

# 論文 蒸気養生したフライアッシュコンクリートに対する廃瓦粗骨材の内部養生効果

村岸 祐輔\*1・小川 由布子\*2・河合 研至\*3・佐藤 良一\*4

**要旨:** 火力発電所の副産物であるフライアッシュは有効利用が望まれる。しかし、フライアッシュを混和材としてコンクリートに用いる場合、長い湿潤養生を必要とするため、構造部材に用いられることは少ない。一方、廃瓦粗骨材を内部養生材として利用し、コンクリート性能の改善が報告されている。本研究は、フライアッシュコンクリートの構造部材への適応を目的とし、蒸気養生したフライアッシュコンクリートの力学特性および耐久性に対する廃瓦粗骨材の内部養生効果の影響を検討した。その結果、フライアッシュコンクリートの性能向上が確認された。

**キーワード:** 蒸気養生, フライアッシュコンクリート, 内部養生, 廃瓦粗骨材

## 1. はじめに

石炭火力発電所の副産物であるフライアッシュは、循環型社会を目指した「再生資源の利用に関する法律」の制定（指定副産物としての石炭灰の有効利用の促進）や東日本大震災後の火力発電量増加にともなう石炭灰排出量の増加などから、有効利用が求められている。フライアッシュのセメント・コンクリート分野への用途を拡大し、その使用量を増加させることが、急務であると認識できる。

フライアッシュは、コンクリートに混和することで流動性の改善や水和熱の減少、長期強度の増進などの効果を持つことが知られており、ダムやプレキャストコンクリートの工事などに主として使用されてきた<sup>1)2)</sup>。さらに、フライアッシュの JIS の制定、品質規定の改正などによって、その使用量は増加傾向にあるが、普通コンクリートよりも初期強度が低く、長い養生期間を必要とするため、依然として構造部材への適用は少ないことが現状である。しかし、近年フライアッシュコンクリート（以下、FAC）のプレストレストコンクリートへの適用が検討されており、蒸気養生することで初期強度が改善され、材齢初期においてプレストレス導入が可能であると確認されている<sup>3)</sup>。

一方、高含水率骨材である廃瓦粗骨材を用いて、セメントペーストと骨材中の湿度勾配を利用し内部養生を行う方法が提案されており、自己収縮の抑制、強度増進および耐久性の向上などの性能向上が報告されている<sup>4)</sup>。廃瓦粗骨材は既存の内部養生材である軽量骨材に比べ、破砕値が小さく、適度な吸水率を有している。温品らの研究により廃瓦粗骨材を内部養生材として用いることで、

湿潤養生を不可欠とする FAC の力学性能が向上したと報告されている<sup>5)</sup>。しかし、FAC の初期強度の改善は報告されていない。

そこで、本研究では FAC の初期強度の低下と長い湿潤養生期間の必要性を改善することを目的として廃瓦粗骨材を使用し、蒸気養生した FAC に対する廃瓦粗骨材の内部養生効果を圧縮強度、長さ変化、中性化抵抗性の観点から実験的に検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

使用材料とその物理的性質を表-1 に示す。結合材に早強ポルトランドセメント(C)およびフライアッシュ(FA)を用いた。フライアッシュは JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」のⅡ種に適合するものである。細骨材には(広島県黒瀬産)石英斑岩砕石(S)を使用し、粗骨材には(広島県黒瀬産)石英斑岩砕石(G)および島根県産廃瓦粗骨材(PCCA)を用いた。廃瓦粗骨材は、カオリン粘土を焼成して瓦を作製する過程で生じた規格外品を粉碎して 5mm から 13mm にふるい分けしたものを 7 日間以上吸水させ、表乾状態にして用いた。混和剤は、主剤としてポリカルボン酸化合物、助剤として変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤および高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤(非陰イオン界面活性剤を含む)を用いた。

### 2.2 配合

配合表を表-2 に示す。水結合材比は 0.30 とし、単位水量は 165kg/m<sup>3</sup> に一定とした。フライアッシュは内割質量置換して用い、セメントに対して 0, 20 および 40%置

