

論文 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

柴田 辰正*¹・岡本 享久*²・早野 博幸*³・石川 雄康*⁴

要旨：近年、絶乾比重 0.8～1.2 で吸水率が非常に小さく、強度特性に優れた超軽量骨材(高品質軽量骨材)が開発されている。本研究では、この超軽量骨材を使用したコンクリートの破壊性状について、破壊エネルギーとマイクロクラックの発生挙動の関係から考察を加えた。その結果、超軽量骨材を使用したコンクリートは、骨材クラックとモルタルクラックが同時に起こる破壊のパターンを示すことにより破壊エネルギーが低下し、ぜい性的な破壊をすることがわかった。破壊エネルギーを向上させるためには、骨材自身の引張強度を増加させるか、モルタル部分の補強方法の検討が必要であると考えられた。

キーワード：超軽量骨材、軽量コンクリート、破壊エネルギー、マイクロクラック、脆度係数

1. はじめに

近年、環境問題が叫ばれる中、セメントコンクリート分野に関しても環境に優しいコンクリートの開発が必要となってきた。そこで注目すべきコンクリートとして軽量コンクリートがある。コンクリートの軽量化を行うことは、構造物のスリム化、施工の簡略化から省資源・省エネルギーに結びつき、CO₂の排出量の減少にもつながる。

しかし、従来の人工軽量骨材は、骨材の吸水率が高いことからコンクリートに使用した場合、耐凍害性に劣るものとなり、土木用途では、極まれに構造部材に使用される程度にとどまっていた。

現在、これらの問題を解決する新しい超軽量骨材(高性能軽量骨材)の開発が進められ、超軽量骨材を使用した軽量コンクリートは、従来耐久性に劣ると言われてきた軽量コンクリートの耐久性改善に貢献し幅広い材料設計の一助になると思われる。

本研究では、超軽量骨材を使用した軽量コンクリートの破壊性状について、破壊エネルギーとマイクロクラックの発生を関連づけて考察した。また、破壊エネルギーの改善方法についても考察を加えた。

2. 超軽量骨材(高品質軽量骨材)について

超軽量骨材¹⁾とは、従来の膨張頁岩などを主原料にした人工軽量骨材に比べて吸水率が非常に小さく、かつ強度特性に優れた高品質な人工軽量骨材のことをいう。超軽量骨材としては流紋岩系の鉱物を主原料とし、絶乾比重は 0.8～1.2 のものが開発されている。本研究で使用した超軽量骨材は、絶乾比重が 0.85 程度のもので、微粉碎した真珠岩に発泡材、保形材などを混合した原料を高密度造粒し、中温焼成で焼結させた後、高温焼成で発泡させて製造したものである。この製造方法により、骨材中に微細な閉気孔を形成させることが可能となり、骨材の吸水特性および強度特性が改善されている。

3. 実験概要

3.1 使用材料

コンクリートに使用した材料を表 1 に示す。セメントには早強ポルトランドセメント、骨材には細骨材、粗骨材ともに普通骨材あるいは超軽量骨材を使用した。また、混和剤には高性能 AE 減水剤ならびに AE 助剤を使用した。

*1 日本セメント(株) 中央研究所 建材研究部 副主任研究員 工修 (正会員)

*2 日本セメント(株) 中央研究所 建材研究部 主席研究員 工博 (正会員)

*3 日本セメント(株) 中央研究所 建材研究部 研究員 工修 (正会員)

*4 日本セメント(株) 中央研究所 建材研究部 主任研究員 工修 (正会員)

表 1 使用材料

使用材料	種類	記号	物性または成分
セメント	早強ポルトランドセメント	C	比重:3.12, 比表面積:4490cm ² /g
細骨材	普通細骨材(青梅産砕砂)	S1	表乾比重:2.62, 吸水率:1.63%, 粗粒率:3.07
	超軽量細骨材	S2	表乾比重:1.19, 24h 吸水率:12.0%, 粗粒率:3.08
粗骨材	普通粗骨材(青梅産砕石)	G1	表乾比重:2.64, 吸水率:0.74%, 粗粒率:6.51, 最大寸法:15mm
	超軽量粗骨材	G2	表乾比重:0.89, 24h 吸水率:4.08%, 粗粒率:6.44, 最大寸法:15mm
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	主成分:ポリカルボン酸エーテル系複合体
	AE 助剤	AE	主成分:変性アルキルカルボン酸化合物

