

論文 高性能軽量コンクリートの破壊エネルギーに関する研究

笹倉 伸晃^{*1}・小原 孝之^{*1}・原 夏生^{*2}・舟橋 政司^{*1}

要旨：堆積粘土を主原料とする高性能軽量骨材を用いた高性能軽量コンクリートの破壊エネルギーを算出し，単位容積質量と破壊エネルギーの関係を求め，既往の研究データとの比較を行った。その結果，高性能軽量コンクリートの破壊エネルギーは，モルタルを同一とした場合，コンクリートの単位容積質量すなわち使用する粗骨材の密度と相関があることがわかった。また，実験で得られた破壊エネルギーを用いて，引張軟化特性に着目した曲げ強度の寸法効果に関する有限要素解析を実施した。その結果，高性能軽量コンクリートの寸法効果は普通コンクリートと比べて小さいという傾向が得られた。

キーワード：高性能軽量コンクリート，破壊エネルギー，単位容積質量，寸法効果

1. はじめに

近年，新しい材料や製造方法により開発された造粒型で独立空隙を有する高性能軽量骨材（SLA）は，従来の人工軽量骨材に比べて高強度で，吸水率が著しく改善されている¹⁾。そのため，これを用いた高性能軽量コンクリート（SLA コンクリート）は，同一の単位容積質量の従来型人工軽量骨材コンクリートよりも高強度が得られ，耐久性を著しく向上させることが可能となってきた。

しかしながら，一般に，SLA コンクリートの圧縮強度は，普通コンクリートと同等の値を得ることができるが，引張強度の圧縮強度に対する割合は普通コンクリートに比べて小さく，また，破壊エネルギーも小さい傾向があることが知られている^{2),3)}。そこで本研究では，堆積粘土を主原料とする中国製の高性能軽量骨材（SLA (Ch)）を用いた SLA コンクリートの破壊エネルギー試験を実施し，普通コンクリートおよび真珠岩を主原料とする高性能軽量骨材（SLA (J)）を用いた SLA コンクリートの既往の研究成果と比較することで，単位容積質量と破壊エネルギーの関係を求めた。加えて，得られた破壊エネルギーより引張軟化特性を把握し，破壊エネルギーが曲げ強度の寸法効果に及ぼす

影響についても検討を行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料および配合

本実験で使用した材料およびコンクリートの配合を表-1 および表-2 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し，細骨材には木更津産山砂を使用した。また，人工軽量骨材は，中国製の堆積粘土を主原料とする高性能人工軽量骨材（以下，SLA：写真-1参照）（以下，細骨材は SLA-S，粗骨材は，骨材密度の違いにより，SLA_{0.85} および SLA_{1.2}）であり，形状は非球形である⁴⁾。なお，JIS A 5002 において，SLA-S および SLA_{0.85} は，絶乾密度区分 L，SLA_{1.2} は絶乾密度区分 M に相当する。



(a) 外観

(b) 骨材粒

写真-1 高性能軽量骨材

*1 前田建設工業(株) 技術本部技術研究所 工修 (正会員)

*2 前田建設工業(株) 技術本部技術研究所 工博 (正会員)

表-1 使用材料

材料	名称	記号	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm ³
細骨材	高性能人工軽量骨材	SLA-S	絶乾密度 1.28g/cm ³ , 24h 吸水率 7.52%, 粗粒率 5.11, 堆積粘土系造粒型
	木更津産山砂	S	表乾密度 2.59g/cm ³ ,
粗骨材	高性能人工軽量骨材	SLA _{0.85}	絶乾密度 0.83g/cm ³ , 24h 吸水率 2.74%, 粗粒率 6.38, 堆積粘土系造粒型
		SLA _{1.2}	絶乾密度 1.15g/cm ³ , 24h 吸水率 2.69%, 粗粒率 6.44, 堆積粘土系造粒型
	両神産碎石	G	表乾密度 2.71g/cm ³ ,
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表-2 コンクリート配合

