

# 論文 超軽量骨材を用いたコンクリートのマイクロクラック発生過程に関する研究

早野 博幸\*<sup>1</sup>・柴田 辰正\*<sup>2</sup>・岡本 享久\*<sup>3</sup>・石川 雄康\*<sup>4</sup>

**要旨：**超軽量骨材を用いたコンクリートの一軸圧縮応力、割裂引張応力下でのマイクロクラックの発生による破壊現象をAEによって検出し、その特性について検討した。その結果、圧縮応力下でのマイクロクラック発生過程は応力の初期段階から多数発生して最大応力付近ではAEによるエネルギーが急増し、普通コンクリートとは異なる傾向を示した。また、初期段階には軽量骨材およびその界面でマイクロクラックは多数発生すると考えられ、その後高強度ペースト部が急激に破壊する脆性的な破壊特性を示した。割裂引張応力下では、最大応力以前にAEによるエネルギーが急増する変極点がみられた。

**キーワード：**超軽量骨材, 軽量コンクリート, AE, マイクロクラック, 破壊挙動

## 1. はじめに

コンクリートの破壊挙動は、マイクロクラックと呼ばれる微細なひびわれの発生、進展、連結の過程に起因するものである。コンクリート工学においても、破壊現象を解明する重要性が認識されるようになってきており、そのためにはマイクロクラックによる微視的な構造変化を連続的に検証する必要がある。それを可能とする方法として、微小破壊に伴い発生する弾性波(AE波)を理論解析することが有効な手段とされている。

近年、さらなる高機能化を追求し多種多様化していくコンクリートであるが、軽量高強度化に関する技術では、骨材に従来とは異質な新たな超軽量骨材を用いることで高強度、高耐久

性を付与している<sup>1)</sup>。このような新規材料においては一般的な強度特性から前述した破壊機構についてまで十分な検討が必要となってくる。

本研究では、超軽量骨材を用いた軽量コンクリートの一軸圧縮応力下ならびに割裂引張応力下におけるマイクロクラック発生過程を中心とした破壊現象をAEの発生挙動によって検出し、普通コンクリートと比較しながらその特性について明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 コンクリート供試体

本実験に用いたコンクリート供試体は、表1に示す材料を使用し、表2の調合に基づいて作製した。本研究では、コンクリート種類の違い

表1 使用材料

使用材料	記号	種類	物性または成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント	比重:3.12, 比表面積:4490cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S1	普通細骨材(青梅産砕砂)	表乾比重:2.62, 吸水率:1.63%, 粗粒率:3.07
	S2	超軽量細骨材	表乾比重:1.19, 24h吸水率:12.0%, 粗粒率:3.08
粗骨材	G1	普通粗骨材(青梅産碎石)	表乾比重:2.64, 吸水率:0.74%, 粗粒率:6.51, 最大寸法:15mm
	G2	超軽量粗骨材	表乾比重:0.83, 24h吸水率:4.08%, 粗粒率:6.44, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	主成分:ポリカルボン酸エーテル系複合体
	AE	AE 助剤	主成分:変性アルキルカルボン酸化合物

\*1 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)

\*2 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)

\*3 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)

\*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 2 コンクリートの調査

コンクリートの種類	比重	W/C (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単位置 (kg/m <sup>3</sup> )						SP (C×%)	AE (C×%)
					W	C	S1	S2	G1	G2		
軽量2種	1.2	32.0	46.0	5.0	151	472	—	352	—	312	0.75	0
軽量1種	1.6	42.4	47.0	5.0	165	389	826	—	—	312	0.90	0.002
普通	2.3	60.0	46.5	5.0	181	302	818	—	943	—	1.05	0.002

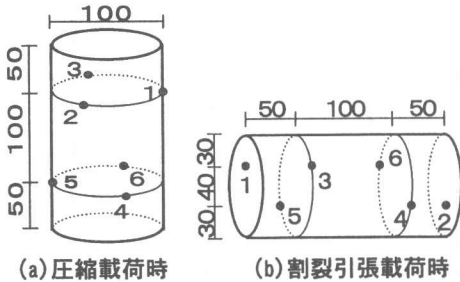


図 1 AE センサーの取り付け位置

による AE の発生状況についても明らかにするため、圧縮強度を同レベルとして比較できるように調査条件を設定した。また、骨材量についても影響が受けないう程度とした。

