論文　吹付けコンクリートへの石炭灰の適用に関する研究

岩城 圭介[*1]・平間 昭信[*1]・周藤 昭夫[*2]・齊藤　直[*3]

要旨：吹付けコンクリートのコスト縮減の観点から，石炭灰のセメント置換による添加を考え，石炭灰の添加方法・添加量が凝結・強度発現性状に与える影響を室内モルタル試験により把握した。また，実際のトンネル工事で行った試験施工により強度発現に関するデータを得た。これら結果から，急結剤添加から数十分以内の凝結性状および材齢 3 時間から 1 年に至る強度発現に影響する配合要因について考察した。

キーワード：吹付けコンクリート，石炭灰，凝結時間，初期強度，長期強度

1.　はじめに

近年の電力需要の増加などを背景として，石炭火力発電にともなう副産物である石炭灰の発生量の増加が予想されている。石炭灰の有効利用は，これまで主にセメント・コンクリート分野で進められてきたが，現状の利用量や今後の発生量の増加を考慮すると，さらなる利用分野の拡大が重要な課題となっている。

コンクリート分野では，JIS 規格に合致したコンクリート用混和材「フライアッシュ」として用いられている。最近では，分級を行っていない石炭灰原粉（以下，石炭灰という）の積極的な利用が期待されおり，山岳トンネルの吹付けコンクリートへの石炭灰の利用に関しても多くの研究[1)]がなされている。また，VE 提案の位置付けで，セメントに比べて安価な石炭灰をセメント置換で吹付けコンクリートに適用した例もある[2)]。

本研究では，材料コストの縮減を目的として，石炭灰の添加が吹付けコンクリートの凝結・強度発現性状に与える影響について検討を行った。

2.　石炭灰の置換方法

吹付けコンクリートにフライアッシュを添加する手法としては，以前から細骨材置換による方法が用いられてきた。すなわち，付着性を利用した湧水箇所への適用[3)]や高強度化・高品質化のための混和材としての評価[4)]が行われている。また，JIS I 種相当に分級したフライアッシュの細骨材置換による粉じん・リバウンド低減に関する研究[5)]が行われている。

一方，国内の一般的な湿式吹付けコンクリートでは，単位セメント量 360 kg/m^3 程度，細骨材率 55～75%程度，粗骨材最大寸法 15 mm 以下の配合が用いられている。すなわち，打込みコンクリートに比べて単位セメント量が多く，細骨材率が大きいモルタルに近い配合であるといえる。これは，吹付けコンクリートで特徴的な圧送性を含む施工性の確保やリバウンドの低減の観点によるものである。このような吹付けコンクリートの配合上の特徴から，石炭灰のセメント置換により低コストな配合が可能と考えられる。しかし，セメント置換では，急結剤の作用による凝結・強度発現性状への影響が懸念され，凝結・強度発現が遅れるような場合には，支保構造の形成が難しいばかりでなく，トンネル掘削に対し安全性を損なう可能性がある。

そこで，本研究では，石炭灰のセメント置換を中心に，石炭灰置換率などの配合要因が凝結・強度発現性状に与える影響について検討した。また，品質向上などの付加的な効果を期待して細骨材置換を検討に含めた。

*1　飛島建設（株）技術研究所 材料研究室（正会員）
*2　飛島建設（株）広島支店
*3　中国電力（株）土木部 石炭灰有効活用プロジェクト 博（工）（正会員）

3. 実験概要

3.1 使用材料

使用材料を**表－1** に示す。石炭灰に関しては，産出発電所の試験成績を平均値，標準偏差で示す。使用する石炭灰は，平均値で JIS A 6201 フライアッシュ II 種を満足するものであった。しかし，品質変動を考慮すると，強熱減量，フロー値比，活性度指数が JIS を満足しない。

