

論 文

[1118] ハイパフォーマンスコンクリートの開発

正会員 ○小沢 一雅 (東京大学 工学部)

正会員 前川 宏一 (東京大学 工学部)

正会員 岡村 甫 (東京大学 工学部)

1. はじめに

コンクリート構造物の信頼性を取り戻すためには、高い性能を有するコンクリート材料の開発を行うことが非常に有効である [1, 2]。すなわち、現場における施工の程度や部材形状、鉄筋のあき等の設計詳細のよしあしの影響を受けない「締め固め不要」のコンクリートを開発し、これを使用すればコンクリート構造物の信頼性はおのずと高まるものと期待される。

我々は、このコンクリートを「ハイパフォーマンスコンクリート」と名付け、その開発のための基礎的研究を行ってきた。その結果、既往の材料を組み合わせることにより、ある程度満足のいくハイパフォーマンスコンクリートのモデルを開発することに成功した [3]。本研究は、このハイパフォーマンスコンクリートモデルの特性について様々な角度から検討を試みようとするものである。

2. ハイパフォーマンスコンクリートの定義

ハイパフォーマンスコンクリートは、次の3つの状態において定義される。すなわち、フレッシュの状態においては、変形性に優れるばかりでなく材料分離抵抗性にも富み、バイブレータを使用しなくても型枠内を充填することができる、いわゆる「締め固め不要」コンクリートである。さらに、打設直後においては、硬化収縮や水和による発熱が小さく、また乾燥収縮も小さく抑えられており、優れたひびわれ抵抗性を持つ初期欠陥を生じにくいコンクリートである。そして、硬化後には、炭酸ガスや塩素イオン等の外界から飛来するコンクリート構造物の耐久性を阻害する要因に対して充分な抵抗を有する緻密な微細構造を持ったコンクリートである。これらの特性をすべて持つコンクリートを「ハイパフォーマンスコンクリート」と呼ぶのである。

3. ハイパフォーマンスコンクリートモデル

我々は、この「ハイパフォーマンスコンクリート」と呼ぶに値するコンクリートを現在市販されている材料を駆使して作成することに成功した。このハイパフォーマンスコンクリートモデルの概要を以下に示す。

3. 1 充填性

このモデルが、試作した型枠内を充填する様子を写真-1に示す。型枠の形状および寸法は、図-1に示すようであり、この断面が鉄筋が密に配置され、また閉じた断面であるためコンクリートを非常に打ち込みにくい状況を再現していることがわかる。なお、鉄筋のあきは粗骨材最大寸法の約1.7倍である。この断面に、約5リットルの容器を用いてただ流し込んだだけで、バイブルータを使用せずとも型枠の隅まで充填されるのである。したがって、このモデルは、締め固めを行わなくても型枠の隅まで流動できる高い変形性と、狭い鉄筋間で流動閉塞を起こすこと

のない充分な材料分離抵抗性を兼ね備えていると考えられる。もちろん、ブリージングは全く見られない。

3.2 その他の特性

その他の特性についても良好な結果が得られている。図-2は、J I S A 1 1 2 9の方法を用いて収縮にともなう供試体の長さ変化をダイヤルゲージにより測定した結果である。ハイパフォーマンスコンクリートモデルは、同じ単位水量を持つ従来のA Eコンクリート（配合を表-1に示す）に比べても優れていることがわかる。また、図-3は硬化後のコンクリートの密実さを真空乾燥法〔4〕により評価した結果を示している。従来のA Eコンクリートに比べて、このモデルからは水が抜けにくく、より緻密な微細構造を持っていることが予想される。さらに、図-4に示すような実際に鉄筋を配した供試体にハイパフォーマンスコンクリートモデルとW/C=50%、スランプ8cmの従来のA Eコンクリートを打設し、ハイパフォーマンスコンクリートモデルは締め固めを行わず、スランプ8cmのコンクリートはバイブレータを用いて充分な締め固めを行った。これらの供試体を真空乾燥法により12時間脱水した結果、図-5に示すように、このモデルはスランプ8cmで締め固めを充分行ったものに劣らないことが確認された。

