
			50.0	41.7	38.7	178	356	71	668	1.035	890	128.2	18.5	4.6	
			45.0	37.5	35.7	185	411	82	588	1.035	1,644	139.8	18.0	4.7	
外割30	普通ポルト	外割30	55.0	42.3	39.6	172	313	94	694	1.035	782	125.1	17.5	4.3	
			50.0	38.5	35.7	185	370	111	588	1.035	925	148.0	17.0	4.3	
			45.0	34.6	33.7	185	411	123	537	1.035	3,289	156.0	18.0	4.7	

2.2 実験項目および実験方法

実験項目および試験方法を表 - 4 に示す。

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサ (55L) を使用し 1 バッチ 40L として練混ぜた。圧縮強度試験用の供試体は、各養生温度と同一の練り上がり温度となるよう調整して作製した。養生方法は供試体作製後、直ちにそれぞれの養生温度の養生室に置き、材齢 1 日 (24 時間) で脱型し、その後は水中養生とした。

OPC の分級については分級機によって普通ポルトランドセメント (比表面積 3,390cm<sup>2</sup>/g) を細粒化 (比表面積 3,840cm<sup>2</sup>/g) して使用した。

表 - 4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
コンクリートの練混ぜ	JIS A 1138 「試験室におけるコンクリートの作り方」
スラブ試験	JIS A 1101 「コンクリートのスラブ試験方法」
空気量試験	JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」
圧縮強度試験	JIS A 1132 「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」 JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」 供試体寸法 : 10cm x h20cm、3本/組 養生温度 : 10, 20 測定材齢 : 1, 3, 7, 28日 試験ケース : 5配合 x 3水結合材比 x 2養生温度

3. 実験結果

3.1 単位水量

単位粉体量と単位水量の関係を図 - 1 に示す。

同一粉体量の単位水量は、FA+二水石膏、外割 20 について OPC に比べ単位水量が減少する傾向にあり、フライアッシュのボールベアリング効果が示された。一方、単位水量が最大となった分級 OPC+FA は、フライアッシュの効果よりもセメントの比表面積の増加による粘性増加の影響が大きいと考えられる。

図 - 1 の単位水量が 185kg/m<sup>3</sup> に達した黒印の配合は多量の AE 減水剤によりスラブを調整している。したがって粉体量が多くなる配合 (水セメント比が小さい配合) では OPC に比べ経済的に不利となる可能性がある。

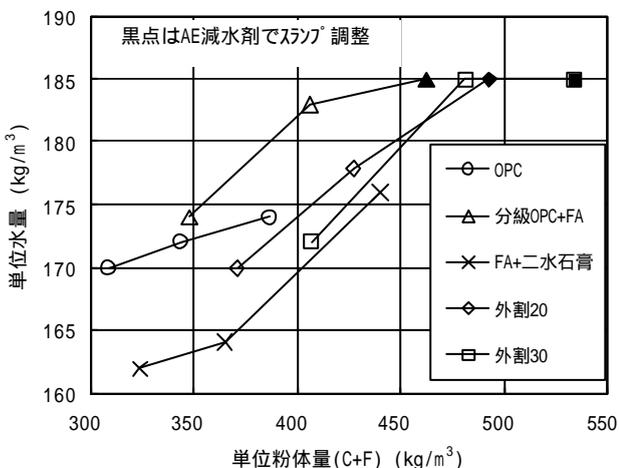


図 - 1 単位粉体量と単位水量

3.2 混和剤

単位粉体量と AE 剤添加量の関係を図 - 2 に示す。

AE 剤添加量は全配合ケースで OPC の 2 倍以上と添加量が多くなるが、特に分級 OPC+FA の増加傾向が著しい。また外割 20、外割 30 は OPC に比べ 2~3 倍程度と多くなるが、分級 OPC+FA、FA+二水石膏に比べると増加傾向は小さい。