## 2.2 AE の測定方法

### (1) 圧縮載荷試験

圧縮応力下における AE の測定方法は、φ10×20cm 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。

### (2) 引張割裂載荷試験

割裂引張強度試験は、供試体寸法を φ10×20cm とし、JIS より直径を小さくしてセンサーによる AE の検出精度を高めた。

なお、AE センサーは 150kHz 共振型を使用し、モーメントテンソル解析を行うため図 1 に示すようにコンクリート供試体に取り付けた。計測条件については、プリアンプの増幅率は 40dB、しきい値を 60dB としてデータの収録を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 コンクリートの強度性状

コンクリートの強度性状を表 3 に示す。圧縮強度はどのコンクリートにおいても約 35 MPa となり、同一強度での比較が可能となった。

表 3 コンクリートの強度性状

コンクリートの種類	比重	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
軽量2種	1.22	35.8	13.0	1.81
軽量1種	1.64	34.2	17.5	2.12
普通	2.31	35.6	28.6	2.89

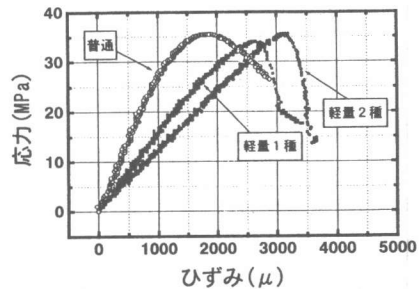


図 2 応力-ひずみ曲線

各コンクリートの応力-ひずみ曲線を図 2 に示す。コンクリートの破壊挙動はクラックの累積効果に起因しているため、応力-ひずみ曲線に現れる特異点と AE 発生頻度とは密接な関係がある<sup>2)</sup>。しかし、軽量 2 種コンクリートはほぼ線形性を示すために特異点は現れず、極めて脆性的な破壊が生じることがわかる。

### 3.2 圧縮応力下における破壊過程

#### (1) 破壊過程における AE の発生状況

各コンクリートの圧縮応力下における AE ヒット数と応力の関係を図 3 に示す。普通コンクリート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、軽量コンクリートは初期から AE は多く発生し、軽量 2 種では応力が 15MPa 以降、軽量 1 種では 27MPa 以降に一時的に減少し、さらにその後増加がみられ、傾向の違いが顕著に表れている。普通コンクリートでは応力初期のマイクロクラック発生数が少なく、破壊直前に急激にその数を増して破壊に至ることが検証さ

