# 論文 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートへの収縮低減型AE減水剤 の適用について

俵 道和\*1·岩井 八\*2·齊藤 和秀\*3·呉 承寧\*4

要旨:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに収縮低減型 AE 減水剤を適用した際の強度特性,変形性状, 長さ変化率,中性化抵抗性,凍結融解抵抗性,塩化物イオン浸透抵抗性およびひび割れ抵抗性などの耐久性 について実験的検討を行った。その結果,収縮低減型 AE 減水剤を用いることにより高炉スラグ微粉末を用 いたコンクリートの収縮が抑制され,ひび割れ抵抗性および塩化物イオン浸透抵抗性が向上するとともに中 性化抵抗性,凍結融解抵抗性については同等の性能を有することが確認された。 キーワード:高炉スラグ微粉末,収縮低減型 AE 減水剤,収縮,中性化,凍結融解,塩分浸透

#### 1. はじめに

近年,海洋からの飛来塩分や寒冷地で道路に散布され る凍結防止剤などによるコンクリート構造物の早期劣 化が問題となっている。プレストレストコンクリート構 造物(以下, PC構造物)は、ひび割れを制御できること から耐久性の高い構造物と考えられていたが, PC構造物 についても早期劣化が問題視されている。

高炉スラグ微粉末は、銑鉄を作るときの副産物であり セメントのような焼成工程がなくCO<sub>2</sub>の発生を大幅に抑 制できる環境に優しい材料である。また、高炉スラグ微 粉末を用いたコンクリートは、塩化物イオン浸透抵抗性 の向上効果やアルカリ骨材反応の抑制効果を有してい るため、コンクリート混和材として高炉スラグ微粉末 (以下、BFS)を使用する事例が増えている。しかしな がら、PC 構造物の場所打ちコンクリートに BFS を使用 した場合に、自己収縮や乾燥収縮により生じるひび割れ が懸念されている。一方、近年収縮ひび割れを制御・抑 制する技術として、減水成分と収縮低減成分を含有する 収縮低減型の AE 減水剤(以下、AESR)が開発された。

本研究では,BFSを用いた,設計基準強度 30MPa と 50MPa のコンクリートに対して,収縮低減型 AE 減水剤 の収縮低減効果および耐久性向上効果について実験的 検討を行った。収縮低減効果についてはコンクリートの 長さ変化率および一軸拘束ひび割れ状況で検討し,耐久 性向上効果については中性化抵抗性,凍結融解抵抗性お よび塩化物イオン浸透抵抗性により検討を行った。

# 2. 試験の概要

#### 2.1 使用材料

コンクリートの収縮ひび割れおよび耐久性に及ぼす

\*1 オリエンタル白石(株) 技術研究所主任研究員 工修(正会員)

\*2 日鉄住金高炉セメント(株)

\*3 竹本油脂(株)(正会員)

\*4 愛知工業大学 工学部都市環境学科教授 博士(工学)(正会員)

混和材および混和剤種類の違いによる影響を調べるた めに、PC 構造物に使用されている早強ポルトランドセ メントを選定し、さらに、PC 構造物の塩害や ASR 抑制 対策として使われている高炉スラグ微粉末 6000 を早強 ポルトランドセメントに対して 50%置換した 2 種類の 結合材について検討を行った。コンクリートの各使用材 料の種類,成分および物性値を表-1 に示す。収縮低減 型 AE 減水剤は、変性リグニンスルホン酸化合物、ポリ カルボン酸コポリマーとポリエーテル誘導体(収縮低減 成分)の複合物を一液化したものであり、JISA 6204「コ ンクリート用化学混和剤」AE 減水剤標準形(I種)に 適合し、コンクリートの収縮低減率を 10~20%程度を目 的として開発された混和剤である。

