

廃瓦骨材を用いた高炉 B 種コンクリートの破壊エネルギー特性の検討

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○MACHARIA MARTIN MWANGI
 広島大学大学院工学研究科 学生会員 重松 明
 広島大学大学院工学研究科 大西 裕士
 広島大学大学院工学研究科 フェロー会員 佐藤良一

1. 背景・目的

建築リサイクル法やグリーン購入法が制定され、環境負荷低減が重要視されるようになり、高炉 B 種セメントを用いたコンクリート(BB)は活用が進み、実構造物に広く使用されている。BB の強度発現は、特に初期材齢における湿潤養生の良否が硬化後のコンクリートの品質に大きな影響を及ぼす。初期に乾燥を受けると、強度発現が低下するとともに耐久性の低下なども起こりうるとされている。

それに対し既往の研究^{1),2)}において、早期脱枠を想定した BB に適度な吸水率と高い強度を持つ廃瓦骨材を内部養生材として用い、圧縮強度、細孔径分布、長さ変化などに関わる性能の向上について実験的に検討された。その結果、初期強度の改善や細孔径空隙の緻密化が認められた。

一方、三谷ら³⁾は、廃瓦粗骨材を高強度コンクリートに用いた場合の破壊エネルギー特性について、廃瓦粗骨材の破砕値が大きいことから、破壊エネルギーが低下し、結果的に斜めひび割れ発生強度の低下をもたらすと報告している。

これらを踏まえて、本研究においては、廃瓦を粗骨材および細骨材として置換した BB（水セメント比=0.5）の破壊エネルギー特性の検討を行う。廃瓦置換率および骨材サイズの変化に伴う破壊エネルギー特性を調べ、最適置換率を評価することを目的とする。検討項目は、材齢 28 日の破壊エネルギー、圧縮強度発現、引張強度発現などとする。

2. 実験概要

使用材料は表-1 に示す。高炉スラグ 40～45%置換のブレミックスセメントである高炉 B 種を使用する。細骨材は中国地方のコンクリートで石灰石砕砂と砕砂を混ぜた混合砂が広く利用されているため、本研究でもその配合を取り入れた。廃瓦粗細骨材は 7 日間吸水させたものを表乾状態で使用した。高炉スラグを使ったコンクリートは練混ぜ温度が強度発現に影響を与えるため、使用材料は打設 2 日前に養生室(20℃, 湿度 60%)で保管し材料温度を一定に保った。

廃瓦粗骨材の置換率は 10, 20, 30, 40%とする。廃瓦細骨材の置換率は粗骨材との比較のため、各内部養生水総量に合わせて算定した。配合表は以下の表 - 2 に示す。高炉 B 種コンクリートを BB とし、G10 および S12 は粗骨材および細骨材に対する廃瓦の置換率を示し、他も同様である。また、廃瓦粗骨材を PCCA、廃瓦細骨材を PCFA と表記する。養生条件は封緘および早期脱枠を想定した材齢 3 日気中曝露である。

表 - 1 使用材料

使用材料	種類	性質	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16 g /cm ³	NC
	高炉セメントB種	密度3.02 g /cm ³	BB
細骨材	石英斑岩砕砂（広島県東広島市黒瀬町産）	表乾密度2.60 g /cm ³ 、吸水率1.06%	S
	石灰砕砂（戸高鉱山産）	表乾密度2.65 g /cm ³ 、吸水率1.22%	LS
	廃瓦細骨材（江津産）	表乾密度2.29 g /cm ³ 、吸水率9.5%	PCFA
			G
粗骨材	石英斑岩砕石（広島県東広島市黒瀬町産）	表乾密度2.62 g /cm ³ 、吸水率0.69%	G
	廃瓦粗骨材（江津産）	表乾密度2.26 g /cm ³ 、吸水率9.0%	PCFA
混和剤	AE剤	ポリアルキレングリコール誘導体	混和剤
	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体	

測定項目は、材齢 28 日の圧縮、割裂引張強度、ヤング係数、破壊エネルギーおよび特性長さである。圧縮強度は、養生条件ごとに材齢 3・7・28・91 日で測定し、圧縮強度—有効材齢⁴⁾の関係における実測値を放物線で回帰して求めた。

2.1 破壊エネルギー試験概要

破壊エネルギー試験は、日本コンクリート工学協会の試験方法⁵⁾に準拠し、試験体中央に幅 4mm、深さ 50mm の切欠きを設ける。載荷は、荷重の降下域の変形を測定するため、容量 100kN の変位制御型試験機を用いる。試験体のスパンは 300mm とし、両支点はローラを配置して水平方向に可動な構造とする。計測項目は、荷重、ひび割れ開口変位(CMOD)、載荷点の鉛直変位である。CMOD は試験体底面の切欠き部中央で、鉛直変位は試験体底面の切欠きを挟んだ 2 点で、クリップゲージ(感度：1/1000mm)により計測する。

