

フライアッシュを使用したコンクリートの PCaPC 床版への適用検討

技術本部	技術研究所	中瀬博一
技術本部	技術研究所	椎野 碧
技術本部	技術研究所	鈴木雅博
技術本部	技術研究所	小島利広

概要：耐久性の向上および環境負荷低減を目的としてフライアッシュを使用したコンクリート（以降、フライアッシュコンクリート）のプレキャスト PC 床版（以降、PCaPC 床版）への適用を検討した。強度発現、収縮特性および耐久性に関する基礎物性を確認したのち、実大の PCaPC 床版を製造し施工性を確認した。その結果、PCaPC 床版へのフライアッシュコンクリートの適用に問題はなく、高品質で環境負荷低減にも寄与する部材の製造が可能である事を確認した。

Key Words：フライアッシュ、プレキャストコンクリート、PC 床版

1. はじめに

高度経済成長期に整備された橋梁の床版の劣化は深刻化しており、劣化した鉄筋コンクリート製の床版をプレストレストコンクリート（以降、PC）製のプレキャスト PC 床版（以降、PCaPC 床版）へ取り替える工事が注目されてきている。また、社会的要請から床版の取替え工事の生産性向上に加え、維持更新工事ではライフサイクルコストが重要視され、構造物の長寿命化が求められている。一方、石炭火力発電所などで副産されるフライアッシュ（以降、FA）は、コンクリートの混和材として用いることで長期強度の増進や ASR の抑制などの効果に加えて環境負荷低減の効果が期待できる。本稿では FA を使用したコンクリートの強度発現や耐久性などの基礎物性を確認したのち、PCaPC 床版の製造実験を実施し、FA の PCaPC 床版への適用性を検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの仕様

PCaPC 床版に用いるコンクリートの仕様を表-1 に示す。プレストレス導入時（材齢 16 時間）の所要強度は 35N/mm^2 、設計基準強度（材齢 28 日）は 50N/mm^2 とした。

表-1 コンクリートの仕様

項目	仕様
設計基準強度	50N/mm^2 (材齢 28 日)
プレストレス導入時 所要強度	35N/mm^2 (材齢 16 時間)

2.2 使用材料

使用材料を表-2 に示す。フライアッシュは関東圏で入手可能な JIS II 種相当の分級フライアッシュを用い、その他の使用材料はプレキャスト製品工場の常用品とした。

2.3 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-3 に示す。比較用として用いた早強セメント単味の HC-36 配合は、設計基準強度 50N/mm^2 の PCaPC 床版に用いられている実績配合である。また、FA-36、FA-33 および FA-30 は、結合材質量の 15% を FA で置換したフライアッシュコンクリートであり、FA-PCa はこれら 3 配合の結合材水比（以降、W/B）と圧縮強度発現の関係性から算出した PCaPC 床版部材用の実施配合である。



中瀬博一



椎野 碧



鈴木雅博



小島利広

表-2 使用材料

材料	種類	仕様	記号
セメント	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4570cm ² /g	HC
混和材	フライアッシュ	密度 2.34g/cm ³ , 比表面積 4100~4720cm ² /g, JISⅡ種相当	FA
細骨材	陸砂	表乾密度:2.53g/cm ³ , 吸水率:2.60%	S1
	砕砂	表乾密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 1.05%	S2
粗骨材	砕石	表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率:0.98%	G
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	AE 剤	アルキルエーテル系	AE

表-3 コンクリートの配合

No.	配合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
						W	B		S1	S2	G
							HC	FA			
1	HC-36	12	4.5	35.9	40.1	157	438	—	334	338	1031
2	FA-36			35.9	40.1	149	353	62	339	343	1049
3	FA-33			33.0	38.8	149	384	68	323	326	1049
4	FA-30			30.0	37.4	149	422	75	304	307	1049
5	FA-PCa	18		32.7	38.6	149	388	69	320	324	1049