これらのことは分級セメント (比表面積の増加) や二水石膏はフライアッシュ以上に AE 剤添加量に影響を与えているものと考えられる。

二水石膏はフライアッシュとの相性も考えられるため、今後は置換率を変えるなど検討する必要がある。

また、いずれの試験ケースにおいても単位粉体量が増加する配合についてスラブの範囲 18 ± 1.5cm を満足するには高性能 AE 減水剤の使用を考慮する必要がある。

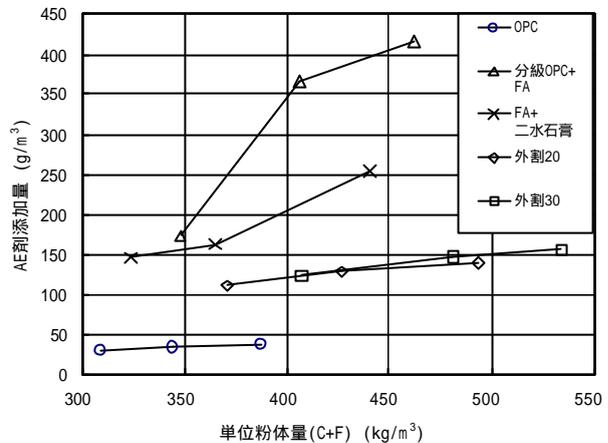


図 - 2 単位粉体量と AE 剤添加量

3.3 圧縮強度試験

養生温度 10、20 における各材齢の水セメント比と圧縮強度の関係を図 - 3 に示す。

多量の AE 減水剤によりスラブを調整した配合は、材齢 1 日において強度発現の遅延が見られる。これは、AE 減水剤量が著しく増加したため凝結遅延となり強度発現が遅れたものと考えられる。

同一水セメント比においては、FA+二水石膏以外、OPC に比べて圧縮強度が高く、特に分級 OPC + FA は養生温度が低くても初期強度が高くなる傾向にあった。

養生温度 10 の場合、材齢 3 日まではフライアッシュを置換した全てのケースが OPC に比べ高い強度を示している。

FA+二水石膏は、養生温度 10 における材齢 1、3 日では OPC と同程度であるものの材齢 7、28 日および養生温度 20 の各材齢では OPC に比べわずかに低くなる傾向にあった。

