

三成分系コンクリートによるPCaPC部材の高耐久化に関する基礎実験

(株)安部日鋼工業 正会員 ○後藤 剣也
 (株)安部日鋼工業 正会員 工修 石井 豪
 (株)安部日鋼工業 正会員 博士(工学) 辛 軍青

キーワード：高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，耐久性向上，三成分系コンクリート

1. はじめに

近年、PC構造物の塩害対策や、ASR対策などの耐久性向上を主な目的として、早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000に置換した二成分系コンクリート（以下、「二成分系」と示す）の適用が進んでいる状況である。しかしながら、既報¹⁾に示したように、長期における想定外の過酷な条件下では二成分系であっても完全に劣化の発生を防止することは難しく、延命化にとどまることもある。このため、さらなる耐久性の向上を目的として二成分系をベースとして結合材にフライアッシュを混合した三成分系コンクリート（以下、「三成分系」と示す）による、経済性、施工性や耐久性の確認を行っている。本稿では、この三成分系をPCaPC部材へ適用することを目的とした基礎実験について、耐久性を中心に報告をするものである。実験結果から、三成分系は二成分系と比較して塩分浸透抑制性能は同等以上、ASRの抑制効果が向上することを確認した。

2. 試験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

本基礎実験に使用した材料の一覧を表-1に、コンクリート配合表を表-2に示す。

表-1 使用材料一覧表

材料区分	記号	種類	品質・性能
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4410cm ² /g, 強熱減量 1.02%
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末6000	密度 2.88g/cm ³ , 比表面積 6020cm ² /g, 強熱減量 1.53%
	FA	フライアッシュ II種	密度 2.26g/cm ³ , 比表面積 3490cm ² /g, 強熱減量 2.30%
細骨材	S1	北海道札幌近郊産 砕砂(反応性)	表乾密度 2.71g/cm ³ , 吸水率 1.3%
	S2	岐阜県揖斐川産 川砂	表乾密度 2.61g/cm ³ , 粗粒率 2.84
粗骨材	G1	北海道札幌近郊産 砕石(反応性)	表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 1.8%
	G2	岐阜県揖斐川産 川砂利	表乾密度 2.64g/cm ³ , 実積率 63.2%
練混ぜ水	W	地下水	密度 1.00g/cm ³
混和剤	Ad1	高性能減水剤	標準形I種 密度 1.07g/cm ³
	Ad2	AE剤	I種 密度 1.05g/cm ³

表-2 コンクリート配合表

名称	骨材種類	水結合材比 W/B*(%)	細骨材率 S/a(%)	単位量 (kg/m ³)								
				水	セメント	混和材		細骨材		粗骨材		7Mカリ
								反応性	無害	反応性	無害	
W	C	BFS	FA	S1	G1	G2	NaCl					
早強単味	無害	34.0	42.2	152	447	0	0	-	728	-	1011	-
二成分系		34.0	40.7	142	209	209	0	-	718	-	1056	-
三成分系		34.0	40.7	142	209	167	42	-	713	-	1048	-
早強単味	反応性	34.0	42.2	152	447	0	0	186	545	1024	-	18.86
二成分系		34.0	40.7	142	209	209	0	183	535	1069	-	18.86
三成分系		34.0	40.7	142	209	167	42	180	532	1064	-	18.86

着色部分は反応性骨材を使用する配合

※ここに、W/B=W/(C+BFS+FA)

従来の早強ポルトランドセメント単味使用配合（以下、「早強単味」と示す）を基本として、二成分系、三成分系の3種類を適用した。また、ASR抑制効果確認試験用に、反応性骨材と反応促進を目

的としてアルカリ (NaCl) を等価 Na_2O 量で $10\text{kg}/\text{m}^3$ として添加した配合を用いた。三成分系の配合は材料価格が二成分系の配合以下となるように設定した。また、全配合を水セメント比34.0%で統一した。

2.2 試験内容及び試験体形状寸法

試験内容を表-3に示す。

表-3 試験内容

対象	試験体形状寸法(mm)	試験項目
フレッシュコンクリート	共通	スランプ(JIS A 1101) , 空気量(JIS A 1118) , 塩分量測定, ワーカビリティ
硬化コンクリート	φ100*200(円柱)	[圧縮強度(JIS A 1108) , 静弾性係数(JIS A 1149) , 引張強度(JIS A 1113)]
	□100*100*400(角柱)	[曲げ強度(JIS A 1106) , 長さ変化(JIS A 1129) , 自由膨張収縮] [促進中性化(JIS A 1153), 凍結融解(JIS A 1148(B法)), 塩分浸漬(JISCE-G 572)]
ASR抑制効果確認用PC梁	□150*300*3000(梁)	屋外曝露 [膨張率測定 , そり量測定 , 超音波伝播速度測定] 静的曲げ載荷 [載荷荷重測定 , 変位測定]

