

論文 人工超軽量骨材コンクリート RC はりの靱性に関する研究

北村周郎*1・尼崎省二*2

要旨: 本研究は、絶乾密度 0.6~0.9kg/l の人工超軽量骨材を構造コンクリート用骨材として適用することを目的とし、細・粗骨材ともに人工超軽量骨材を使用したコンクリートの超軽量 RC はり供試体を作製し、同程度の圧縮強度を有する普通骨材コンクリート RC はり供試体との曲げ挙動の比較検討を行った。その結果、超軽量 RC はりは普通 RC はりと比べて降伏曲げモーメント時のたわみが大きくなるとともに、はり圧縮部のかぶりコンクリートの剥落領域は大きく、脆性的な曲げ破壊をするが、超軽量 RC はりに横拘束筋を配置することによって靱性は増加した。

キーワード: 人工超軽量骨材, 超軽量コンクリート, 破壊性状, 横拘束筋, 靱性

1. はじめに

近年、コンクリート構造物は、超大スパン橋梁、多層高架道路橋、超高層ビルなど巨大化、高層化が進んでいる。それに伴いコンクリート構造部材の断面は複雑化するとともに自重も膨大なものになりつつあり、軽くて強いコンクリートが望まれている。

本研究では、新たに開発された人工超軽量骨材を用い¹⁾、単位容積質量 1.2kg/l 程度の超軽量コンクリートの RC はり供試体の曲げ載荷試験を行い、その性状を調べた。また、超軽量コンクリートは応力ひずみ曲線の圧縮応力下降域の負勾配が大きく、急激な破壊を生じるため¹⁾、その RC はりも脆性的な破壊をされると考えられる。普通骨材コンクリート RC はりの脆性破壊

を防止することを目的とした補強方法として、スターラップ間隔を小さくする方法^{2),3)}、およびはり圧縮部に横拘束筋を配置する方法^{4),5),6)}などがある。それらの方法が超軽量 RC はりの靱性に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 超軽量コンクリートの使用材料

超軽量コンクリートの使用材料を表-1 に示す。細骨材は、膨張粘土を造粒・焼成したもので、絶乾密度 0.6~0.8kg/l、N1~N3 に分級されている。粗骨材は真珠岩を主体とする原料を微粉砕・混合・造粒した絶乾密度 0.87 kg/l のものを用いた。これらは内部に無数の微小独立気泡を有し、外形は球形に近く粒度の調整も比較的

表-1 超軽量コンクリートの使用材料

使用材料		記号	物性または成分
セメント		C	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
超軽量骨材	細骨材	N1	粒径: 5.0~2.5mm、絶乾密度: 0.65kg/l、24h吸水率: 6.5%
		N2	粒径: 2.5~1.2mm、絶乾密度: 0.68kg/l、24h吸水率: 6.5%
		N3	粒径: 1.2~0.6mm、絶乾密度: 0.73kg/l、24h吸水率: 7.0%
	粗骨材	G	粒径: 15~5.0mm、絶乾密度: 0.87kg/l、24h吸水率: 4.0%
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系の複合体
	AE 助剤	AE	アルキルアリルスルホン化合物系陰イオン界面活性剤
	分離低減剤	SFCA	水溶性セルロースエーテル

*1 西日本旅客鉄道(株) 工修 (正会員)

*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

表-2 超軽量コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプフロー (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)							SP (C×%)	SFCA (g)	AE* (A)
					水 W	セメント C	細骨材			粗骨材 G	補正水 +W			
							N1	N2	N3					
15	60±5	30	5±1	46	155	517	28	33	147	300	26.1	1.50	300	2.5

