

論文 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリート用多機能混和剤の開発

木之下 光男*1・黒田 萌*2・橋本 学*3・松下 哲郎*4

要旨: セメント・コンクリートの製造エネルギーと CO₂ の削減を目的とした高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートを対象として、普通コンクリート向け化学混和剤の開発を行った。既存の化学混和剤を使用した時の課題を明らかにし、課題を解決するための検討を行った。検討の結果、1) 練混ぜ後の流動性が経時的に大きく低下する。2) ブリーディングの発生量が多い。3) 水和熱による高温履歴を受けた硬化体の圧縮強度が標準養生硬化体に比べて低下する等々、複数の改善すべき課題が見出された。これらの課題を改善するために筆者らは分散剤を改良し、更に流動保持剤や凝結遅延剤を組み合わせた新しい多機能混和剤を開発した。

キーワード: CO₂ 削減, 高炉スラグ高含有セメント, コンクリート, 混和剤, 分散剤, 凝結遅延剤

1. はじめに

近年、セメント・コンクリートの製造エネルギーと CO₂ の削減を目的として、製造プロセスで焼成が不要である高炉スラグ微粉末を多量に含有する高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートに大きな期待が寄せられている^{1),2)}。筆者らは、土木および建築用途における水セメント比が 45% および 50% の普通コンクリート向け配(調)合において、高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートに最適な化学混和剤(以下単に混和剤という)を新しく開発することを目的とした。

この用途の混和剤としては、特に経済性を重視する必要があるため、高性能 AE 減水剤より経済性のよい高性能タイプの AE 減水剤(以下多機能混和剤という)の JIS 規格(コンクリート用化学混和剤: JIS A 6204)に適合する混和剤を対象とした。既存の混和剤を調査したところ、1) 練混ぜ後の流動性が経時的に大きく低下する。2) ブリーディングの発生量が多い。3) 水和熱による高温履歴を受けた硬化体の圧縮強度が標準養生硬化体に比べて大きく低下するなど、複数の改善すべき課題が見出された。前記 1) と 2) のフレッシュコンクリートの課題では、混和剤の減水成分であるポリカルボン酸(塩)系化合物を改良合成し、特定の流動保持剤を一液化することによって問題が改善できることを見出した。また、前記 3) の硬化コンクリートの課題では、特に練混ぜ温度が高い時期(夏期)に練り混ぜると、高温履歴を受けた硬化体の強度が低下するという問題を改善することが必要とされた。その改善方法として、特定の種類の凝結遅延剤を添加して高炉スラグ高含有セメントの初期水和を抑制することにより、高温履歴を受けた硬化体の強度が増進し、改善できることを見出したので報告する。

2. 実験概要

2.1 有機系使用材料

2.1.1 既存の混和剤

既存の混和剤として、メタクリル酸(塩)系ポリカルボン酸化合物(D-1)、変成リグニンスルホン酸化合物(D-3)とオキシカルボン酸(D-4)を一液混合した 3 つの成分から構成される高性能タイプの AE 減水剤(AD-1)を改良前の対象品として用いた。

2.1.2 分散剤

メタクリル酸(塩)系ポリカルボン酸化合物の化学構造式³⁾を図-1 に示す。改良した分散剤(D-2)は、共重合モノマーの比率(図-1 中の a と b の比率)を調整し、セメントへの吸着点となる a の比率を減じて合成したものを使用した。

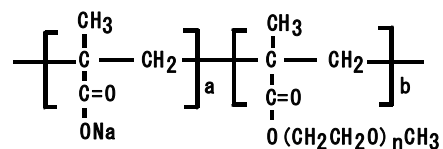


図-1 メタクリル酸(塩)系ポリカルボン酸化合物の化学構造

2.1.3 流動保持剤

流動保持剤として種々の化合物を検討した結果、有機酸を主成分とする流動保持成分(FR)を使用した。

2.1.4 多機能混和剤

分散剤(D-2)と流動保持剤(FR)と変成リグニンスルホン酸化合物(D-3)の 3 成分を一液混合したものを多機能混和剤の試作品とした。D-2/FR = 45/55(質量比)の混合物 100 部に対し、D-3 を 40 部添加した混合物を試作品 1

*1 竹本油脂(株) 第三事業部 参与 博士(工学) (正会員)

*2 竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 コンクリートグループ 研究員 修士(工学)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 修士(工学) (正会員)

