

フライアッシュのPC床版への適用の検討

三菱マテリアル(株)	修士(工学)	○木村 祥平
三菱マテリアル(株)	博士(工学)	桜田 道博
新関西菱光(株)	修士(工学)	新里 良輔
(株)ピーエス三菱	正会員	中瀬 博一

Abstract : In order to apply fly ash to precast pre-stressed concrete slabs, properties of concrete using fly ash were measured. Furthermore, the workability and the crack resistance were confirmed by the actual member production test. As a result, Even if using fly ash, it was possible to obtain the strength necessary for the introduction of pre-stress. Also, it was confirmed the concrete using fly ash was enough durable. There were almost no problems in term of workability at the time of manufacturing an actual pre-cast slab and resistance to cracking after completion of the slab. From the above results, it is clarified that fly ash is applicable to precast pre-stressed concrete slab.

Key words : fly ash, pre-stressed concrete, precast concrete, sustainability, durability

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の多くが供用から50年を迎え、社会インフラの維持管理や更新が注目されている。とくに、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キャスト(以降, PCa)プレストレストコンクリート(以降, PC)床版に取り替える工事が増えている。財政の逼迫や少子高齢化が進行する中、今後更新されるPCaPC床版には、耐久性や品質の向上による長寿命化が求められる。一方、石炭火力発電所などから年間1000万t以上産出されるフライアッシュ(以降, FA)は、混和材として用いることで長期強度の増進、水和発熱の低減、アルカリ骨材反応の抑制および化学抵抗性の向上など多くのメリットがある^{1), 2), 3)}。さらに、セメントの一部をFAに置換することでコンクリートの材料に起因するCO₂排出量を削減できるため、PCaPC床版にFAを適用することによるメリットは大きいと考えられる。ただし、PCaPC床版はプレストレスを導入するため、蒸気養生直後に35N/mm²以上の圧縮強度を発現することが求められる。FAは一般に初期強度の発現が緩慢であるため、PCaPC構造物への適用は進んでいないのが現状である。

そこで、本報ではPCaPC床版へのFAの適用性を確認するため、コンクリートの各種性状を室内試験により評価し、さらに実機試験によって実部材の施工性やひび割れ抵抗性について確認した。

2. 試験概要

2.1 コンクリートの要求性能

対象とするコンクリート(PCaPC床版)の要求性能を表-1に示す。材齢16時間のプレストレス導入時の設計基準強度は35N/mm²とし、これに割増係数1.16(変動係数8%相当)を乗じた40.6N/mm²を配合強度とした。また、材

表-1 コンクリートの要求性能

項目	評価基準
設計基準強度	50N/mm ² (材齢28日)
プレストレス導入時の強度(特性値)	35N/mm ² (材齢16時間)
スランプ(打込み時)	12±2.5cm
空気量	4.5±1.5%

齢28日における設計基準強度は50N/mm²とし、これに割増係数1.16を乗じた58N/mm²を配合強度とした。打込み時のスランプは12±2.5cmとし、空気量は4.5±1.5%とした

2.2 試験方法

FAを用いたコンクリートのフレッシュ性状、強度性状、収縮特性および耐久性を確認するため、表-2に示す試験を行った。また、FAを用いたPCaPC床版の施工性、ひび割れ抵抗性を確認するため、実部材製作試験も行った。

2.3 使用材料

使用材料およびFAの諸物性をそれぞれ表-3および表-4に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。FAにはJIS A 6201のII種に適合するよう分級したものを使用した。混和剤にはコンクリート製品用の高性能減水剤を用いた。

2.4 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-5に示す。No. 1の配合(以降、H単味)は結合材が早強ポルトランドセメント単味で現状のPCaPC床版の配合である。No. 2の配合は水結合材比(W/B)がH単味と同じ35.9%で、結合材に対するFAの置換率を15%とした配合である。後述する乾燥収縮試験、凍結融解試験、促進中性化試験および塩化物イオン拡散係数試験はこの配合で実施した。No. 3, No. 4およびNo. 5の配合はFAを用いたコンクリートで結合材水比(B/W)と圧縮強度の関係を把握するための配合で、それぞれW/Bを35.9%, 33.0%および30.0%とした。No. 6の配合は所要の圧縮強度を満足する配合であり、この配合で実部材製作を行った。