*1%希釈液をセメント1kgあたり2ml使用したものを1Aとする

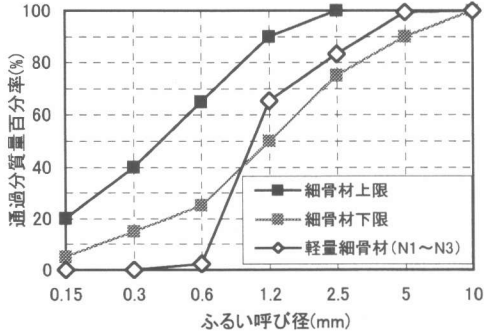


図-1 人工超軽量細骨材の粒度分布

容易である。本研究と同様な性質を示す粗骨材を使用した軽量コンクリートは、吸水率が従来の軽量骨材に比べ小さく、ポンプ圧送性⁷⁾、および耐凍害性などのコンクリートの耐久性に優れるとされている¹⁾。セメントは普通ポルトランドセメント、混和剤は、高性能 AE 減水剤、AE 助剤、および分離低減剤を使用した。

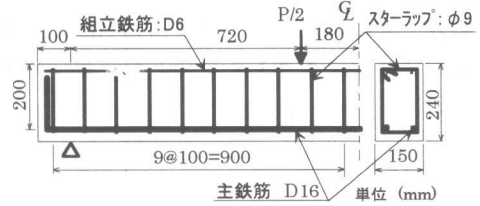
2.2 超軽量コンクリートの配合

超軽量コンクリートの配合を表-2に示す。単位水量を 155kg/m³とし、著者らの研究から得られた最大圧縮強度 33MPa 程度を目標とし水セメント比を 30%にした³⁾。細骨材は JIS A 5002 に示されている粒度分布(図-1)に最も近くなるように N1:N2:N3=0.15:0.17:0.68 で混合しを使用した。締固め可能で材料分離を抑制するために、表-1に示す混和剤を用いて、フレッシュコンクリートのスランプフローを 60±5cm、空気量を 5±1%に調整した。なお、軽量骨材は気乾状態で使用し、24時間吸水量に相当する水を補正水として単位水量に加えた。

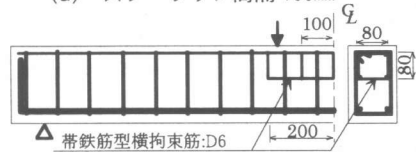
2.3 超軽量 RC はりの曲げ載荷試験

(1) RC はり供試体

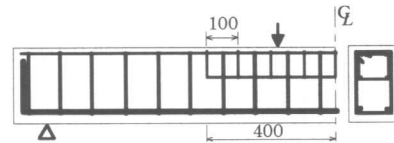
実験は、スターラップ間隔 100mm の供試体(図-2(a))を基本とし、スターラップ間隔を 70 および 150mm に変化させた場合、および鉄



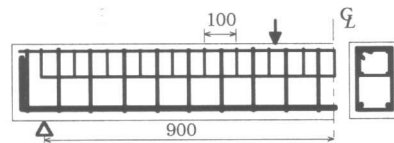
(a) スターラップ間隔 100mm



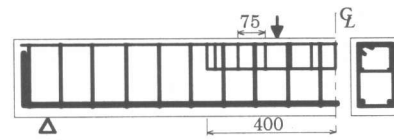
(b) 横拘束筋長 400 間隔 100mm



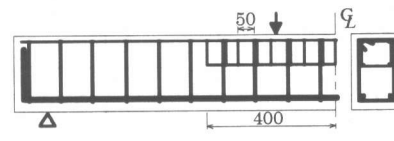
(c) 横拘束筋長 800 間隔 100mm



(d) 横拘束筋長 1800 間隔 100mm



(e) 横拘束筋長 800 間隔 75mm



(f) 横拘束筋長 800 間隔 50mm

図-2 RC はり供試体図

筋 D6 で作製した帯鉄筋状の各種横拘束筋をはりの圧縮部に配置した供試体(図-2(b)~(f))を用いて行った。RC はり供試体は、高さ 240mm

×幅 150mm×長さ 2000 mm の単鉄筋長方形断面とし、鉄筋は、主鉄筋にはSD295AのD16を2本、スターラップにはφ9を使用した。

帯鉄筋状の横拘束筋の形状は、間隔を100mmと一定とし、長さを400, 800, および1800mmと変化させたもの(図-2(b)~(d)), および長さを800mmと一定とし間隔を75および50mmと変化させたもの(図-2(e), (f))である。なお、帯鉄筋状の横拘束筋は組立鉄筋を囲むように配置し、その端部を結束線で拘束し断面に集中しないように配置した。横拘束筋とスターラップが重なる箇所では、横拘束筋をスターラップに隣接して配置した。同程度の圧縮強度を有する普通RCはりは図-2(a)に示す形状である。実験要因を表-3に示す。

