

廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの破壊エネルギーに関する研究

広島大学大学院	学生会員	○三谷 昂大
広島大学大学院	学生会員	大賀 琢麻
広島大学大学院	学生会員	加藤 昂樹
国土交通省	非会員	丹後 浩一
広島大学大学院	フェロー会員	佐藤 良一

1. はじめに

近年の技術進歩により、圧縮強度 150N/mm^2 クラスの構造物の構築も可能となってきている。しかし、超高強度コンクリート(以下 UHSC と示す)は自己収縮ひずみが大きくなることが知られており、コンクリートが鉄筋の拘束などを受けた場合にひび割れの発生リスクが高い。また、自己収縮ひずみによりせん断強度が低下することも明らかとなっており、せん断強度 τ_c と引張強度 f_t の比 τ_c/f_t と、有効高さ d と Hillerborg らにより提案されている特性長さ $l_{ch}^{1)}$ の比 d/l_{ch} は高い相関が示されている²⁾。すなわち、せん断強度の寸法効果の評価における破壊力学の適用は有効であり、粗骨材強度など材料の影響を大きく受ける UHSC において、その材料特性を把握することは大きな意味を持つ。一方、UHSC の内部養生材として、吸水率が高く、かつ、破砕値が市販の軽量骨材と比較して小さい廃瓦粗骨材を用いた研究が近年行われており、高い収縮低減効果を発揮することが明らかになっている³⁾。そこで本研究では、粗骨材全容積を廃瓦粗骨材で 20%容積置換した UHSC を用いて破壊エネルギー試験を行い、廃瓦粗骨材を用いた場合の破壊エネルギーの特性を把握することを目的とする。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

本研究で用いたコンクリート配合を表-1 に、使用材料を表-2 示す。水結合材比 $W/B=0.15$ とし、セメントは実構造物を想定した早強セメントと低熱セメントを使用した。また、低収縮化のために、膨張材と収縮低減剤を併用し、さらにセルフキュアリング法を適用するために粗骨材全容積を廃瓦粗骨材で 20%容積置換した。なお、廃瓦粗骨材の置換率は、収縮低減率、材料強度の観点から現段階で最適な置換率である文献³⁾を元に決定した。自己収縮の大きい UHSC(配合名：HSF)と、廃瓦および膨張材、収縮低減剤によって収縮を低減した UHSC(配合名：G20-EX-R)について、それぞれ 10 体ずつ試験体を作製した。養生条件は、材齢 1 日で脱枠し、その後乾燥暴露した。

2. 2 破壊エネルギー試験方法

破壊エネルギーの測定は、日本コンクリート工学協会が提案している「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案)」⁴⁾に準拠して行った。

2. 2. 1 試験体

試験体寸法は試験法案の規定(図 1)に準拠し、 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ とし、試験体中央の切欠き深さは 50mm とした。切欠き加工はコンクリートカッターで行い、切欠き幅は約 4mm であった。

2. 2. 2 試験方法

本試験は載荷スパン 300mm とし、載荷装置は両支点下にローラを配置し、水平方向に可動な構造とした。計測項目は、載荷荷重、ひび割れ開口変位(CMOD)、載荷点の鉛直変位とした。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、ひずみゲージ式変位計(感度： $1/1000\text{mm}$)により計測した。写真 1 に破壊エネルギー試験状況を示す。

表-1 コンクリートの配合

配合名	セメントの種類	W/B	単位量(kg/m ³)								
			W	C	S	G	G(廃瓦)	SF	SP	EX	R
HSF	H	0.15	155	930	407	849	0	103	36.2	0	0
G20-EX-R	SFLC	0.15	149	1023	425	679	148	0	18.4	10	6

表-2 使用材料

材料名	記号	種類 / 特性
セメント	H	早強セメント / 密度:3.14g/cm ³
	SFLC	シリカヒュームプレミックスセメント / 密度:3.08g/cm ³
細骨材	S	砕砂 / 表乾密度:2.56g/cm ³ , 吸水率2.13%
粗骨材	G	砕岩 / 表乾密度:2.62g/cm ³ , 吸水率0.73%, 破碎値11%
	G(廃瓦)	廃瓦 / 表乾密度:2.27g/cm ³ , 吸水率8.66%, 破碎値21.38%
混和材	SF	シリカヒューム / 密度:2.24g/cm ³
混和剤	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
膨張材	EX	石灰エトリンガイト複合系 / 密度:3.05g/cm ³
収縮低減剤	R	低級アルコール系