3.2 室内モルタル試験

(1) 試験配合

室内モルタル試験の配合設定では，先ず，石炭灰無添加の配合（N 配合）を，目標スランプを 10.0±2.0 cm として選定した。石炭灰添加配合では，容積置換でセメントに対して 0～60%，細骨材に対して 0～18%の石炭灰添加率を設定した。なお，全配合の単位粗骨材量は N 配合に準じた。以上のコンクリート配合から粗骨材を除外したモルタルの練混ぜを行い，JIS A 1173「ポリマーセメントモルタルのスランプ試験方法」に準じてフレッシュ性状の確認を行った。ここで，各配合のモルタルスランプが 65±10 mm となるように，単位水量を調整した。

以上の過程により，**表—2** に示す室内モルタル試験の配合を選定した。なお，凝結試験，強度試験における急結剤の添加量は，一般的な単位セメント量 360 kg/m^3 の 6%にあたる 21.6 kg/m^3（コンクリート換算）一定とした。

(2) 試験方法

凝結試験は，土木学会コンクリート標準示方書規準編 JSCE-D 102「吹付けコンクリート用急結剤品質規格」付属書「貫入抵抗によるモルタルの凝結試験時間測定方法」に準拠した。なお，急結剤の添加方法は，実際の吹付け条件を反映可能な湿式練混ぜ方式（モルタル先練り，急結剤後添加）[6] を採用した。成形型の寸法は，160×136×40 mm である。また，凝結時間の測定は，経過時間 30 分または貫入抵抗値 20 N/mm^2 以内を対象とした。

圧縮強度試験は，JSCE-D 102 に準拠し，上記凝結試験と同様の急結剤の添加方法を採用した。試験材齢は，初期強度の範囲で 3 時間，24 時間，長期強度の範囲で，材齢 7 日，28 日の試験材齢を設定した。

3.3 試験施工

試験施工 [2] では，**表－3** に示す 4 配合について，初期強度，長期強度の試験を行った。各配合とも，目標スランプを 10.0±2.0 cm，急結剤の添加量を一般的な単位セメント量 360 kg/m^3 の 7%にあたる 25.2 kg/m^3 に設定した。

初期強度に関しては，日本道路公団規格 JHS 702「吹付けコンクリートの初期強度試験」により材齢 3，24 時間の圧縮強度を推定した。

また，長期強度に関しては，材齢 7，28，91 日，1 年で圧縮強度試験を行った。試験対象は，JSCE-F 561「吹付けコンクリートの圧縮強度試験用供試体の作り方」に準じ吹付け成形したパネルから採取したコア供試体および急結剤を添加しないコンクリート（以下，ベースコンクリート）で作成した供試体とした。

4. 実験結果および考察

4.1 凝結性状

図－1 に凝結試験結果の一例（細骨材容積置換率 6%）を示す。経過時間と貫入抵抗値の関係は，図に示すように対数近似が可能であった。

凝結時間に関する指標としては，貫入抵抗値が，3.5，28 N/mm^2 となる始発，終結時間が知られている。本研究では，吹付けコンクリートの付着性や剥落の観点で特に重要な急結剤添加後初期の凝結性状を把握するために，貫入抵抗値が 3.5，10，15 N/mm^2 となる経過時間 *ST3.5*（始発時間），*ST10*，*ST15*（分）を各配合で得た近似曲線から求め，凝結時間の指標とした。

図－2 では，配合要因として単位セメント量 *C*，単位粉体量 *P*，石炭灰粉体比 *CA/P* を挙げ，各配合要因と凝結時間 *ST3.5*，*ST10*，*ST15* の関係を示した。図中には，指数近似の寄与率をあわせて示す。各試験結果から，*C*，*P* が多く，*CA/P* が小さいほど凝結時間が短縮される傾向が認められた。

