

論文 生コン工場で製造したハイボリュームフライアッシュ コンクリートの諸性質

平岡伸哉*1・河野清*2・石丸啓輔*3・川田修*4

要旨: 近年, フライアッシュを多量に用いたハイボリュームフライアッシュコンクリートの研究が注目されているが, 実構造物への施工事例は報告されていない。そこで実際に生コン工場でハイボリュームフライアッシュコンクリートを製造し, 現場施工することとした。本研究はコンクリートの品質変動状態および諸性質について, 出荷実績のある同じ呼び強度の普通コンクリートと比較して実施工への適用性を検討した。その結果, 普通コンクリートに比べて諸性質は優れているが, 品質変動は大きくなり, 生コン工場では厳密な管理が必要であること。また, 施工面では仕上げ作業に影響が出ることが明らかになった。

キーワード: 生コンクリート, ハイボリュームフライアッシュコンクリート, 品質管理

1. はじめに

数年前から, 省資源・省エネルギーの立場より, Malhotra^{1), 2)}が中心となり, ハイボリュームフライアッシュコンクリート (以下 HVFC と略記) の研究が始まり, 注目されるようになってきた。HVFC は長期強度, 耐久性, 水密性などが改善され, 温度上昇が低減できることが報告されている^{1), 3), 4)}が, まだ我が国では実際の構造物への適用例がないので, 比較的マシブな構造物を対象に今後使用を検討しなければならない。

また, 徳島県阿南市の橘湾では, 電源開発(株)と四国電力(株)とによる出力 280 万 kw の石炭火力発電所が建設中であり, 多量の石炭灰が発生することになり, フライアッシュの有効利用は, きわめて緊急で重要な課題となっている。

そこで, 阿南市福井町の四国電力(株)阿南変換所において無筋コンクリート擁壁工事が行われる機会に生コン工場で HVFC を製造し, 現場施工することとした。本研究は, 現場におけるコンクリートのスランプ, 空気量, 圧縮強度などの品質変動状態および生コンプラントで実際に製造した HVFC の諸性質について, 出荷実績のある同じ

呼び強度の普通コンクリート(以下 PL と略記)と比較して調査を行い, HVFC の実用化を検討した。

2. 試験の概要

2.1 使用材料

(1) セメント

セメントは普通ポルトランドセメント (比重 3.15, 28 日圧縮強度 40.3N/mm²) を使用した。

(2) 混和材

フライアッシュは比重 2.27, プレーン比表面積 3310cm²/g, 強熱減量 1.4%, SiO₂ 56.2% のものを使用した。

(3) 骨材

粗骨材は阿南市下大野町産玉砕石 (最大寸法 25mm, 比重 2.63, 吸水率 0.99%) を使用した。

細骨材は HVFC については阿南市下大野町産川砂 (比重 2.62, 吸水率 1.23%, F.M. 3.29) を用い, PL については上記の川砂と阿南市下大野町産海砂 (比重 2.57, 吸水率 1.92%, F.M. 1.83) を 7:3 の割合で混合したものを使用した。ここで海砂は粒度調整用として使用し, HVFC につい

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 徳島大学技官 工学部建設工学科

*4 徳島県生コンクリート工業組合

てはフライアッシュを細骨材の微粒分として考えたため川砂のみを使用した。

(4) 混和剤

混和剤として、芳香族スルホン酸系の高性能 AE 減水剤、リグニンスルホン酸系の AE 減水剤および AE 剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合

現場に使用する HVFC は呼び強度 18N/mm^2 とし、呼び強度を保証する材齢を 28 日とした。打込み時の施工性を考慮し目標スランプは $20 \pm 2.5\text{cm}$ とし、フライアッシュの多量使用により空気量の制御が難しいことを考慮して目標空気量は $4.0 \pm 1.0\%$ とした。また、単位セメント量に対しフライアッシュ混入量を 1.1, 1.3, 1.5, 1.7 倍（質量比）と変化させたとき、1.3 倍の時に圧縮強度が最大となるとの研究結果³⁾からフライアッシュ使用量は単位セメント量の 1.3 倍となる 234kg/m^3 とした。なお、PL については、呼び強度 18N/mm^2 とし、生コン工場の出荷実績から目標スランプ $15 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5 \pm 1.0\%$ とした。使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。

2.3 コンクリートの製造

コンクリートの練混ぜは重力式の傾胴 2 軸ミキサ（容量 1.5m^3 ）を用いて行った。使用材料はコンピュータによる自動計量を行い、25 秒間でミキサに投入し、HVFC は 3 分間練混ぜを行った。運搬車への積み込みに 20 数秒を要するので、1 サイクルは 4 分近くとなる。PL については練混ぜ時間を 1 分としたので、1 サイクル 90 秒である。

