

フライアッシュ置換率25%のコンクリートのプレテンションPC桁への適用

オリエンタル白石 (株) 正会員 ○石井 智大
 オリエンタル白石 (株) 正会員 工修 東 洋輔
 オリエンタル白石 (株) 工修 小林 俊秋
 愛知工業大学 正会員 博 (工) 呉 承寧

キーワード：フライアッシュ，初期強度，塩分浸透抵抗性，プレテンションPC桁

1. はじめに

近年，コンクリートに使用するセメントの一部を産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどで置換して，セメントの使用量を減少させ，コンクリート構造物の建設に伴い排出されるCO₂を削減する動きが活発である。また，さらなる環境負荷低減を達成するため各種混和材の利用拡大が鋭意推進されている。しかしながら，フライアッシュを用いたコンクリートの課題として，未燃焼カーボンによるAE剤の吸着作用が起り，安定した品質提供が難しいこと，また，初期強度発現性が低いことが挙げられる。一方で，フライアッシュを用いたコンクリートの利点として，ワーカビリティの改善，水和熱の低減，長期強度の増進，アルカリシリカ反応の抑制および遮塩性の向上などが挙げられ，これらの物性改善効果は多く報告されている¹⁾²⁾。プレテンションPC桁（以下，PC桁と略称）へのフライアッシュの適用事例について着目すると，初期強度発現性を改善した事例はいくつかあるものの³⁾，高いフライアッシュ置換率で使用した事例は少なく，とくにフライアッシュの置換率を25%とした事例はない。本研究では，セメント使用量の削減と耐久性を向上させるため，早強ポルトランドセメントをフライアッシュで25%置換したコンクリートのPC桁への適用性について検討することを目的とした。そのために，実験室レベルで初期強度を確保する配合を確立し，耐久性を評価，従来の早強ポルトランドセメント単味の配合および高炉スラグ微粉末を使用した配合との比較をした。さらに，実際のPC桁を製作し，早強ポルトランドセメント単味のPC桁と比較を行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

コンクリートの使用材料を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメント，フライアッシュはJIS II種品，高炉スラグ微粉末は6000cm²/g級品である。一部のコンクリートには初期強度を改善するため早強性膨張材を使用した。コンクリートの配合を表-2および表-3に示す。表-3に示す配合には促進アルカリシリカ反応試験のために反応性粗骨材を用いた。各種混和材は結合材に対して質量置換することとし，フライアッシュの置換率は15%，25%および35%，高炉スラグ微粉末置換率は

表-1 使用材料

材料名	記号	種類・産地および物性値
セメント	H	早強ポルトランドセメント，密度3.14g/cm ³ ，比表面積4440cm ² /g
フライアッシュ	FA	JIS II種品：七尾産，密度2.46g/cm ³ ，強熱減量1.8%，比表面積4750cm ² /g
高炉スラグ微粉末	BFS	高炉スラグ微粉末：密度2.91g/cm ³ ，強熱減量0.44%，比表面積6120cm ² /g
早強性膨張材	CSA	カルシウムサルホアルミネート系膨張材
細骨材	S	桜川産砕砂，表乾密度2.63g/cm ³
粗骨材	G	桜川産砕石，表乾密度2.66g/cm ³
反応性粗骨材	G'	川砂利，表乾密度2.66g/cm ³
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系化合物
AE剤	AE	ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸塩

表-2 コンクリート配合およびフレッシュ性状

配合 記号	水結合材比 W/B (%)	混和材 置換率 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)										フレッシュ性状	
				W	B	H	混和材 FA, BFS	CSA	S	G	SP	AE	SL (cm)	Air (%)	
H	36.0	0	41	153	403	403	0	0	747	1039	2.82	0.012	18.0	4.5	
FA15	33.0	15	44	153	443	377	66	0	761	976	3.32	0.013	21.5	4.8	
FA25	29.0	25	45	153	502	379	123	0	750	924	4.27	0.030	21.0	4.8	
FA35	29.5	35	45	153	486	321	165	22	723	935	4.13	0.039	19.0	4.2	
BFS50	36.0	50	45	153	403	202	202	0	794	978	2.82	0.014	20.0	3.7	

