

早強材を添加した環境負荷低減型コンクリートの 収縮特性および耐久性

技術本部
技術本部

技術研究所
技術研究所

椎野碧
中瀬博一

概要: 高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を用いた環境負荷低減型コンクリートは耐久性向上などの優位性がある一方、初期の強度発現が遅延する傾向にある。そこで、環境負荷低減型コンクリートに早強材を用いることで初期強度発現性を向上させた、早強型混和材コンクリートを開発し、技報第 18 号にて報告した。しかし、構造物に適用するうえで収縮特性や耐久性について不明であったため、基礎データの蓄積を目的に各種試験を実施した。その結果、収縮特性の把握および塩害や凍害に対して十分な耐久性を有していることが確認された。

Key Words: 混和材コンクリート、初期強度発現性、収縮特性、耐久性、間詰め

1. はじめに

高炉スラグ微粉末(以降、BFS と称す)やフライアッシュ(以降、FA と称す)を用いた環境負荷低減型コンクリート(以降、混和材コンクリートと称す)は耐久性向上などの優位性がある一方、初期の強度発現が遅延する傾向にある。そのため、促進養生が困難な場所打ちとなるプレキャスト PC 床版間詰め部に適用した場合、生産性の低下が懸念される。こうした背景から、筆者らは、早強材を用いることにより初期の強度発現性確保し、かつ、流動保持剤により施工性を確保した混和材コンクリート(以降、早強型混和材コンクリートと称す)を開発した¹⁾²⁾。ここで、構造物に適用するうえで収縮特性や耐久性を明らかにする必要がある。そこで、本稿では収縮特性および耐久性の基礎データの蓄積を目的に実施した各種試験の結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 早強型混和材コンクリートの仕様

早強型混和材コンクリートの仕様を表-1 に示す。プレキャスト PC 床版間詰め部への場所打ち施工を想定しているため、運搬時間を考慮し、スランプフローおよび空気量は練上りから 90 分後の試験値で管理することとした。

表-1 早強型混和材コンクリートの仕様

項目	目標値	備考
設計基準強度(σ_3)	50N/mm ²	・配合強度 58N/mm ²
スランプフロー	60±10cm	・練上りから 90 分後
空気量	4.5±1.0%	
膨張率	200±50 μ	・材齢 7 日

2.2 使用材料および配合

使用材料を表-2 に示す。膨張材 EX はカルシウムサルフォアルミネートを主成分とするものであり、早強材 AC の作用機構はポルトランドセメントの水和促進作用によってエトリンガイトおよびカルシウムシリケ



椎野碧



中瀬博一

ート水和物を多量に生成して強度を発現するものである。配合を表-3に示す。早強型混和材コンクリートはBFSを用いた配合(以降、早強型BFSと称す)と、FAを用いた配合(以降、早強型FAと称す)の2種類であり、それぞれの単位結合材量に対する質量置換率はBFSが50%、FAが15%である。

表-2 使用材料

材料	記号	仕様
水	W	上水道水
セメント	C	早強ポルトランドセメント, 密度 3.14g/cm ³
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末 6000, 密度 2.91g/cm ³ , SO ₃ 2.89%
	FA	フライアッシュⅡ種, 密度 2.36g/cm ³
膨張材	EX	主成分はカルシウムサルフォアルミネート, 粉体, 密度 2.95g/cm ³
早強材	AC	粉体, 密度 2.91g/cm ³
細骨材	S1	陸砂, 表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.58%, F.M.2.59
	S2	砕砂, 表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 1.14%, F.M.2.98
粗骨材	G	砕石 2005, 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.64%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤
	AE	AE 剤
	R	流動保持剤, 液体

表-3 配合

配合	W/B (%)	単位量(kg/m ³)									添加率 (B×%)		
		W	B			EX	AC	S		G	SP	AE	R
			C	BFS	FA			S1	S2				
早強型 BFS	31.0	170	274	274	—	25	40	269	273	985	1.2	0.03	1.0
早強型 FA	31.0	170	466	—	82	23	40	268	272	985	2.3	0.04	1.0

3. 試験結果

3.1 乾燥収縮

試験は JIS A 1129 に準拠して実施し、乾燥開始材齢は 7 日とした。乾燥期間と乾燥収縮ひずみの関係を図-1に、乾燥期間と質量減少率の関係を図-2に示す。また、図-1および図-2には比較として、水セメント比 W/C が 37%、単位水量 170kg/m³ で設計基準強度(材齢 7 日)が 50N/mm² の早強セメント単味の配合(以降、H 単味と称す)の結果も併せて示す。

