

場所打ちを対象とした収縮補償フライアッシュコンクリートの検討

技術本部
名古屋支店

技術研究所
金沢営業所

鈴木雅博
小林和弘

概要：プレテンションPC桁の高耐久化と環境負荷低減を目的として、分級フライアッシュを用いたコンクリートが注目されている。これまで、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プレテンションPC桁と同等の構造特性を有していることを実験的に明らかにしてきた。しかし、プレテンションPC桁間の場所打ち部は、現場打ちの収縮補償コンクリートとなるが、分級フライアッシュを用いたコンクリートへの適用に関する検討はほとんどないのが現状である。本研究では、分級フライアッシュを用いた収縮補償コンクリートを場所打ち部に適用するため、20℃の養生条件下における圧縮強度の発現および透気性の観点から湿潤養生日数を検討し、翌日脱型後の湿潤養生日数が4日程度必要であることが確認された。また、塩化物イオンの浸透性に対する抵抗性は、湿潤養生日数の増加に伴い向上することが確認された。

Key Words：分級フライアッシュ、収縮補償、強度、耐久性、湿潤養生日数

1. はじめに

プレストレストコンクリート橋(以降、PC橋と呼ぶ)の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^{1),2)}。また、コンクリート製造時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PC橋に活用することは、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、PC橋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、ポゾラン反応性も高く、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^{3),4)}。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(ここではPC桁はPC橋を構成する部材とする)に適用するため、強度特性、耐久性、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⁵⁾。

一方、プレテンションPC桁間の場所打ち部は、収縮補償コンクリートとなり、PC桁と同様に高耐久化が望まれる。しかし、分級フライアッシュを用いた収縮補償コンクリートの検討は、ほとんどないのが現状で



鈴木雅博



小林和弘

ある。

そこで本研究では、分級フライアッシュをプレテンション PC 桁間の場所打ち部に適用することによる PC 橋の高耐久化を目的とし、分級フライアッシュを用いた収縮補償コンクリートの膨張特性と材料特性を検討した。材料特性の検討では、圧縮強度試験、透気係数試験および浸漬による塩化物イオンの浸透性試験を行い、分級フライアッシュを用いた収縮補償コンクリートの湿潤養生日数が、圧縮強度の発現特性、透気係数および塩化物イオンの浸透深さにおよぼす影響を検討した。

2. 試験概要

2.1 コンクリートの目標性状

コンクリートの目標性状を表-1 に示す。コンクリートの設計基準強度は 50N/mm^2 (材齢 28 日)とした。また、スランプおよび空気量の目標値はそれぞれ、 $18\pm 2.5\text{cm}$ および $4.5\pm 1.5\%$ とした。コンクリートはプレテンション PC 桁間の場所打ち部に適用することを目的としていることから収縮補償コンクリートとし、材齢 7 日の膨張率の目標値は 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(膨張だけを対象とした試験方法)において $(200\pm 50)\times 10^{-6}$ とした。

表-1 コンクリートの目標性状

設計基準強度	$\sigma_{28}=50.0\text{N/mm}^2$
変動係数 (設計基準強度)	$V=8.0\%$
膨張率	材齢 7 日におけるひずみ $(200\pm 50)\times 10^{-6}$
目標スランプ	$SL=18.0\text{cm}$
目標空気量	$\text{air}=4.5\%$
粗骨材の最大寸法	$G_{\text{max}}=25\text{mm}$
塩化物含有量の最大値	300g/m^3
割増し係数から算出される配合強度	
設計基準強度の配合強度	$\sigma_{28}=58.0\text{N/mm}^2$

2.2 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 では収縮補償コンクリートとなる単位膨張材量を検討した。Step2 では良好なワーカビリティと設計基準強度を満足する配合を検討した。Step3 では圧縮強度の発現、透気係数および塩化物イオン浸透に対する抵抗性の試験結果に基づき、翌日脱型後の湿潤養生日数を検討した。

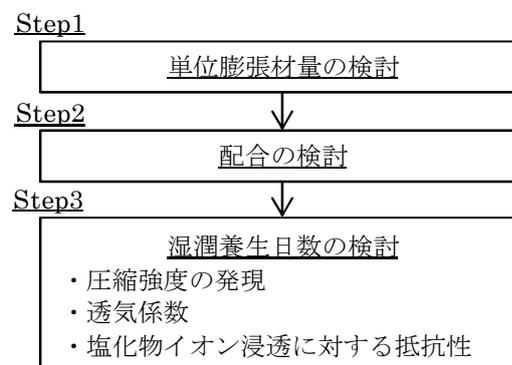


図-1 検討フロー

2.3 使用材料

使用材料を表-2 に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを、フライアッシュには北陸電力(株)七尾大田火力発電所で製造される分級フライアッシュを使用した。本試験では、膨張材(以降、EX と呼ぶ)は、

