

3次元応用要素法による構造物の破壊シミュレーション

3-Dimensional Applied Element Simulation of Failure Behavior of Structures

目黒 公郎*・ハテム・タグエルディン*

Kimiro MEGURO and Hatem TAGEL-DIM

1. はじめに

著者らは、複雑で非線形性の高い構造物の破壊挙動を、簡単にしかも高い精度でコンピュータシミュレーションでできる手法の開発を進めている。この手法とは応用要素法 (AEM, Applied Element Method) という手法である。このモデルを用いると、座屈などの大変形問題や完全崩壊に至るまでの破壊過程が、リーズナブルな CPU タイムで、しかも驚くほどの高い精度で追跡できる^{例えば1)~6)}。有限要素法 (FEM) におけるジョイント要素^{例えば7)}のように、クラックの発生位置や進展方向を予め仮定するなどの必要性は一切なく、破壊は任意の位置に発生し、自由な方向に進展する。クラックの発生による応力状況の変化や境界条件の変化によって進展する進行性破壊現象を高い精度で解析できる手法である。また個別要素法 (DEM)⁸⁾が苦手な静的な問題への適用性、用いる要素の形状や配置の影響による解の不安定性の問題もない。解析に要する CPU タイムも圧倒的に短

いなどの特長を有した手法である。今回この手法を3次元に拡張したので、ごく簡単にその概要を紹介する。

2. 応用要素法 (AEM) の3次元への拡張

簡単のために、2次元モデルを用いて説明すると、AEM では図1に示すように構造物を仮想的に分割した要素の集合体とみなしている。すなわち、図1(b)に示す $a \times b$ の大きさを持つ要素が、運動を追いかける最小単位となる。これらの要素に力を及ぼす力学モデルの最小単位が図1(b)の2要素間に示された斜線部分である。図1(b)に示された2つの要素は、要素同士の間分布する複数のバネによって連結されていると仮定する。法線方向とせん断方向の2種類のバネを1組とするこれらのバネは、図中の斜線部分の材料の挙動を表現するモデルとなっている。解析対象が鉄筋コンクリート (RC) の場合で、斜線の領域に鉄筋が位置している場合には、この部分に限り、鉄筋バネとコンクリートバネが重なった状態で設置される。1要素の範