(2) 養生

供試体は材齢48時間で脱型し、2週間散水養生の後、試験材齢4週まで室内保管とした。

(3) 試験方法および計測項目

RCはり供試体は対称二点載荷としせん断スパン有効高さ比3.6で載荷し、はり中央のたわみ、曲げスパン圧縮・引張縁でのひずみの測定、および目視によるひび割れの観察を行った。靱性は、任意のたわみに至るまでのエネルギーを吸収する能力と定義し、荷重-たわみ曲線で囲まれた蓄積エネルギーで評価した。なお、コンクリートの静弾性係数はJSCE-G502に準じ単調増加載荷により求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 RCはりのコンクリートの物性

実験に用いたコンクリートの機械的特性を表-3に示す。静弾性係数は約10GPaで、コンクリート標準示方書に示されている軽量コンクリートの静弾性係数よりも小さいが、この値は式

表-3 実験要因, RCはりのコンクリートの物性, およびRCはりの実測値

骨材の種類	図番号	実験要因			コンクリートの物性			RCはりの実測値	
		スターラップ間隔	横拘束筋の長さ	横拘束筋の間隔	密度 ρ	圧縮強度 f_c'	静弾性係数 E_c	降伏曲げモーメント	最大曲げモーメント
		(mm)			(kg/l)	(MPa)	(GPa)	(kN·m)	
軽量	図-2(a)	100	-	-	1.21	32.8	10.6	26.5	28.2
	-	70						26.8	28.2
	-	150						26.5	28.3
	図-2(b)	100	400	100				27.5	31.4
	図-2(c)		800					28.6	31.2
	図-2(d)		1800	27.2				30.1	
	図-2(e)		800	75				27.2	29.6
図-2(f)	50			27.5	30.6				
普通	図-2(a)		100	-	-	2.38	34.8	33.1	27.2

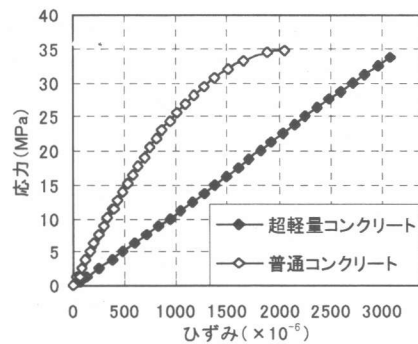


図-3 応力ひずみ曲線

(1)で推定できる⁸⁾。

$$E_c = \frac{1}{2.34} \times 10^{0.5} \cdot \rho^{1.5} \sqrt{f_c'} \quad (1)$$

ここで、 E_c : 静弾性係数(GPa), ρ : コンクリートの密度(kg/l), f_c' : 圧縮強度(MPa)である。

超軽量および普通コンクリートの最大応力時までの応力ひずみ曲線を図-3に示す。超軽量コンクリートの最大応力時のひずみは 3000×10^{-6} 程度で、普通コンクリートに比べ大きく、直線的傾向を示している。これは、軽量骨材のヤング係数がモルタルのヤング係数より小さく、骨材の強度がモルタル強度より小さいためと考えられる。すなわち、超軽量コンクリートの破壊が、普通コンクリートのような界面ひび割れからモルタルひび割れに進展して破壊するのではなく、骨材の破壊からコンクリート全体が破壊するためと考えられる⁹⁾。

3.2 最大曲げモーメントまでの性状

はり供試体の載荷試験結果を表-3に示す。降伏曲げモーメントは、引張鉄筋の降伏が影響す

るため横拘束筋の程度に関係なく同程度の値となっている。最大曲げモーメントは、横拘束筋を配置した超軽量 RC はりで横拘束筋を配置していないものに比べて 10%程度増加している。拘束鉄筋を有するコンクリートの圧縮強度は大きくなると報告されており^{5,6)}、これが最大曲げモーメントが増加した原因と考えられる。

