

論文 高性能軽量骨材を使用したコンクリートの破壊時のマイクロクラック発生挙動に関する研究

柴田 辰正*¹・石川 雄康*²・荒井 利奈*³・岡本 享久*⁴

要旨: 近年, 絶乾比重が 0.8~1.2 で吸水率が非常に小さく, 強度特性に優れた高性能軽量骨材が開発されている。本研究では, この高性能軽量骨材を使用したコンクリートの破壊性状について, マイクロクラックの発生挙動と破壊エネルギーから実験的および解析的に検討を加えた。その結果, 高性能軽量骨材を使用したコンクリートは, 骨材内部および周辺部の応力状態が普通コンクリートと異なり内部に引張型クラックが発生し, これらとモルタルクラックが破壊時に連結し, ぜい性的な破壊をすることがわかった。しかし, 粗骨材自体の強度を増加させることで破壊性状を改善できることが, AE 法や引張軟化挙動から検証できた。

キーワード: 高性能軽量骨材, 軽量コンクリート, マイクロクラック, 破壊エネルギー, 引張軟化

1. はじめに

高性能軽量骨材(超軽量骨材¹⁾)は, 微細な独立気孔を有し, 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性能な人工軽量骨材のことをいう。現在, 絶乾比重が 0.8~1.2 のものが開発されている。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。

本研究では, この高性能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, マイクロクラックの発生挙動と引張軟化挙動について実験的および解析的に検討を加えた。コンクリートの引張軟化挙動を検討することは, コンクリート構造物の破壊現象を究明することとなり, 新しい軽量コンクリートの構造用コンクリートとしての有効性を示すことに役立つと考える。

2. 実験概要

2.1 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, 骨材には軽量細骨材, 普通細骨材(砕砂), 高性能軽量粗骨材 2 種類(0.85 品および 1.2 品)および普通粗骨材(砕石)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。

2.2 配合

コンクリートの配合を表 2 に示す。コンクリートの種類は, 表に示すように普通コンクリート(W/C=60%, 35%), 軽量 1 種コンクリート(高性能軽量粗骨材 0.85 品(HL1), 1.2 品(HL2)をそれぞれ使用), 軽量 2 種コンクリート, 普通モルタルおよび軽量モルタルとした。

2.3 圧縮応力下のマイクロクラック進展

圧縮応力下におけるマイクロクラックの測定は, $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の供試体を用い, JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」に準じて, 高剛性試験機を使用して行った。実験時には圧縮強度およびヤング係数, 並びに割裂引張強度を JIS に準じて測定した。

*1 太平洋セメント(株) 清澄研究所 超軽量コンクリート技術グループ 副主任研究員 工修 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 清澄研究所 超軽量コンクリート技術グループ リーダー 工修 (正会員)

*3 芝浦工業大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

*4 太平洋セメント(株) 清澄研究所 ゼネラル・マネージャー 工博 (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
	軽量細骨材	S2	絶乾比重:1.06, 24h 吸水率:12.0%, 粗粒率:3.08
粗骨材	普通粗骨材(青梅産碎石)	G1	表乾比重:2.64, 吸水率:0.74%, 粗粒率 6.51, 最大寸法:15mm
	高性能軽量粗骨材	HL1	絶乾比重:0.86, 24h 吸水率:4.08%, 粗粒率:6.44, 最大寸法:15mm, 圧壊強度 ¹⁾ :1120N
	高性能軽量粗骨材	HL2	絶乾比重:1.19, 24h 吸水率:1.80%, 粗粒率:6.45, 最大寸法:15mm, 圧壊強度 ¹⁾ :1610N
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

