

# プレキャスト PC 床版接合部の適用を目的とした収縮補償型フライアッシュコンクリートの開発

鈴木 雅博\*<sup>1</sup>・杉山 彰徳\*<sup>2</sup>・村松 達也\*<sup>3</sup>・鳥居 和之\*<sup>4</sup>

既設 RC 床版の更新方法として、プレキャスト PC 床版を用いる場合が増えている。この床版接合部には、通常、収縮補償型コンクリートが用いられている。しかし、凍結防止剤が作用する環境下で、石灰系膨張材を使用すると、コンクリートのアルカリシリカ反応による膨張が促進されることが懸念される。そこで、本研究では、凍結防止剤の浸透による塩害とアルカリシリカ反応の抑制を目的にフライアッシュを混入した収縮補償型高強度フライアッシュコンクリートのアルカリシリカ反応抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性、物質移動抵抗性などを実験を行って検討した。また、フライアッシュコンクリートの品質は、湿潤養生日数の影響を大きく受けるため、圧縮強度発現性と耐久性について、それぞれの湿潤養生日数を実験を行って検討した。その結果、湿潤養生日数は、圧縮強度の観点からは4日、耐久性の観点からは7日とすることが望ましいことが認められた。また、膨張材を添加した場合においても、アルカリシリカ反応の抑制効果が確認できたことから、プレキャスト PC 床版接合部に収縮補償型高強度フライアッシュコンクリートを適用することの有用性が認められた。

キーワード：分級フライアッシュ、収縮補償、耐久性、湿潤養生日数

## 1. はじめに

劣化した RC 既設床版の更新において、プレキャスト PC 床版（以降、PCaPC 床版と呼ぶ）を用いる場合が増えている。PCaPC 床版に用いるコンクリートは、同様の劣化を抑制するため、高耐久化が望まれる。この方策の1つとして、高耐久化と環境負荷低減などを目的として早強ポルトランドセメントの一部をフライアッシュや高炉スラグ微粉末に置換したコンクリートが注目されている。混和材の使用は、コンクリートの緻密化による遮塩性の向上やアルカリシリカ反応（以下、ASR と呼ぶ）の抑制など、耐久性の向上に寄与することが知られている<sup>1,2)</sup>。また、コンクリートの二酸化炭素排出量の低減や未利用資源の有効活用などの環境負荷の低減にもつながる。このことから、混和材を PCaPC 床版に活用することは、高耐久化と環境負荷低減化の技術の1つになりうる。これまでフライアッシュは品質が安定しないため、PCaPC 床版に使用されてこなかったが、フライアッシュを分級することにより、

JIS A 6201 の I 種に近い粉末度を有し、ボズラン反応性も高く、高品質で安定したフライアッシュ（以降、分級フライアッシュと呼ぶ）が供給されるようになった<sup>3,4)</sup>。こうした背景から、筆者らは、分級フライアッシュを用いたコンクリートをプレテンション PC 桁に適用するため、強度特性、耐久性およびひび割れ抵抗性の観点から蒸気養生後の湿潤養生日数や構造特性を検討し、蒸気養生後の湿潤養生日数が耐久性を確保するために3日程度必要であることや早強ポルトランドセメント単味のコンクリートを用いたプレテンション PC 桁と同程度の構造特性を有することなどを明らかにしてきた<sup>5)</sup>。

ここで、PCaPC 床版接合部は、現場打ちの収縮補償型コンクリートとなるが、PCaPC 床版と同様に高耐久化とすることにより、橋梁全体において品質を確保することが望まれる。しかし、分級フライアッシュを用いた収縮補償型コンクリートの検討はほとんどないのが現状であった。

そこで、筆者らは、分級フライアッシュをプレテンション PC 接合部に適用することによる PC 橋の高耐久化を目

\*<sup>1</sup> Masahiro SUZUKI

(株)ピーエス三菱  
技術本部 技術研究所

\*<sup>2</sup> Ayanori SUGIYAMA

太平洋セメント(株)  
中央研究所 第2研究部

\*<sup>3</sup> Tatsuya MURAMATSU

(株)太平洋コンサルタント  
コンクリート技術部

\*<sup>4</sup> Kazuyuki TORII

金沢大学  
理工学研究域 教授

的とし、分級フライアッシュを用いた収縮補償型コンクリートの膨張特性と圧縮強度発現性および物質移動抵抗性の材料特性の検討<sup>6)</sup>を行った。また、凍結防止剤が作用する環境下で、石灰系膨張材を使用した場合に、コンクリートのASR膨張が促進された事例<sup>7)</sup>が報告されていることから、飽和NaCl溶液に20週間浸漬した分級フライアッシュを混入した供試体のASR試験からフライアッシュを用いることの抑制効果の検討<sup>8)</sup>を行った。

本報では、分級フライアッシュを用いた収縮補償型コンクリートの湿潤養生日数が圧縮強度の発現性、物質移動抵抗性におよぼす影響に関する既報<sup>6)</sup>の実験結果に塩化物イオン浸透抵抗性の実験結果を加えて報告する。また、ASR抵抗性に関しては、既報<sup>8)</sup>の浸漬期間を延長した48週間としたときのASR膨張のその後の進展について報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 検討フロー

検討フローを図-1に示す。検討はStep1～Step3の3段階で実施した。Step1では、収縮補償型コンクリートとなる単位膨張材量および圧縮強度を満足する配合を検討した。Step2では、翌日脱型後の湿潤養生日数が圧縮強度の発現性、塩化物イオン浸透抵抗性、物質移動抵抗性におよぼす影響を実験を行って検討した。Step3では、収縮補償型フライアッシュコンクリートのASR抵抗性を実験を行って検討した。

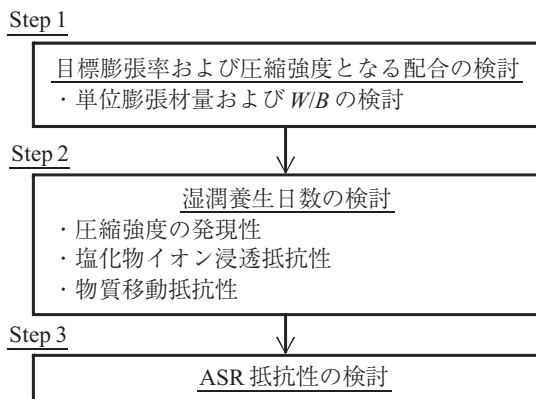


図-1 検討フロー

### 2.2 使用材料

#### 2.2.1 配合および湿潤養生日数における実験に用いた使用材料

配合および湿潤養生日数の実験で使用した材料を表-1に示す。セメントには早強ポルトランドセメント、フライアッシュには北陸電力七尾大田火力発電所で産出された分級フライアッシュを使用した。本実験で使用した膨張材は、標準添加量 20 kg/m<sup>3</sup> の石灰系低添加型を使用した。