表-3 促進試験用コンクリート配合およびフレッシュ性状

配合 記号	水結合材比 W/B (%)	混和材 置換率 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)										フレッシュ性状	
				W	B	H	混和材 FA, BFS	CSA	S	G'	SP	AE	SL (cm)	Air (%)	
H	36.0	0	41	153	403	403	0	0	747	1020	3.02	0.012	20.0	6.1	
FA15	33.0	15	44	153	443	377	66	0	761	957	3.54	0.018	19.0	4.6	
FA25	29.0	25	45	153	502	379	123	0	750	906	4.02	0.035	23.5	4.1	
FA35	29.5	35	45	153	486	321	165	22	723	917	4.13	0.039	20.0	4.2	
BFS50	36.0	50	45	153	403	202	202	0	794	960	3.22	0.012	22.0	5.5	

50%とした。比較として混和材置換率0%を用意した。水結合材比 (以下, W/Bと略称) は, 蒸気養生を行い, 圧縮強度がプレストレス導入時 (材齢16時間) に35N/mm²以上, 材齢28日に50N/mm²以上になるよう設定した。スランブは18±2.5cm, 空気量は4.5±1.5%を目標とした。なお, FA35では初期強度改善のため早強性膨張材を併用した。

2.2 試験体の製造方法

コンクリートの練混ぜは容量100Lの強制練りパン型ミキサを使用し, セメント, 各種混和材および細骨材を投入して30秒間の空練りを行った後, 水と混和剤を投入して60秒間の練混ぜ (FA水準は120~180秒), 粗骨材を投入して60秒間の練混ぜを行った。蒸気養生は, 20°Cで3時間前置きした後に, 15°C/hで昇温し, 温度50°Cで6時間を保持した後, 5°C/hで20°Cまで降温した。その後, すべての水準を材齢1日で脱型し, 雨掛かりのある屋外養生 (平均気温23.4°C) を行った。

2.3 評価項目

試験はJIS A 1157 に準拠して圧縮強度の測定を行い, 耐久性の評価として埋込み型ひずみ計によるコンクリートの収縮ひずみの測定, 電気泳動による塩化物イオンの拡散係数の算定⁵⁾およびASTM C1260を参考にした促進アルカリシリカ反応試験 (80°C 1N NaOH水溶液に浸漬)⁶⁾を行った。耐久性試験はコンクリート試験体 (10×10×40cm) を鋼製型枠で製作して各試験に供した。なお, 電気泳動試験および促進アルカリシリカ反応試験は材齢91日まで屋外養生した試験体を, 恒温恒湿環境下 (温度20°C, 湿度60%) で24時間経過させた後に, 各試験に供した。

3. 試験結果

3.1 コンクリートの圧縮強度試験結果

図-1に各水準の圧縮強度試験の結果を示す。PC桁の圧縮強度は, 材齢16時間で35N/mm², 材齢28日で50N/mm²必要となるが, すべての水準で必要強度条件を満たした。なかでも, 材齢16時間および材齢28日においてFA25の強度がもっとも高い値を示した。フライアッシュの置換率を25%あるいは35%としても, 早強ポルトランドセメントを使用することに加えてW/Bを低くすることにより強度発現性を改善できることが分かった。

3.2 収縮ひずみ

図-2にコンクリート試験体の収縮ひずみ測定結果を示す。混和材を加えた水準はHに比べ収縮が大きい。これは混和材を加えた水準はW/Bが小さいことによる自己収縮量の増加, フライアッシュ置換に

伴う未水和水の増加による乾燥収縮量の増加が影響したと考えられる。また、材齢約22日までの収縮は混和材の置換率に応じて大きくなるが、長期材齢ではFA25の収縮がFA35を上回る結果となった。これはFA35が早強性膨張材によりコンクリートが膨張し、収縮が小さくなったためと考えられる。

3.3 電気泳動

図-3に各試験体の塩化物イオンの実効拡散係数を示す。混和材水準はHに比べて1/3~1/10程度小さくなり、FA25とFA35が同等の値でBFS50に比べて1/3以下となる小さい拡散係数を示した。混和材の置換率が大きくなるほどケイ酸カルシウム水和物（以下、C-S-Hと略称）中のCa/Si比および密度が小さくなり、密度が小さくなると体積換算したときのC-S-Hの割合が大きくなり細孔構造は緻密化する⁶⁾。さらに、フライアッシュの水準については材齢91日の長期材齢でポズラン反応によるコンクリートの緻密化が起るため、FA25およびFA35の高置換率の水準は小さい拡散係数を示したと推察される。また、FA25およびFA35のW/Bが他の水準に比べ小さいこともコンクリートの緻密化に繋がっている。