\*1 広島大学 工学研究科 社会基盤工学専攻 (学生会員)

\*2 広島大学 工学研究院 社会環境空間部門助教 博士 (正会員)

\*3 広島大学 工学研究院 社会環境空間部門教授 工博 (正会員)

\*4 広島大学 工学研究院 社会環境空間部門特任教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

材料	種類	特性	記号
セメント	早強ポルトランドセメント	密度：3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積：4490cm <sup>2</sup> /g	C
混和材	フライアッシュ (JIS II 種)	密度：2.33g/cm <sup>3</sup> , 比表面積：3200cm <sup>2</sup> /g	FA
細骨材	石英斑岩砕砂	表乾密度：2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率：1.16%	S
粗骨材	石英斑岩砕石	表乾密度：2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率：0.62%, 寸法：5-13mm, 13-20mm	G
	廃瓦粗骨材	表乾密度：2.26g/cm <sup>3</sup> , 吸水率：8.70%	PCCA
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸化合物	
	AE剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤 高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤	

表-2 配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

配合名	W/(C+FA)	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						Air (%)	Slump (cm)	Temp. (°C)	
			W	C	FA	S	G					
							G1305	G2013				PCCA
HF0-G0	0.3	0.47	165	550	0	751	512	342	0	3.9	19.0	21.0
HF0-G10							427		74	3.9	20.0	19.0
HF20-G0		0.46		440	110	714	512		0	4.4	21.0	18.7
HF20-G10							427		74	3.8	20.0	20.0
HF40-G0		0.44		330	220	677	512		0	3.8	20.0	19.0
HF40-G10							427		74	3.5	21.5	18.5
WC40	0.4	0.47	165	413	0	805	549	366	0	3.8	20.0	20.0

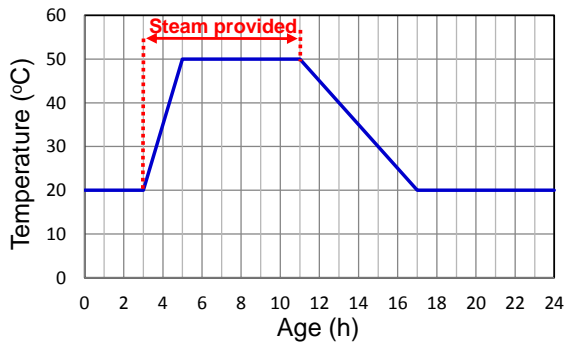


図-1 蒸気養生の温度履歴

換した。廃瓦粗骨材は全粗骨材容積に対して0および10%置換して用いた。なお、全粗骨材容積は一定とし、寸法5mm-13mmの粗骨材と13mm-20mmの粗骨材は、容積比6:4として混合使用した。廃瓦粗骨材は、寸法5-13mmの粗骨材に対して容積置換している。配合名は、フライアッシュ置換率を0、20および40%としたコンクリートをFA0-G0、FA20-G0およびFA40-G0と表記した。これら3配合に廃瓦粗骨材を全粗骨材量に対して10%容積置換したコンクリートをFA0-G0、FA20-G10およびFA40-G10と表記した。なお、WC40は後述における比較配合であり、詳細は3章で述べる。

空気量、スランプおよび練混ぜ直後の温度は、4.5±1.0%、18±2.0cmおよび20±2.0°Cを目標としそれぞれ調節し、各配合のフレッシュコンクリートの試験結果を表-2に示す。スランプは目標範囲を超えた配合もあるが、材料分離はなく、打込みに支障はなかった。

### 2.3 コンクリートの練混ぜおよび養生

コンクリートの練混ぜは、公称容量0.10m<sup>3</sup>の強制練りパン型ミキサを用いて行った。養生は、図-1に示す温度履歴を与え蒸気養生を行った。材齢1日に脱枠し、室温20±2.0°C、相対湿度60±5.0%の室内にて養生した。

