

論文

[1038] 高強度コンクリート用セメントの性能評価に関する実験的研究

依田和久*1・桜本文敏*2・吉田宗司*3・小高茂央*1

1. はじめに

近年、構造物の高層化が進む中で、コンクリートの高強度化が望まれている。しかし、高強度コンクリートを建築工事に適用する際には、ポンプ圧送性などの施工性や、セメントの初期水和熱による強度低下といった問題点がある。これらの問題を解決するために、各種の特徴のある高強度用セメントが開発されてきている。ここでは、高ビーライト系セメント（以下HFと記す）、及び建設省総プロ「NewRC」の一環として開発された粒度調整セメントを対象とし、フレッシュ時の性状、コンクリートの施工性、さらに初期水和熱による高温履歴を受けた場合の強度性状について、普通セメント（以下Nと記す）を用いたコンクリートと比較検討し評価を行うものである。施工性には様々な観点があるが、ここではポンプ圧送性に着目した。ポンプ圧送時の圧力損失は回転翼型粘度計による見かけの塑性粘度とよい相関を示すことが和美らにより明らかにされている[1] ので、本論文も見かけの塑性粘度を求めることにより、ポンプ圧送性を評価した。また、強度性状については実際の構造物の強度発現性状により近い状態である簡易断熱養生[2]で検討することとした。

2. 実験計画

2.1 実験要因

表-1 実験要因の組み合わせ

セメント種類 *	水セメント比 (%)		
HF、N	27	30	35
RI、RA	22	25	30

*注) セメント記号は表-2 参照

実験要因の組み合わせを表-1に示す。実験要因としてセメント種類と水セメント比をとりあげた。セメント種類はHFと粒度調整セメント、及び比較用のNとした。粒度調整セメントは、石灰石微粉末の混合比の違いにより2種類（以下RI、RAと記す）あり、石灰石微粉末が混入されているため、普通セメントを使用した場合よりも圧縮強度が若干低くなることが事前の検討により明らかとなったので、強度レベルを合わせるため水セメント比を各々5%ずつ減じた値とした。

2.2 使用材料及び調合

使用した材料を表-2に、各セメントの物理的性質と構成化合物を表-3に示す。HFは、セメント粒子への混和剤の吸着を均一にするためC₃A及びC₄Aの量を調整しており、高強度で高い流動性状を示すといった特徴がある[3]。また、粒度調整セメントは、セメントの戻り粉である粗粉及び石灰石微粉末をセメントに混合して粒度分布を調整することにより、低水セメント比域での練り混ぜを可能としたセメントである[4]。

表-4にコンクリートの計画調合を示す。スランプフロー、空気量の目標値を55±5cm、

*1 鹿島技術研究所 第四研究部 研究員 工修（正会員）

*2 鹿島技術研究所 第四研究部 主任研究員 工修（正会員）

*3 鹿島 建築技術本部 生産技術部

2 ± 1 % と定めた。ただし、HF は高流動コンクリート用セメントとしての性能を兼ね備えている[3] ので目標値を 65 ± 5 cm とし、比較のため他のセメントと同一調合のものについても実験を行った。

表-2 使用材料

使用材料	種類、記号	物性及び成分
セメント	高ビ-ライト系セメント HF (C社製) 粒度調整セメント RI (U社製) 粒度調整セメント RA (U社製) 普通セメント N (N社製)	粒度調整セメントにおけるセメント・粗粉・微粉の混合比は、RIが70:20:10であり、RAが75:20:5である。また比表面積は、セメントが3200cm ² /g、粗粉が600cm ² /g、微粉が20000cm ² /gである。
細骨材	山梨県上野原産陸砂 千葉県香取郡産陸砂 混合	表乾比重2.58 吸水率2.55 粗粒率3.12 表乾比重2.58 吸水率2.59 粗粒率1.71
粗骨材	東京都青梅産硬質砂岩碎石	表乾比重2.65 吸水率0.84 粗粒率6.69
混和剤	高性能AE減水剤 (T社製)	ポリカルボン酸系 比重1.07

