

加圧流動床灰を主結合材としたコンクリート二次製品の開発

中国電力株式会社 正会員 ○南條 英夫
 (株) エネルギア・エコ・マテリア 正会員 福本 直
 呉工業高等専門学校 正会員 堀口 至
 ランデス株式会社 正会員 Paweena Jariyathitipong

1. はじめに

加圧流動床方式の石炭火力発電所から排出される加圧流動床灰（以下、PFBC灰）は、従来のフライアッシュと比較し、CaO、SO₃が多い、SiO₂が少ない、不定形な粒子形状である、自硬性を有するという特徴がある。

著者らは、PFBC灰の自硬性に着目し、PFBC灰を主結合材としたコンクリートの物性を把握するとともに、実用化のために圧縮強度改善を目的とした配合および養生方法の検討を実施してきた^{1) 2) 3)}。その結果、「結合材として高炉スラグ微粉末の併用」、「水結合材比の低減」により強度改善が図れるものの、初期強度が低く、粘性が高い等、現場打ちコンクリートとしては施工性に課題が残ることから、高い温度での養生や、高いエネルギーを持った機械による締め固めが可能な工場製品（二次製品）への適用が望ましいことが明らかとなった。

本稿では、PFBC灰を主結合材としたコンクリートを二次製品へ適用することを目的とした配合および養生条件の検討、ならびに工場での製品試作試験結果、耐久性（中性化）試験結果について報告する。

2. コンクリート二次製品への適用を目的とした配合および養生条件の検討

初期強度向上に対しては蒸気養生による初期水和促進で、粘性が高いことに対しては配合を高流動タイプまたは即時脱型タイプ（ゼロスランプでプレス成型）とすることで対応することとし、PFBC灰を主結合材としたコンクリートについて二次製品への適用性を確認するため、以下の検討を実施した。

(1) 目標強度の設定

コンクリート二次製品へ適用する場合、高流動配合では脱型時強度と出荷時強度が、即時脱型配合は出荷時強度が品質管理項目となる。このため、養生終了時を脱枠時、材齢7日時点を出荷時と設定し、圧縮強度試験を実施することとした。表—1に目標強度を示す。出荷時における目標強度は、施工のばらつきを考慮して、「設計基準強度×1.25」に設定した。また、高流動配合での脱型時目標強度は、普通製品と同等の10N/mm²以上を目標とした。

表—1 目標強度

配合種別	目標強度		適用製品
	脱型時強度	出荷時強度	
高流動配合	10N/mm ² 以上	30N/mm ² 以上 (設計基準強度24N/mm ² 以上×1.25)	・U字側溝 ・歩車道境界ブロック
即時脱型配合	—	22N/mm ² 以上 (設計基準強度18N/mm ² 以上×1.25)	積ブロック

表—2 コンクリートの配合

配合種別	配合名	水結合材比 W/B (%)	単位水量 W (kg/m ³)	細骨材率 s/a (%)	結合材に占める割合 (%)			混和剤添加量 (B×%)
					PFBC	BF	C	
高流動配合	高流動 C0	30	175	45	70	30	—	1.35
	高流動 C10				60		10	1.25
	高流動 C20				50		20	1.10
	高流動 C30				40		30	1.03
即時脱型配合	即脱 C0	30	90	57	70	30	—	1.5
	即脱 C10				60		10	
	即脱 C20				50		20	
	即脱 C30				40		30	
	即脱 C40				30		40	

記号) 結合材 (B) =PFBC+BF+C, PFBC: 加圧流動床灰, BF: 高炉スラグ微粉末, C: 普通ポルトランドセメント

(2) コンクリートの配合

試験に使用した配合を表-2に示す。これまでの研究成果をもとに、水結合材比は30%の1水準とした。結合材については、P F B C 灰 70%、高炉スラグ微粉末 30%の配合を基本とするが、この配合では目標強度を達成できないことが予想されたため、P F B C 灰の代りにセメントを 40%まで置換した配合についても検討することにした。