[注]1)圧壊荷重とは、直径 14mm の骨材の 1 軸載荷試験時の破断荷重

表 2 コンクリートの配合

コンクリートの種類	記号	比重	W/C (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m³)							SP (C×%)	AE (C×%)
						W	C	S1	S2	G1	HL1	HL2		
普通モルタル	NM	2.3	60	—	5.0	283	471	1279	—	—	—	—	1.05	0.002
普 通	N35	2.3	35	46.0	5.0	150	429	799	—	945	—	—	1.05	0.002
	N60	2.3	60	46.5	5.0	181	302	819	—	950	—	—	1.05	0.002
軽量1種	L35	1.8	35	46.0	5.0	150	429	799	—	—	—	422	0.8	0.002
	L08	1.7	42	47.0	5.0	165	389	813	—	—	301	—	0.8	0.002
	L12	1.8	42	47.0	5.0	165	389	813	—	—	—	414	0.8	0.002
軽量モルタル	LM	1.5	32	—	5.0	232	726	—	485	—	—	—	1.5	0
軽量2種	L2	1.2	32	46.0	5.0	151	472	—	316	—	311	—	1.5	0

[注]なお、軽量骨材は 24 時間吸水させて使用。

なお、載荷試験時には AE(アコースティックエミッション)法により AE 波形の測定を行った。AE センサーは 150kHz 共振型を使用し、図 1 に示すようにコンクリート供試体に取り付けた。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²⁾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。

2.4 破壊エネルギーの測定試験

(1)試験の概要

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」に準じて実施した。

供試体は、図 2 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

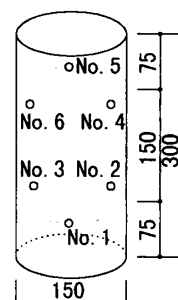
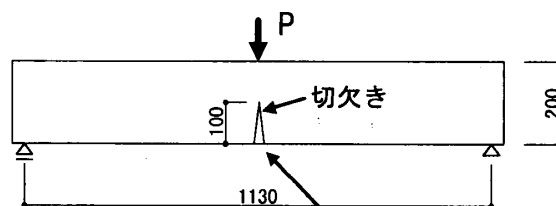


図 1 圧縮試験時の AE センサ位置



曲げ変位および開口変位の測定

図 2 試験体および載荷試験の概要

を実施した。

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。

(2)載荷方法および測定方法

載荷は、変位制御型のアクチュエータを有す

表 3 各コンクリートの力学的性状

コンクリートの種類(記号)	NM	N35	N60	L35	L08	L12	LM	L2
比重	2.33	2.44	2.38	1.85	1.73	1.87	1.52	1.31
圧縮強度 (N/mm ²)	72.2	96.4	42.5	59.4	43.0	56.9	42.3	36.6
引張強度 (N/mm ²)	4.3	6.7	3.5	4.1	2.3	3.6	3.5	2.2
ヤング係数 (kN/mm ²)	31.0	39.1	33.3	23.2	17.7	21.9	15.4	13.1
脆度係数(圧縮強度/引張強度)	16.8	14.3	12.2	14.5	18.9	15.9	12.0	16.6
最大曲げ荷重 (N)	—	4231	2221	2116	1641	1871	—	1194
破断時の変位 (mm)	—	0.90	1.41	0.52	0.46	0.52	—	0.22
破壊エネルギー (N/m)	—	149.7	163.9	54.2	43.3	52.9	—	19.7

る試験機を用いて 3 点曲げ载荷を実施した。

また、载荷時には圧縮試験時と同様に AE 法によるモーメントテンソル解析により、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同定した。測定時の 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。

(3)破壊エネルギー

破壊エネルギーは式(1)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)、梁重量に载荷スパンと供試体の長さの比をかけて計算、 g ：重力加速度(m/sec²)、 δ_0 ：梁の破断時の変位(m)、 A_{lig} ：はりの破断部分の面積(m²)。

(4)引張軟化曲線

引張軟化曲線は、RILEM の破壊エネルギー試験を実施する際に測定した荷重－開口変位関係を用いて、試験体中央に仮想ひび割れモデルを組み込んだ有限要素用いた多直線近似解析^{3),4)}により推定した。

3. 実験結果および考察

3.1 高性能軽量骨材を使用した軽量コンクリートの力学特性

表 3 は、今回実施した軽量コンクリートの力学的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が 12 程度であるのに対し、高性能軽量コンクリートは 16～19 と大きい値とな