#### 2.2.2 ASR 抵抗性における実験に用いた使用材料

ASR 抵抗性の実験で使用した材料を表-2に示す。セメント、フライアッシュ、膨張材および混和剤は表-1と同じ材料を使用した。細骨材および粗骨材は、常願寺川産の川砂および川砂利を使用した。この骨材は、反応性鉄

表-1 使用材料（配合および湿潤養生日数の検討）

材料	記号	仕様
セメント	HC	早強ポルトランドセメント 密度：3.14 g/cm <sup>3</sup> 、比表面積：4 410 cm <sup>2</sup> /g
混和材	FA1	フライアッシュⅡ種 (七尾大田火力発電所産) 密度：2.44 g/cm <sup>3</sup> 、比表面積：5 070 cm <sup>2</sup> /g、 強熱減量：2.8%
	FA2	フライアッシュⅡ種 (七尾大田火力発電所産) 密度：2.39 g/cm <sup>3</sup> 、比表面積：4 650 cm <sup>2</sup> /g、 強熱減量：2.0%
	EX	低添加型、石灰系 密度：3.16 g/cm <sup>3</sup> 、比表面積：3 400 cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	砕砂（早月川産）表乾密度：2.66 g/cm <sup>3</sup> 、 吸水率 1.10%
粗骨材	G	碎石（早月川産）表乾密度：2.70 g/cm <sup>3</sup> 、 吸水率 0.78%、最大径 25 mm
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系
AE 剤	AE	高級脂肪酸系

- 1) FA1 は単位膨張材量の検討で使用したフライアッシュ (FA)
- 2) FA2 は配合、湿潤養生日数の検討および ASR 抵抗性の検討で使用したフライアッシュ (FA)

表-2 使用材料（ASR 抵抗性の検討）

材料	記号	仕様
細骨材	S1	川砂（常願寺川産） 表乾密度：2.62 g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 2.05%
粗骨材	G1	川砂利（常願寺川産） 表乾密度：2.60 g/cm <sup>3</sup> 、 吸水率 1.57%、最大径 25 mm

物としてオパール、クリストバライトおよびトリディマイトを含有しており、化学法 (JIS A 1145) により「無害でない」と判定されたものである。

### 2.3 配合

コンクリートは、PCaPC 床版接合部に適用することを目的としているため、JIS A 6202 附属書 2「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」の A 法（膨張だけを対象とした試験方法）において材齢 7 日の膨張率が (200 ± 50) × 10<sup>-6</sup> を目標値とした収縮補償型とした。標準養生した供試体の圧縮強度は、材齢 28 日において 50 N/mm<sup>2</sup> を目標値とした。コンクリートのフレッシュ性状は、スランプ 18 ± 2.5 cm および空気量 4.5 ± 1.5% を目標値となるように高性能 AE 減水剤と AE 剤の量を調整した。

目標とした膨張率となる単位膨張材量および目標とした圧縮強度となる水結合材比（以下、W/B と呼ぶ）を検討した実験の配合を表-3に示す。なお、同表には、湿潤養生日数を検討するために行った実験の配合もあわせて示す。結合材（以降、B と呼ぶ）は早強ポルトランドセメント（以降、HC と呼ぶ）、分級フライアッシュ（以降、FA と呼ぶ）および膨張材（以降、EX と呼ぶ）とした。混和材に FA と EX を混合した配合（以降、FAEX 配合と呼ぶ）では、B の単位量から EX の単位量を差し引いた単位量の 15 mass% を単位 FA 量とし、85 mass% を単位 HC 量とした。

膨張材の作用機構として膨張材の水和生成物がセメント硬化体に空隙を形成しながら生成する報告<sup>9)</sup>がある。このため、単位 EX 量の増加に伴い、圧縮強度が低下するこ

表 - 3 配合 (配合および湿潤養生日数の検討)

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						検討内容
		W	B			S	G	
			HC	FA1, FA2	EX			
FAEX20-30	30	165	451	80	20	710	918	単位膨張材量
FAEX20-35	35	165	384	68	20	758	942	
FAEX20-40	40	165	334	59	20	801	953	
FAEX25-30	30	165	446	79	25	713	918	
FAEX25-35	35	165	379	67	25	758	942	
FAEX25-40	40	165	329	58	25	798	953	圧縮強度
FAEX22-32	32	165	420	74	22	730	928	
FAEX22-35	35	165	382	67	22	758	940	
FAEX22-38	38	165	350	62	22	784	949	湿潤養生日数
FAEX22-35	35	165	382	67	22	758	940	
HCEX22-35	35	165	449	-	22	766	950	

とが考えられる。このことから、膨張率の目標値および圧縮強度の目標値となる単位 EX 量および W/B の目安を実験を行って検討 (以下、配合の検討と呼ぶ) した。膨張率試験を実施した配合は、単位 EX 量を 20 kg/m<sup>3</sup> と 25 kg/m<sup>3</sup> の 2 水準とし、W/B を 35% とした。圧縮強度試験体の配合は、単位 EX 量を 20 kg/m<sup>3</sup> と 25 kg/m<sup>3</sup> の 2 水準とし、W/B を 30%、35% および 40% の 3 水準とした。

配合の検討で目安とした単位 EX 量を混入した FAEX 配合において、W/B を 33%、35% および 38% の 3 水準とし、B/W と圧縮強度の関係から配合強度 58.0N/mm<sup>2</sup> となる適切な W/B を実験を行って検討した。目標とした圧縮強度に対する配合強度は、変動係数を 8% とし、JIS A 5308 に準拠して算出し、58.0 N/mm<sup>2</sup> とした。