2.4 練混ぜおよび養生方法

コンクリートの練混ぜは、試験室内における基礎物性試験では公称容量 50 リットルの水平 2 軸型強制練りミキサを用い、部材製造実験では公称容量 2.0m³のパン型 2 段ミキサを用いて行った。また、コンクリート打設後には最高温度 50℃で常圧の蒸気養生を実施した。コンクリートの練混ぜ方法を図-1 に、蒸気養生の温度設定を図-2 に示す。

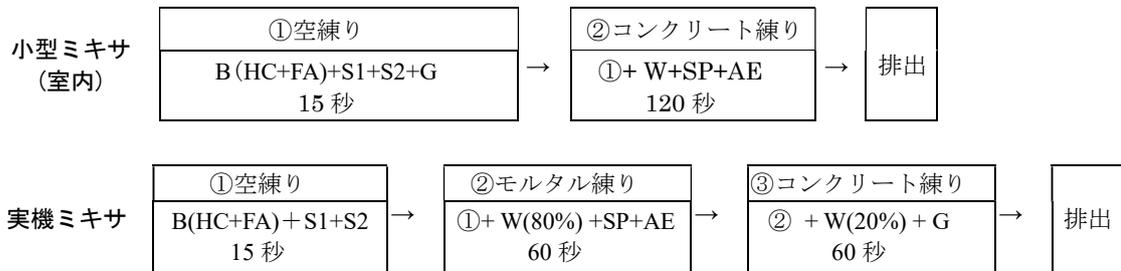


図-1 コンクリートの練混ぜ方法

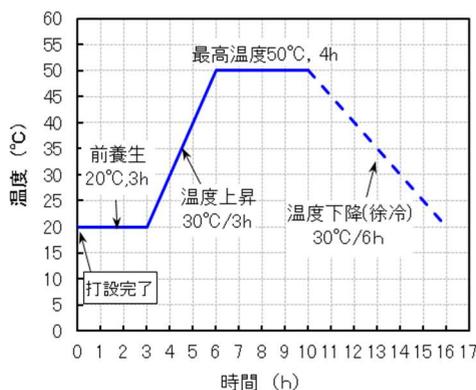


図-2 蒸気養生の温度設定

表-4 試験項目および試験方法

種別	試験項目, 検討事項	試験対象コンクリート (表-3 参照)					試験方法
		HC-36	FA-36	FA-33	FA-30	FA-PCa	
基礎物性 確認試験	圧縮強度	○	○	○	○	○	JIS A1108
	乾燥収縮	—	○	—	—	—	JIS A1129
	凍結融解	—	○	—	—	—	JIS A1148
	促進中性化	—	○	—	—	—	JIS A1153
	塩分浸透	○	○	—	—	—	JSCE-G572
施工性試験 (部材製造)	仕上げ性, 充填性, ひび割れ発生	—	—	—	—	○	目視観察

2.5 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-4に示す。耐久性試験（乾燥収縮、凍結融解、促進中性化、塩分浸透）については、本件で扱うFA配合のうち最もW/Bが大きく耐久性が低いと考えられ、すべての配合の耐久性を安全側に評価できると考えられるFA-36について実施した。

2.5.1 乾燥収縮

乾燥収縮試験はJIS A1129-3 (2010)に準拠して行った。ただし、実際のプレキャスト部材の製造サイクルでは翌日の脱枠直後から乾燥が開始されるため、これに合わせて脱枠直後に基長を測定の後、恒温恒湿室（室温 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ ）で気中養生として乾燥収縮ひずみを測定した。測定期間は基長測定時から半年（26週）とした。

2.5.2 凍結融解

凍結融解試験は「JIS A 1148 (2010) コンクリートの凍結融解試験方法」の水中凍結融解試験方法（A法）に準拠して実施した。試験体は脱枠後に室温 20°C 、湿度 60%RHの室内に材齢 28日まで静置したのち 20°C の水中に1日浸漬し、材齢 29日から凍結融解試験に供した。

