論文 分級フライアッシュのプレキャスト PC 床版への適用検討

新里　良輔*1・木村　祥平*1・桜田　道博*2・黒岩　義仁*3

要旨：フライアッシュをプレキャスト PC 床版に適用することを目指し，分級したフライアッシュの比表面積や蒸気養生方法をパラメータとして強度発現性や耐久性を検討した。検討の結果，分級したフライアッシュを用いたコンクリートの圧縮強度は，比表面積よりも産地の影響を大きく受けることが確認された。また，強度発現が比較的良好なフライアッシュを用いてコンクリートの耐久性について検討した結果，コンクリートの耐久性は早強ポルトランドセメント単味の場合と同等以上であった。以上より，フライアッシュを用いることで高耐久なプレキャストコンクリートを製造できることが確認された。

キーワード：フライアッシュ，プレキャストコンクリート，蒸気養生，早強ポルトランドセメント，床版

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。特に，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ストレストコンクリート(以降，PC)製のプレキャスト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，今後更新されるプレキャスト PC 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。一方で，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 [1]，混和材として用いることでコンクリートが緻密化し，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 [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 CO_2 排出量の低減や未利用資源の有効活用など，環境負荷の低減にもつながることから，プレキャスト PC 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。しかし，プレキャスト PC 床版にはプレストレスを導入するため，蒸気養生直後に 35N/mm^2 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，PC 構造物への適用は進んでいないのが現状である。そこで，強度発現性の向上を期待し，分級して表面積を大きくした FA(以下，分級 FA)をプレキャスト PC 床版に適用することを目指し，FA の比表面積や蒸気養生方法をパラメータとして，強度特性，収縮特性，耐久性などを検討した。

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(PC 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/mm^2 とし，これに割増係数 1.16(変動係数 8%相当)を乗じた 40.6N/mm^2 を配合強度とした。また，材齢 28 日における設計基準強度は 50N/mm^2 とし，これに割増係数 1.16 を乗じた 58N/mm^2 を配合強度とした。スランプは 12±2.5cm，空気量は 4.5±1.5%とした。コンクリートの供用期間の目標は 100 年とした。なお，供用期間 100 年を満足する各耐久性の目標設定の詳細については次章で述べる。

2.2 使用材料

使用材料を表－2 および表－3 に示す。分級 FA は産地 A，産地 B および産地 C の 3 つを使用した。なお，分級 FA の名称は産地および比表面積を表している。たとえば，A3890 であれば，FA の産地が A で，比表面積が 3890cm^2/g の分級 FA であることを表す。

2.3 配合

配合を表－4 に示す。配合 No.1 は早強ポルトランドセメント単味の配合(以降，H)で，No.2～No.4 の配

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設計基準強度	35N/mm^2(材齢 16 時間)
スランプ	12±2.5cm
空気量	4.5±1.5%
収縮特性および耐久性状	供用期間 100 年

*1 三菱マテリアル株式会社　セメント研究所　コンクリートグループ(正会員)
*2 三菱マテリアル株式会社　セメント研究所　コンクリートグループ　グループリーダー(正会員)
*3 三菱マテリアル株式会社　セメント事業カンパニー

表－2　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
分級 FA	FA	JIS II 種相当，分級品，表－3 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 AE 減水剤
	AE	アルキルエーテル系 AE 剤

表－3　使用した分級 FA の諸物性

分級 FA の名称	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
A5990	5990	2.42	2.69	0.67	88.5	103.2
A4680	4680	2.38	2.31	0.43	86.0	99.7
A3890	3890	2.28	2.31	0.39	81.4	95.1
B6510	6510	2.39	2.80	0.77	86.5	102.4
B5210	5210	2.31	2.66	0.62	85.5	100.7
B4380	4380	2.26	2.73	0.58	81.5	95.8
C4100	4100	2.33	2.91	0.75	80.0	95.0

合はそれぞれ産地 A，産地 B および産地 C の分級 FA を結合材に対して 15%置換した配合である。

2.4 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。

2.5 蒸気養生方法

蒸気養生方法を図－2 に示す。蒸気養生温度をパラメータとして圧縮強度を比較するため，蒸気養生時の最高温度は 50℃および 60℃の 2 種類とした。蒸気養生条件は，前置き時間(3 時間)，降温速度(5℃/時間)および蒸気養生終了時間(16 時間)を固定し，蒸気養生時の最高温度の保持時間(50℃×4 時間，60℃×2.3 時間)および前置き後の昇温速度(最大 15℃/時間)のみを変更した。