高流動配合はスランプフローが $60 \pm 10 \text{cm}$ 、即時脱型配合はスランプが 0cm となるよう高性能減水剤を用いて調整した。

(3) 養生条件

養生条件を表-3に、養生温度履歴を図-1示す。養生温度は、土木学会制定の「コンクリート標準示方書」に準拠し、温度上昇速度は $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 、最高温度は 65°C とした。また、蒸気養生を行うまでに前養生を行い、硬化体組織の緻密化を図ることが、その後の強度発現に有効であることが分かっているため、前養生時間も設定し、その温度は 20°C とした。蒸気養生完了後は、実際のコンクリート二次製品の製造方法に合わせて脱型後は気中暴露する条件とした。

表-3 養生条件

配合種別	配合名	前養生時間 (h)	蒸気養生時間 (h)
高流動配合	高流動 C0	2	19
		2	28
		4	24
		24	24
	高流動 C10	4	17
	高流動 C20	4	8
		4	17
	高流動 C30	4	17
即時脱型配合	即脱 C0	0	21
		4	24
		24	24
	即脱 C10	4	17
	即脱 C20	4	17
		24	24
	即脱 C30	4	17
		24	24
	即脱 C40	4	17

(4) 試験結果および考察

①セメント不使用配合の強度試験結果

セメント不使用配合（配合名：高流動 C0、即脱 C0）の強度試験結果を図-2、図-3に示す。これより、初期強度発現性は、前養生時間を長くとることにより良くなることが分かった。当該コンクリートは初期水和速度が遅いが、前養生時間を十分確保することにより硬化体組織が緻密化し、その後に蒸気養生を行うことで強度が向上したためと考えられる。

しかし、セメント不使用配合では、いずれの養生条件においても、今回の目標としていた出荷時強度（高流動 $30 \text{N}/\text{mm}^2$ 、即時脱型 $22 \text{N}/\text{mm}^2$ 以上）を満足することはできなかった。

②セメントを使用した配合の強度試験結果

セメント使用配合の強度試験結果を図-4、図-5に示す。高流動配合、即時脱型配合ともに、セメント使用量が増加するに従って、強度も増加することが確認できた。

高流動配合の場合は、結合材に占めるセメントの割合を 20%、前養生 4 時間、蒸気養生 17 時間とすることで、目標強度を達成できることが分かった。

即時脱型配合の場合も、結合材に占めるセメントの割合を 20% とすると、目標強度 $22 \text{N}/\text{mm}^2$ 以上を満足することが確認できた。また、結合材に占めるセメントの割合を増やすことにより、養生時間を短縮できることが分かった。

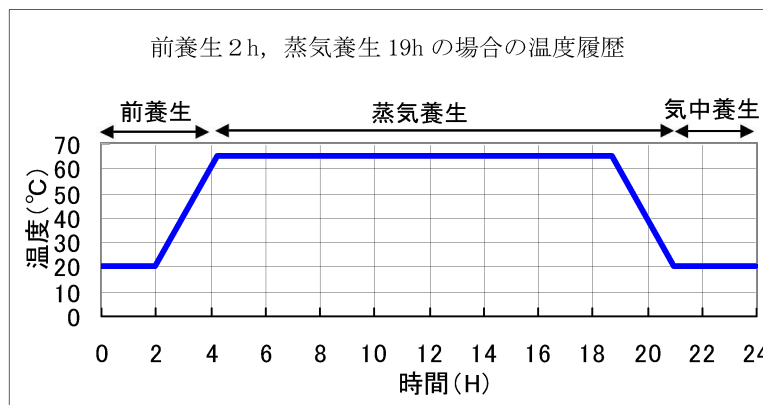
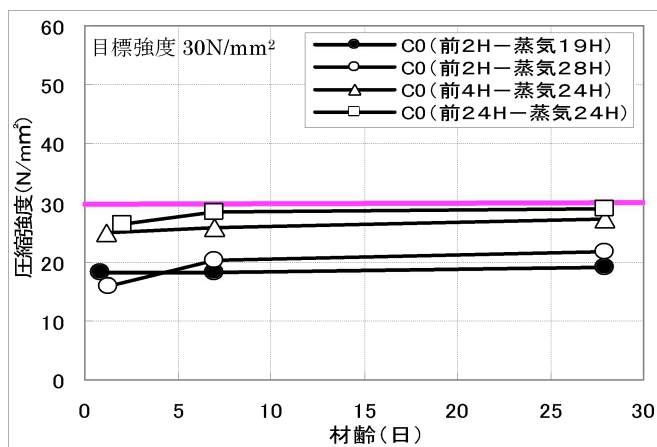
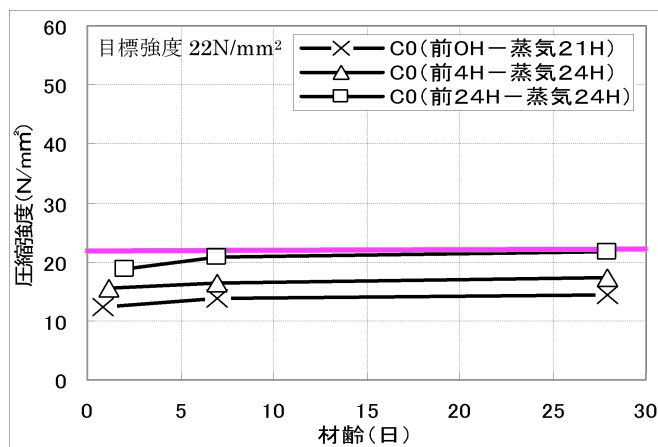