表－1　使用材料の諸元

使用材料	諸　元
セメント C	普通ポルトランドセメント，密度 3.16 g/cm^3
石炭灰 CA	新小野田発電所産，二酸化珪素 60%（σ 4.59%），湿分 0.1%（σ 0.08%），強熱減量 3.7%（σ 1.26%），密度 2.20 g/cm^3（σ 0.07 g/cm^3），45 μm ふるい残分 20%，比表面積 3,290 cm^2/g（σ 429 cm^2/g），フロー値比 102.6%（σ 5.52%），活性度指数 28 日 82.9%（σ 3.47%）91 日 95.2%（σ 3.64%）
細骨材 S	岩国市守内産･蒲江沖産，砕砂･海砂混合，粗粒率 2.64，表乾密度 2.66 g/cm^3
粗骨材 G	岩国市守内産，砕石 1505，表乾密度 2.65 g/cm^3
急結剤 Ac	カルシウムアルミネート系，密度 2.70 g/cm^3

表－2　室内モルタル試験における検討配合（粗骨材を含むコンクリート配合で表示）

記号	石炭灰の容積置換率(%)		水セメント比 W/C (%)	水粉体比 W/P (%)	石炭灰粉体比 CA/P (%)	単位粉体量 P (kg/m^3)	単位量 (kg/m^3)				
							粉体 P		水 W	細骨材 S	粗骨材 G
	セメント置換	細骨材置換					セメント C	石炭灰 CA			
00-00 (N)	0	0	60.0	60.0	0.0	360	360	0	216	1072	655
00-18	0	18	63.3	44.3	30.1	515	360	155	228	853	655
00-15		15	62.8	46.2	26.5	490		130	226	889	
00-12		12	60.6	46.8	22.7	466		106	218	939	
00-09		9	60.6	49.6	18.1	439		79	218	971	
00-06		6	60.3	52.5	12.8	413		53	217	1005	
00-03		3	60.0	55.9	6.9	387		27	216	1040	
10-15	10	15	69.8	47.2	32.3	479	324	155	226	889	655
10-12		12	69.1	49.4	28.5	453		129	224	925	
10-09		9	67.3	50.9	24.4	428		104	218	971	
10-06		6	67.0	54.0	19.4	402		78	217	1005	
10-03		3	66.7	57.5	13.8	376		52	216	1040	
10-00		0	66.7	61.9	7.2	349		25	216	1072	
20-12	20	12	77.4	50.4	34.9	443	288	155	223	927	655
20-09		9	76.0	52.5	31.0	417		129	219	968	
20-06		6	76.0	56.0	26.3	391		103	219	1000	
20-03		3	75.0	59.2	21.0	365		77	216	1040	
20-00		0	75.0	63.9	14.8	338		50	216	1072	
30-09	30	9	87.7	54.4	37.9	406	252	154	221	964	655
30-06		6	87.3	57.9	33.7	380		128	220	998	
30-03		3	85.7	61.1	28.8	354		102	216	1040	
30-00		0	85.7	66.0	23.0	327		72	216	1072	
40-06	40	6	101.4	59.3	41.5	369	216	153	219	1000	655
40-03		3	100.9	63.6	37.0	343		127	218	1035	
40-00		0	100.0	68.3	31.7	316		100	216	1072	
50-03	50	3	120.0	65.1	45.8	332	180	152	216	1040	655
50-00		0	120.0	70.7	41.0	305		125	216	1072	
60-00	60	0	150.0	73.4	51.1	294	144	150	216	1072	655

表－3　試験施工における検討配合

記号	石炭灰の容積置換率(%)		水セメント比 W/C (%)	水粉体比 W/P (%)	石炭灰粉体比 CA/P (%)	単位粉体量 P (kg/m^3)	単位量 (kg/m^3)				
							粉体 P		水 W	細骨材 S	粗骨材 G
	セメント置換	細骨材置換					セメント C	石炭灰 CA			
N	0	0	61.1	61.1	0.0	360	360	0	220	1,061	655
CA1	30	1.7	58.9	84.1	30.0	360	252	108	212	1,043	
CA2	15	0.8	60.0	70.6	15.0	360	306	54	216	1,053	
CA3	15	7.0	52.2	70.6	26.1	414	306	108	216	987	

