

論文 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

俵 道和^{*1}・呉 承寧^{*2}・石川 嘉崇^{*3}・滝上 邦彦^{*4}

要旨: 本研究では、プレストレストコンクリートに必要な要因として考えられる初期強度発現性、乾燥収縮、クリープ、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性および塩分浸透抵抗性に及ぼすフライアッシュの影響について検討を行った。その結果、水結合材比を調整することにより初期強度を確保することが可能であり、フライアッシュを混入したものが乾燥収縮およびクリープ係数共に小さくなった。耐久性として、フライアッシュを混入することにより中性化抵抗性は低下したが、空気量を適切に制御することで凍結融解抵抗性は確保され、塩分浸透抵抗性は向上することが確認された。

キーワード: フライアッシュ, 乾燥収縮, クリープ, 中性化抵抗性, 凍結融解抵抗性, 塩分浸透抵抗性

1. はじめに

石炭火力発電所では、石炭焼却に伴う副産物として石炭灰が産出される。石炭灰の産出量は、電力以外のものも含めると年間 1000 万トンを超えており、今後も増加傾向にあると言われている。しかし、灰処分場の確保が困難となってきたことから、既存の灰処分場の延命化や埋め立て以外の有効利用拡大が求められている。フライアッシュは、石炭を燃焼させた時に発生する石炭灰のうち、電気集じん器により捕集された微粉末の灰のことであり、石炭灰の約 90%がフライアッシュである。フライアッシュの有効利用は、セメント混合材、コンクリート混和材、土工材、建材など多岐に亘っているが、その利用量は多くない。フライアッシュのコンクリートへの利用は、施工性能の向上、温度ひび割れの抑制、耐久性の向上、長期強度の増進、アルカリシリカ反応の抑制など、コンクリートの性能向上に係わる利点のみならず、セメント代替による CO₂削減など地球環境保全の観点からのメリットも兼ね備えている。

これらの利点を有するフライアッシュコンクリートであるが、これまでプレストレストコンクリートに適用された事例は少ない。プレストレストコンクリートに必要な特性値として、(1)プレストレスト導入を早期に行うために必要な初期強度発現性、(2)プレストレスト量の減少に関係するコンクリートの収縮およびクリープ、(3)塩害地域や融雪剤が散布される地域で建設された構造物に必要となる凍結融解抵抗性や塩分浸透抵抗性などの耐久性が挙げられる。

よって本研究では、プレテンション PC 桁やポストテンション PC セグメント桁などのプレキャスト製品を対

象とした配合について、通常使用されているコンクリートとフライアッシュを混入したコンクリートを比較しながら、フライアッシュコンクリートの適用性について検討を行った。

2. 試験の概要

2.1 使用材料

本試験で使用した使用材料を表-1に示す。

2.2 コンクリートの配合

本研究では、プレテンション PC 桁およびポストテンション PC セグメント桁を対象とした配合について検討を行い、表-2に示す示方配合を選定した。

一般的に使用されるプレテンション PC 桁およびポストテンション PC セグメント桁の水結合材比は 36.0%、41.0%および 50.0%を設定した。フライアッシュを混入し

表-1 使用材料

材料名	記号	種類・産地および物性値
セメント	C	早強ポルトランドセメント 密度: 3.14 g/cm ³
フライアッシュ	FA	JIS 規格の II 種品 密度: 2.24 g/cm ³
細骨材	S	西茨城郡岩瀬町飯淵産砕砂 密度: 2.63 g/cm ³
粗骨材	G	西茨城郡岩瀬町飯淵産砕石 密度: 2.61 g/cm ³
減水剤	SP	高性能減水剤 ポリカルボン酸エーテル系化合物
空気調整剤	AE	AE 剤

*1 オリエンタル白石(株) 技術研究所研究員 工修 (正会員)

*2 オリエンタル白石(株) 技術研究所副所長 工博 (正会員)

*3 電源開発(株) 茅ヶ崎研究所上席研究員 工博 (正会員)