配合種別	スランプフロー (mm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)								単位容積質量 (t/m ³)				
					W	C	S	SLA-S	G	SLA 1.2	SLA 0.85	SP (C×%)					
L1	450	45.0	5.5	47.3	165	367	820				403		0.90	1.766			
L2															190	232	291
L3																	
L4															36.3	46.6	155
N	120**1	45.0		47.3	165	367	820		948				2.300				

**1 スランプ値

コンクリートの配合は、粗骨材に全て SLA_{1.2} を使用した配合 (L1), 粗骨材に全て SLA_{0.85} を使用した配合 (L2), SLA_{0.85} と天然碎石を混合 (体積比で 4:1) して使用した配合 (L3), 細骨材に、SLA-S と山砂を混合し、粗骨材に全て SLA_{0.85} を使用した配合 (L4) および普通コンクリート (N1) の 5 種類とした。コンクリートの配合条件は、水セメント比 45%(L4 は 36.3%), 空気量 5.5%, スランプフロー 450 ± 50mm とした。

2.2 強度試験

供試体は、材齢 1 日で脱型し、材齢 28 日まで 20 で水中養生を行って試験を実施した。強度試験としては、圧縮強度試験、曲げ強度試験、割裂引張強度試験を行った。

2.3 破壊エネルギーの測定方法

試験体の寸法および荷重方法を図-1に示す。破壊エネルギー測定試験は「JCI「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法」⁵⁾に準じて実施した。試験体の寸法は幅 100×高さ 100×長さ 400mm の角柱試験体とし、試験体数を各配合 3

~4 体とした。養生方法は、強度試験と同様とし、試験体中央の深さ 50mm の切欠きは、厚さ 2mm のダイヤモンドカッターを用いて各試験体の荷重直前に施した。試験体の荷重は、クローズドループコントロールを用いた変位制御により、切欠き開口変位 (CMOD) の開口変位が 0.05 ~ 0.04mm/min となるよう実施した。

2.4 破壊エネルギーの算出

破壊エネルギー (G_f) は、式 (1) および式 (2) を用いて、CMOD により評価した。なお、今回の荷重試験では、試験体が完全に破壊するまで

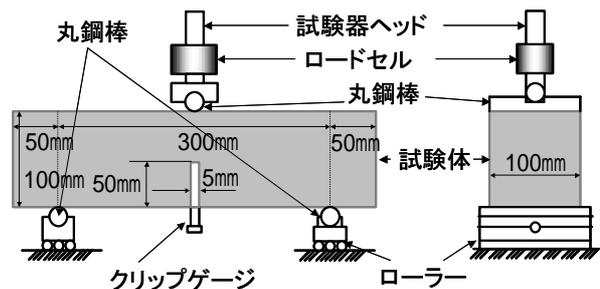


図-1 試験体寸法および荷重方法

計測できなかったため、計測点のうち、最後の30～50点を線形回帰することで破断時のひび割れ開口変位 (CMOD_C) を求め、破壊エネルギーを算出した。

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

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

ここで、G_f：破壊エネルギー (N/mm)、W₀：試験体が破断するまでの荷重-CMOD 曲線下の面積 (N・mm)、W₁：試験体の自重および載荷治具がなす仕事 (N・mm)、A_{lig}：リガメント面積 (N/mm²)、m₁：試験体の質量 (kg)、S：載荷スパン (mm)、L：試験体の全長 (mm)、m₂：試験機に取付けられておらず、破断するまで試験体に載っている治具の質量 (kg)、g：重力加速度 (9.807m/s²)、CMOD_C：破断時のひび割れ開口変位 (mm)