3.4 促進アルカリシリカ反応試験

試験は表-3に示す反応性骨材を使用した配合で製作した。図-4にアルカリシリカ反応促進試験の結果を示す。Hは膨張の挙動を示したが、混和材を加えた水準では膨張を示すことはなかった。混和材を加えた水準は単位セメント量の低減による水和物生成中のCa(OH)₂の減少、遷移帯の緻密化に伴うイオン移動度の低下が考えられる。さらにフライアッシュは、低Ca/Si比のC-S-Hを生成し細孔溶液のpH低減効果が大きいいため、アルカリシリカ反応の抑制効果が大きくなったと考えられる。

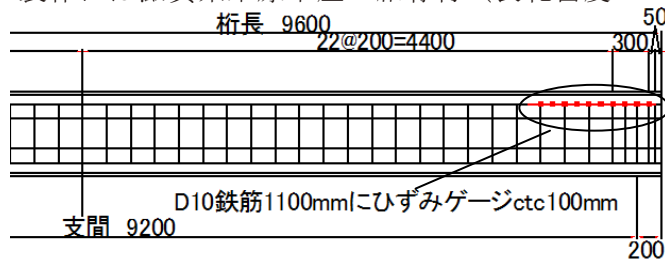
3.5 考察

本章における室内試験の結果より、W/Bの小さいFA25がもっとも高い強度発現を示した。また、耐久性試験ではBFS50に比べて収縮ひずみが小さいこと、塩化物イオンの実効拡散係数が小さいこと、およびアルカリシリカ反応抵抗性が高いことなどの良好な結果を示した。以上の理由から、FA25を用いたPC桁（以下、FA25桁と略称）への適用の検討を行った。

4. PC桁への適用

4.1 試験概要

PC桁の製作には滋賀県米原市産の細骨材（表乾密度：2.68g/



a) 平面図

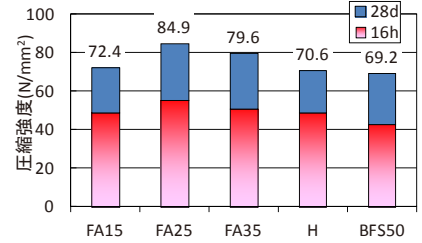


図-1 コンクリート圧縮強度

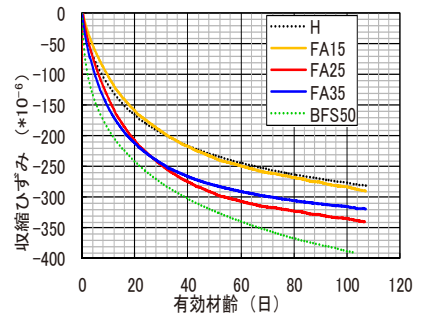


図-2 収縮ひずみ

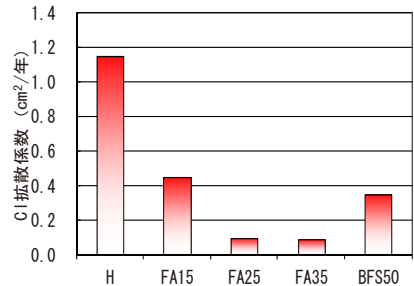


図-3 電気泳動による拡散係数

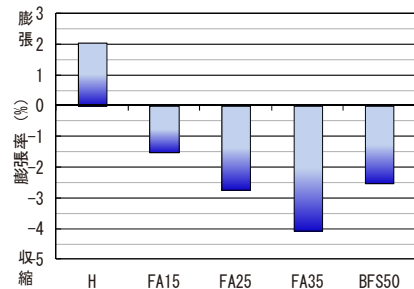
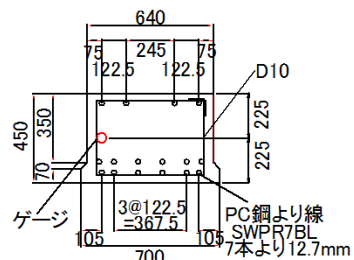