### 2.4 試験項目

#### (1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は円柱供試体φ100mm×200mmを用い、JIS A 1108に準拠して行った。試験材齢は1、7、28、91、182および364日とした。

#### (2) 静弾性係数試験

静弾性係数試験は圧縮強度試験と同時に行い、JIS A 1149に準拠した。試験材齢は圧縮強度試験と同様に1、7、28、91、182および364日とした。

#### (3) 長さ変化試験

長さ変化試験は100mm×100mm×400mmの角柱供試体を用い、コンクリートの打込み直後から埋込みみずみゲージにより、経時的に測定を行った。また、所定材齢において、同寸法の供試体の質量を測定した。

#### (4) 促進中性化試験

促進中性化試験はフライアッシュのポゾラン反応が進行していると考えられる材齢91日から二酸化炭素濃度5.0%の促進中性化槽にて行った。供試体は100mm×100mm×400mmの角柱供試体を用い、打込み面に対する1側面を曝露面とし、これ以外の5面をアルミ粘着テープでコーティングし、1面曝露とした。

ここで、打込み面を基準面として、側面を決定した。促進中性化期間は1, 4, 8, 13および26週とし、各促進材齢において、フェノールフタレインを吹き付け、中性化深さを測定した。

### (5) 塩分浸せき試験

JSCE-G 572<sup>6)</sup>に準拠し、材齢 28 日の供試体をφ100mm×200mmの上下50mmをカットし、側面と下面をエポキシ樹脂でコーティングし質量濃度10%の塩化ナトリウム水溶液に浸せきした。ここで、供試体の上面は打込み面側を意味しており、上面からの塩分浸透抵抗性を検討する。浸せき期間1年経過後、供試体を浸せき面に対して垂直に割裂させ、硝酸銀(1/10N)を吹き付け、浸透深さを測定した。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 力学特性

#### (1) 圧縮強度発現

図-2に各配合の圧縮強度発現性状を示す。図に示すように、フライアッシュ置換率が40%であっても、材齢1日でプレストレス導入可能強度(35N/mm<sup>2</sup>)<sup>7)</sup>を満足した。フライアッシュ40%置換において、廃瓦粗骨材の内部養生効果による強度増加が顕著であった。フライアッシュ0および20%置換については、廃瓦粗骨材の内部養生効果は十分にみられない。これは、蒸気養生中に廃瓦粗骨材の内部養生水が供給されてしまい、乾燥開始時において、廃瓦粗骨材内部に内部養生水が残存していなかったためと考えられる。水セメント比と水和反応速度の関係<sup>8)</sup>より、実水セメント比の大きいフライアッシュ40%置換においては、他と比べ水和反応速度が遅いため、内部養生水の供給が遅延されたと考えられる。

#### (2) 静弾性係数の経時変化

図-3に各試験材齢の静弾性係数を示す。フライアッシュおよび廃瓦粗骨材置換の有無にかかわらず、材齢の進行にともなう静弾性係数の増大がみられない。これは、蒸気養生によりセメントの水和反応が急激に促進され、材齢1日における水和度は大きい、コンクリートの内部構造が粗になるためと考えられる。

一方、破砕値の大きな廃瓦粗骨材の使用により静弾性係数の低下が生じると報告されている<sup>2)</sup>。フライアッシュ0および20%置換において、既往の研究と同様の傾向がみられるが、フライアッシュ40%置換においては、廃瓦粗骨材無置換に対して同等以上である。

#### (3) 圧縮強度と静弾性係数の関係

本研究における圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4に示す。圧縮強度に対する静弾性係数を検討するため、高強度コンクリートにおける圧縮強度と静弾性係