*4 オリエンタル白石(株) 大阪支店施工技術部課長

表-2 コンクリートの示方配合

配合	水結合 材比 W/B (%)	水 セメント比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	FA 置換率 FA/B (%)	減水剤 添加率 SP/B (%)	AE 剤 添加率 AE/B (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
							水 W	セメント C	フライ アッシュ FA	細 骨 材 S	粗 骨 材 G	減 水 剤 SP	AE 剤 AE
36-0	36.0	36.0	39.0	0	0.65	0.004	154	428	0	690	1079	2.78	0.015
36-10	33.0	36.7	36.0	10	0.80	0.018	145	395	44	636	1131	3.52	0.079
41-0	41.0	41.0	40.5	0	0.60	0.003	154	376	0	734	1078	2.25	0.011
41-20	35.0	43.8	37.0	20	0.70	0.014	145	331	83	657	1119	2.90	0.058
50-0	50.0	50.0	44.0	0	0.70	0.004	154	308	0	823	1047	2.16	0.012
50-20	43.0	53.7	41.0	20	0.70	0.014	145	270	67	757	1089	2.19	0.047

※B=C+FA

たものについては、初期材齢および材齢 28 日に同程度の圧縮強度が得られるように水結合材比を3~7%小さく設定した。フライアッシュを混入しないコンクリートの単位水量を 154kg/m³としたが、フライアッシュを混入したコンクリートは、フライアッシュのベアリング効果で、単位水量が 145kg/m³としても同程度のワーカビリティを得ることができた。フライアッシュの置換率は、結合材の内割りで 10%または20%とした。フレッシュコンクリートの目標スランプと空気量は 10±2.5cm および 4.5±1.5%とした。

2.3 コンクリートの製造

コンクリートの製造は、温度 20℃、湿度 80%の試験室で公称容量 0.10m³の強制練りパン型ミキサを用いて行った。

2.4 コンクリートの養生

コンクリートの養生方法は、20℃の水中での標準養生およびプレキャスト製品を想定した蒸気養生の2種類について検討を行った。

蒸気養生の温度履歴を図-1に示す。蒸気養生の温度履歴は、プレストレストコンクリート製品工場で行われている温度履歴である。

2.5 試験項目

本研究では、表-3に示す8項目の試験を行った。

3. 試験の結果

3.1 強度特性

(1) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を養生種類毎に図-2, 3に示す。標準養生は、打ち込み翌日に脱枠し試験材齢まで20℃の水中養生を行った。蒸気養生は、蒸気養生終了後から試験材齢までは温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室で気中養生を行った。以下のヤング係数および割裂引張強度についても同様の養生方法を行った。

標準養生を行った場合、フライアッシュを混入したものは材齢 91 日まで強度増進が確認された。また、フラ

表-3 試験項目

試験種類		試験方法
強度 特性	圧縮強度試験	JIS A 1108
	割裂引張強度試験	JIS A 1113
体積 変化	ヤング係数試験	JIS A 1149
	乾燥収縮試験	JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法)
	クリープ試験	JIS A 1157
耐 久 性	促進中性化試験	JIS A 1152, JIS A 1153
	凍結融解試験	JIS A 1148
	塩化物イオン拡散 係数電気泳動試験	JSCE-G 571-2007

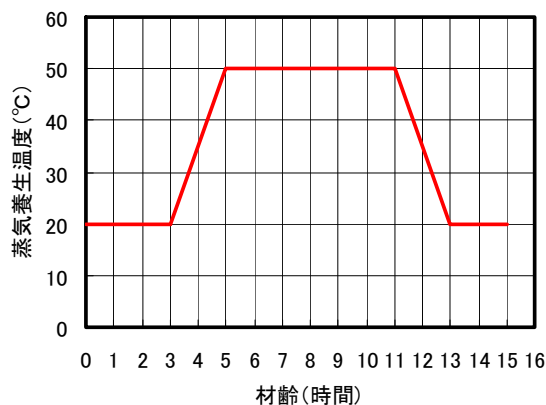


図-1 蒸気養生温度履歴

イアッシュ無混入のものとは比べて10%程度の強度増加が確認された。

一方、蒸気養生を行った場合、フライアッシュを混入したものは、材齢1日時にフライアッシュ無混入のコンクリートと同等の圧縮強度を示しており、その後の強度増加もフライアッシュ無混入のものと同程度であった。また、フライアッシュを混入し蒸気養生を行ったものは、標準養生を行ったものとは比べて長期の強度増加が見られなかった。

(2) 割裂引張強度

割裂引張強度の試験結果を養生種類毎に図-4, 5に示

す。フライアッシュを混入し標準養生を行ったものは、材齢 28 日から 91 日まで強度増加が確認された。蒸気養生を行ったものについては、フライアッシュ混入の有無に係わらず材齢 28 日から 91 日までの強度増加はほとんど確認されなかった。