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-CMOD 曲線および破壊エネルギー

表-3 に各試験体における試験結果一覧を示す。普通コンクリートの破壊エネルギーが

0.120N/mm であるのに対して、SLA (Ch) を用いた SLA コンクリートの破壊エネルギーは、0.038～0.071N/mm であった。SLA コンクリートの破壊エネルギーは、多くの要因によって変化するが、特にモルタル強度と高性能軽量粗骨材の強度の影響が大きいと考えられる。試験体の破断状況を比較すると、N 試験体は、粗骨材の破壊がほとんど見られなかったのに対して、L1～L4 試験体では、すべての試験体で SLA (Ch) の破壊が認められた。すなわち、SLA コンクリートでは、ひび割れが骨材を迂回することがほとんど無く、ひび割れ面における骨材のかみ合いも少ないため、ひび割れの進展に対する抵抗が小さいものと考えられる。

図-2 に各配合における荷重-CMOD 曲線を示す。水セメント比を一定とした配合(L1、L2、L3)に着目すると、粗骨材に普通骨材が含まれている場合(L3)には、最大荷重が増加する傾向がある。また、粗骨材すべてにSLAを使用した場合は、SLAの密度が大きいSLA1.2を用いた場合(L2)の方が、軟化域の荷重が大きいことがわかる。また、L4配合に関しては、荷重0時のCMODが他の配合と比較し、若干小さくなっている。

表-3 試験結果一覧

配合種別	No.	試験材齢	単位容積質量 (t/m ³)	破断時ひび割れ開口変位 (mm)	破壊エネルギー (N/mm)	試験時の圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 材齢28日 (N/mm ²)	引張強度 材齢28日 (N/mm ²)	
L1	1	35	1.727	0.732	0.066	0.057	23.8	3.19	2.01
	2			0.501	0.045				
	3			0.785	0.054				
	4			0.987	0.062				
L2	1	35	1.654	0.729	0.073	0.061	26.9	2.69	1.74
	2			0.785	0.047				
	3			0.904	0.064				
L3	1	40	1.771	0.908	0.071	0.071	28.0	2.90	1.94
	2			1.641	0.103				
	3			0.551	0.043				
	4			0.743	0.063				
L4	1	42	1.453	0.507	0.045	0.038	26.6	3.17	2.53
	2			0.461	0.035				
	3			0.367	0.034				
	4			0.457	0.038				
N	1	33	2.327	0.782	0.115	0.120	28.4	4.18	2.73
	2			0.942	0.117				
	3			1.215	0.127				

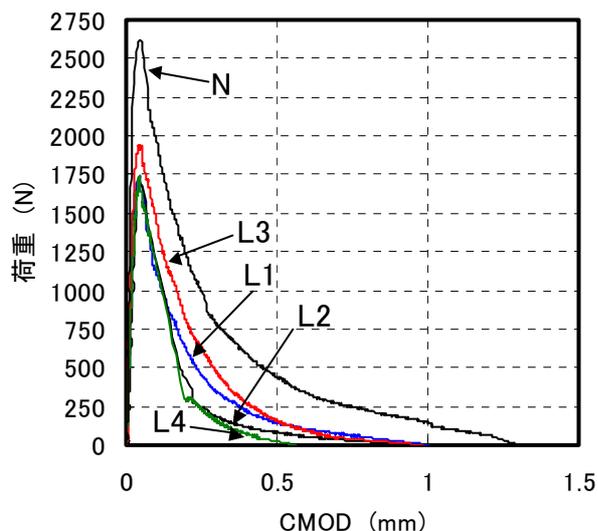


図-2 荷重-CMOD 曲線

3.2 単位容積質量と破壊エネルギーの関係

図-3 に曲げ強度比および引張強度比と単位体積質量の関係を示す。引張強度比および曲げ強度比は SLA コンクリートの単位容積質量の低下に伴い、減少する傾向がある。

図-4 に破壊エネルギーとコンクリートの単位容積質量の関係を示す。SLA コンクリートの破壊エネルギーは、単位容積質量の低下に伴い、小さくなる傾向がある。普通コンクリートを含めた回帰直線の相関係数は 0.98 であり、SLA コンクリートの単位容積質量と良い相関があることが確認できる。