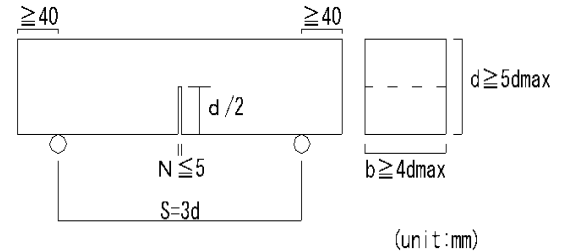


図-1 試験体概要

2. 2. 3 破壊エネルギー評価方法

コンクリートの破壊エネルギーを求めるためには、荷重と載荷点変位(LPD)を高い精度で計測する必要がある。本試験では載荷スパンは 300mm と小さいため LPD の絶対値は小さく、高い精度で変位計測を行うために、変位計の試験体への固定には特別な治具を用いた。一方、CMOD はクリップゲージにより直接的かつ高精度での測定が可能である。破壊エネルギー G_f は、以下の算定式から求めた⁴⁾。

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

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMODc$$

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]

m_1 : 試験体の質量[kg]

m_2 : 破断するまで試験体に載っている治具の質量[kg]

S : 載荷スパン[mm]

L : 試験体の全長[mm]

g : 重力加速度[9.807m/s²]

CMODc : 破断時のひび割れ開口変位[mm]

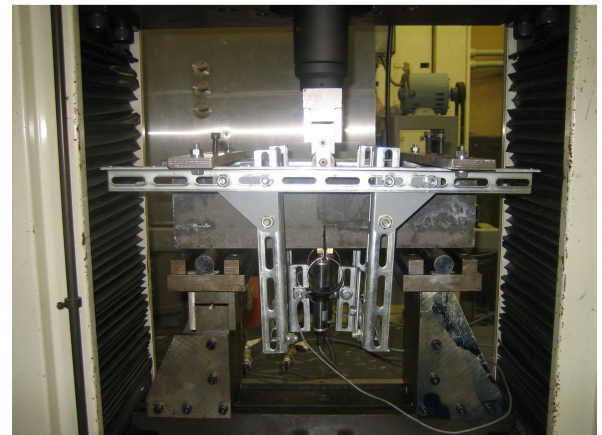


写真-1 破壊エネルギー試験状況

また、特性長さ l_{ch} は次式より求めた¹⁾。

$$l_{ch} = \frac{E_c G_f}{f_t^2} \quad (2)$$

E_c : ヤング係数[N/mm²]

f_t : 引張強度[N/mm²]

3. 破壊エネルギー試験結果

式(1)、(2)より破壊エネルギーおよび特性長さを求めた。試験結果一覧を表3に示す。また、荷重-CMOD 曲線の一例を図2に示す。HSF および G20-EX-R の破壊エネルギーの試験結果にはばらつきが見られるが、本試験の検討においては平均値を用いるものとする。試験結果のばらつきの要因については、今後の検討課題とする。

