

蒸気養生および内部養生したコンクリートの性能に対するフライアッシュの貢献度評価

広島大学 学生会員 ○藤本 洋平
 広島大学 正会員 小川 由布子
 広島大学 フェロー会員 河合 研至

1. はじめに

石炭火力発電の副産物であるフライアッシュ (FA) をセメント置換したコンクリートは、初期強度の低下や品質が不安定等の理由から、使用率は未だ低いのが現状である。フライアッシュコンクリート (FAC) の初期強度改善方法として蒸気養生が挙げられ、初期強度の向上だけでなく、乾燥収縮の抑制や塩分浸透抵抗性の向上効果などが報告されている¹⁾。また、適度な吸水率を有した軽量骨材を使用した内部養生も強度発現の促進が期待される。内部養生材としては、規格外瓦を破砕した廃瓦骨材が検討されており、FAC の強度増進や細孔構造の緻密化、自己収縮低減などの効果が報告されている²⁾。このように、内部養生は蒸気養生した FAC の性能を向上させると報告されているが、FA の結合材としての性能に寄与しているかは明らかになっていない。また、コンクリートの性能に関する FA の貢献度はセメント有効係数 k (以下、k 値) で評価できる。そこで本研究では、蒸気養生した FAC の強度発現性や物質移動抵抗性に対する FA の貢献度を k 値によって評価し、廃瓦細骨材の内部養生が FA の反応やコンクリートの各種物性への FA の貢献度に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2. 1. 供試体概要および養生条件

本検討における使用材料の物理特性を表 1 に示す。セメントは早強ポルトランドセメント、FA は JIS A 6201 の II 種に相当するもの、細骨材は石英斑岩砕砂および島根県江津産石州瓦の規格外品を破砕した廃瓦細骨材 (PCFA)、粗骨材は石英斑岩砕石を使用した。廃瓦細骨材は表乾状態にする前に 7 日間以上吸水処理を施した。

本検討の配合を表 2 に示す。単位水量は 170kg/m³、水結合材比は 40%とした。FA 置換率は 0 および 20mass% (F0, F20)、廃瓦細骨材置換率は 0 および 20vol% (S0, S20) とした。また k 値を算出するため、FA 無混和のコンクリートについては水セメント比を 30%および 50%とした配合も準備した。目標フレッシュ性状は、空気量を 5.0±0.5%、スランプ値を 14±2cm とし、混和剤を用いて調整した。上記の配合条件でφ100×200mm の円柱供試体および 100×100×400mm の角柱供試体をそれぞれ作製した。

打設後は、蒸気養生を 24 時間施し、脱枠後は気中養生とした。蒸気養生は、3 時間 20℃の前養生後、蒸気を供給しながら 10℃/h で 50℃まで昇温した。昇温後 50℃で 5 時間保温および蒸気供給を行い、その後蒸気供給を停止し、5℃/h で 20℃まで降温した。すべての供試体は打設後 24 時間経過後に脱枠し、室温 20℃±2.0℃、60±5.0%RH の室内に静置した。また、脱枠直後に角柱供試体の打込み面に対して 100×400mm の側面の一面

表 1 使用材料の物理特性

使用材料	種類	物性
練混ぜ水	水道水	密度 1.00g/cm ³
セメント	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4,230cm ² /g
FA	JIS A 6201 II 種	密度 2.22g/cm ³ , 比表面積 2,750cm ² /g
細骨材	石英斑岩砕砂 (黒瀬産)	表乾密度 2.61 g/cm ³ , 吸水率 1.05%, 粗粒率 2.61
	廃瓦細骨材 (江津産)	表乾密度 2.25 g/cm ³ , 吸水率 9.34%, 粗粒率 3.93
粗骨材	石英斑岩砕石 2010 (黒瀬産)	表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 0.68%, 粗粒率 7.06
	石英斑岩砕石 1505 (黒瀬産)	表乾密度 2.61 g/cm ³ , 吸水率 0.67%, 粗粒率 6.32
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物, 密度 1.02~1.10g/cm ³
	AE 剤	特殊アニオン界面活性剤, 密度 1.02~1.06g/cm ³ 高級脂肪酸系界面活性剤, 密度 1.00~1.04g/cm ³

表 2 コンクリートの配合

配合名	W/B (B/W)	単位量 (kg/m ³)						
		W	C	F	S	PCFA	G2010	G1505
F20S0	0.40	170	340	85	764	0	490	401
F20S20					611	132		
F0S0 (0.4)	(2.50)	170	425	0	749	0	515	421
F0S20 (0.4)					599	129		
F0S0 (0.3)	0.30	170	567	0	696	0	479	392
F0S20 (0.3)					557	120		
F0S0 (0.5)	0.50	170	340	0	780	0	536	439
F0S20 (0.5)					624	135		