2.6 試験項目

試験項目および試験方法を表－5 に示す。分級 FA を用いたコンクリートのフレッシュ性状，強度性状，耐久性および収縮特性を検討するため表－5 に示す試験を行った。

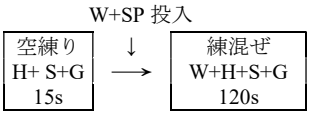
2.7 蒸気養生後の湿潤養生方法の検討

フライアッシュを用いた場所打ち部材の湿潤養生日数に関しては，土木学会で 7 日以上(平均気温 15℃以上の場合)と定められているが[4]，蒸気養生を実施するプレキャスト部材の湿潤養生日数に関しては定められていない。既往の研究によると，耐久性の観点から蒸気養生後の湿潤養生日数は 3 日程度とするのが望ましいと報告されているが，湿潤養生によりどの程度耐久性が向上するのか定量的に評価するには至っていないのが現状である[5]。

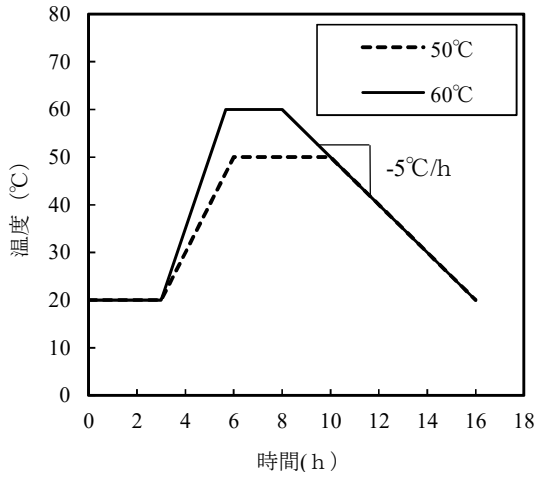
表－4　配合

配合 No.	W/B* (%)	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	395	0.75
2	35.9	12±2.5	4.5±1.5	150	356	63	340	336	1039	0.75
3	35.9	12±2.5	4.5±1.5	155	367	65	335	331	1028	0.75
4	35.9	12±2.5	4.5±1.5	149	353	62	343	339	1049	0.75

*W/B は水結合材比を表す。　**W(単位水量)は SP を含む。
***B は結合材(セメントおよび FA)を表す。



図－1　練混ぜ方法



図－2　蒸気養生条件

表－5　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	
コンクリート温度	JIS A 1156	
圧縮強度	JIS A 1108	標準養生は材齢 7, 28 日，蒸気養生は材齢 16 時間，28 日で測定
静弾性係数	JIS A 1149	
乾燥収縮試験	JIS A 1129	目標値は表－6,前養生方法は表－7 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	

*製品工場で練上りから打設まで 15 分かかることを想定

表－6　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≦800×10^{-6} *1
中性化抵抗性	100 年後の中性化残り≦25mm*2
凍結融解抵抗性	300 サイクル時の相対動弾性係数≧ 90%*2

*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 2015[6]による，*2 2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編][7]による

表－7　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	蒸気養生	←乾燥開始(気中保管)		
	D3	蒸気養生	湿潤養生	←乾燥開始(気中保管)	
促進中性化	D	蒸気養生	気中保管	←促進開始	
	D3	蒸気養生	湿潤養生	気中保管	←促進開始
凍結融解	D	蒸気養生	気中保管	湿潤養生	←凍結融解開始
	D3	蒸気養生	湿潤養生	気中保管	湿潤養生 ←凍結融解開始

*配合はすべて No.4, **湿潤養生は 20℃, ***気中保管は 20℃, RH60%

そこで, 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 水準で収縮特性および耐久性に関する試験を実施することとした。また，各耐久性試験の評価基準を表－6 に示す。各耐久性試験の前には，蒸気養生後の湿潤養生日数の効果が現れるよう表－7 の通り前養生を行った。

2.8 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は前養生方法を除いて JIS A 1129-1「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法–第 1 部：コンパレータ方法」に準拠して行った。評価基準は長さ変化率を 800×10^{-6} 以下とし，これは JASS 5[6] に規定されている計画供用期間の級で「超長期(200 年)」相当となる。

