

論文

[1006] 二成分系低発熱型高流動コンクリートの基礎物性について

正会員○渡部 聡 (熊谷組技術研究所)
 正会員 田中健治郎 (熊谷組技術研究所)
 正会員 金沢 克義 (本州四国連絡橋公団)
 正会員 有馬 勇 (本州四国連絡橋公団)

1. はじめに

表題の二成分系低発熱型高流動コンクリートは、打設・締固め作業の大幅な省力化を可能とするハイパフォーマンスコンクリート[1][2]の範疇に属するものであるが、本研究では、明石海峡大橋の大規模基礎のうち、淡路島側に構築するコンクリート総打設量約25万m³の巨大な4 Aアンカレイジ構造物への適用性を検討するための基礎実験を行った。

当該工事に適用し得る高流動コンクリートに求められた制約条件としては、①マスコンの温度ひびわれ防止対策として低発熱型セメントを使用すること、かつ、最大単位セメント量に限度があること[3][4]、②設計上の単位容積重量 (2,300kg/m³) を確保するために最大寸法40mmの粗骨材を使用する必要があること、③アンカレイジ特有の部分的に過密な鉄筋・鉄骨の間を材料分離を生ずることなく流動し、それらの周囲を確実に充填すること、④上記の流動充填性能は生コン製造後少なくとも1時間は保持すること、⑤硬化コンクリートの品質は本四公団が予め基準として定めた低発熱型セメント使用の従来型の普通コンクリート (以後ベースコンクリートと呼ぶ) と同等以上であること、などがある。これらの制約条件のうち①、②の条件は、高流動コンクリートとして全く前例がないことから、本研究に先立って多数回の予備実験を行った。その結果、適用を検討する高流動コンクリートは、(I) 材料分離抵抗性は、化学的に安定した高純度の石灰石微粉末を骨材の一部に代替添加することによって付与し、また、(II) 流動性は二成分系低発熱型セメントおよび石灰石粉との合性の良い高性能A E減水剤を適量使用することによって付与することとし[5]、本論文では、当該高流動コンクリートのフレッシュ時の性状、強度、耐久性、断熱温度上昇特性などの基礎物性について報告する。

2. 実験方法

2.1 コンクリートの材料、練り混ぜ、試験方法、要求性能

実験に使用した材料を表-1に示す。コンクリートの練り混ぜは、100ℓの2軸強制練りミキサーを使用して図-2に示す手順で混練した。また、各試験は表-2に示す方法で行った。

表-1 使用材料

使用材料	種 類	物 性 および 成 分
セメント	二成分系低発熱型	比重 3.00, 比表面積 4850 cm ² /g, 水和熱48.3cal/g(28日) 成分割合: 低熱セメント30%, スラグ70%
細骨材	海砂	表乾比重 2.54, 吸水率 2.36 %, FM= 2.39
粗骨材	流紋岩碎石	最大寸法 40mm, 表乾比重 2.64, 吸水率 0.57 %, FM=7.21
混和材料	石灰石粉	比重 2.71, 石灰純度 99.0 %, 比表面積 7500 cm ² /g
混和剤	高性能A E減水剤	変性リグニン複合物
	空気連行剤	変性アルキルカルボン酸化合物

二成分系低発熱型高流動コンクリートは表-3に示す要求性能を満足するように配合を調整した。なお、スランプフローの目標値に関しては、事前の予備実験によって40mm骨材を用いた高流動コンクリートが材料分離を起こすことなく、かつ、十分な流動性を確保できる値として検討の上決めたものである。その他の目標値は本四公団の当該構造物に使用するベースコンクリートの規格値である。ベースコンクリートの配合は、表-4、表-5に示す配合No.⑩であり、海砂の微粒分不足を補うため石灰石粉を30kg/m³添加している。なお、ベースコンクリートのスランプの目標値は11±2.5cmである。

2.2 実験Ⅰ

水セメント比および石灰石粉量を変化させて、その時スランプフローが目標値を満足するように調整した場合の高性能AE減水剤の使用量、スランプフローの経時変化、ブリージング率、凝結時間について試験を行った。配合を表-4に示す。s/aは石灰石粉を含まずに算定した値である。

