

論文 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

柴田辰正*1・岡本享久*2・内田昌勝*3・山本一之*4

要旨: 圧縮を受けるコンクリートの破壊過程に発生するマイクロクラックを引張ばねおよびせん断ばねから成る剛体-ばねモデルによってモデル化するとともに、実際のコンクリート供試体を用いて、圧縮荷重を受ける場合を対象にアコースティックエミッション (AE) 法におけるモーメントテンソル解析により、クラック発生位置およびひび割れのタイプ (引張型またはせん断型) について、モデルの検証を行った。その結果、剛体-ばねモデルにより破壊過程に発生するひび割れとの関連を付けることができた。

キーワード: コンクリート、マイクロクラック、剛体-ばねモデル、AE 法、引張型、せん断型

1. まえがき

剛体-ばねモデル (RBSM) は、不規則な要素分割、すなわちボロノイ分割が、コンクリート中の骨材とモルタルの模倣を容易に行えるという理由から、コンクリートの破壊解析に適したモデルである[1]。そこで本研究では、コンクリートの破壊時に進展するひび割れを剛体-ばねモデル (RBSM) でモデル化し、そのモデルの妥当性について検討することを目的とした。検討項目は、載荷試験実施時のアコースティックエミッション (AE) 法におけるモーメントテンソル解析[2]による位置評定およびひび割れタイプとの比較、並びに AE の発生状況について行った。

2. 剛体-ばねモデル (RBSM) の概要

剛体-ばねモデル (RBSM, Rigid-Bodies Spring Model) は、極限解析に対する離散化解析法のひとつとして開発されたもので、対象構造物を剛体要素の集合体とそれらを連結する2種類の分布ばね (引張ばねとせん断ばね) によりモデル化する[3]。要素が変形しない代わりにばねが伸び、このばねにエネルギーが蓄えられる。このモデルは、コンクリート構造物の破壊を支配するひび割れやせん断すべりなどの不連続現象を比較的簡単に取り扱うことができる[4]。

表-1 は、有限要素法 (FEM) と剛体-ばねモデル (RBSM) の相違点を簡単にまとめたものである。以下にその概要について示す。

表-1 FEM と RBSM の相違点

	FEM (定ひずみ要素)	RBSM
要素形状	三角形	任意の多角形
自由度	各節点において、X,Y 方向変位、2 自由度	剛体運動を規定する X,Y 方向変位と剛体回転角、3 自由度
自由度設定位置	三角形の頂点	要素内の任意の点(重心等)
応力	要素内(σ_x, σ_y, τ)	要素境界边上(σ_n, τ)

*1 日本セメント(株)中央研究所、研究員、工修 (正会員)

*2 日本セメント(株)中央研究所、主席研究員、工博 (正会員)

*3 日本セメント(株)中央研究所、副主任研究員、工修 (正会員)

*4 芝浦工業大学工学部土木工学科、教授、工博 (正会員)

(1)要素形状

RBSM により平面問題の解析を行う場合、FEM と同様に解析領域を有限な領域に分割しなければならない。FEM では、三角形や四角形要素を用いるが、RBSM では、剛体変位場を仮定しているため、要素形状に制限がない。そこで、本研究では乱数による座標を基準点とするポロノイ多角形を利用して、要素分割を行った。

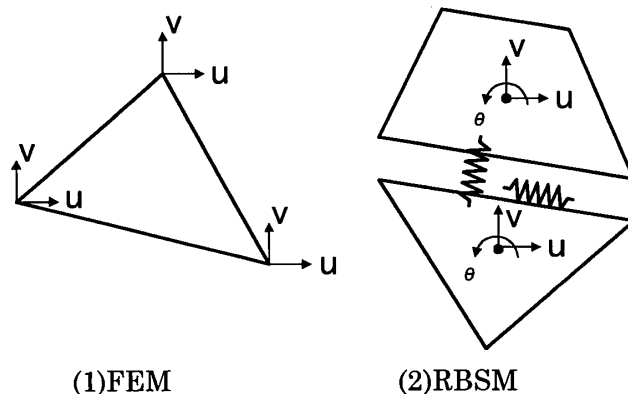


図-1 自由度と設定位置

(2)自由度と設定位置

図-1 に示すように FEM の定ひずみ要素では、三角形の各頂点に自由度を設定し、それぞれの節点に x 、 y 方向の平行変位(u , v) の2自由度を与える。RBSM では、各要素の変形を無視し、剛体と考える。剛体の運動を規定する場合は、剛体内の任意の位置に x 、 y 方向の平行変位(u , v) と剛体の回転角 (θ) の3自由度を与える。通常は、各要素の重心に自由度を設けることが多い。