2.9 促進中性化試験

促進中性化試験は前養生方法を除いて JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して行った。評価基準は実環境(CO_2 濃度 0.03%)における 100 年後の中性化残りが 25mm 相当以上[7](かぶりを 35mm と仮定すると中性化深さで 10mm 以下)となるように定めた。

2.10 凍結融解試験

凍結融解試験は前養生方法を除いて JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠して行った。評価基準は凍結融解試験における 300 サイクル時の相対動弾性係数が 90%以上[7]とした。

3.　試験結果および考察

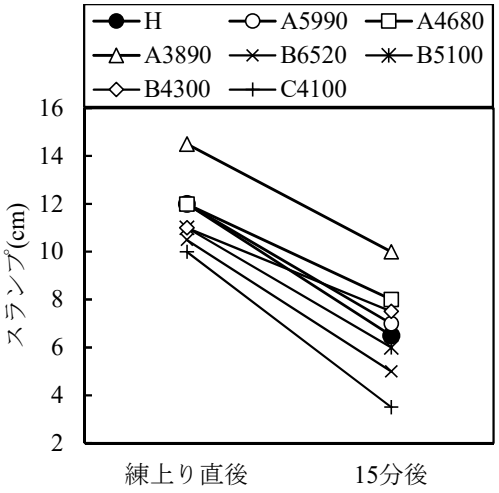
3.1 FA の種類がフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響

(1) フレッシュ性状

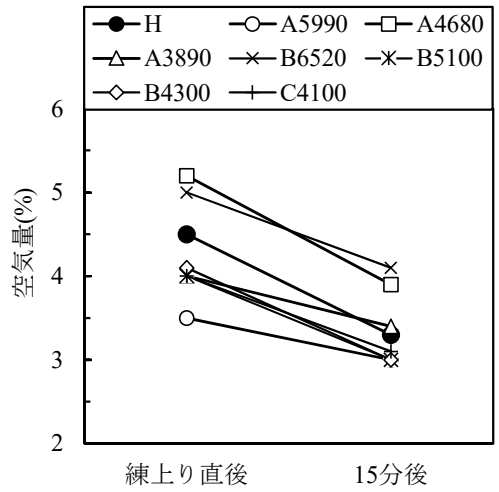
分級 FA の比表面積および産地をパラメータとして，フレッシュ性状および強度発現性に関する試験を実施した。コンクリートのフレッシュ性状を表－8，図－3 および図－4 に示す。分級 FA を用いた場合，目標のスランプを得るためのコンクリートの単位水量は，H 単味(配合 No.1)に比べて少なくなり，一般的なフライアッシュを使用した場合と同様の傾向となった[4]。目標の空気量を得るための AE 剤添加率は単位結合材量に対して産地 A(配合 No.2)が 0.010%, 産地 B(配合 No.3)が 0.025～0.035%，産地 C (配合 No.4)が 0.015%となり，H 単味の 0.005%に比べて多くなった。スランプの経時変化に関しては 3.5～6.5cm 程度であり，図－3 のとおり，分級 FA を用いた場合と H 単味の場合とでほとんど差は認められなかった。空気量の経時変化に関しても 0.5～1.3%程度であり，図－4 のとおり，分級 FA を用いた場合と H 単味の場合とで差はほとんどなかった。また，分級 FA の