*4 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部門 研究員 博士(工学) (正会員)

とし、D-2/FR =60/40(質量比)の混合物 100 部に対し、D-3 を 30 部添加した混合物を試作品 2 とした。試作品はいずれも 20%濃度の水溶液に調整して使用した。

2.1.5 凝結遅延剤

凝結遅延剤は一般的に知られている代表的な化合物⁴⁾の中から 3 種類(R-1,R-2,R-3)を選んで使用した。

2.1.6 AE 剤, 消泡剤

AE 剤として AE-1 を、消泡剤として DF-1 を用いた。以上説明した有機系混和材料を表-1 にまとめて示す。

2.2 有機系材料以外の使用材料

2.2.1 高炉スラグ高含有セメント

使用した高炉スラグ高含有セメント(密度 2.98g/cm³, 記号 ECM1)の概要を表-2 に示す。本稿では高炉セメントの JIS 規格(高炉セメント C 種)に適合する高炉スラグ高含有セメントを使用した。また、比較用として普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³, 記号 N), 高炉セメント B 種(密度 3.04g/cm³, 記号 BB)を用いた。

2.2.2 骨材

細骨材として、大井川水系産陸砂(密度 2.57g/cm³, FM2.73, 記号 S1), 石灰砕砂混合砂(密度 2.62g/cm³, FM2.61, 記号 S2), 山砂砕砂混合砂(密度 2.63g/cm³, 記号 S3), 粗骨材として、岡崎産碎石(密度 2.66g/cm³, 記号 G1), 石灰岩碎石 2005(密度 2.70g/cm³, 記号 G2), 碎石 2015 と碎石 1505 の混合碎石(密度 2.65g/cm³, 記号 G3)を用いた。

2.3 試験方法

2.3.1 試験方法(1) モルタル試験

モルタルの配(調)合は、水セメント比(W/C)50%{砂セメント比(S/C)2.7}及び W/C 45%(S/C 1.8)で行った。いずれの場合も消泡剤を用いて空気量を抑制した。モルタルの練混ぜは JIS R 5201 に準拠して行い、フロー値の測定は JIS R 5201 に規定されているフローコーンを用いた 0 打フローを暫定的にフロー値とした。また、モルタル試験による簡易断熱養生は、ホバートミキサで練り混ぜた直後のモルタルをφ5×10cmのサミットモールドに充填した供試体を、図-2 に示す厚さ 20mm の発泡スチロール製(熱伝導率 0.04W/mK 程度)の簡易断熱箱(330×400×268mm)に入れて所定の材齢まで養生した。

2.3.2 試験方法(2) コンクリート試験

(a)コンクリートの配(調)合

普通コンクリートの用途において、建築用(スランブ 18cm)コンクリートおよび土木用(スランブ 8cm)コンクリートの配(調)合を表-3 に示す。空気量は 4.5±1.0%とした。

(b)試験方法

練混ぜは、強制パン型ミキサ(容量 55L)に全材料を投入後 90 秒間練り混ぜたのち排出した。試験温度は、20℃

表-1 使用した有機系混和材料

分類	記号	内容
分散剤	D-1	ポリカルボン酸化合物(改良前)
	D-2	ポリカルボン酸化合物(改良後)
	D-3	変性リグニンスルホン酸化合物
	D-4	オキシカルボン酸
流動保持剤	FR	有機酸
凝結遅延剤	R-1	サッカロース
	R-2	高分子量の糖類誘導体
	R-3	オキシカルボン酸塩
AE 剤, 消泡剤	AE-1, DF-1	空気量調節剤
多機能混和剤	試作品 1	D-2/FR/D-3=32/39/29 (比率)
	試作品 2	D-2/FR/D-3=46/31/23 (比率)
既存 AE 減水剤	AD-1	高機能タイプ(改良前)

表-2 使用した高炉スラグ高含有セメント

記号	名称	試作セメントの概要
ECM1	高炉スラグ高含有セメント(スラグ粉末度 4000 級)	スラグ含有率: 60~65 質量%, SO ₃ 量: 3.60%, 高炉スラグ微粉末の比表面積: 4410cm ² /g

表-3 コンクリートの配(調)合

記号	W/C (%)	Slump (cm)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	S1	S2	G1	G2
ECM1-50A	50	18	165	330	838	—	939	—
ECM1-45A	45	18	180	400	—	760	—	948
ECM1-50C1	50	8	145	290	856	—	1011	—
ECM1-50C2	50	8	150	300	S3,	852	G3,	1007