2.5 練混ぜ方法

練混ぜ方法を図-1に示す。練混ぜには公称容量50Lの強制練り水平二軸ミキサを使用した。

2.6 養生方法

本検討ではPCaPC床版を対象としているため、コンクリートには蒸気養生を行った。蒸気養生条件を図-2に示す。蒸気養生は実際のPCaPC床版の製作時と同様の条件とし、前置き3時間、昇温速度10°C/h、最高温度50°C(4時間)、

表-2 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	備考
スランプ	JIS A 1101	練混ぜ直後と15分後*に測定
空気量	JIS A 1128	
圧縮強度	JIS A 1108	材齢16時間、28日に測定
乾燥収縮試験	JIS A 1129	前養生方法は表-6、目標値は表-7を参照
凍結融解抵抗性	JIS A 1148	
塩化物イオン拡散係数	JSCE-G572	
中性化抵抗性	JIS A 1153	
実部材製作	-	施工性、ひび割れ抵抗性の確認

* 打込み時を想定

表-3 使用材料

材料	記号	備考
セメント	H	早強ポルトランドセメント：密度3.14g/cm ³
FA	FA	JIS II種相当、表-4参照
細骨材	S1	鹿沼市産砕砂：表乾密度2.56g/cm ³ 、吸水率1.05%
	S2	行方市産陸砂：表乾密度2.53g/cm ³ 、吸水率2.60%
粗骨材	G	鹿沼市産砕石：表乾密度2.61g/cm ³ 、吸水率0.98%
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤
	AE	アルキルエーテル系AE剤

表-4 FAの諸物性

FAの記号	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	ig.loss (%)	MB吸着量 (mg/g)	活性度指数(%)	
					28日	91日
A	4100	2.33	2.91	0.75	80	95
B	4720	2.34	3.16	0.70	91	107

表-5 コンクリートの配合

配合No.	W/B (%)	FAの記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						SP/B (%)
					W	B		S1	S2	G	
						H	FA				
1	35.9	-	12±2.5	4.5±1.5	157	438	-	338	334	1031	0.75
2	35.9	A			149	353	62	343	339	1049	0.75
3	35.9	B			149	353	62	343	339	1049	0.65
4	33.0	B			149	384	68	326	323	1049	0.65
5	30.0	B			149	422	75	307	304	1049	0.75
6	32.7	B	18±2.5		149	388	69	324	320	1049	1.60

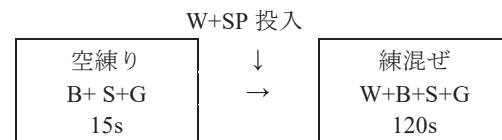


図-1 練混ぜ方法

降温速度5°C/hとした。なお、既往の研究によると、FAを用いたプレキャスト部材は耐久性向上の観点から蒸気養生後に湿潤養生を3日以上行うことが望ましいと報告されている⁴⁾。そこで、本検討では蒸気養生後に3日間湿潤養生した場合(以降、D3)と、蒸気養生後に湿潤養生を行わない場合(以降、D)の2水準で耐久性試験を実施することとした。耐久性試験における前養生方法を表-6に、各耐久性試験における評価基準を表-7に示す。なお、塩化物イオン拡散係数についてはH単味のコンクリート(配合No.1)との相対比較により評価した。

2.7 実部材製作試験

実部材製作試験で製作した試験体の形状を図-3に示す。実部材製作試験ではプレション方式のPCaPC床版をモデル化した実部材を製作し、打込み時の施工性および部材のひび割れ抵抗性を確認した。なお、実部材製作試験におけるコンクリートの練混ぜは実機(公称容量2m³の強制練りパン型ミキサ)により行った。