標準添加量 $20\text{kg}/\text{m}^3$ の石灰系低添加型を使用した。

表-2 使用材料

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: $3.14\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $4410\text{cm}^2/\text{g}$
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: $2.44\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $5070\text{cm}^2/\text{g}$, 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: $2.39\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $4650\text{cm}^2/\text{g}$, 強熱減量: 2.0%
	EX	低添加型膨張材, 石灰系 密度: $3.16\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $3400\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	砕砂(早月川産) 表乾密度: $2.66\text{g}/\text{cm}^3$
粗骨材	G	碎石(早月川産) 表乾密度: $2.70\text{g}/\text{cm}^3$
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

2.4 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜ方法を図-2に示す。室内試験では公称容量 55L の強制練り水平二軸ミキサーを用いた。1バッチあたりの練混ぜ量は 30 リットルとした。

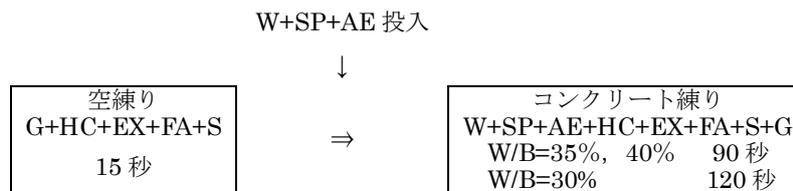


図-2 練混ぜ方法

2.5 単位膨張材量の試験方法

単位膨張材量を検討したコンクリートの配合を表-3に示す。なお、同表には次節以降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EX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 $15\text{mass}\%$ を単位FA量とし、 $85\text{mass}\%$ を単位HC量とした。単位EX量の検討では、単位EX量を $20\text{kg}/\text{m}^3$ と $25\text{kg}/\text{m}^3$ の2水準とし、水結合材比(W/B)を 30% 、 35% および 40% の3水準とし、B/Wと圧縮強度の関係からW/Bの目安を検討した。また、膨張率試験は中心配合のW/Bを 35% において実施し、前述した材齢7日の膨張率が目標値になる単位EX量を検討した。配合強度を確認する圧縮強度の試験体の養生は標準養生とした。

表-3 配合

配合	W/B (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						検討内容
				W	B			S	G	
					HC	FA1 ¹⁾ , FA2 ²⁾	EX			
FAEX20-30	30	4.5	44.0	165	451	80	20	710	918	単位膨張材量
FAEX20-35	35	4.5	45.0	165	384	68	20	758	942	
FAEX20-40	40	4.5	46.0	165	334	59	20	801	953	
FAEX25-30	30	4.5	44.0	165	446	79	25	713	918	
FAEX25-35	35	4.5	45.0	165	379	67	25	758	942	
FAEX25-40	40	4.5	46.0	165	329	58	25	798	953	
FAEX22-32	32	4.5	44.4	165	420	74	22	730	928	配合
FAEX22-35	35	4.5	45.0	165	382	67	22	758	940	
FAEX22-38	38	4.5	45.6	165	350	62	22	784	949	
FAEX22-35	35	4.5	45.0	165	382	67	22	758	940	湿潤養生日数
HCEX22-35	35	4.5	45.0	165	449	-	22	766	950	

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は配合及び湿潤養生日数の検討で使用したフライアッシュ(FA)

2.6 配合の検討

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⁶⁾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とが考えられる。このことから、単位EX量の検討で決定した単位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58.0 N/mm²となる適切なW/Bを検討した。

2.7 湿潤養生日数の試験方法

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(以降、Dと呼ぶ)、2日(以降、D3と呼ぶ)、4日(以降、D5と呼ぶ)および6日(以降、D7と呼ぶ)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。気乾養生した全ての試験体は室温20℃、湿度60%の室内に静置した。

表-4 養生方法

養生方法	養生方法の記号
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

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、耐久性の観点では透気係数試験および塩化物イオンの浸透深さを測定する浸せき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、試験体の寸法はφ100×200mmとし、各3体とした。透気試験に用いた試験体の形状を図-3に、試験体の型枠を写真-1に示す。透気試験は二重構造を持つチャンバー、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⁷⁾により実施した。試験体の寸法は150×150×492mmとし、測定箇所は試験体の打込み面において3箇所とした。試験体は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、概ね同じ鋼材比(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φ17mmを用いて膨張及び収縮を拘束した(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%)。試験は材齢28日および182日で実施した。

表-5 試験項目

検討項目	試験項目	試験方法	実施した養生方法
強度発現	圧縮強度	JIS A 1108	D, D3, D5, D7
耐久性	透気係数	Torrent 法	D, D3, D5, D7
	塩化物イオンの浸透深さ	JIS A 1154	D, D3, D5, D7
	塩化物イオンの見掛けの拡散係数	JSCE G 574 (EPMA)	D7