表－8　コンクリートの配合およびフレッシュ性状

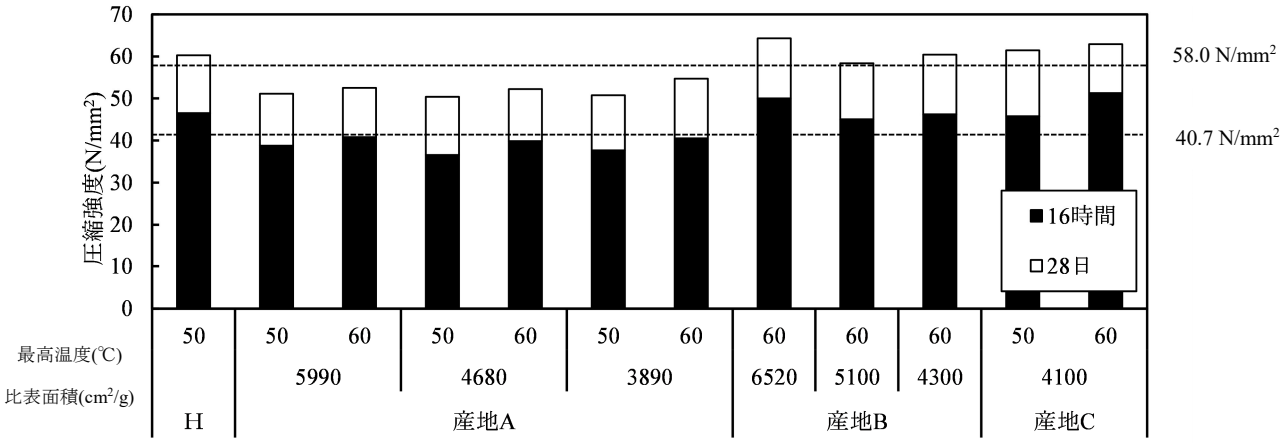
配合No.	配合名	W (kg/m³)	SP/B (%)	AE/B (%)	スランプ(cm) 直後	スランプ(cm) 15分後	空気量(%) 直後	空気量(%) 15分後
1	H単味	157	0.75	0.005	12.0	6.5	4.5	3.3
2	A5990	150	0.75	0.010	12.0	7.0	3.5	3.0
	A4680		0.75		12.0	8.0	5.2	3.9
	A3890		0.75		14.5	10.0	4.0	3.4
3	B6510	155	0.75	0.035	10.5	5.0	5.0	4.1
	B5210		0.75	0.025	11.0	6.0	3.7	3.0
	B4380		0.75		11.0	7.5	4.0	3.0
4	C4100	149	0.75	0.15	10.0	3.5	4.0	3.0



図－3　スランプの経時変化



図－4　空気量の経時変化



図－5　圧縮強度(蒸気養生)

比表面積によるスランプおよび空気量の経時変化の差もほとんど認められず，分級 FA の有無や比表面積がスランプおよび空気量の経時変化に及ぼす影響は小さいことが確認された。

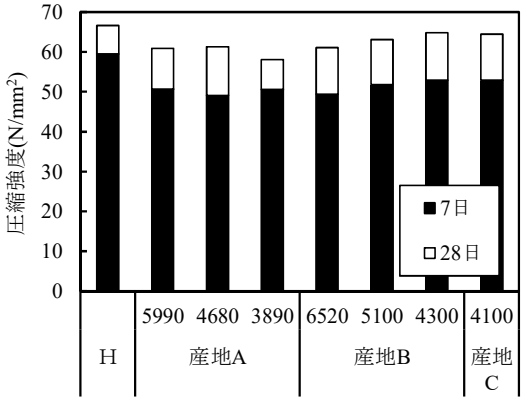
(2) 圧縮強度および静弾性係数

蒸気養生を行った場合の圧縮強度試験の結果を図－5 に示す。蒸気養生を行った場合は，フライアッシュの産地により圧縮強度が大きく異なり，産地 B および産地 C では H 単味と同等の圧縮強度が得られることが確認された。一方，比表面積が圧縮強度に及ぼす影響は小さく，同一産地であれば比表面積が変わっても圧縮強度はそれほど変化しないことがわかる。また，分級 FA の比表面積は 4000cm²/g 程度で十分と考えられる。標準養生を行った場合の圧縮強度試験の結果を図－6 に示す。標準養生を行った場合の圧縮強度は H 単味に比べて低く，蒸気養生を行ったときのように産地による強度差は認められなかった。

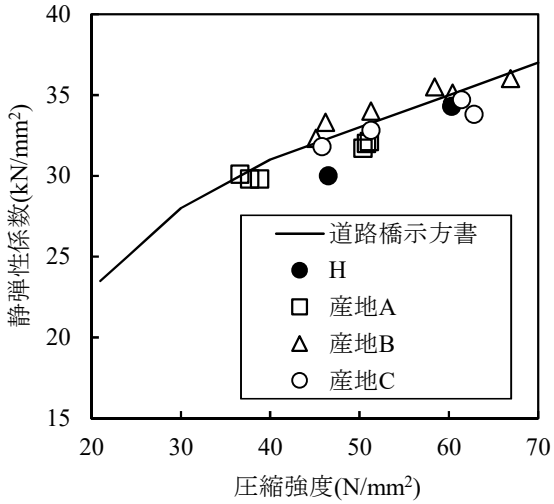
圧縮強度と静弾性係数の関係を図－7 に示す。なお，図中の実線は道路橋示方書 [8]に示されている静弾性係数の設計値である。分級 FA を用いたコンクリートの静弾性係数は道路示方書の設計値と同程度であり，分級 FA を用いた PC 構造物を設計する際に道路橋示方書の静弾性係数を用いても問題ないと考えられる。