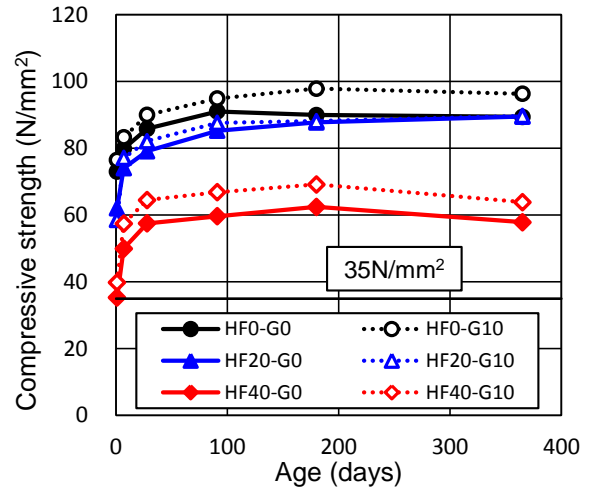


図-2 圧縮強度発現性状

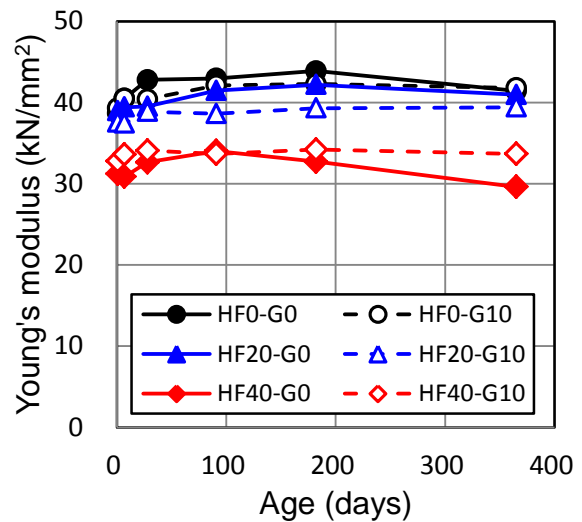


図-3 静弾性係数の経時変化

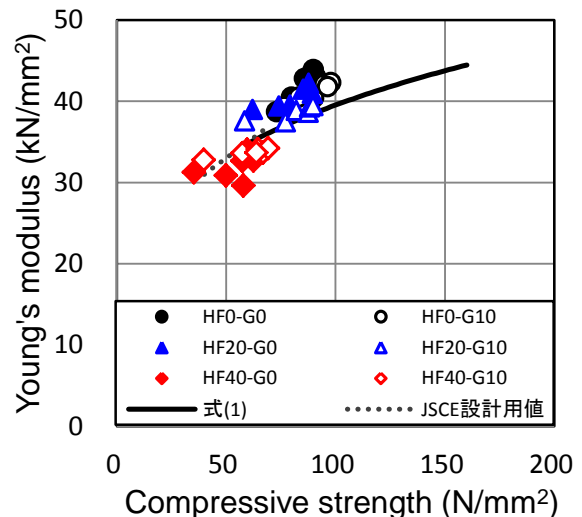


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

数の関係式(1)<sup>9)</sup>を用いる。

$$E_c = 12.5 \cdot f_c^{\frac{1}{4}} \quad (60 \leq f_c \leq 160 \text{ N/mm}^2) \quad (1)$$

ここで、 $E_c$ はコンクリートの静弾性係数、 $f_c$ はコンクリートの圧縮強度を表す。フライアッシュ0および20%置換においては式(1)に対して同等以上であるが、

フライアッシュ 40%置換においては廃瓦粗骨材の有無にかかわらず式(1)より小さい傾向がある。そこで、HF40-G0 および HF40-G10 の圧縮強度に適応可能な普通コンクリート( $40 \leq f'_c \leq 70 \text{ N/mm}^2$ )に対する土木学会の設計用値<sup>10)</sup>と比較する。フライアッシュ 40%置換した場合、圧縮強度に対して静弾性係数は小さく、土木学会の設計用値より小さい傾向がみられた。これは蒸気養生を行うことで、圧縮強度の伸び率に対し静弾性係数の伸び率は小さく、頭打ちが生じているためと考えられる。