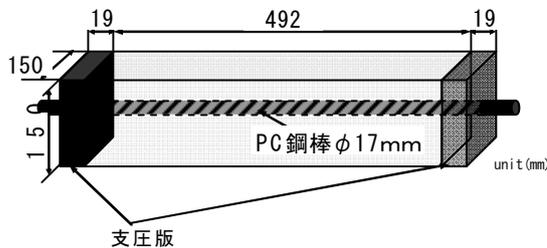


図-3 透気試験に用いた試験体の形状



写真-1 透気試験に用いた試験体の型枠

試験体は JISA6202 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(膨張を対象とした試験方法)に準拠して作製した。塩化ナトリウム水溶液の濃度は、JSCE-G572「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(案)」に準拠し、10mass%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。エポキシ樹脂乾燥後、20℃の水中に 24 時間養生し、その後、10mass%の塩化ナトリウム水溶液に浸せきした。浸せき日数は 182 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⁻と呼ぶ)濃度を測定し、塩化物イオンの拡散係数を算出した。EPMA 分析用の試料の採取位置および分析面を図-4 に示す。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(浸せき面)の中央部から採取し、形状および寸法は高さ 40mm、幅 40mm、長さ 40mm の立方体とした。EPMA による分析面は採取した試料側面の高さ 40mm、幅 40mm の範囲とした。

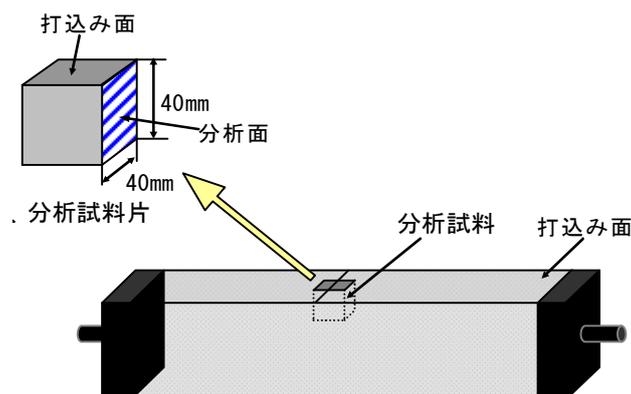


図-4 分析試料の採取位置および分析面

EPMA による Cl⁻濃度の測定結果を用いて、式(1)により回帰分析することにより、塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_c および表面塩化物イオン濃度 C_0 を求めた。回帰分析にあたり、浸漬面近傍のデータは、Cl⁻の測定結果が不安定となるため、除外した。また、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は除外した。表面塩化物イオン濃度 C_0 と初期の塩化物イオン濃度 C_i は、%の値と供試体の配合をもとに kg/m^3 に換算した値を求めた。

$$C(x,t) = C_o \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right) + C_i \quad (1)$$

ここに、 $C(x,t)$: 塩化物イオン量(kg/m³)
 C_o : 試料表面の塩化物イオン量(kg/m³)
 D_c : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm²/年)
 C_i : 初期の塩化物イオン濃度(kg/m³)
 t : 時間(年)
 x : 試料表面からの距離(cm)
 erf : 誤差関数

3. 試験結果および考察

3.1 単位膨張材量の検討

W/Bを35%とし、単位EX量を20, 25kg/m³とした膨張率の経時変化を図-5に示す。単位EX量20kg/m³とした配合では目標値の下限となり、単位EX量25kg/m³とした配合では目標値の上限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とするのに必要な単位EX量は、標準量(20kg/m³)より若干多くする必要があることが認められた。

膨張率の発現の結果を用い、膨張率が概ね目標値の中心値となる単位EX量を検討した。単位EX量と材齢7日の膨張率との関係を図-6に示す。図内には次節に示す配合の検討で実施した膨張率試験結果を参考として示す。膨張率は単位EX量の一次の関数で示すことができると仮定した。この関係を用いて目標とする膨張率の中心値 200×10^{-6} となる単位EX量を推定した結果 21.4kg/m³となった。次節の配合の検討において、単位EX量は膨張率が 200×10^{-6} を若干超えるように 22.0kg/m³とした。

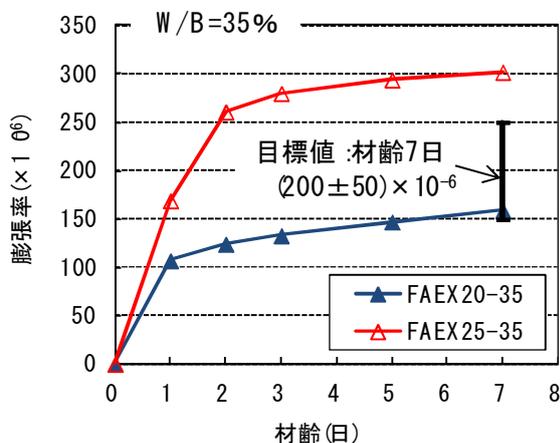


図-5 膨張率の経時変化(平均値)