表 2 コンクリートの配合

番号	比重	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						SP (C×%)	AE (C×%)
					W	C	S1	S2	G1	G2		
1	2.3	60.0	46.5	5	181	302	818	—	943	—	1.05	0.002
2	1.7	42.4	47.0	5.0	165	389	826	—	—	312	0.90	0.002
3	1.2	32.0	46.0	5.0	151	472	—	352	—	312	0.75	0

3.2 配合

コンクリートの配合を表 2 に示す。コンクリートは、普通コンクリート(比重:2.3)、軽量 1 種コンクリート(比重 1.7)および軽量 2 種コンクリート(超軽量, 比重 1.2)とし、いずれのコンクリートも目標圧縮強度を 40MPa とした。

3.3 破壊エネルギーの測定試験

破壊エネルギーの測定は、RILEM の「切欠き梁の 3 点曲げ試験によるモルタルならびにコンクリートの破壊エネルギーの測定(Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of Three-point Bend Tests on Notched Beams)」に準じて実施した。

(1) 供試体

供試体は、図 1 に示すような中央部に切欠きがある梁状供試体とした。供試体の大きさは、高さ 200×幅 100×長さ 1200mm で、中央部に 100mm の深さの切欠きを有するものである。載荷スパンは 1130mm とし、切欠き上部から載荷を実施した。

なお、圧縮強度およびヤング係数は JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に、引張強度は JIS A 1113 「コンクリートの引張強度試験方法」にそれぞれ準じて測定した。

(2) 養生

供試体は脱型後、曲げ試験直前まで 20±2℃の実験室にて湿封養生を実施した。

(3) 載荷方法および測定方法

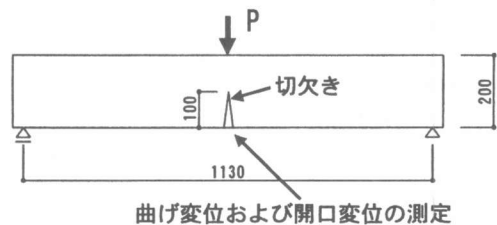


図 1 試験体および載荷試験の概要

載荷は、変位制御型のアクチュエータを有する試験機を用いて 3 点曲げ載荷を実施した。

また、載荷時にはアコースティックエミッション(AE)法を利用し、発生する AE 波形からひび割れの発生位置、ひび割れのタイプおよび発生パターンを測定した。

AE 波形計測時の AE センサーの配置位置は、切欠き上部付近を囲む形で配置した。AE 波形は、AE 波形収録装置を用いて 6 チャンネル同時に収録し、収録した波形からモーメントテンソル解析を実施し、AE 発生位置およびひび割れのタイプを求めた。AE はしきい値を 60dB としてデータの収録を行った。

(4) 破壊エネルギー

破壊エネルギーは(1)式を用いて計算した。

$$G_F = \frac{W_0 + mg \cdot \delta_0}{A_{lig}} \quad (\text{N/m}) \quad (1)$$

ここで、 G_F : 破壊エネルギー(N/m)、 W_0 : 荷重変位曲線下の面積(N・m)、 m : 支点間の梁の重さ(kg)、梁重量に載荷スパンと供試体の長さの比をかけて

表3 超軽量コンクリートの強度性能

養生方法(材齢)	蒸気養生(1日)	水中養生(28日)
比重	1.22	1.27
圧縮強度(MPa)	33.1	35.5
曲げ強度(MPa)	2.73	4.01
せん断強度(MPa)	3.07	3.31
引張強度(MPa)	1.55	1.99
ヤング係数(GPa)	11.6	12.9
脆度係数 (圧縮/引張)	21.4	17.8

計算, g : 重力加速度(m/sec^2), δ_0 : 梁の破断時の変位(m), A_{lig} : はりの破断部分の面積(m^2).