#### (4) 長さ変化

図-5 に凝結開始時点からの長さ変化の経時変化を示す。ここで、初期膨張のピーク時を凝結開始時と定義した。フライアッシュ 40%置換の収縮は他に比べて小さいが、フライアッシュ 20%置換したものも含め、廃瓦粗骨材の有無にかかわらず乾燥開始後の収縮速度が大きい。蒸気養生後の乾燥が長さ変化に大きく影響していると考えられる。質量減少率の経時変化は図-6 に示すとおり、フライアッシュ置換率が大きくなるほど、材齢初期の水分逸散が大きく、各フライアッシュ置換率において、廃瓦粗骨材置換することによって、質量減少が大きい。これは、蒸気養生することにより、コンクリートがポーラスになるため水分逸散が大きくなり、結果として、水セメント比の大きいフライアッシュ 20 および 40%置換において質量減少が大きくなったと考えられる。

蒸気養生後の乾燥の影響を検討するため、長さ変化と質量減少率の関係を図-7 に示す。フライアッシュ 40%置換した場合、材齢初期において質量減少が大きい長さ変化は小さい。これは、材齢初期において、コンクリートに収縮を生じさせうると考えられる小さな空隙が少なく、比較的大きな空隙を有していたと考えられる。HF40-G0 および HF40-G10 は、材齢初期に同等量の水分が逸散しているが、HF40-G10 は廃瓦粗骨材に含まれる内部養生水を保有しているため、長期にかけて水分逸散が進行する。廃瓦粗骨材の内部養生効果によりコンクリートは緻密化されるが、水分逸散にともない乾燥収縮が増大したと考えられる。また、コンクリートの収縮が $-100\mu$  に達するとフライアッシュ置換にかかわらず長さ変化と質量減少率の関係は線形的になる傾向がみられた。

### 3.2 耐久性

#### (1) FAC の中性化抵抗性に対する廃瓦粗骨材の影響

促進中性化試験における中性化深さの変化を図-8 に示す。HF0-G0 および HF0-G10 は促進中性化期間が 26 週経過しても中性化深さが 0.05mm(ノギスの最小目盛り)以下であったため、十分な中性化抵抗性を有