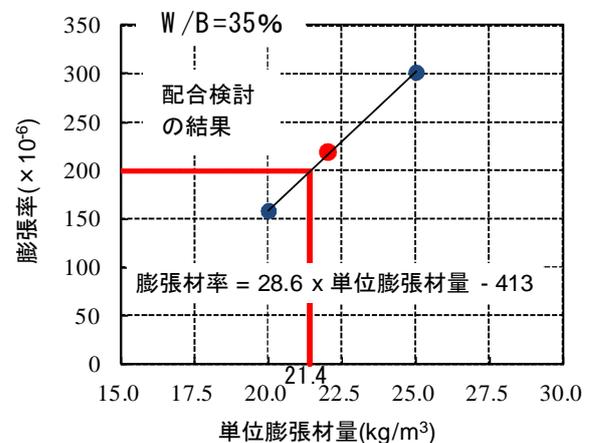


図-6 各単位EX量と膨張率との関係

材齢28日におけるB/Wと圧縮強度の関係を図-7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。これは、前述した膨張材による空隙生成によることが理由として考えられる。圧縮強度はW/Bを35%(B/W=2.857)としたコンクリートにおいて単位EX量を22kg/m³とした場合に赤点線と青点線の間になり、目標強度を満足すると考えられた。

以上のことから、次節の配合の検討では、単位EX量を22 kg/m³とし、W/Bを32%, 35%および38%の3水準とした試験を実施した。また、膨張率は圧縮強度により異なることから、中心配合の膨張率試験をあわせて実施し、材齢7日の膨張率が目標値を満足するかを確認した。

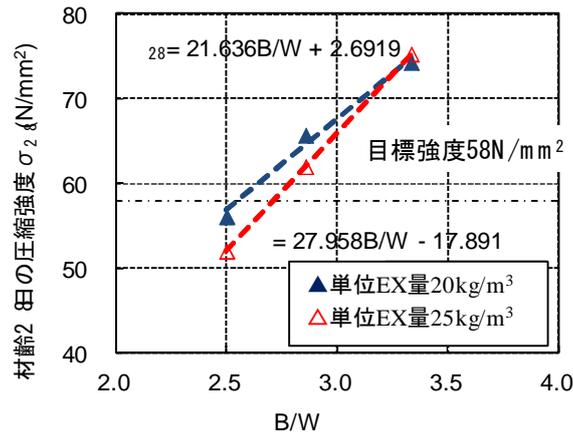


図-7 各単位 EX 量の B/W と圧縮強度の関係

3.2 配合の検討

配合の検討に先立ち、ワーカビリティが良好となる細骨材率(以降 s/a と呼ぶ)を検討した。試験は W/B を 35%の配合において、s/a を 45%と仮定し、これに対し s/a を 3%減少した場合と、3%増加した場合について、単位水量、単位結合材量同一として、単位細骨材量、単位粗骨材量を配合計算により算出したコンクリートのスランプおよび空気量を測定した。空気量は目標空気量の±0.5%となるように AE 剤により調整した。W/B を 35%の配合において s/a を 45%、42%および 48%としたコンクリートのフレッシュ性状を写真-2 に示す。目視で確認し、良好なワーカビリティとなる細骨材率を 45%とすることとした(決定した配合は表-3 参照)。



細骨材率 42%
スランプ 18cm
空気量 4.0%
(粗骨材過多)

細骨材率 45%
スランプ 19cm
空気量 4.8%
(良好)

細骨材率 48%
スランプ 20cm
空気量 4.5%

写真-2 各細骨材率によるフレッシュ性状

W/Bを35%とし、単位EX量を 22kg/m^3 とした膨張率の経時変化を図-8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 220×10^{-6} であり、図-6に示す推定線を用いた推定値 216×10^{-6} と概ね合致することが認められた。

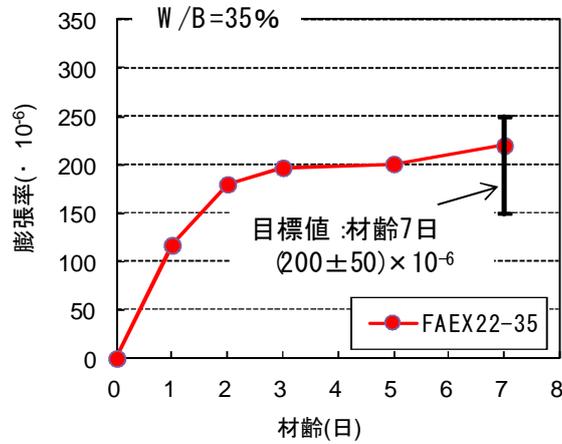


図-8 膨張率の経時変化(平均値)(配合 FAEX22-35)

圧縮強度の発現を図-9に、B/Wと材齢28日の圧縮強度の関係を図-10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 22kg/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。湿潤養生日数の検討はこの配合を用いて実施した。