分級 OPC+FA は、どのケースと比べても単位セメント量が少なく、初期強度が高い結果となり、コンクリートへのフライアッシュの利用効果が高いと考えられる。

外割 20 および外割 30 は OPC と同等程度のセメント量

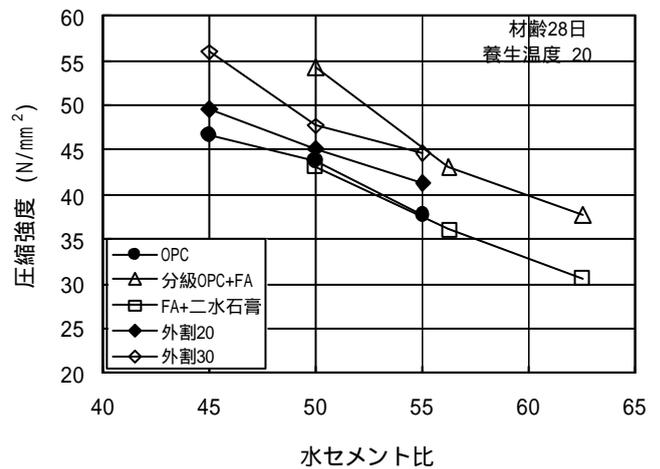
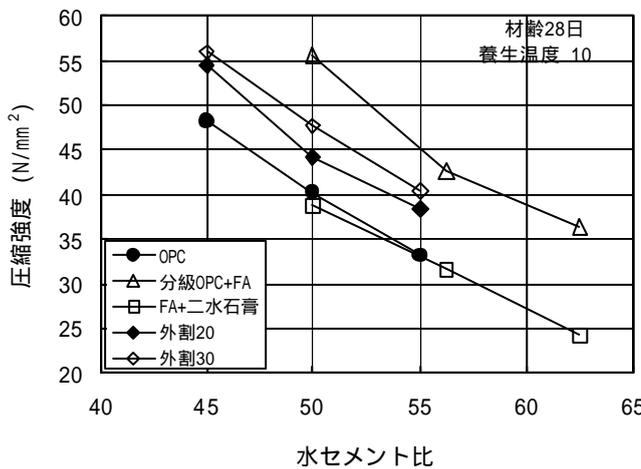
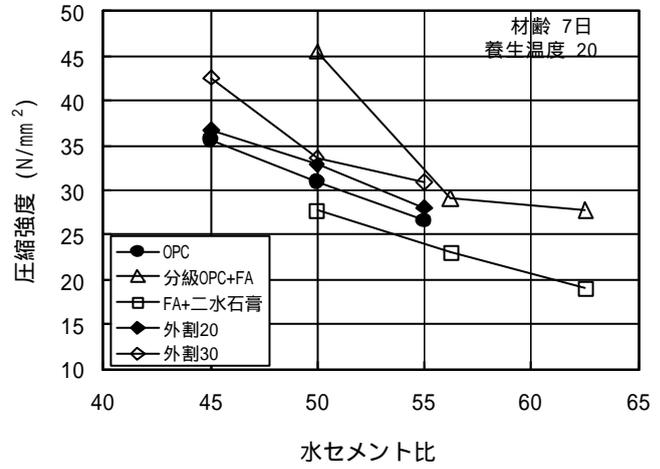
