

報告

[1003] ハイパフォーマンスコンクリートの実構造物における
製造と品質管理

正会員○濱園喜代一 (麻生セメント中央研究所)

生野千力 (麻生セメント中央研究所)

正会員 大矢一夫 (西松建設技術研究所)

正会員 西山直洋 (西松建設技術研究所)

1. まえがき

東京大学・岡村研究室により提唱されたハイパフォーマンスコンクリート (以下HPCと言う) は、高い流動性と材料不分離性を有するため、施工に際しては、締固めは不用となり省力化がはかられ、かつコンクリートは緻密になり高耐久性であるといわれている[1]。

この概念を基に、現在、様々な分野で、いわゆる超高流動化コンクリートの研究開発が試みられ、実施例もかなり知見されてきた[2][3]。しかしながら、現状でも、粉体最適粒度構成、混和剤との適応性、フレッシュ時の定量的品質評価方法等、解決されるべき点も多く残されている。

筆者らは、平成3年7月、普通セメント、高炉スラグ粉末およびフライアッシュを用いた三成分系のHPCを、生コンクリート工場で製造し、実構造物 (RC造平屋、床面積57m²) に適用して施工を実施した。

本報告は、実機によるHPCの製造状況と、フレッシュ時ならびに硬化後の諸物性についてまとめたものである。

2. HPCの製造

2.1 製造と運搬の概要

HPCの総製造量は40m³、1バッチの混練量は2m³、アジテータ車1台当たりの運搬量は混練2回分に相当する4m³とし (1号車と11号車は2m³)、計20バッチ、1号車から11号車まで延11台のアジテータ車で運搬した。

製造に用いたミキサーの概要を表-1に示す。また、HPC混練時のミキサーの油圧モーターにかかる負荷値、各材料の投入順序および混練時間を、普通コンクリートと比較して図-1に示す。各材料の投入順序は、普通コンクリートのように、全材料をほとんど同時に投入すると過負荷がかかりミキサーが停止したため、粗骨材は20秒後からの投入とした。HPC (2m³)混練時の負荷値は普通コンクリート (3m³)

表-1 ミキサー概要

方式	2軸強制練りミキサー3m ³
特徴	油圧駆動・可変速 (定出力)

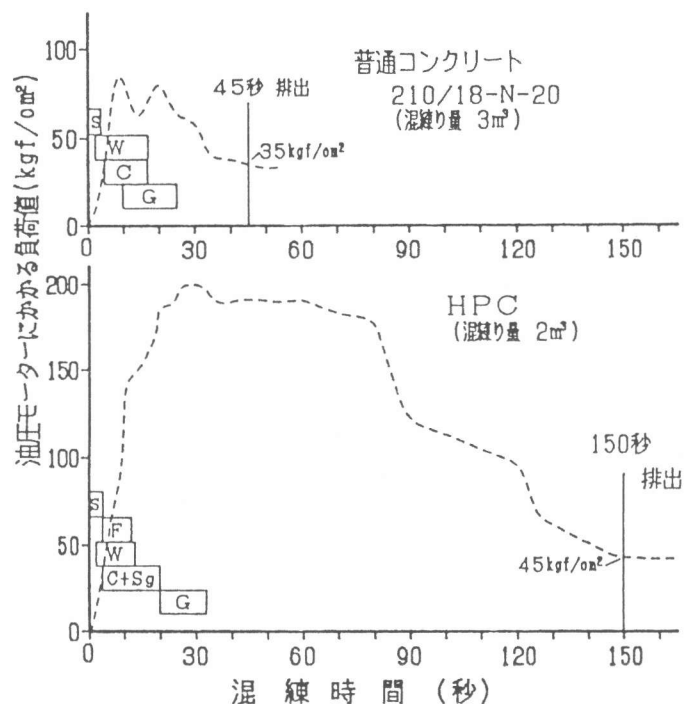


図-1 油圧モーター負荷値の変化

に比べてはるかに大きく、一定に落ち着いた後も大きい。また、負荷値が一定に落ち着くまでの時間（混練時間）は、約 3 倍であった。これらは、HPC の材料の分散に大きなエネルギーが必要であり、また練り上がった HPC が高粘性であることを示している。

砂の表面水量の変動は、HPC の流動性および材料分離に大きな影響を及ぼすため、使用直前に貯蔵ビンに投入するなどの処置を行った。その結果、表面水量はほとんど変動しなかった。