表-3 破壊エネルギー試験結果一覧

配合		破壊エネルギー G_f N/mm	圧縮強度 f_c N/mm ²	引張強度 f_t N/mm ²	ヤング係数 E_c kN/mm ²	特性長さ l_{ch} mm	配合		破壊エネルギー G_f N/mm	圧縮強度 f_c N/mm ²	引張強度 f_t N/mm ²	ヤング係数 E_c kN/mm ²	特性長さ l_{ch} mm
HSF	①	0.289	156.43	4.75	48.73	624.90	G20-EX-R	①	0.149	151.03	5.10	45.60	261.79
	②	0.202	156.43	4.75	48.73	436.31		②	0.128	151.03	5.10	45.60	224.49
	③	0.186	156.43	4.75	48.73	402.47		③	0.131	151.03	5.10	45.60	230.07
	④	0.198	156.43	4.75	48.73	428.26		④	0.170	151.03	5.10	45.60	298.19
	⑤	0.196	156.43	4.75	48.73	423.39		⑤	0.113	151.03	5.10	45.60	198.31
	⑥	0.183	156.43	4.75	48.73	396.07		⑥	0.173	151.03	5.10	45.60	303.29
	⑦	0.192	156.43	4.75	48.73	415.37		⑦	0.170	151.03	5.10	45.60	298.65
	⑧	0.173	156.43	4.75	48.73	373.92		⑧	0.116	151.03	5.10	45.60	202.91
	⑨	0.155	156.43	4.75	48.73	335.01		⑨	0.162	151.03	5.10	45.60	284.73
	⑩	0.187	156.43	4.75	48.73	404.10		⑩	0.148	151.03	5.10	45.60	259.43
平均		0.196	156.43	4.75	48.73	423.98		平均	0.146	151.03	5.10	45.60	256.19

粗骨材全容積を廃瓦粗骨材で 20%容積置換することにより、破壊エネルギーは約 26%低下している。コンクリートの引張軟化域（最大荷重以降の荷重低下の勾配）で明らかな差が出ており、HSF と比較して G20-EX-R の方がより脆性的な破壊を示したためと考えられる。これは、G20-EX-R は粗骨材全容積を廃瓦粗骨材で 20%容積置換しているため、廃瓦の骨材強度の低下による引張軟化域の骨材の架橋効果の減少が破壊エネルギーの低下を促したのではないかと考えられる。また、破壊後の試験体破断面の視察においてほとんどの粗骨材に破断が認められることから、骨材強度の低下が破壊エネルギーの低下に大きく影響したものと考えられる。

4. 結論

粗骨材全容積を廃瓦粗骨材で 20%容積置換した UHSC を用いて破壊エネルギー試験を行い、廃瓦粗骨材を用いた場合の破壊エネルギーの特性について検討した。本試験から得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 圧縮強度および割裂引張強度、ヤング係数に大きな差は見られなかった。
- (2) HSF と比較して G20-EX-R の方がより脆性的な破壊を示した。
- (3) 廃瓦の骨材強度の低下により、引張軟化域の骨材の架橋効果が減少したと考えられる。
- (4) 粗骨材全容積を廃瓦粗骨材で 20%容積置換することにより、破壊エネルギーは約 26%低下した。
- (5) 特性長さは 40%減少した。

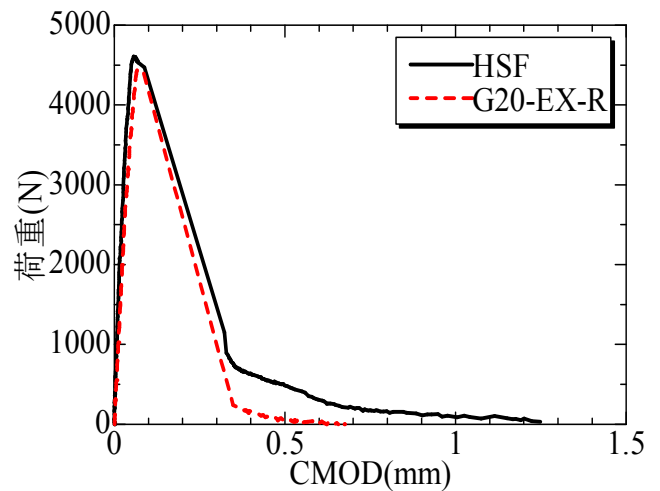


図-2 荷重-CMOD 曲線

【参考文献】

- 1) Gustafsson, P. J. et al. : Sensitivity in Shear Strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete, ACI Structural Journal, May-June, pp.286-294,1988.
- 2) 松元香保里ほか：「高強度コンクリートの材料特性および破壊エネルギーに関する研究」，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.739-774，2002
- 3) 鈴木雅博ほか：「超高強度 RC プリズムの自己応力低減に関する検討」，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，2008
- 4) 社団法人 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