2.4 コンクリートの運搬

生コンプラントから施工現場までトラックアジ

テータ車によって運搬したが現場まで約 23km あり、運搬時間は約 60 分を要した。現場到着後、高速攪拌を行った後コンクリートを排出し、試験用の試料を採取し現場擁壁への打込みを行った。

2.5 施工条件

コンクリートの打込みは平成 8 年 10 月 28 日から 12 月 20 日の約 2 ヶ月にわたり行った。無筋コンクリート擁壁の部材寸法は幅 30m、高さ 3.5m、体積が約 81m^3 のもので打込み回数を 8 回に分けて、1 回の打込み量は約 $6 \sim 16\text{m}^3$ とした。

2.6 試験用試料の採取

生コンプラントでアジテータ車に積み込み後、試料を採取してスランプと空気量を 20 回にわたり測定し、硬化コンクリートの諸性質を調べる供試体は工場で採取した。現場の荷卸時点では、スランプ、空気量および塩化物イオン含有量ならびに 28 日圧縮強度試験用供試体の試料を 20 回にわたり採取して試験を行い、PL の場合と比較した。

2.7 コンクリートの試験

(1) フレッシュコンクリートについて

スランプ試験 (JIS A 1101)、空気量試験 (JIS A 1128)、ブリーディング試験 (JIS A 1123)、塩化物イオン含有量試験 (JSCE-C 503)、凝結時間試験 (ASTM C 403) を行い、スランプの経時変化（プラント～現場）も測定した。

(2) 硬化コンクリートについて

(a) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準じ、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いて材齢 7 日、28 日、91 日、6 ヶ月および 1 年について行った。

(b) 引張強度試験

JIS A 1113 に準じ、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体を

表-1 コンクリートの配合

種別	W/(C+F) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)							
			W	C	FA	S	G	高性能 AE 減水剤	AE 減水剤	AE 剤
HVFC	33.8	40.0	140	180	234	694	1041	5.80	—	0.075
PL	61.5	46.3	164	267	0	853	997	—	0.686	—

用いて材齢 28 日, 91 日および 6 ヶ月について行った。

(c) 曲げ強度試験

JIS A 1106 に準じ, $\square 10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ のはり供試体を用いて材齢 28 日, 91 日および 6 ヶ月について行った。

(d) 乾燥収縮試験

JIS A 1129 に準じ, $\square 10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ のはり供試体を用いて材齢 7 日から乾燥養生を行ったものについて長さ変化率を測定した。

(e) 耐摩耗性試験

材齢 28 日および 91 日まで標準養生を行った $\phi 15 \times 5 \text{ cm}$ の円盤供試体を用いた。試験は ASTM C 779 の B 法に準じ, 供試体に 85N の圧力を加えながら歯車状鋼製円盤を回転させ, 0~10000 回転時まで 2000 回転毎に供試体質量を測定し, すりへり深さを求めた。

(f) 透水試験

材齢 21 日まで標準養生を行った後, 7 日間乾燥養生した $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ の中空円柱供試体を用いた。試験は DIN 1048 のインプット法に準じ, 供試体に水压を加えてその浸透深さを測定し, 水密性の尺度となる拡散係数を求めた。

(g) 凍結融解試験

材齢 28 日まで標準養生を行った $\square 10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ のはり供試体を用いた。試験は JSCE-1986 に準じ, 水中急速凍結融解試験法とし, 1 サイクル ($5^\circ \text{C} \sim -18^\circ \text{C}$) の所要時間は 4 時間を標準とし, 1 日 6 サイクルで 300 サイクルまで相対動ヤング係数の測定を行った。

(h) 断熱温度上昇試験

$\square 30 \times 30 \times 30 \text{ cm}$ の立方体の容器にコンクリートを詰めて, 空気循環式断熱温度上昇試験装置によって, 断熱状態における温度上昇量を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 生コンプラントおよび荷卸時点におけるコンクリートの品質とその変動