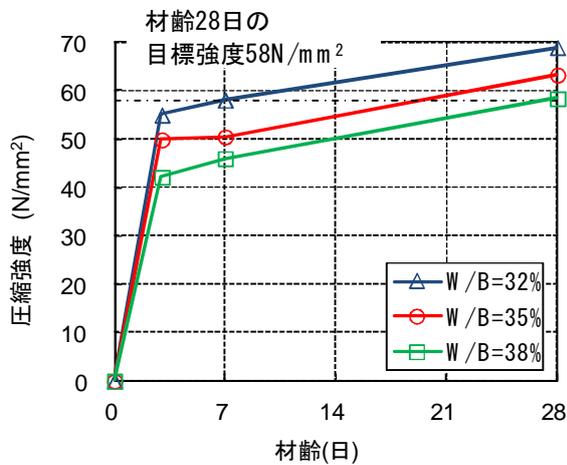


図-9 圧縮強度の発現

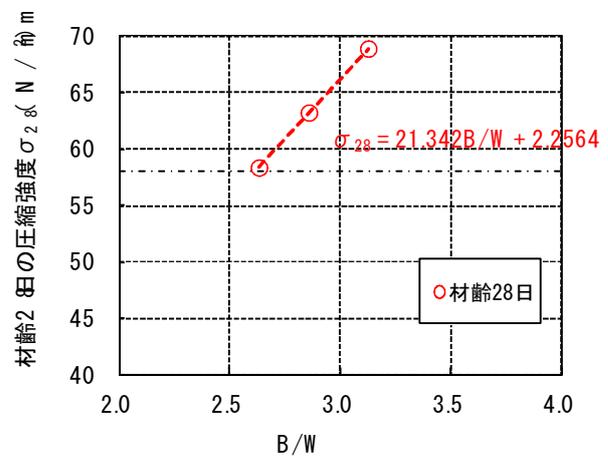


図-10 B/Wと材齢28日の圧縮強度の関係

3.3 湿潤養生日数

3.3.1 膨張率および標準養生試験体の圧縮強度の発現

配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の膨張率の経時変化を図-11 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 の標準養生した試験体の圧縮強度の発現を図-12 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。このことは、B を「HC+FA+EX」とした場合と B を「HC+EX」とした場合において、各結合材の水和進行の速さの差に伴う EX による空隙形成に差が生じ、圧縮強度の発現に影響したことが理由として考えられる。このことより、EX を混入する配合の検討は、膨張率および圧縮強度の発現の両面で行う必要があると考えられる。

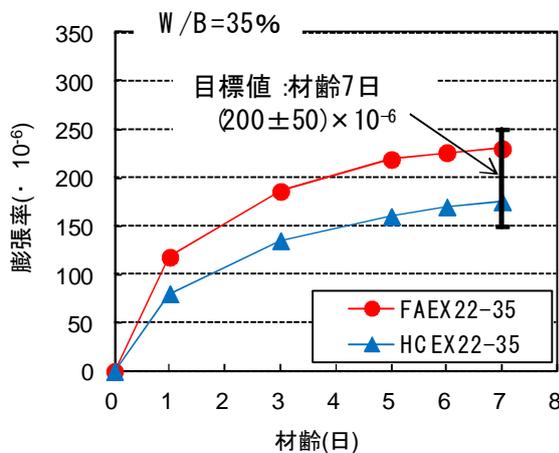


図-11 膨張率の経時変化の比較

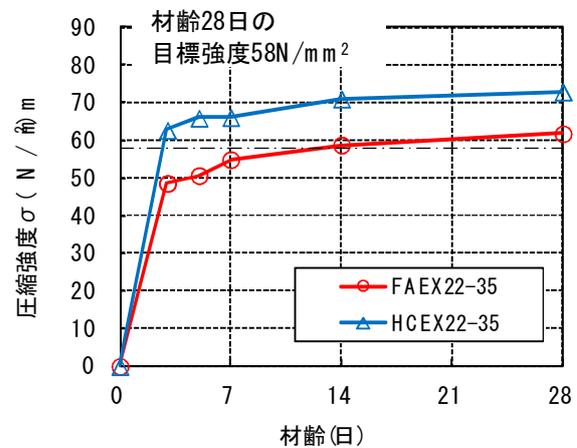
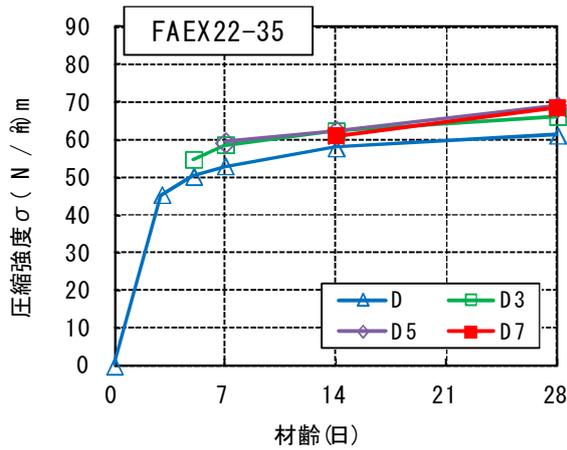