4. 実験結果および考察

4.1 超軽量コンクリートの力学特性

表3は, 実験室レベルで行った細骨材・粗骨材ともに超軽量骨材を使用した圧縮強度35MPaの超軽量コンクリートの物性をまとめたものである。普通コンクリートの脆度係数(圧縮強度/引張強度)が12程度である²⁾のに対し, 超軽量コンクリートは17~21と大きい値となっている。このように, 圧縮強度が35MPa以上の軽量コンクリートになると, 引張強度は圧縮強度に比例して増大せず, 頭打ちの状態になることが一般的に知られている^{3),4)}。また, 圧縮強度試験および引張強度試験を行った供試体の破断面を観察すると, 普通コンクリートの場合では破壊がモルタル自体ならびにモルタル部と粗骨材の界面に発生するひび割れから生じる⁵⁾のに対し, 超軽量コンクリートの場合はモルタル部だけでなく粗骨材自体にもひび割れが発生し, それらが連結して破壊に至ることがわかった。すなわち, 粗骨材自体が引張に対して破壊を起こしている。

次にヤング係数であるが, 超軽量コンクリートでは, 同等の圧縮強度を有する普通コンクリートに比較してかなり小さい。コンクリートのヤング係数は, 圧縮強度および比重ときわめて密接な関係があり, 一般に次式の形で表される²⁾。

$$E_c = \frac{1}{2.34} \times 10^{0.5} \cdot \rho^{1.5} \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (2)$$

ここに, E_c : コンクリートのヤング係数(GPa),
 ρ : 比重, σ_c : 圧縮強度(MPa)。

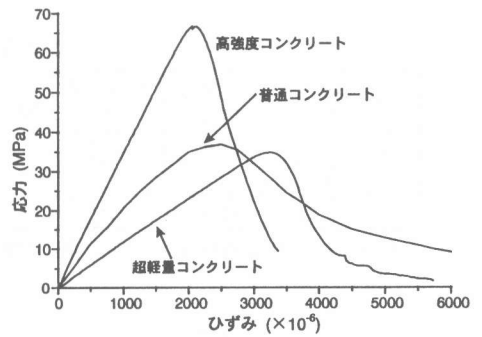


図2 コンクリートの応力-ひずみ曲線

この式が示すように, コンクリート強度が一定のとき, コンクリートのヤング係数 E_c はコンクリート比重 ρ の関数であるといえ, 超軽量コンクリートにおいてもこの関係がほぼ成立し, ヤング係数は比重の低下とともに低下する。

図2は, 圧縮強度時の応力-ひずみ曲線の一例を示したものである。この図より, 超軽量コンクリートの応力-ひずみ曲線は, 同強度の普通コンクリートに比べて圧縮強度付近まで直線な関係を示すことがわかる。これは, 超軽量コンクリートは, モルタル部より粗骨材部の弾性係数が小さくモルタル部分の挙動に依存することによる。一方, 超軽量コンクリートの応力下降域の勾配は大きく, 急激な破壊を示すことがわかる。これは, 高強度コンクリートの場合とよく似た現象であり, 粗骨材と母材マトリックスの力学性状が近いとき粗骨材自体が破壊し, ひびわれの進展を阻止する効果が減ぜられるために生じると考えられる。これにより, 超軽量コンクリートの破壊はぜい性的な破壊となる。

4.2 RILEM の破壊エネルギー試験

表4は, RILEM の破壊エネルギー試験を行った際の各コンクリートの物性をまとめたものである。コンクリートの比重はそれぞれ目標値を満足した。しかし, 圧縮強度は目標値40MPaに対して, 比重1.2の超軽量コンクリートでは目標値を満足したが, 比重1.7および2.3のコンクリートは若干大きめの値となった。