## 2.2 コンクリートの配合

本試験で使用したコンクリートの配合を表-2に示す。

表一1 使用材料表一1 使用材料				
材料	記号	種類・成分・物性値		
セイント	С	早強ポルトランドセメント		
		密度 3.14g/cm <sup>3</sup>		
	BFS	高炉スラグ微粉末		
油毛中牛牛		比表面積=5760cm²/g,		
化比个日本分		密度=2.91g/cm <sup>3</sup> ,		
		SO <sub>3</sub> =3.12%		
細骨材	S	砕砂, 密度=2.66 g/cm <sup>3</sup>		
v1 .国. ++	G	2005 砕石,		
相目的		密度=2.66 g/cm <sup>3</sup>		
AE 減水剤	AE	リグニン系化合物,減水率 15%		
高性能	CD	ポリカルギン酚亥 油水玄 100/		
AE 減水剤	SP	ホリカルホン酸示, 減小平 18%		
収縮低減型 AE 減水剤	AESR	変性リグニンスルホン酸化合物,		
		ポリカルボン酸コポリマーとポリ		
		エーテル誘導体の複合物、減水率		
		15%		

	水社会社は	细母壮索	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )						
配合	減水剤 種類	水市 日 初 比 W/B <sup>※</sup> (%)	が山 日 小川 中立 s/a (%)	水 W	セメント C	高炉スラグ 微粉末 BFS	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤
H30	AE	49	46	165	337	0	835	981	1.852
BFS30	AE	49	46	165	168	168	830	975	1.852
BFS30AESR	AESR	49	46	165	168	168	830	975	5.051
H50	SP	37	42	165	446	0	724	1000	2.230
BFS50	SP	37	42	165	223	223	718	991	1.784
BFS50AESR	AESR	37	42	165	223	223	718	991	6.243

表-2 コンクリートの配合

**%**B=C+BFS

水結合材比は,設計基準強度 30MPa と 50MPa を得ら れるため、49%と37%とした。単位水量および細骨材率 は、比較するために一定とした。目標スランプを 12.0±2.5cm,目標空気量を4.5±1.0%と設定し、減水剤 とAE剤の添加量によって調整した。

# 2.3 試験項目

本研究では,**表**-3 に示す9項目について検討を行った。拘束ひび割れ試験については,ひび割れ低減対策を施した試験体に短期間でひび割れを発生させるために, 日本コンクリート工学会自己収縮研究委員会<sup>1)</sup>の「コン クリートの自己収縮応力試験方法(案)(改訂版 2002)」 に示される試験体形状にひび割れ誘発目地を設置した。

# 3. 試験結果

### 3.1 フレッシュ性状および強度特性・変形性状

各種コンクリートのフレッシュ性状の試験結果を表 -4 に示し, 圧縮強度, 割裂引張強度および静弾性係数 を図-1~3 に示す。その結果, 早強ポルトランドセメン ト単味の配合が BFS を混和した配合に比べて材齢 7 日 までの圧縮強度, 割裂引張強度および静弾性係数は大き くなった。その後の材齢 28, 91 日については BFS を添 加した配合が早強ポルトランドセメント単味の配合よ りも増加した。BFS と AESR を組み合わせた配合につ いて目標強度を満足する結果が得られたが, 水結合材比 にかかわらず材齢 91 日の圧縮強度, 静弾性係数および 割裂引張強度については通常の AE 減水剤を用いた場合

表-3 試験項目

試験種類	試験方法		
圧縮強度試験	JIS A 1108		
割裂引張強度試験	JIS A 1113		
静弹性係数試験	JIS A 1149		
<b>乾</b> 榀巾綻試驗	JIS A 1129-3		
毕心,朱北文,州日中八初天	(ダイヤルゲージ法)		
均市ひび割わ試験	自己収縮研究委員会試験		
拘束いい討れば被	方法(案) <sup>1)</sup>		
促進中性化試験	JIS A 1152, JIS A 1153		
凍結融解試験	JIS A 1148		
塩化物イオン拡散係数	JSCE-G 571-2007		
電気泳動試験			
塩化物イオン	ISCE C 572 2010		
浸せき試験	JSCE-G 572-2010		