図-4 膨張率



b) 断面図

図-5 概要図 (AS09 桁)

cm³) および粗骨材 (表乾密度 : 2.69g/cm³) を使用した。なお、PC桁は、図-5に示すJIS A 5373に規定されるAS09とした。試験は従来の早強ポルトランドセメント単味で製作したPC桁 (H桁) とFA25桁を用いて圧縮強度試験と定着長試験を行った。PC桁の養生は2.2節の試験体の製造方法と同一条件で行い、材齢16時間でプレストレスを導入した。圧縮強度試験はPC桁と同一条件で養生した試験体で行い、定着長試験は1mの犠牲鉄筋 (D10) にひずみゲージを100mm間隔で貼り付けて設置し、ひずみの測定を行った。

4.2 結果

図-6にPC桁の強度を示す。緊張時 (材齢16時間) にそれぞれの水準で35N/mm², 28日で50N/mm²を十分に超える強度発現が確認でき、H桁に比べFA25桁は高い強度発現を示すことを確認した。また、プレストレス導入によるひずみの変化を図-7に示す。図中には点線で65φ (φはPC鋼より線の公称直径12.7mm) の位置を示す。結果より、65φ (826mm) 以上においてFA25桁はH桁とほぼ同程度の値を示し、定着長はφ65以内であることを確認した。本検討では初期強度を満足するためW/Bを小さく設定した。そのため、収縮量が増大するなどの悪影響が懸念されが、収縮挙動を別途計測した結果から、H桁と同程度であることを確認している。なお、試験終了後に静的載荷試験を行い、構造性能の評価を行う予定である。

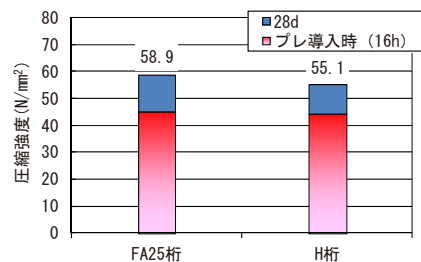


図-6 PC桁の圧縮強度

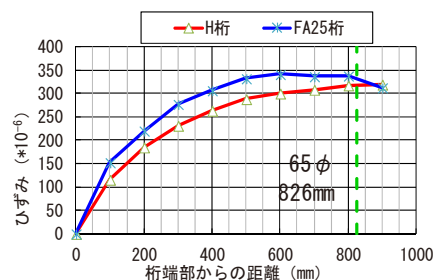


図-7 定着長 (プレ導入時)

5. まとめ

本稿ではフライアッシュ置換率25%のコンクリートの基礎物性、耐久性およびPC桁への適用に関する試験を行った結果を以下に記す。

- 1) 初期強度は水結合材比が小さいフライアッシュ置換率25%のコンクリートでもっとも高い値を示した。耐久性に関して、コンクリート収縮ひずみは混和材の置換率が高いほど収縮ひずみ量は大きくなるが、高炉スラグ微粉末を使用した場合より小さい。塩化物イオンの実効拡散係数および促進アルカリシリカ反応試験での膨張量は、フライアッシュ置換率が高いほど良好な結果を示した。
- 2) フライアッシュ置換率25%のコンクリートPC桁の圧縮強度および定着長に関して、従来の早強ポルトランドセメント単味のPC桁と比較し、同等以上の性能であることを確認した。

参考文献

- 1) 吉田匠吾, 板坂 匠, Irfan Prasetia, 鳥居和之 : PC 桁・PCa 製品の ASR 抑制対策としての分級フライアッシュの効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 985-990, 2013
- 2) 川原真一, 佐伯竜彦, 佐々木謙二, 佐藤道生 : フライアッシュを用いた長期材齢コンクリートの塩分浸透抵抗性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 845-850, 2011
- 3) 俵 道和, 呉 承寧, 石川嘉崇, 滝上邦彦 : プレストレストコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎試験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 197-202, 2011
- 4) 渡辺 豊, 河野宏隆, 渡辺博志 : コンクリートの急速塩分浸透性試験による塩化物イオン拡散係数の算定について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 663-668, 2002
- 5) ASTM C 1260 : Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar Bar Method), Annual Book of ASTM standards, Section 4, Vol. 04.02, pp. 654-659, 1994
- 6) 東 洋輔, 森 寛晃, 多田克彦 : 蒸気養生モルタルの強度、耐久性および細孔構造に及ぼす追加養生の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol. 70, No. 1, pp. 405-412, 2016