2.5.3 塩化物イオン拡散係数

塩分浸透性試験は「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（JSCE-G 572-2013）」に、全塩化物イオン分布の測定は「EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法（案）（JSCE-G-574-2013）」に準拠して行い塩化物イオン拡散係数を算出した。塩水浸漬期間は6か月とした。

2.5.4 促進中性化

促進中性化試験は「JIS A1153 (2012) コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して行った。ただし、乾燥収縮と同様に実際の部材製造サイクルに合わせ、脱枠後は材齢 28日の促進試験開始まで室温 20°C 、湿度 60%RHの室内に静置した（JISでは湿潤養生）。

2.5.5 プレキャストPC床版の製造実験

部材製造における施工性および、ひび割れなどに代表される不具合発生の有無を確認するため、プレキャストPC床版の実大試験体を製造した。コンクリートの配合は室内試験において決定した実施配合FA-PCa（表-3参照）とし、プレキャスト製品工場の実機ミキサで練り混ぜた。また、試験体へのコンクリート打設は、実験を行ったプレキャスト製品工場におけるPC床版の製造要領に従い、通常の部材製造と同様に行った。試験体は脱枠後に外気環境下で暴露保管し目視による観察を行った。PCaPC床版試験体の形状および寸法を図-3に示す。

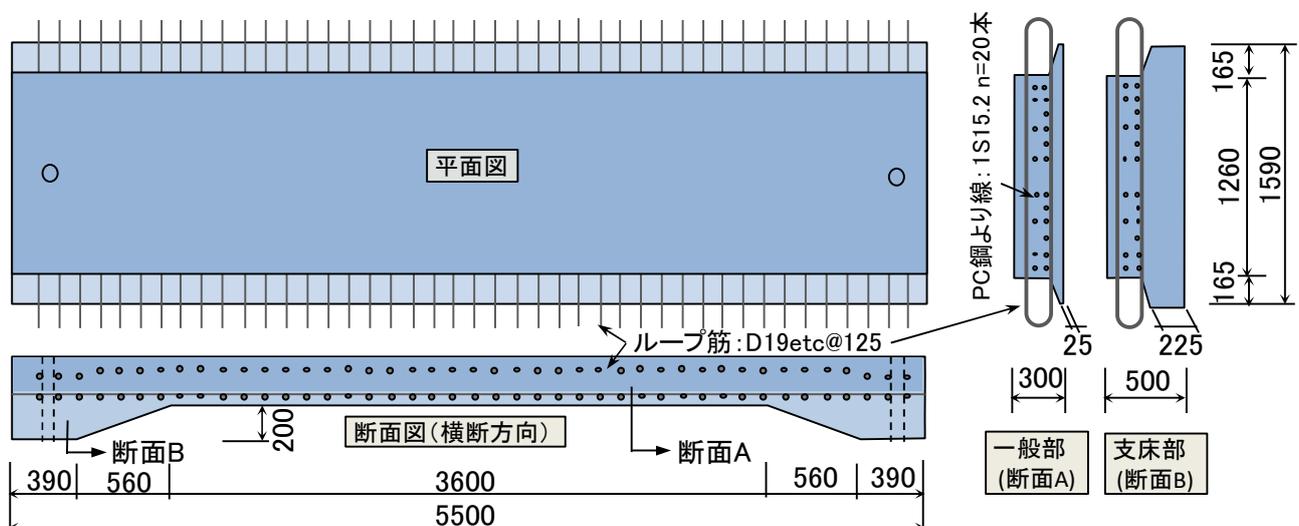


図-3 PCaPC床版部材の形状および寸法

3. 実験結果

3.1 基礎物性確認試験

3.1.1 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートはいずれの配合でも目標値を満足した。ただし、フライアッシュコンクリートはスランプの経時変化が大きく、部材への打ち込みまでの時間として想定される練上りから15分後で6cm程度のロスが生じる傾向が認められたため、部材製造実験ではコンクリート打設時にスランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$ となるよう練上り時のスランプ目標値を18cmとした。また、空気量は練上りから15分後のロスが1%程度であったため、部材製造実験時は経時変化を見込み、練上り直後の空気量の目標値を5.5%とした。