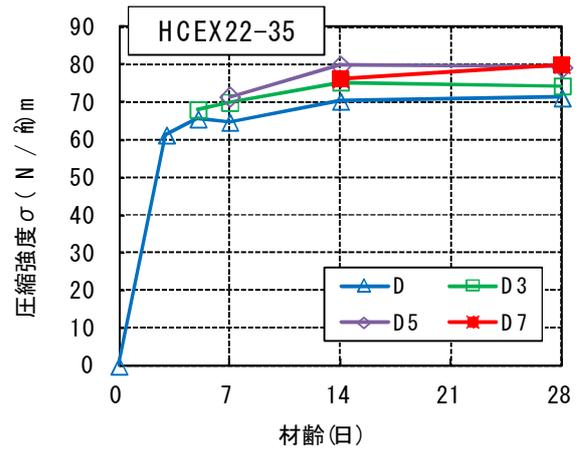
図-12 圧縮強度の発現(標準養生)の比較

3.3.2 湿潤養生日数が圧縮強度の発現におよぼす影響

湿潤養生日数をパラメータとして実施した配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の圧縮強度の発現を図-13 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 をとし、各試験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試験体では、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ズラン反応は、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ズラン反応には、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)

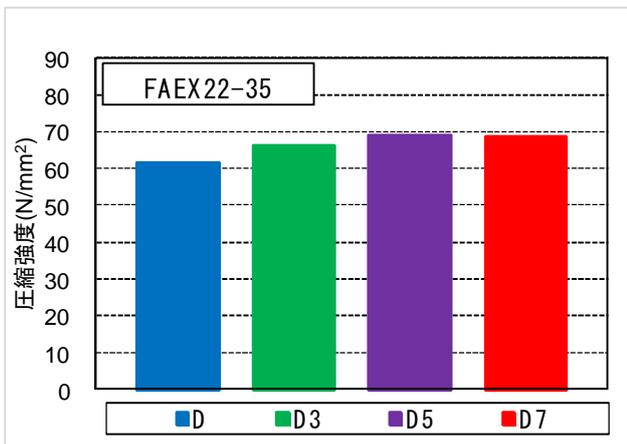


(配合 HCEX22-35)

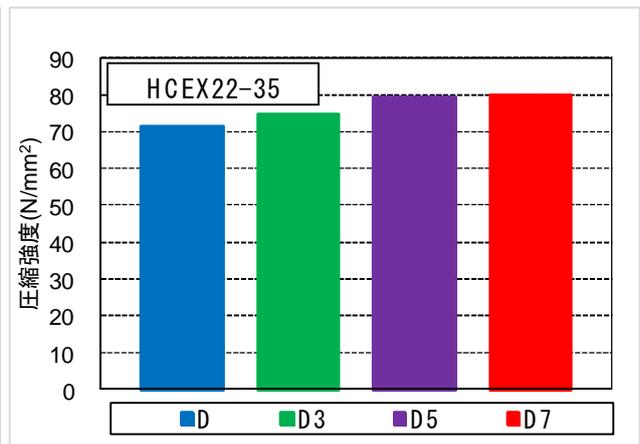
図-13 各湿潤養生日数の圧縮強度の発現

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-14 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 10N/mm² 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 とでは、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、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-12 と 図-13 を用いて標準養生した試験体と、湿潤養生後に気乾養生した試験体の圧縮強度を比較すると、標準養生をした試験体の方が低くなることが認められた。標準養生をした試験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⁹⁾があり、結果として標準養生した試験体では 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。



(配合 FAEX22-35)



(配合 HCEX22-35)

図-14 各養生方法による材齢 28 日の圧縮強度の比較

3.3.3 湿潤養生日数が耐久性におよぼす影響

配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の各養生方法の透気係数を図-15 に示す。材齢 28 日において実施した透気係数試験の結果は、配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の全ての試験体において品質評価⁷⁾は「良い」の判定であった。また、配合 FAEX22-35 の養生方法 D5, および D7 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。

次に試験を実施した材齢 28 日と材齢 182 日の透気係数の比較を行う。材齢 182 日の透気係数は、材齢 28 日より大きくなる傾向が認められたが、湿潤養生による表層部の品質の改善効果は同様に認められ、脱枠後に望ましいと考えられる湿潤養生日数も同様であることが認められた。材齢 182 日の透気係数の増加は、コンクリート中の水分の乾燥による透気経路の拡大に起因することが報告⁹⁾されており、このことが材齢 182 日の透気係数が材齢 28 日の透気係数より大きくなったことが理由として考えられる。

試験を実施した材齢により透気係数に差異があるが、透気性の観点からの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。これは配合 FAEX22-35 の膨張率が配合 HCEX22-35 より大きく、EX 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理由として考えられる。フライアッシュによるコンクリートの表層部の品質改善効果を検討するには、さらにデータを蓄積し、膨張率を概ね同じとした試験結果による比較が必要であると考えられる。