ST3.5 に対する配合要因の影響に関しては，*C*，*P* に比べて *CA/P* の相関が比較的高く，*CA/P* 30%以下の範囲で 1～1.5 分であったのに対し，*CA/P* 30%超の範囲で 2 分程度と遅延する傾向が示された。これら結果は，吹き付け直後の凝結性状に対する影響因子として，急結剤の自硬性やセメントとの作用のみならず石炭灰の効果も考慮する必要があることを示唆する。しかし，単位粉体量との相関が認められなかったため，石炭灰を結合材の一部と見なすことはできない。よって，初期の凝結性状では，石炭灰の物理的な充填効果 [7] も考慮する必要があると考えられる。つまり，石炭灰粉体比 *CA/P* が 30%を超える場合には，セメントと急結剤の作用に匹敵する物理的充填効果が得られず，初期凝結を遅延する可能性があると考えられる。

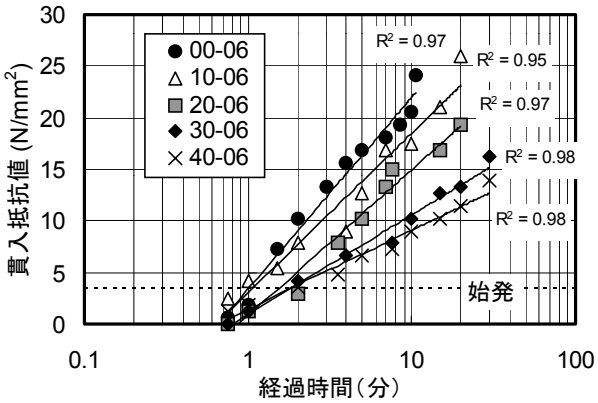
一方，*ST10*，*ST15* では，*P*，*CA/P* との相関に比べて *C* との相関が卓越することが示された。この結果は，吹付けから数分後以降の時間帯では，急結剤のセメントへの作用が顕著となり，石炭灰のセメント置換率が過大で単位セメント量が極端に少ない場合には，適切な凝結性状が得られない可能性を示唆するものである。

4.2 初期強度発現

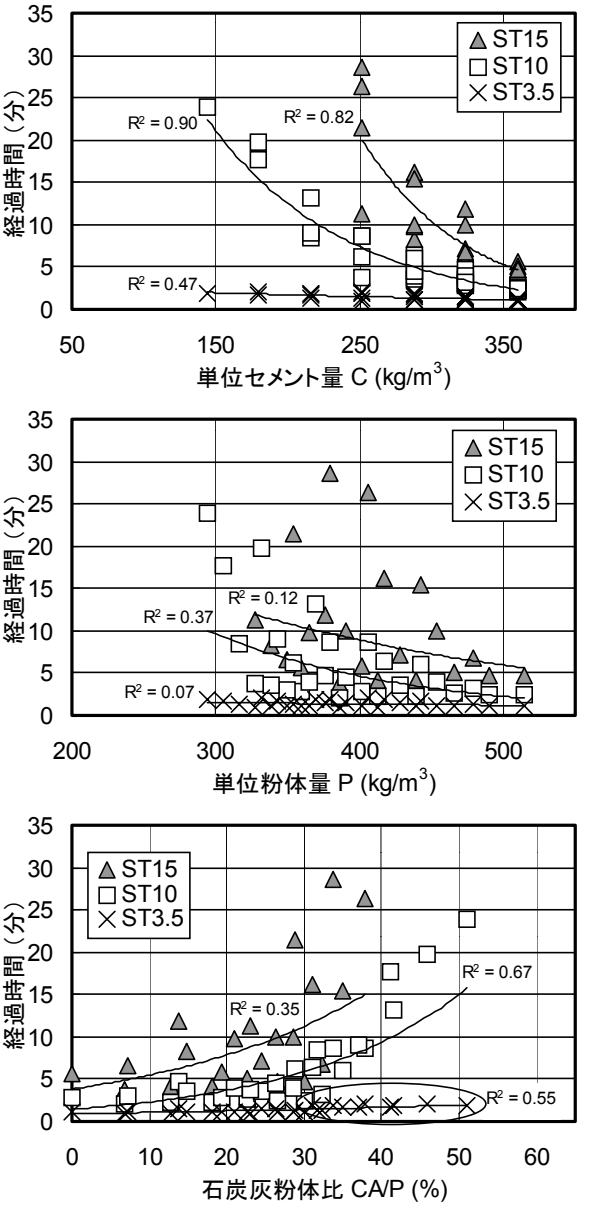
単位セメント量 *C*，単位粉体量 *P* と材齢 3 時間，24 時間の圧縮強度の関係を**図－3** に示す。なお，凡例の *LT* は室内モルタル試験，*FT* は試験施工を，3 hr，24 hr は材齢を表す。