3.2　蒸気養生方法の検討

図－5 の産地 A および産地 C の圧縮強度試験結果より，蒸気養生温度を 50℃から 60℃に高くすることで，圧縮強度は若干向上することがわかる。ただし，産地 A の分級 FA では圧縮強度の発現が悪く，蒸気養生温度を 60℃にしても所要の圧縮強度を満足しなかった。一方，産地 C の分級 FA では，蒸気養生温度が 50℃でも H 単味と同等の圧縮強度が発現している。プレキャスト部材の製作において，蒸気養生温度を高くすると，脱枠時に部材表面と外気の温度差が大きくなり，ひび割れのリスクが高まるため，プレキャスト PC 床版には蒸気養生温度が 50℃でも所要の圧縮強度を満足する産地 C の分級 FA が望ましいと考えられ



図－6　圧縮強度(標準養生)



図－7　圧縮強度と静弾性係数の関係

る。したがって，以降の検討は産地 C の分級 FA を用いて行うこととした。

3.3　蒸気養生後の湿潤養生方法の検討

(1) 収縮特性

乾燥収縮試験の結果を図－8 に示す。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。

(2) 中性化抵抗性

促進中性化試験の結果を図－9 および写真－1 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。これは，3 日の湿潤養生により供試体の表面が緻密化したことによると考えられる。そこで，式(1)および式(2)により一般環境での 100 年後の中性化深さを計算した [9]。式(1)に，促進中性化試験における中性化深さ d(＝4.6mm), 促進期間 T_{act}(＝0.5 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 0.50mm/√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－10 に示す。一般環境における 100 年後の中性化深さは 5.0mm 程度であり，かぶりを 35mm と仮定すると中性化残りは 30mm 以上となり，分級 FA を用いたコンクリートは中性化に対して十分な抵抗性を有していると考えられる。

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

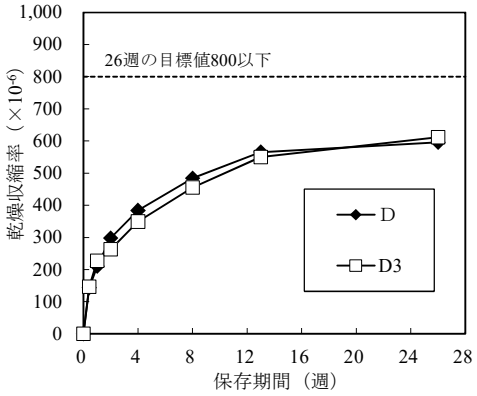
$$D = A \cdot \sqrt{t} \qquad (2)$$

ここに，

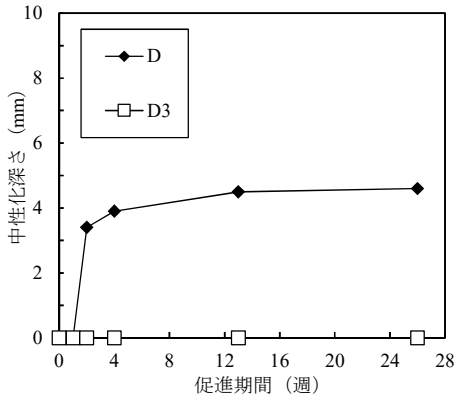
- D：一般環境における t 年後の中性化深さ（mm）
- A：一般環境における中性化速度係数（mm/√年）
- CO_2：一般大気中の炭酸ガス濃度（%）
- CO_{2act}：促進中性化試験における炭酸ガス濃度（%）
- T_{act}：促進期間（年）
- t：一般環境課における曝露年数（年）
- d：促進中性化試験における中性化深さ（mm）