2.4 湿潤養生日数の検討方法

養生方法を表 - 4 に示す。FA を混入したコンクリートは、初期の養生条件が強度発現や耐久性などに影響をおよぼすことから、配合の検討において決定した FAEX 配合を用いて、翌日脱型後の湿潤養生日数を 0 日、2 日、4 日および 6 日の 4 水準とした。また、FA の混入の有無による材料特性の差異を把握するため、FAEX 配合と同じ W/B および単位 EX 量とし、混和材に EX のみを混合した配合 (以降、HCEX 配合と呼ぶ) もあわせて実施した。供試体は所定の湿潤養生を行った後、室温 20℃、湿度 60% の室内に静置した。

試験項目を表 - 5 に示す。圧縮強度の発現の観点では圧縮強度試験を、耐久性の観点では塩化物イオン浸透抵抗性および物質移動抵抗性試験をそれぞれ実施した。圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して実施し、供試体の寸法はφ 100 × 200 mm とし、各 3 体とした。

塩化物イオン浸透抵抗性試験の供試体寸法は 100 × 100 × 360 mm とし、供試体の拘束は JIS A 6202 附属書 2 「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」の A 法と同じとした。塩化ナトリウム水溶液の濃度は、JSCE-G572 「浸漬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 (案) に準拠し、10 mass% とした。所定の湿潤養生を行った後、温度 20℃、湿度 60% の室内に材齢 28 日まで静置した。材齢 28 日において、型枠面 1 面を残し、それ以外の面をエポキシ樹脂でシールした。エポキ

表 - 4 養生方法

養生方法	供試体記号
標準養生	W
気乾養生	D
翌日脱型後の湿潤養生 2 日 → 気乾養生	D3
翌日脱型後の湿潤養生 4 日 → 気乾養生	D5
翌日脱型後の湿潤養生 6 日 → 気乾養生	D7

表 - 5 試験項目

検討項目	試験項目	試験方法
強度発現	圧縮強度	JIS A 1108
耐久性	塩分浸透抵抗性	JSCE-G572
	物質移動抵抗性	Torrent 法

シ樹脂乾燥後、20℃ の水中に 24 時間養生し、その後、10 mass% の塩化ナトリウム水溶液に浸漬した。浸漬日数は 364 日とした。塩化物イオンの浸透深さは、供試体を深さ方向に切断し、切断面に 1/10N 硝酸銀溶液を噴霧することによって測定した。養生方法 D7 に関しては、EPMA 分析により塩化物イオン (以降、Cl<sup>-</sup> と呼ぶ) 濃度を測定し、塩化物イオンの拡散係数を回帰分析することにより求めた。なお、Cl<sup>-</sup> の測定結果が不安定となるため、回帰分析は、浸漬面近傍のデータおよび粗骨材の分布による濃度分布への影響が見られる領域のデータを除外しておこなった。EPMA 分析は JSCE G 574 に準拠して実施した。分析試料は供試体上面 (浸漬面) の中央部から採取し、寸法および形状は高さ 40 × 40 × 10 mm のスライス片とした。EPMA による分析面は、採取した試料側面の高さ 40 mm、幅 40 mm の範囲とした。

物質移動抵抗性試験に用いた供試体の形状を図 - 2 に示す。供試体の寸法は 150 × 150 × 492 mm とし、供試体は JIS A 6202 附属書 2 「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」の B 法 (膨張及び収縮を対象とした試験方法) に準拠し、おおむね同じ鋼材比 (PC 鋼棒の断面積をコンクリート断面積で除した値) となる全ネジの PC 鋼棒φ 17 mm を用いて膨張および収縮を拘束した (鋼材比は JIS A 6202 の膨張率において 0.95%、本試験において 1.0%)。供試体は所定の湿潤養生を行った後、温度 20℃、湿度 60% の室内に材齢 28 日まで静置した。試験は材齢 28 日で実施した。物質移動抵抗性試験は、二重構造のチャンバー、真空ポンプ、制御版および測定器で構成される減圧型トレント法<sup>10)</sup>により実施した。測定箇所は、供試体の打込み面において 3 箇所とした。

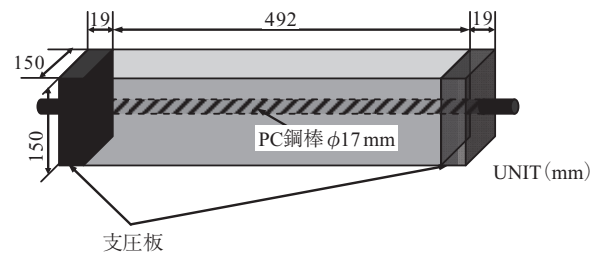


図 - 2 物質移動抵抗性試験に用いた供試体の形状



2.5 ASR 抵抗性の検討方法

ASR 抵抗性の検討におけるコンクリートの配合を表 - 6 に示す。配合は、結合材を「HC」、「HC+FA」および「HC+FA+EX」の3種類とした。単位 EX 量は単位 EX 量および圧縮強度の配合の検討で得られた膨張率の目標値を満足する量とした。

ASR 抵抗性試験は、凍結防止剤の浸透にともなう ASR 劣化を模擬するため、温度 50℃ の飽和 NaCl 溶液に供試体（セメント以外からのアルカリ添加無し）を完全に浸漬する飽和 NaCl 溶液浸漬法（デンマーク法）に準拠して実施した。供試体の寸法は 75 mm × 75 mm × 400 mm とした。飽和 NaCl 溶液の浸漬は、翌日の脱枠後に 14 日間の標準養生を行い、その後、2 週間の封緘養生を行ったのちに開始した。

凍結防止剤（NaCl）が散布される環境条件では、NaCl のコンクリートへの浸透過程でフリーデル氏塩（ $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ）が生成し、その際に解離した  $Na^+$  イオンと水酸化カルシウム（CH）との反応により  $OH^-$  イオンが生成し、ASR を促進する要因の1つと考えられる。このメカニズムを検討するために、コンクリートの薄片研磨試料（厚さ：20  $\mu m$ ）を偏光顕微鏡を用いて CH クラスターの残存形態を観察した。

表 - 6 配合（ASR 抵抗性の検討）

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	B			S1	S1
			HC	FA2	EX		
ASR-HCFAEX22	35	165	382	67	22	747	905
ASR-HCEX22	35	165	449	-	22	755	915
ASR-HC	35	165	471	-	-	755	915