3.2 体積変化

(1) ヤング係数

ヤング係数の試験結果を養生種類毎に図-6, 7 に示す。試験結果から、養生方法の違いによる大きな差は確認されなかった。また、フライアッシュ混入の有無による違

いは、フライアッシュを混入したものが 5%程度大きくなる傾向が確認された。

(2) 乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮率を養生種類毎に図-8, 9 に示す。標準養生とは、脱枠後から材齢 7 日まで 20℃の水中で標準養生を行い、その後基長を測定し、温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿室で保管し定期的に乾燥収縮率を測定した。蒸気養生とは、材齢 1 日の蒸気養生終了後に基長を測定し、温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿室で保管し定期的に乾燥収縮率を測定した。

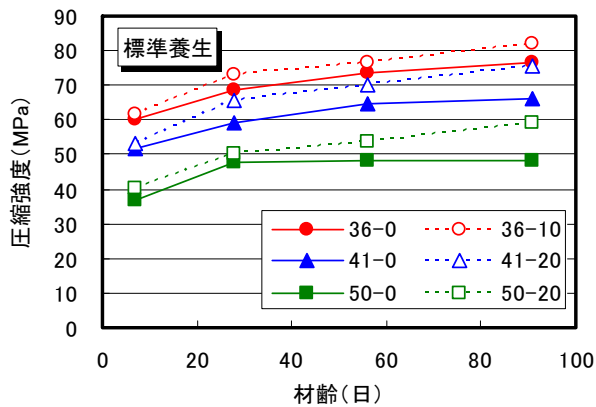


図-2 標準養生したコンクリートの圧縮強度

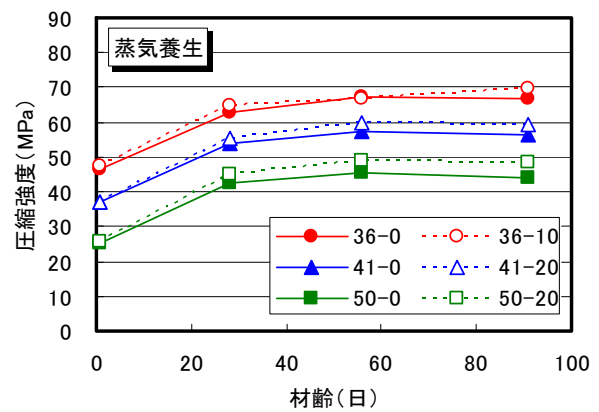


図-3 蒸気養生したコンクリートの圧縮強度

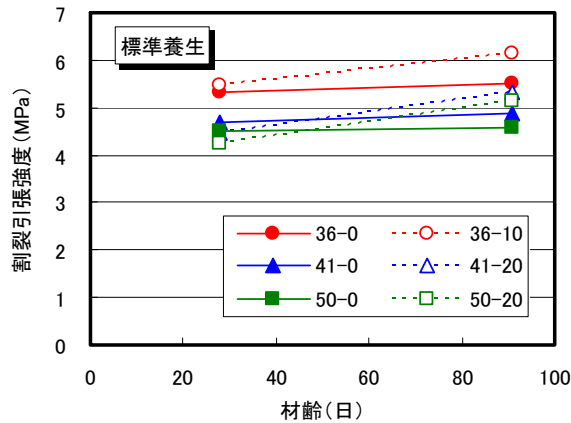


図-4 標準養生したコンクリートの割裂引張強度

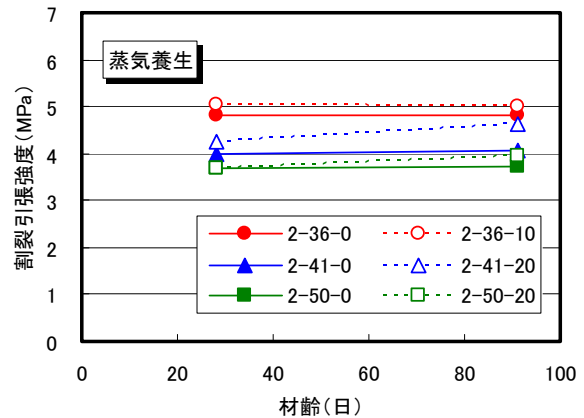


図-5 蒸気養生したコンクリートの割裂引張強度

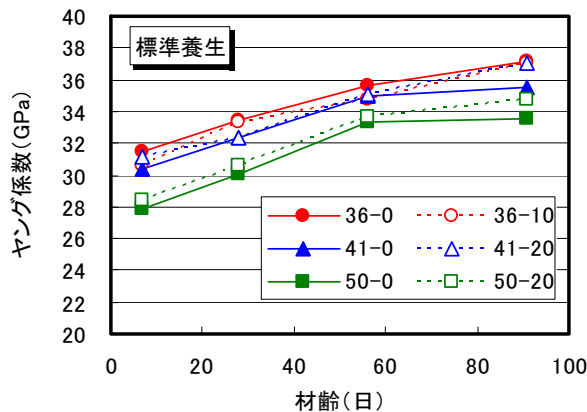


図-6 標準養生したコンクリートのヤング係数

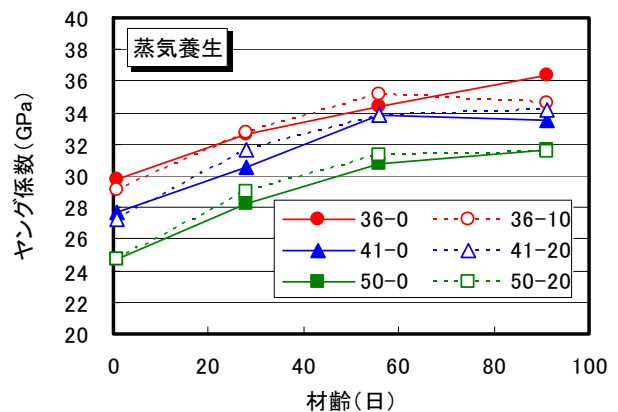


図-7 蒸気養生したコンクリートのヤング係数

その結果、標準養生を行った場合、フライアッシュを混入したコンクリートは無混入のコンクリートと比べて材齢 26 週の乾燥収縮率が 10%程度小さくなった。一方、蒸気養生を行った場合は、フライアッシュの混入の有無に係わらず材齢 26 週の乾燥収縮率は約 500×10^{-6} を示した。