3.3 SLA コンクリートの既往の研究データとの比較

本研究で得られた破壊エネルギーと真珠岩を主原料とする SLA (J) を用いた既往の研究データ⁶⁾との比較を行った。

図-5 は、本研究と既往のデータにおける SLA コンクリートの単位容積質量と破壊エネルギーの関係を示したものである。単位容積質量と破壊エネルギーの関係においては、SLA の主原料 (SLA (Ch), SLA (J)) による顕著な差は認められない。

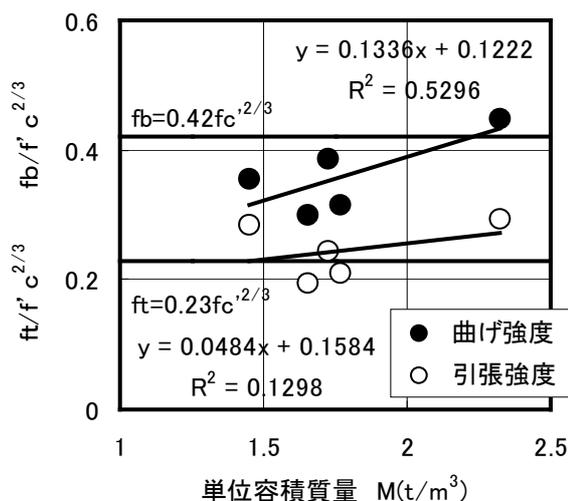


図-3 単位容積質量と引張強度比，曲げ強度比の関係

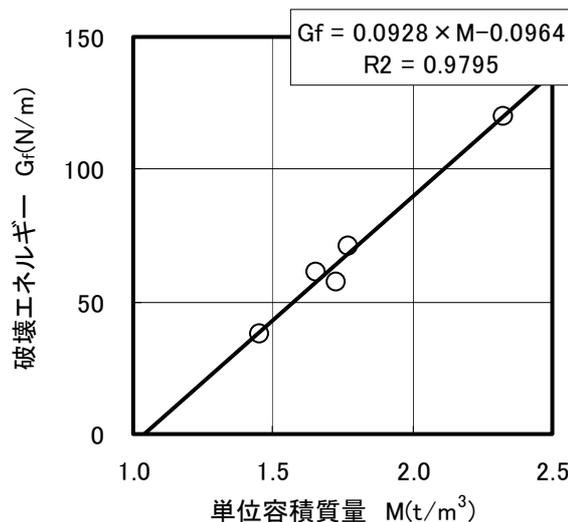


図-4 単位容積質量と破壊エネルギーの関係

また、図-6 は、SLA コンクリートの単位容積質量と破壊エネルギー/引張強度比を表したものである。今回の堆積粘土を主原料とする SLA (Ch) を用いた方が、単位容積質量の影響をやや大きく受ける傾向がある。しかしながら、SLA 以外にも破壊エネルギーに影響を及ぼす因子がある³⁾ことを考えると、両者はほぼ同等の破壊エネルギーを有していると考えられる。