(3)応力

FEM における定ひずみ要素では、節点における変位から各要素毎にその要素内の応力 (σ_x , σ_y , τ_{xy}) を計算する。RBSM では、要素境界辺上における垂直方向およびせん断方向における2つの単位面積当たりの表面力 (σ_n , τ) を求める。したがって、破壊条件として合力で与えられる式を直接利用することができる。

3.剛体-ばねモデルによる破壊解析方法

3.1 ばねの破壊条件

各剛体を接合しているばねは、以下の条件が成立するものとし、式から得られる引張応力およびせん断応力が材料定数よりも大きくなった場合にそのばねは破壊することとした。

$$\text{構成則} \quad \sigma = E \varepsilon \quad (1)$$

$$\text{引張破壊条件} \quad \sigma = ft \quad (2)$$

$$\text{クーロンの破壊条件} \quad \tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3)$$

ここで、 σ ：垂直応力、 τ ：せん断応力、 E ：ヤング係数、 ε ：ひずみ、 ft ：引張強度、 c ：せん断強度、 ϕ ：内部摩擦角。

この解析では、圧縮方向に関しては破壊条件を考慮しておらず、引張とせん断に関する条件のみを考慮していることが特徴としてあげられる。

今回の解析に用いた材料定数を表-2 に示す。これらの定数は、実験(表-4 参照)および文献[5]を参考にして決定した。この材料定数は、各要素間に配置するばねに関するものであり、上記の破壊条

表-2 材料定数

	界面	モルタル
ヤング係数、 E (GPa)	20.0	27.0
ポアソン比、 ν	0.2	0.2
引張強度、 ft (MPa)	1.5	2.0
せん断強度、 c (MPa)	2.5	4.0
内部摩擦角、 ϕ (°)	35.0	35.0

件式に直接代入することができる。モルタルは、均質材料として一種類の材料定数を使用した。コンクリートの解析では、粗骨材は剛体で変形および破壊はしないと仮定し、モルタルマトリクス内あるいは骨材とモルタルマトリクス間の界面が破壊するものとし、骨材自身の材料定数は定義していない。

3.2 要素分割 (ポロノイ分割)

本研究では、要素形状が解析結果に及ぼす影響を取り除くために要素分割にポロノイ分割を用いた。ポロノイ多角形は、乱数によって配置した節点を基に、デローニー三角分割を行い、得られた三角形の各辺の垂直二等分線が一辺となるように分割した多角形である。図-2は、本解析の要素分割である。モルタルとコンクリートの要素分割は同じものとし、コンクリートでは、図-3に示す太線で示した要素を粗骨材要素として配置した。コンクリートにおける粗骨材面積率は、30%とした。

表-3 には、本解析に使用した要素の条件を示した。

4.実験によるひび割れのタイプの測定

コンクリートおよびモルタルの圧縮試験を実施し、その際に発生する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。

使用材料は、普通ポルトランドセメントセメント(比重: 3.15)、砕砂(比重: 2.59)、碎石(比重: 2.64、最大寸法: 20mm)とし、コンクリートおよびモルタルの水セメント比(W/C)は、50%とした。供試体はφ10×20cmの円柱供試体を使用し、一軸圧縮試験を実施した。コンクリート中に占める粗骨材の体積率は、40%とした。また、モルタルは、コンクリート中の粗骨材を取り除いたものを使用した。使用したコンクリートおよびモルタルの力学的性質を表-4に示す。

図-4はAE波形計測時のAEセンサーの配置位置を示したものである。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。

5.結果および考察

5.1 実験結果

モルタルおよびコンクリートの圧縮試験におけるAE波形データから得られたマイクロクラック発生状況を図-5および図-6に示す。これらの図は、図-4におけるXY平面上を表示したもので、中間時と最終荷重時について示した。図中の●は引張クラック(引張成分60%以上)、

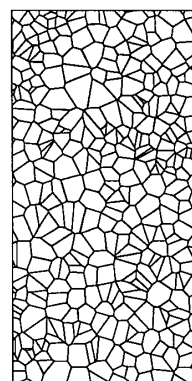


図-2 本解析の
要素分割

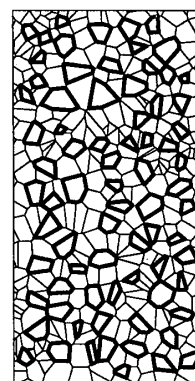


図-3 骨材要素の
配置(コンクリート)