施工現場は生コンクリート工場と同一敷地内であったが、運搬時間を 30 分と仮定し、30 分のアジテートの後、ポンプ車への排出を行った。

2.2 配合および使用材料

本施工で用いた HPC の配合は全バッチ、全アジテータ車を通じて同一であり、混和剤量だけをアジテータ車単位で変化させて ($4.29 \sim 4.56 \text{ kg/m}^3$)、品質管理の試験項目であるスランプロー（以下 SF とする）値と空気量を管理した。管理目標は、東京大学・岡村研究室の既往の試験結果と事前の試験練り結果より、SF 値 $55 \pm 5 \text{ cm}$ 、空気量 $2.0 \pm 1.0 \%$ とした。配合と使用材料の諸性質を表-2、表-3 に示す。

表-2 配 合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水結合材 比 (%)	細骨材 率 (%)	単 位 量 (kg/m^3)						
			水	結合材			細骨材	粗骨材	混和剤
				セメント	スラグ	フライアッシュ			
20	29.9	51.0	160	156	177	203	816	810	4.29

本施工における使用材料の特徴は、HPC をより一般化するために、高炉セメント用として常時準備されている高炉スラグ粉末と、市販のフライアッシュを使用した点である。

また、高性能 AE 減水剤は、事前のポリカルボン酸系とナフタリン系の比較試験の結果より、前者を採用した。前者は後者に比べ、SF 値の経時に伴う減少が大きく、また同一 SF 値とした場合、粘性が小さいため材料分離抵抗性は小さいと推察されたが、凝結時間が短く、また初期強度が材令 3 日で後者を用いた場合の約 2 倍であったため、工期短縮を優先させた決定であった。増粘剤は、今回は使用しなかった。

表-3 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (比重 3.16 比表面積 $3,320 \text{ cm}^2/\text{g}$)
高炉スラグ	(比重 2.89 比表面積 $4,040 \text{ cm}^2/\text{g}$)
フライアッシュ	(比重 2.30 比表面積 $4,500 \text{ cm}^2/\text{g}$)
細骨材	海砂 (比重 2.58 FM 2.63)
粗骨材	砕石 2005、角閃岩 (比重 2.66 FM 6.66)
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)

3. コンクリートの品質管理

3.1 試料の採取

各試験の試料の採取は、アジテータ車単位で行い、また試験によっては同一アジテータ車の出荷（練り上がり直後）、荷渡し（30 分のアジテート後）及び筒先（圧送直後）の 3 箇所で行った。

3.2 フレッシュコンクリートの流動性、施工性、分離抵抗性の管理

試験項目は SF 値（水中不分離性コンクリート・モジュール）、空気量（JIS A 1128）、コンクリート温度（アルコール温度計）である。

(アジテートによる経時変化)

アジテートによる物性の経時変化を図-2に示す。SF値は漸減し、空気量は漸増した。しかし、その変化は、JISで定められたレデーミクストコンクリートの運搬時間内では問題ないと考えられる。

(アジテータ車間の物性のばらつき)

荷渡し時のHPCの諸性質をアジテータ車別に図-3に示す。SF値および空気量ともに若干の変動は見られるが、目標値をほぼ満足した。

(試料採取場所による物性の変化)

図-4に見られるようにSF値は次第に減少した。特に、ポンプ圧送後の筒先では出荷から約10cmの減少が見られた。空気量は、逆に増加した。経時変化と同様の傾向であった。

(断熱温度上昇)

$$T = K(1 - \exp(-\alpha t)) \quad (1)$$

式(1)に回帰した場合、断熱温度上昇の終局値 $K=36.0$ 、温度上昇速度に関する実験定数 $\alpha=1.54$ である。3.3の圧縮強度の試験結果と考え合わせて、強度当たりの発熱量について言えば、非常に低発熱であり、今後の利用分野の拡大(高強度を必要とするマスコンクリートへの適用など)が期待される。

3.3 硬化後の物性の調査

試験項目は圧縮強度試験(JIS A 1107, 1108)、乾燥収縮試験(JIS A 1129)、促進中性化試験、透水試験(インフュージョン法)および凍結融解抵抗性試験(土木学会案)である。

(圧縮強度と静弾性係数)

強度試験結果

表-4 強度試験結果

果を表-4に、強度発現曲線を図-5に示す。初期材令から非常に高

材令	3日	7日	28日	91日
標準養生	259(232-281)	382(341-415)	546(526-562)	650(616-699)
現場水中養生	288(278-313)	447(439-456)	567(532-592)	629(596-690)
気中養生	325	450	579	-