材齢 3 時間の室内モルタル試験結果では，配合要因との明確な関連を示さない結果であった。これに対し，材齢 24 時間の室内モルタル試験結果では，*C*，*P* が多いほど圧縮強度が大きい傾向が認められ，*P* との相関に比べて *C* との相関が高い結果であった。

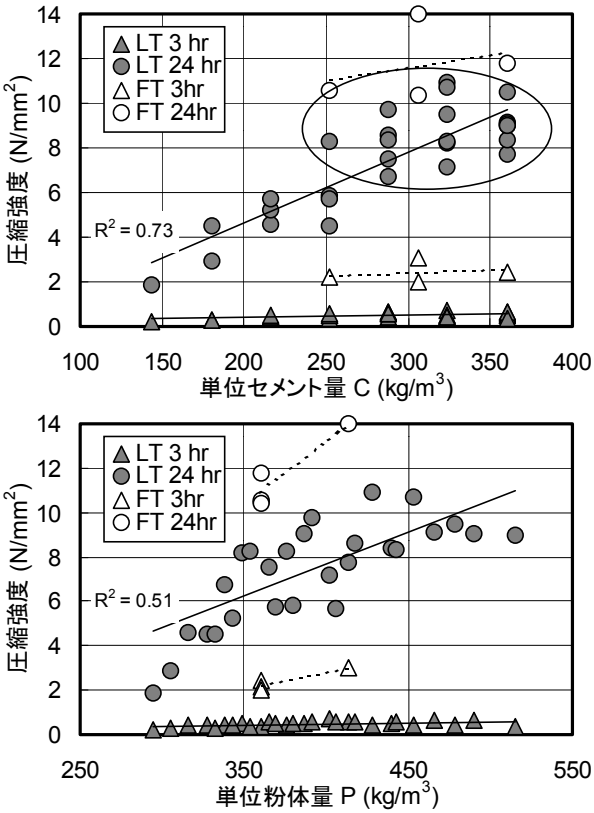
これらの結果から，前述のセメントに対する急結剤の作用が材齢数時間で収束し，これ以降，セメントの水和による強度発現への影響が卓越することが推定できる。また，*C* が 250 kg/m^3 程度を越える範囲では，6 N/mm^2 を越える値を示したことから，一般的な初期強度の管理基準である材齢 24 時間 5 N/mm^2 を満足するには，*C* 250 kg/m^3 を下限とする必要があると考えら