2.3 実験Ⅱ

水セメント比、石灰石粉量を変化させて、圧縮強度、中性化、乾燥収縮、断熱温度上昇の試験を行った。配合を表-5に示す。

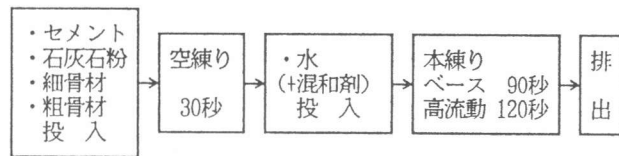


図-1 コンクリート混練のフローチャート

表-2 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプフロー試験	JIS A 1101のスランプ試験を行いそのスランプのフローを測定。ただし、各層の突き数は10回とする。
空気量試験	JIS A 1128
凝結試験	JIS A 6204 付属書1
ブリージング試験	JIS A 1123
圧縮強度試験	JIS A 1108
乾燥収縮試験	JIS A 1129
促進中性化試験	材令28日まで20℃標準水中養生した後CO ₂ 濃度10%、温度40℃、湿度40%RHにて保存。所定材令でフェノールクレイン溶液を噴霧し、中性化領域を測定
断熱温度上昇試験	空気循環式断熱温度試験機にて測定
供試体作成方法	圧縮用φ150x300mmで6層5回叩き 中性化用φ150x150mmで3層5回叩き

表-3 要求性能

項目	目標値
スランプフロー	55±5 cm
空気量	4±1 %
練り上がり温度	20±1 °C
単位容積重量	2300 kg/m ³ 以上
設計基準強度	材令91日 240 kgf/cm ² 以上
断熱温度上昇値 K	25°C以下

表-4 コンクリートの配合 (実験Ⅰ)

配合No.	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
			水	セメント	石灰石粉	細骨材	粗骨材
①	60.5	36.0	145	240	100	638	1179
②					150	621	1148
③					200	605	1117
④	55.8	36.0	145	260	100	632	1168
⑤					150	615	1137
⑥					200	599	1106
⑦	51.8	36.0	145	280	100	626	1157
⑧					150	609	1126
⑨					200	592	1095
⑩	55.8	36.0	145	260	30	656	1211

表-5 コンクリートの配合 (実験Ⅱ)

配合No.	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
			水	セメント	石灰石粉	細骨材	粗骨材
①	60.5	36.0	145	240	120	632	1167
②					150	621	1148
③					180	611	1130
④	55.8	36.0	145	260	120	625	1156
⑤					150	615	1137
⑥					180	605	1118
⑦	51.8	36.0	145	280	120	619	1145
⑧					150	609	1126
⑨					180	599	1107
⑩	55.8	36.0	145	260	30	656	1211

3. 結果および考察

3.1 実験 I

(1) 高性能AE減水剤の使用量

コンクリートのスランプフローを55cmとした場合の各配合における高性能AE減水剤の使用量を図-2に示す。高性能AE減水剤の使用量は水セメント比が小さいほど、石灰石粉の添加量が多いほど増大しており、通常のコンクリートにおける標準使用量と比較すると2.0~2.4倍の値となっている。

(2) スランプフローの経時変化

単位セメント量が最も多い水セメント比51.8%の場合のスランプフローの経時変化を図-3に示す。高流動コンクリートのスランプフローはコンクリート練り上がり後5分でピークを示し、その後60分までのスランプフローの経時変化はほとんどみられない。各水セメント比における石灰石粉量の大小によるコンクリートの性状は、石灰石粉量が100kg/m³の場合は多少荒々しい感じが見られ、また、200kg/m³の場合は粘性が高かった。写真-1に水セメント比55.8%、石灰石粉量150kg/m³の練り上がり5分後のスランプ状況を示す。

(3) ブリージング率

各配合におけるブリージング率を図-4に示す。高流動コンクリートでは材料分離を生じさせないという観点からは、ブリージングも極力少ないことが望ましい。本実験ではブリージング率は最大で0.51%であり、ほぼ満足のいく結果が得られている。全体の傾向としては、水セメント比が小さいほど、また、石灰石粉量が多いほどブリージングは少なくなっており、水セメント比51.8%、あるいは石灰石粉を200kg/m³添加した場合にはブリージングはほぼ0に近い値となっている。