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状および圧縮強度

コンクリートのフレッシュ性状と圧縮強度を表-8に示す。フレッシュ性状および圧縮強度はすべての配合で目標値を満足した。ただし、配合No.2において、練上り直後のスランプは10.0cmと目標値を満足したものの、打込み時を想定した経時15分のスランプは3.5cmまで低下した。そのため、実部材製作試験においてはSP添加率を調整し、練上り直後のスランプの目標値を18±2.5cmとした。その結果、配合No.6に示すようにスランプは練上り直後で19.5cm、打込み時(練上りから15分程度)で10.0cmとなり、打込み時時の目標スランプ(12±2.5cm)を満足することができた。コンクリートのB/Wと圧縮強度との関係を図-4に示す。この結果より、所要の圧縮強度を満足するW/Bは32.7%となった。W/Bを32.7%としたコンクリート(配合No.6)で実部材を製作した結果、材齢16時間および材齢28日の圧縮強度は目標値を満足したが、材齢16時間の圧縮強度はやや低くなった。実部材試験においては前養生時の温度管理が不可能であり、さらに製造時は外気温が低かったため、その影響が若材齢において現れたものと考えている。

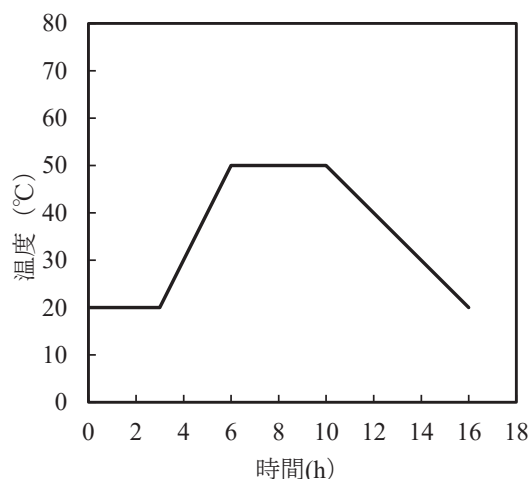


図-2 室内試験における蒸気養生条件

表-6 耐久性試験における前養生の方法

試験名	条件	材齢(日)			
		1	4	28	56
乾燥収縮	D	SC	←乾燥開始(AC)		
	D3	SC	WC	←乾燥開始(AC)	
促進中性化	D	SC	AC	←促進開始	
	D3	SC	WC	AC	←促進開始
凍結融解	D	SC	AC	WC	←凍結融解開始
	D3	SC	WC	AC	WC
塩化物イオン 拡散係数	D	SC	AC	←浸漬開始	
	D3	SC	WC	AC	←浸漬開始

SC : 蒸気養生, WC : 20°C水中養生, AC : 20°C RH60% 気中保管

表-7 各種耐久性試験の評価基準

試験項目	評価基準
収縮特性	26週における乾燥収縮率 $\leq 800 \times 10^{-6}$ *1
中性化抵抗性	100年後の中性化残り $\geq 25\text{mm}$ *2
凍結融解抵抗性	300サイクル時の相対動弾性係数 $\geq 90\%$ *3
塩化物イオン拡散係数	H単味より小さいこと

*1 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2018⁵⁾における計画供用期間の級が長期・超長期相当

*2 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]⁶⁾による塩害環境下における中性化残り

*3 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]⁶⁾により、凍結融解抵抗性の照査が不要とされる基準

