

論文 ECL コンクリートへのフライアッシュの適合性について

伊藤功^{*1}・齋藤敏樹^{*2}

要旨：トンネルの掘削・覆工並進工法であるECL工法用のコンクリート（ECLコンクリート）に、国内炭フライアッシュを混和材として使用することにより、加圧時の分離低減、端面自立強度の向上などに効果があり、フライアッシュがECLコンクリートへの適合性に優れていることを確認した。

キーワード：ECL、フライアッシュ、加圧ブリーディング、端面自立強度

1. はじめに

ECL工法は、覆工にセグメントを使用せず、掘削と平行してシールドの後部で地山と内型枠の間にフレッシュコンクリートを加圧された状態で押し出し、地山に密着した覆工コンクリートを構築する工法である。ECLコンクリートには、一般コンクリートとは異なる様々な特性（高流動コンクリートに近い流動性、加圧による脱水が少ないこと、加圧後のプレス面が自立すること等）が要求され、特殊性の高いコンクリートである。フライアッシュは、高流動コンクリートのモルタルの粘性を高める効果のあることが報告されている[1]が、ECLコンクリートの諸特性に与える影響については、不明な点が多い。

本研究は、フライアッシュを混和材としたコンクリートの諸特性を試験し、ECLコンクリートへの適合性を検討したものである。

2. 実験方法

2. 1 使用材料

実験に使用した材料を表-1に示す。

表-1 使用材料

フライアッシュは比較的品質の安定した国内炭フライアッシュ（表-2）を用い、高性能AE減水剤は分離低減剤との相性を考慮してポリカルボン酸系のものを用いた。

材料名	種 類	成分、特性など
セメント	普通ポルトランドセメント	比重3.16、比表面積3300cm ² /g
混和材	奈井江火力産フライアッシュ	JIS灰（表-2）
細骨材	沙流川産川砂	F.M2.63、表乾比重2.61
粗骨材	沙流川産川砂利	F.M6.52、表乾比重2.80
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系化合物
	空気量調整剤	スルホン酸炭化水素
	分離低減剤	水溶性シリコーンエーテル

表-2 フライアッシュの品質試験結果

試験項目	二酸化けい素 (%)	湿 分 (%)	強熱減量 (%)	比 重	ブレン比表面積 (cm ² /g)	単位水量比 (%)	圧縮強度比 (%)	
							材齢28日	材齢91日
JIS規格	45以上	1以下	5以下	1.95以上	2,400以上	102以下	60以上	70以上
試験成績	59.22	0.06	0.80	2.16	2,870	95.2	69.9	92.9

*1 北海道電力(株)総合研究所土木グループ（正会員）

*2 北電興業(株)土木建築部土木担当主任（正会員）

2. 2 ECLコンクリートの設計条件

本実験で対象としたECLコンクリートは、新第三紀～先白亜紀の各種岩種の地山に密着するような流動性、充填性及び分離抵抗性を有し、打設後1時間の妻枠脱型時に端面が自立し、打設後1日の型枠脱型時に十分な強度を有することが必要なことから、設計条件を表-3のとおり設定した。

表-3 ECLコンクリートの設計条件

フレッシュコンクリート性状		強度特性				
スランプフロー (練り上がり)	加圧ブリーディング 15分経過後	プレス強度 (MPa)			ノンプレス強度 (MPa)	
		端面自立強度	材齢 1日	材齢28日	材齢 1日	材齢28日
57±5cm	25cc以下	0.0392以上	5.88以上	23.5以上	5.88以上	23.5以上

注) プレス強度とは、プレス圧(0.196MPa)を60分間かけた供試体の一軸圧縮強度であり、端面自立強度はプレス直後の一軸圧縮強度である。なお、ノンプレス強度は、通常の供試体による一軸圧縮強度である。

2. 3 配合ケースと練り上がり性状

実験は表-4に示す12ケースの配合について実施した。No.1～6は単位結合材量を450kg/m³として、フライアッシュ未使用および20%置換について、それぞれ分離低減剤量を変化させたケースであり、No.7～9は単位結合材量を400kg/m³および350kg/m³に低減したケース、また、No.10～12はNo.8(単位結合材量400kg/m³、フライアッシュ20%置換)の空気量を変化させたケースである。