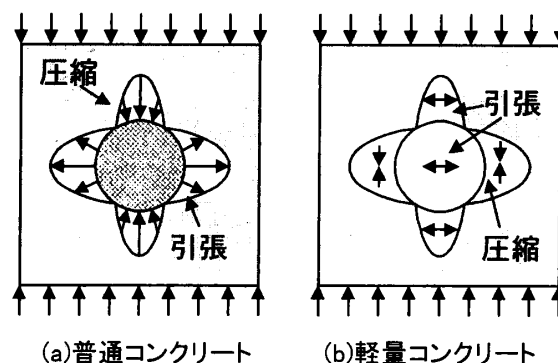
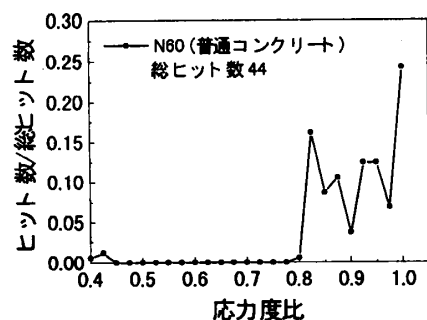


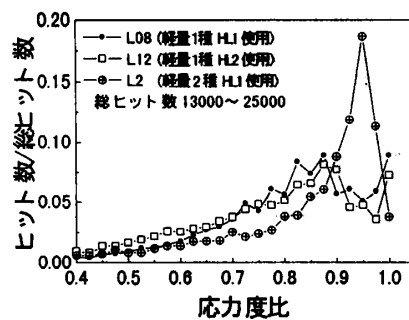
図 3 骨材周辺の応力分布

った。このように、高強度な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⁵⁾。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のに対し、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、図 3⁶⁾に示すような応力状態となり、粗骨材自体に引張応力が生じ、破壊を起こしている。しかし、この傾向は同じ高性能軽量骨材でも比重 1.2 の HL2 を使用した場合、すなわち骨材自体の強度が増大すれば改善されている。すなわち、比重 0.85 の HL1 を使用したコンクリートでは、ほぼ 100% の粗骨材が破断時に割裂しているが、HL2 を使用した場合には約 40% の粗骨材が破断せずに、ひび割れが骨材を迂回していることが観察された。これに伴い、圧縮強度も増大している。

次にヤング係数であるが、コンクリートのヤ

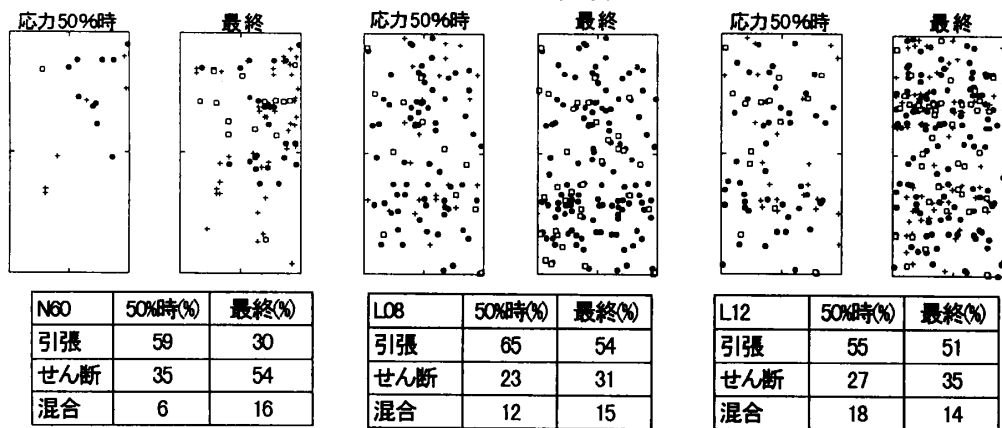


(a) 普通コンクリート



(b) 軽量コンクリート

図 4 AE 発生頻度



(a) 普通コンクリート

(b) 軽量 1 種 (HL1 使用)

(c) 軽量 1 種 (HL2 使用)

図 5 モーメントテンソル解析結果(圧縮)

ング係数は、圧縮強度および比重の関数であるといえ、高性能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。