キーワード 蒸気養生, 内部養生, 廃瓦細骨材, k 値, 圧縮強度, 物質移動抵抗性

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院先進理工系科学研究科 構造材料工学研究室

TEL082-424-7786

を暴露面として、暴露面以外をアルミ粘着テープで被覆した。

2. 2. 検討項目および試験方法

検討項目は、圧縮強度、中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性とした。圧縮強度試験は、円柱供試体を用いて JIS A 1108 に準拠して行った。測定材齢は 1, 7, 28 および 91 日とした。促進中性化試験は、角柱供試体を用いて JIS A 1153 に準拠し材齢 35 日目に開始した。試験は槽内温度 $20 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 5.0\% \text{RH}$ 、 CO_2 濃度 $5.0 \pm 0.2\%$ の環境下で行い、測定材齢は中性化開始後 0, 7, 28 および 56 日とした。測定日に供試体を割裂し、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した。その後中性化深さを基に、中性化速度係数は \sqrt{t} 則 (式(1)) に従うものとして、中性化速度係数を算出した。

$$Y = \alpha\sqrt{t} \quad (1) \quad \text{ここで, } Y: \text{中性化深さ (mm), } \alpha: \text{中性化速度係数 (mm}/\sqrt{\text{weeks}),} \\ t: \text{促進中性化期間 (weeks)}$$

塩分浸漬試験は、角柱供試体を用いて材齢 28 日目に開始した。試験の前準備として、気中養生の角柱供試体に暴露面以外をエポキシ樹脂塗料で被覆し、エポキシ乾燥後 1 日間吸水処理を施した。試験は NaCl 濃度 10% の塩水に供試体を浸漬し、測定材齢は浸漬開始後 56 日とした。測定日に供試体を割裂し、割裂面に硝酸銀溶液を噴霧して塩分浸透深さを測定した。

2. 3. セメント有効係数

試験結果を基に、各種性能に基づく k 値を算出した。 k 値は任意の置換率や養生条件における、FA の結合材としての性能を、ポルトランドセメントの性能に対する比で表したものである³⁾。

圧縮強度に基づく k 値は、コンクリートの圧縮強度がセメント水比に支配されることから、FAC の結合材水比 $(C+F)/W$ を $(C+k \cdot F)/W$ とおくことで、以下の手順で算出される。はじめに、 $(C+k \cdot F)/W$ と同等の強度を有する FA 無混和コンクリートのセメント水比を等価セメント水比 $(C/W)_{eq.}$ として式(2)のように置く。

$$\frac{C + k \cdot F}{W} = \left(\frac{C}{W}\right)_{eq.} \quad (2)$$

ここで、 W : 単位水量 (kg/m^3)

C : 単位セメント量 (kg/m^3)

F : 単位フライアッシュ量 (kg/m^3)

$(C/W)_{eq.}$: 等価セメント水比

この等価セメント水比は、図 1 のように圧縮強度とセメント水比の関係を一近似的により定式化し、近似式に FA 混和した場合の圧縮強度を代入することで算出できる。FA 混和率 r を式(3)のように表し、等価セメント水比を用いて、圧縮強度に基づく k 値が式(4)から算出される。

$$r = \frac{F}{C + F} \quad (3)$$

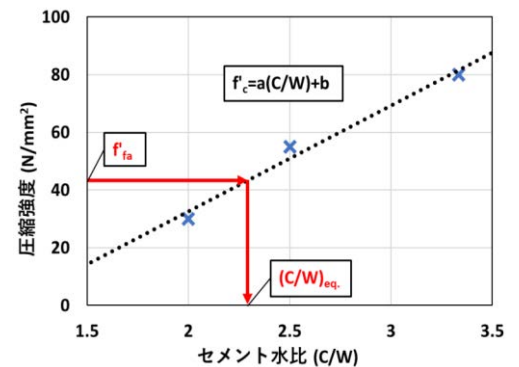


図 1 圧縮強度とセメント水比の関係

$$k = \left\{ \frac{(C/W)_{eq.}}{(C/W)} \right\} \cdot \left(\frac{1-r}{r} \right) \quad (4)$$

また、中性化抵抗性および塩分浸透抵抗性に基づく k 値は、中性化速度係数および塩分浸透深さと水セメント比の関係から、等価水セメント比 $(W/C)_{eq.}$ を求め、以下の式(5)、(6)と式(3)を用いて圧縮強度と同様の手順で算出できる。

$$\frac{W}{C + k \cdot F} = \left(\frac{W}{C}\right)_{eq.} \quad (5) \quad k = \left\{ \frac{(W/C)}{(W/C)_{eq.}} \right\} \cdot \left(\frac{1-r}{r} \right) \quad (6)$$

3. 実験結果および考察

蒸気養生を施した FAC の圧縮強度は、廃瓦置換の有無で大きな差がなく、廃瓦の内部養生効果は確認されなかった。これは、FA 混和配合の実水セメント比が 50% であるためにセメントに対して水分が多いことや FA のポズラン反応が穏やかな初期材齢時では、組織が粗大であったために水分が逸散したことなどにより、内部