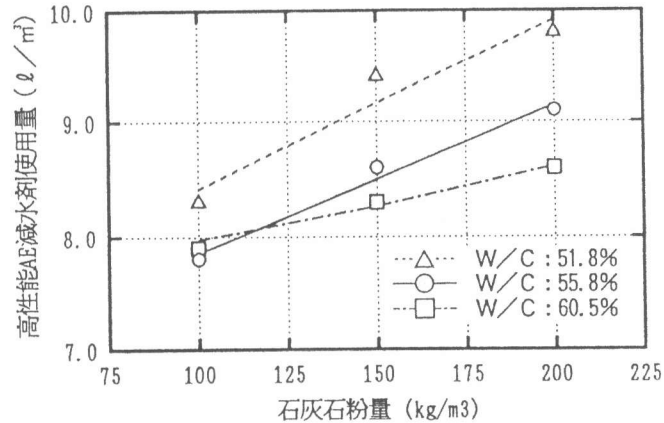


図-2 石灰石粉量と高性能AE減水剤使用量

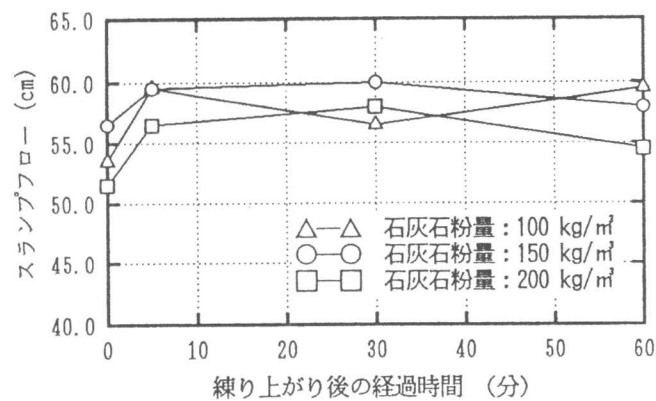


図-3 スランプフローの経時変化

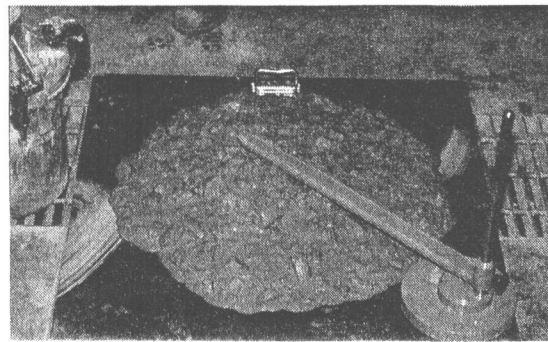


写真-1 高流動コンクリートのスランプ状況 (配合⑤)

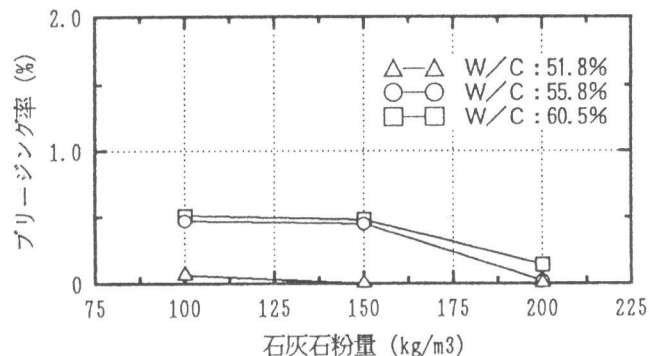


図-4 石灰石粉量とブリージング率

(4) 凝結

各配合の凝結時間を図-5に示す。低発熱型セメントを用いたコンクリートでは、一般にセメント中に含まれるクリンカー量が少ないため、凝結時間は遅延する傾向にある。二成分系低発熱型セメントを用いたベースコンクリート (W/C=55.8%)の凝結時間は始発で11時間、終結で20時間前後であるが、高流動コンクリートとした場合には高性能AE減水剤の使用量が増加するため、凝結時間の始発、終結ともベースコンクリートに比べ5時間前後遅延する。