3.1.2 圧縮強度

配合FA-36、FA-33およびFA-30の脱枠時（プレストレス導入時）を想定した打設からの材齢16時間および、強度保証材齢である材齢28日における結合材水比（B/W）と圧縮強度の関係を図-4に示す。打設から16時間後の所要強度 35N/mm^2 および、材齢28日における設計基準強度 50N/mm^2 に対し、変動係数を8%とした場合のコンクリートの配合強度は、材齢16時間（脱枠時）で 40.6N/mm^2 、材齢28日で 58N/mm^2 となる。実験より得られたB/Wと圧縮強度の関係式から配合強度を満足する水結合材比（W/B）を算定した結果を表-5に示す。これより脱枠時および強度保証材齢における配合強度を満足するW/Bは、それぞれ35.2%および32.7%となり、このうちW/Bが小さい方の値を採用して部材製造の実施配合におけるW/Bを32.8%に決定した。

3.1.3 乾燥収縮

乾燥収縮試験結果を図-5に示す。FA-36の材齢26週における乾燥収縮率は、 600×10^{-6} 程度であり、評価の参考値としてあげられる「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2018」における計画供用期間の級が長期・超長期相当となる 800×10^{-6} 以下を十分に満足し、乾燥収縮ひび割れに対する抵抗性は十分であると考えられる。

3.1.4 凍結融解

凍結融解試験結果を図-6（相対動弾性係数）および図-7（質量変化率）に示す。凍結融解300サイクル後の相対動弾性係数は100%以上であり、「コンクリート標準示方書[設計編]（2017）」により、凍結融解抵抗性の照査が不要とされる基準である300サイクル時の相対動弾性係数が90%以上を満足した。これより、フライアッシュコンクリートは十分な耐凍害性を有していることが確認された。

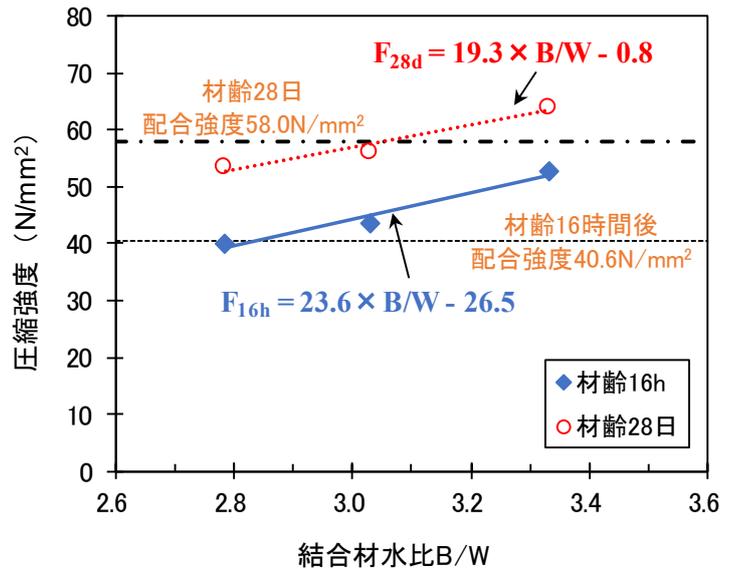


図-4 結合材水比（B/W）と圧縮強度の関係

表-5 配合強度に対する水結合材比の算定結果

項目	材齢16時間 (脱枠時)	材齢28日 (強度保証材齢)
配合強度 (N/mm²)	40.6	58.0
B/W	2.843	3.047
W/B (%)	35.2	32.8