3.2 圧縮応力下のマイクロクラック進展

圧縮応力下における AE ヒット数と応力の関係を図 4 に示す。普通コンクリートでは最大応力付近まではほとんど AE が発生せず、その後急激にヒット数の増加がみられるのに対して、軽量コンクリートでは初期から多くの AE が発生していることがわかる。

図 5 は、AE モーメントテンソル解析によるひび割れのタイプとひび割れ発生位置の推定結果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。普通コンクリートでは、応力 50%付近までは、ほとんど AE が測定されず、最終的にはせん断クラックが 50%以上観察されている。これに対して、軽

量コンクリートでは、初期から多くの引張クラックが発生し、最終的には引張クラックが 50%以上観察された。この傾向は、HL2 を使用した場合よりも HL1 を使用した場合のほうが顕著に現れている。すなわち、図 3 に示すようなコンクリート中における骨材周辺の応力状態の違いによる結果が現れている。これは、破断面の骨材の破損状況からもわかる。

3.3 RILEM の破壊エネルギー試験

RILEM の破壊エネルギー試験による結果を表 3 に併記した。普通コンクリートに比べて、軽量コンクリートでは、破断時の変位および破壊エネルギーの値は、普通コンクリートの値と比較して小さく破壊エネルギーは 1/4~1/6 の値となった。高性能軽量粗骨材を使用したコンクリートでは、コンクリートの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。

図 6 および図 7 は試験時に測定した荷重-た

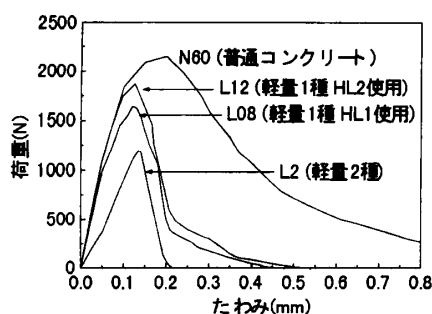


図6 荷重-たわみ関係

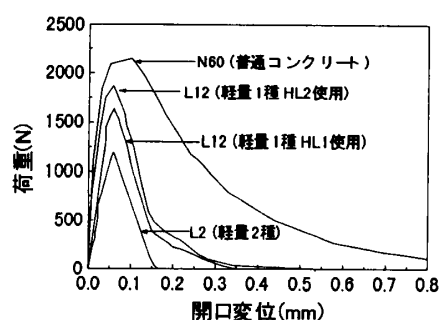


図7 荷重-開口変位関係

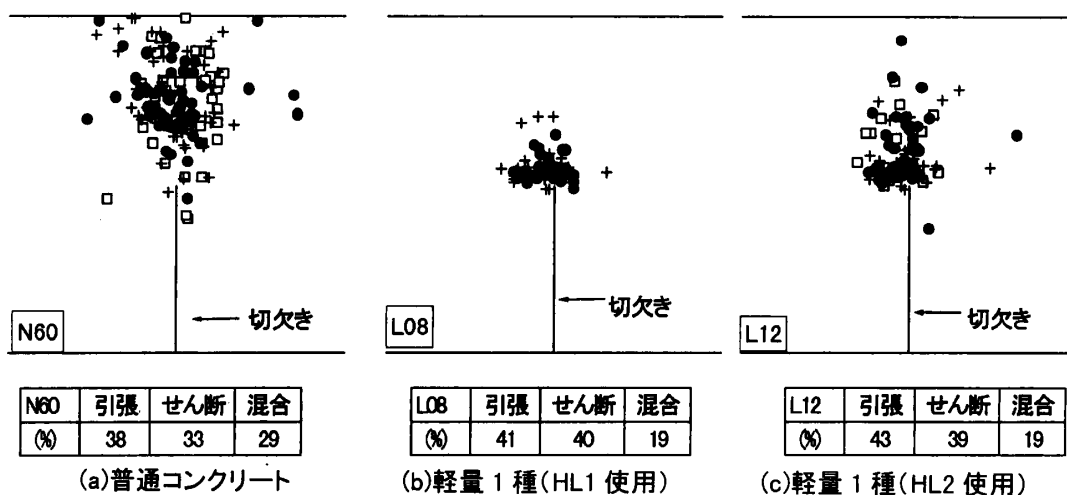


図8 モーメントテンソル解析結果(切り欠き梁)