HVFC のスランプおよび空気量の試験結果を, PL の品質変動状態とともに図-1~図-4 に示す。

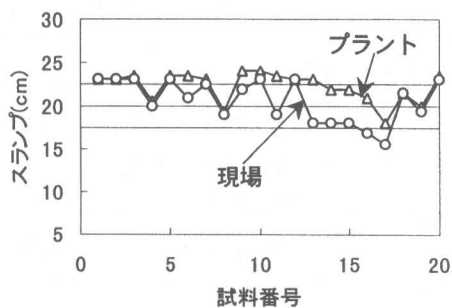


図-1 HVFC のスランプの変動状態

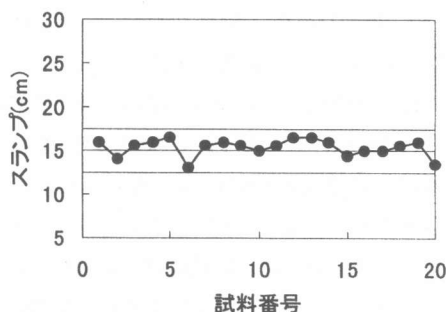


図-2 PL のスランプの変動状態

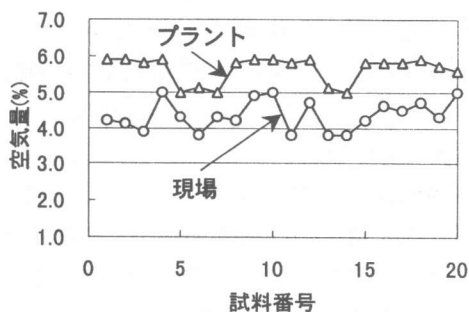


図-3 HVFC の空気量の変動状態

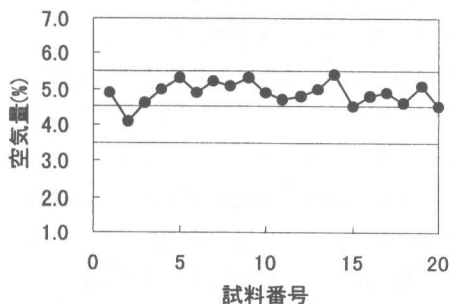


図-4 PL の空気量の変動状態

また, 図-1 および図-3 においては HVFC のスランプおよび空気量の経時変化としてプラントと現場における値を示す。ただし図中の横線は目標値 (中心線) および許容誤差 (上下の線) を表

す。これらの図より HVFC は PL に比べて、ばらつきが大きくなっている。これは、HVFC の混和剤使用量が多く、コンクリート温度が微妙に影響したためと考えられる。すなわち現場におけるコンクリートの温度変化の範囲が PL は 7℃であったのに対し HVFC は 13℃となっており、これがスランプおよび空気量のばらつきに影響したと思われる。また、スランプの経時変化は平均で約 1.5cm の低下であった。空気量については約 1.3%の低下であり、フライアッシュの混和剤吸着能力が高いことが原因と考えられる。

次に、HVFC および PL の圧縮強度の変動状態をそれぞれ図-5 と図-6 に示す。ただし図中の横線は平均値（中心線）、 3σ 限界（点線）および 2σ 限界（実線）を表す。これらの図より PL に比べて HVFC は変動係数が 7.0%と大きくなっており、スランプや空気量の変動の影響によるものと思われるが、生コン工場の過去の管理実績からすれば問題ない範囲であるといえる。

3.2 生コンプラントで製造した HVFC の特性

(1) フレッシュコンクリートについて

(a)ブリーディング

環境温度 19℃におけるブリーディング試験結果を示した図-7 にみられるように HVFC はブリーディングを生じない。そのため現場においては、コンクリートの打込み後、表面が乾燥しないうちに表面仕上げを行う必要がある。

(b)コンクリートの凝結時間

環境温度 20℃における凝結時間試験結果を示した図-8 にみられるように HVFC は凝結時間が著しく長くなる。これはフライアッシュの多量使用、あるいは高性能 AE 減水剤の添加量が多いためと思われる。このため、現場においては即日脱型が困難なため、型枠養生期間を長めにとる必要がある。

(c)塩化物イオン含有量試験

塩化物イオンがコンクリート中にある限度以上存在すればコンクリート中の鋼材の腐食の原因となるが、無筋コンクリートであっても塩化物イオン量が多くなると、長期材齢における強度の伸び