表-3 解析の条件

①要素種類	平面ひずみ問題
②破壊後の摩擦	考慮しない
③載荷面の摩擦	有り
④節点数	796
⑤要素数	429
⑥ばねの数	1118

表-4 力学的性質

種類	強度 (MPa)		ヤング係数 (GPa)
	圧縮	引張	
モルタル	41.8	2.05	27.0
コンクリート	40.5	2.30	29.4

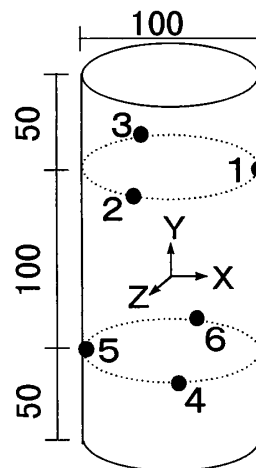


図-4 AEセンサー位置

+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。

モルタルにおいて中間時に上部にクラックが多く見られるが、この理由

は供試体製作時のモルタルが比較

的柔らかかったためブリーディングの影響で上部が比較的弱くなったためであると思われる。また、上端面側において、端面が摩擦により拘束されて円錐状に生じるひび割れの状況も見ることができ、本測定

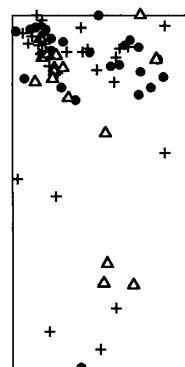
におけるひび割れ位置の同定は妥当な結果であるといえる。コンクリートでは、応力レベルの初期からクラックの発生分布が全体に広がりをもっている。また、破壊時にも引張クラック、せん断クラックともに全体にほぼ一様に分布していることがわかる。

モルタルとコンクリートを比較すると、コンクリートではせん断クラックの割合が引張クラックと比較して大きいことが確認できる。すなわち、モルタルでは引張クラックとせん断クラックの割合がほぼ等しいが、コンクリートではせん断クラックは引張クラックの2倍程度となっている。これは、コンクリート中のひび割れには多くのモルタルマトリクスと粗骨材の界面でのずれが生じており、せん断クラックの多くはその界面でのずれを表していると考えられる。

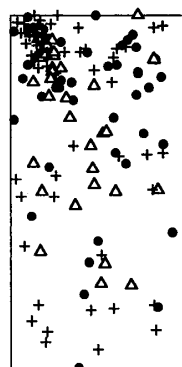
図-7は、モルタルおよびコンクリートの圧縮試験時のAEヒット数を応力レベルを横軸にして示したものである。応力レベル90%程度までは、AEは徐々に発生するが、その後は急激に発生している。すなわち、マイクロクラックは破壊直前の荷重までは徐々に生じ、破壊荷重に近づき多数のマイクロクラックが急激に発生することにより、コンクリートあるいはモルタルは破壊に至ることがAE試験結果から示されている。

5.2 解析結果と実験結果との比較

図-8は、剛体-ばねモデルによって得られた一軸圧縮試験時の応力-ひずみ曲線である。図中の実線が解析結果であり、破線は実験によって得られた結果である。また、図中の(a),(b)の付いた○印は、図-9~図-10に示したばねの破壊状況を示した点である。本研究では、破壊条件として圧縮破壊は考慮せず、せん断と引張に関する条件を与えただけであるが、応力-ひずみ関



(a)中間時



(b)最終荷重時



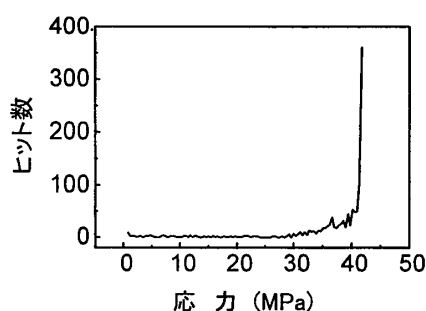
(a)中間時



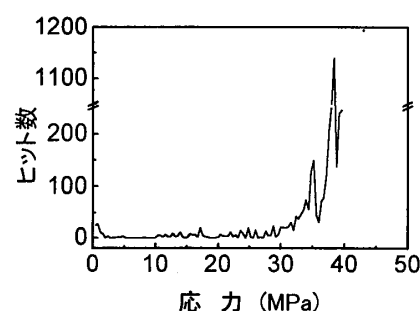
(b)最終荷重時

図-5 クラック発生状況(モルタル) 図-6 クラック発生状況(コンクリート)

(●: 引張クラック、+: せん断クラック、△: 混合クラック)