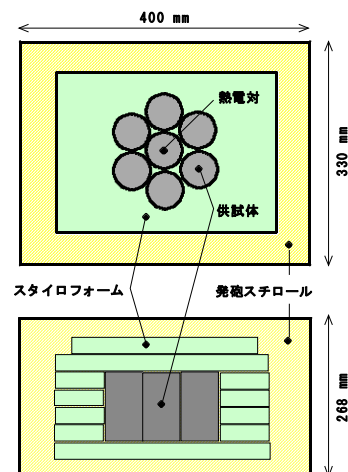


図-2 モルタルの簡易断熱箱

及び 30℃, 練り量は 40L とした。スランブは JIS A 1128, 凝結時間は JIS A 1147, ブリーディング量は JIS A 1123, 圧縮強度は JIS A 1108, 乾燥収縮は JIS A 1129-3, 凍結融解試験は JIS A 1148 に準拠した。また、コンクリート試

験による簡易断熱養生は、練り混ぜた直後のコンクリートをφ10×20cmのサミットモールドに充填した供試体を作製し、内寸が500mm×500mm×400mmで、周囲6面を厚さ約300mmの発泡スチロール製の断熱材(熱伝導率0.04W/mK程度)で覆った簡易断熱箱に供試体9本を静置し、中心位置の供試体1本に熱電対を設置して内部の温度上昇履歴を測定した。所定の材齢まで練混ぜ時の温度環境下に簡易断熱箱を静置して、簡易断熱養生した供試体の圧縮強度を測定した。

3. 実験結果

3.1 モルタル試験結果

3.1.1 モルタルの流動性

高炉スラグ高含有セメントを使用したW/C50%(S/C2.7)のモルタル配(調)合条件で、分散剤(D-1)及び分散剤(D-2)、更に分散剤(D-1)に流動保持剤(FR)を15%含有させたもの(D-1+流動保持剤)及び分散剤(D-2)に流動保持剤(FR)を15%含有させたもの(D-2+流動保持剤)の計4種について、練混ぜ後のフロー値が180±10mmの範囲に入るように添加量を調節しながらモルタル試験を行った。練混ぜ後90分間の流動性の経時変化を測定した結果を図-3に示す。分散剤(D-2)は分散剤(D-1)に比べて流動保持性が改善した。また、双方の分散剤とも流動保持剤を含有することによって流動保持性が向上し、D-2+流動保持剤が良い結果を示した。また、流動保持剤を一定量含有させた分散剤を用いて、セメントの種類を変えたときの流動性比較試験の結果を図-4に示す。普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、高炉スラグ高含有セメントの順に流動性が向上し、いずれのセメントにおいても分散剤(D-2)は分散剤(D-1)に比べてモルタルの流動性が良好である結果が得られた。

3.1.2 簡易断熱養生したモルタルの強度発現性

高炉スラグ高含有セメントを使用したW/C45%(S/C1.8)のモルタル配(調)合条件で、20℃及び30℃の温度で練り混ぜたモルタル供試体を前記の簡易断熱箱に入れて簡易断熱養生試験を行った。圧縮強度測定結果を標準養生の結果と併せて図-5に示す。いずれの練混ぜ温度においても、簡易断熱養生した供試体の圧縮強度(材齢28日)は、標準(20℃)養生した供試体の圧縮強度に比べて10~15%程度低下した。すなわち、水和熱による高温履歴を受けた高炉スラグ高含有セメント硬化体の圧縮強度は、標準養生硬化体の強度に比べて低下し、S値(標準養生した供試体の強度と簡易断熱養生した供試体の強度の差)が大きい(20℃で6.4N/mm²、30℃で6.9N/mm²)ことが確認された。この問題を解決するために、D-2+流動保持剤を使用し、20℃の温度で練り混ぜる際にモルタルに各種の凝結遅延剤(R-1,R-2,R-3)を一