3. 実験結果および考察

3.1 単位膨張量および配合の検討

W/B を 35% とし、単位 EX 量と材齢 7 日の膨張率との関係を図 - 3 に示す。同図には、次に示す圧縮強度の目標値を満足する検討であわせて実施した膨張率試験の材齢 7 日の膨張率（後掲図 - 5 参照）もあわせて示す。単位 EX 量 20 kg/m<sup>3</sup> とした配合では目標値の下限となり、単位 EX 量 25 kg/m<sup>3</sup> とした配合では目標値の上限（250 × 10<sup>-6</sup>）を超える結果となった。FA を混入したコンクリートでは、目標とする膨張率の中心値（200 × 10<sup>-6</sup>）とするのに必要な単位 EX 量は標準量（20 kg/m<sup>3</sup>）より若干多くする必要があることが認められた。目標とする膨張率の中心値（200 × 10<sup>-6</sup>）となる単位 EX 量は、膨張率が単位 EX 量の一次関数で示すことができると仮定した回帰式（図 - 3）を用いて 21.4 kg/m<sup>3</sup> と推定した。圧縮強度を満足する W/B の検討では、単位 EX 量は膨張率が 200 × 10<sup>-6</sup> を若干超えるように 22.0 kg/m<sup>3</sup> とすることとした。

材齢 28 日における B/W と圧縮強度の関係を図 - 4 に示す。単位 EX 量の増加に伴い、同じ B/W における圧縮強度は低下する傾向が認められた。単位 EX 量を 22 kg/m<sup>3</sup> と

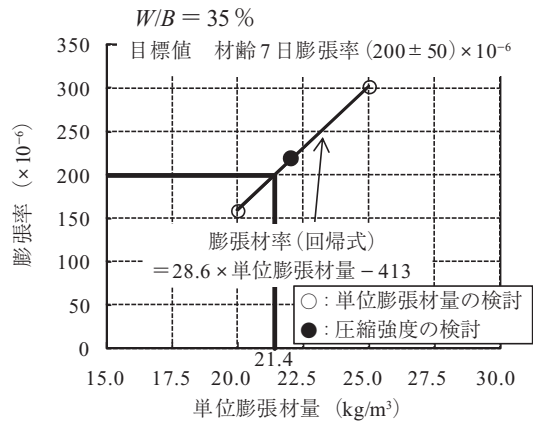


図 - 3 単位 EX 量と膨張率との関係

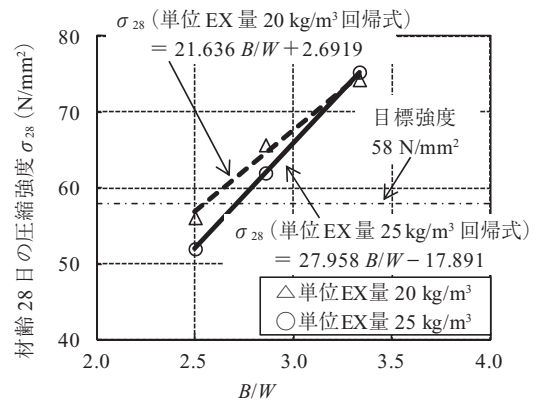


図 - 4 各単位 EX 量の B/W と圧縮強度の関係

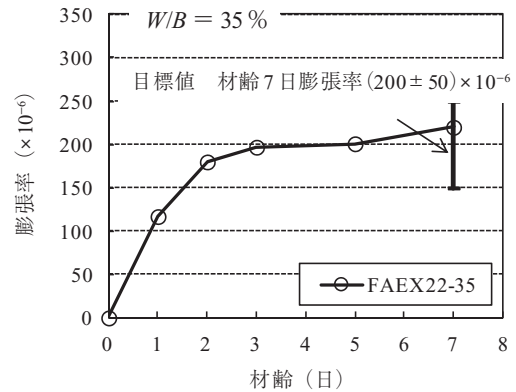


図 - 5 膨張率の経時変化（平均値）（配合 FAEX22-35）

した場合の圧縮強度は、点線と実線の間となることが予測でき、W/B を 35%（B/W=2.857）としたコンクリートにおいて、目標の圧縮強度を満足することが考えられた。

以上のことから、圧縮強度の目標値を満足する配合は、単位 EX 量を 22 kg/m<sup>3</sup> とし、W/B を 32%、35% および 38% の 3 水準としたコンクリートの圧縮強度試験を行うことにより検討した。また、膨張率は、W/B と単位膨張材量に影響を受けることから、中心配合の膨張率試験をあわせて行い、材齢 7 日の膨張率が目標値を満足するかを確認した。

$W/B$  を 35% とし、単位 EX 量を  $22 \text{ kg/m}^3$  とした膨張率の経時変化を図 - 5 に示す。配合 FAEX22-35 の膨張率は目標値を満足することが認められた。材齢 7 日の膨張率の試験結果は  $220 \times 10^{-6}$  であり、図 - 3 に示す回帰式を用いて算出した膨張率  $216 \times 10^{-6}$  とおおむね合致することが認められた。

圧縮強度の発現を図 - 6 に、 $B/W$  と材齢 28 日の圧縮強度の関係を図 - 7 に示す。圧縮強度は、 $W/B$  を 35% ( $B/W = 2.857$ ) としたコンクリートは目標強度を満足することが認められた。以上のことから、 $W/B$  を 35% とし、単位 EX 量を  $22 \text{ kg/m}^3$  としたコンクリートは、膨張率と圧縮強度ともに目標値を満足することが認められた。湿潤養生日数の実験は、この配合を用いて実施した。

### 3.2 湿潤養生日数の検討

#### 3.2.1 標準養生供試体の膨張率および圧縮強度の発現

配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の膨張率の経時変化を図 - 8 に示す。いずれの配合も材齢 7 日の膨張率の目標値を満足することが認められた。配合 FAEX22-35 の材齢の 7 日の膨張率は、配合 HCEX22-35 より大きくなることが認められた。

配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の標準養生した供試体の圧縮強度の発現を図 - 9 に示す。いずれの配合も材齢 28 日の圧縮強度の目標値を満足することが認められた。 $W/B$  が同じであるが、配合 FAEX22-35 の材齢の 28 日

の圧縮強度は、配合 HCEX22-35 のより小さくなることが認められた。この理由として、 $B$  を「HC+FA+EX」とした場合と  $B$  を「HC+EX」とした場合において、FA 混入による水和進行の速さの差により、EX の反応が開始する材齢の圧縮強度に差が生じ、形成する空隙の大きさに差が生じたため、圧縮強度に差が生じたことが考えられる。このことは、配合 HCEX22-35 より大きい膨張率となった配合 FAEX22-35 の圧縮強度が小さくなる実験結果とも整合している。このことから、EX を混入する配合は、膨張率および圧縮強度の両面で決める必要があると考えられる。