これらの実験結果より、このハイパフォーマンスコンクリートモデルは、材令初期において欠陥を生じる可能性が小さく、硬化後においても部材表面付近の水の移動に対して充分な抵抗を持っているものと考えられる。なお強度については、シリンダーストロングを調べると材令7日で 277 kg/cm^2 、材令28日で 439 kg/cm^2 が得られている。

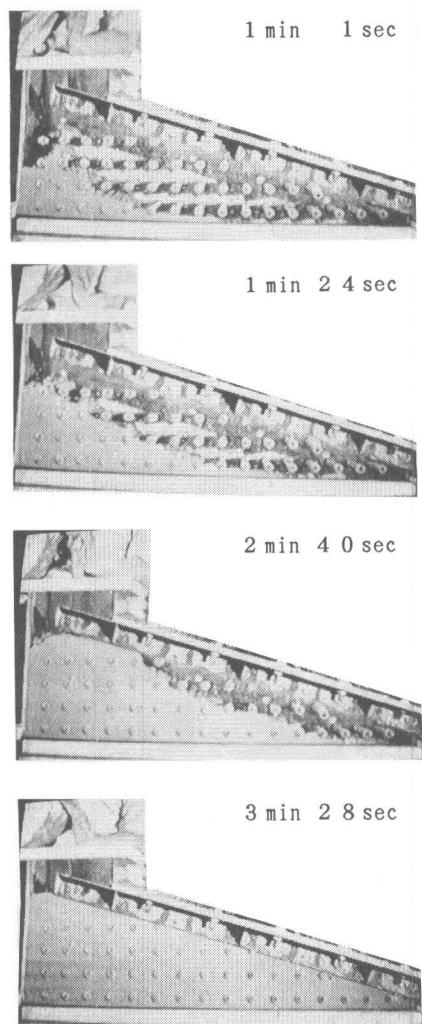


写真-1 型枠内の充填状況

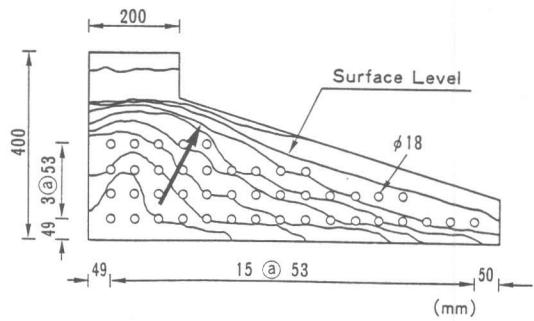


図-1 型枠の形状及び寸法

3. 3 配合および使用材料

以上のような特性を持つ「ハイパフォーマンスコンクリートモデル」の配合及び実験に使用した材料の特性を表-1および表-2にそれぞれ示す。使用されている材料は、すべて市販されているものばかりである。混和材としては、高炉スラグ微粉末、膨張材（C S A系）およびフライアッシュを、化学混和剤としては、高性能A E減水剤と極少量の増粘剤を使用した。増粘剤は、特殊水中コンクリート用の混和剤の一成分として使われているものである。高性能A E減水剤は、スランプロス低減型のものを使用し、練り上がり後90分間はスランプフローのほとんど変化しないことを確認した。練り混ぜには、100リットル強制パン型ミキサーを用いた。

配合設計に当たり考慮したことは、若材令および硬化後に要求される特性から、まず単位水量を 150 kg/m^3 に、水結合材比を50%に設定したことである。この2つの条件の範囲内で、主に硬化前の特性を満足のいくものにするための検討を行い、配合を決定したのである。

膨張材は、主にコンクリート打設直後の硬化収縮を補償するために使用している。したがって、少量で効果がある。また、若材令時のコンクリートの伸び能力を改善する働きも多少期待できる。

フライアッシュは結合材としてではなく、細骨材の一部を置換した粉末として考えている。もちろん、長期のポゾラン反応を考えれば、水結合材比の効果はさらに高まることが期待できる。