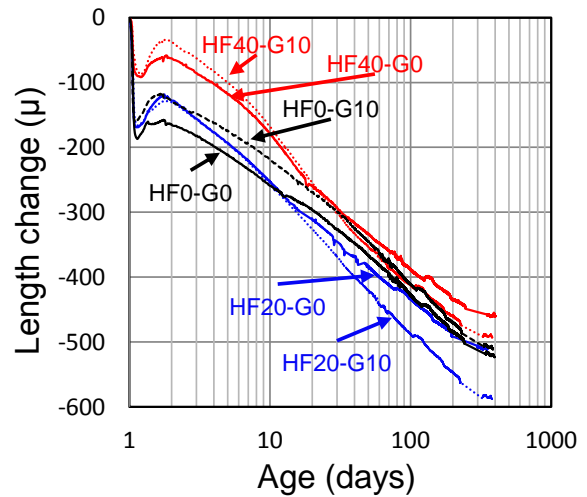


図-5 長さ変化の経時変化

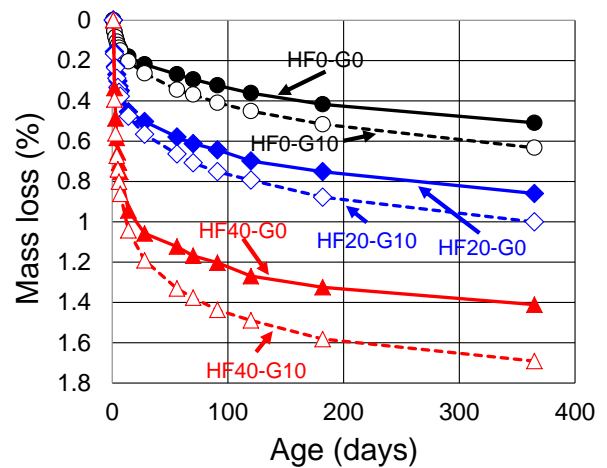


図-6 コンクリートの質量変化

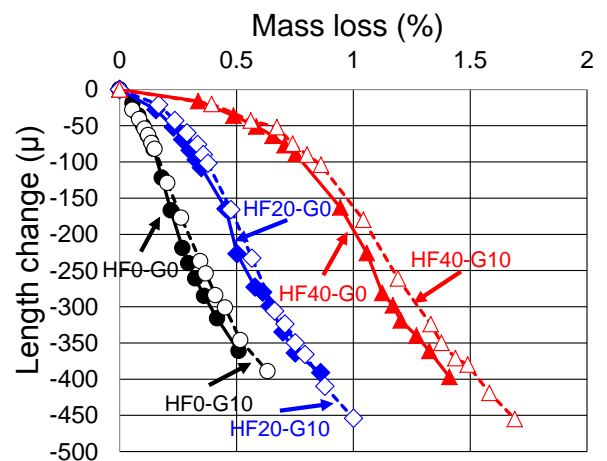


図-7 長さ変化と質量変化の関係

していると考えられる。以下、FAC の中性化抵抗性について検討する。FAC の促進中性化速度係数  $A_{ac}$  を表-3 に示す。フライアッシュ 40%置換において、HF40-G10 の促進中性化速度係数  $A_{ac}$  は HF40-G0 の促進中性化速度係数  $A_{ac}$  に比べて約 30%小さい。これは、廃瓦粗骨材の内部養生効果により FAC が緻密になり、

中性化抵抗性が向上したと考えられる。フライアッシュ 20%置換においては、廃瓦粗骨材置換することによる中性化抵抗性の向上はみられず、廃瓦粗骨材無置換に対して同等程度であった。

(2)中性化速度係数と有効水結合材比の関係

示方書において、コンクリートの中性化速度係数の設定は、コンクリートの有効水結合材から予測される。そこで、本研究においても中性化抵抗性に対する廃瓦粗骨材の内部養生効果の影響度を中性化速度係数と有効水結合材比の関係に着目して検討した。有効水結合材比  $W/B'$  とは、混和材の影響を考慮した水セメント比のことである。

$$W/B' = W/(C_p + k \cdot A_d) \quad (2)$$

ここで、 $W$  は単位体積あたりの水の質量、 $B'$  は単位体積あたりの有効結合材の質量、 $C_p$  は単位体積あたりのポルトランドセメントの質量、 $A_d$  は単位体積あたりの混和材の質量、 $k$  は混和材の種類により定まる定数であり、混和材に高炉スラグを用いる場合  $k=0.7$ 、フライアッシュを用いる場合  $k=0$  と定義されている<sup>11)</sup>。

一方、促進中性化速度係数  $A_{ac}$  は促進中性化二酸化炭素濃度(%)を用いて屋内自然曝露条件における中性化速度係数  $A_{na}$  への変換式が報告されており、これを式(3)<sup>12)</sup>に示す。

$$A_{na} = A_{ac}(2.804 - 0.847 \cdot \log C)/\sqrt{C} \quad (3)$$

ここで、 $C$  は二酸化炭素濃度(%)を表す。式(3)を用いて、変換した中性化速度係数  $A_{na}$  を同じく表-3 に示す。促進中性化速度係数  $A_{na}$  と有効水結合材比  $W/B'$  の関係を図-9 に示す。また、HF20-G0 と HF40-G0 における直線近似回帰式を図-9 に付記する。廃瓦粗骨材を用いない場合、中性化速度係数と有効水結合材比  $W/B'$  は線形関係にあることが確認された。しかし、HF40-G10 はこの近似直線から乖離している。これは、HF40-G10 の中性化抵抗性が廃瓦粗骨材の内部養生効果により向上しているためと考えられ、HF40-G10 の  $W/B'$  が 0.5 より小さいことを示唆している。そこで、求めた近似式を用いて HF40-G10 の中性化速度係数  $A_{na}$  から有効水結合材比  $W/B'$  を算出した。算出した結果、 $W/B'=0.42$  となり、HF40-G10 は  $W/B'=0.40$  程度の中性化抵抗性を有していることが明らかとなった。ここで、水セメント比を 40%とし、廃瓦粗骨材およびフライアッシュを混和していない配合 (WC40) と HF40-G10 の促進中性化試験開始時である材齢 91 日の圧縮強度を図-10 に示す。これにより、HF40-G10 は廃瓦粗骨材の内部養生効果によりコンクリートが緻密化し、中性化抵抗性および圧縮強度ともに性能向上が確認された。