表 - 2 配合表

配合記号	W/(C+BB)	空気量(%)	s/a	単位量(kg/m ³)						
				W	C	BB	S	LS	PCFA	G
NC					330	-	481	327		988
BB										-
BB-G10	0.5	4.5	0.45	165	-	330	475	323	-	889
BB-G20										85
BB-G30										170
BB-G40										256
BB-S12							420	285	81	593
BB-S23							365	248	161	341
BB-S35							310	211	242	
BB-S46							255	173	323	

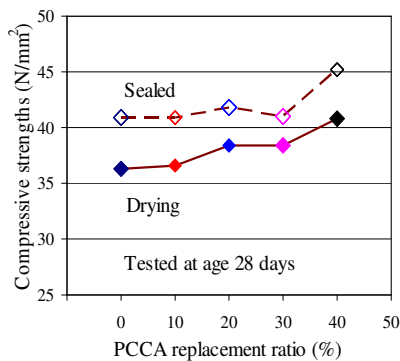


図-1 材齢 28 日における圧縮強度と PCCA 置換率の関係

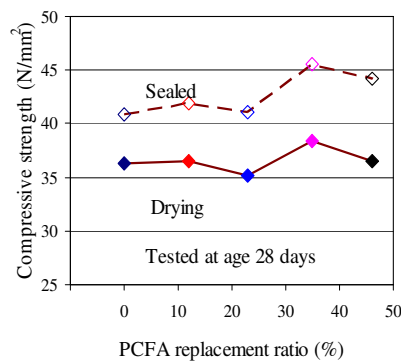


図-2 材齢 28 日における圧縮強度と PCFA 置換率の関係

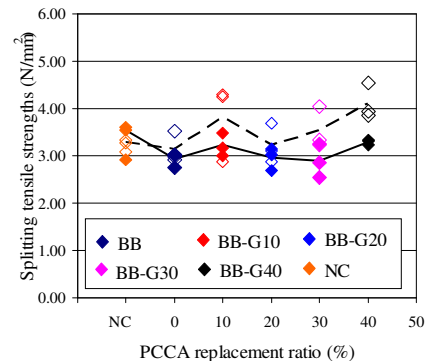


図-3 材齢 28 日における割裂引張強度と PCCA の関係

2.2 破壊エネルギー試験の評価方法

コンクリートの破壊エネルギーは、以下の算定式(1)から求めた⁶⁾。

$$G_f = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (1)$$

ここで、 W_0 ：試験体が破断するまでの荷重-CMOD 曲線下の面積[N・mm]、 W_1 ：試験体の自重及び載荷治具がなす仕事[N・mm]、 A_{lig} ：リガメントの面積[mm²]

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度と廃瓦置換率の関係

図-1・2 に材齢 28 日における各配合・養生条件の圧縮強度と廃瓦骨材(PCA)置換率の関係を示す。この図より、PCA 置換率の増加に伴い養生条件を問わず圧縮強度は無置換の BB に比べて同等かそれ以上であることがわかる。これは PCA の内部養生効果によるものだと考えられる。