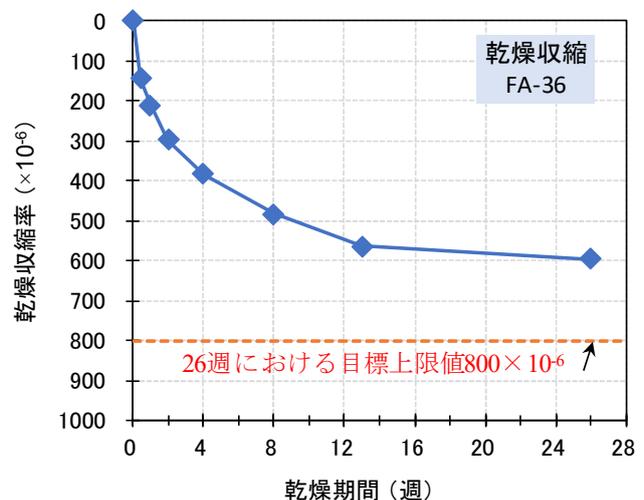


図-5 乾燥収縮試験結果

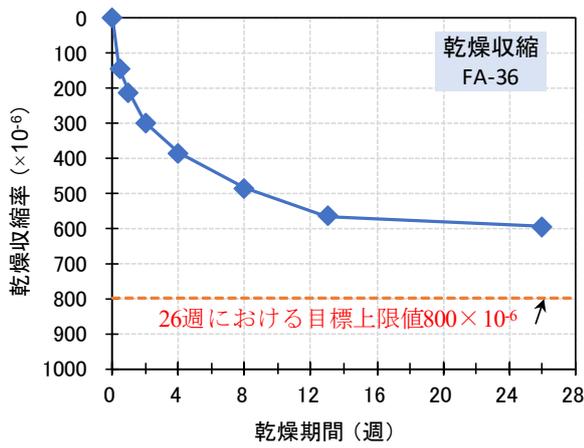


図-6 凍結融解試験結果 (相対動弾性係数)

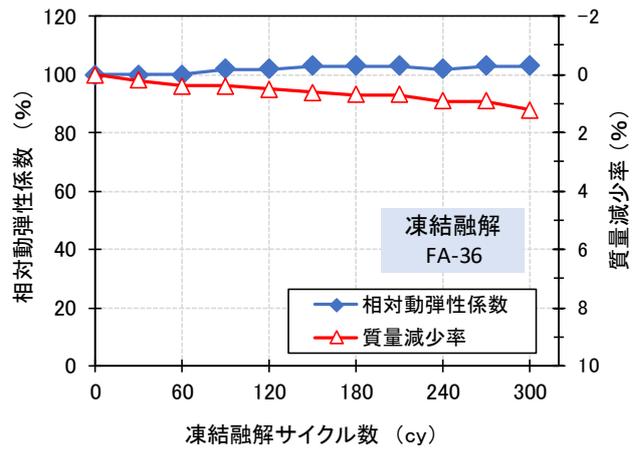


図-7 凍結融解試験結果 (質量変化率)

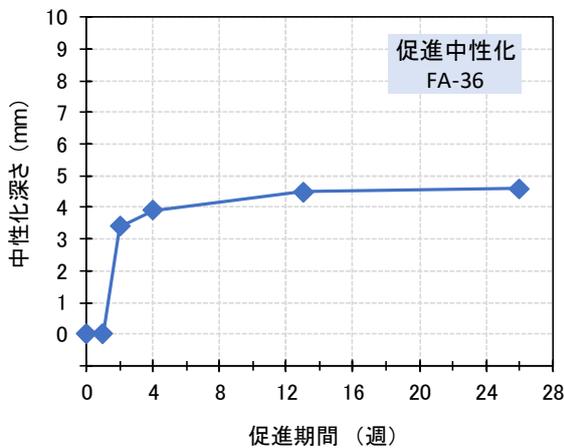


図-8 促進中性化試験結果 (中性化深さ)