図-4 に曲げモーメントとたわみとの関係を示す。超軽量 RC はりの降伏曲げモーメントまでの性状は横拘束筋に関係なく同様な性状を示している。降伏曲げモーメント時の超軽量 RC はりのたわみは 8mm 程度であるのに対して、普通 RC はりでは 6mm 程度となっており、普通 RC はりに比べ大きくなっている。これは、超軽量コンクリートの静弾性係数が普通コンクリートに比べ小さく、後述するようにひび割れの発生数が普通 RC はりに比べて多いため、曲げ剛性が小さくなったことが原因であると考えられる。

3.3 超軽量 RC はりの靱性

(1) スターラップ間隔の影響

スターラップ間隔が曲げモーメントとたわみとの関係に及ぼす影響を図-5 に示す。普通、超軽量 RC はりともたわみが 15~25mm 程度で耐力の減少を生じている。特に超軽量 RC はりは普通 RC はりに比べ耐力が大きく減少している。これは、前述したように超軽量 RC はりのコンクリートの応力ひずみ曲線の応力下降域の最大負勾配が大きいためであると考えられる。すなわち、超軽量 RC はりの圧潰が生じると、それらの進展は普通コンクリートと異なり骨材により阻止されること無く結合し、圧縮部のかぶりコンクリートの剥離がたわみ 15~25mm 程度で生じ、耐力が大きく減少したと思われる。

たわみ 60mm までのスターラップ間隔と蓄積エネルギーとの関係を図-6 に示す。超軽量 RC はりの靱性は、スターラップ間隔を 100 から 70mm に低減すると 6%程度、150 から 70mm に低減すると 10%程度増加している。また、たわみが 60mm 以上になるとその増加が大きくなる

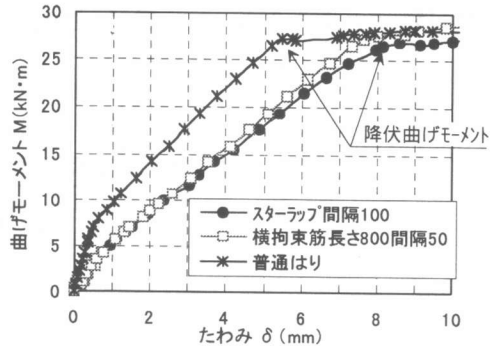


図-4 曲げモーメント-たわみ関係

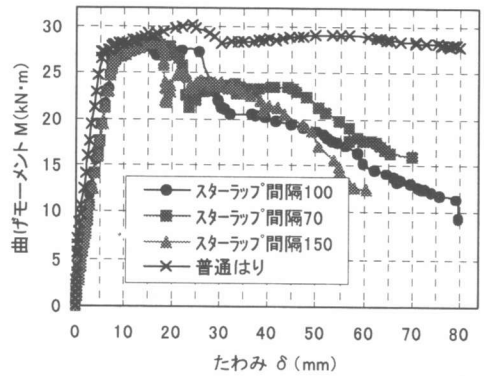


図-5 曲げモーメント-たわみ関係
(スターラップ間隔による相違)

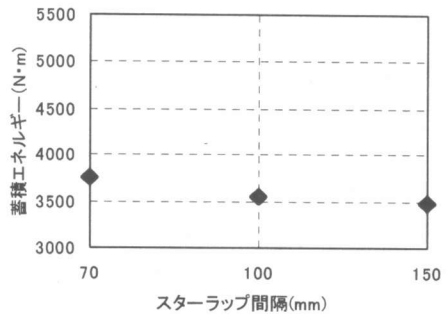


図-6 たわみ 60mm までの蓄積エネルギー

ことが図-5 から推察できる。しかし、柳沼らは、普通骨材コンクリートの RC はりのスターラップ間隔-有効高さ比が本研究と同様の場合には本研究結果よりも大きな靱性の増加を示している²⁾。この結果の相違は、本実験で使用した骨材が軽量骨材であるため、RC はりのコンクリートの破壊が脆性的となり、スターラップのみでは十分な拘束効果が得られなかったためと思われる。