(a)モルタル



(b)コンクリート

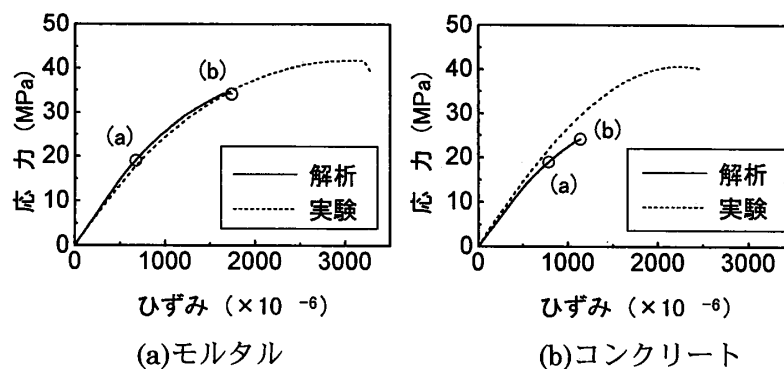
図-7 各応力レベルにおけるAEヒット数

係は、実験と同様な関係を得ることができた。解析結果は、実験結果と比較してモルタルでは強度が約 20% 低下し、ヤング係数は一致している。強度が低下した理由は、実際のひび割れは発生後も界面に摩擦力が働いているが、モデルではひび割れ後の摩擦は考慮していないためである。コン

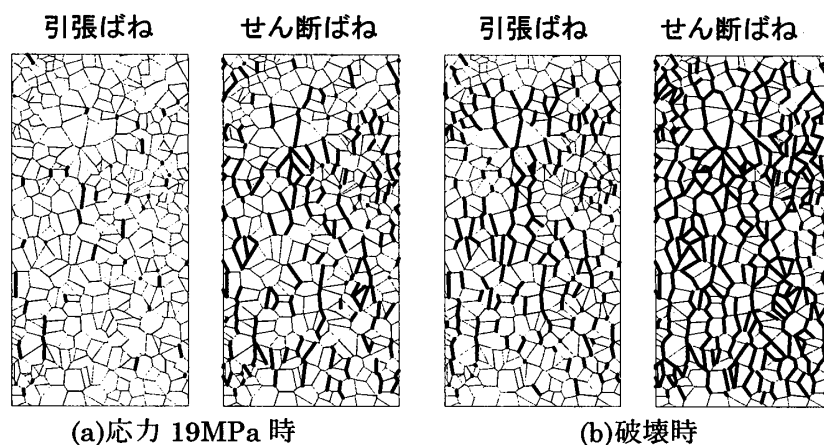
クリートでは強度は約 40% 低下し、ヤング係数も低下している。この理由は、実際には、モルタルよりもヤング係数の大きな粗骨材を混入してコンクリートとすることで、コンクリートのヤング係数はモルタルよりも大きくなるが、今回の解析では粗骨材は破壊しないものとして、粗骨材を一つの剛体（要素）としたことによる。すなわち、剛体－ばねモデルでは、材料の力学的挙動は要素間をつなぐばねで表現するため、コンクリートの場合には計算にヤング係数および強度がモルタルよりも大きい粗骨材自体の性質が考慮されずに、ヤング係数および強の小さい粗骨材とモルタルマトリクス間の付着のみが考慮され、モルタルのみの場合よりも弱くなる結果となった。

図－9 および図－10 は、剛体－ばねモデルによるばねの破壊状況を示したものである。図には、

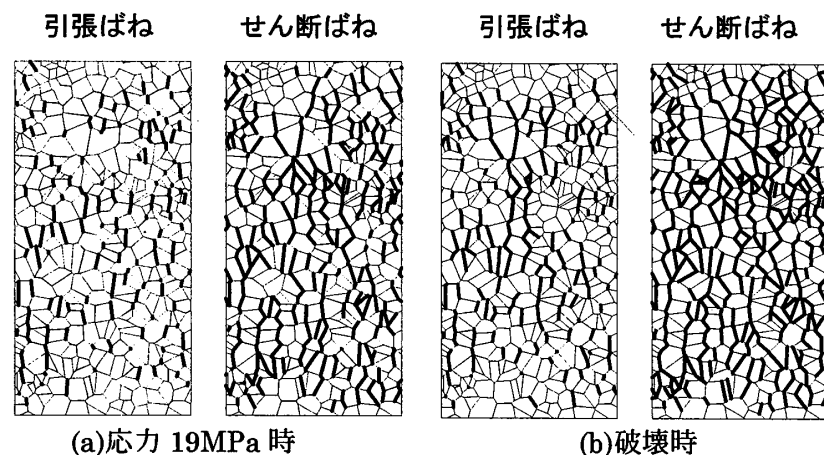
応力 19MPa 時と破壊時のものを示した。応力 19MPa 時のモルタルとコンクリートを比較すると、コンクリートでは、载荷軸方向の骨材とモルタルの界面の引張ばねが多く破壊しているが、モルタルでは、引張ばねの破壊が少ないことがわかる。せん断ばねは、コンクリートおよびモルタルとも比較的全体に破壊が生じているが、その割合は、コンクリートのほうが多い。最終破壊時は、モルタルとコンクリートでは、ばねの破壊状況に大きな差は見られないが、実際の圧縮試験時に見られるような垂直方向のひび割れが生じている。ま