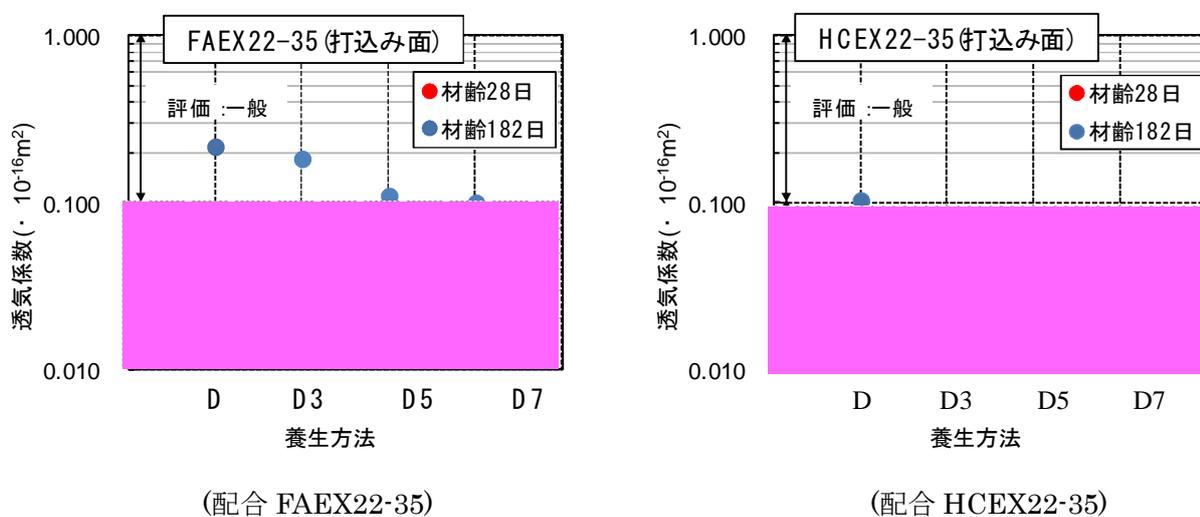


図-15 各養生方法の透気係数

配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の各養生方法の塩化物イオンの浸透深さを図-16 に示す。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。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り、その傾向は配合 FAEX22-35 に顕著に認められた。

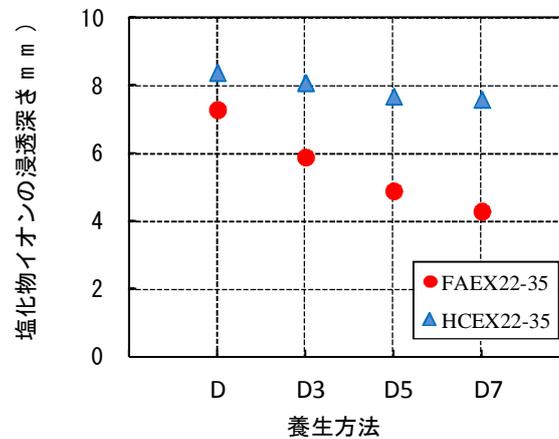
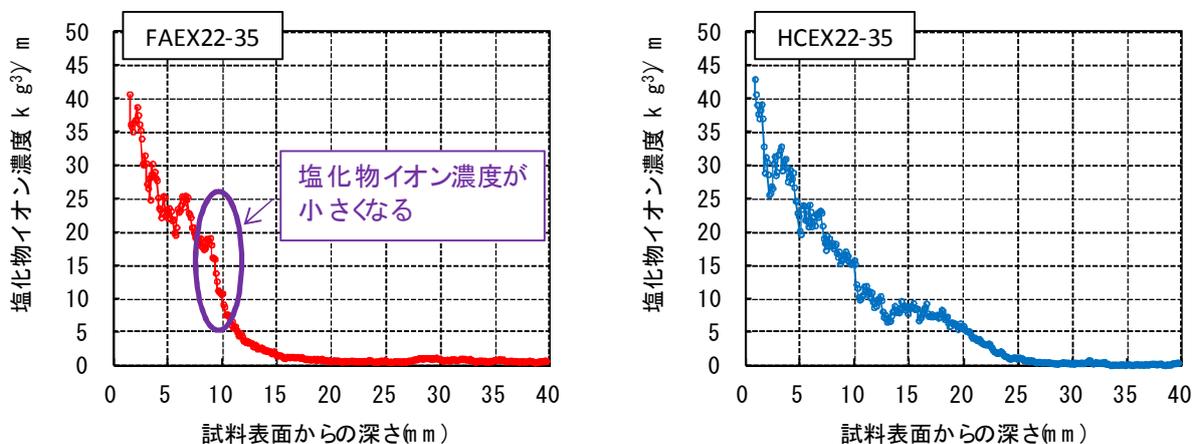


図-16 塩化物イオンの浸透深さ

本試験の範囲内では、コンクリートの品質評価は、透気係数と塩化物イオンの浸透深さでは異なることが認められた。配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の養生方法 D7 の EPMA 分析による試料深さと塩化物イオン濃度との関係を図-17 に示す。配合 FAEX22-35 は試料表面から深さ 8 から 10mm の区間で塩化物イオン濃度が急に低下する箇所があるが、配合 HCEX22-35 はそうした箇所が認められなかった。このことから、FA の化合物が塩化物イオンを吸着などして浸透を抑制したことが考えられる。このことは、トレント法を用いて透気係数を測定した場合に、ごく表層部のコンクリートの品質に影響されることが指摘¹⁰⁾されており、本試験では前述したように EX による空隙が粗になった可能性が考えられるが、一方で FA のポズラン反応生成物が化学的な塩素固定能力を有することが報告¹¹⁾されており、本試験でも同様の現象が生じたことが考えられる。FA を用いたコンクリートの場合には、さらにデータを蓄積し、品質項目とそれに適合する試験方法について、さらに検討していく必要があると考える。