A S R抑制効果確認用PC梁試験における試験体形状寸法を図-1に、屋外曝露試験項目における試験体の測定位置を写真-1に示す。促進中性化試験は中性化が懸念されたため^{2),3)}、凍結融解試験はA Eコンクリートとしたが本実験の配合におけるデータが無い^{2),4)}実施した。塩分浸透抑制性能を確認するため塩分浸漬試験を塩分浸透の限界とされる浸漬期間1.5年として実施した。膨張率測定試験、超音波伝播速度測定試験は、試験体片側面6ヶ所を測定対象とし結果はそれらの全平均値を算出した。本稿は屋外曝露期間3年の結果をまとめた。

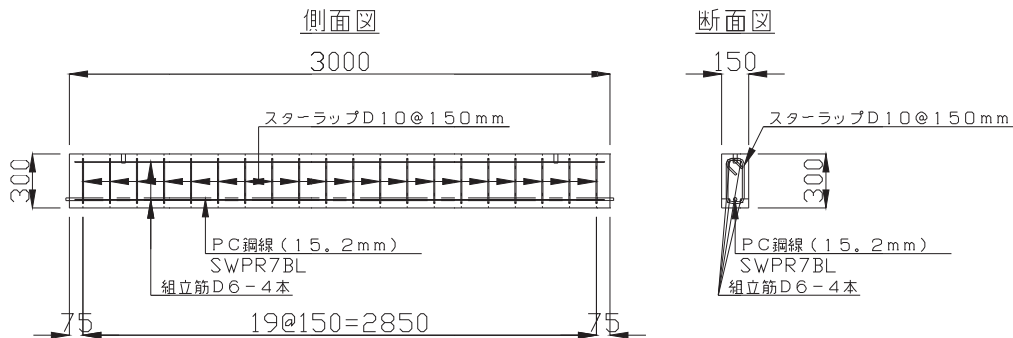


図-1 試験体形状寸法 (単位: mm)

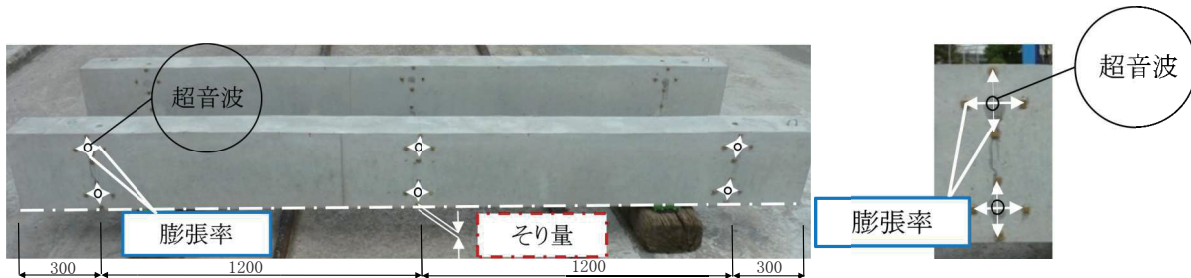


写真-1 屋外曝露試験体の測定位置 (単位: mm)

本基礎実験の対象はPC a PC部材であることから試験体製作はPC桁製作専用工場で行った。初期材齢時には蒸気養生を行った。

長さ変化試験用試験体は所定材齢まで水中養生後、自由膨張収縮試験用試験体は蒸気養生後、それぞれ恒温恒湿室へ試験体を移動させ、測定終了まで気温 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60\pm 5\%$ の一定環境下で養生した。

3. 試験結果

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は、スランプ $15\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5\pm 1.5\%$ 、塩化物含有量 $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下の品質を全ての配合が満足した結果を得た。ワーカビリティは良好であった。

3.2 硬化コンクリート試験 (強度試験など)

硬化コンクリート試験における圧縮強度試験は、プレストレス導入強度 35N/mm^2 以上、材齢28日における設計基準強度 50N/mm^2 以上を全ての配合で満足し、早強単味、二成分系、三成分系の順に $67.0, 69.7, 64.2\text{N/mm}^2$ の結果を得た。静弾性係数、引張強度、曲げ強度と圧縮強度との関係は土木学会式に近似した結果を得た。長さ変化試験、自由膨張収縮試験における材齢26週の収縮ひずみを表-4に示す。自由膨張収縮試験の基長は試験体作製時とした。三成分系と二成分系は早強単味よりも単位水量が少ない影響から早強単味ほど収縮せず、三成分系は早強単味と比較して長さ変化試験で86%、自由膨張収縮試験で91%のひずみを示した。大きなひずみを示した順に早強単味、三成分系、二成分系の結果であった。本試験の条件下では二成分系に対し三成分系は収縮抑制効果は得られなかった。