乾燥期間が 365 日の乾燥収縮ひずみはそれぞれ、早強型 BFS が -356 μ 、早強型 FA が -635 μ 、H 単味が -597 μ であり、H 単味と比較して早強型 BFS は 4 割程度小さくなり、早強型 FA は僅かに大きくなった。早強型 FA が H 単味より僅かに大きくなった一因として、FA の置換率が BFS と比較して 15%と小さいために H 単味と同様の挙動を示したことと次節の自己収縮の影響もあると考えられる。

乾燥期間が 365 日の質量減少率はそれぞれ、早強型 BFS が -0.379%、早強型 FA が -0.568%、H 単味が -1.182% であり、早強型混和材コンクリートは H 単味と比較して 3~5 割程度となった。

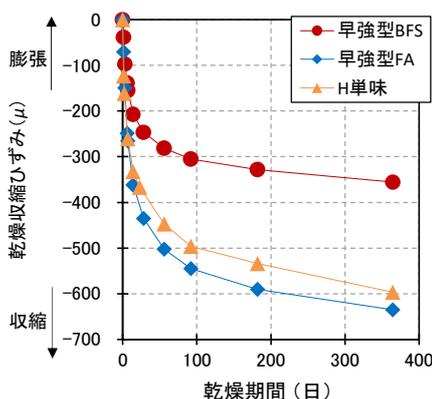


図-1 乾燥期間と乾燥収縮ひずみの関係

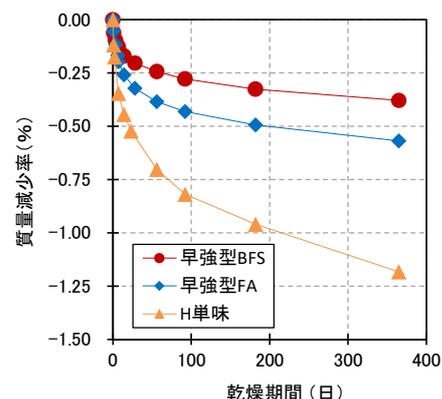


図-2 乾燥期間と質量減少率の関係

3.2 自己収縮

試験は公益社団法人日本コンクリート工学会の「超流動コンクリート研究委員会 報告書Ⅱ」に準拠して実施した。材齢と自己収縮ひずみの関係を図-3 に示す。また、図-3 には比較として H 単味の結果も併せて示す。

材齢 365 日での自己収縮ひずみはそれぞれ、早強型 BFS が -118μ 、早強型 FA が -214μ 、H 単味が -169μ であり、早強型 BFS は H 単味と比較して、初期材齢での変動は大きいものの、その後の収縮は徐々に緩やかとなり、材齢 365 日では H 単味より小さくなった。早強型 FA の収縮量は H 単味と比較して、材齢 28 日では同程度であったが、それ以降、僅かに大きくなった。

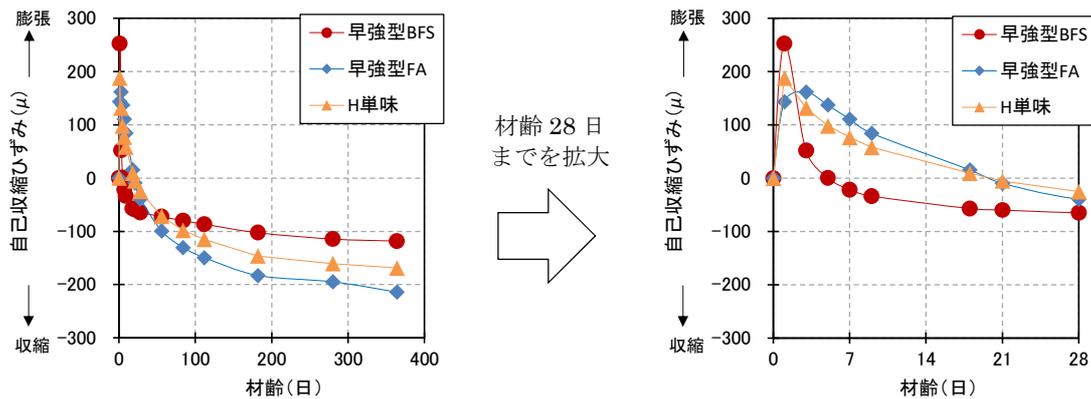


図-3 材齢と自己収縮ひずみの関係

3.3 自己収縮応力

試験は JCI-SAS3-2 を準用して実施した。使用した鉄筋は、床版厚が 220mm 以上のプレキャスト PC 床版において基本的な接合方法である「あごなしループ継手」の接合部の鉄筋を参考³⁾に SD345 D19 とし、長さは「道路橋示方書」に記載されている式-1 により算出した定着長である 1100mm とした。