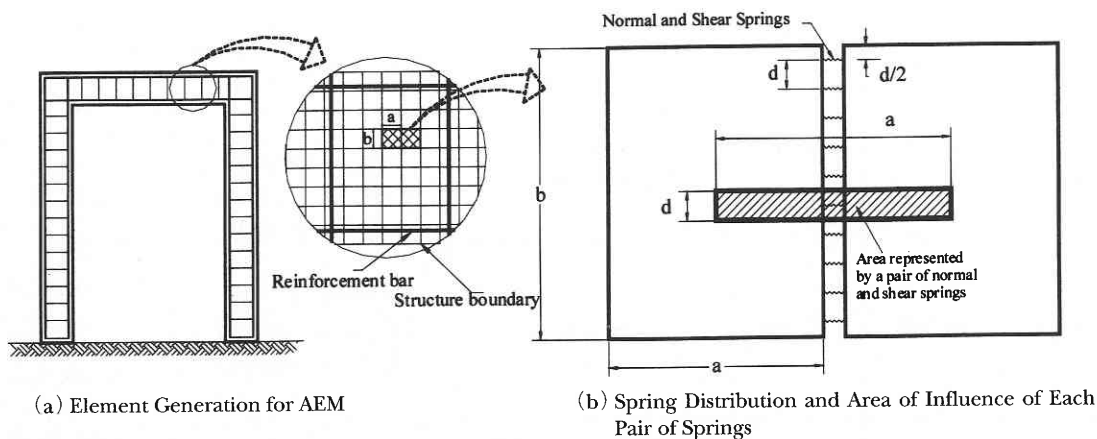


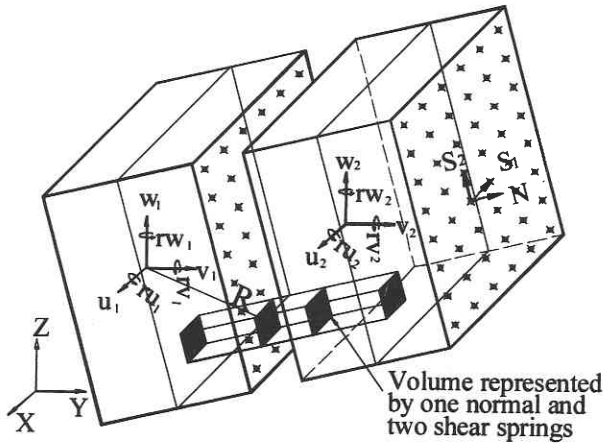
図1 AEMにおける構造物のモデル化 (2次元モデル)

*東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報

圈内では、鉄筋バネとコンクリートバネは一体として挙動する（つまり両者間での滑りを許容しない）ことを仮定するが、複数個の要素を対象範囲として考えた場合には、鉄筋バネが壊れる前にコンクリートバネが壊れることで、要素間に自由にクラックが入ることから、コンクリートと鉄筋の間には相対変位が考慮される。

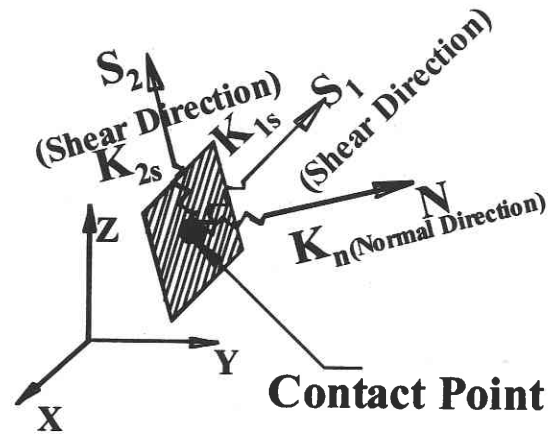
3次元におけるモデル化も2次元の場合と同様である



(a) Element Generation for AEM and Area of Influence of Each Set of Springs (3-D)

(図2)．ただし自由度は、2次元では3自由度（並進2，回転1）であったものが，6自由度（並進3，回転3）となる．この定式化に考慮されていないポアソン比の影響については，文献2)を参照されたい。

図2(a)に示すように，隣り合った要素どうしがある1つの接触点に設置された一組の法線方向と接線方向のバネで結ばれているものと仮定する．この接触点における剛性



(b) Spring Distribution at Contact Point (3-D)