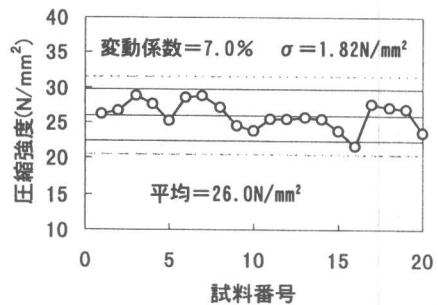


図-5 HVFC の圧縮強度の変動状態

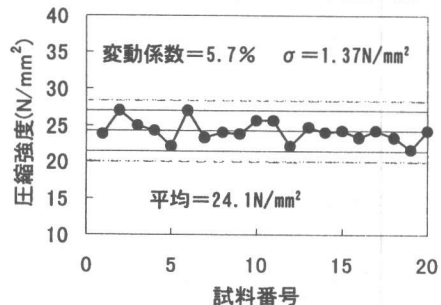


図-6 PL の圧縮強度の変動状態

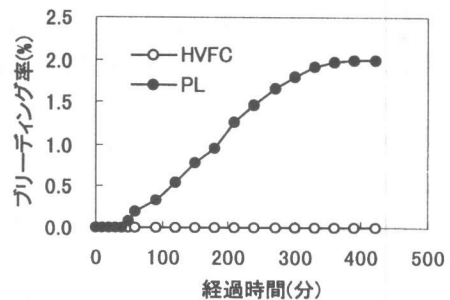


図-7 ブリーディング試験結果

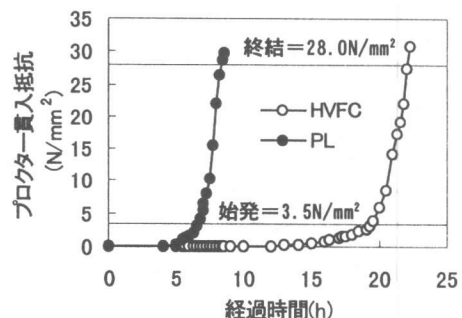


図-8 凝結時間試験結果

が小さくなることが指摘されている。HVFC の塩化物イオン含有量は平均で 0.020kg/m^3 、PL については 0.023kg/m^3 となっており、 0.3kg/m^3 を

大幅に下回り問題はない。

(2) 硬化コンクリートについて

(a) 強度特性

表-2 に示すように HVFC の圧縮強度は初期材齢では低いが、91 日以降の長期材齢においては高くなっており、長期にわたりポゾラン反応が進行したものと考えられる。また、引張強度および曲げ強度についても同様の結果が得られた。

表-2 HVFC と PL の強度の比較

種別	HVFC				
材齢	7 日	28 日	91 日	6ヶ月	1 年
圧縮強度	13.7	25.6	32.4	35.6	39.6
引張強度	—	2.2	3.8	4.5	—
曲げ強度	—	4.1	5.6	6.0	—
種別	PL				
材齢	7 日	28 日	91 日	6ヶ月	1 年
圧縮強度	17.4	23.5	28.5	29.6	30.3
引張強度	—	1.8	3.2	3.5	—
曲げ強度	—	4.1	4.5	5.0	—

(単位は N/mm^2)

(b) 乾燥による長さ変化率

乾燥による長さ変化率を測定した結果を示した図-9 にみられるように HVFC の方が明らかに小さい。これは、フライアッシュの乾燥収縮低減効果⁵⁾ の上に、単位水量が 140kg/m^3 と少ないことも影響していると考えられる。

(c) すりへり抵抗性

耐摩耗性試験結果としてすりへり深さを示した図-10 にみられるように HVFC は PL に比べて明らかにすりへり深さが減少している。材齢 28 日ではフライアッシュの微粉末効果によるものと考えられるが、材齢 91 日では HVFC のすりへり深さは約半分になっておりフライアッシュのポゾラン反応の進行によるものと考えられる。