#### 3.2.2 湿潤養生日数が圧縮強度の発現におよぼす影響

配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の湿潤養生日数をパラメーターとして実施した圧縮強度の発現を図 - 10 に示す。凡例は脱型後の湿潤養生日数を 0 日において D、2 日において D3、4 日において D5、6 日において D7 とし、各供試体の養生方法を示す。配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 とともに養生方法 D3、D5 および D7 は養生方法 D と比較して、圧縮強度の増加が認められた。配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の圧縮強度の発現を比較すると、湿潤養生を実施した供試体では、配合 FAEX22-35 は材齢 14 日以降においても圧縮強度の増進が認められたが、配合 HCEX22-35 においては材齢 14 日以降における圧縮強度の発現が認められなかった。フライアッシュのポゾラン反応は長期にわたって圧縮強度が増進することが知

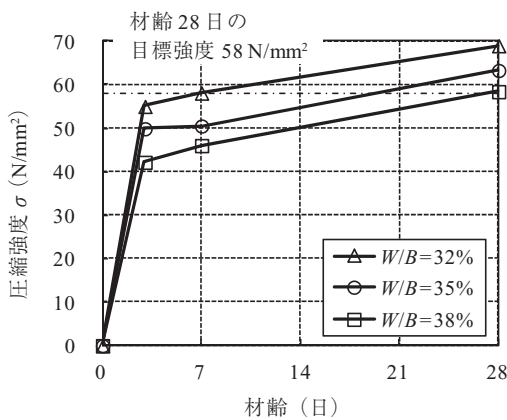


図 - 6 圧縮強度の発現

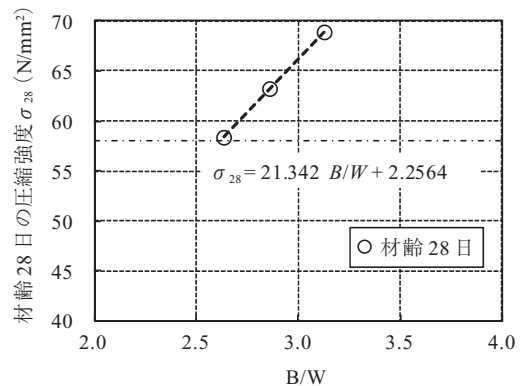


図 - 7  $B/W$  と材齢 28 日の圧縮強度の関係

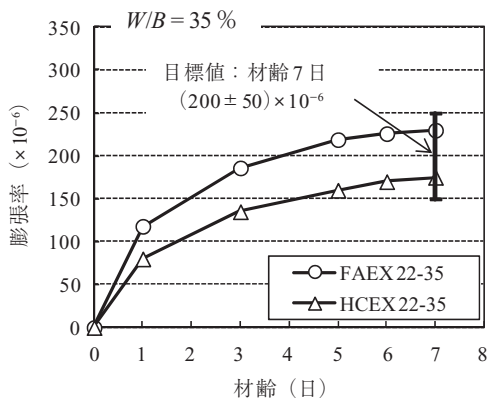


図 - 8 膨張率の経時変化の比較

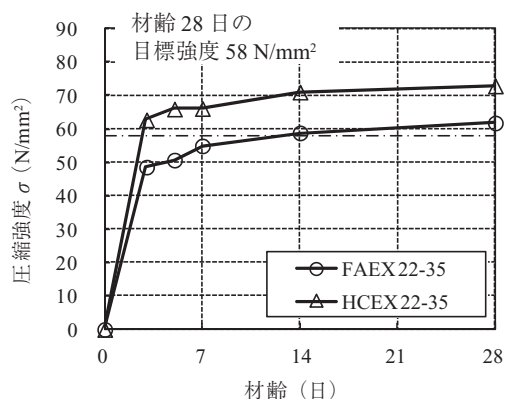


図 - 9 圧縮強度の発現 (標準養生) の比較

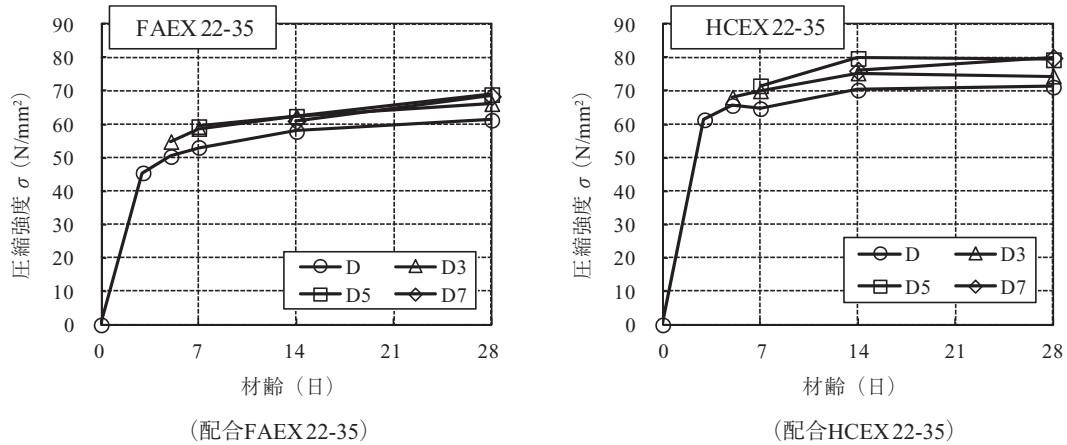


図 - 10 各湿潤養生日数の圧縮強度の発現

られており、本試験でも同様の傾向が認められた。ただし、脱型後の湿潤養生を実施しない場合には圧縮強度の発現が小さくなることから、フライアッシュのポゾラン反応には、脱型後の湿潤養生を適切に行うことが必要であると考えられる。

配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の各養生の材齢 28 日の圧縮強度を図 - 11 に示す。配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 とともに養生方法 D7 の圧縮強度は、養生方法 D と比較して、約 10 N/mm<sup>2</sup> 大きくなることが認められた。また、いずれの配合も養生方法 D5 と D7 の圧縮強度は、ほぼ同程度であり、脱型後の湿潤養生日数を 4 日以上としても圧縮強度の増進はほとんど認められなかった。このことから、養生温度 20℃ とした試験条件の範囲内では、圧縮強度の発現性の観点からは、脱型後の湿潤養生日数は 4 日程度とすることが望ましいと考えられる。