図－8 応力－ひずみ曲線



図－9 ばねの破壊状況（モルタル）



図－10 ばねの破壊状況（コンクリート）

た、載荷面は摩擦により拘束されているため、載荷面に最も近い部分ではひび割れが少ない。しかし、実際の破壊時の端面に生じる三角形（円錐型）のひび割れは再現することができなかった。

ばねの破壊状況と実験により求めたクラック図（図-5 および 6）と比較すると、実

験では材料の不均質性のためクラックの発生に偏りが見られるが、解析結果においてせん断クラックおよび引張クラックが供試体全体に一様に分布している点は、実験結果を十分再現している。

図-11 は、剛体-ばねモデルによって得られた各応力レベルにおける破壊したばねの数を示したものである。せん断ばね、引張ばねともに徐々に破壊し、最終荷重時直前に多くのばねが破壊して試験体自体の破壊に至っている。これは、実験によって得られた AE の発生状況（図-7）を再現しているものと考えられ、剛体-ばねモデルにおけるばねの破壊とクラックの発生現象を関連付ける一つの理由となる。

6.まとめ

本研究の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1)剛体-ばねモデルにより、コンクリート中に発生するマイクロクラックを模擬することが可能である。
- (2)剛体-ばねモデルの引張ばねおよびせん断ばねと、AE 試験におけるモーメントテンソル解析によって得られる引張クラックとせん断クラックの関連付けができた。
- (3)ばねの破壊状況は AE の発生頻度を再現しており、剛体-ばねモデルにおけるばねの破壊とクラックの発生現象を関連付けられた。
- (4)以上より、剛体-ばねモデルはコンクリートの破壊時のクラック発生および進展現象を表現できるモデルである。

[謝辞]本研究を進めるにあたって、芝浦工業大学 4 年生山崎正太氏の助力を得た。ここに付記して謝意を表する。

[参考文献]

- [1]柴田辰正、岡本享久、小川航司、山本一之：剛体-ばねモデルによるモルタルの破壊解析、コンクリート工学年次論文報告集、第 18 巻、第 1 号、pp.627-632、1996。
- [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、森北出版、1988。
- [3]川井忠彦、竹内則雄：離散化極限解析プログラミング、培風館、1990。
- [4]竹内則雄、上田真稔、鬼頭宏明、樋口晴紀、上林厚志：ボロノイ分割を用いた RBSM による無筋コンクリート梁の寸法効果解析、構造工学論文集、Vol.40A、pp.519-527、1994.3。
- [5]A. M. Neville：Properties of Concrete（後藤幸正、尾坂芳夫監訳：コンクリートの特性）、技報堂、1979。

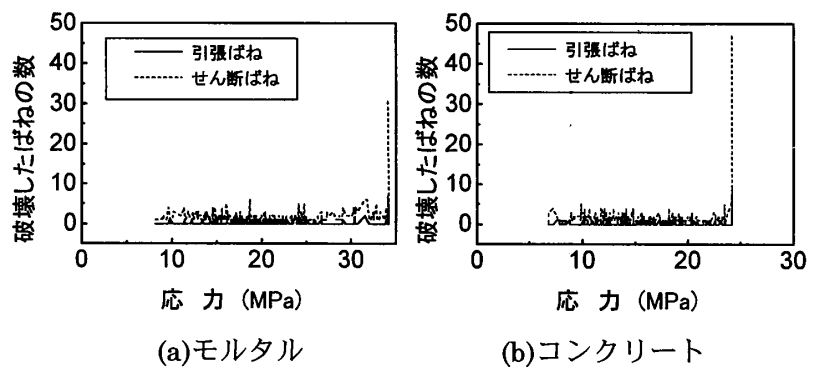


図-11 各応力レベルにおける破壊したばねの数