材齢と自己収縮応力の関係を図-4 に示す。材齢 364 日の自己収縮応力はそれぞれ、早強型 BFS が 0.77N/mm^2 、早強型 FA が 0.87N/mm^2 、H 単味が 0.90N/mm^2 であった。「コンクリート標準示方書【設計編】」に記載されている算定式(式-2)を用いて算出した早強型混和材コンクリートの引張強度の推定値は 3.12N/mm^2 であり、発生応力が引張強度の推定値を下回っている。以上の結果から、早強型 BFS および早強型 FA はいずれも十分なひび割れ抵抗性を有していると考えられる。

$$l_a = \frac{\sigma_{sa}}{4\tau_{0a}} \cdot \phi \quad \dots \text{式-1}$$

- ここに、
- l_a : 付着応力度より算出する重ね継手長(mm)
 - σ_{sa} : 鉄筋の引張応力度の基本値(=200N/mm²)
 - τ_{0a} : コンクリートの付着応力度の基本値(=2.00N/mm²)
 - ϕ : 鉄筋の直径(mm)

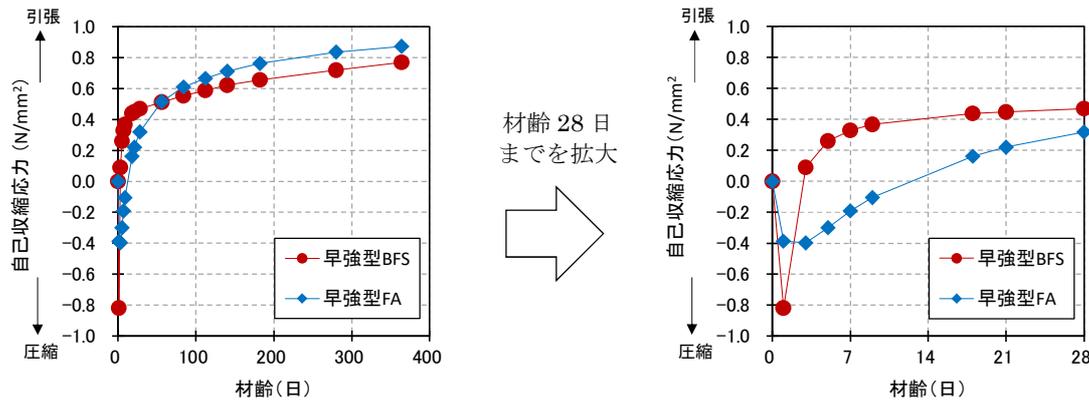


図-4 材齢と自己収縮応力の関係

$$f_{tk} = 0.23 f'_{ck}{}^{2/3} \quad \dots \text{式-2}$$

ここに、 f_{tk} : 引張強さ(N/mm²)
 $f'_{ck}{}^{2/3}$: 設計基準強度(N/mm²)

3.4 塩害に対する耐久性

試験は JSCE-G 572 に準拠して実施した。

3.4.1 塩分浸透深さ

濃度が 10%の塩化ナトリウム水溶液に 1 年間浸漬した供試体を用いて実施した EPMA による塩化物イオン濃度の分析結果を図-5 に示す。なお、早強型 BFS について、採取した分析試料の含侵面に粗骨材があり、その粗骨材とモルタルの界面に沿った塩化物イオンの浸透が認められたため、見掛けの拡散係数の算出はその範囲を除いた黄色枠線内を対象とした。

EPMA による塩化物イオン濃度の分析の結果、塩化物イオンの浸透深さ(塩化物イオン濃度が 0.1%以上になったときの深さ)の最大は早強型 BFS が 11mm，早強型 FA が 14mm 程度であった。