養生効果が十分に得られなかったためと考えられる。図2に圧縮強度に関するk値を示す。材齢91日において、廃瓦置換した場合のk値が0.53であり、無置換のものよりも低くなった。FA無混和のコンクリートの圧縮強度が廃瓦置換により高くなっていることを考慮すると、廃瓦細骨材の内部養生がセメントの水和反応の促進に寄与し、相対的にFAの貢献度が低くなったといえる。

蒸気養生を施したFACの中性化抵抗性は、FAの有無に関わらず廃瓦置換により向上したが、FA混和することにより低下した。これは、廃瓦の内部養生によってセメントの反応が促進され、CH生成量の増加や組織が緻密化したためと考えられる。図3に中性化速度係数に基づくk値を示す。廃瓦置換した場合のk値が0.26となり、無置換のものよりも低くなった。圧縮強度と同じく、廃瓦細骨材の内部養生がセメントの水和反応の促進に寄与し、相対的にFAの貢献度が低くなったといえる。

蒸気養生を施したFACの塩分浸透深さは、廃瓦置換の有無で大きな差がなく、廃瓦の内部養生効果は確認されなかった。この結果は、廃瓦粗骨材を使用した場合の村岸らの研究⁴⁾と同様の傾向である。図4に塩分浸透深さに基づくk値を示す。廃瓦置換した場合のk値が0.27となり、無置換のものよりも低くなった。また、FA無混和のコンクリートの塩分浸透深さは廃瓦置換により低減されていることも考慮すると、内部養生がセメントの水和反応の促進に寄与し、FA20%混和において廃瓦の内部養生効果が十分に得られなかったために、相対的にFAの貢献度が低くなったといえる。

4. 結論

- (1) 蒸気養生したフライアッシュコンクリートの圧縮強度は、廃瓦置換の有無による大きな差はみられず、廃瓦置換した場合のk値は材齢91日において0.53となり、無置換のものよりも低くなった。
- (2) 中性化抵抗性は、廃瓦置換により向上したが、廃瓦置換した場合のk値は促進中性化8週時点において0.26となり、無置換の場合よりも低くなった。
- (3) 塩分浸透抵抗性は、廃瓦置換の有無で大きな差がみられず、廃瓦置換した場合のk値は0.27となり、無置換のものよりも低くなった。
- (4) 蒸気養生したコンクリートの性能に対するFAの貢献度は廃瓦置換により小さくなる傾向にあり、内部養生効果はFAよりセメントの反応促進に寄与している可能性が高いことが示唆された。

参考文献

- 1) Kou, Shi C., Chi S. Poon. and Dixon Chan.: Properties of steam cured recycled aggregate fly ash concrete, INTERNATIONAL CENTER FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING (CIMNE), pp.590-599, 2004.
- 2) 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.
- 3) Smith, Iain A.: The Design of Fly-Ash concretes, Proceedings of the institution of civil engineers, Vol.36, No.4, pp.769-790, 1967.
- 4) 村岸祐輔, 小川由布子, 河合研至, 佐藤良一: 蒸気養生したフライアッシュコンクリートの耐久性に対する廃瓦粗骨材の内部養生効果, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, No.1, pp337-344, 2014.

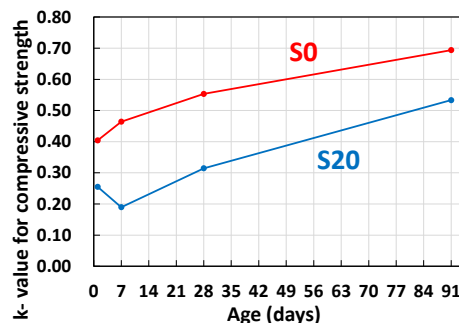


図2 圧縮強度に基づくk値

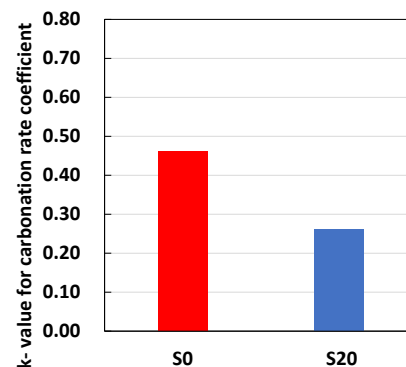


図3 中性化速度係数に基づくk値

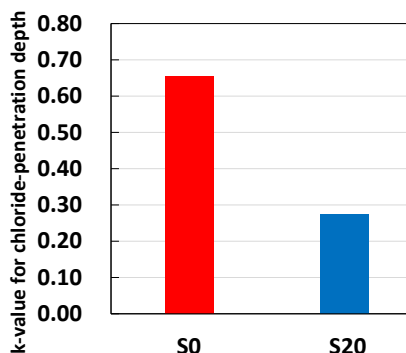


図4 塩分浸透深さに基づくk値