

論文 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

鈴木 雅博*1・杉山 彰徳*2・村松 達也*3・鳥居 和之*4

要旨: 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、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 桁間の継目部は、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継目部に適用するため、20℃の養生条件下における強度特性、膨張材による膨張特性および耐久性と圧縮強度の発現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は4日程度必要であることが確認された。

キーワード: 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⁾。プレテンション PC 桁間の継目部は、現場打ちの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 桁間の継目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や透気係数におよぼす影響を検討した。

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および透気係数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。

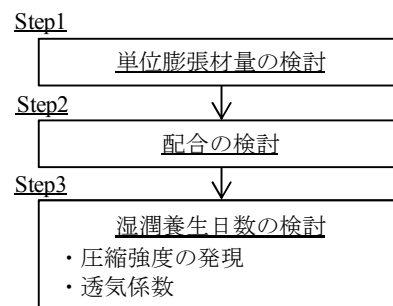


図-1 検討フロー

*1(株)ピーエス三菱 技術本部 技術研究所 所長代理 博(工) (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 建設マテリアルチームリーダー 博(工) (正会員)

*3(株)太平洋コンサルタント コンクリート技術部 (正会員)

*4 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 教授 工博 (正会員)

2.2 使用材料

使用材料を表-1に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを、フライアッシュには北陸電力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。本試験で使用した膨張材は標準添加量 20kg/m³の石灰系低添加型を使用した。

2.3 単位膨張材量の検討

プレテンション PC 桁間の継目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)×10⁻⁶を目標値とした収縮補償コンクリートとした。コンクリートの設計基準強度は材齢 28 日において 50N/mm²とした。また、スランブおよび空気量の目標値はそれぞれ、18±2.5cm および 4.5±1.5%とした。

本検討におけるコンクリートの配合を表-2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 FA(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 15mass%を単位 FA 量とし、85mass%を単位 HC 量とした。単位 EX 量の検討では、単位 EX 量を 20kg/m³と 25kg/m³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。設計基準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、配合強度を 58.0 N/mm²とした。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。

2.4 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⁹⁾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。

2.5 湿潤養生日数の検討

養生方法を表-3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

表-1 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:3.14g/cm ³ , 比表面積:4410cm ² /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:2.44g/cm ³ , 比表面積:5070cm ² /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:2.39g/cm ³ , 比表面積:4650cm ² /g, 強熱減量:2.0%
	EX	低添加型, 石灰系 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3400cm ² /g
細骨材	S	砕砂(早月川産) 表乾密度:2.66g/cm ³
粗骨材	G	砕石(早月川産) 表乾密度:2.70g/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

表-2 配合

配合	W/B (%)	単位量(kg/m ³)						検討内容	
		W	B			S	G		
			HC	FA1 ¹⁾ , FA2 ²⁾	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		
FAEX22-32	32	165	420	74	22	730	928		配合
FAEX22-35	35	165	382	67	22	758	940		
FAEX22-38	38	165	350	62	22	784	949		
FAEX22-35	35	165	382	67	22	758	940		湿潤養生日数
HCEX22-35	35	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)

表-3 養生方法

養生方法	試験体記号
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-4 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	透気係数	Torrent 法

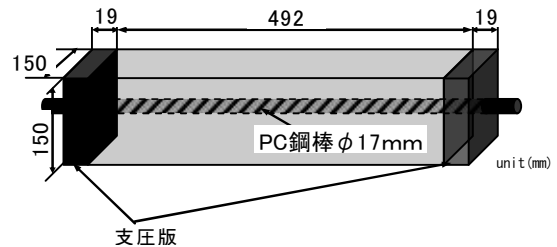


図-2 透気試験に用いた試験体の形状

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°C、湿度 60%の室内に静置した。

試験項目を表-4 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 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ とし、各 3 体とした。透気試験に用いた試験体の形状を図-2 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 $150 \times 150 \times 492\text{mm}$ 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 $\phi 17\text{mm}$ 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 日で実施した。

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/m^3 とした膨張率の経時変化を図-3 に示す。単位 EX 量 20kg/m^3 とした配合では目標値の下限となり、単位 EX 量 25kg/m^3 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/m^3)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-4 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/m^3 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/m^3 とした。

材齢 28 日における B/W と圧縮強度の関係を図-5 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/m^3 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 22kg/m^3 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