表-4 配合ケースと練り上がり性状

項目 No.	粗骨材 の最大 寸 法 (mm)	水 結 合 材 比 W/(C+F) (%)	フライアッシュ 置 換 率 F/(C+F) (%)	細骨 材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)									練り上がり性状		
					水 W	セメント C	フライ アッシュ F	細骨材 S	粗 骨 材 G		分 離 低減剤	高性能 AE減水剤 標準形	空気量 調整剤 (g/m ³)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	
									5～10 mm	10～20 mm						
No. 1	20	40.0	0	51	180	450	0	862	439	439	0	7.650	22.5	59.9	2.4	
No. 2											0.1	7.740	0	59.8	2.8	
No. 3											0.2	8.100	0	57.9	2.9	
No. 4		34.7	20		156	360	90	876	447	447	0	8.325	36.0	57.3	2.8	
No. 5											0.1	8.775	0	55.5	2.9	
No. 6											0.2	9.225	0	59.4	2.9	
No. 7		41.8	0	51	167	400	0	900	459	459	0.1	9.400	0	57.5	2.8	
No. 8		36.0	20		144	320	80	915	467	467	0	9.400	24.0	60.8	2.5	
No. 9		43.4			152	280	70	928	473	473	0	8.400	28.0	58.9	2.5	
No. 10		36.0			144	320	80	902	460	460	0	9.200	88.0	62.0	4.5	
No. 11								875	446	446	0	9.000	100.0	61.5	5.8	
No. 12								848	423	433	0	8.000	140.0	61.6	8.4	

2. 4 試験項目と方法

表-5に本実験で実施した試験項目と方法を示す。

なお、表中のプレス供試体は、JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠して作製(φ10×20cm)し、上面と下面にろ過紙を置いてコンクリート加圧装置にて0.196MPaの圧力を供試体上面に60分間加えた後、所定材齢まで標準養生した。

表-5 試験項目と方法

試験項目	試験方法
スランプフロー試験	土木学会規準水中不分離性コンクリートの「コンクリートのスランプフロー試験(案)」に準拠した。
空気量試験	JIS A 1128「まだ固まらないコンクリートの空気量の圧力による試験方法(空気室圧力法)」に準拠した。
加圧ブリーディング試験	ポンプ施工指針「加圧ブリーディング試験」に準拠し、容器内試料上面に、コンクリート加圧装置により、0.196MPaの圧力を加え、脱水量を5、10、15、30、45、60、75分毎にメスシリンダーで測定した。 なお、供試体の底面には、ろ過紙と金網を置いた。
端面自立強度試験	プレス供試体作製後、直ちに脱型し、JSF-T-511「土の一軸圧縮試験方法」に準拠して実施した。
プレス供試体圧縮強度試験	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、プレス供試体について実施した。材齢 1、28日
ノンプレス供試体圧縮強度試験	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、ノンプレス供試体について実施した。材齢 1、28、91日
凍結融解試験	土木学会規準「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠して実施した。

3. 実験結果

3. 1 加圧ブリーディング試験

試験の結果は、図-1～2に示すとおり、各ケースとも加圧15分後25cc以下を満足した。

単位結合材量 $450\text{kg}/\text{m}^3$ のNo. 1～6における15分加圧時の加圧ブリーディング水量から加圧ブリーディング率を求め比較した結果を図-3に示す。加圧ブリーディング率は、分離低減剤量が増えるに従い低減する傾向であり、フライアッシュ置換による大きな減水効果でさらに減少し、フライアッシュの分離低減効果が示された。

フライアッシュ置換で分離低減剤を使用しない、No. 4、8及びNo. 9の単位結合材量と加圧ブリーディング率(加圧15分時)との関係を図-4に示す。加圧ブリーディング率は、単位結合材量 $400\text{kg}/\text{m}^3$ および $450\text{kg}/\text{m}^3$ では大差ないが、 $350\text{kg}/\text{m}^3$ では水結合材比が大きくなり若干大きな加圧ブリーディング率となった。

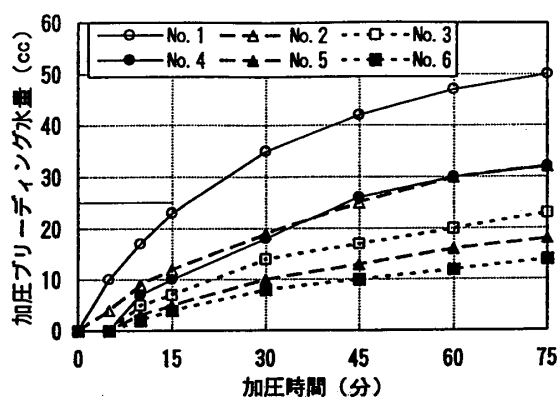


図-1 加圧ブリーディング試験結果(No. 1～6)