3.2 実験II

(1) セメント水比と圧縮強度

セメント水比と圧縮強度の関係を図-6に示す。両者は通常のコンクリートの場合と同様に、ほぼ直線関係となっている。強度発現は材令28日強度を100とした場合、材令7日で60、91日で120程度の値となる。

(2) 石灰石粉の添加量と圧縮強度

水セメント比55.8%の場合の石灰石粉の添加量と圧縮強度の関係を図-7に示す。圧縮強度はいずれの材令においても石灰石粉量の増大に伴って増加しており、石灰石粉量を180 kg/m³とした場合には30kg/m³の場合に比べて20%程度の強度増加を示している。このような石灰石粉の添加量増大に伴って圧縮強度が増進する理由としては、石灰石粉の反応に起因する化学的なものと、微粉の添加による微細空隙充填効果により、セメント硬化

体中の空隙量が減少するという物理的原因の二つが考えられる。石灰石粉の反応性については、セメントペースト単体と石灰石粉を添加したものの電子顕微鏡による観察結果では、両者の生成物に差異は認められなかった。また、3.2.(6)に示す断熱温度上昇試験結果においても、単位セメント量が同一の場合には温度上昇量に有意な差は生じていない。このことから、今後さらに詳細な検討が必要とは思われるが、石灰石粉の添加による圧縮強度の増加は、主として微粉添加による微細空隙充填効果およびブリージングの減少によりコンクリートマトリックス中の内部欠陥が減少したことに起因しているものと考えられる。