図 - 9 と図 - 10 を用いて標準養生した供試体と湿潤養生後に気乾養生した供試体の圧縮強度を比較すると標準養生をした供試体の方が低い圧縮強度となることが認められた。標準養生をした供試体の圧縮強度の低下は、外部からの水分補給がある場合に長期的に膨張作用が発現するとの報告<sup>11)</sup>があり、結果として標準養生した供試体では EX による空隙がより多く形成されたことが理由として考えられる。

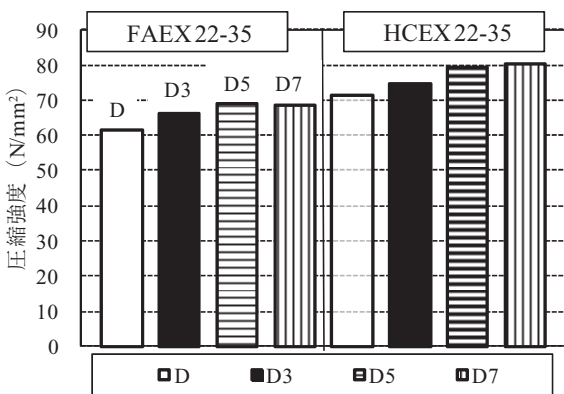


図 - 11 各養生の方法による材齢 28 日の圧縮強度の比較

### 3.2.3 湿潤養生日数が耐久性におよぼす影響

#### (1) 塩分浸透抵抗性

配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の各養生方法の塩水浸漬日数 364 日の塩化物イオンの浸透深さを図 - 12 に示す。配合 FAEX22-35 と HCEX22-35 の塩化物イオンの浸透深さは、湿潤養生日数の増加にともない小さくなることが認められた。配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の塩分拡散係数試験（浸漬法）の塩水浸漬日数 364 日における養生方法 D7 の塩化物イオン濃度の測定結果を図 - 13 に示す。塩化物イオン拡散係数は、配合 FAEX22-35 において 0.362 cm<sup>2</sup>/年、配合 HCEX22-35 において 2.16 cm<sup>2</sup>/年となり、配合 FAEX22-35 の塩化物イオン拡散係数は、配

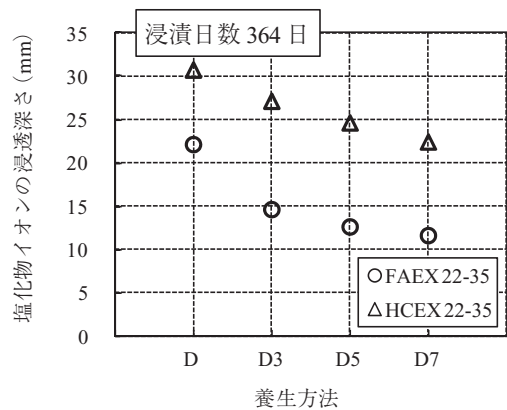


図 - 12 各養生の方法による材齢 364 日の塩化物イオンの浸透深さの比較

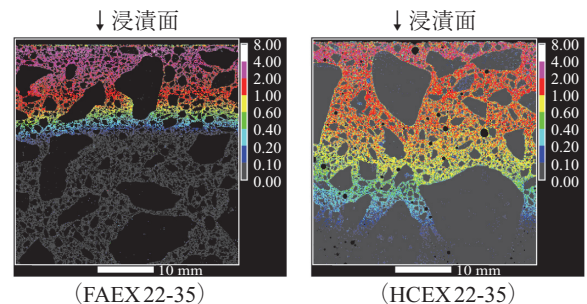


図 - 13 EPMA による塩化物イオン濃度の測定結果



合 HCEX22-35 の 0.2 倍程度となった。配合 FAEX22-35 の塩化物イオンの浸透深さは配合 HCEX22-35 と比較して小さくなり、EX を混入した場合においても FA による塩化物イオン浸透性に対する抵抗性の向上が認められた。

(2) 物質移動抵抗性

ここでは、養生日数がコンクリート表層部の品質におよぼす影響を把握する目的で、物質移動抵抗性を把握する試験の 1 つである透気係数試験を実施した結果を述べる。配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の各養生方法の材齢 28 日の透気係数を図 - 14 に示す。配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 のすべての養生方法において、品質評価<sup>10)</sup>は「良い」の判定であった。配合 FAEX22-35 の養生方法 D5 および D7 の透気係数はおおむね同じ値となり、脱型後の湿潤養生日数を 4 日からさらに延長しても表層部の改善効果はほとんど変わらないことが認められた。養生方法 D5 の透気係数は養生方法 D の 1/2 程度の値となっており、湿潤養生による表層部の品質の改善が認められた。配合 HCEX22-35 に関しては、同様に湿潤養生を実施することにより表層部の改善効果が認められたが、脱型後の湿潤養生日数を 2 日からさらに延長しても表層部の改善効果はほとんど変わらないことが認められた。このことから、物質移動抵抗性の観点から脱型後の湿潤養生日数は、配合 FAEX22-35 において 4 日程度、配合 HCEX22-35 において 2 日程度とするのが望ましいと考えられる。配合 FAEX22-

35 と配合 HCEX22-35 の養生方法 D7 の透気係数を比較すると配合 FAEX22-35 の方が大きくなり、混和材にフライアッシュを混入することによるコンクリート表層部の品質改善効果は認められなかった。透気係数の測定により、塩化物イオン浸透抵抗性を評価が可能であることが報告<sup>12)</sup>されているが、本試験では異なる結果となった。これは配合 FAEX22-35 の膨張率が配合 HCEX22-35 より大きく(図 - 8)、膨張材による空隙生成によりコンクリートの組織がより粗になったことが透気係数の増加につながったことが理由として考えられる。一方で、FA を用いたコンクリートは塩分浸透停滞現象が報告<sup>13)</sup>されており、本試験においても同様の現象が生じ、FA を用いたコンクリートにおいて塩化物イオン浸透抵抗性が向上したことが考えられる。養生温度 20℃ とした試験条件の範囲内における塩化物イオン浸透性と物質移動抵抗性の湿潤養生の実験結果から、膨張材を用いた収縮補償型コンクリートの湿潤養生日数は、一般的には打込み後 5 日間の湿潤養生(本試験では養生方法 D5)を標準としているが、収縮補償型フライアッシュコンクリートは、さらに湿潤養生を長くすることにより、塩化物イオン浸透抵抗性を向上させることができることが認められた。