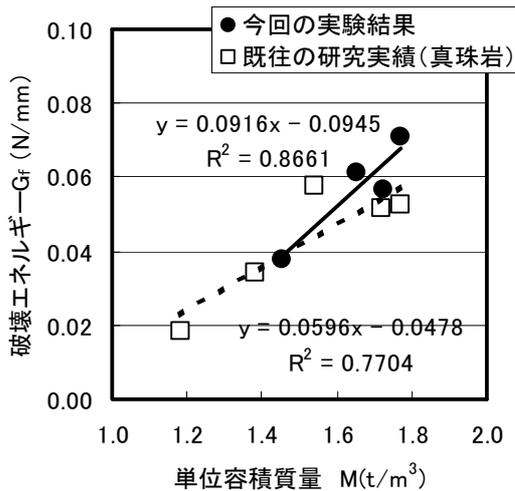


図-5 単位容積質量-破壊エネルギーの関係

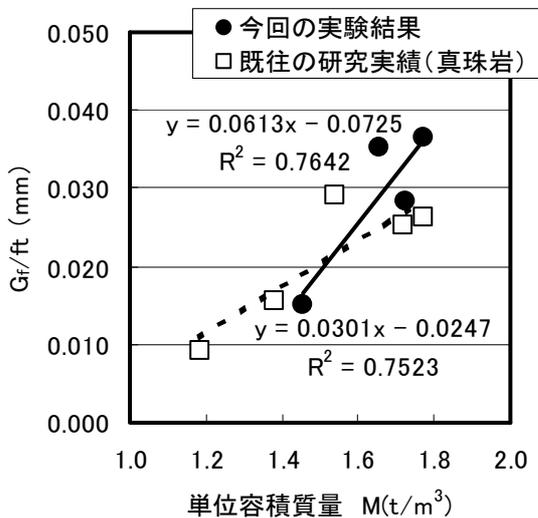


図-6 単位容積重量と破壊エネルギー/引張強度の関係

3.4 曲げ強度の寸法効果に及ぼす破壊エネルギーの影響

SLA コンクリートの曲げ強度の寸法効果に及ぼす破壊エネルギーの影響について検討するため、単一ひび割れ面を仮定した4点曲げ載荷試験のFEM解析を実施した。

解析条件は、部材寸法 ($h=100, 500, 1000\text{mm}$) と配合をパラメータとし、要素分割の概要は、図-7に示すように、試験体中央にひび割れ要素として離散ひび割れ接合要素を適用し、それ以外の要素は、弾性体要素を適用した。ひび割れ要素の引張軟化特性は、実験で得られた荷重-CMOD関係より、多曲線近似法⁷⁾により引張軟

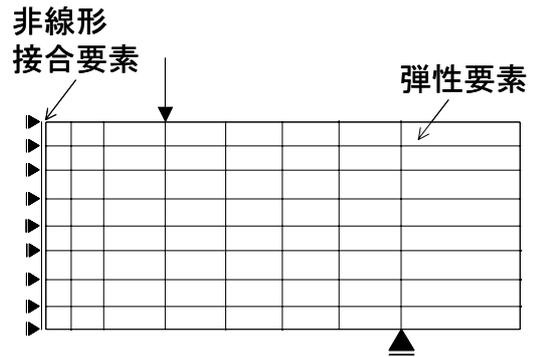


図-7 試験体要素分割の概要

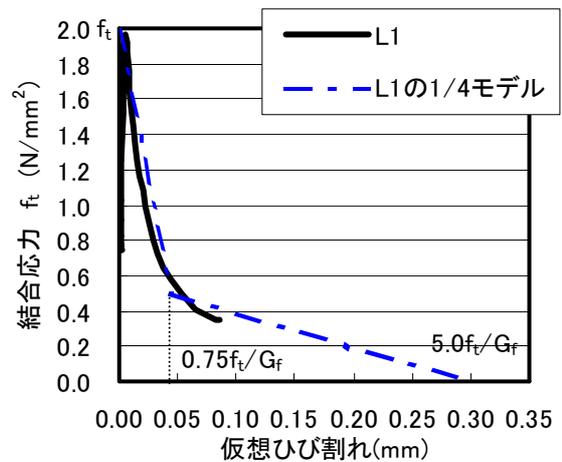


図-8 引張軟化特性の1/4モデル

表-1 解析結果一覧

配合種別	部材寸法 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げ/引張強度比
L1	1000	2.01	2.02	1.01
	500		2.09	1.04
	100		2.58	1.28
L2	1000	1.74	1.76	1.01
	500		1.83	1.05
	100		2.27	1.30
L3	1000	1.94	1.96	1.01
	500		2.04	1.05
	100		2.52	1.30
L4	1000	2.53	2.47	0.98
	500		2.48	0.98
	100		2.83	1.12
N	1000	2.73	2.79	1.02
	500		3.03	1.11
	100		3.90	1.43