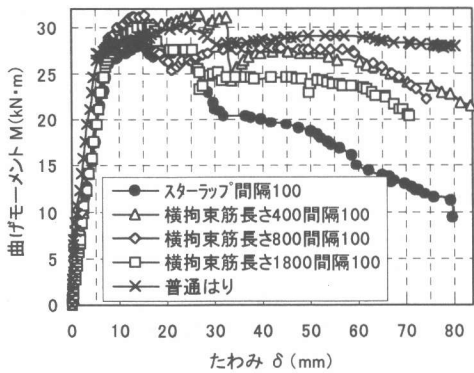


図-7 曲げモーメント-たわみ関係
(横拘束筋の長さによる相違)

(2) 横拘束筋の長さの影響

横拘束筋の長さが曲げモーメントとたわみとの関係に及ぼす影響を図-7に、たわみ70mmまでの横拘束筋の長さとの蓄積エネルギーとの関係を図-8に示す。図-6と比較すると、横拘束筋を配置した超軽量RCはりの靱性はスターラップのみの場合と比べて、十分に増加していることが分かる。たわみ70mmまでの靱性は、スターラップ間隔100mmの超軽量RCはりと比べて25%程度増加しており、普通RCはりと同程度の靱性が得られた。

横拘束筋の長さが1800mmのはりは、長さ400、800mmのものに比べて靱性が10%程度小さくなっている。これは、後述するようにひび割れの発生数が多くなったためと考えられるが、さらに検討が必要である。

普通RCはりおよびスターラップ間隔100mm、横拘束筋の長さ400および1800mmの超軽量RCはりのひび割れ状況図を図-9に示す。超軽量RCはりのひび割れ間隔は普通RCはりに比べ小さくなっている。横拘束筋の長さ1800mmの超軽量RCはりはその傾向が顕著である。超軽量RCはりのコンクリートの剥落部分は普通RCはりに比べて大きくなっている。これは、超軽量RCはりのコンクリートのひび割れが骨材により阻止されることなく進展するためと思われる。また、横拘束筋の端部の拘束が切れていた。このことが原因で、その部分のコンクリ

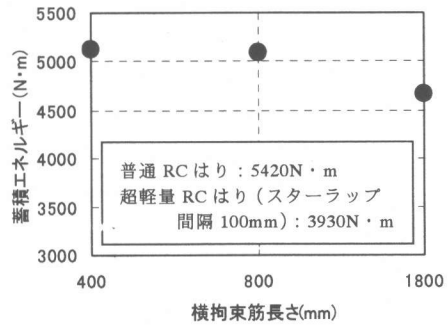


図-8 たわみ70mmまでの蓄積エネルギー

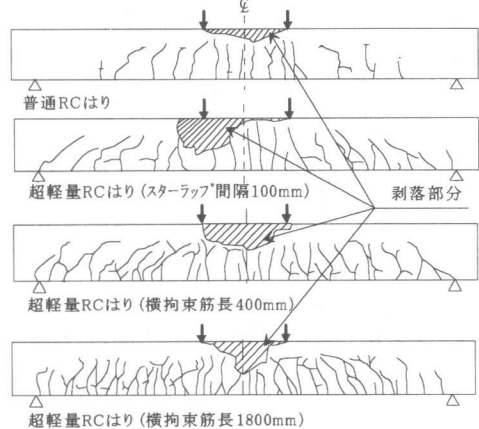


図-9 ひび割れ状況図

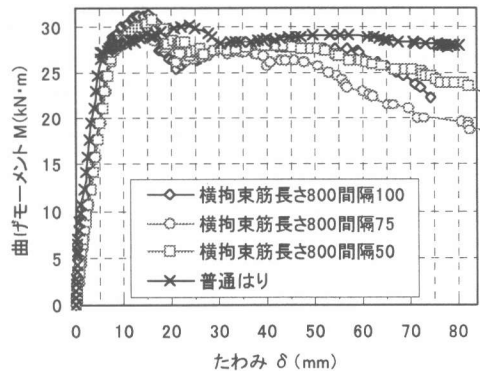


図-10 曲げモーメント-たわみ関係
(横拘束筋間隔による相違)