表-3 各セメントの物理的性質と構成化合物

セメントの種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	構成化合物 (%)				混合比 (%) 石灰石微粉末
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
HF	3.21	4260	33.7	47.2	3.8	8.8	
RI	3.10	4220	45.1	21.0	8.5	7.9	10~11
RA	3.12	3260	46.9	23.0	9.1	8.4	5~6
N	3.15	3320	43.7	30.6	9.3	8.4	

注)RI及びRAの構成化合物は、石灰石微粉末を取り除いた粗粒を含むセメントの構成化合物を示す。

2. 3 練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜは、容量100 (ℓ)の水平二軸強制練りミキサを用いた。初めに、セメント、細骨材、高性能AE減水剤、水を投入し30秒、その後粗骨材を投入し120秒練り混ぜた。

2. 4 試験項目及び方法

表-5に試験項目及び試験方法について示す。

(1) Vロート試験は、V型のロートにコンクリート試料を投入し、下部の吐出口を解放することによってコンクリートが流出するのに要する時間を測定した[5]。

(2) 見かけの塑性粘度の測定は、回転翼型粘度計を用いて行い、円筒型容器に詰めたコンクリート中に回転翼を入れて回転させこのときのトルク (T) と回転数 (N) を測定し、(1) 式によって、見かけの塑性粘度を求めた。回転数は10~30r. p. mの範囲で変化させた。

表-4 計画調合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (Kg/m ³)			
			W	C	S	G
HF27	27	48.1		630	761	
HF30	30	49.8	170	567	813	842
HF35	35	51.7		486	877	
HF30W	30	44.3	165	550	735	950
RI22	22	37.4		750	552	
RI25	25	40.7	165	660	627	950
RI30	30	44.0		550	720	
RA22	22	37.7		750	560	
RA25	25	40.4	165	660	635	950
RA30	30	43.8		550	725	
N27	27	42.4		611	681	
N30	30	44.1	165	550	730	950
N35	35	46.2		471	795	

表-5 試験項目及び試験方法

試験項目	試験方法
・スランプ ・スランプフロー ・空気量 ・単位容積重量 ・コンクリート温度	JIS A 1101 土木学会規準(案) JIS A 1128 JIS A 1116 -
・スランプフロー時間 ・Vロート時間 ・見かけの塑性粘度	50cmの印通過時間 (1) 項参照 (2) 項参照
・圧縮強度試験 (標準養生、簡易断熱養生)	JIS A 1108 (3) 項参照

$$T = h \cdot N + g \quad (h: \text{見かけの塑性粘度} \quad g: \text{見かけの降伏値}) \quad \text{-----} \quad (1)$$

(3) 簡易断熱養生は、図-1に示す円柱型の発泡スチロール製簡易断熱型枠の中空部に $\phi 10 \times 20$ cmのコンクリート供試体(軽量モールド使用)を同心円状に配置し、その後、構造体の温度履歴により近づけるため断熱型枠中央部に同一調合の $\phi 260 \times 220$ mmのコンクリートを詰め込み、密封して行った。供試体は水分の蒸発を防ぐためビニールで封緘