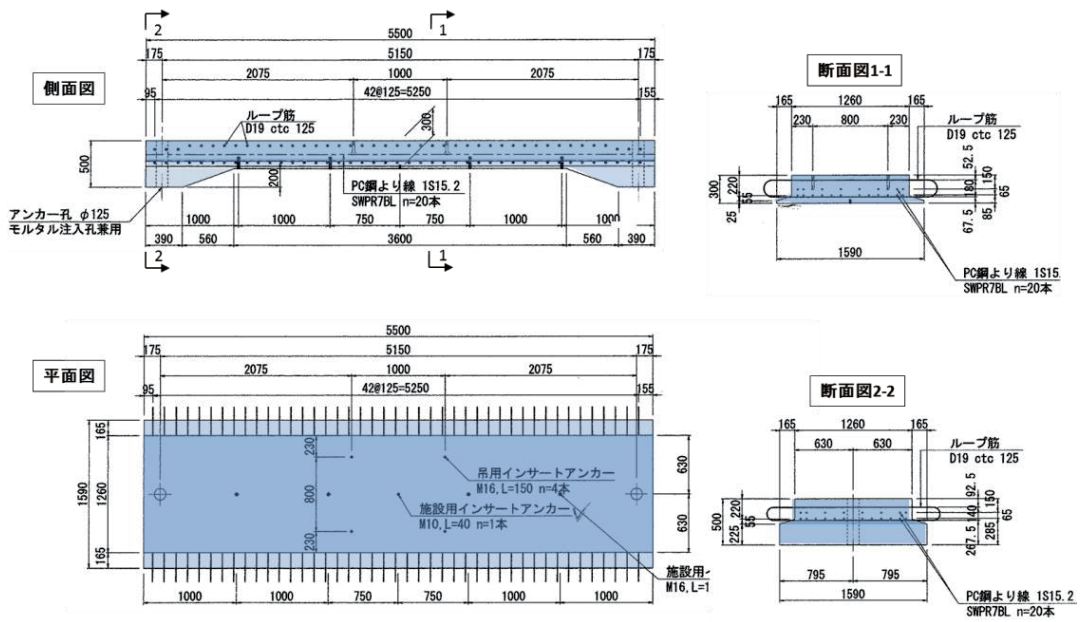


図-3 製作した部材

3.2 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験の結果を図-5に示す。FAを用いたコンクリート(配合No. 2)の乾燥収縮率はDおよびD3のいずれの条件であっても同程度であり、蒸気養生後の湿潤養生日数が乾燥収縮率に及ぼす影響は小さいことが確認された。また、乾燥収縮率も 800×10^{-6} に達しておらず、目標値を満足した。

3.3 促進中性化試験

促進中性化試験の結果を図-6に示す。蒸気養生後に湿潤養生を3日行ったD3では中性化は認められなかったが湿潤養生を行わなかったDでは半年で4.6mmの中性化が確認された。W/Bが低いと水和物の組織が緻密になるため、中性化を引き起こす二酸化炭素が透過しにくくなる。本試験において、湿潤養生を行わない場合には表層から5mm程度までは二酸化炭素が侵入するものの、5mmより深い位置においては二酸化炭素が侵入できなかったものと考えられる。ここで、PCaPC床版の耐用年数を検討するため、式(1)および式(2)により一般環境における100年後の中性化深さを計算した⁷⁾。なお、計算には中性化が認められたDの結果を用いて行った。

$$A = \frac{d}{\sqrt{T_{act}}} \cdot \sqrt{\frac{CO_2}{CO_{2act}}} \quad (1)$$

$$D = A \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

表-8 フレッシュ性状および圧縮強度

配合No.	スランブ(cm)		空気量(%)		圧縮強度(N/m ²)		備考
	直後	15分後	直後	15分後	16時間	28日	
1	12.0	—	4.2	—	46.7	60.6	耐久性検討
2	10.0	3.5	4.0	3.0	45.8	61.4	
3	12.5	—	4.5	—	40.0	53.6	
4	12.5	—	4.5	—	43.8	56.2	W/Bの検討
5	13.0	—	4.0	—	52.8	64.0	
6	19.5	10.0	5.9	5.2	35.6	62.2	実部材製作