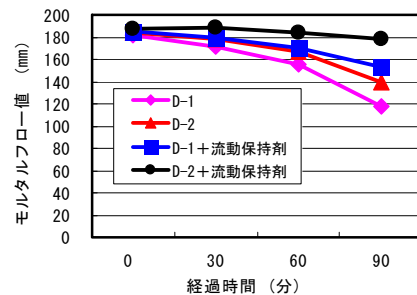


図-3 モルタルの流動性

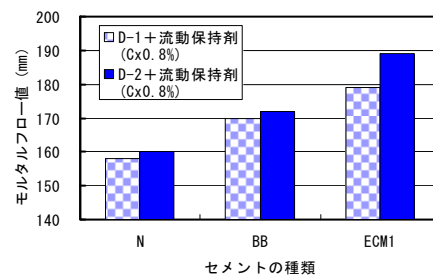


図-4 セメントの種類によるモルタルの流動性

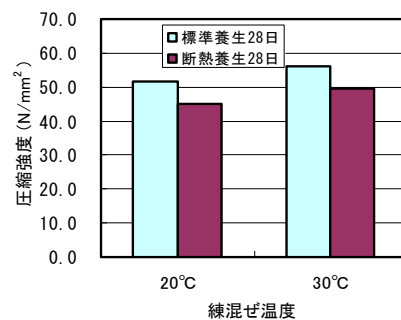


図-5 養生温度の違いによる強度発現の比較

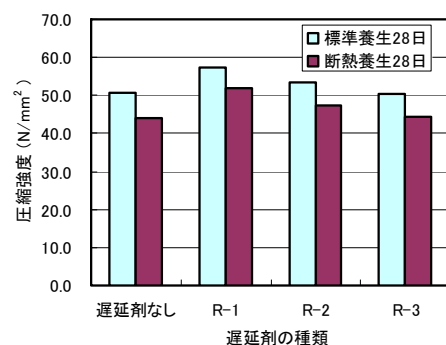


図-6 各種凝結遅延剤を添加した強度発現の比較

定量(C×0.1%)添加して強度発現性状を調べた。その結果を図-6に示す。材齢28日の強度で判断すると、R-1(サッカロース)とR-2(高分子量の糖類誘導体)において標準養生及び簡易断熱養生の双方に強度増進効果が認められ、R-3(オキシカルボン酸塩)にはその効果は認めら

れなかった。図-7に凝結遅延剤を添加した簡易断熱温度上昇履歴を示した。凝結遅延剤を添加して水和反応を遅らせても、凝結遅延剤の種類によっては強度増進効果が異なることが見出された。今回の実験の範囲内では、オキシカルボン酸塩よりも凝結遅延性が大きい糖類の R-1 が最も優れた強度増進効果が得られた。また別の実験で、凝結遅延剤の添加量を一定量以上にした場合にも同様な傾向が確認された。一つの理由は凝結遅延剤の化学構造の違いによる影響と推察される。しかし、簡易断熱養生において強度が増進したが、同時に標準養生においても強度が増進したことによって、S 値を小さくすることはできなかった。今後は異なる種類のセメント(N, BB)についても前記した効果を調べる予定である。

3.2 コンクリート試験結果

3.2.1 流動保持性

表-3 の記号 ECM1-50A の建築用途(スランブ 18cm)の配(調)合条件で、試作品 1、試作品 2 及び既存品(AD-1)を用いて流動保持性についての比較試験(20℃)を行った。結果を表-4 に示す。既存品(AD-1)に比べて、試作品 1→試作品 2 の順に流動保持性が向上した。すなわち、変性リグニンスルホン化合物(D-3)含有量が少なく分散剤(D-2)の含有量が多いものが初期の流動性及び流動保持性において有利な傾向となり、モルタル試験で得られた結果に準ずる傾向が得られた。また、表-3 の記号 ECM1-50C1 の土木用途(スランブ 8cm)の配(調)合条件で、流動保持性についての比較試験(20℃)を行った結果を表-5 に示す。土木用途の硬練りの場合においても、既存品(AD-1)に比べて、試作品 1→試作品 2 の順に流動性及び流動保持性が向上した。

3.2.2 ブリーディング試験

表-3 の記号 ECM1-50A の配(調)合条件で、ブリーディング試験(20℃)を行った結果を図-8 に示す。既存品(AD-1)に比べると、試作品 1→試作品 2 の順にブリーディング量が減少した。また、表-3 の記号 ECM1-50C2 の配(調)合条件で、ブリーディング試験(20℃)を行った結果を図-9 に示す。ブリーディング量は基本的には、高炉スラグ微粉末を使用することにより、無混入に比べて大きく増加することはない⁵⁾とされているが、使用材料の種類や配(調)合条件、練混ぜ温度や養生条件などによっては変動する場合があると推測される。本実験では既存品(AD-1)を用いた場合に、高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説⁶⁾で定めるブリーディング量の上限值である $0.30\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を超えるような大きな数値とはならなかったが、 $0.20\text{cm}^3/\text{cm}^2$ の比較的大きな数値となった。これに対し、試作品 1、試作品 2 を用いた場合は、いずれもブリーディング量が低下し、試作品 2 では $0.10\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度の値が得られ、既存品(AD-1)を用い