表-4 材齢 26 週の収縮ひずみ

(単位: μ)

名称	長さ変化試験	自由膨張収縮試験
早強単味	606	629
二成分系	460	495
三成分系	521	570

3.3 硬化コンクリート試験 (耐久性試験)

(1) 促進中性化試験

促進中性化試験 (促進期間26週) を実施した結果から、全ての配合において中性化は確認されず、三成分系であっても中性化に対する問題はないことを確認できた (写真-2 ~ 写真-4)。



写真-2 早強単味



写真-3 二成分系



写真-4 三成分系

(2) 凍結融解試験

凍結融解試験を600サイクルまで実施した結果、全配合において相対動弾性係数低下は無く、また、質量減少率は1.0%以下であった。

(3) 塩分浸漬試験

塩分浸透量の結果を図-2に示す。図から、全測定位置において三成分系は二成分系より塩分浸透量は少ないことから、三成分系は二成分系と同等以上の塩分浸透抑制性能を有する結果であった。なお、PC a PC部材では一般的な設計かぶりに近い深さ3.05cmでの塩分浸透量は、早強単味で 2.3kg/m^3 、二成分系で 0kg/m^3 、三成分系で 0kg/m^3 であった。

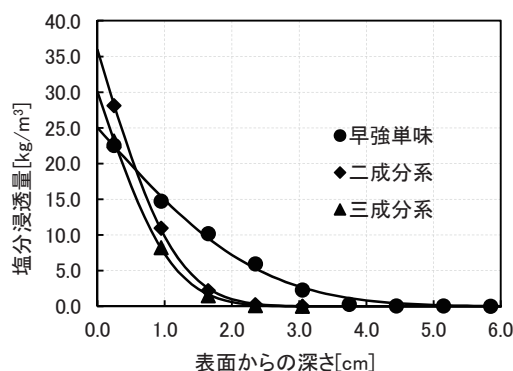


図-2 塩分浸透量

3.4 ASR抑制効果確認用PC梁試験結果

3.4.1 屋外曝露試験

屋外曝露期間3年が経過したASR抑制効果確認試験用PC梁における膨張率測定、そり量測定、超音波伝播速度測定の結果を以下に示す。膨張率測定結果 (図-3) から、早強単味は曝露日数57日から膨張し、曝露日数3年で0.24%を示した。二成分系は曝露日数323日から膨張し、曝露日数3年で早強単味と比較して約半分の0.10%を示したことから既報¹⁾と同様にASR劣化の発生を遅らせ膨張を抑制する効果を確認できた。一方、三成分系は曝露日数3年経過しても膨張は始まっていない。このことから二成分系よりもさらに優れたASR劣化に対する抑制効果を有すると言える。

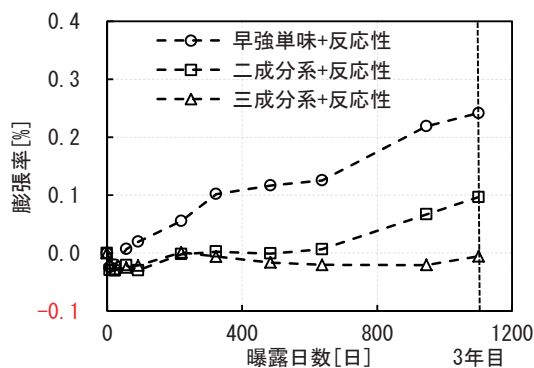


図-3 膨張率測定結果

また、そり量測定結果 (図-4)、超音波伝播速度測定結果 (図-5) から、二成分系のそり量が若干小さめであることを除いて、二成分系、三成分系の両者はほぼ同値の結果を得たため、今後はASRの進展を注視していくこととした。

(2) 静的曲げ載荷試験

単純支持3等分点静的曲げ載荷試験 (支持スパン2.4m) において載荷荷重、中央たわみ量を測定した結果を図-6に示す。三成分系PC梁 (無害骨材) の最終載荷荷重182kN、中央たわみ量37mm、三成分系PC梁 (反応性骨材) の最終載荷荷重185kN、中央たわみ量54mm。二成分系PC梁 (無害骨材) は最終載荷荷重183kN、中央たわみ量45mm、二成分系PC梁 (反応性骨材) の最終載荷荷重177kN、中央たわみ量42mmとなった。