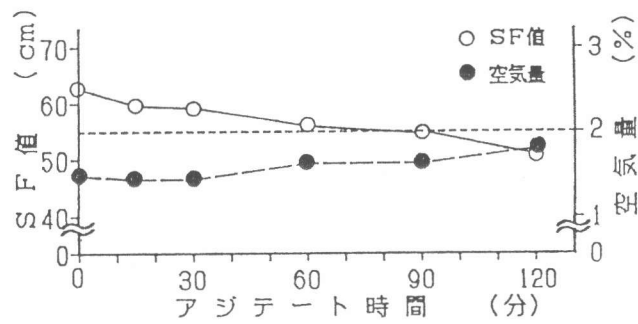


図-2 物性の経時変化

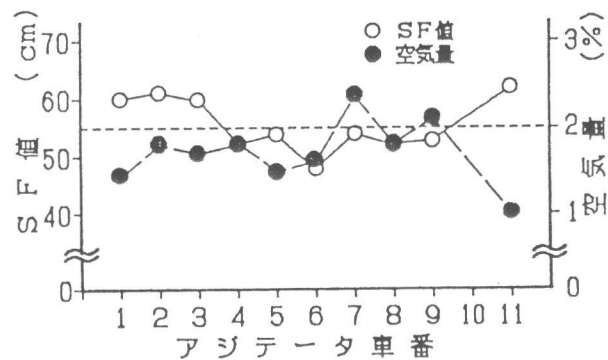


図-3 各アジテータ車の物性

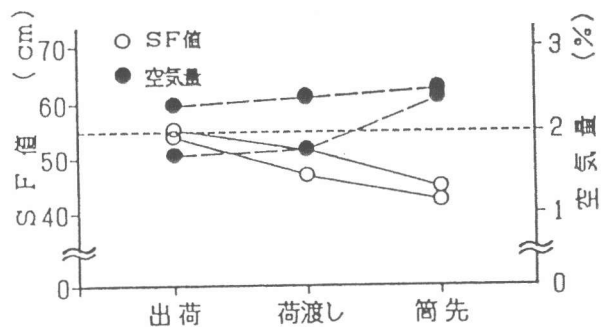


図-4 採取場所による変化

い強度を示し、その結果、材令 3日
 で実構造物のすべての型枠が解体で
 きた。これは、前述したようにポリ
 カルボン酸系の高性能 A E 減水剤の
 使用が最も大きな原因であると考え
 られる。圧縮強度の標準偏差は、材
 令 3日で標準養生 $\sigma=16.6\text{kgf/cm}^2$ 、
 現場水中養生 $\sigma=12.2\text{kgf/cm}^2$ 、材令
 28日で標準養生 $\sigma=10.9\text{kgf/cm}^2$ 、現
 場水中養生 $\sigma=21.9\text{kgf/cm}^2$ であった。
 また、出荷、荷渡しおよび筒先の材
 令28日強度は、それぞれ544、553、
 538 kgf/cm^2 (5,7号車) であり、試料採取場所による強度差は認められなかった。

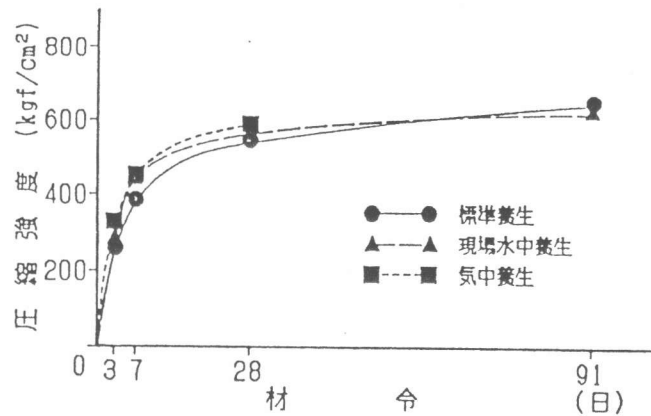


図-5 強度発現曲線

実構造物から切取ったコアの圧縮強度は、材令180日で779 kgf/cm^2 ($\sigma=29.3\text{kgf/cm}^2$)、静弾性係数は $4.35 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ であり、実構造物においても、打設時に採取した供試体と同等の強度が十分に発現していることが確認された。切り取りコアの圧縮強度の平方根と静弾性係数の関係を図-6に示す。一般に用いられている式(2)によく合い、切り取り位置による圧縮強度および静弾性係数の大きなばらつきは認められないことが確認できる。

$$E = 4300 \times \gamma^{1.5} \times \sigma^{0.5} \quad (2)$$

E : 静弾性係数 (kgf/cm²)
 γ : 気乾単位容積重量 (t/m³)
 σ : 圧縮強度 (kgf/cm²)