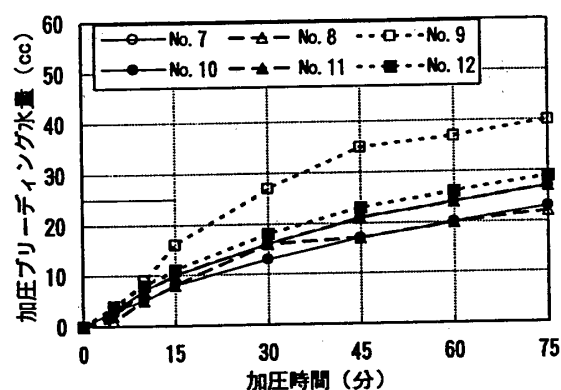


図-2 加圧ブリーディング試験結果(No. 7～12)

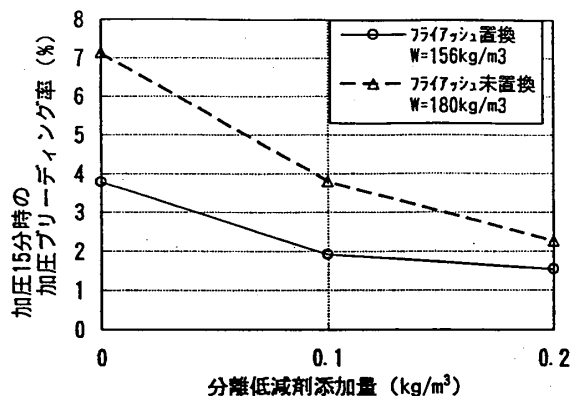


図-3 分離低減剤添加量と加圧ブリーディング率との関係

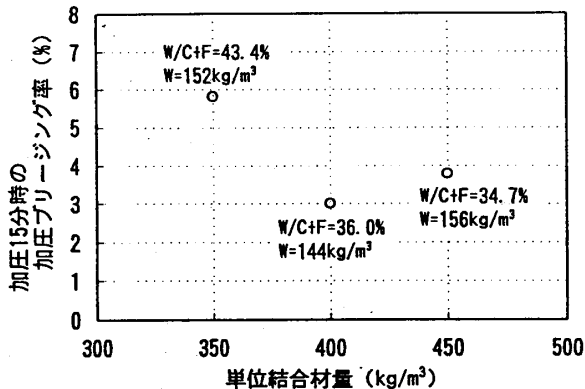


図-4 単位結合材量と加圧ブリーディング率との関係

3. 2 端面自立強度試験

各配合ケースの試験結果は、図-5に示すとおりであり、変動係数を10%と仮定した場合の配合強度0.0470MPa（設計強度0.0392MPa×1.2）を満足するのは、No.1、2、4、8、10、11の6ケースであった。

単位結合材量450kg/m³のNo.1～6における分離低減剤と端面自立強度との関係を図-6に示す。端面自立強度は、分離低減剤が増えるに従い低減する傾向にあり、フライアッシュ置換ではその傾向が強まるが、分離低減剤を使用しない場合は、配合強度を大きく上回る良好な結果を示した。

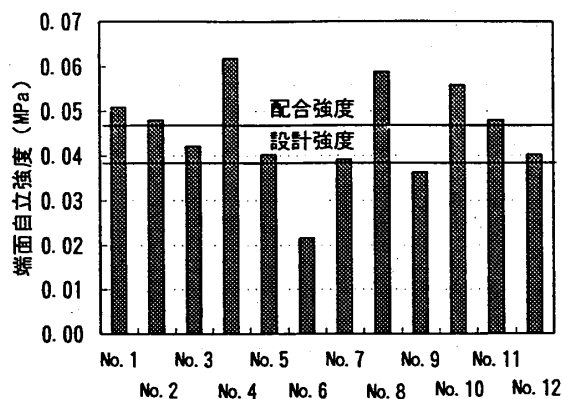


図-5 各配合ケースの端面自立強度

フライアッシュ置換で、分離低減剤を使用しないNo.4、8及びNo.9の単位結合材量と端面自立強度との関係を図-7に示す。端面自立強度は、水結合材比が小さいほどペーストの粘性が高まることにより大きくなると考えられるが、単位結合材量が400kg/m³と450kg/m³とでは水結合材比が同程度となったため端面自立強度も同程度となったと考えられる。