(d) 水密性

透水試験結果として拡散係数を示した図-11 にみられるように HVFC は PL に比べて拡散係数が小さくなり、水密性が改善されることを示し

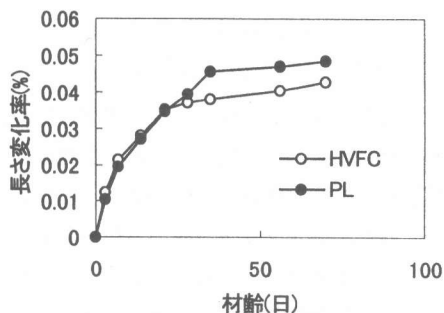


図-9 乾燥による長さ変化率の比較

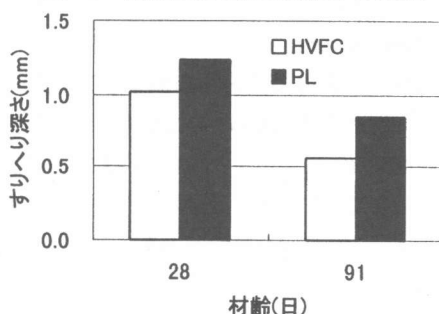


図-10 耐摩耗性試験結果

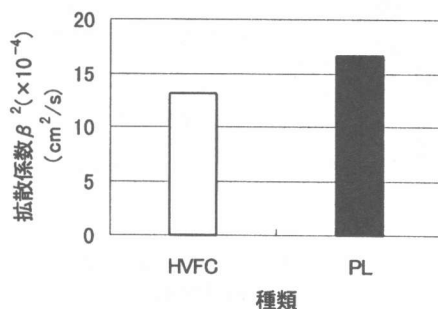


図-11 透水試験結果

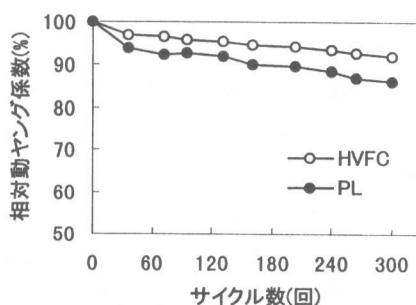


図-12 耐凍害性試験結果

ている。これはフライアッシュの多量使用により粉体量が多いため緻密な内部組織が形成されたためと考えられる。

(e)耐凍害性

凍結融解の繰返し試験を行った結果を示した図-12 にみられるように HVFC の方が PL に比べて相対動ヤング係数が高くなり、耐凍害性が優れているといえる。これは PL の水結合材比が 61.5% であるのに対し、HVFC は 33.8% と約 0.5 倍となっており、コンクリート中の凍結する水の量が少なかったためと考えられる。あるいは、フライアッシュの使用により、細孔構造が緻密化して耐凍害性の向上に役立っていることが考えられる。

(f)断熱温度上昇

経過時間と上昇温度との関係を示した図-13 にみられるように HVFC の方が明らかに温度上昇量が低くなっている。これは HVFC の単位セメント量が PL に比べて小さいこと、あるいは、フライアッシュの水和熱抑制効果によるものと思われる。

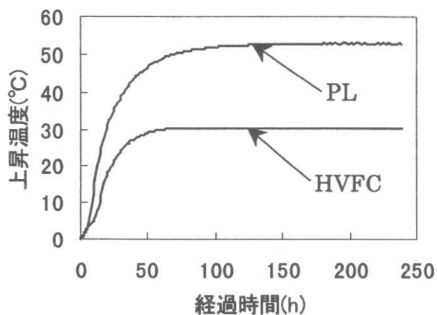


図-13 断熱温度上昇の試験結果

4. まとめ

本試験で得られた結果を要約すると、ハイボリュームフライアッシュコンクリートについて次のことがいえる。

1) 荷卸時点におけるスランプや空気量の変動は、普通コンクリートに比べて大きくなり、より厳密な使用材料や配合の管理が必要となる。また、圧縮強度の日間変動は 7.0% となり、普通コンクリートの 5.7% より大きくなるが、生コン工場の過去の管理実績からは問題ないと考えられる。

2) フライアッシュの多量使用によりコンクリートの粘性が高いため、あるいはブリーディングが

生じないために、表面仕上げはコンクリートの打込み後、表面が乾燥しないうちに行う必要がある。また、凝結時間が遅いため型枠養生期間を長めにする必要がある。これには促進系の混和剤の使用により適当な凝結時間を確保して作業性を改善することが考えられる。

3) 材齢 91 日以降の強度発現は顕著であり、耐久性についても優れている。さらに断熱温度上昇量を大幅に低減できることが確認できた。

以上のことよりハイボリュームフライアッシュコンクリートを一般のコンクリート構造物に利用するためには型枠の脱型などの作業性を支配する初期強度の改善および施工時の表面仕上げに対して対応を検討しておく必要がある。また、ハイボリュームフライアッシュコンクリートは長期にわたり強度、耐久性が要求され、かつ温度応力が問題となるダムのようなマッシブな構造物へ適用するのが有利といえる。

参考文献

- 1) Malhotra, V.M. : CANMET Investigations dealing with High-Volume Fly Ash Concret, pp.433-470, Sept.1992
- 2) Malhotra, V.M. : Investigation of High-Volume Fly Ash Concret Systems, EPRI TR-10315 Project 3176-66 Final Report, Oct.1993
- 3) 河野清, 川口修宏, 三田正和, 馬越唯好 : ハイボリュームフライアッシュコンクリートの特性, セメント・コンクリート論文集, No.593, pp.10-17, 1996.7
- 4) 川口修宏, 河野清, 森内誠司 : フライアッシュを多量に使用したコンクリートの基礎研究, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.120-125, 1995.12
- 5) 小野田セメント(株)中央研究所 : フライアッシュセメントに関する文献集, コンクリート技術情報, No.18, pp.49-50, 1965.9