3.2 割裂引張強度と廃瓦置換率の関係

図-3 及び図-4 に材齢 28 日における各配合・養生条件の

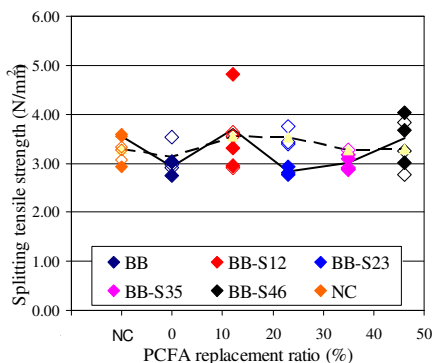


図-4 材齢 28 日における割裂引張強度と PCFA の関係

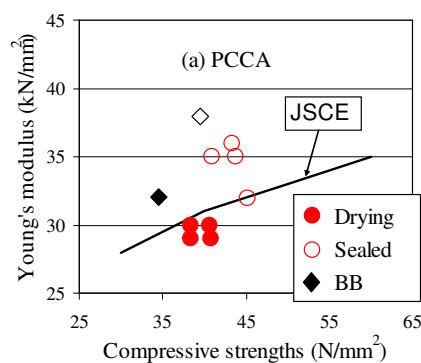


図-5 PCCA の場合のヤング係数と圧縮強度の関係

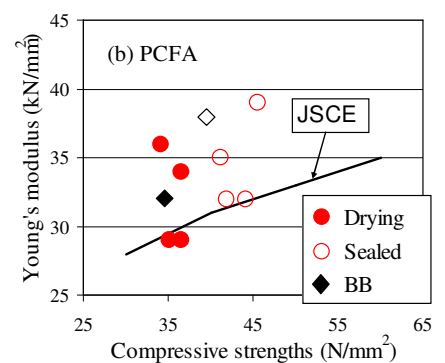


図-6 PCFA の場合のヤング係数と圧縮強度の関係

割裂引張強度及び PCA 置換率の関係を示す。図中の実線は材齢 3 日気中曝露の割裂引張強度の平均値を示し、破線は封緘の平均値を示す。図-3・4 より、PCA 置換率の増加は割裂引張強度にさほどの影響がなく、BB に比べてほぼ同等の値が得られていることがわかる。これも PCA の内部養生効果によるものだと考えられる。

3.3 ヤング係数と圧縮強度の関係

図-5 には PCCA の場合のヤング係数と圧縮強度の関係を示す。また、図-6 には PCFA の場合のヤング係数と圧縮強度の関係を示す。図-5 より、養生条件を問わず、PCCA を用いたコンクリートのヤング係数は BB に比べて低いことがわかる。これは PCCA の多孔性質によるものだと考えられる。図-6 より、PCFA を置換することによるヤング係数へも影響が見られなかった。

3.4 破壊エネルギー特性

表-3 に材齢 28 日における破壊エネルギーの平均をした値である。

図-7 には材齢 28 における破壊エネルギーと PCCA 置換率の関係を示す。また、図中に NC の破壊エネルギーの値も示す

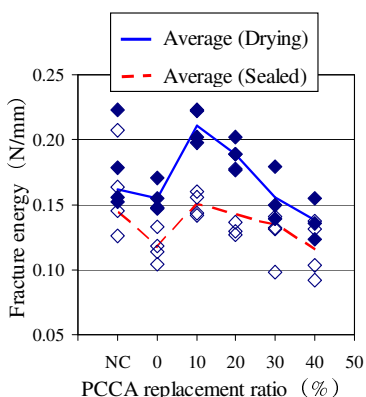


図-7 材齢 28 日における破壊エネルギーと PCCA 置換率の関係

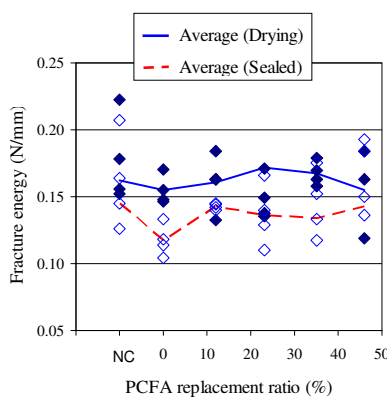


図-8 材齢 28 日における破壊エネルギーと PCFA 置換率の関係

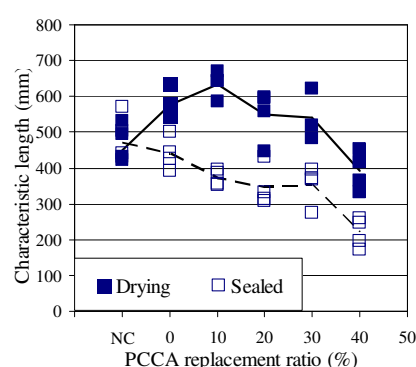


図-9 材齢 28 日における特性長さとして PCCA 置換率の関係

図-7 より、PCCA を用いた BB の破壊エネルギーは BB に比べて、養生条件によらず置換率 10%まで増加し、その後は置換率の増加に伴い減少していく傾向が見られた。この増加は、PCCA の内部養生効果によるものだと考えられる。PCCA 置換率の増加に伴う破壊エネルギーの低下は PCCA の大きい破砕値の影響によるものだと考えられる。図-8 に材齢 28 日における破壊エネルギーと PCFA 置換率の関係を示す。

また、図中に NC の破壊エネルギーの値を示す。図-8 より、早期乾燥条件では PCFA 置換率の増加に伴う破壊エネルギーの変化がほとんどなかったことがわかる。封緘の場合、PCFA を用いた BB の破壊エネルギーは BB に比べて微増し、その後の増加はほとんど見られなかった。このことから、PCFA による破壊エネルギーへの負の影響が認められなかった。

図-7 および図-8 にみられるように、封緘養生した供試体の破壊エネルギーは早期乾燥条件より小さい（最大で 40%の低下）ことがわかる。封緘養生では供試体をアルミ粘着テープで密閉にし、水分の吸湿や排出がないと考えられるので、十分に水和反応を促進させることができ、破壊エネルギーは早期乾燥条件の材齢 3 日気中曝露をした供試体より大きくなることが予想できる。ここで見られる低下の原因はまだ明確ではないが、ひとつ考えられる理由は、乾燥条件下でのセメントペーストの収縮によって、骨材周囲の遷移帯での垂直抗力が大きくなって、