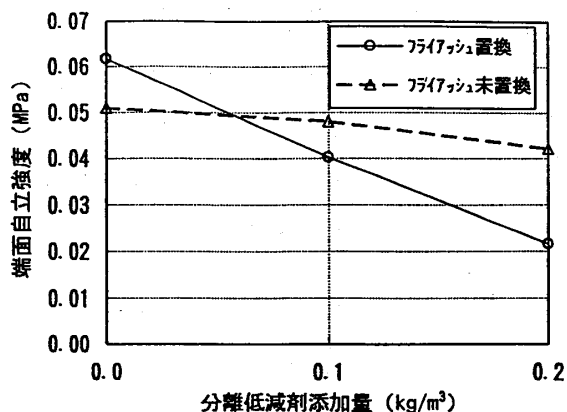


図-6 分離低減剤添加量と端面自立強度との関係

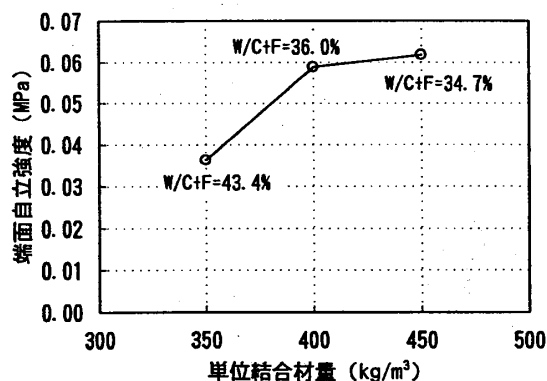


図-7 単位結合材量と端面自立強度との関係

3. 3 圧縮強度試験

各配合ケースの試験結果は、図-8および図-9に示すとおりである。図中の配合強度は変動係数10%と仮定し、材齢1日で7.06MPa（設計強度5.88MPa $\times$ 1.2）、材齢28日で28.2MPa（設計強度23.5MPa $\times$ 1.2）を示している。各ケースとも、材齢1日ではプレス強度がノンプレス強度を上回っているが、材齢28日では逆にノンプレス強度の方が大きくなっている。

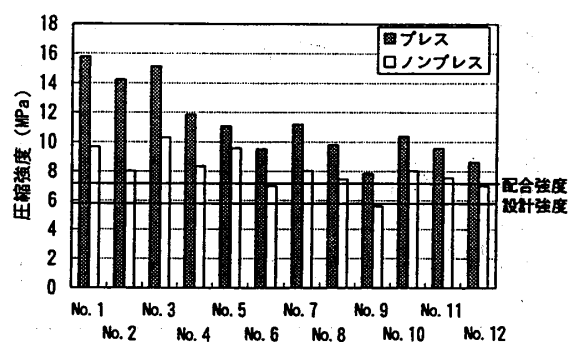


図-8 圧縮強度試験結果（材齢1日）

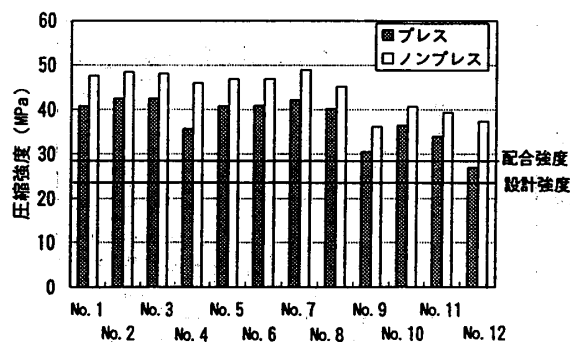


図-9 圧縮強度試験結果（材齢28日）

単位結合材量450kg/m³で分離低減剤を使用しないNo. 1、4の材齢とノンプレス強度との関係を、図-10に示す。フライアッシュ置換のNo. 4は、材齢28日まではフライアッシュを使用しないNo. 1より低強度であるが、材齢91日においては、若干No. 1を上回る強度発現を示し、材齢28日の強度を基準とした材齢91日の強度増進率は、No. 1の10%程度に対しNo. 4では18%となり、フライアッシュのポゾラン効果が示されたものと推察される。

フライアッシュ置換で分離低減剤を使用しないNo. 4、8及びNo. 9の単位結合材量と圧縮強度との関係を、図-11に示す。材齢28日強度は、単位結合材量350kg/m³と400kg/m³の強度差に比べ400kg/m³と450kg/m³の強度差は小さく、端面自立強度と同様の結果となった。