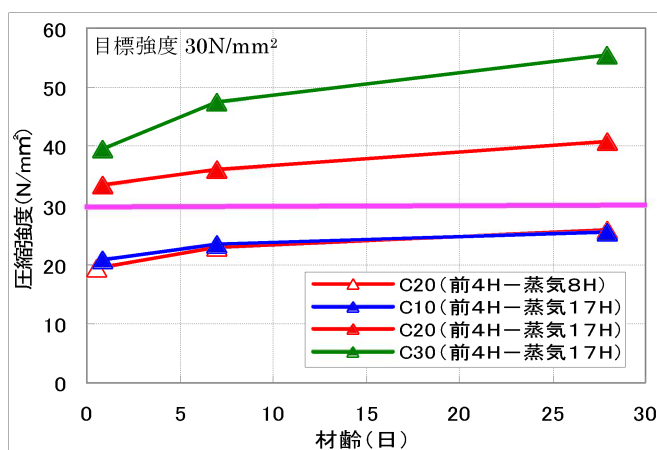
図-1 養生温度履歴



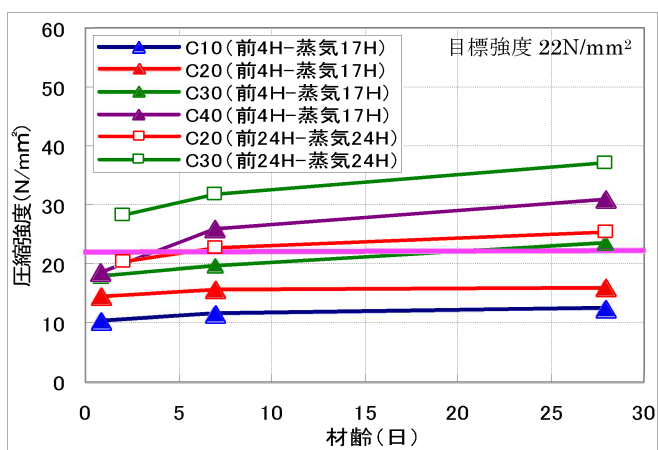
図－２ 養生条件の違いによる強度への影響
(高流動，セメント不使用)



図－３ 養生条件の違いによる強度への影響
(即時脱型，セメント不使用)



図－４ 養生条件およびセメント置換率の違いによる
強度への影響 (高流動，セメント使用)



図－５ 養生条件およびセメント置換率の違いによる
強度への影響 (即時脱型，セメント使用)

３．工場における製品試作試験結果

工場条件下で製品を試作し，施工性，強度および完成した製品の外観を確認した。配合，養生条件および試作試験結果を表－４に示す。高流動配合ではＵ字側溝および歩車道境界ブロックを，即時脱型配合では積ブロックを試作した。

試作の結果，高流動配合については，C0 および C20 とともにコンクリートの粘性は高いものの，型枠への流し込みや締固めは十分可能であり，施工性に問題はなかった。また，即時脱型配合についても，練上りコンクリートの性状は均一で，成型後の製品寸法も安定しており，施工性に問題はなかった。