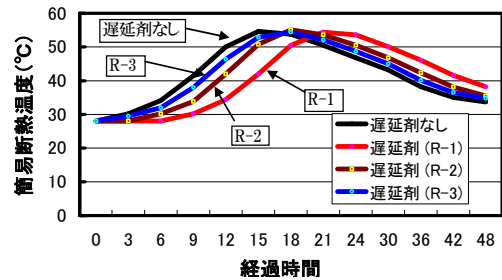


図-7 簡易断熱温度上昇履歴 (モルタル)

表-4 流動保持性比較(建築用途)

混和剤種類	添加量 (C×%)	スランブ (cm)		スランブ * 残存率 (%)
		直後	60分後	
AD-1	1.0	18.4	12.5	68
試作品 1	0.9	19.8	14.6	74
試作品 2	0.8	20.1	16.1	80

*スランブ残存率

$$= (\text{練混ぜ直後のスランブ} / \text{60分後のスランブ}) \times 100$$

表-5 流動保持性比較(土木用途)

混和剤種類	添加量 (C×%)	スランブ (cm)		スランブ 残存率 (%)
		直後	60分後	
AD-1	1.0	10.4	6.4	62
試作品 1	0.9	9.8	7.0	71
試作品 2	0.8	9.6	7.7	80

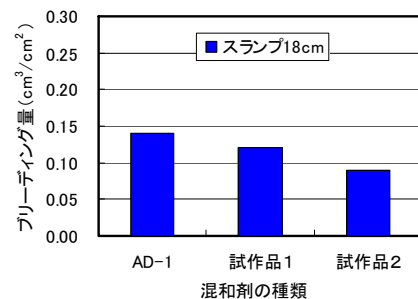


図-8 ブリーディング量の比較 (建築用途)

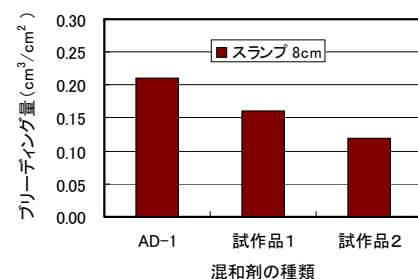


図-9 ブリーディング量の比較 (土木用途)

た時よりも改善された結果が得られた。これらの混和剤が既存品(AD-1)に比べてブリーディング量が減少した理由は明らかではないが、改良前の分散剤(D-1)と改良後の分散剤(D-2)の化学構造の違いやFR及びD-3の混

合使用の組成比率が異なる等の影響と推察される。

3.2.3 簡易断熱養生したコンクリートの強度発現性

高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは環境温度の影響を受けやすく、その影響は高含有したセメントほど大きいことが指摘されている^{7),8)}。すなわち、コンクリートが材齢初期に高温履歴を受けると、標準養生した場合と比べて初期強度は増加するものの、長期材齢では強度発現が停滞することが知られている。モルタル試験結果を参考にして、表-3における記号 ECM1-45A の配(調)合で、夏期を想定し温度 30℃の環境下で練り混ぜて供試体を作製した。混和剤は表-6に示すように試作品 2 を減水剤として用い、凝結遅延剤を添加しないもの、各種凝結遅延剤を一定量(C×0.1%)外割で添加したものについてフレッシュ性状を測定した。また、簡易断熱養生した供試体及び標準養生した供試体の材齢 28 日における強度発現を調べた。結果を図-10に示す。凝結遅延剤無添加で簡易断熱養生した供試体は、標準養生した供試体に比べて強度が顕著に低下した。一方、R-1とR-2において標準養生及び簡易断熱養生の双方に強度増進効果が認められ、R-3にはその効果は殆ど認められなかった。R-1を添加したものは最も効果があり、無添加の標準養生した供試体よりも簡易断熱養生した供試体の強度が上回る結果が得られ、モルタルでの試験結果と同様な傾向を示した。図-11にコンクリート供試体の簡易断熱温度上昇履歴を示し、表-7に最高温度、最高温度到達時間及び初期水和速度の抑制効果を把握するための凝結開始後直近と考えられる 35℃到達時間を示す。結果として、35℃到達時間が遅い(水和速度を遅らせる)ほど、簡易断熱養生での強度は高くなる傾向が認められた。なお、別途試験した結果では、R-1(C×0.1%)を使用した 20℃の凝結時間は無添加に比べ約 200 分程度遅れることを確認した。