引張強度およびヤング係数に関しては4.1節に記した結果と同様に, 比重が小さくなるにつれて

表 4 使用したコンクリートの物性

番号	比重	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	脆度係数 (圧縮/引張)	ヤング係数 (GPa) *1	破断時の変位 (mm)	破壊エネルギー (N/m)
1	2.36	50.6	4.20	12.0	28.4 (34.8)	1.27	167.2
2	1.73	47.1	2.56	18.4	19.2 (21.1)	0.27	35.9
3	1.29	39.1	1.91	20.5	13.9 (12.4)	0.22	27.4

[注] *1: () 内の数値は式(2)から計算した値

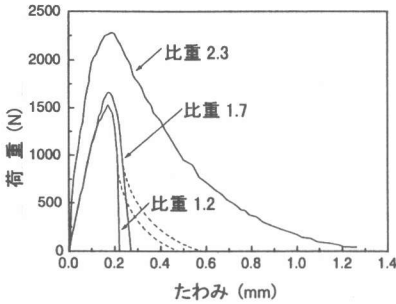


図 3 荷重－たわみ曲線

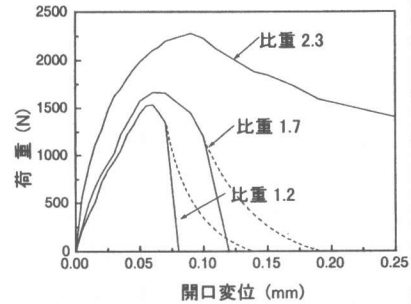


図 4 荷重－開口変位曲線

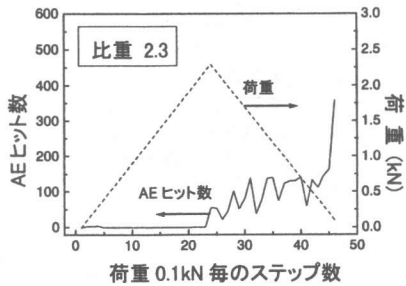
脆度係数(圧縮強度／引張強度)が増加し、ヤング係数が低下する結果となった。

図 3 および図 4 は試験時に測定した荷重－たわみ曲線および荷重－開口変位曲線を示したものである。普通コンクリート(番号 1)では、荷重－たわみ曲線、荷重－開口変位曲線ともに応力下降域まで計測でき、既往の研究⁹⁾で測定されているものと同様の結果が得られた。しかし、超軽量骨材を使用したコンクリート(番号 2 および 3)では、最大荷重以降急激な破壊を起こし、圧縮試験時の応力－ひずみ関係と同様にぜい性的な性状を示した。実際の変形挙動は、図中の波線に示すような形であると予想されるが、試験機の実験能力の限界からの急激な破壊のため測定できず、実線のような挙動となった。表 4 に示した番号 2 および 3 の破断時の変位および破壊エネルギーの値は、実線で示された値を使用して求めているため、実際の値よりも小さく評価されている。その値は、普通コンクリートの値と比較して 1/4～1/6 と小さくなった。超軽量粗骨材を使用したコンクリートでは、比重レベルが異なっても破壊エネルギーがほとんど増加せず、骨材の破壊が、破壊エネルギーの値に大きく影響を及ぼしていると考えられる。すなわち、破壊が主体となるような破壊状態においては、普

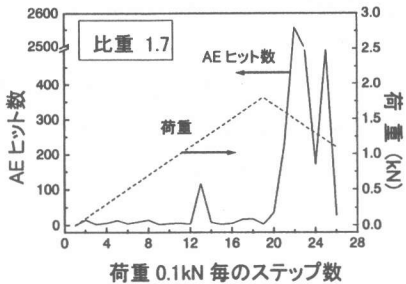
通骨材を使用したコンクリートと超軽量骨材を使用したコンクリートでは、破壊のメカニズムが違ふことが考えられる。普通粗骨材を使用した場合には、粗骨材のヤング係数および強度は、モルタル部分より大きい。これにより、引張応力を受けた場合、マイクロクラックのほとんどはモルタル部分あるいは骨材との界面に発生し、粗骨材を迂回する形でひび割れが進展する。これに対して、軽量粗骨材を使用した場合には、粗骨材のヤング係数および強度がモルタル部分と同程度あるいは小さくなる場合もある。これにより応力を受けた場合、マイクロクラックはモルタル部分と骨材部分に同時に発生、あるいは粗骨材部分のほうが先に発生すると考えられる。