(3) クリープ係数

クリープ試験には、配合 36-0 および 36-10 の 2 配合について標準養生と蒸気養生の 2 種類について行った。標準養生とは、材齢 28 日まで 20℃ の水中で標準養生を行った後にクリープ試験の载荷を始めたものであり、蒸気養生とは、蒸気養生終了後の材齢 1 日にクリープ試験の载荷を始めたものである。

クリープ試験で測定したコンクリートのクリープ係数を図-10 に示す。この図より、標準養生を行ったコンクリートのクリープ係数は、フライアッシュを混入したものが無混入のものに比べて 15%程度小さくなったが、蒸気養生を行ったコンクリートのクリープ係数は、フライアッシュの有無に係わらず同程度の値を示した。

3.3 耐久性

(1) 中性化抵抗性

26 週間中性化促進試験の結果を図-11 に示す。ここに示す標準養生とは、脱枠後から材齢 4 週まで標準養生を行い、標準養生終了後から温度 20℃、湿度 60%、二酸化炭素濃度 5% の環境で中性化促進試験を行ったものであり、蒸気養生とは、材齢 1 日の蒸気養生終了後から温度 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室に材齢 4 週まで保管した後に、中性化促進試験を行った結果である。

標準養生を行ったコンクリートは、水結合材比が最も大きくフライアッシュを 20%置換した配合 50-20 のみ中性化した。一方、蒸気養生を行ったものは、水結合材比が大きくなるにつれて、またフライアッシュを混入することにより中性化深さが大きくなる傾向が確認された。

(2) 凍結融解抵抗性

既往の研究¹⁾より、フライアッシュに含まれる未燃焼炭素の影響により、フライアッシュを混入したコンクリートのフレッシュ性状時の空気量を安定して確保できない場合が報告されている。これより、フライアッシュを混入したコンクリートは、凍結融解抵抗性が低下することが問題視されている。

本研究では、フライアッシュを混入したコンクリートは無混入のコンクリートと比べ、同じ $4.5 \pm 1.5\%$ の空気量を得るために AE 剤の使用量を大きく設定する必要があったが、図-12 に示す凍結融解試験結果から、凍結融解抵抗性は十分に確保されたことがわかった。