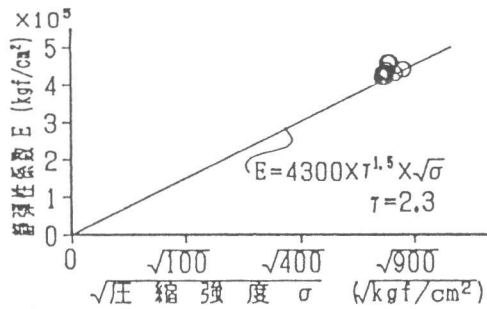


図-6 圧縮強度と静弾性係数

強度試験後、供試体の破壊面を観察したところ、材令91日以後は全供試体に骨材破壊が多く見られ、骨材の選択によっては、より高強度が期待できると考えられる。

なお、同時に切り取りコアの粗骨材率を測定したが、切り取り位置による差は見られず、型枠中での粗骨材の分離は確認されなかった。

(乾燥収縮)

長さ変化試験結果を図-7に示す。材令91日までの長さ変化量は、一般のコンクリート(収縮ひずみ $4 \sim 9 \times 10^{-4}$)の1/2~1/3であった。

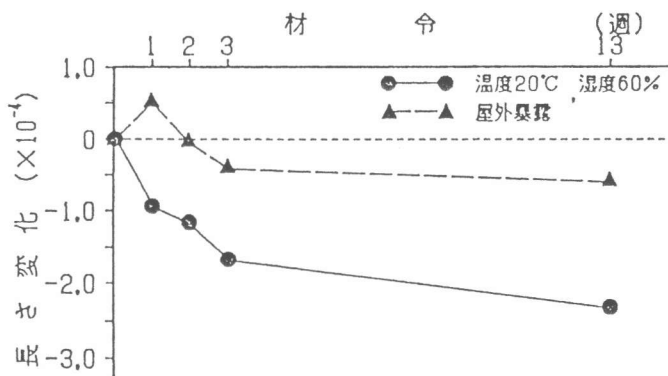


図-7 長さ変化

(促進中性化)

打設時採取供試体(標準養生・材令91日)と切取りコア(材令91日)を用い、CO₂濃度10%、室温30℃、湿度60%の試験条件の下、促進中性化試験を実施した。試験期間3週までの結果を、図-8に示す。中性化速度はセメントの種類、水セメント比および養生条件に関わらず、それらの影響を全て包含した結果と考えられる圧縮強度を指標とするという報告[4]があるため、比較用供試体として同等強度(標準養生・材令28日)の高強度コンクリート供試体(表-5)を採用した。少ないセメント量と、高炉スラグおよびフライアッシュの多量混入による水酸化カルシウムの消費により、中性化の速い進行が懸念されたが、中性化深さは普通セメントを3倍以上用いた比較供試体よりかなり低い値を示している。

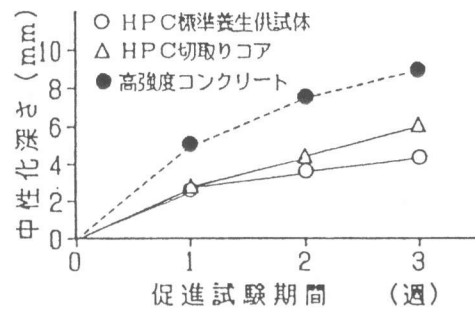


図-8 促進中性化試験結果

表-5 中性化試験における比較供試体(高強度コンクリート)

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				圧縮強度 (kgf/cm ²)		
			水	セメント	細骨材	粗骨材	3日	7日	28日
20	30.0	45.0	165	550	739	931	546	653	751

(透水性)

材令14日の標準養生供試体を用いて、インプット方法(水圧20kgf/cm²、240時間)で求めた水の拡散係数は、 9.22×10^{-4} (cm²/sec)であった。この値は、比較的水密なAEコンクリートと同等の値である。適当な空気量を有するAEコンクリートを用いた方が、水密的なコンクリートを造るには有利であると言われている理由として、ブリージングによって生じた毛細管を通して浸透する水をエントレインドエアが抑えることなどが挙げられる[5]。しかし、今回のHPCはブリージングがなく、それによって生じる毛細管も存在しないため、エントレインドエアは少ないが水密的であったと考えられる。また同時に、フライアッシュを用いたコンクリートは、用いない場合に比べて、材令に伴う水密性の増加は著しく大きいとも言われており[5]、水密性は今後十分に増進すると考えられる。