図 5 は、荷重と AE 発生頻度の関係を示したものである。x 軸には荷重 0.1kN の増減を 1 ステップとしたステップ数を、y 軸には 1 ステップ毎の荷重および AE ヒット数を示している。

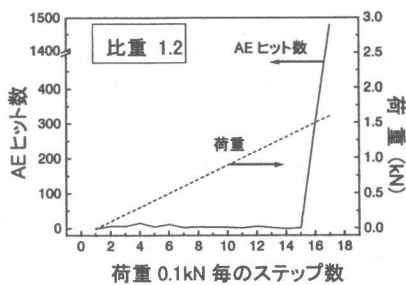
普通コンクリート(比重 2.3)の場合、圧縮応力下での挙動⁹⁾と同様に最大荷重付近まで AE はほとんど発生していない。多くの AE は、最大荷重以降の応力下降域に発生していることがわかる。これに対して、超軽量骨材を使用したコンクリートでは、最大荷重に達する直前あるいは直後に急激に



(a)普通コンクリート(比重 2.3)



(b)軽量コンクリート(比重 1.7)



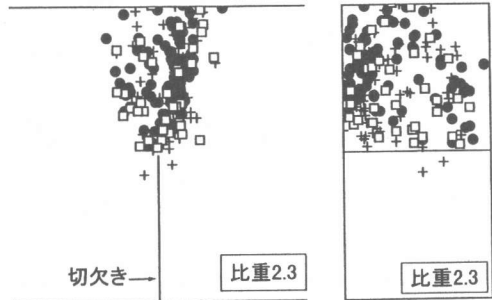
(c)軽量コンクリート(比重 1.2)

図5 荷重とAEの発生頻度の関係

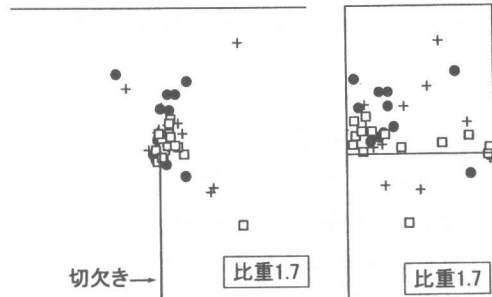
AEが発生している。これらの関係は、図3の変形挙動と同様であり、上述した破壊過程を裏付けるデータの一つと成り得る。

図6は、AEモーメントテンソル解析⁷⁾によって得られたマイクロクラックの発生位置とその破壊モードを示したものである。図中の●は引張クラック(引張成分60%以上)、+はせん断クラック(せん断成分60%以上)、□は混合クラック(引張およびせん断成分40~60%)を示す。

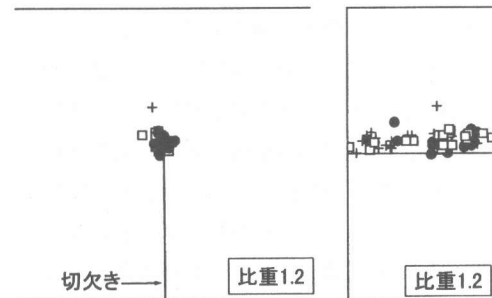
普通コンクリートの場合には、切欠き上部からはり上端部まで断面全体にわたってマイクロクラックの発生が測定され、切欠き上部に塑性域が形



(a)普通コンクリート, 比重 2.3 (側面図および断面図)



(b)軽量コンクリート, 比重 1.7 (側面図および断面図)



(c)軽量コンクリート, 比重 1.2 (側面図および断面図)

図6 供試体切欠き付近のモーメントテンソル解析結果 (●:引張クラック, +:せん断クラック, □:混合クラック)