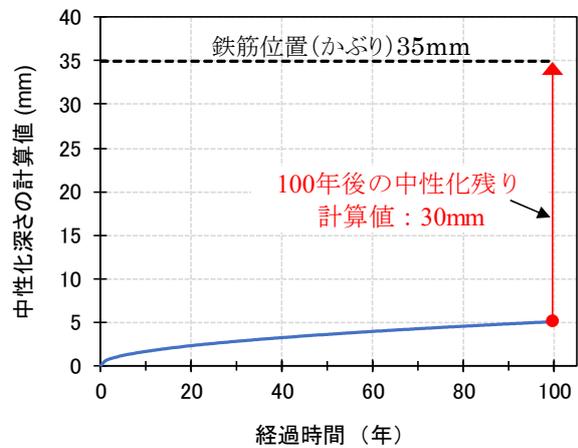


図-9 促進中性化試験結果 (100年後の中性化深さ)

また、質量変化率についても 300 サイクル後に 1%程度にとどまり、スケーリングに対する抵抗性も優れていることが確認された。

3.1.5 促進中性化

促進中性化試験結果を図-8 (中性化深さ) および図-9 (100年後の中性化深さ計算値) に示す。図-8 より、6 ヶ月間 (26 週) の促進養生の結果、中性化深さは約 4.5mm となり、この値を用いて「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, 1991.7, 日本建築学会」に準じて一般環境における 100 年後の中性化深さを算定した結果 5mm 程度となった。PCaPC 床版のかぶりを 35mm と仮定すると 100 年後における計算上の中性化残りは 30mm 以上となり、フライアッシュコンクリートの十分な鋼材腐食抵抗性が確認された。

3.1.6 塩分浸透

FA-36 配合のフライアッシュコンクリートおよび、HC-36 の早強セメント単味のコンクリートを塩水に 6 ヶ月間浸漬した後に測定した塩化物イオン拡散係数を表-6 に示す。FA-36 は早強セメント単味の HC-36 と同一の W/B であるが、塩分拡散係数は半分以下となった。これよりフライアッシュを混和材として用いることによりコンクリートの塩分浸透抵抗性が向上することが確認された。

表-6 塩化物イオン拡散係数

項目	FA-36 (FA 使用)	HC-36 (HC 単味)
塩化物イオン拡散係数 (cm ² /年)	0.609	1.47

3.2 プレキャスト PC 床版製造実験

3.2.1 コンクリートの性状

(1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験状況を写真-1に示す。実機ミキサでPCaPC床版用配合であるFA-PCa配合の練り混ぜた結果、基準値を満足する良好なフレッシュ性状を有していた。フレッシュコンクリートの経時変化を表-7に、スランプの経時変化を図-10に、空気量の経時変化を図-11に示す。室内試験練りによりスランプおよび空気量の経時変化の傾向を把握し、練上り時の目標値としてスランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $5.5 \pm 1.5\%$ とした結果、コンクリート打設時（練上り 15 分後を想定）におけるフレッシュコンクリート性状を管理することが可能となり、目標値であるスランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$ および空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ を満足した。

(2) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を図-12に示す。フライアッシュコンクリートは初期強度発現が緩慢となる懸念があったが、図-12に示すように良好な強度発現を示し、所要の脱枠時（プレストレス導入時）強度および強度保証材齢における設計基準強度を満足し、プレテンション部材にも適用可能であることが確認された。



写真-1 フレッシュコンクリートの試験状況

表-7 フレッシュコンクリートの経時変化

配合	測定時期	スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T. (°C)	A.T. (°C)
FA-PCa	練上り直後	19.5	5.9	20.0	18.0
	15 分後	10.0	5.2	20.4	18.9
	30 分後	10.0	5.0	20.4	18.9