(凍結融解抵抗性)

相対動弾性係数の凍結融解サイクル数との関係を図-9に示す。予測された通り相対動弾性係数の低下は速い。ばらつきはあるが、速いものは86サイクル経過後、遅いもので168サイクル経過後で相対動弾性係数が60%以下に低下した。これは、今回のHPCは、空気量を2%としたことと、存在する空気がエントラップトエア主体のためだと考えられる。フライアッシュを混和したコンクリートでは、AE剤により導入された気泡の分散性が低く、耐凍害につい

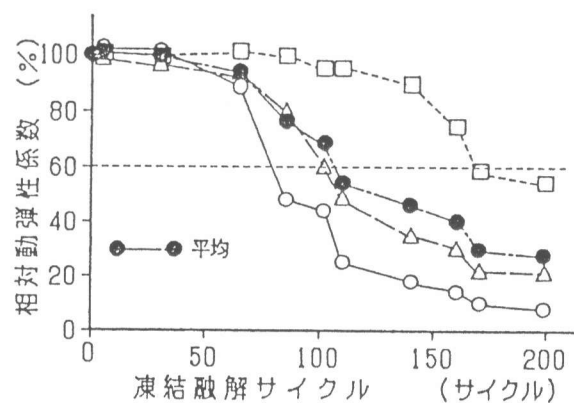


図-9 凍結融解試験結果

ては有効に作用しにくいという報告[6]もあり、適当な空気量と混和剤の種類および使用量については、今後の検討および対策が必要である。

4. まとめ

今回のHPCについて、実機による製造を通じ、以下のことが確認された。

- (1)普通コンクリートの製造と比較して、材料の分散に要するエネルギーが大きくミキサーの油圧モーターにかかる負荷値が大きいため、混練り量を減少しても粗骨材の投入をかなり遅らす必要があり、負荷値が一定に落ち着くまでの時間（混練時間）も大きい。また、高粘性であるため、一定に落ち着いた時の負荷値も大きい。
- (2)骨材の含水量を事前管理すれば、流動性の一指標であるSF値は、混和剤量だけの調整により容易に管理できた。なお、ロット間の物性差は、試験結果からは認められなかった。
- (3)SF値の経時に伴う減少は、JISのレデーミクストコンクリートで定められた運搬時間内では問題ない。
- (4)強度は、初期から非常に高く、全材令にわたり高強度コンクリートの範囲に入るコンクリートである。その反面、水和発熱量は低いため、今後の利用分野の拡大が期待される。
- (5)中性化速度は、普通セメントを3倍以上用いた同等強度の高強度コンクリートよりもかなり遅いことから、非常に緻密な構造が推察される。
- (6)中性化速度が遅いことと透水性は低いことは、ブリージングの生じないコンクリートであるためそれによって生じる毛細管量が非常に少ないことも原因の一つと考えられる。
- (7)凍結融解抵抗性は、今回の施工現場は九州ということもあり大きな問題とはならないが、寒冷地域においては、フライアッシュを多量に使用する場合、最適空気量の検討は大きな課題と言える。混和剤の種類および使用量について、今後の対策および検討が必要である。

[謝辞]

本施工および実験にあたり、東京大学 国島教授ならびに小沢講師より貴重なご意見、ご指導を賜りました。また、サンフロー(株) 葉賀氏ならびに山陽国策パルプ(株) 森部氏には多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡村、國島、前川、小沢：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11-1、pp.699-704、1989
- 2) 坂本、松岡、新藤、Tangtermsirikul：超高流動コンクリートの実構造物への適用に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集13-1、pp.881-886、1991
- 3) 三浦、牧野、小野、小沢：二成分系のハイパフォーマンスコンクリートの実物大模型による施工性の検討、コンクリート工学年次論文報告集13-1、pp.869-874、1991
- 4) 和泉、嵩、押田、西原：コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類、調合および養生条件について、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.117-120、1985
- 5) 村田二郎：コンクリートの水密性の研究、コンクリート・ライブラリー第7号
- 6) 長瀧、大賀、嶋田：フライアッシュを混入したコンクリートの対凍害性評価、セメント技術年報41；pp.128-131 1988