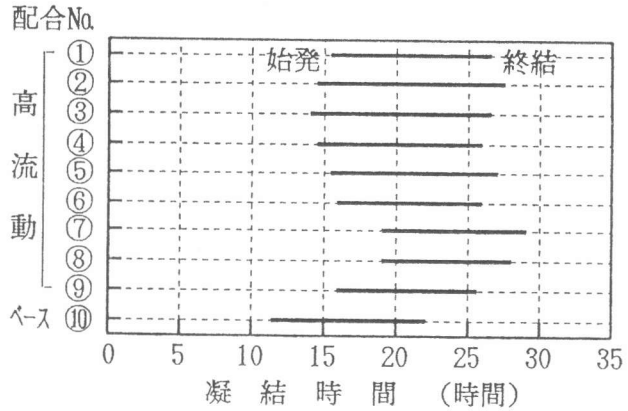


図-5 各配合の凝結時間

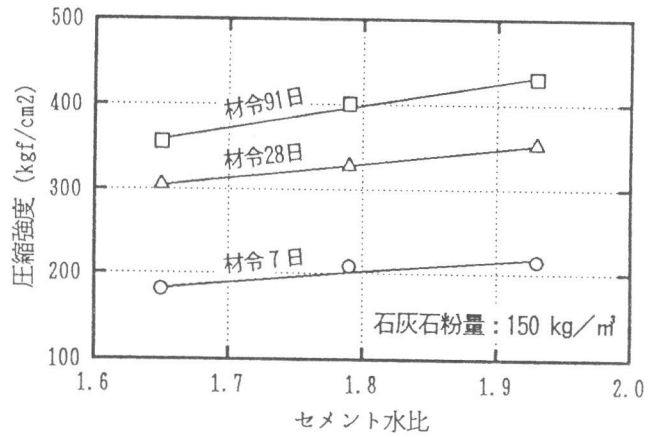


図-6 セメント水比と圧縮強度

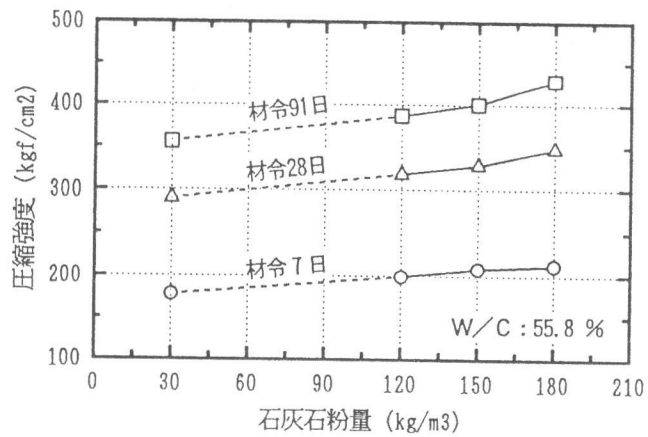


図-7 石灰石粉量と圧縮強度

(3) 材令と圧縮強度

配合No.⑤ (W/C=55.8%, 石灰石粉150 kg/m³) と配合No.⑩ (W/C=55.8%, 石灰石粉30kg/m³) の材令26週までの圧縮強度を図-8に示す。強度発現は、材令28日を100とすると材令26週では、配合No.⑤で140、配合No.⑩で130程度の値となる。また、配合No.⑤は配合No.⑩に比べ材令4週では30%程度圧縮強度が増加しており、その後も両者の差は漸増傾向にある。

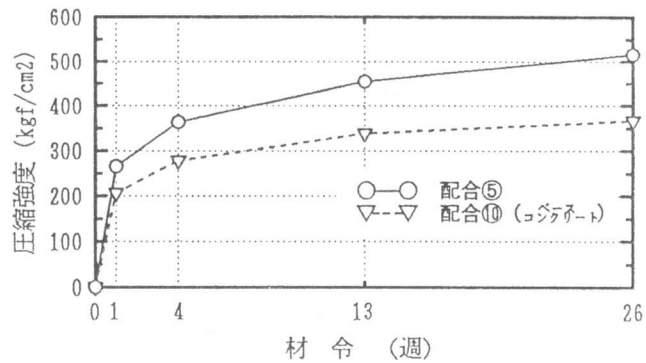


図-8 材令と圧縮強度

(4) 中性化

図-9に促進中性化試験結果を示す。中性化深さは水セメント比が小さいほど、また、石灰石粉の添加量が多いほど小さな値となっている。石粉添加量が150 kg/m³の場合は30kg/m³のベースコンクリートに比べ10%程度中性化速度が遅くなっている。これは前述の石灰石粉による微細空隙充填効果の影響で硬化体組織が緻密化したことによるものと考えられる。

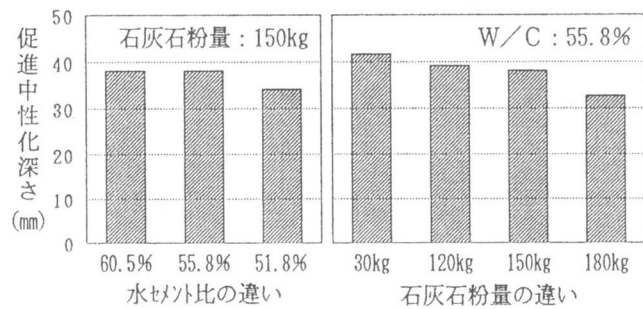


図-9 促進中性化深さ

(5) 乾燥収縮

乾燥収縮による長さ変化率の試験結果を図-10に示す。長さ変化率は高流動コンクリートおよび比較用のベースコンクリートともほぼ同等の値であり、材令26週で4.6 ~ 4.8 × 10⁻⁴であった。

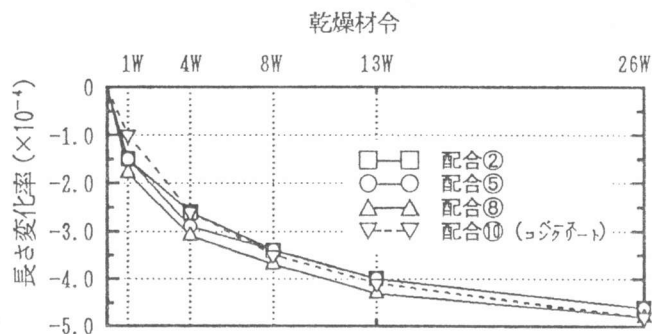


図-10 乾燥収縮による長さ変化

(6) 断熱温度上昇

断熱温度上昇試験結果を図-11に示す。断熱温度上昇量を単位セメント量の違いで見ると、セメント量240 kg (配合No.②) で20.4℃、260kg (配合No.⑤) で22.0℃、280 kg (配合No.⑧) で24.3℃とセメント量10kgについて約1℃の温度上昇となっている。また比較用のベースコンクリートと比べると、ベースコンクリート (配合No.⑩) の断熱温度上昇量22.2℃に対して高流動コンクリート (配合No.⑤) では22.0℃であり両者に有意な差は認められなかった。ただし、2成分系低発熱型セメントを使用したコンクリートは、