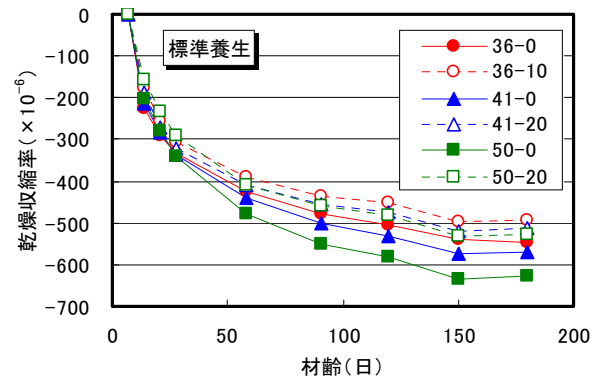


図-8 標準養生したコンクリートの乾燥収縮率

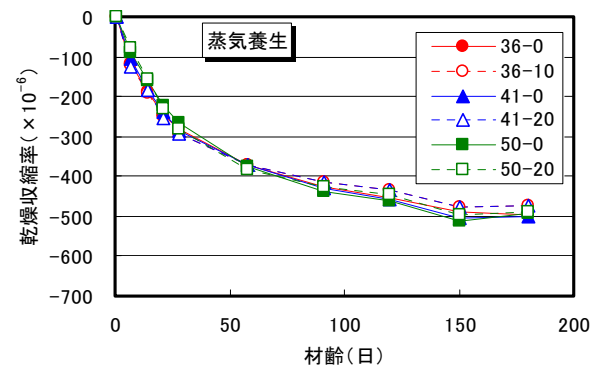


図-9 蒸気養生したコンクリートの乾燥収縮率

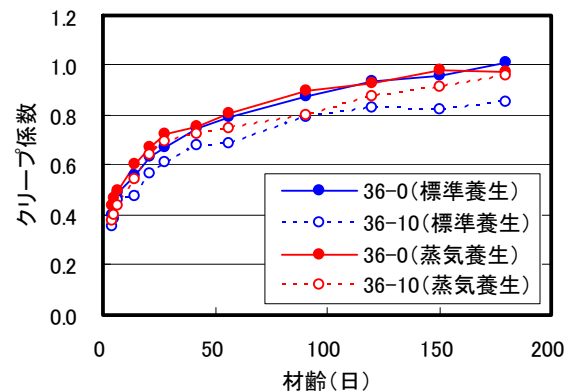


図-10 コンクリートのクリープ係数

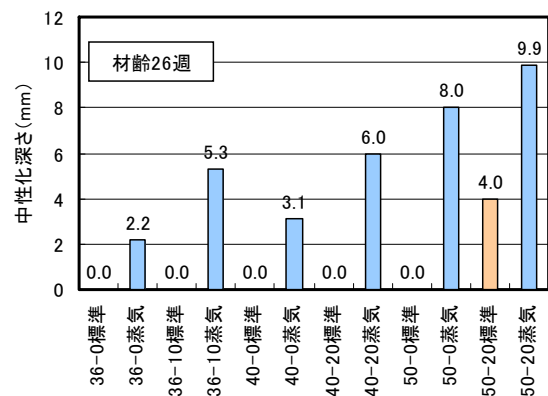


図-11 中性化促進試験

(3) 塩分浸透抵抗性

a) 電気泳動試験による実効拡散係数

本研究では、塩分浸透性能試験として比較的短期間で塩分浸透性能の評価が可能となる電気泳動による試験を行い、実効拡散係数を算定した。

本試験で求められた配合および養生種類毎の塩化物イオンの実効拡散係数 D_e を表-4 および図-13 に示す。電気泳動法で求められた実効拡散係数は、すべての配合について標準養生を行ったものが蒸気養生を行ったものよりも小さくなった。また、フライアッシュを混入したものが無混入のものに比べて実行拡散係数は50%以上小さくなった。

b) 実効拡散係数から推定した見掛けの拡散係数

前述の実効拡散係数は、「見掛けの」拡散係数ではなく、コンクリートの細孔溶液中における塩化物イオンの移動のし易さを表す「実効」拡散係数を測定するものである。得られた実効拡散係数は、そのままコンクリート標準示方書の照査に用いることはできないが、土木学会では実効拡散係数から見掛けの拡散係数に変換する方法が提示されているため、実効拡散係数から見掛けの拡散係数を推定することが可能である。見掛けの拡散係数は、電気泳動法により求められた実効拡散係数 D_e を用いて、式(1)より算定が可能である。