3.3 ASR 抵抗性の検討

温度 50℃ の飽和 NaCl 溶液に浸漬を開始する前および 182 日間の浸漬した配合 ASR-HCEX22 および ASR-HCFAEX22 の供試体の薄片研磨試料の偏光顕微鏡観察の結果を写真 - 1, 2 に示す。両供試体には、膨張材の粗粒子に由来する CH のクラスター(最大径 0.1 mm)がセメント硬化体に残存しており、このクラスターの周囲には CaO が Ca(OH)<sub>2</sub> を生成する際に発生した放射状の膨張ひび割れが観察された。細骨材の一部には膨張によるひび割れの発生が認められた。この膨張性ひび割れの発生頻度と規模(進展長さ)は、配合 ASR-HCEX22 の供試体よりも配合 ASR-HCFAEX22 の供試体の方が効果的に低減することが認められた。また、FA のポゾラン反応の進行による CH の減少はその後の材齢の経過とともにさらに顕著になることが認められた。

配合 ASR-HCEX22, ASR-HCFAEX22 および ASR-HC の長さおよび動弾性係数の変化を図 - 15, 16 に示す。FA を混入することにより、ASR 膨張の促進を抑制する効果が認められた。飽和 NaCl 浸漬法では、塩水が供試体の内部(20 mm 程度)まで浸透した段階で砂粒子から ASR の反応が順次始まる。このため、浸漬 4 週後に配合 ASR-HCEX22 の供試体、次いで配合 ASR-HC の供試体の順番で膨張が発生し、コンクリートの膨張量の増大に比例して動弾性係数が大きく低下している。しかし、浸漬 48 週間後の配合 ASR-HCEX22 の膨張量は、配合 ASR-HC の膨張量と同程度であり、膨張材の有無による差異が認められなかった。膨張材の影響は、浸漬から膨張開始までの期間が早くなるため、塩水の浸透が速くなることが想定され、本試験では拘束がない条件の影響が顕著になったことが推察される。

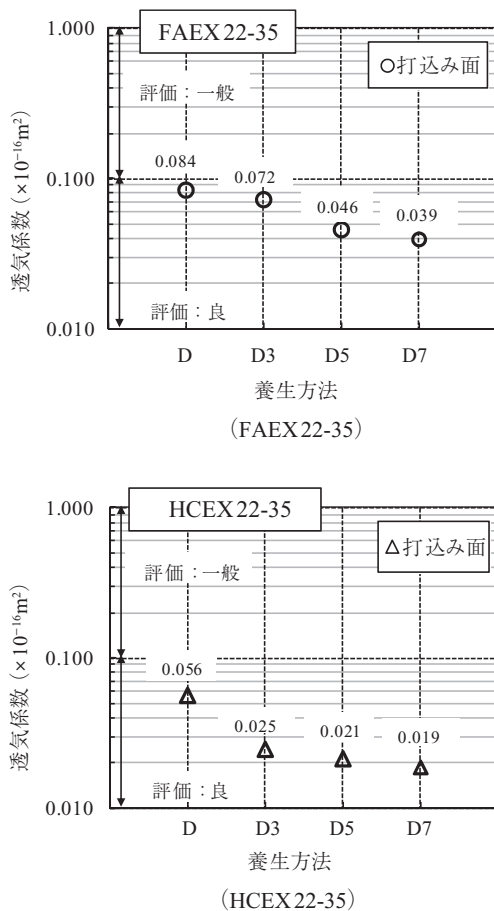
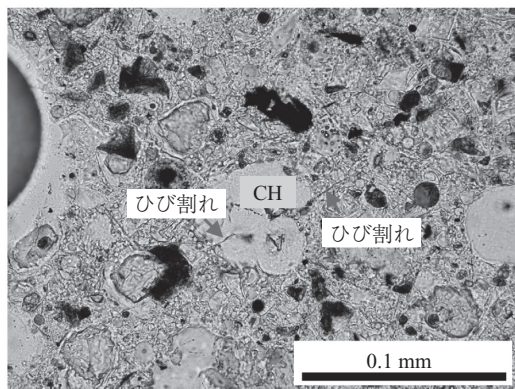
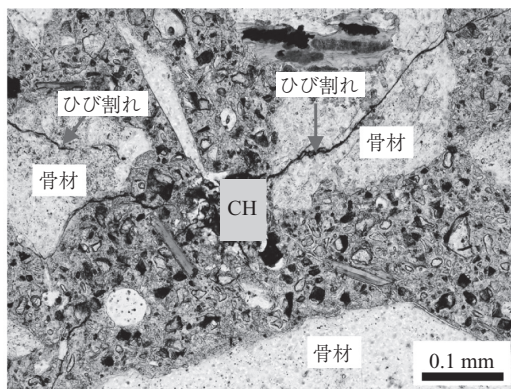


図 - 14 各養生の方法の透気係数の比較

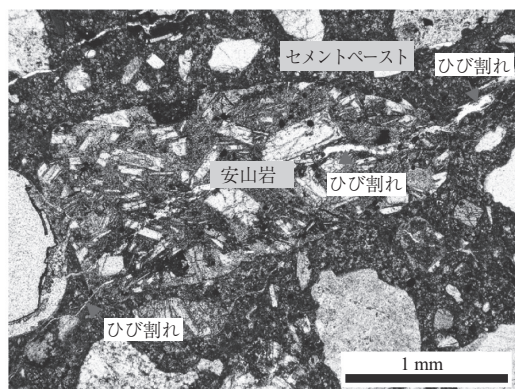


(ASR-HCFAEX22)

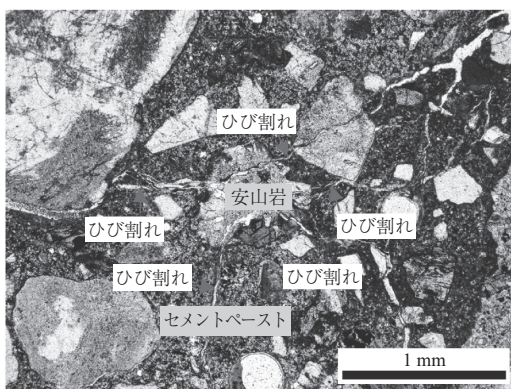


(ASR-HCEX22)