3.2.4 長さ変化率

表-3における記号 ECM1-45A の配(調)合で、試作品 2 を用いてセメントの種類による長さ変化率(乾燥収縮)の比較試験を行った。結果を図-12に示す。図から明らかのように、高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートは、その特長の一つとして、普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種を用いたコンクリートに比べて乾燥収縮が小さい¹⁾ことが改めて確認された。

3.2.5 JIS 規格項目の試験

試作品をコンクリート用化学混和剤の製品として実用化するためには、まず、JIS 規格(JIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」)に適合することが必要条件とされる。また JIS 試験では、普通ポルトランドセメントを使用して品質項目の規格試験値の可否を判断することになっている。本検討では試作品 2 を用いて AE 減水剤標

表-6 フレッシュ性状

混和剤(減水剤)種類(C×%)	遅延剤(C×%)	AE-1, DF-1(C×%)	Slump(cm)	Air(%)
試作品 2(0.75)	無添加	0.003, 2×10 ⁻⁴	20.2	3.5
試作品 2(0.72)	R-1(0.1)	0.003, 2×10 ⁻⁴	21.6	3.6
試作品 2(0.70)	R-2(0.1)	0.003, 2×10 ⁻⁴	21.4	3.7
試作品 2(0.70)	R-3(0.1)	0.003, 2×10 ⁻⁴	21.2	3.2

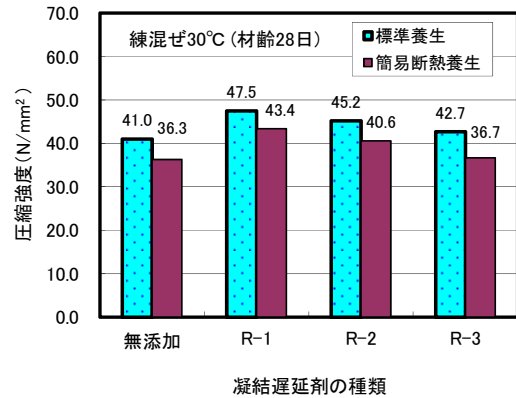


図-10 凝結遅延剤が強度発現に及ぼす影響

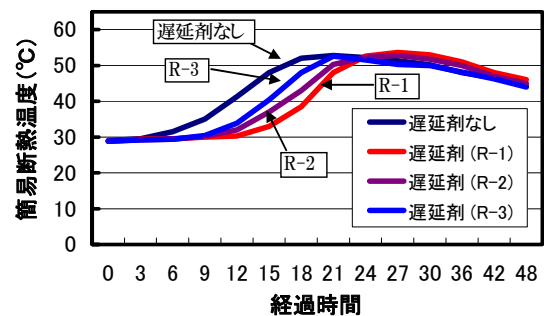


図-11 簡易断熱温度上昇履歴(コンクリート)

表-7 コンクリートの簡易断熱温度上昇試験

混和剤種類	最高温度(℃)	最高温度到達時間(hr)	35℃到達時間(hr)
試作品 2	52.9	20.3	8.8
試作品 2+ R-1	52.6	27.4	16.3
試作品 2+ R-2	53.1	26.1	14.6
試作品 2+ R-3	53.6	22.7	12.8

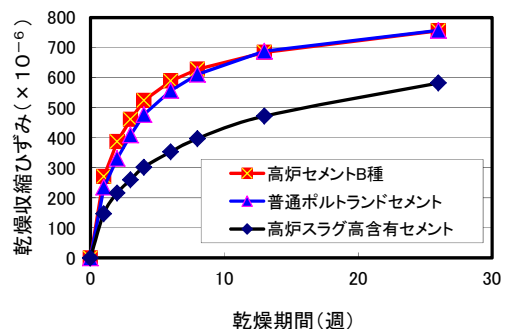


図-12 長さ変化率(乾燥収縮ひずみ)の比較

準形の試験項目について試験した。結果を表-8に示す。いずれの項目においても適合することが確認できた。また、試作品2に凝結遅延剤を添加して用いる場合は、夏期に限定使用するAE減水剤遅延形を検討中である。