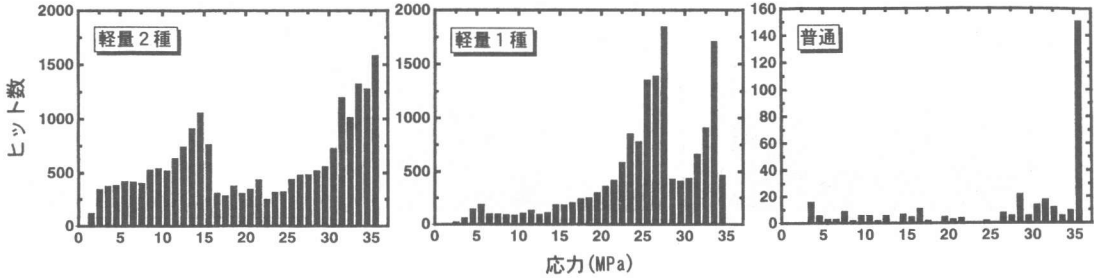


図3 AE ヒット数と応力の関係

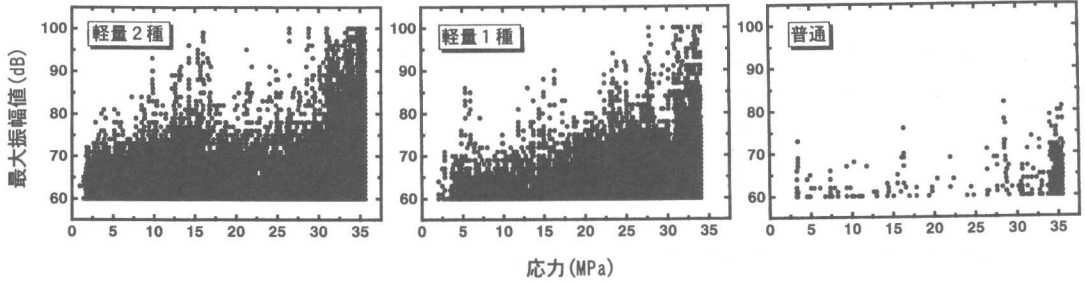


図4 AE の最大振幅値と応力の関係

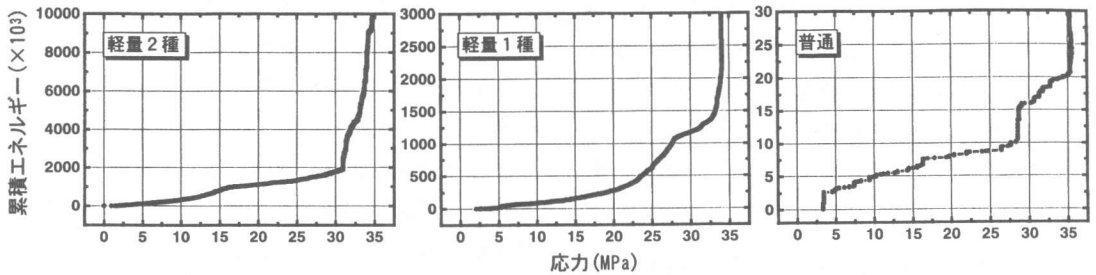


図5 AE による累積エネルギーと応力の関係

れているが<sup>3)</sup>、軽量コンクリートでは最大応力以前に多数発生したクラックが AE として検出されていることから、既にマイクロクラックが内部に多数存在しており、最大応力時にこれらのクラックが進展、連結され急激に破壊が生じるものと考えられる。

コンクリートの破壊状況と AE によるエネルギー(AE の包絡線検波形の面積)は特に密接な関係があり、エネルギーは AE の発生数だけでなく波形によってもその値は大きく変わってくる。各コンクリートの AE の最大振幅値と応力の関係を図4に示す。軽量コンクリートでは最大応力付近で振幅値が大きくなっているが、これは AE ヒット数と類似した傾向を示しており、マイクロクラックが多数発生するような状況ではそ

の時の振幅値も大きく、クラックによる AE エネルギーも増大することがいえる。

AE による累積エネルギーと応力の関係を図5に示す。軽量2種コンクリートでは AE によるエネルギーは最大応力付近で急増しているが、図3の AE ヒット数ではそれほど増えていないことから特に最大応力付近ではクラックのエネルギーが増大し、かなりの破壊が生じているといえる。一方、普通コンクリートでは軽量コンクリートに比べて最大応力付近での AE 発生数は増大しているが、エネルギーにおいては軽量コンクリートほど急激な増加はみられなかった。