写真 - 1 浸漬開始前（材齢 14 日）の偏光顕微鏡観察



(ASR-HCFAEX22)



(ASR-HCEX22)

写真 - 2 浸漬期間 182 日の偏光顕微鏡観察

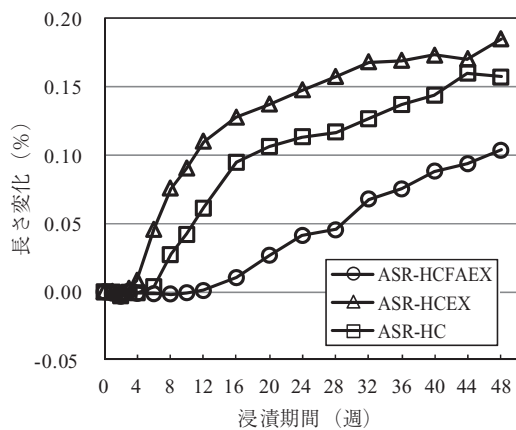


図 - 15 長さ変化の経時変化

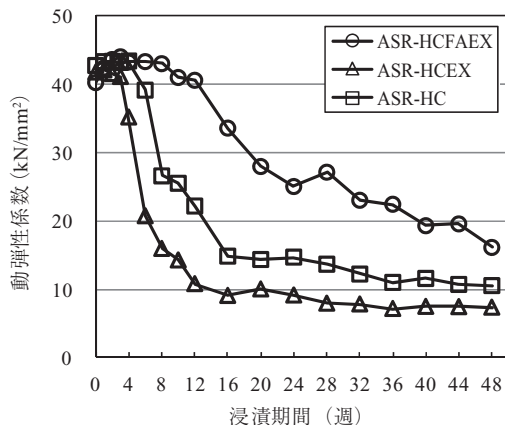


図 - 16 動弾性係数の経時変化

#### 4. おわりに

分級フライアッシュをプレキャスト PC 床版接合部に適用することによる PC 橋の高耐久化を目的とし、養生温度 20℃とした試験条件の範囲内において実施した分級フライアッシュを用いた収縮補償型コンクリートの膨張特性、湿潤養生日数が圧縮強度発現や耐久性におよぼす影響および ASR 抵抗性を検討した結果、以下の知見が得られた。

(1) 収縮補償型コンクリートの膨張率を満足する単位膨張

材量は、コンクリートの結合材を構成する材料で異なる。結合材を分級フライアッシュ、早強ポルトランドセメントおよび膨張材とした場合の単位膨張材量は本試験の範囲内では 22 kg/m<sup>3</sup> となり、標準添加量 (20 kg/m<sup>3</sup>) より若干多くなった。

(2) 収縮補償型コンクリートの圧縮強度は、単位膨張材量による影響を受けるため、圧縮強度を満足する配合検討は、膨張率と圧縮強度の両方を勘案して決定する必要が



ある。

- (3) 湿潤養生日数は、コンクリートの結合材を構成する材料で異なる。本試験の範囲内では、結合材を分級フライアッシュ、早強ポルトランドおよび膨張材とした配合の翌日脱型後の湿潤養生日数は、圧縮強度の発現性と物質移動抵抗性の観点では4日程度、塩分浸透抵抗性の観点では、本試験の範囲である翌日脱型後の湿潤養生日数6日までは向上することが認められた。
- (4) 一方で、結合材を早強ポルトランドおよび膨張材とした配合の翌日脱型後の湿潤養生日数は、圧縮強度の発現性において4日程度、物質移動抵抗性では2日程度が望ましいと考えられる。また、塩分浸透抵抗性は、翌日脱型後の湿潤養生日数6日までは向上することが認められた。
- (5) 適正な湿潤養生を実施することにより、フライアッシュを用いることにより、塩分浸透抵抗性は向上ことが認められた。
- (6) フライアッシュを用いることにより、石灰系膨張材を使用した場合に生じるコンクリートのASR膨張の促進を抑制する効果が認められた。

#### 謝 辞

本研究は、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）（研究開発課題：コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発、研究責任者：鳥居和之）の研究の一環として実施したものであり、関係各位に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 松村将充, 蓑田理希, 蔡云峰, 鳥居和之: 高炉スラグ微粉末を含有したプレストレストコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.803-

- 808, 2006
- 2) 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
- 3) 鳥居和之: フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化-北陸地方のASR問題への取り組みと情報発信-, 電力土木, No.357, p11-15, 2012
- 4) 橋本徹, 久保哲司, 参納千夏男: 産官学連携による北陸地方におけるコンクリートのフライアッシュ有効利用促進に向けた取り組み, 電力土木 (別刷), No.361, pp.56-60, 2012
- 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) 鈴木雅博, 杉山彰徳, 村松達也, 鳥居和之: 分級フライアッシュを用いた収縮補償コンクリートの材料特性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.135-140, 2016
- 7) プレストレストコンクリート工学会: 更新用プレキャストPC床版技術指針, pp.179-180, 2016
- 8) 菊地弘紀, 鈴木雅博, 杉山彰徳, 鳥居和之: 収縮補償型膨張コンクリートのASRによる膨張挙動とその抑制対策, 土木学会第71回年次学術講演会, pp.1039-1040, 2016
- 9) 盛岡実, 萩原宏俊, 坂井悦郎, 大門正機: 膨張材を混和したセメント硬化体の微細構造, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.169-174, 1998
- 10) R.J.Torrent, "A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site", Materials and Structures, Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992.
- 11) 片平博, 渡辺博志: 膨張コンクリートの膨張性に関する長期測定結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.436-441, 2012
- 12) 林亮太, 榎原 弘貴, 添田政司, 松本涼: 透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価方法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.745-750, 2013
- 13) 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治: 実構造物中のフライアッシュへの塩分浸透性状と調査時の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.803-808, 2010

[2017年1月4日受付]



図書案内

PC 技術規準シリーズ

## PC 構造物高耐久化ガイドライン

2015年4月

定 価 4,860 円 / 送料 300 円

会員特価 4,000 円 / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会 編

技報堂出版