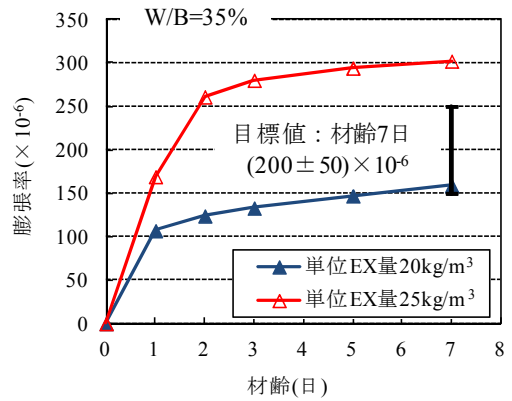


図-3 膨張率の経時変化(平均値)

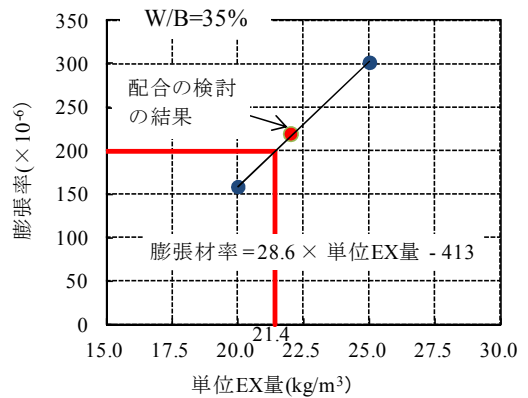


図-4 単位 EX 量と膨張率との関係

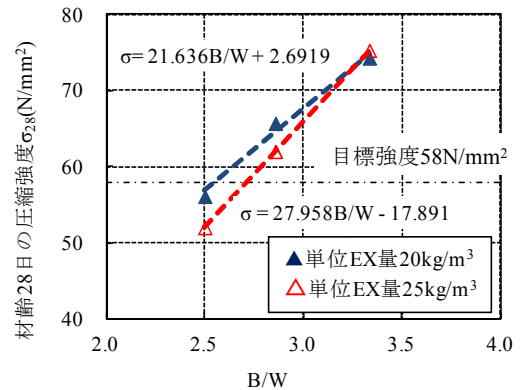


図-5 各単位 EX 量の B/W と圧縮強度の関係

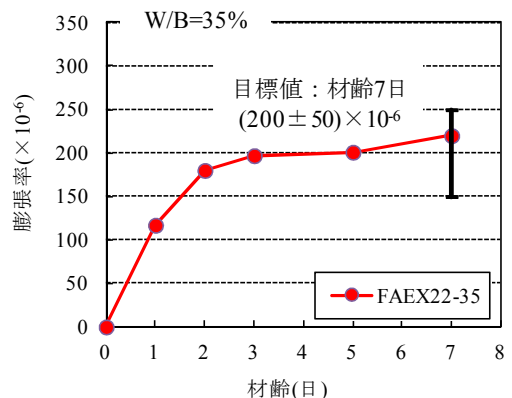


図-6 膨張率の経時変化(平均値)(配合 FAEX22-35)

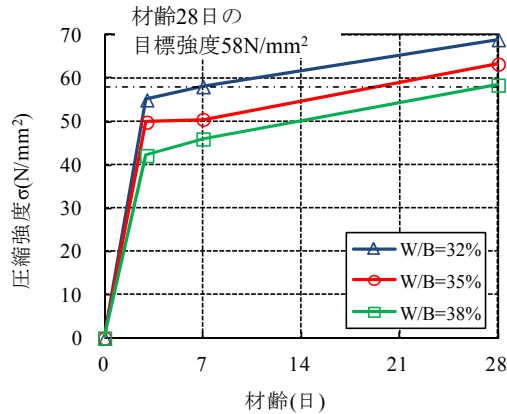


図-7 圧縮強度の発現

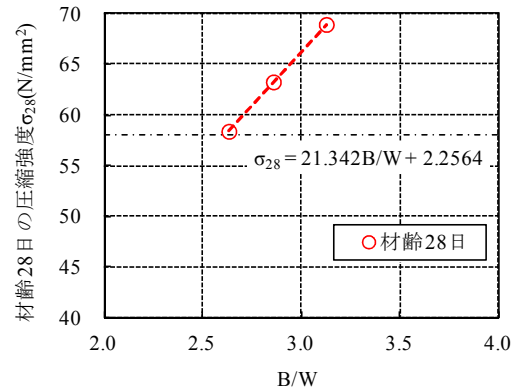


図-8 B/W と材齢 28 日の圧縮強度の関係

し、材齢 7 日の膨張率が目標値を満足するかを確認した。

3.2 配合の検討

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-6 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-4 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。