強度試験については，製品と同条件で試作した供試体を用いて養生終了時と材齢 7 日時に実施した。セメ

表－４ 二次製品試作における配合，養生条件および試作試験結果

配合種別	配合名	結合材に占める割合 (%)			養生時間 (H)		試作試験結果		
		PFBC	BF	C	前養生	蒸気養生	施工性	外観	強度
高流動配合	高流動 C0	70	30	—	24	24	合格	合格	不合格
	高流動 C20	50		20	4	17	合格	合格	合格
即時脱型配合	即脱 C20	50	30	20	24	24	合格	合格	合格

(注) 表－４における水結合材比，単位水量，細骨材率は，表－２と同じ。

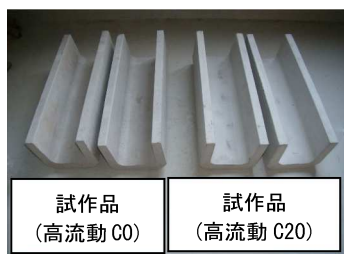


写真-1 U字側溝



写真-2 歩車道境界ブロック



写真-3 積ブロック

ントを含まない高流動 C0 配合では、表-1に示す目標強度を満足することができなかったが、セメントを20%含む高流動 C20 配合および即脱 C20 配合では、目標強度を満足することができた。また、外観上も問題はなく、二次製品として適用可能であることを確認した（写真-1、写真-2、写真-3）。

4. 耐久性試験結果（促進中性化試験結果）

工場における試作を踏まえ、製品の耐久性を確認するため促進中性化試験を実施した。普通製品配合と、P F B C 灰を主結合材とする配合（表-4に示す高流動 C20）の試験結果を図-6に示す。これより、P F B C 灰を主結合材とするコンクリートは、中性化の進行が早い。この結果は、P F B C 灰および高炉スラグ微粉末から生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が少なく、またともに生成した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を消費しながら CSH を生成する材料であることが原因と考えられる。

この試験結果から、鉄筋入の製品である U 字側溝の実用化は困難であると推測された。

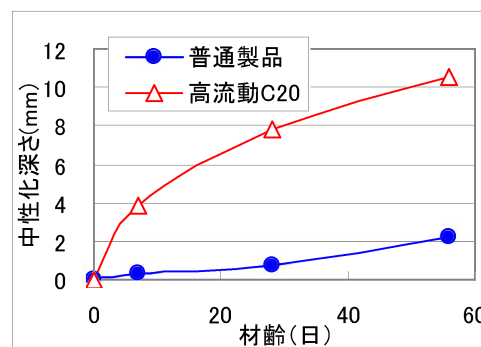


図-6 促進中性化試験結果

5. おわりに

P F B C 灰を主結合材としたコンクリートの二次製品への適用性検討において、以下の知見を得た。

- (1) 蒸気養生により強度増進を図るためには、前養生により組織の緻密化を図った後で蒸気養生を行う必要がある。
- (2) コンクリート二次製品として、目標強度を達成するには、結合材に占めるセメントの割合を20%以上とする必要がある。
- (3) P F B C 灰を主結合材としたコンクリートは、通常のコンクリートよりも中性化の進行が早い。したがって、当該コンクリートは、無筋製品への適用が望ましい。

以上より、P F B C 灰を主結合材としたコンクリートが二次製品（無筋製品）として適用可能であることを確認した。なお、開発したコンクリート二次製品は、セメント使用量が従来品に比べ大幅に少ないため、材料コストの低減、 CO_2 排出量の低減に寄与するものと考えられる。

今後は、実用化可能となった製品の試験施工を実施するとともに、その他の無筋製品についても試作を行い、適用範囲の拡大を図る予定である。

参考文献

- 1) 堀口至，市坪誠，田中雅章：P F B C 灰を結合材として用いた硬化体の圧縮強度および耐硫酸性，セメント・コンクリート論文集，No.61，2007，pp.572-578.
- 2) 堀口至，市坪誠，田中雅章，福本直：耐硫酸性を有するP F B C 灰硬化体の圧縮強度，セメント工学年次論文集，vol.30，No.2，2008，pp.529-534.
- 3) 福本直，岩田数典，堀口至，PaweenaJariyathitipong：加圧流動床灰を主結合材としたコンクリートの蒸気養生時における強度発現性，土木学会第63回年次学術講演会概要集，2008，pp.797-798.