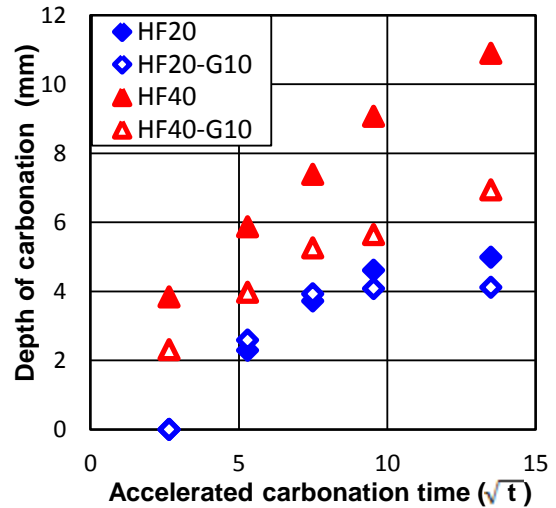


図-8 促進中性化深さの経時変化

表-3 FAC の中性化速度係数

配合	$A_{ac}$ (mm/ $\sqrt{\text{week}}$ )	$A_{na}$ (mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )
HF20-G0	0.416	0.607
HF20-G10	0.378	0.552
HF40-G0	0.907	1.322
HF40-G10	0.588	0.857