圧縮強度の発現を図-7 に、B/W と材齢 28 日の圧縮強度の関係を図-8 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。

3.3 湿潤養生日数

(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-9 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-10 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を認められた。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。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。

(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

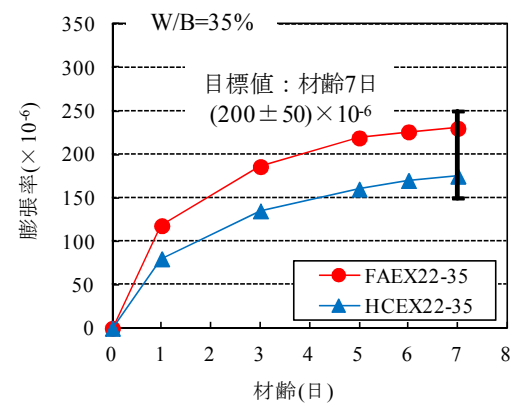


図-9 膨張率の経時変化の比較

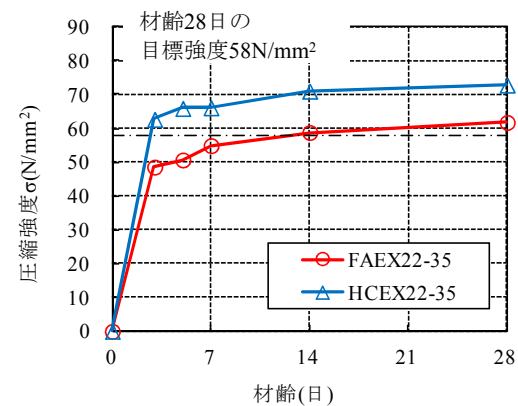
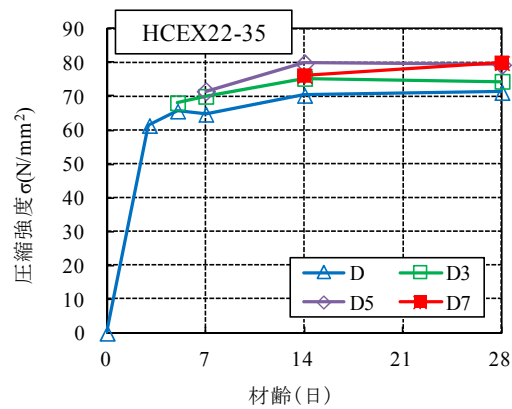
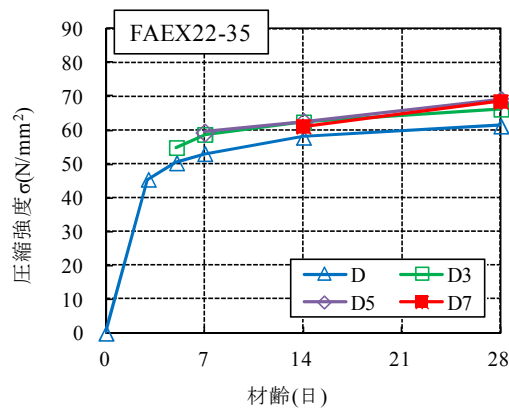