4. まとめ

高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリート用多機能混和剤の開発を目的として、流動保持性の確保、ブリーディング量の低減、高温履歴を受けた硬化体の強度低下対策等の課題について検討した結果、以下(1)～(6)の知見が得られた。

- (1) 流動保持性を確保する課題は、分子設計により改良合成したポリカルボン酸分散剤(D-2)と特定の流動保持剤(FR)を組み合わせることによって改善した。
- (2) ブリーディング量を低減する課題は、ポリカルボン酸(塩)系分散剤(D-2)と流動保持剤(FR)と変成リグニンスルホン酸化合物(D-3)の3成分を適正な比率でバランスよく含有する多機能混和剤にすることによって改善した。
- (3) 夏期の環境条件下で高温履歴を受けた硬化体の強度低下を抑制する課題は、凝結遅延剤(R-1)を試作品2の外割で添加することによって改善した。しかし、簡易断熱養生した供試体の強度は増進したが、同時に標準養生した供試体の強度も増進したため、S値を小さくすることはできなかった。
- (4) 高温履歴を受けた硬化体の強度を大きく増進させる効果を得るために、凝結遅延剤をC×1.0%以上の添加量で使用する場合には、凝結時間が過度に遅延して硬化不良を引き起こさないように注意して使用する必要がある。
- (5) 混和剤原料として、原料コストの高い石油原料由来のポリカルボン酸(塩)系分散剤と、それに比べて原料コストが比較的安価な植物原料由来の流動保持剤及び変成リグニン化合物を複合使用することによって、高性能AE減水剤に比べて経済性がよく、高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの製造に適した多機能混和剤、すなわちAE減水剤(高機能タイプ)を提案した。
- (6) 今後の課題として、凝結遅延剤(R-1)よりも更に強度増進性の優れた有機系混和剤についての検討を継続すると同時に、初期の水和速度と長期強度発現の関係について詳しく調べる予定である。

参考文献

- 1) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉渕 清, 木之下光男, 釜野博臣: エネルギー・CO₂ ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, Vol.48,

表-8 JIS A 6204 による試験結果

項目	AE減水剤標準形(I種)		
	JIS A 6204による規定値	試作品2の試験値	
減水率(%)	10以上	15	
ブリーディング量の比(%)	70以下	41	
凝結時間の差(分)	始発	-60~+90	+15
	終結	-60~+90	-5
圧縮強度比(%)	材齢7日	110以上	126
	材齢28日	110以上	112
長さ変化比(%)	120以下	97	
凍結融解に対する抵抗性(相対動弾性係数%)	60以上	81	
塩化物イオン量(kg/m ³)	0.02以下	0.00	
全アルカリ量(kg/m ³)	0.30以下	0.08	

No.9, pp.69-73, 2010

- 2) Toshio Yonezawa, Etsuo Sakai, Kiyoshi koibuchi, Mitsuo Kinoshita, "High-Slag Cement and Structures for Substantial Reduction of Energy・CO₂", Proceedings, fib Symposium Stockholm, pp.463-466, 2012
- 3) 木之下光男: 土木建築用高分子界面活性剤の新しい技術開発, オレオサイエンス, Vol.49, No.4, pp.117-126, 2009
- 4) 日本材料学会編: コンクリート混和材料ハンドブック, pp.137, 2004
- 5) 日本建築学会編: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの技術の現状, pp.16, 1992
- 6) 日本建築学会編: 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, pp.84, 1991
- 7) 伊代田岳史, 兼安 真司, 檀 康弘, 前田 悦孝: 高炉スラグ微粉末を高含有したセメントの温度依存特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.139-144, 2005
- 8) 伊代田岳史, 檀 康弘: 高炉セメント中の高炉スラグ微粉末の反応速度における養生温度の影響, コンクリートエンジニアリングシリーズ 74, pp.59-62, 2007

謝辞: 本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成による「省エネルギー革新技術開発事業/実用化開発/エネルギー・CO₂ ミニマム(ECM)セメント・コンクリートシステムの研究開発」の一環として実施した。共同研究者である東京工業大学 坂井悦郎教授をはじめ、(株)竹中工務店, 鹿島建設(株), (株)デイ・シイ, 日鉄住金高炉セメント(株), 太平洋セメント(株), 日鉄住金セメント(株)および竹本油脂(株)の関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。