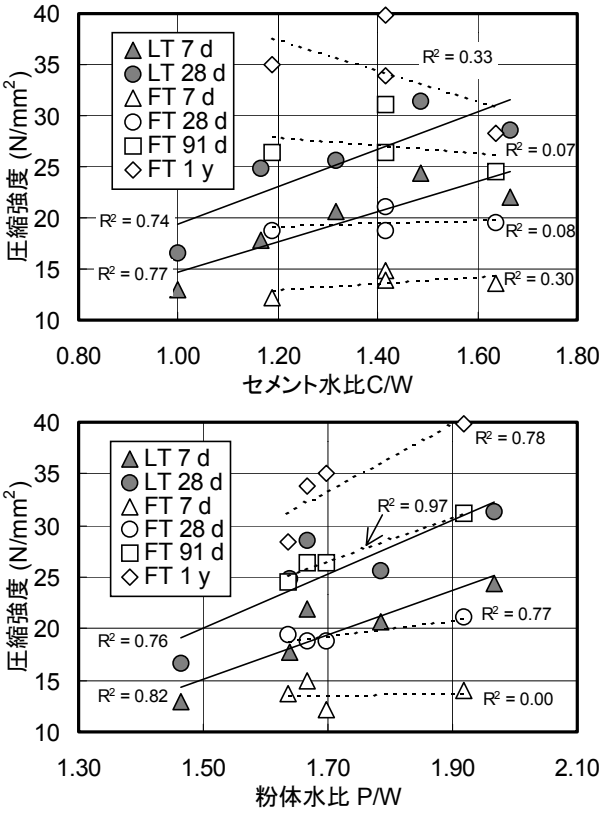
図－1　凝結時間測定結果の一例
細骨材容積置換率 6%の場合



図－2　凝結時間に及ぼす配合要因の影響
上：C (kg/m^3)，中：P (kg/m^3)，下：CA/P (%)



図－3　初期強度に及ぼす配合要因の影響
上：C (kg/m^3)，下：P (kg/m^3)



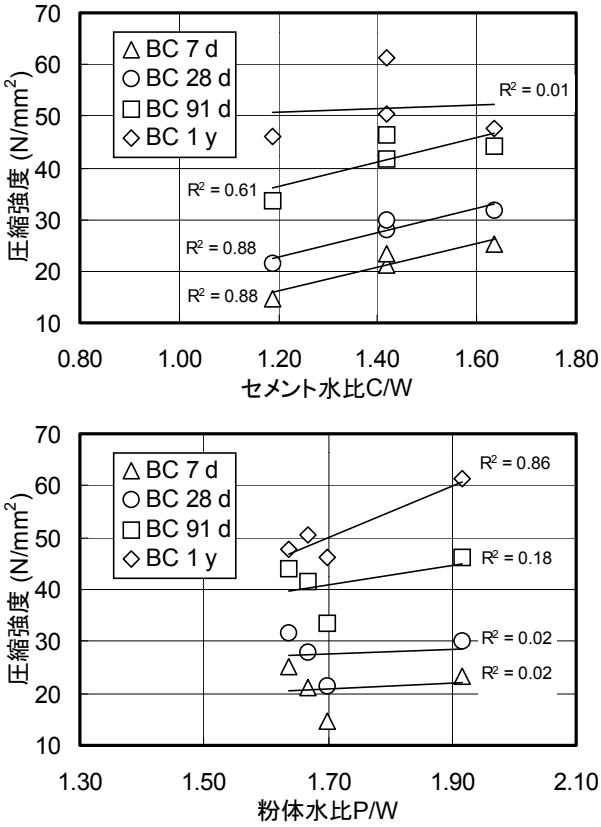
図－4　長期強度に及ぼす配合要因の影響
吹付けコンクリート，上：C/W，下：P/W

れる。なお，試験施工の初期強度は，材齢 3 時間，24 時間とも，室内モルタル試験に比べて高い値であった。この原因としては，急結剤添加量の違いや供試体寸法による内部発熱の強度発現への影響などが考えられる。

4.3 長期強度発現

セメント水比 *C/W*，粉体水比 *P/W* と室内モルタル試験および試験施工（吹付けコンクリート）の圧縮強度の関係を**図－4** に示す。また，*C/W*，*P/W* と試験施工（ベースコンクリート：*BC*）の圧縮強度の関係を**図－5** に示す。凡例の 7d，28d，91d，1y はそれぞれ材齢を表す。