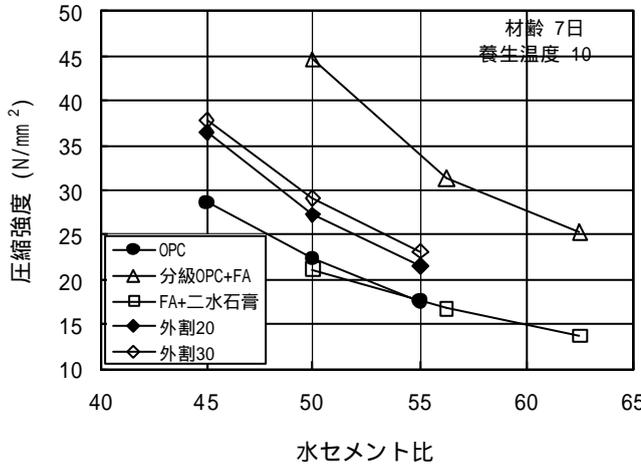
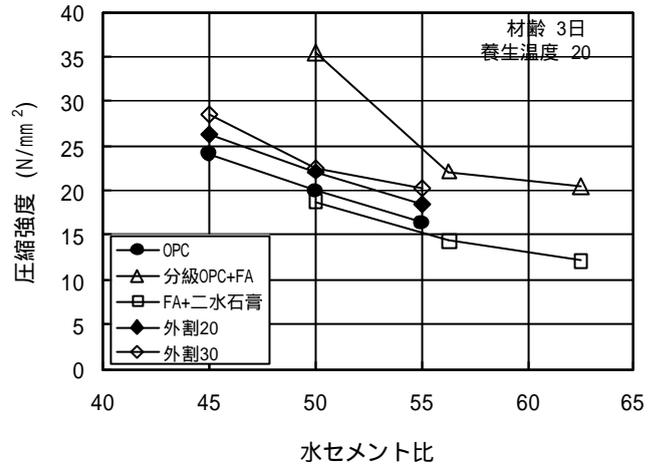
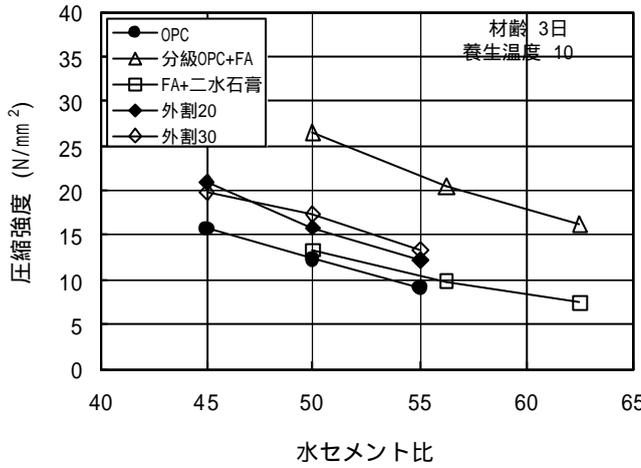
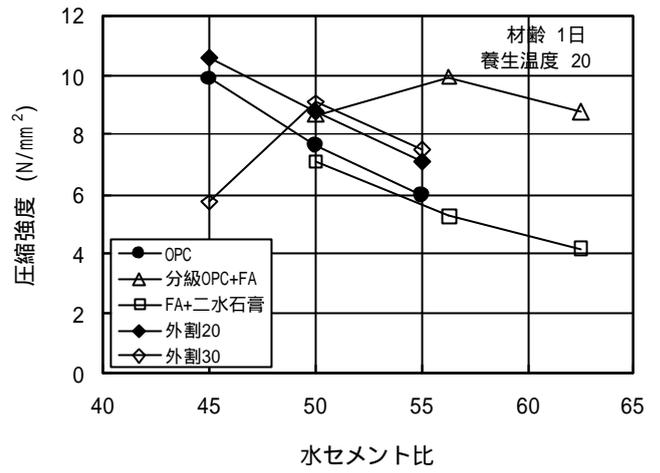
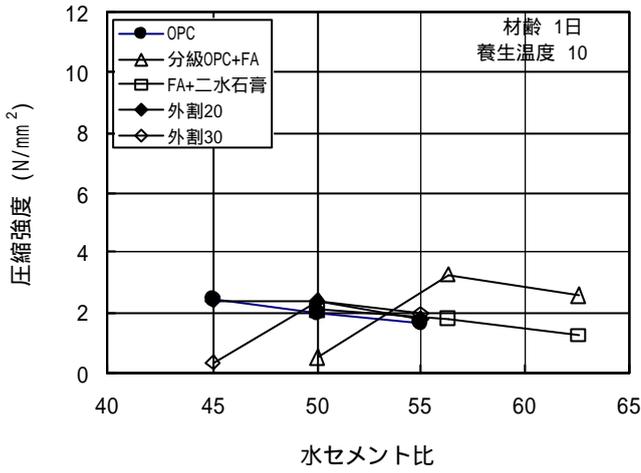