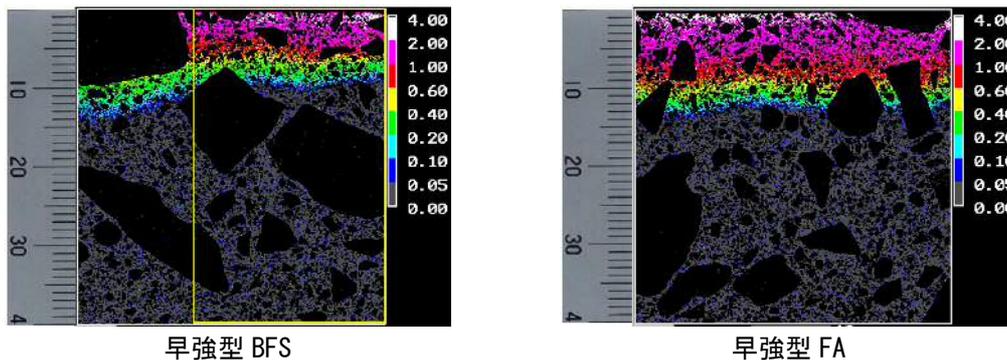


図-5 EPMA による塩化物イオンの濃度分布

3.4.2 見掛けの拡散係数

3.4.1 項の分析結果から得られた濃度分布より、式-3を用いて算出した見掛けの拡散係数を表-4に示す。見掛けの拡散係数はそれぞれ、早強型 BFS が $0.116\text{cm}^2/\text{年}$ 、早強型 FA が $0.215\text{cm}^2/\text{年}$ となった。

$$C(x, t) - C_i = C_{a0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \dots \text{式-3}$$

ここに、 x : 含侵面からの距離(mm)

t : 浸漬期間(年)

$C(x, t)$: 距離 x (mm), 浸漬期間 t (年)において測定された塩化物イオン濃度(%)

C_{a0} : 試料表面の全塩化物イオン(%)

C_i : 初期に含有される塩化物イオン濃度(%)

D_{ap} : 見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

erf : 誤差関数

表-4 見掛けの拡散係数

配合	浸漬期間 (日)	単位容積質量 (kg/m^3)	見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)	塩化物イオン濃度 (kg/m^3)	
				表面	初期
早強型 BFS	365	2310	0.116	29.8	0.1030
早強型 FA	365	2306	0.215	35.3	0.0387

3.4.3 耐用年数

3.4.2 項の見掛けの拡散係数を用いて式-4 および式-5 より算出した各塩害環境下における耐用年数を表-5に示す。鉄筋の腐食発生限界濃度は「コンクリート標準示方書【設計編】」に準拠し、 $2.29\text{kg}/\text{m}^3$ とした。

表-5 より、早強型 BFS の場合、かぶりを飛沫帯および汀線付近では 70mm 以上、海岸から 0.1km 付近では 45mm 以上とすることで普通鉄筋を用いた場合でも耐用年数 100 年を確保できると考えられる。早強型 FA の場合、普通鉄筋では飛沫帯および汀線付近においてかぶりを 70mm としても対応年数 100 年を確保することが困難であった。

一方、早強型 BFS および早強型 FA いずれもエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した場合、飛沫帯でもかぶりが 35mm 以上であれば対応年数 100 年を満足することが確認された。

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \dots \text{式-4}$$

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left\{ \frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{c}{\sqrt{D_{ap}}} + \frac{c_{ep}}{\sqrt{D_{epd}}} \right) \right\} \right\} \dots \text{式-5}$$

ここに、 C_d : 鋼材位置の塩化物イオン濃度(kg/m^3)

C_0 : 表面における塩化物イオン濃度(kg/m^3)

c : かぶりの期待値

γ_{cl} : 予測の精度に関する安全係数(=1.1)

c_{ep} : エポキシ樹脂塗膜の厚さの期待値(mm)

D_{epd} : エポキシ樹脂の見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

表-5 各塩害環境下における耐用年数

配合	見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)	かぶり (mm)	鉄筋種類	耐用年数		
				環境条件		
				飛沫帯	汀線付近	海岸から 0.1km
早強型 BFS	0.116	35	普通	26	36	98
			エポ	169	—	—
		45	普通	44	61	162
			70	普通	107	—
早強型 FA	0.215	35	普通	14	19	53
			エポ	135	—	—
		45	普通	23	32	87
			エポ	186	—	—
		70	普通	57	79	212