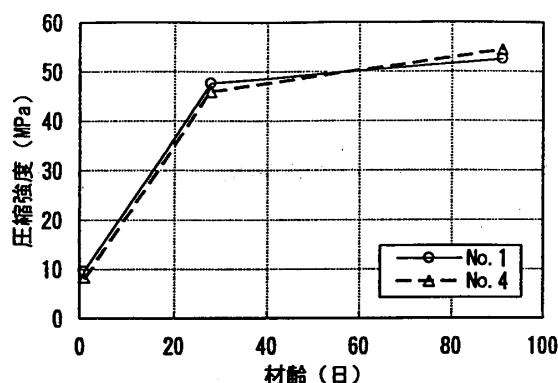


図-10 圧縮強度試験結果（ノンプレス）

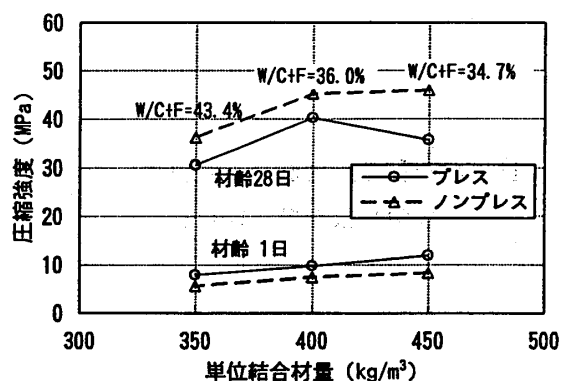


図-11 単位結合材量と圧縮強度との関係

3. 4 凍結融解試験

単位結合材量400kg/m³、フライアッシュ置換で空気量を3～8%に変化させたNo. 8、10、11及び

No. 12の試験結果は図-12に示すとおりである。No. 8を除く3ケースは、300サイクル終了時点の相対動弾性係数が85%以上と良好な耐凍害性を示した。

図-13に練り上がり空気量と耐久性指数との関係を示すが、No. 8は練り上がり空気量が2.5%と少なく、耐凍害性確保に必要なエントレインドエアが不足しているもので、耐久性指数は練り上がり空気量2.5%～4.5%で急激に向上するが、5.8%以上では一定値となった。

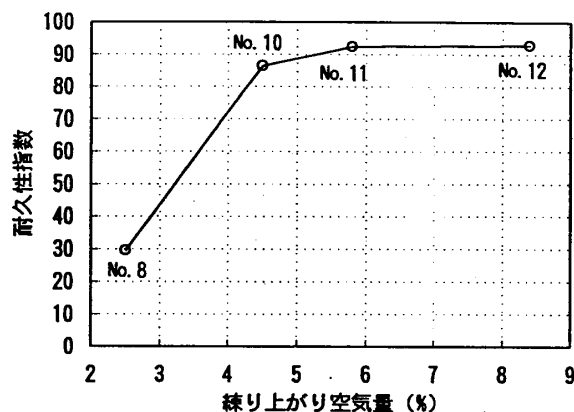
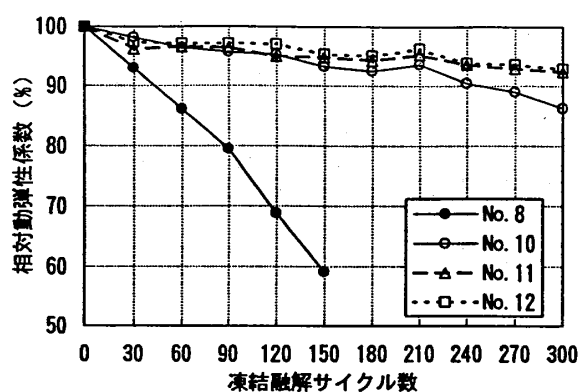


図-12 凍結融解試験結果(相対動弾性係数)

図-13 練り上がり空気量と耐久性指数との関係

4. まとめ

フライアッシュを使用したECLコンクリートの性状を試験した結果、以下のことが明らかとなった。

- ①フライアッシュの20%置換使用は、加圧時の分離低減および端面自立強度の向上に効果があり、分離低減剤を用いることなく、所定の性状を得ることが可能である。
- ②フライアッシュを20%置換使用した場合、単位結合材量を 400kg/m^3 とすれば、ECLコンクリートに要求される諸性状を確保できる。
- ③フライアッシュの使用により、長期的に強度の増進が期待できる。
- ④耐凍害性は、練り上がり空気量の増加とともに向上するが、空気量が6%以上になると一定値となる。

参考文献

- [1]小沢一雅, 前川宏一, 岡村甫: ハイパフォーマンスコンクリートの開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.699~704, 1989.6