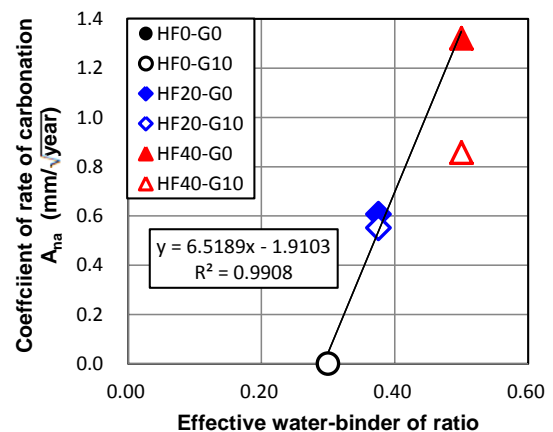


図-9 中性化速度係数と有効水結合材比の関係

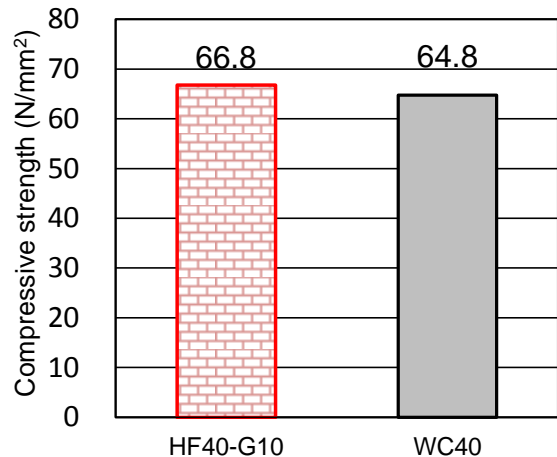


図-10 圧縮強度の整合性

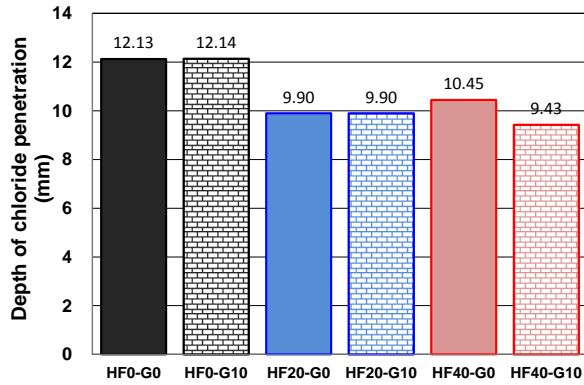


図-11 塩分浸透深さ

### (3) 塩分浸透抵抗性

浸せき期間を1年とした各配合の塩分浸透深さを図-11に示す。塩分浸透深さは、フライアッシュ置換することによりフライアッシュ無置換に比べ小さくなっている。フライアッシュ0および20%置換において、廃瓦粗骨材置換による浸透深さの低減は認められなかったが、フライアッシュ40%置換においては、廃瓦粗骨材置換により浸透深さが小さくなっている。これは、中性化抵抗性と同様に廃瓦粗骨材の内部養生効果により内部構造が緻密化され、塩分浸透抵抗性が向上したと考えられる。

### 4. まとめ

蒸気養生した高強度フライアッシュコンクリートにおける内部養生効果の影響を力学特性として圧縮強度、静弾性係数および長さ変化、耐久性として中性化抵抗性および塩分浸透性を実験的に検討した。本研究の範囲内で明らかになった事項をまとめると以下のとおりである。

- (1) 蒸気養生することでフライアッシュ置換率が40%であっても、材齢1日でプレストレス導入に必要な圧縮強度(35N/mm<sup>2</sup>)を満足した。さらに、フライアッシュ置換率が40%の場合、廃瓦粗骨材の内部養生効果による圧縮強度の増大が確認された。
- (2) フライアッシュ置換率が0および20%の場合、廃瓦粗骨材を用いることにより静弾性係数が低下した。しかし、フライアッシュ40%置換した場合には静弾性係数の低下はみられなかった。
- (3) フライアッシュを40%置換することで、収縮が低減されたが、乾燥開始後の収縮速度が大きくなった。また、フライアッシュ無置換において、廃瓦粗骨材の内部養生効果により収縮低減された。
- (4) フライアッシュ40%置換において、廃瓦内部養生効果により中性化抵抗性が向上し、これは

W/C=0.40に相当するコンクリート性能であった。

- (5) フライアッシュを用いることで、塩分浸透抵抗性が向上した。また、フライアッシュ40%置換した場合において、廃瓦粗骨材の内部養生効果により塩分浸透抵抗性の向上が確認された。

### 参考文献

- 1) 土木学会：環境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－利用拡大に向けた設計施工指針試案－，pp.39-383，2009.12
- 2) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[施工編]，pp.374-378，2012.3
- 3) 俵道和，呉承寧，石川嘉崇，滝上邦彦：プレストレス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.197-202，2011.7
- 4) 鈴木雅博，丸山一平，川畑智亮，佐藤良一：廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの変形と拘束応力に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.651-656，2007.7
- 5) 温品達也，清木祥平，中川信矢，佐藤良一：廃瓦の内部養生によるフライアッシュ混入コンクリートの性能向上に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.241-246，2009.7
- 6) 土木学会：2010年制定コンクリート標準示方書[規準編]，土木学会基準および関連基準，pp.319-323，2010.3
- 7) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[施工編]，pp.314-315，2012.3
- 8) 後藤孝治，魚本健人：セメントの水和反応に及ぼす細孔構造の影響に関する一考察，クリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.743-746，1995.6
- 9) プレストレストコンクリート技術協会：高強度コンクリートを用いたPC構造物の設計施工基準，pp.28-29，2008.10
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，pp.39，2012.3
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，pp.147-148，2012.3
- 12) 魚本健人，高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす要因，土木学会論文集，No.451，V-17，pp.119-128，1992.8