3.5 凍害に対する耐久性

3.5.1 凍結融解

試験は JIS A 1148(A 法) に準拠して実施した。凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-6 に、凍結融解サイクル数と質量減少率の関係を図-7 に示す。また、図-6 および図-7 には比較として H 単味の結果も併せて示す。

300 サイクル終了時の相対動弾性係数はそれぞれ、早強型 BFS が 100%、早強型 FA が 102%、H 単味が 92% であり、質量減少率はそれぞれ、早強型 BFS が 0.1%、早強型 FA が 0.0%、H 単味が 0.1% であった。以上より、早強型混和材コンクリートの凍結融解に対する耐久性は H 単味と同程度であることが確認された。

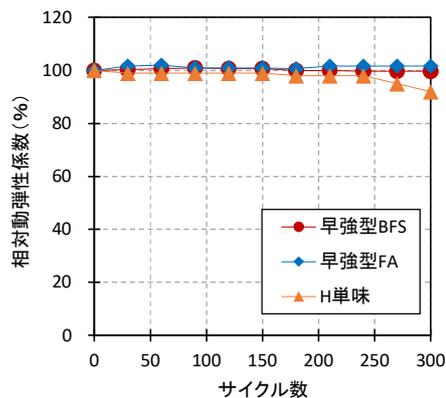


図-6 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係

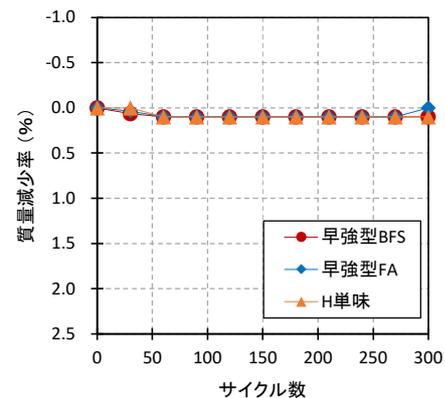


図-7 凍結融解サイクル数と質量減少率の関係

3.5.2 スケーリング

試験は ASTM-C672 に準拠して実施した。サイクル数と累積スケーリング量の関係を図-8 に示す。50 サイクル終了時の累積スケーリング量はそれぞれ、早強型 BFS が 0.0537kg/m^2 、早強型 FA が 0.3881kg/m^2 となった。前節の凍結融解試験の結果では早強型 BFS と早強型 FA で同様の傾向であったことに対し、累積スケーリング量は異なる傾向を示した。これは、3.4.2 項での見掛けの拡散係数の違いが一因と考えられる。ただし、早強型混和材コンクリートの累積スケーリング量は早強型 BFS、早強型 FA いずれも東北地方整備局の評価基準⁴⁾である「50 サイクルでのスケーリング量が 0.5kg/m^2 以下」を満足しているため、スケーリングに対する耐久性は優れていると考えられる。

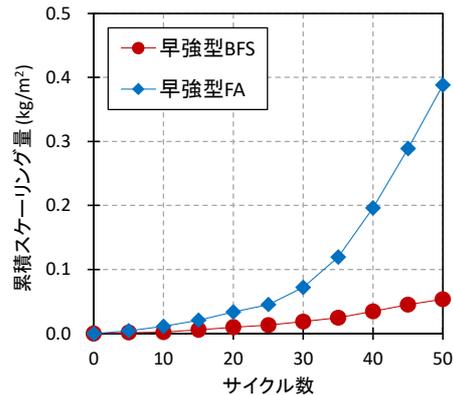


図-8 サイクル数と累積スケーリング量の関係

4. まとめ

各種試験の実施により、場所打ち間詰め部用に開発した早強型混和材コンクリートは、収縮ひび割れ、塩害および凍害に対して十分な抵抗性および耐久性を有していることが確認された。

参考文献

- 1) 椎野碧, 中瀬博一, 鈴木雅博: 混和材を用いた場所打ちコンクリートの早強化の検討, 第29回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.435-440, 2020
- 2) 椎野碧, 中瀬博一, 鈴木雅博: 早強型混和材コンクリートのフレッシュ性状や強度発現への環境温度の影響, 第30回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.345-350, 2021
- 3) 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会: プレキャストPC床版による道路橋更新設計施工要領, 2018
- 4) 国土交通省 東北地方整備局: 東北地方における凍害対策に関する参考資料(案), 2019