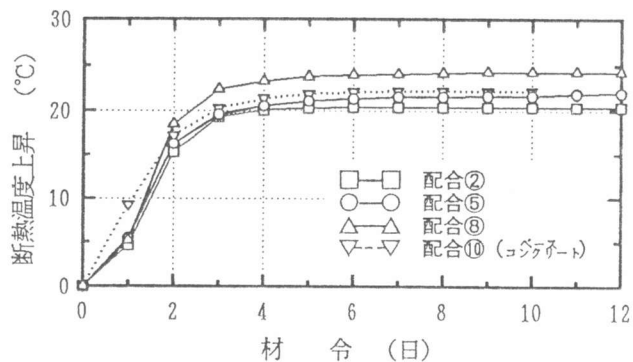


図-11 断熱温度上昇

凝結の遅延に伴い、初期の温度上昇がゆるやかとなる傾向が見られ、特に、高流動コンクリートではこの傾向が顕著である。このため、一般的に用いられている断熱温度上昇式(1)で近似した結果

$$T = K (1 - \exp(-\alpha t)) \dots\dots (1) \quad T = K (1 - \exp(-\alpha t^\beta)) \dots\dots (2)$$

合、初期の温度上昇の遅れを近似できず相関係数が0.96~0.97程度となる。これに対して、式(2)を用いると初期の温度上昇の遅れを評価でき、相関係数が0.99と実測値により近似する結果が得られた。

4. まとめ

本研究で得られた40mm骨材を使用した二成分系低発熱型高流動コンクリートに関する結論は以下のとおりである。

(1)良好な流動性と材料分離抵抗性を付与するに必要な石灰石微粉量は、120~180 kg/m³程度であり、セメント量と合わせた微粉量としては360~460 kg/m³程度となる。また、その場合の高性能A E減水剤の使用量は標準使用量の2.0~2.4倍必要となる。

(2)フレッシュコンクリートの性状は、高性能A E減水剤の使用量が多いため、スランプロスは小さく、凝結時間は遅延する傾向がみられる。また、石灰石粉の添加量の増大によりブリージングは大幅に減少する。

(3)多量の石灰石微粉を添加した高流動コンクリートは同一水セメントのベースコンクリートに比べて圧縮強度は10~20%増大する。また、中性化速度は10%前後遅延する。これらは、石灰石微粉の微細空隙充填効果およびブリージングの減少による内部欠陥の低減効果によるものと考えられる。乾燥収縮については、ベースコンクリートとほぼ同等の値であった。断熱温度上昇については、高性能A E減水剤の影響により初期に遅延する傾向があるが、最大温度上昇は単位セメント量が支配的でベースコンクリートとほぼ同じ値であった。

以上のように、今回開発した二成分系低発熱型高流動コンクリートは、基礎物性に関しては、所要性能を充分有していることが確認できた。

[謝辞] 本研究を進めるにあたり貴重なご助言、ご指導を頂いた明石海峡大橋構造用マスコンクリート委員会(委員長 東京工業大学工学部 長瀧重義教授)の各氏、並びに同委員でもあり、ハイパフォーマンスコンクリートの提唱者である東京大学工学部 岡村甫教授、小沢一雅講師に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 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, pp9-11, 1988. 1
- [2] 小沢 一雅・前川 宏一・岡村 甫：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，Vol. 11, No. 1, pp699-704, 1989
- [3] 金沢 克義ほか：超低発熱セメントの橋梁マスコンクリートへの適用性，コンクリート工学，Vol. 27, No. 5, pp31-37, 1989. 5
- [4] 金沢 克義ほか：大型橋梁マスコンクリートに適した超低発熱型セメント，コンクリート工学，Vol. 29, No. 4, pp27-36, 1991. 4
- [5] 金沢 克義ほか：橋梁用マスコンクリートにおける二成分系低発熱型高流動コンクリートの開発(その1)，本四技報，Vol. 17, No. 62, 1992, 4