(配合 FAEX22-35)

(配合 HCEX22-35)

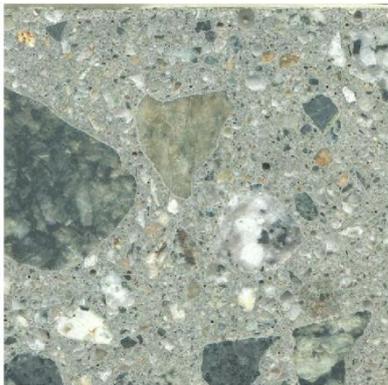
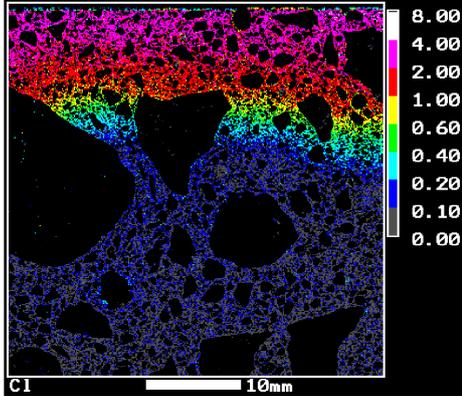
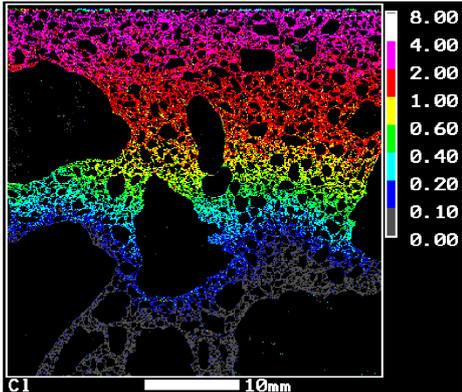
図-17 各養生方法の試料表面からの深さと塩化物イオン濃度の関係

配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の塩分拡散係数試験(浸せき法)の結果を表-6 および表-7 に示す。塩化物イオン拡散係数(浸せき期間 182 日)は、配合 FAEX22-35 において $0.641\text{cm}^2/\text{年}$ 、配合 HCEX22-35 において $1.38\text{cm}^2/\text{年}$ となり、配合 FAEX22-35 の塩化物イオン拡散係数は配合 HCEX22-35 の 0.5 倍程度となった。EX を混入した場合においても、FA を混入したコンクリートは早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに比較して、塩害に対する耐久性は高いといえる。

表-6 塩分拡散係数試験(浸せき法)の結果

配合名	W/B (%)	浸せき期間	見掛けの塩分拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)	表面の塩分濃度 (kg/m^3)	初期塩分濃度 (kg/m^3)
FAEX22-35	35	182 日	0.641	44.2	0.790
HCEX22-35	35	182 日	1.38	36.9	0.244

表-7 EPMA による塩化物イオン濃度の測定結果(コンター図)

試験体名	試料の状況	塩化物イオン濃度コンター図
FAEX22-35	↓ 浸漬面 	↓ 浸漬面 
	↓ 浸漬面 	↓ 浸漬面 

4. まとめ

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方式 PC 桁間の場所打ち部に適用することによる PC 橋の高耐久化を目的とし、20°Cの養生条件下における分級フライアッシュを用いた収縮補償コンクリートの膨張特性と材料特性を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 収縮補償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 22kg/m^3 となり、標準添加量(20kg/m^3)より若干多くなった。
- (2) 収縮補償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。このため、収縮補償コンクリートの配合で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と透気係数の観点では4日程度が望ましいと考えられる。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、圧縮強度の発現において4日程度、透気係数の観点では2日程度が望ましいと考えられる。
- (4) 塩化物イオンに対する抵抗性は、湿潤養生日数の増加にともない大きくなる傾向が認められた。その傾向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で、より顕著になることが認められた。
- (5) 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は、結合材を早強ポルトランドおよび膨張材とした配合と比較して、透気係数に関しては大きくなったが、塩化物イオンの浸透深さに関しては小さくなった。

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致します。

また、試験の実施にあたり、太平洋セメント株式会社中央研究所の杉山彰徳氏、株式会社太平洋コンサルタントの村松達也氏らのご協力を得て実施したものであり、深く感謝致します。

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，吳承寧，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) 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
- 7) 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.

- 8) 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
- 9) 蔵重勲, 廣長道彦: 透気係数の含水依存性を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価法の一提案, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.225-232, 2011
- 10) 温品達也, 坂田昇, 渡邊賢三, 柳井修司: 表層透気試験で得られたコンクリート表層品質の判定結果に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1738-1743, 2012
- 11) 三浦正純, 一色正広, 武知隆男, 上田隆雄: フライアッシュの塩素固定能力に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.851-856, 2011