AE エネルギーは AE 波形の立上がりから減衰するまでの継続時間によっても左右され、そこでマイクロクラックの特性を AE 波形から判断

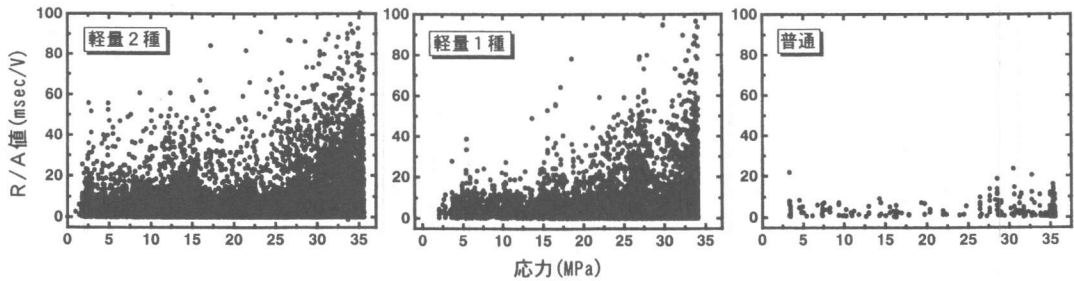


図6 RA値と応力の関係

できる可能性があるとしてされている RA 値<sup>4)</sup>(立上り時間(R)/最大振幅値(A))についても検討した。RA 値と応力の関係を図6に示す。RA 値は、せん断ひびわれが卓越すると考えられる場合にはその値が大きく、引張型では小さいことが確認されている<sup>4)</sup>。軽量2種では比較的応力の小さい範囲においてもRA値が大きいAEが検出されており、普通コンクリートとは破壊モードが異なるクラックが多く発生していると推察できる。

(2) 軽量コンクリートのマイクロクラック発生過程に関する考察

表4に小阪ら<sup>5)</sup>によるコンクリートの直接観察法によるマイクロクラックの発生過程を示す。

表4 マイクロクラックの発生過程<sup>5)</sup>

$\sigma/F_c$	軽量1種, W/C=0.35 (強度:粗骨材<モルタル)	普通, W/C=0.65 (強度:粗骨材>モルタル)
0	粗骨材下面にポンドクラック(弱点層)	粗骨材下面にポンドクラック(弱点層)
0.5	ポンドクラック進展開始	ポンドクラック進展開始
0.7	モルタルクラック発生 骨材クラック発生	モルタルクラック発生
0.9	モルタルクラックと骨材クラックが連結	モルタルクラックとポンドクラックが連結
1.0	長大な連続クラックの発生	試験体上端でのすべり破壊

$\sigma$ : 応力,  $F_c$ : 圧縮強度

これは、各応力域で発生するマイクロクラックの種類を直接観察することによって検証したもので、表によると従来の軽量骨材を用いた軽量1種コンクリートでは初期に粗骨材の界面にポンドクラックが発生し、その後、モルタルクラック、骨材クラックが発生する。破壊挙動に影響する各材料の強度の違いを考慮した場合、普

通、軽量1種コンクリートは粗骨材とモルタルの2相材料として考えればよい。しかし、軽量2種コンクリートではモルタル中にセメントペーストより脆弱な細骨材が存在するため、破壊過程を説明するためには3相材料として考える必要があり、ポンドクラック、骨材クラックは細骨材中にも発生することが予想される。特に軽量細骨材は粗骨材と比べた場合、強度およびヤング係数は小さく、その影響は大きくなることが予想される。

表4に示したように、1軸圧縮試験におけるクラックの発生過程については、骨材強度や表面の状況に関わらず初めに骨材の界面に圧縮・せん断破壊型のポンドクラックが発生するといわれているが、前述したRA値の大きいAEはそのポンドクラックから発生されている可能性があると思われる。軽量コンクリートと普通コンクリートでは骨材周辺の応力状態は異なり、普通骨材では圧縮載荷面と平行な部分では圧縮応力、それに垂直な部分では引張応力となる。一方、ヤング係数の小さい軽量骨材では変形しやすいためその逆となる<sup>6)</sup>。したがって、普通コンクリートと軽量コンクリートでは、前述したようにマイクロクラックの発生状況だけでなく微視的な破壊モードも異なることが考えられる。

超軽量骨材を使用したコンクリートが従来の軽量コンクリートと異なる点は、骨材クラックの発生過程である。従来の軽量骨材は内部組織が不均質なため欠陥となる脆弱部が存在し、その部分に応力が集中して骨材クラックが発生する。超軽量骨材においては、微細な独立気孔を