化曲線を求め、それを基に図-8に示すような1/4モデルを仮定した。

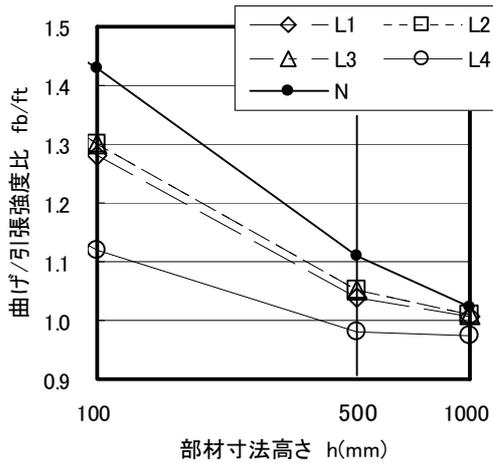


図-9 部材寸法と曲げ/引張強度比の関係

解析結果を表-1に示す。SLA コンクリートの配合により寸法効果の影響は異なり、部材寸法が最大である $h=1000\text{mm}$ の場合は、配合によらず、曲げ強度は引張強度とほぼ等しくなる傾向がある。また、図-9 は部材寸法と曲げ引張強度比の関係を表したものである。試験体寸法が 100mm の場合、普通コンクリートの曲げ引張強度比は 1.43 であるのに対し、SLA コンクリートは、 $1.12 \sim 1.30$ であった。従って、普通コンクリートと比較すると、SLA コンクリートの寸法効果は小さい傾向が見られた。

4. まとめ

- 1) SLA コンクリートの破壊エネルギーは、モルタルを同一とした場合、コンクリートの単位容積質量、すなわち、使用する粗骨材の密度と相関関係があることがわかった。
- 2) 堆積粘土を主原料とした高性能人工軽量骨材を用いたコンクリートの破壊エネルギーは、真珠岩を主原料とする高性能人工軽量骨材と比較して、ほぼ同程度である。
- 3) SLA コンクリートの単位容積質量により曲げ強度の寸法効果の影響は異なるが、本論文の解析の範囲では、SLA コンクリートの寸法効果は、普通コンクリートに比べて小さいという結果が得られた。

謝辞

本研究を実施するにあたり、東京工業大学二羽淳一郎教授、(独)港湾空港技術研究所横田弘博士ならびに太平洋セメント(株)岡本享久博士より有益なご助言を頂きました。また、太平洋セメント(株)中央研究所森大介氏には、真珠岩のSLA に関する貴重なデータを提供して頂き、長岡技術大学清水淳氏、小野秀晃氏には実験実施にご協力頂きました。ここに、関係各位への感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡本享久, 石川雄康, 棚木隆, 笹島昌男: 高性能軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.37, No.4, pp12-18, 1999.4
- 2) 森 大介, 石川雄康, 國府勝郎, 荒井孝文: 人工軽量粗骨材を使用したコンクリートの破壊エネルギー挙動について, 軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集, pp.11-16, 2000.8
- 3) 木場美子, 川口哲生, 高濱達矢, 二羽淳一郎: 超軽量人工骨材を用いたコンクリートの破壊力学特性値に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.49-54, 2001
- 4) 九々正武, 坂口昇, 木村薫: 中国産人工軽量骨材を使用したコンクリートの物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.43-48
- 5) 内田裕市, 市之瀬敏勝: 破壊のメカニズムと破壊の力学, コンクリート工学, Vol.37, No.9, pp.11-17, 1999.9
- 6) 川口哲生, 二羽淳一郎, 文載欽, 前堀伸平: 超軽量人工骨材を使用した普通強度RCはりのせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.595-600, 2000
- 7) 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, (社)日本コンクリート工学協会, 2001.5