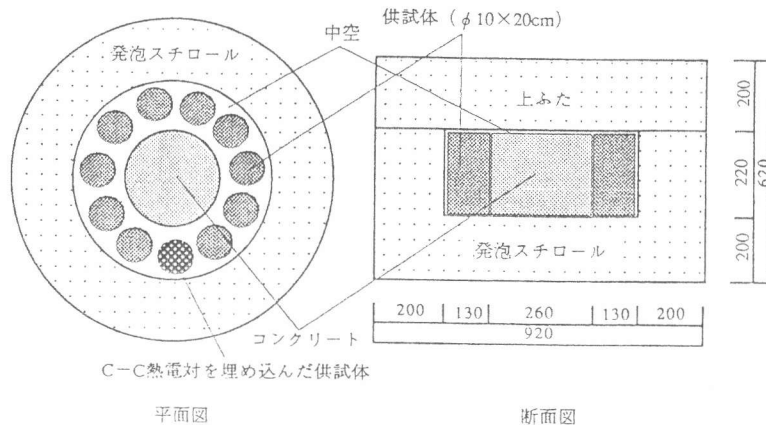


図-1 断熱型枠の形状

し、簡易断熱型枠に供試体をセット後 20°C の養生室に静置した。供試体の内の一本にC-C熱電対を埋め込み温度履歴を測定(5日間)した。

3. 実験結果と考察

3.1 フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリート試験を行った結果、スランプフローは $52 \sim 59$ cm (HF $60 \sim 68.5$ cm)、空気量は $1.5 \sim 2.9\%$ 、練り上がり温度は $20 \sim 22^{\circ}\text{C}$ の範囲内にあり、所定のフレッシュ性状が得られたものと判断した。

図-2に水セメント比と見かけの塑性粘度の関係を示す。各セメントとも水セメント比が小さくなるほど見かけの塑性粘度が大きくなり、水セメント比 30% で比較するとHFが最も小さく、次いでRI、N、RAの順であった。またRIは、 25% 以下の低い水セメント比の領域まで流動特性は良好であった。次に、図-3、図-4にVロート時間及びスランプフロー時間と見かけの塑性粘度の関係を示す。これらの図が示すように、Vロート時間及びスランプフロー時間とも見かけの塑性粘度と相関があると言える。この相関関係は、Vロート時間が 30 秒以内の場合スランプフロー時間より良好である。つまり、Vロート時間が 30 秒以内の場合、この値により簡易的にコンクリートの塑性粘度を評価することができると言える。

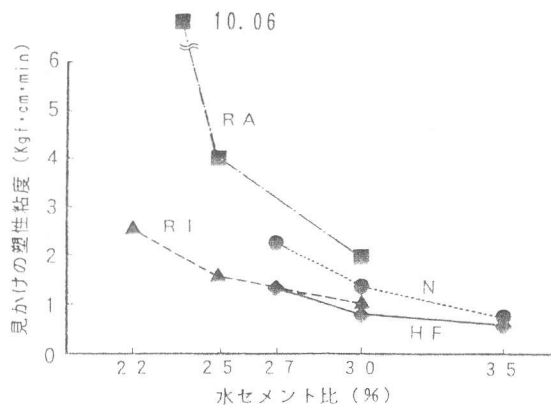


図-2 水セメント比と見かけの塑性粘度の関係

3.2 初期水和熱による温度履歴

図-5に各コンクリートの初期水和熱による温度履歴を示す。同一水セメント比で温度履歴を比較すると、温度上昇量はNが最も大きく、次いでRA、RIとなり、HFが最も小さい。HFの温度上昇量が小さいのは、セメント中の C_3A 、 C_3S 量が少なく C_2S 量が多いためと考えられる。また、Nの水セメント比 30% の温度上昇量は約 50°C であり、これは $80 \sim 90$ cm角程度の柱部材の温度上昇量に相当している[6]。

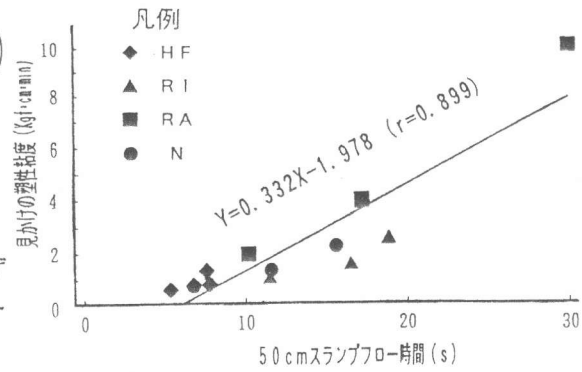
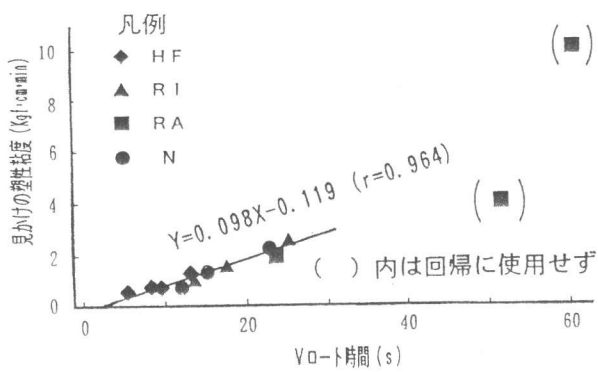