この結果から、屋外曝露期間3年を経過した三成分系PC梁 (反応性骨材) は耐荷力が約4%増進した結果を得たことから、二成分系よりASR劣化に対する抑制効果があると言える。又、無害骨材試験体に関しては、僅差であるものの三成分系の最終載荷荷重が最小値を示す結果を得た。

4. まとめ

本基礎実験から、以下の知見を得た。

- 1) 三成分系と早強単味、二成分系は促進中性化試験において中性化しなかった。
- 2) 三成分系と早強単味、二成分系は凍結融解試験において凍結融解抵抗性は低下しなかった。
- 3) 三成分系は二成分系と同等以上の塩分浸透抑制性能を有する結果を得た。
- 4) ASR抑制効果確認用PC梁による屋外曝露試験と静的曲げ載荷試験結果から、本基礎実験における条件下において三成分系は二成分系よりもASR抑制効果は優れている結果を得た。

今後は、同時に作製した別の試験体に対して屋外曝露試験を継続実施していく予定としており、これらの試験体により三成分系コンクリートの耐久性向上効果を再検証し、高耐久化したPCa PC部材への適用を実現していきたいと考えている。

謝辞：本実験を行うに当たり、日鉄住金高炉セメント(株)、竹本油脂(株)の関係者の皆様方にはご協力、ご助言を賜りました。改めまして謝意を表します。

参考文献

- 1) 國富康氏, 石井豪, 辛軍青, 鳥居和之: 高炉スラグ微粉末6000を混和したPC梁部材のASR劣化に対する耐荷力特性, プレストレストコンクリート工学会 第24回シンポジウム論文集, pp. 323-326, 2015. 10
- 2) 土木学会 コンクリートライブラリー第63号 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案)pp. 5-6, 1988. 1
- 3) 土木学会 コンクリートライブラリー第64号 フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究 (最終報告) p. 50, p. 69, 1988. 3
- 4) 土木学会 コンクリートライブラリー第94号 フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案) p. 8, 1999. 1

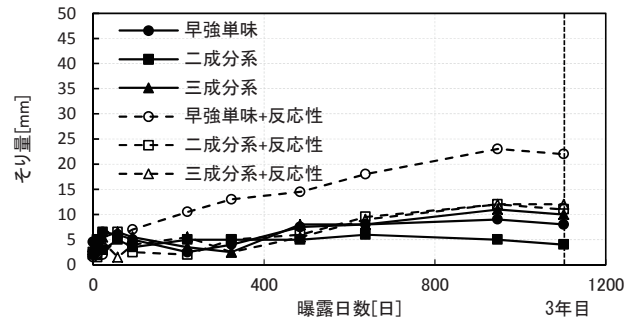


図-4 そり量測定結果

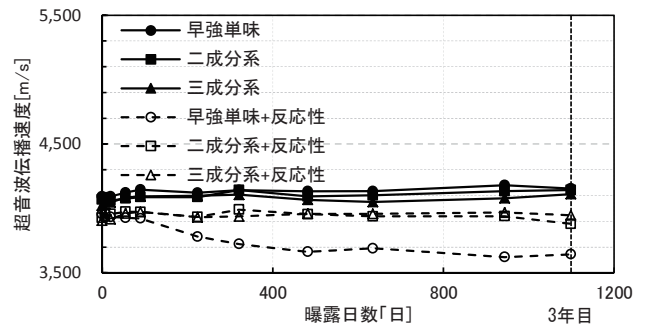


図-5 超音波伝播速度測定結果

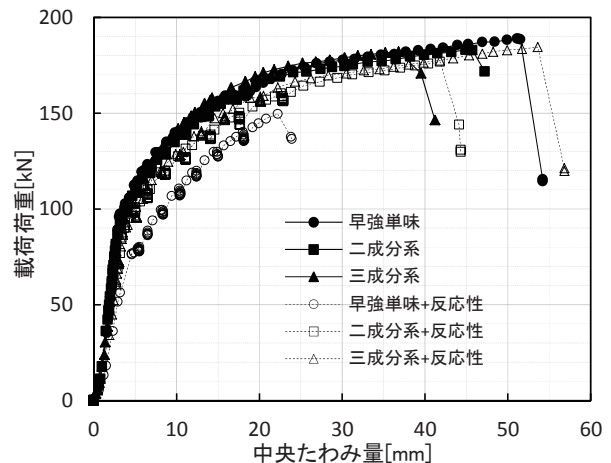


図-6 曲げ載荷試験結果(屋外曝露期間3年)