3.5 特性長さ

図-9 には材齢 28 日における破壊エネルギーと PCCA 置換率の関係。また、図-10 には材齢 28 日における特性長さと PCFA 置換率の関係。図中の実線は材齢 3 日気中曝露をした供試体の特性長さの平均値を示す。破線は封緘の場合の平均値を示す。図-9 より、材齢 3 日気中曝露の PCCA を用いた BB の特性長さは PCCA 置換率 10%まで

摩擦力が大きくなるので、ひび割れ発生に必要なエネルギーが大きくなる。これについての信頼性は今後詳細な検討を行う予定である。

また、ひび割れ進展エネルギーはコンクリートの含水率が高いほど、減少すると報告されている⁵⁾。封緘養生は乾燥条件下に比べて内部に含まれている水分が多いためひび割れ進展エネルギーが低下するので破壊エネルギーが結果的に低下すると考えられるが、これも憶測の域をでない。

表-3 材齢 28 日における破壊エネルギーの値

配合	破壊エネルギー	
	3日気中曝露	封緘
NC	0.162	0.145
BB	0.155	0.117
BB-G10	0.211	0.150
BB-G20	0.189	0.143
BB-G30	0.156	0.135
BB-G40	0.138	0.116
BB-S12	0.161	0.143
BB-S23	0.172	0.136
BB-S35	0.167	0.134
BB-S46	0.155	0.143

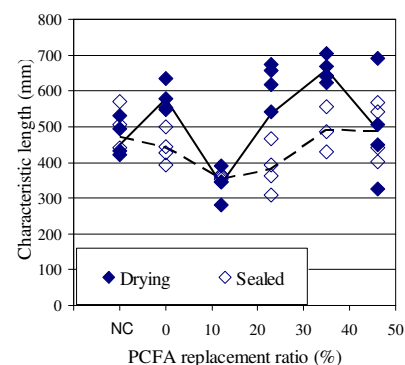


図-10 材齢 28 日における特性長さと PCFA 置換率の関係

増加し、その後は置換率の増加に伴い減少する傾向が見られた。また、同図より封緘の場合は特性長さが減少する一方であることがわかる。特性長さは脆性度な破壊を生じる材料ほど小さくなり、通常のコンクリートでは、200～400mm 程度である(6)。材齢 3 日気中曝露の場合の BB-G10 の特性長さが大きく得られているのは PCCA の内部養生効果によるものだと考えられる。PCCA 置換率の増加に伴う特性長さの低下は PCCA の大きい破砕値によるものだと

考えられる。

図-10 より、特性長さは BB-S12 の時に最も低く、その後は BB-S35 まで増加することがわかる。全体的の値は通常のコンクリートの値の範囲内に入っているかそれ以上であることがわかる。このことから、PCFA を用いることによるコンクリートの脆性度への影響はさほどなかったことが言える。

4. 結論

廃瓦骨材置換による材齢 28 日における強度への影響はさほどなく、同等以上であった。養生条件を問わず、廃瓦粗骨材を置換することによるヤング係数の低下が確認され、廃瓦細骨材による影響はさほどなかった。

廃瓦粗骨材の内部養生効果による破壊エネルギーの増加及び大きい破砕値による低下の関係が明らかとなった。また、廃瓦細骨材置換により破壊エネルギーに影響が殆ど無く無置換に比べて同程度の値が得られた。早期乾燥条件の破壊エネルギーは封緘養生の破壊エネルギーに比べて大きかったことが認められた。廃瓦粗骨材置換率は 10%の方が、20%よりも破壊エネルギー増化が見られ、効果的であると考えられる。

5. 参考文献

- 1) 重松明；廃瓦粗骨材の内部養生による高炉 B 種コンクリートの性能向上について，広島大学卒業論文
- 2) 大西裕士；廃瓦細骨材の内部養生による高炉 B 種コンクリートの性能向上に関する検討，広島大学卒業論文
- 3) 三谷昂大，大賀琢麻，佐藤良一；超高強度 RC はりの斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮と寸法効果の評価について 広島大学卒業論文
- 4) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp.47-51
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，2001
- 6) 尾上幸造，松下博通：液体浸漬によるコンクリートの静的圧縮強度低下に関するエネルギー的考察 土木学会論文集 E Vol. 64 No. 4, 515－525, 2008.
- 7) Petersson, P.E.: Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials, Report TVBM-1001, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1981.