図-3 Vロート時間と見かけの塑性粘度の関係 図-4 スランプフロー時間と見かけの塑性粘度の関係

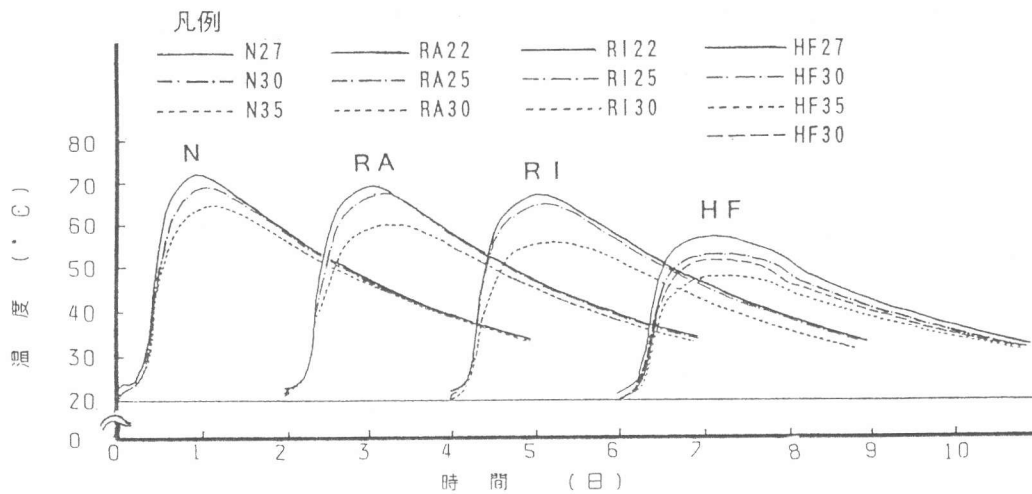


図-5 初期水和熱による温度履歴

3. 3 硬化コンクリートの性状

図-6、図-7に水セメント比30%における材齢と圧縮強度の関係の比較を示す。また、図-8、図-9にセメント水比と圧縮強度の関係の比較を示す。図-6、7より、簡易断熱養生における材齢に伴う強度の伸びは、標準水中養生に比べて低い傾向にある。さらに、図-8、9に示すように、標準水中養生28日、簡易断熱養生91日とも、同一水セメント比で比較すると $HF > N > RA > RI$ の順となっている。図-10に91日簡易断熱養生強度の28日標準水中養生強度に対する比を示すが、その値はHFが最も大きい。これらは、HFには強度発現性に寄与する C_2S が多く、 C_3A が少ないため、長期的に水和反応が進むためと考えられる。

4. 設計基準強度とポンプ圧送性（塑性粘度）との関係

「NewRC」施工標準では、構造体コンクリートの強度は材齢91日のコア強度と定められており、その中の強度管理のための判定方法では、構造体強度と管理用強度の違いをその差で補正している。これに対し、本論文では、強度比Kで考慮することとし、実機プラントによる強度低下と実構造物における強度のばらつきを考慮し、以下の関係式を用いて調合強度Fを定めた。