$$D_{ac} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad (1)$$

ここに、

D_{ac} : 見掛けの拡散係数の推定値 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

D_e : 実効拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

k_1 : コンクリート側、陰極側溶液側それぞれの塩化物イオン濃度の釣り合いにかかわる係数

k_2 : セメント水和物中への塩化物イオン固定化現象にかかわる係数

式(1)に示した換算係数 $k_1 \cdot k_2$ は、土木学会コンクリート標準示方書[規準編]土木学会規準および関連規準2007の附属書、電気泳動試験による実効拡散係数を用いた見掛けの拡散係数計算方法²⁾に示されている図より算定することができる。換算係数 $k_1 \cdot k_2$ は、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種および低熱ポルトランドセメントの3種類のセメントについて提案されている。今回、検討を行なった早強ポルトランドセメントを用いた配合については普通ポルトランドセメントの換算係数 $k_1 \cdot k_2$ を適用した。また、フライアッシュを添加した配合については、フライアッシュの置換率毎に示された換算係数 $k_1 \cdot k_2$ を適用した。土木学会コンクリート標準示方書[規準編]に示される図より求めた配合ごとの換

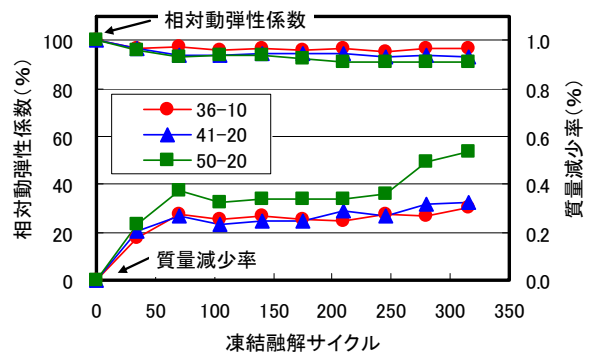


図-12 凍結融解抵抗性

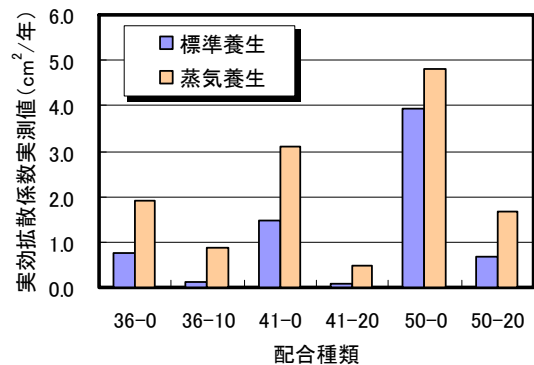


図-13 配合種類と実効拡散係数実測値の関係

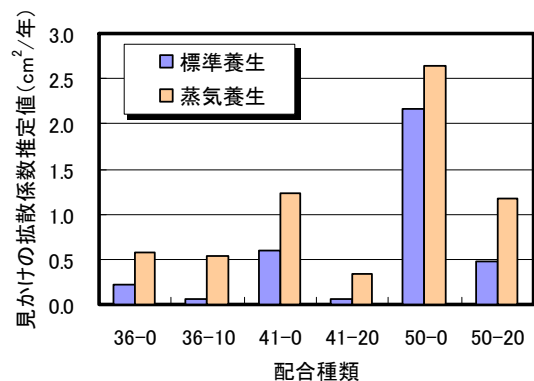


図-14 配合種類と見かけの拡散係数推定値の関係

算係数 $k_1 \cdot k_2$ および式(1)から算出された見掛けの拡散係数推定値を表-4 および図-14 に示す。実効拡散係数から推定された見掛けの拡散係数は、すべての配合について標準養生を行ったものが蒸気養生を行ったものよりも小さくなった。また、配合 36-0 および配合 36-10 以外の配合はフライアッシュを混入したものが無混入のものに比べて見掛けの拡散係数は50%以上小さくなった。配合 36-0 と配合 36-10 は、水セメント比が小さい配合であり、フライアッシュの置換率が10%であったためにフライアッシュを混入することによる塩分浸透抵抗性の向上効果が少なくなったものと考えられる。