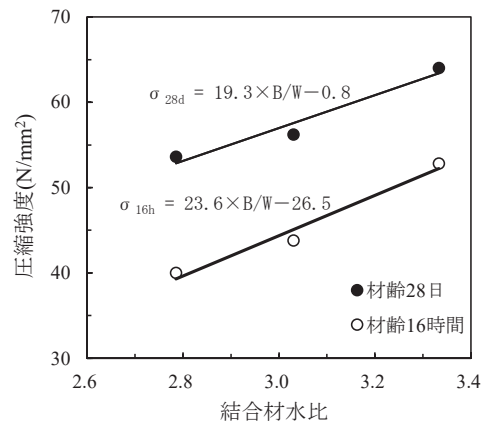


図-4 W/Bと圧縮強度の関係

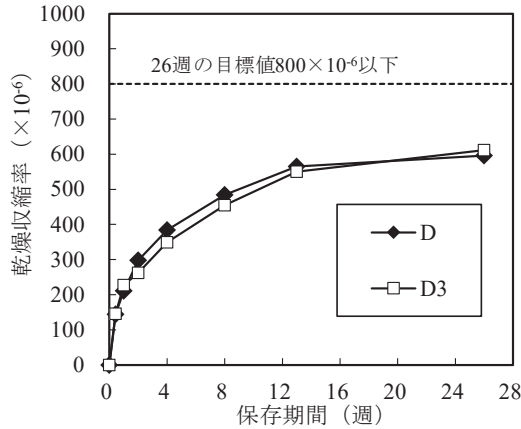


図-5 乾燥収縮試験結果

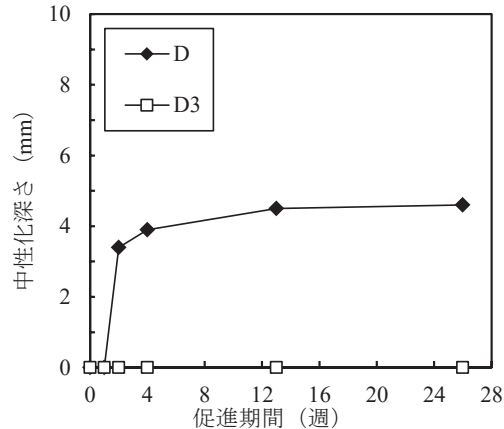


図-6 促進中性化試験結果

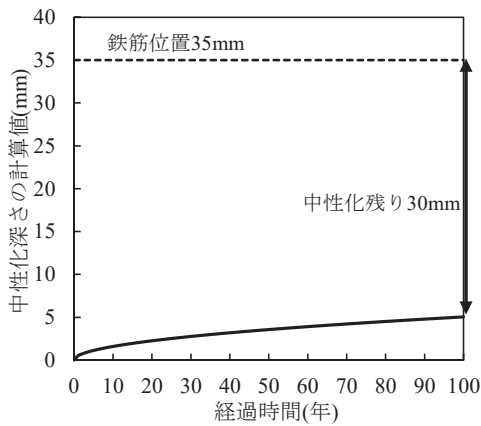


図-7 D の中性化深さの予測値

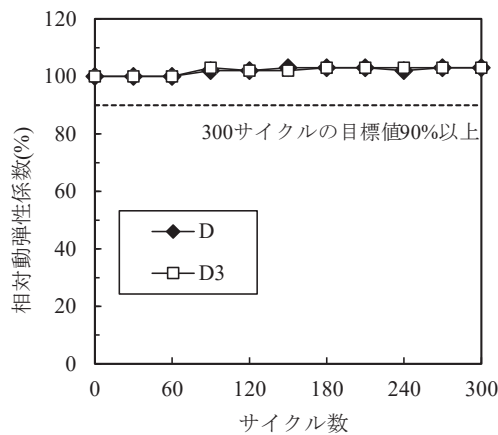


図-8 相対動弾性係数の推移

ここに、 D ：一般環境における t 年後の中性化深さ (mm)， A ：一般環境における中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)， CO_2 ：一般大気中の炭酸ガス濃度 (%)， CO_{2act} ：促進中性化試験における炭酸ガス濃度 (%)， T_{act} ：促進期間 (年)， t ：一般環境下における暴露年数 (年)， d ：促進中性化試験における中性化深さ (mm)