ートの剥離が進行し、たわみ50mm以降の耐力が減少したと思われる。したがって、横拘束筋にフックを付けて定着することが、靱性がさらに増加する要因と思われる。

(3) 横拘束筋の間隔の影響

横拘束筋の間隔が曲げモーメントとたわみとの関係に及ぼす影響を図-10に、たわみ70mm

までの横拘束筋の間隔と蓄積エネルギーとの関係を図-11に示す。たわみ 50mm 程度まで横拘束筋の間隔によらず同様な性状を示している。しかしながら、たわみ 70mm では横拘束筋の間隔 75mm のよりは間隔 50 および 100mm のもの比べて靱性が 10%程度小さくなっている。これは、横拘束筋の間隔あるいは横拘束筋とスターラップの間隔は横拘束筋間隔 50 および 100mm の場合には 50mm となるが、横拘束筋間隔 75mm では 25 および 75mm となる。横拘束筋を有する供試体は、最終的には組立鉄筋は座屈したため、座屈の影響は明らかではないが、図-10に示すように、横拘束筋間隔 75mm では他のほりに比べて曲げモーメントの減少が早くなっていることから、座屈も早い段階で生じたものと考えられる。

4. まとめ

本論の結論をまとめると以下のようである。

- (1) 超軽量 RC はりの降伏曲げモーメント時のたわみは、普通 RC はりに比べてコンクリートの静弾性係数が小さく、ひび割れ発生間隔が小さいため、大きくなる。
- (2) 超軽量 RC はりのスターラップ間隔を小さくすることにより超軽量 RC はりの靱性は増加する。しかし、コンクリートのひび割れの進展が脆性的であるために大きな靱性の増加は見られない。
- (3) 帯鉄筋状の横拘束筋を配置することで、スターラップ間隔を小さくすることで増加する靱性より大きくなり、普通 RC はりと同程度の靱性を得ることができる。
- (4) 超軽量 RC はりの横拘束筋の間隔の評価は、組立鉄筋の座屈長さもあわせて検討する必要があると考えられる。

謝辞

本研究の実施に当たりご協力頂いた内外セラミック（株）、太平洋セメント（株）に厚くお礼申し上げます。

参考文献

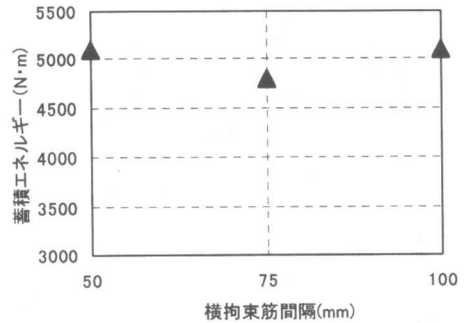


図-11 たわみ 70mm までの蓄積エネルギー

- 1) 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.48-52, 1998.1
- 2) 柳沼義明, 関慎吾, 北田勇輔: 鉄筋コンクリートばりのじん性におよぼす補強筋の効果, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.6, pp.565-568, 1984
- 3) 北村周郎, 尼崎省二: 人工超軽量骨材コンクリート RC はりに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.247-252, 2000
- 4) 藤井学, 阿河俊夫, 本郷忠夫, 宮花邦宏: 過多鉄筋コンクリートばりの横拘束筋による靱性改善, 土木学会論文集, No.348 号/V-1, pp.77-86, 1984.8
- 5) 中川俊則, 矢村潔, 平沢征夫, 原内康隆: 圧縮部に拘束鉄筋を有する RC はりの塑性挙動, セメント技術年報, XXVIII, pp.413-416, 1974 年
- 6) 岡田清, 平沢征夫, 中川俊則: 圧縮部に拘束鉄筋を有する鉄筋コンクリートはりの力学的特性, セメント技術年報, XXVI, pp.442-449, 1972
- 7) 坂田昇, 柳井修司, 石川雄康, 棚木隆: 高性能軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.355-360, 1999
- 8) 柴田辰正, 岡本享久, 早野博幸, 石川雄康: 超軽量骨材を使用したコンクリートの破壊性状に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.49-54, 1998
- 9) 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, 日本コンクリート工学協会, pp.11-16, 2000.8