わみ曲線および荷重-開口変位曲線を示したものである。普通コンクリートでは、荷重-たわみ曲線、荷重-開口変位曲線ともに既往の研究⁷⁾で測定されているものと同様の結果が得られた。すなわち、普通骨材を使用したコンクリートと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うことが考えられる。普通粗骨材を使用した場合には、引張応力を受けると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、粗骨材自体が割裂し、モルタル部分と粗骨材部分に貫通した破壊となる。L12 (HL2 使用) で破壊エネルギーが大きくなるのは、骨材強度の増加のため、破断面の30%の粗骨材付近においてひび割れが骨材を貫通せずに迂回しているためである。

図8は、AE モーメントテンソル解析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観察され、切欠き上部に塑性域が形成されていることがわかる。これに対して、高性能軽量骨材を使用したコンクリートでは、より軽量の粗骨材を使用したものほど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²⁾からである。このことから、引張応力下においては、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、高性能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して破壊に至ったこと

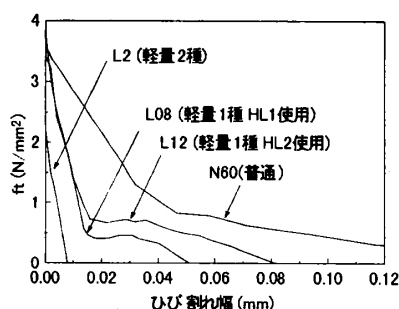


図9 引張軟化曲線の推定結果

が確認することができた。

3.5 引張軟化挙動

図9は、多直線近似法により推定した引張軟化曲線の一例である。引張軟化挙動には軽量骨材の強度がそのまま影響を及ぼし、強度の高いもののほど優れた軟化挙動を示すことがわかる。

図10は、引張軟化曲線を無次元化したものである。普通および軽量1種コンクリートでは推定した引張軟化曲線は1/4モデルに近い形を示したが、軽量2種コンクリートでは、直線モデルに近い形となった。

一般にコンクリートのひび割れ発生挙動は、破壊のメカニズムすなわち、ひび割れが骨材を迂回しながら進むのかあるいは骨材を貫通しながら進むのかによって大きく異なることが知られている。今回使用した軽量骨材についても同じことが言える。すなわち、比重0.85のHL1を使用した場合に比較して、比重1.2のHL2を使用した場合には、破壊に関する結果すべてにおいて優れていることからわかる。破壊性状は、粗骨材の強度性状が良くなることで改善されている。

今後も軽量コンクリートの引張軟化挙動については検討を深め、コンクリート構造物の破壊、特にせん断破壊に対して引張軟化挙動の検討のような破壊力学を適用していくことはせん断破壊の理論的定式化に対して非常に重要なことであると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1)高性能軽量骨材を使用したコンクリートは、

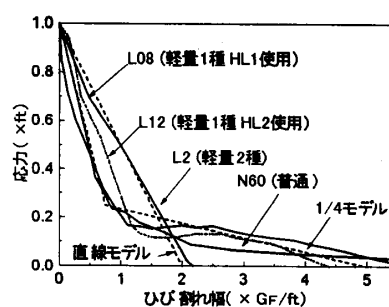


図10 無次元化した引張軟化曲線

普通コンクリートと比較して圧縮応力下において骨材内部および周辺における応力状態が異なり、骨材内部に引張型のマイクロクラックが発生し、これらとモルタルクラックが破壊時に連結してぜい性的な破壊をする。

- (2)高性能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する。
- (3)これらの傾向は、比重1.2の高性能軽量粗骨材を使用することで改善され、破壊性状に優れた構造用コンクリートとして適用できる可能性がある。

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)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
- 3)橋高義典, 上村克郎, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No.453, pp.15-25, 1993.11
- 4)栗原哲彦, 安藤貴宏, 国枝稔, 内田裕市, 六郷恵哲: 多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ性状, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.119-129, 1996.2
- 5)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
- 6)岡田清編: 最新コンクリート工学, オーム社, 1986
- 7)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