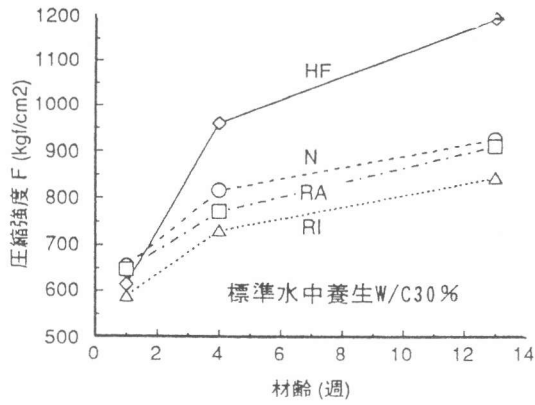


図-6 材齢と圧縮強度の関係

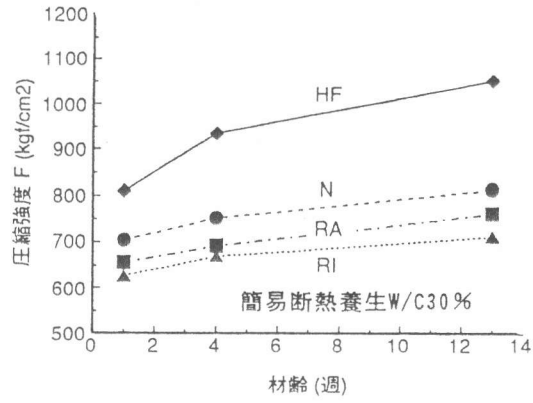


図-7 材齢と圧縮強度の関係

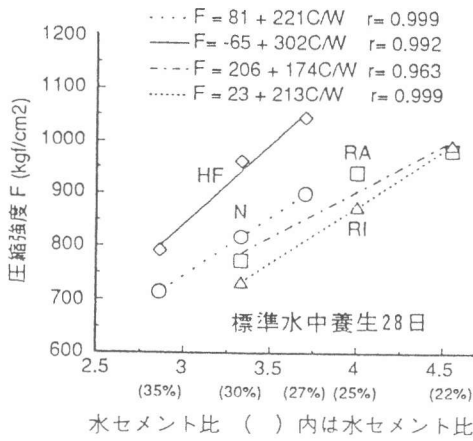


図-8 セメント水比と圧縮強度の関係

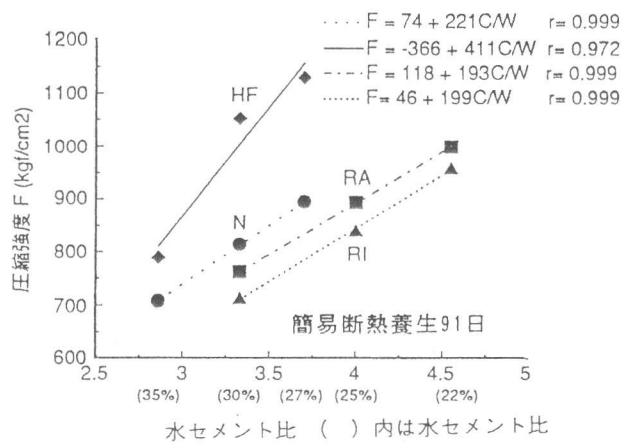


図-9 セメント水比と圧縮強度の関係

$$F' = F_c / K' + 2\sigma \quad (2)$$

($F' = 0.9F$ 、 $K' = 0.95K$ 、 $\sigma = 0.1F_c$)

F : 試験室で得られた調合強度 (標準28日)

F' : 実機プラントにおける強度低下を見込んだ
調合強度 (標準28日)

K : 実験より得られた強度比

K' : 構造体のコアを想定したときの強度比

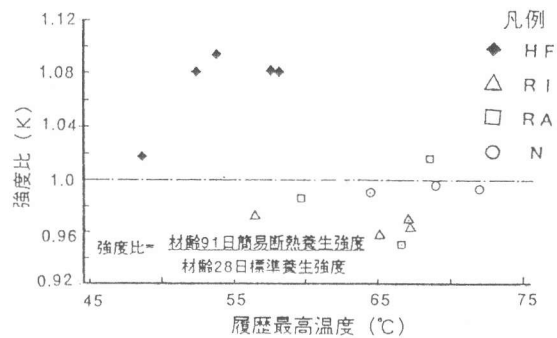


図-10 履歴最高温度と強度比の関係

したがって、図-8より、ある調合強度に必要なセメント水比を求め、その値に対応する見かけの塑性粘度が図-2より導かれる。また見かけの塑性粘度とポンプ圧力損失の相関関係は和美らの研究より明らかとなっている[1]。この研究は、普通セメントを用いた水セメント比27~49%のコンクリートの他に、シリカフュームや高炉スラグ微粉末を混入したものなど広範なコンクリートを対象としたものであるため、本実験においてもこの相関関係が成り立つものとして圧力損失を算出した。図-11に示すような配管モデルで設計基準強度600 Kgf/cm²のコンクリートの圧送可能高さをセメント別に試算すると表-6のようになる。圧送可能高さは、HFが最も大きく、次いでN及びRIであり、RAは圧送不可となった。圧送可能高さについては、今後ポンプ圧送実験により確認する必要がある。