表-4 フレッシュ性状の試験結果

配合	スランプ(cm)	空気量(%)
H30	11.5	4.5
BFS30	9.5	3.3
BFS30AESR	13.5	5.7
H50	9.5	4.9
BFS50	14.5	4.2
BFS50AESR	14.5	5.2

より伸びが小さくなる傾向が確認された。これは,空気 量の違いによる影響が考えられるため,空気量を合わせ て再検討を行う必要があると考えられる。

## 3.2 乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮による長さ変化率を図-4,5



に示す。長さ変化率は、材齢1日で脱枠し材齢7日まで 20℃水中養生を行った後に基長を測定した。その後は, 温度 20℃,湿度 60%の恒温恒湿室で保管した。

長さ変化率の測定結果より、配合 BFS は高炉スラグ 微粉末を用いたにもかかわらず,配合Hと同等の長さ変 化率を示した。この原因は、本試験では石こう添加型の BFS を用いており、初期膨張による自己収縮の抑制効果 <sup>2)</sup> が影響しているものと考えられる。

ベース配合である H30 と H50 について, 材齢 6 ヶ月 での長さ変化率は同程度であった。一般に単位水量は少 ないほど,水セメント比は小さいほど乾燥収縮が小さい ことが知られており、本研究においても H30 は H50 に 比べて乾燥収縮が小さい傾向にあったが、単位水量が同 じであるためその差はわずかであった<sup>3)</sup>。高炉スラグ微 粉末を用いたコンクリートに収縮低減型 AE 減水剤を使 用した場合の収縮低減効果について、収縮低減型 AE 減 水剤を用いた BFS30AESR と BFS50AESR は、普通の AE 減水剤または高性能 AE 減水剤を用いた BFS30 と BFS50 と比較して乾燥収縮による長さ変化率が材齢 6 ヶ月の時点でそれぞれ10%と12%小さくなった。

#### 3.3 拘束ひび割れ試験

0

-100

-200

-300

-400

-500

-600

-700

0

50

長さ変化率(×10<sup>-6</sup>)

コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を検討するため

H30

100

材齢(日)

BFS30

150



に、各種配合について3本の拘束試験体を製作し、拘束 鉄筋のひずみ変化を測定した。試験体は、材齢7日まで 湿潤養生を行った。その後は温度 20℃, 相対湿度 60% の室内に保管した。図-6 に拘束ひび割れ試験体形状図 を示す。100×100×1000mm 角柱のコンクリート試験 体に埋め込まれた D22 異型鉄筋のひずみを測定し、式 (1)を用いてコンクリートの収縮拘束応力を算出した。







図-7 設計基準強度 30MPa コンクリートの収縮拘束応力 図-8 設計基準強度 50MPa コンクリートの収縮拘束応力

$$\sigma_{c} = - (E_{s} \times \epsilon_{s} \times A_{s}) / A_{c}$$
(1)

ここに, σ<sub>c</sub>:コンクリートの収縮拘束応力(MPa) E<sub>s</sub>:鋼材の弾性係数(MPa)

A<sub>s</sub>:鋼材の中央部断面積(mm<sup>2</sup>)

A<sub>c</sub>:コンクリートの純断面積 (mm<sup>2</sup>)

同じコンクリートを用いても拘束試験体にひび割れ が発生する時期が異なるため、拘束試験体について第2 番目にひび割れが発生した試験体の材齢と収縮拘束応 力の関係を代表として図-7、8に示す。この図について、 コンクリートの収縮拘束応力が急激に減少する時がコ ンクリートにひび割れが発生したことを示している。図 -7に示される設計基準強度 30MPa コンクリートの収 縮拘束応力の測定結果から、H30 は材齢 47 日(3体の 平均値は 52 日)、BFS30 は材齢 117 日(3体の平均値は 111 日)でひび割れが発生したことが確認された。また、 図-8 に示される設計基準強度 50MPa コンクリートの 収縮拘束応力の測定結果から、H50 は材齢 104 日(3体 の平均値は 105 日)、BFS50 は 103 日(3体の平均値は 103 日)でひび割れが発生したことが確認された。