※ C.T.: コンクリート温度, A.T.: 外気温

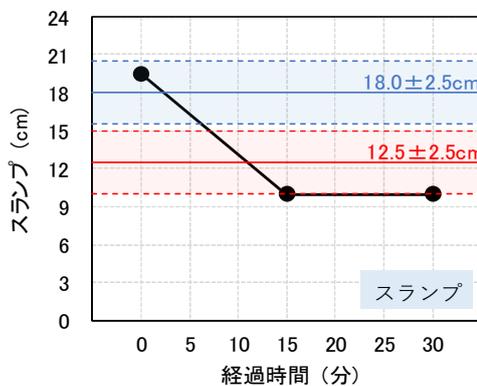


図-10 スランプの経時変化

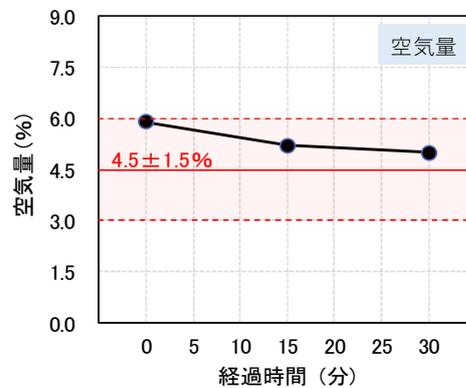


図-11 空気量の経時変化

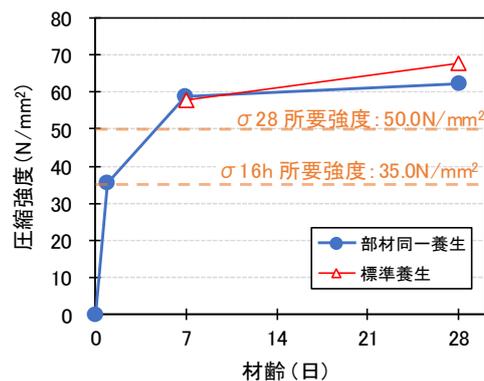


図-12 圧縮強度試験結果

3.2.2 施工性

部材のコンクリート打設状況を写真-2に、表面仕上げ状況を写真-3に、間詰め部（アゴ形状）の充填状況を写真-4に、脱枠後のPCaPC床版の外観を写真-5に示す。フライアッシュコンクリートはPCaPC床版への打設に十分な施工性を有し、プレキャスト製品工場の通常の施工方法で十分に打設可能であった。また、床版の間詰め部（アゴ形状）などの狭窄部でも問題なく充填され、打込み面の表面仕上げも問題なかった。

製造したPCaPC床版を屋外に約半年暴露し観察した結果、部材には問題となる劣化や、有害なひび割れ等は認められず、フライアッシュコンクリートを用いて高品質なPCaPC床版の製造が可能であることが確認された。

4. まとめ

フライアッシュを使用したコンクリートのPCaPC床版への適用を検討した結果をまとめると以下となる。

- (1) 強度発現に問題は無く、スランプロスを事前に検討しコントロールすることで、施工可能なフレッシュ性状を有する範囲で所要強度を満足するW/Bを設定可能である。
- (2) 耐久性に関する検討の結果、乾燥収縮、凍結融解および中性化は要求性能を満足し、塩分浸透に対する抵抗性は早強セメント単味の場合に比べ優れている。
- (3) フライアッシュコンクリートを用いることにより、高品質なPCaPC床版の製造が可能である。



写真-2 コンクリート打設状況

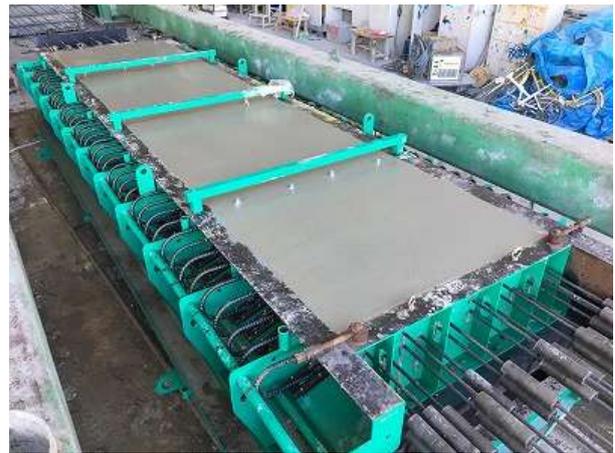


写真-3 表面仕上げ状況



写真-4 間詰め部（アゴ形状）の充填状況



写真-5 PCaPC床版の外観