5. まとめ

実験結果、以下のことがわかった。

(1) 見かけの塑性粘度は、水セメント比30%と比較すると、HFが最も小さかった。また、RIは水セメント比25%以下の領域でも流動特性は良好であった。

(2) 簡易断熱養生下の履歴最高温度は、HFが最も低く、次いでRI、RA、Nの順であった。

(3) 強度発現性は、標準水中養生及び断熱養生下において、材齢7日の標準養生を除き、HFが最も高く、次いで、N、RA、RIの順であった。

(4) 設計基準強度600Kgf/cm²レベルにおいて、見かけの塑性粘度とポンプ圧力損出の相関関係より圧送可能高さを試算すると、HFが最も大きく、次いでNとRIが同等であった。

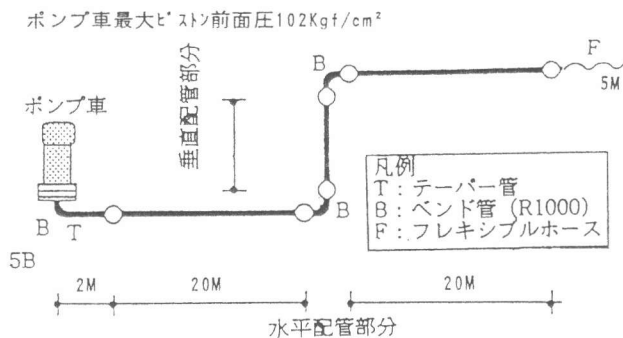


図-11 ポンプ圧送モデル図

表-6 圧送可能高さ(試算)

セメント種類	F _c Kgf/cm ²	K	F Kgf/cm ²	C/W	h	P _h	P _v	圧送可能高さ m
HF	600	1.06	762	2.74	0.54	0.31	0.64	96
RI		0.96	828	3.78	1.42	0.69	1.21	31
RA		0.98	814	3.49	2.54	1.18	1.94	不可
N		0.99	807	3.29	1.32	0.65	1.14	35

h: 見かけの塑性粘度(kgf·cm·min)

圧力損失(5B管, 実質吐出量40m³/h)(kgf/cm²/m)

P_h=0.436h+0.076, P_v=0.650h+0.285(文献1より)

またT(テーバ管), B(ベント管), F(フレキシブルホース)の算定は、日本建築学会「コンクリートポンプ工法施工指針案・同解説(1979)」に基づく。

6. おわりに

現在、このような高強度コンクリートを超高層RC構造や鋼管コンクリート構造へ適用することを検討中である。一方総合的な施工性の良否を判断するためには、見かけの塑性粘度の他にコンクリートのすべり抵抗性や付着力等による評価も必要であると思われる。

最後に、本実験を行うに当たり秩父セメント(株)及び宇部興産(株)をはじめ、多くの方々にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

<参考文献>

- [1] 和美広喜、桜本文敏、他：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究(その1、その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、pp.1109~1112、1993.9
- [2] 柳田克巳、和美広喜、他：高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの水和熱養生条件下における強度特性、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.727~728、1991.9
- [3] 名和豊春、鈴木清孝、他：高ビーライト系セメントを用いた高流動・高強度コンクリートに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、VOL.15、No.1、pp.143~148、1993.6
- [4] 陳底、友沢史紀、他：高強度・高流動コンクリート用バインダーの開発に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、pp.525~526、1992.8
- [5] 小沢一雅、岡村甫、坂田昇：締め固め不要コンクリートの充填性評価のためのロート試験、超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp.17~22、1993.5
- [6] 戸祭邦之、他：水和発熱による高温履歴を受けた高強度コンクリートの強度発現性とその管理についての一考察、日本建築学会構造系論文報告集、第445号、pp.1~10、1993.3