一方,収縮低減型 AE 減水剤を用いた BFS30AESR お よび BFS50AESR は材齢 120 日までひび割れは発生しな かった。これより,収縮低減型 AE 減水剤は高炉スラグ 微粉末を用いたコンクリートの自由収縮を低減させ,拘 束ひび割れを抑制することが確認された。

#### 3.4 凍結融解試験

既往の研究では、収縮低減剤の混和によってコンクリ ートの凍結融解抵抗性が低下する場合があるとの報告 がある。その理由については、凍結時に収縮低減成分の 影響により未凍結水を移動させる駆動力が増大すると の報告<sup>4)</sup> や、またAE 剤使用コンクリートの気泡間隔係 数への収縮低減剤成分による影響もあると考えられて いる<sup>5)</sup>。そのため、本試験では通常のAE減水剤と収縮低 減型AE減水剤をそれぞれ用いたコンクリートの凍結融 解抵抗性を確認した。図-9に凍結融解サイクルと相対 動弾性係数の関係を示し、図-10に凍結融解サイクルと 質量減少率の関係を示す。

試験の結果は、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートはいずれも良好な凍結融解抵抗性を示し、通常のAE 減水剤と収縮低減型AE減水剤の混和剤種類による大き な差は確認されなかった。

# 3.5 促進中性化試験

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは,普通ポル トランドセメント単味を用いたコンクリートと比較し て中性化速度係数が大きいことが指摘されており,その





図-9 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

図-11 促進材齢と中性化深さの関係

0.3

促進材齢((「年)

Ω4

05

06

02

٥

01

原因として水酸化カルシウムの生成量が少ないことが 挙げられている<sup>6</sup>。そのため、本試験では比較的中性化 速度の速い、設計基準強度30MPaの高炉スラグ微粉末を 用いたコンクリートについて、通常のAE減水剤と収縮低 減型AE減水剤の混和剤種類による中性化速度係数の差 異について促進中性化試験で検討を行った。

図-11 に促進材齢の平方根と中性化深さの関係を示 す。図中の回帰直線は、中性化深さCが促進期間tの平方 根に比例する $\int t$  則をもとに $C = A \int t$  として導いた回帰 直線である。その結果、配合BFS30コンクリートの中性 化速度係数Aは4.58 (mm/ $\int$ 年)となり、配合BFS30AESR コンクリートの中性化速度係数Aは4.47 (mm/ $\int$ 年) と なり混和剤種類による中性化速度係数に与える影響は 確認されなかった。 求められた中性化速度係数と式(2)を用いて100年後 の中性化深さを推定した。CO2 濃度は、一般的に室内の CO2 濃度として用いられる0.2%を用いた。その結果、配 合BFS30と配合BFS30AESRはともに100年後の中性化深 さが約9mmと算出され、十分な中性化抵抗性があること が確認された。この原因は、これらのコンクリートに用 いた高炉スラグ微粉末6000は比表面積が大きいために 反応性が高く、また早強ポルトランドセメントは普通ポ ルトランドセメントに比べ水和が早く進み、コンクリー トが早期に緻密化したことによる効果によって中性化 が抑制されたものと考えられる<sup>70</sup>。

$$C = A' \sqrt{CO_2/5.0} \cdot \sqrt{t}$$
 (2)

ここに,

C:中性化深さ (mm)

CO<sub>2</sub>: 炭酸ガス濃度(%)

A':促進中性化試験における中性化速度係数 (mm/√年)t:材齢(年)