有しているため内部が均質であることから微細なクラックが多数発生すると思われる。

これらのことから、超軽量骨材を用いたコンクリートのマイクロクラック発生過程については以下のように考察できる。初期段階には構成材料の強度やヤング係数の違いから主に骨材内部とその界面にマイクロクラックは発生する。AEの発生状況からもわかるように、骨材内部は均質であるため多数の微細なクラックが生じることになる。荷重が大きくなると、高強度ペースト部にもクラックが生じ、それらが進展して既に発生しているクラックと連結して急激に破壊に至ることから、脆性的な破壊挙動は高強度ペースト部の破壊にも起因するといえる。また、初期応力段階で多数発生するマイクロクラックは非常に微細であること、さらにペースト部が骨材に対して高強度であるために、応力-ひずみ曲線には特異点として現れていないものと考えられる。

### (3)最大応力以降におけるAEの発生状況

各コンクリートの最大応力付近の下降域におけるAEの発生状況を図7に示す。ヒット数、すなわちプロットの数に着目すると、普通コンクリートはほぼ一様にAEが検出されており、

図4の最大応力以前よりもかなり増えている。一方、軽量コンクリートは1種、2種の順でAE発生数は減少しており、最大応力以前と比べると激減している。一般に材料の破壊は延性破壊と脆性破壊に分けられ、延性破壊を示す過程ではAEはよく検出されるが、脆性破壊を示す過程ではAEの発生頻度はかなり少なくなる<sup>7)</sup>。図2の応力-ひずみ曲線からもわかるように軽量コンクリートは普通コンクリートに比べて脆性的な破壊を示す傾向にあることから、AEの発生状況と合致していることが確認できる。

### 3.3 割裂引張応力下におけるAE挙動

割裂引張応力下におけるAEヒット数と応力の関係を図8に示す。マイクロクラックの発生状況は圧縮応力下と同様にコンクリートの種類によって全く傾向が異なる。軽量コンクリートの割裂引張試験の破壊機構に関しては、特に軽量骨材の引張に対する抵抗力が小さいことが影響していると思われる、応力の初期段階で微細な骨材クラックが多数発生し、最終的には高強度ペースト部にクラックが生じるが、骨材には既に多数のクラックが内在するためペースト部が破壊すると同時に骨材を通り瞬時に平面的な終局破壊面が形成される。一方、普通コンクリートではクラックが