4. 締め固め不要コンクリート

ハイパフォーマンスコンクリートの重要な特性の一つである「締め固め不要」を実現するためには、型枠の隅までバイブレータを使用することなく流動できる優れた変

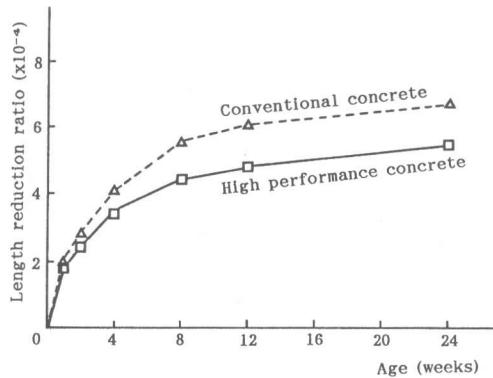


図-2 乾燥収縮試験結果 (JIS A1129)

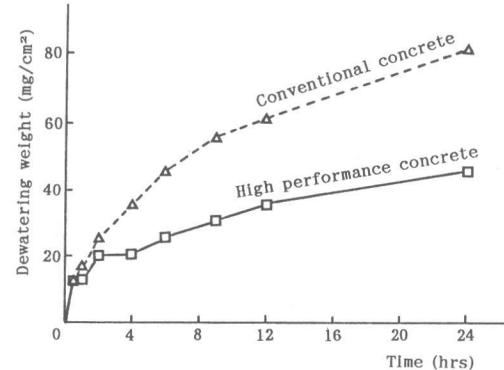


図-3 密実さ判定試験結果 (真空乾燥法)

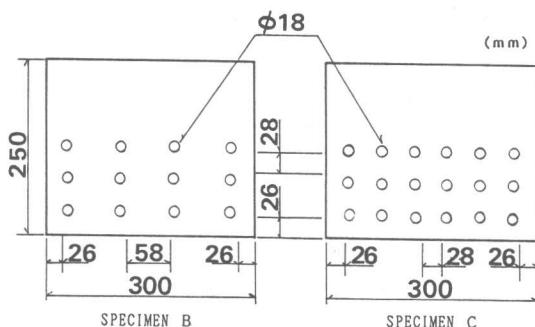


図-4 供試体の形状 [4]

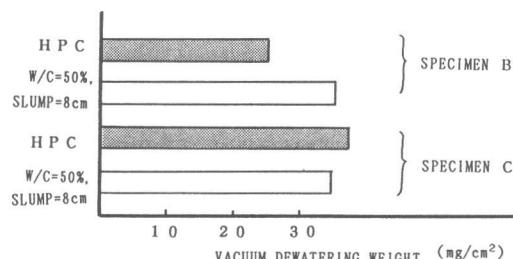


図-5 12時間後の真空脱水量

表-1 コンクリートの配合

	W	C	A ₁	A ₂	A ₃	S	G	Ad	Slump or flow(cm)	Air%
HPC Model	154	144	10	154	197	753	963	*)	57(flow)	2.1
Convent.	150	300	—	—	—	752	1176	**) 17		4.2

A₁=Expansive Admix., A₂=slag, A₃=Fly Ash

*) 4800cc for superplasticizer + 6g for cellulose viscous agent

**) 750cc for AE & water reducing agent

25mm maximum size

表-2 使用した材料の特性

Cementitious materials		Aggregates (river type)			
	specific gravity	specific surface area(cm ² /g)		specific gravity	F.M.
O.P.C.	3.15	3220			
Slag	2.90	5680			
Fly ash	2.19	3000			
Fine	2.65		absorption capacity %		solid volume ratio %
Coarse	2.76		6.93	1.74	66.5
				1.14	67.4

Grading of both aggregates conforms to the range specified in JSCE standard.