図-10 圧縮強度の発現 (標準養生) の比較

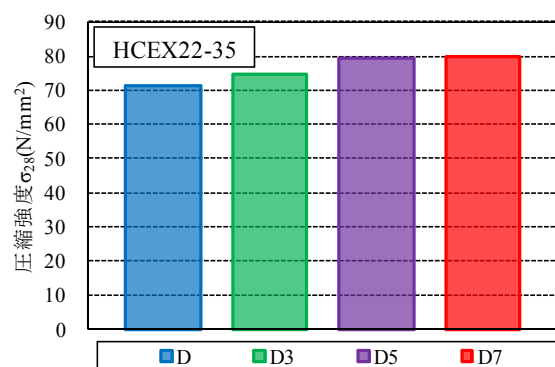
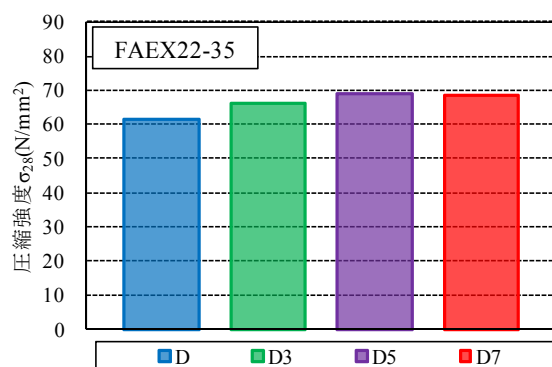
パラメータとして実施した圧縮強度の発現を図-11 に示す。凡例は脱型後の湿潤養生日数を 0 日において D, 2 日において D3, 4 日において D5, 6 日において D7 をとし、各試験体の養生方法を示す。配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 とともに養生方法 D3, D5 および D7 は養生方法 D と比較して、圧縮強度の増加が認められた。配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の圧縮強度の発現を比較すると、湿潤養生を実施した試験体では、配合 FAEX22-35 は材齢 14 日以降においても圧縮強度の増進が認められたが、配合 HCEX22-35 においては材齢 14 日以降におけ



(配合 FAEX22-35)

(配合 HCEX22-35)

図-11 各湿潤養生日数の圧縮強度の発現



(配合 FAEX22-35)

(配合 HCEX22-35)

図-12 各養生の方法による材齢 28 日の圧縮強度の比較

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。

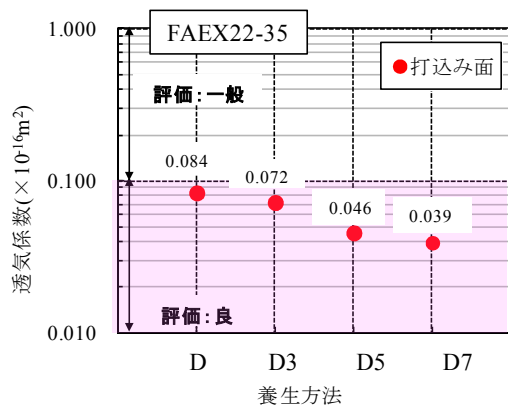
配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の各養生の材齢 28 日の圧縮強度を図-12 に示す。配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 とともに養生方法 D7 の圧縮強度は、養生方法 D と比較して、約 10N/mm² 大きくなることが認められた。また、いずれの配合も養生方法 D5 と D7 とでは、圧縮強度はほぼ同程度であり、脱型後の湿潤養生日数を 4 日以上としても圧縮強度の増進はほとんど認められなかった。このことから、脱型後の湿潤養生日数は 4 日程度とすることが望ましいと考えられる。

図-10 と図-11 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い圧縮強度と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⁸⁾があり、結果として標準養生した試験

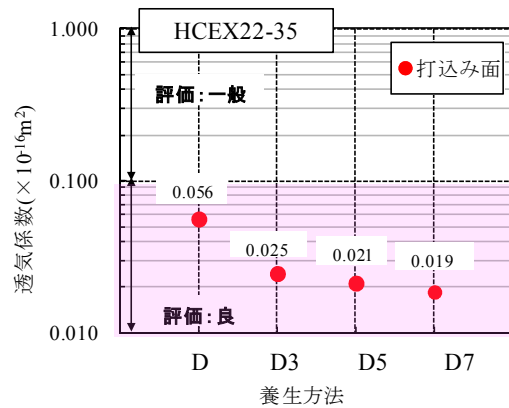
体では EX による空隙がより多く形成されたことが理由として考えられる。

(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-13 に示す。配合 FAEX22-35 と配合 HCEX22-35 の全ての試験体において品質評価⁹⁾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。このことから、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、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



(配合 FAEX22-35)



(配合 HCEX22-35)

図-13 各養生の方法の透気係数

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。

4. まとめ

分級フライアッシュをプレテンション方式 PC 桁間の継目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耐久性の観点では 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、耐久性の観点では 2 日程度が望ましいと考えられる。

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・構造的な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。

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) 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