# 3.6 塩化物イオン浸透抵抗性

コンクリートの塩化物イオン浸透に対するパラメータ ーとして塩化物イオンの拡散係数が用いられる。この見 掛けの拡散係数を直接求める試験方法として、「土木学会 の浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛け の拡散係数試験方法(案)」(以下,浸せき法)がある。 浸せき法に比べ短時間で拡散係数を求める試験方法とし て、「土木学会の電気泳動によるコンクリート中の塩化物 イオンの実効拡散係数試験方法(案)」(以下,電気泳動 法)がある。しかし、ここで求まる拡散係数は、「見掛け の」拡散係数ではなく、コンクリートの細孔溶液中にお ける塩化物イオンの移動のし易さを表す「実効」拡散係 数を測定するものである。また、コンクリート標準示方 書[規準編]<sup>8)</sup>では、浸せき法から求められた見掛けの拡 散係数 D<sub>ae</sub>と電気泳動法から求められた実効拡散係数 D<sub>e</sub> について、式(3)に示される関係式が提案されている。

$$\mathbf{D}_{ae} = \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{D}_e \tag{3}$$

ここに,

D<sub>ae</sub>:見掛けの拡散係数の推定値(cm<sup>2</sup>/年)

D<sub>e</sub>: 実効拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)

- k<sub>1</sub>:コンクリート側, 陰極側溶液側それぞれの塩化物 イオン濃度の釣り合いにかかわる係数
- k<sub>2</sub>:セメント水和物中への塩化物イオン固定化現象に かかわる係数



図-13 配合種類と実効拡散係数の関係

本試験では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート の塩化物イオン浸透抵抗性に及ぼす収縮低減型 AE 減水 剤の影響を調べるために、通常の AE 減水剤または収縮 低減型 AE 減水剤を使用した試験体を用い、浸せき法と 電気泳動法の2種類の試験を行い、見掛けの拡散係数と 実効拡散係数を測定し、さらに、その両者の関係係数  $k_1$ ・  $k_2$ を算出した。材齢 28 日まで 20℃一定の水中養生を行 った後に塩水浸せきおよび電気泳動試験を開始し、浸せ き法については、塩水浸せき材齢 21 ヶ月後に見かけの拡 散係数を測定した。その結果を**表**-5 に示す。

浸せき法で測定したコンクリートの塩化物イオンの見 掛けの拡散係数 D<sub>ae</sub>を図-12 に示す。この図より,収縮 低減型 AE 減水剤を用いたコンクリートは,通常の AE 減水剤を用いたコンクリートに比べ,見掛けの拡散係数 が約 10%小さくなった。一方,電気泳動法で測定したコ ンクリートの実効拡散係数 D<sub>e</sub>を図-13 に示す。同図よ り,電気泳動法で求められた実効拡散係数は浸せき法と 同様の傾向が確認され,収縮低減型 AE 減水剤を用いた コンクリートは,通常の AE 減水剤を用いたコンクリー トに比べ,実効拡散係数が約 10%小さくなった。その原 因は,収縮低減型 AE 減水剤の使用によって,コンクリ ートの収縮が低減され,収縮により発生する微細なひび 割れの発生が抑制され,コンクリートの塩化物イオン浸 透抵抗性が大きくなったものと考えられる。

コンクリート標準示方書[規準編]<sup>8)</sup> に示される水セメント比と係数 k<sub>1</sub>・k<sub>2</sub>の関係図に本試験で測定した高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの見掛けの拡散係数と 実効拡散係数の実測値から求められた係数 k<sub>1</sub>・k<sub>2</sub>をプロ

配合 番号	水結合材比 W/B (%)	実効拡散係数 D <sub>e</sub> (cm <sup>2/</sup> 年)	見掛けの拡散係数 D <sub>ae</sub> (cm <sup>2</sup> /年)	実効拡散係数と見掛けの拡散係数 から算出した換算係数 k <sub>1</sub> ・k <sub>2</sub>	
BFS30	40.0	0.93	0.32	0.34	
BFS30AESR	49.0	0.85	0.28	0.33	
BFS50	27.0	0.66	0.18	0.27	
BFS50AESR	57.0	0.60	0.16	0.27	