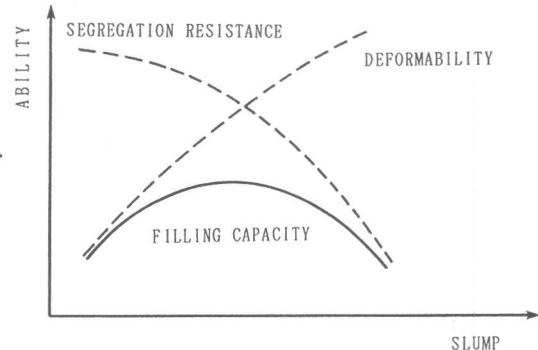


図-6 スランプと充填性の関係

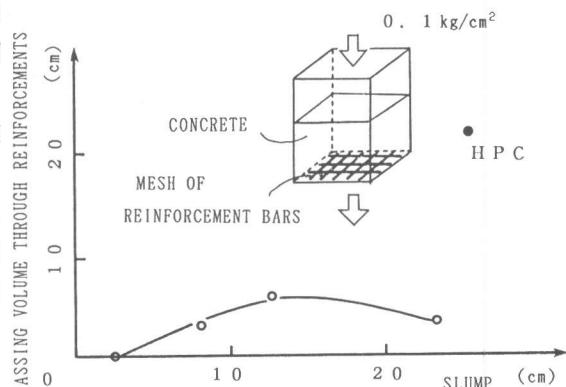


図-7 スランプと鉄筋通過量の関係

形性と流動中に鉄筋間等で閉塞を起こさないための充分な材料分離抵抗性を確保する必要がある。一般に普通コンクリートでは、両特性は相反するものであり、例えばスランプと比較的狭い空隙への充填性の関係は図-6 のようになる。スランプの増大は、変形性が大きいことを表す。逆に、材料分離抵抗性は、スランプの増大と共に小さくなる。したがって、両者の複合効果を考えれば充填性とスランプの関係は上に凸の曲線となることが想像される。実際、鉄筋間隔 5 cm のメッシュにコンクリートを通過させる実験結果 [5] からも、このことは確認されている（図-7 参照）。

「ハイパフォーマンスコンクリート」においては、変形性及び材料分離抵抗性を支配する要因の一つと考えられる自由水（粉体および細骨材に拘束されない水）に着目し、変形性を落とさずに材料分離抵抗性を向上させるための様々な工夫を凝らしているのである。

4. 1 混和材の役割

使用した高炉スラグ微粉末の粒度はセメント粒子よりも細かく（ブレーン値 5680 cm²/g）、この果たす役割には次の2つが考えられる。すなわち、粉体全体の粒度分布を広くすること、および粉体が表面に捉える水の量を増やすことである。前者は、セメント粒子間にスラグ微粉末が入り込むことにより粉体相の実績率を上げ、ペーストレベルでの必要最小水量を減らす方向に働くものと考えられる。後者は、粉体が拘束する水の量を増やすことで、いわゆる自由水を減らしペーストと細骨材の材料分離抵抗性を向上させているものと思われる。

前川らの実験結果[6]においても粉末度の細かいスラグ微粉末に100%置換したモルタルは、セメントモルタルに比べて分離抵抗性が大きくなることが示されている。しかし、モルタルとしての変形性はかえって悪くなることも明らかにされている。しかし、両粉体をうまく混和させた場合には、上記の理由から粉体粒子どうしの平均距離を小さくすることなしに自由水の量を減らすことができれば、変形性を余り落とさずに分離抵抗性を改善することも可能ではないかと考えられる。

フライアッシュ粒子は、きれいな球形をしているため、セメントに一部置換して用いるとフレッシュコンクリートのワーカビリティーの改善に非常に有効であることは、従来から知られている[7]。また、泉らによるペーストのせん断試験を行った結果[8]からは、図-8に示すようにフライアッシュは、それと比表面積がほとんど変わらない普通ポルトランドセメントや高炉スラグに比べて小さい水結合材比で層間せん断応力が最小となる。つまり、フライアッシュは、所定のせん断抵抗を実現するのに表面に拘束する水の量が少いため、少ない水で他と同じ粘性を実現できるのである。このフライアッシュを細骨材の一部と置換することにより水量を余り増やすことなくモルタルの粘性を上げることができるのである。