図 - 3 水セメント比と圧縮強度

であるが、養生温度 10 の材齢 1 日の強度が OPC と同程度となり材齢 3 日以降は大きく養生温度 20 ではどのケースにおいても OPC に比べ強度が大きい結果であった。これは、フライアッシュを混合したことによる水粉体比の低下とコンクリートの緻密化が強度増加の要因と考えられる。

3.4 圧縮強度の推定

圧縮強度はセメントの種類、セメント水比、単位フライアッシュ量および積算温度によって異なることから OPC および外割 20 および外割 30 について積算温度を以下の(1)式により求め、重回帰分析を行った結果を表 - 5 に示す。また、回帰式による推定強度と圧縮強度の関係を図 - 4 に示す。

AE 減水剤の多量添加による強度発現遅延のため材齢 1 日の圧縮強度は回帰式から離れているものの、相関係数は 0.954 となった。回帰式中の単位フライアッシュ量の重みは小さいがフライアッシュ混入により圧縮強度が増加することが示された。

$$M = \sum_0^t (q + A) \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (1)$$

- M : 積算温度 ( ·h)
- q : 時間中のコンクリート温度
- A : 定数(10 )
- Δt : 時間

表 - 5 重回帰分析結果

配合ケース	回 帰 式	相関係数
OPC OPC+FA	$= (11.83(C/W)+0.01082F) \log_{10}M - 60.00$	0.954

ここで、  
 : 圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)  
 C : 単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>)  
 W : 単位水量(kg/m<sup>3</sup>)  
 F : 単位フライアッシュ量(kg/m<sup>3</sup>)  
 M : 積算温度( ·h)

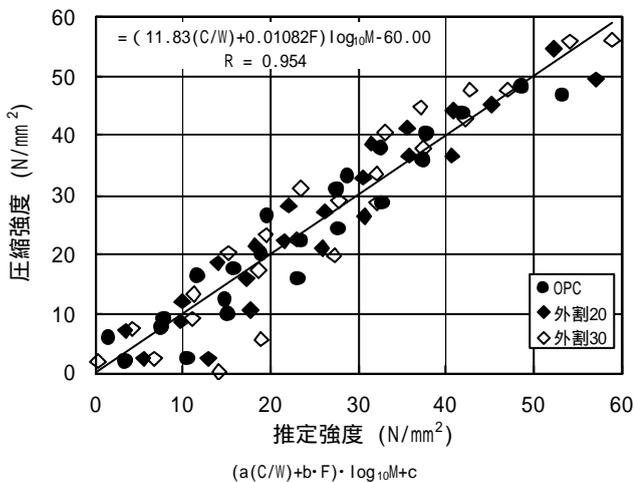


図 - 4 推定強度と圧縮強度

4. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 同一粉体量の単位水量は、FA+二水石膏、外割 20 について OPC に比べ単位水量が減少する傾向にあり、フライアッシュのボールベアリング効果が示された。一方、単位水量が最大となった分級 OPC+FA は、フライアッシュの効果よりもセメント比表面積増加による影響が大きい。
- (2) 単位粉体量が多くスランプを多量の AE 減水剤で調整する配合は凝結遅延によって材齢 1 日の強度発現が遅れた。また各ケースとも単位粉体量が多くなる場合にはスランプの範囲 18cm±1.5 を満足するには高性能 AE 減水剤の利用を考慮する必要がある。
- (3) 分級 OPC+FA は、各養生温度において OPC に比べ初期強度が高く、単位セメント量も減少することから、コンクリートへのフライアッシュ利用効果がある。
- (4) FA+二水石膏は、養生温度 10 における材齢 1、3 日では圧縮強度が OPC と同程度であるものの材齢 7、28 日および養生温度 20 の各材齢では OPC に比べわずかに低くなる傾向にあった。
- (5) 外割 20 および外割 30 は OPC と比較して初期強度の増進が示された。また、一般的にはフライアッシュ混合により長期材齢の増進が知られていることから外割配合でのフライアッシュ利用については初期強度の低下対策に効果があるといえる。
- (6) OPC、外割 20 および外割 30 について積算温度をもとに、重回帰分析を行った結果、圧縮強度は、セメント水比、単位フライアッシュ量および積算温度により推定可能であることが示唆された。また、単位フライアッシュ量の重みは小さいもののフライアッシュ混入によって圧縮強度が増加することが示された。

今回の実験結果からフライアッシュコンクリートの初期強度の低下対策として分級 OPC の使用および外割配合が有効であることが示されたことから、今後はこれらの配合で耐久性の確認を行なう予定である。

参考文献

- 1) 本田悟, 椎葉大和: フライアッシュを使用したコンクリートの初期強度発現性, 日本建築学会大会 学術講演梗概集 (北陸), pp.749-750, 2002.8.
- 2) 廣瀬哲, 岡本亨久, 寺田了司, 堺孝司: 普通または早強セメントを混合したビーライト系セメントの特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.315-320, 1996
- 3) 土木学会; フライアッシュコンクリートシンポジウム論文報告集, 1997.12.