成されていることがわかる。これに対して、超軽量骨材を使用したコンクリートでは、切欠き直上部にマイクロクラックの発生が集中している。これは、延性破壊を示すものはAEをよく検出することができるが、ぜい性破壊を示す材料ではAEの発生頻度はかなり少なくなる⁷⁾からである。このことから、引張を受ける応力下においては、普通コンクリートではマイクロクラックが粗骨材を迂回して分散して発生するのに対して、超軽量骨材を使用したコンクリートでは、最大荷重に達する直前から急激にマイクロクラックの発生が始まり、骨材とモルタル部分のクラックが一気に連結

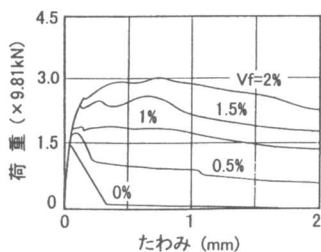


図7 繊維量(Vf)を変化させた場合の荷重-たわみ曲線⁸⁾

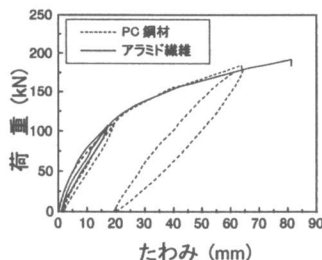


図8 超軽量コンクリートPC桁の荷重-たわみ曲線

・試験体の概要
 支点間距離: 7000mm
 載荷点距離: 1000mm
 断面寸法: 300×650mm
 $F_c=30\text{MPa}$, $\rho=1.25$
 プレストレス導入量: 80~110kN

して破壊に至ったことが AE 法からも確認することができた。

5. 破壊性状改善の対策

当初、超軽量コンクリートの力学上の問題点として、圧縮強度を増加させても普通コンクリートほどヤング係数が増加しないことが考えられたが、破壊エネルギーも小さくなることが明らかとなった。破壊エネルギーを向上させるためには、骨材製造段階で骨材自身の引張強度を増加させるか、モルタル部分を繊維などで補強して引張強度を増加させてコンクリートとする必要があると考えられる。図7は、 $10\times 10\times 40\text{cm}$ の供試体で鋼繊維を混入したコンクリートの荷重-変位曲線を示した例⁸⁾である。このような補強を行えば軽量コンクリートについても破壊エネルギーを増加させることが可能であると思われる。

なお、ミクロ的な視点から考察を行ったが、図8に示すような比重0.85の超軽量粗骨材を使用した比重1.2で圧縮強度 35MPa の超軽量コンクリートPC桁の曲げ試験結果によれば、最終破壊直前に圧縮縁近傍において、上述したような骨材の割裂を起こしたが、通常の使用限界状態では、特に破壊性状が劣るということにはなかった。

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1)超軽量コンクリートは、比重の低下とともに脆度係数が増加し、ヤング係数が低下する。
- (2)超軽量骨材を使用したコンクリートは、普通コンクリートと比べ破壊エネルギーが低下し、ぜ

い性的な破壊をする。これは、マイクロクラックの発生パターンの相違によるところが大きい。しかし、この骨材を用いた軽量コンクリート製のPC単純梁の曲げ性状は、通常のコンクリートの場合に近いものであった。

[参考文献]

- 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)Neville, A. M. : Properties of Concrete (後藤幸正，尾坂芳夫監訳：コンクリートの特性)，技法堂出版，1979
- 3)西岡思郎，江口勇，国本公瑞：軽量骨材を用いたコンクリートの研究，セメント技術年報，18，pp.478-486，1964
- 4)西林新蔵，小林和夫，小野紘一：人工軽量骨材コンクリートに関する1，2の研究-とくに強度特性および変形特性-，セメント技術年報，19，pp.464-471，1965
- 5)岡田清編：最新コンクリート工学，オーム社，1986
- 6)破壊力学の応用研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1993.10.
- 7)大津政康：アコースティックエミッションの特性と理論，1988
- 8)魚本健人，西村次男：鋼繊維補強コンクリートのタフネス評価方法，セメント技術年報，36，pp.408-411，1982