4. 2 化学混和剤の役割

高性能AE減水剤は、少ない水で粉体の多いこのモデルを作るためには、必要不可欠である。増粘剤の使用量が非常に少ないのは、フレッシュ時にコンクリート中に存在する自由水の量が少ないことが原因であり、伊東らの考案した試験方法[9, 10]などを用いて実際に計算してみると練り混ぜ時に入れた水の約10-15%にすぎず、これは、従来のコンクリートに比べると非常に少ない。つまり、重力下という非常に小さい力で変形させるために、このモデルは、増粘剤を必要最少限の量に抑え、変形性を確保していると考えることができる。事実、重力下でこのモデルは、特殊水中コンクリートのように非常にゆっくりした変形は見られない。また、特殊水中コンクリートでは、図-1のような型枠内を充填できないことも確認されている。

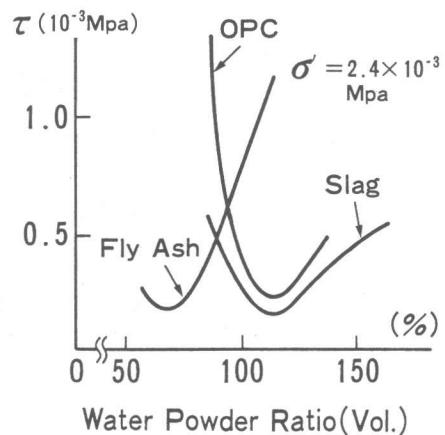


図-8 ペーストのせん断試験結果[8]

5. まとめ

締め固め不要であり、初期欠陥を生じにくい「ハイパフォーマンスコンクリート」の開発を行い、現在市販されている材料の組合せで作成することができた。このハイパフォーマンスコンクリートモデルは、粉末度の細かい高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよび膨張材を使用し、高性能A-E減水剤と少量の増粘剤を併用して作成したものである。そして、種々の角度から検討を行うことにより、このモデルが「ハイパフォーマンスコンクリート」としてかなり満足のいく特性を有していることが確認された。このハイパフォーマンスコンクリートは、コンクリート構造物の信頼性の回復に大いに役立つものと期待される。

今後は、このモデルの改良を行うと共に、ハイパフォーマンスコンクリートの一般的な配合設計法の開発を行っていく予定である。

謝辞

本研究は國分正胤東大名誉教授の御示唆を15年の年月を経て、ようやく実現したものである。また、実験を行うに当たり、日曹マスタービルダース(株)の遠藤裕悦氏、東京大学大学院修士2年の山中克夫氏および同大学学部4年の小塚清氏にご援助頂いた。ここに、付記し御礼申し上げる。

【参考文献】

- 1) 岡村 甫：新しいコンクリート材料への期待、セメント・コンクリート、No. 475, Sept. 1986, pp. 2-5
- 2) 岡村 甫：信頼されるコンクリートへの途、コンクリート工学、Vol. 26, No. 1, Jan. 1988, pp. 9-11
- 3) OZAWA, K., MAEKAWA, K., KUNISHIMA, M., OKAMURA, H.: High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structure, Proceeding of The Second East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Chiang Mai, Jan. 1989
- 4) 山中 克夫、小沢 一雅、國島 正彦：コンクリート構造物の耐久性能の定量的評価、第11回コンクリート工学年次論文報告集、日本コンクリート工学協会、1989
- 5) 山越 健司：フレッシュコンクリートのワーカビリティーと材料分離、東京大学卒業論文、1989. 3
- 6) 前川 宏一、山田 浩司、岸本 達也、小沢 一雅：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの流動途上における分離抵抗性、高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム、土木学会、Mar. 1987
- 7) 國分 正胤：フライアッシュおよびフライアッシュセメント、セメント・コンクリート、No. 267, May 1969, pp. 2-18
- 8) 泉 達也、前川 宏一、小沢 一雅、國島 正彦：固体間摩擦抵抗に及ぼすペーストの効果、コンクリート工学年次論文報告集、June 1988
- 9) 辻 幸和、二羽 淳一郎、伊東 靖郎、岡村 甫：遠心力を利用した細骨材の保有水試験方法、土木学会論文集 第384号/V-7, 1987. 8, pp. 103-109
- 10) 堀部 慶次：細骨材の保水性とモルタルの特性、東京大学修士論文、1987. 3