c) 実験値から推定した見掛けの拡散係数と予測値の整合性

塩化物イオンに対する拡散係数の照査に用いる、コン

表-4 電気泳動による拡散係数

配合番号	水セメント比 W/C(%)	フライアッシュ置換率 (%)	換算係数 $k_1 \cdot k_2$	実効拡散係数実測値 D_e (cm ² /年)		見掛けの拡散係数推定値 D_{ae} (cm ² /年)	
				標準養生	蒸気養生	標準養生	蒸気養生
36-0	36.0	—	0.30	0.74	1.92	0.22	0.58
36-10	—	10	0.61	0.11	0.89	0.07	0.54
41-0	41.0	—	0.40	1.47	3.10	0.59	1.24
41-20	—	20	0.70	0.09	0.49	0.06	0.35
50-0	50.0	—	0.55	3.95	4.81	2.17	2.65
50-20	—	20	0.70	0.69	1.66	0.48	1.16

クリートの見掛けの拡散係数の予測値の算定方法について、土木学会標準示方書[設計編]³⁾では、普通ポルトランドセメントを用いる場合について式(2)の回帰式が提案されている。また、土木学会⁴⁾ではフライアッシュを用いた場合の見掛けの拡散係数の予測値として式(3)が提案されている。上記の式(2), (3)より算定されたコンクリートの見掛けの拡散係数の予測値と電気泳動によって求められた実験値の実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数推定値との比較を図-15に示す。その結果、標準養生を行ったものはフライアッシュの有無に係わらず、予測値と推定値はほぼ一致しているが、蒸気養生を行ったものは、予測値より推定値が大きくなる傾向が確認された。

$$\log D_p = -3.9 (W/C)^2 + 7.2 (W/C) - 2.5 \quad (2)$$

$$\log D_p = 3.0 (W/B) - 1.9 \quad (3)$$

ここに、 D_p ：見掛けの拡散係数の予測値 (cm²/年)

4. まとめ

本研究の範囲で以下の結論が得られた。

- (1) 材齢と圧縮強度、割裂引張強度およびヤング係数の関係について標準養生を行ったものは、水セメント比が大きいものほどフライアッシュを添加したものの長期の強度増加が大きくなった。蒸気養生を行ったものは、フライアッシュを添加し水セメント比を変化させても、長期の強度増加は見られなかった。
- (2) 乾燥収縮率について、フライアッシュを混入することにより、標準養生を行った場合は約10%低減できるが、蒸気養生を行った場合は同程度となった。
- (3) クリープ係数について、フライアッシュを混入したものが若干小さくなることが確認された。
- (4) 中性化抵抗性について、高水結合材比の配合にフライアッシュを混入したコンクリートで蒸気養生を行ったものは、フライアッシュ無混入のものに比べて中性化速度が比較的速くなった。
- (5) 凍結融解抵抗性について、フレッシュ性状時の空気量を4.5±1.5%確保することにより、フライアッシュを混入しても凍結融解抵抗性は低下しなかった。

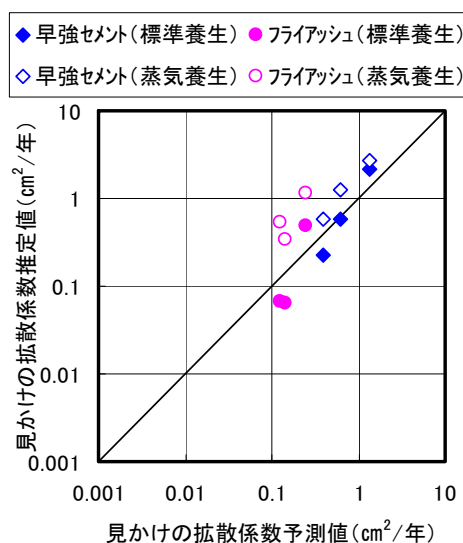


図-15 見かけの拡散係数の予測値と推定値との比較

- (6) 塩分浸透抵抗性は、フライアッシュを混入することにより向上した。
- (7) フライアッシュを混入した配合は、水結合材比を調整することにより初期強度発現性を満足し、またプレストレス量の経時変化に影響を与える乾燥収縮やクリープの体積変化は小さくなり、塩分浸透抵抗性は向上することが確認されたために、プレストレスコンクリートにフライアッシュを適用することは十分可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 山本隆信, 杉山隆文, 辻幸和：フライアッシュコンクリートの空気連行性およびブリーディングに影響を及ぼす各種要因, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.97-102, 1998
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編], pp.277-284, 2007
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編], pp.55, 2007
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー, 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, pp.129-133, 2009