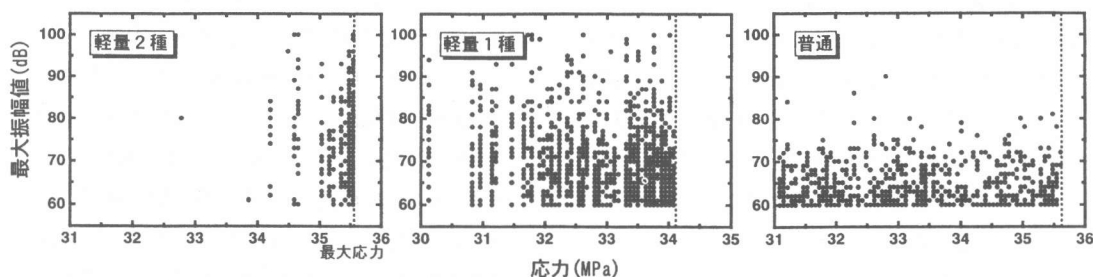


図7 最大応力付近の下降域におけるAEの発生状況

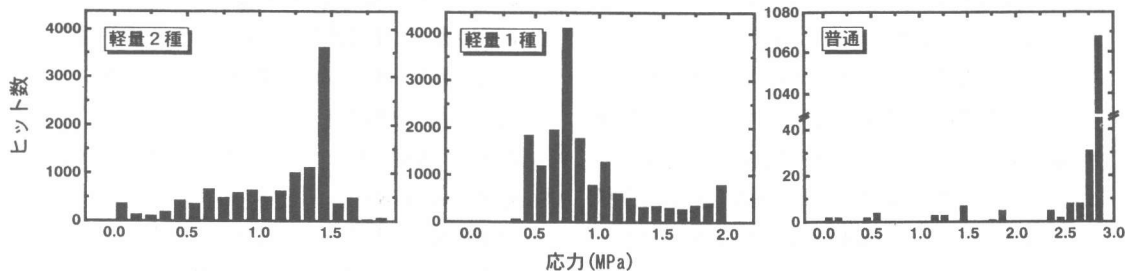


図8 AEヒット数と応力の関係

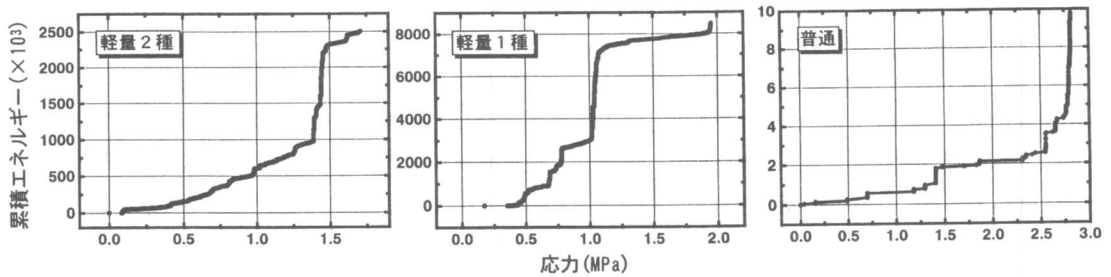


図9 AEによる累積エネルギーと応力の関係

骨材にぶつかった場合には迂回して脆弱な界面へと進展していくため終局破壊面は3次元的になり、軽量コンクリートに比べて延性的な破壊を生じる。

AEによる累積エネルギーと応力の関係を図9に示す。軽量コンクリートでは、エネルギーが増大する変極点が最大応力付近ではない位置に現れ破壊が生じていることから、普通コンクリートに比べて脆度係数(圧縮強度/引張強度)が大きい原因がこれらの現象からも説明できる。

#### 4. まとめ

本研究における結論を以下に示す。

- (1) 軽量2種コンクリートの応力-ひずみ曲線はほぼ線形性を示し、特異点は現れない脆性的な破壊挙動を示した。
- (2) 1軸圧縮応力下における軽量コンクリートのマイクロクラック発生過程は、応力の初期段階から多数発生して最大応力付近ではAEによるエネルギーが急増し、最大応力時にクラックの発生数が急増する普通コンクリートとは異なる傾向を示した。
- (3) 1軸圧縮応力下において、軽量コンクリートは振幅値に対する立上がり時間の比が大きいAEが多数検出されたことから、普通コンクリートとは異なる破壊モードのマイクロクラックが多数発生していると考えられ、その現象は軽量2種コンクリートで顕著にみられた。
- (4) 割裂引張応力下においても圧縮応力下と同様にコンクリートの種類によってマイクロクラックの発生状況は異なり、軽量コンクリート

では最大応力以前にAEによるエネルギーが急増する傾向がみられた。

#### [謝辞]

本研究の実施に当たって、東海大学工学部土木学科4年生・中村達夫君、日本大学理工学部交通土木工学科4年生・出口鋭君にご協力頂いた。ここに付記して謝意を表す。

#### [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) 小林昭一, 大津政康: アコースティック・エミッションのコンクリート工学への応用, コンクリート工学, Vol.16, No.7, pp.9-17, 1978,7
- 3) 柴田辰正, 岡本享久, 内田昌勝, 山本一之: コンクリート中の微細ひび割れ進展過程のモデル化と検証, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.589-594, 1997
- 4) 森大介, 岡本享久, 内田昌勝, 柴田辰正: 常時微動荷重下における鉄筋コンクリート梁のAE挙動に関する検討: コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1327-1332, 1997
- 5) 小坂義夫, 谷川恭雄: コンクリートの力学的性質と骨材, セメント・コンクリート, No.331, pp.56-64, 1974.9
- 6) 岡田清: 最新コンクリート工学, オーム社, pp.18-24, 1986
- 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, 森北出版, pp.28, 1988