室内モルタル試験の長期圧縮強度については，*C/W*，*P/W* が高いほど材齢 7 日，28 日とも圧縮強度が高くなる傾向を示した。一方，試験施工の吹付けコンクリートでは，*C/W* と圧縮強度に相関が認められないが，材齢 28 日以降の *P/W* との関係において，*P/W* の増加（石炭灰量の増加）にともなう圧縮強度の増加傾向が比較的高い相関で認められた。強度レベルに関して



図－5　長期強度に及ぼす配合要因の影響
ベースコンクリート，上：C/W，下：P/W

は，室内モルタル試験の材齢 7 日，28 日に対し，試験施工の材齢 28 日，91 日がほぼ同程度の圧縮強度を示した。この原因としては，急結剤添加量の違いによる強度発現阻害への影響などが考えられる。また，圧縮強度と *P/W* の関係は，強度レベルが同程度の材齢でそれぞれ類似する傾向を示した。よって，急結剤を添加したコンクリートの長期強度は，単位粉体量に鍛錬する *P/W* との関係で説明可能と考えられる。

一方，ベースコンクリートの長期圧縮強度と *C/W* との関係では，材齢 91 日までの範囲で相関が認められるのに対し，材齢 1 年で相関が低い結果であった。また，*P/W* との関係では，材齢 91 日までの範囲で相関が低いのに対し，材齢 1 年で相関が高い結果であった。よって，ベースコンクリートにおける石炭灰の強度発現への関与は，材齢 1 年を経過しなければ表れないと考えられる。一方，吹付けコンクリートにおける石炭灰の強度発現への関与は，前述のように材齢 28 日以降と比較的早期に表れた。これらの結果は，吹付けコンクリートにおける急結剤の作用が石炭灰のポゾラン反応を促進した可能性を示唆するものと考えられる。

5. まとめ

石炭灰を添加した吹付けコンクリートの配合要因と凝結・強度発現性状の関係に関し，得られた知見を以下に示す。

1) 石炭灰粉体比が 30%程度を越える場合，吹付け初期の凝結を遅延する可能性が示された。また，数分以降の時間帯では，単位セメント量の凝結時間への影響が大きく，急結剤のセメントへの作用が支配的であると推定された。

2) 材齢 1 日程度では，単位セメント量の初期強度への影響が大きく，セメントの水和が卓越する時間帯と推定された。

3) 材齢 28 日以降の長期強度に対しては，粉体水比の影響が大きく，材齢を経るごとにその影響が顕著であった。これは，石炭灰のポゾラン反応によるものと考えられる。また，吹付けコンクリートとベースコンクリートの比較から，急結剤の作用による石炭灰のポゾラン反応を促進する効果が示唆された。

謝 辞

試験施工に際し，山口県錦川総合開発事務所他関係各位に多大なるご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 例えば，安野孝生，齊藤直，松田敦夫，飯島俊荘，赤崎修一，西江寛次，木戸昭治，山崎泰典：石炭灰原粉を用いた湿式吹付けコンクリートの配合設計，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，V-490，2002.

2) 山本修，緒方正則，周藤昭夫，岩城圭介，安野孝生：石炭灰を用いた吹付けコンクリートの現場適用について，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，VI-207，2002.

3) 平間昭信，早野義昭，中野嘉昭，木村勝利：吹付けコンクリートの湧水に対する付着性改善に関する研究，土木学会第 45 回年次学術講演会概要集，V-353，1990.

4) 平間昭信，安藤慎一郎，荒木昭俊，魚本健人：使用材料が吹付けコンクリートの強度特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.1381-1386，2000.

5) 油野邦弘，石井光裕，加地貴：分級フライアッシュを用いた吹付けコンクリートの品質改善に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.177-182，2002.

6) 寺村悟，岩崎昌浩，平野健吉，笹川幸男，中川浩二：各種急結剤と吹付けモルタルの特性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.91-101，1999.

7) 寺本勝三，五十嵐心一，川村満紀，渡辺暁央：吹付け用フライアッシュ含有コンクリートの初期強度と細孔構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.139-144，2001.