(3) 凍結融解抵抗性

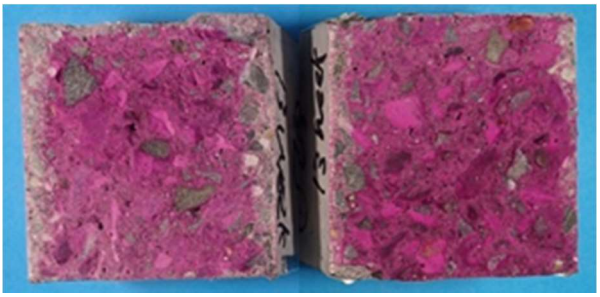
凍結融解試験における相対動弾性係数を図－11 に示す。また，凍結融解サイクル後の供試体を写真－2 および写真－3 に示す。凍結融解 300 サイクルまでの相対動弾性係数は，D および D3 のいずれの条件であっても同程度であり，蒸気養生後の湿潤養生日数が凍結融解抵抗性に及ぼす影響はほとんどないことが確認された。また，D および D3 の相対動弾性係数は 90%以上であり，蒸気



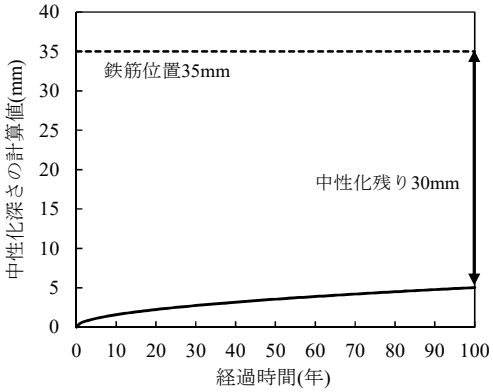
図－8　長さ変化率



図－9　促進期間と中性化深さの関係



写真－1　促進26週後の供試体(左側：D，右側：D3)



図－10　Dの中性化深さの予測値

養生後に湿潤養生を行わなくても十分な凍結融解抵抗性が得られることが確認された。

4. まとめ

分級 FA の産地，比表面積および蒸気養生時の最高温度が圧縮強度に及ぼす影響を検討した。さらに，選定した分級 FA の種類(産地 C)，比表面積および蒸気養生条件で製造したコンクリートで，蒸気養生後の湿潤養生日数が収縮特性や耐久性に及ぼす影響を検討した。その結果，以下の知見が得られた。

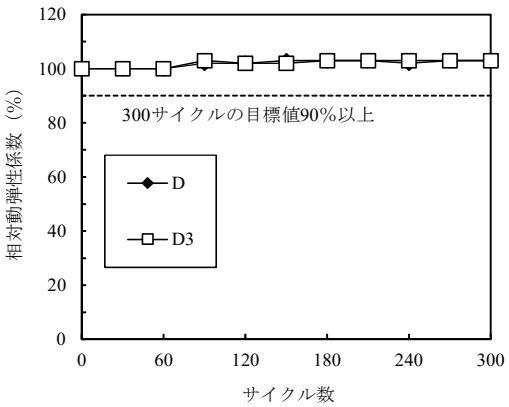
(1) 分級FAの比表面積がコンクリートのフレッシュ性状および強度発現性に及ぼす影響は小さいことが確認された。

(2) 蒸気養生温度を50℃から60℃に高くすると圧縮強度は若干増加した。プレキャスト部材の製作において，蒸気養生温度を高くすると温度差によりひび割れが発生するリスクがあるため，蒸気養生温度が50℃でも所要の圧縮強度を満足する産地Cの分級FAを選定することとした。

(3) FAの産地(A，B，C)により，蒸気養生後の強度発現性が異なり，産地BおよびCの分級FAはH単味と同等の圧縮強度が得られることが確認された。

(4) 蒸気養生後の湿潤養生が収縮特性および凍結融解抵抗性に及ぼす影響はほとんどなかった。中性化抵抗性に関しては，蒸気養生後に湿潤養生を行った方が優れていたものの，湿潤養生を行わなくても十分な耐久性(耐用年数100年相当)が得られた。

以上より，分級FAをプレキャストPC床版に適用することは十分可能と考えられる。



図－11　相対動弾性係数の推移

写真－2　凍結融解 300 サイクル後の供試体(D)

写真－3　凍結融解 300 サイクル後の供試体(D3)

参考文献

1) 日本コンクリート工学会：コンクリートにおける未利用資源の利用拡大に関する特別委員会報告書，p.11，2016

2) 荒井康夫：セメントの材料化学，大日本図書株式会社，pp.214-215，1990

3) 長瀧重義，大賀宏行，増田和機，谷直樹：フライアッシュコンクリートの品質管理手法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.65，No.1，pp.223-228，1987.6

4) 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，p.123，2009

5) 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

6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2015，p.194，2015

7) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，p.81，2017

8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，p.87，2012

9) 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，pp.183-184，1991