表-5 拡散係数および係数 k<sub>1</sub>・k<sub>2</sub>の比較

ットしたものを図-14 に示す。図中に示す BFS6 の W/C と係数 k<sub>1</sub>・k<sub>2</sub>の推定線は,高炉 B 種の回帰線の W/C を-0.1 並行移動させた推定線である。本試験の結果から得られ た係数 k<sub>1</sub>・k<sub>2</sub>は, BFS30 と BFS50 のほぼ中間を示してい ることから, 高炉スラグ微粉末 6000 を早強ポルトランド セメントに対して 50%置換した結合材を使用した場合 の係数 k<sub>1</sub>・k<sub>2</sub>は図-14 に示す BFS6 の推定線を適用でき るものと考えられる。図-14に示される高炉 B種の回帰 線よりも、本試験の結果から得られた BFS6 の推定線が W/C として-0.1 平行移動する傾向が得られた理由として, 高炉スラグ微粉末 6000 と早強ポルトランドセメントを 用いた配合は、高炉 B 種よりも反応性が高く初期から反 応が進行したために浸せき法により得られた見かけの拡 散係数に比べて, 電気泳動法で測定した実行拡散係数の 割合が小さくなったためだと考えられる。高炉スラグ微 粉末 6000 を早強ポルトランドセメントに対して 50%置 換した結合材を使用した場合の係数 k<sub>1</sub>・k<sub>2</sub>の推定線は, 本試験で得られた4配合から推定したものであるために, 更にデータを収集し精度を向上させる必要がある。

# 4. まとめ

本研究は、高炉スラグ微粉末 6000 を早強ポルトラン ドセメントに対して 50%置換した結合材を用いたコン クリートにおいて、収縮低減型 AE 減水剤の効果に関す る試験結果から、以下のことが分かった。

- 収縮低減型 AE 減水剤を用いることにより、コンク リートの収縮を 10~12%程度低減することができ る。
- コンクリートに収縮低減型AE減水剤を使用することによって、拘束ひび割れの発生を抑制することができる。
- 3) 収縮低減型 AE 減水剤は、通常の AE 減水剤および 高性能 AE 減水剤と同様にコンクリートの凍結融解 抵抗性に影響を及ぼさない。
- 4) コンクリートの中性化速度係数において、収縮低減型 AE 減水剤と通常の AE 減水剤および高性能 AE 減水剤との差異はほとんど無かった。
- 5) コンクリートに収縮低減型AE減水剤を使用することによって、塩化物イオンの見掛けの拡散係数と実



図-14 係数 k<sub>1</sub>・k<sub>2</sub>の参考値と実測値

効拡散係数ともに低減され,塩化物イオン浸透抵抗 性が向上された。

## 参考文献

- 日本コンクリート工学会:自己収縮研究委員会報告
   書, pp.58-60, 2002
- 伊代田岳史,兼安真司,檀康弘:高炉セメント中の スラグ粉末度と石こう量が水和発熱と自己収縮特 性に与える影響,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.99-104, 2007
- 日本コンクリート工学会:コンクリートの収縮特性 評価およびひび割れへの影響に関する調査研究委 員会報告書, pp.26-27, 2012
- 4) 西祐宜,名和豊春:収縮低減剤がモルタルの乾燥収 縮および凍結融解挙動に及ぼす影響,コンクリート 工学年次論文集,Vol.29,No.1,pp.1173-1178,2007
- 5) 藤原浩巳, 富田六郎, 下山善秀: 収縮低減剤を用い たコンクリートの耐久性に関する検討, コンクリー ト工学年次論文集, 10-2, pp.37-42, 1988
- 5) 坂井悦郎,金尚奎,大門正機:高炉スラグセメント 硬化体の炭酸化反応による多孔化の抑制方法,セメ ントコンクリート論文集,No.49, pp.714-719, 1995
- 7) 本城玲,松下博通他:高炉スラグ微粉末を混和した 高強度コンクリートの中性化に関する検討,土木学 会第58回年次学術講演会,pp.23-24,2003
- 8) 土木学会:コンクリート標準示方書[規準編], pp.318, 2007