式(1)に、促進中性化試験における中性化深さ $d(=4.6\text{mm})$ ，促進期間 $T_{act}(=0.5\text{年})$ ，一般大気中の炭酸ガス濃度 $CO_2(=0.03\%)$ ，および促進中性化試験における炭酸ガス濃度 $CO_{2act}(=5.0\%)$ を代入すると一般環境における中性化速度係数 A は $0.50\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ となる。式(2)の t に経過時間(年)を代入して100年後までの一般環境における中性化深さを計算した結果を図-7に示す。一般環境における100年後の中性化深さは 5.0mm 程度であった。かぶりを 35mm と仮定すると中性化残りは 30mm 以上であり、目標値を満足した。今回の検討ではコンクリートの W/B が 35.9% と低く、水和物の組織が緻密であるために FA を用いた場合でも中性化が問題とならなかつたと考えられる。

3.4 凍結融解抵抗性

コンクリートの相対動弾性係数の推移を図-8に示す。相対動弾性係数は乾燥収縮ひずみと同様に湿潤養生の効果は認められず、いずれも目標値を満足した。 FA を用いたコンクリートにおいても、適切な空気量を確保することで凍結融解に対して十分な耐久性を有することができると考えられる。

3.5 塩化物イオン拡散係数

塩水浸漬期間が半年における塩化物イオン拡散係数を表-9に示す。なお、 H 単味の値は、前養生条件を D とした場合の結果である。 FA を用いたコンクリートの塩化物イオン拡散係数は、 D および $D3$ で大差はなく、蒸気養生後の湿潤養生による耐久性の向上は認められなかった。一方、 FA を用いたコンクリートと H 単味の塩化物イオン拡散係数を比較すると、 FA を用いたコンクリート ($D, D3$) の値は H 単味の

半分程度であり，FAを用いることで塩害に対する抵抗性が向上することが確認された。FAを用いることでポゾラン反応により組織が緻密になったためと考えられる。

3.6 実部材製作

製作した試験体の打込み状況および脱枠後の状況を写真-1 および写真-2 に示す。コンクリートの施工性に問題はなく，脱枠直後の部材に充填不良やひび割れなどの不具合は認められなかった。FAを用いた PCaPC 床版の実用化が十分可能であることが確認された。

4. まとめ

FAのPCaPC床版への適用を目的として，コンクリートのフレッシュ性状，強度性状，収縮特性，耐久性，実部材の施工性などについて検討した。その結果，以下の結論が得られた。

- ① FAを使用した場合でも，W/Bを3%程度下げることによってプレストレスの導入に必要な圧縮強度を確保できた。
- ② コンクリートの耐久性は，蒸気養生後の湿潤養生の有無に関わらず十分高かった。また，塩害に対する耐久性はFAを用いることで向上した。
- ③ 練上り直後のスランプを 18 ± 2.5 cmとすることで，実部材製作時における施工性は確保できた。また，製作した部材にひび割れなどの不具合は発生しなかった。
- ④ 以上より，FAを用いたPCaPC床版の実用化が十分可能であることが確認された。

最後に，本研究ではPCaPC床版に加え，PCaPC床版同士を接合する場所打ちの間詰コンクリートについてもFAの適用を検討している。FAを用いた間詰コンクリートの検討結果については今後報告する。

参考文献

- 1) 石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書，p. 6，2018. 2
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー94 フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案)，1999
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー132 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術－利用拡大に向けた設計施工指針試案－，2009
- 4) 山村智，鈴木雅博，小林和弘，鳥居和之：分級フライアッシュを用いたコンクリートのプレテンションPC 桁への適用に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35，No. 1，pp. 181-186，2013. 6
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事2018，2018. 7
- 6) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2017. 3
- 7) 日本建築学会：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

表-9 塩化物イオン拡散係数

コンクリートの種類	FA 使用(配合 No.2)		H 単味(配合 No1)
	D	D3	D
前養生方法			
塩化物イオン拡散係数(cm ² /年)	0.609	0.779	1.47



写真-1 打込み状況



写真-2 部材の外観