図2 AEMにおける構造物のモデル化（3次元モデル）

表1 接触点における剛性マトリクス（左上1/4部分）

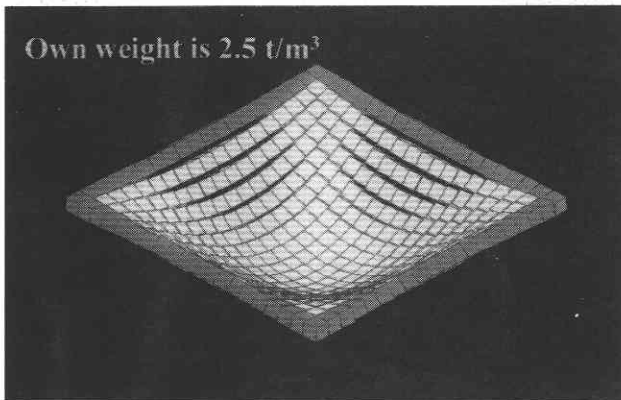
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
(1)	$K_n N_x^2$ $+K_{1s} S_{1x}^2$ $+K_{2s} S_{2x}^2$	$N_x K_n N_y$ $+S_{1x} K_{1s} S_{1y}$ $+S_{2x} K_{2s} S_{2y}$	$N_x K_n N_z$ $+S_{1x} K_{1s} S_{1z}$ $+S_{2x} K_{2s} S_{2z}$	$K_n N_x (R_y N_z - R_z N_y)$ $+K_{1s} S_{1x} (R_y S_{1z} - R_z S_{1y})$ $+K_{2s} S_{2x} (R_y S_{2z} - R_z S_{2y})$	$K_n N_x (R_z N_x - R_x N_z)$ $+K_{1s} S_{1x} (R_z S_{1x} - R_x S_{1z})$ $+K_{2s} S_{2x} (R_z S_{2x} - R_x S_{2z})$	$K_n N_x (R_x N_y - R_y N_x)$ $+K_{1s} S_{1x} (R_x S_{1y} - R_y S_{1x})$ $+K_{2s} S_{2x} (R_x S_{2y} - R_y S_{2x})$
(2)	S(1,2)	$K_n N_y^2$ $+K_{1s} S_{1y}^2$ $+K_{2s} S_{2y}^2$	$N_y K_n N_z$ $+S_{1y} K_{1s} S_{1z}$ $+S_{2y} K_{2s} S_{2z}$	$K_n N_y (R_y N_z - R_z N_y)$ $+K_{1s} S_{1y} (R_y S_{1z} - R_z S_{1y})$ $+K_{2s} S_{2y} (R_y S_{2z} - R_z S_{2y})$	$K_n N_y (R_z N_x - R_x N_z)$ $+K_{1s} S_{1y} (R_z S_{1x} - R_x S_{1z})$ $+K_{2s} S_{2y} (R_z S_{2x} - R_x S_{2z})$	$K_n N_y (R_x N_y - R_y N_x)$ $+K_{1s} S_{1y} (R_x S_{1y} - R_y S_{1x})$ $+K_{2s} S_{2y} (R_x S_{2y} - R_y S_{2x})$
(3)	S(1,3)	S(2,3)	$K_n N_z^2$ $+K_{1s} S_{1z}^2$ $+K_{2s} S_{2z}^2$	$K_n N_z (R_y N_z - R_z N_y)$ $+K_{1s} S_{1z} (R_y S_{1z} - R_z S_{1y})$ $+K_{2s} S_{2z} (R_y S_{2z} - R_z S_{2y})$	$K_n N_z (R_z N_x - R_x N_z)$ $+K_{1s} S_{1z} (R_z S_{1x} - R_x S_{1z})$ $+K_{2s} S_{2z} (R_z S_{2x} - R_x S_{2z})$	$K_n N_z (R_x N_y - R_y N_x)$ $+K_{1s} S_{1z} (R_x S_{1y} - R_y S_{1x})$ $+K_{2s} S_{2z} (R_x S_{2y} - R_y S_{2x})$
(4)	S(1,4)	S(2,4)	S(3,4)	$K_n (R_y N_z - R_z N_y)^2$ $+K_{1s} (R_y S_{1z} - R_z S_{1y})^2$ $+K_{2s} (R_y S_{2z} - R_z S_{2y})^2$	$K_n N_z (R_y N_z - R_z N_y)$ $(R_z N_x - R_x N_z)$ $+K_{1s} S_{1z} (R_y S_{1z} - R_z S_{1y})$ $(R_z S_{1x} - R_x S_{1z})$ $+K_{2s} S_{2z} (R_y S_{2z} - R_z S_{2y})$ $(R_z S_{2x} - R_x S_{2z})$	$K_n (R_y N_z - R_z N_y)$ $(R_x N_y - R_y N_x)$ $+K_{1s} (R_y S_{1z} - R_z S_{1y})$ $(R_x S_{1y} - R_y S_{1x})$ $+K_{2s} (R_y S_{2z} - R_z S_{2y})$ $(R_x S_{2y} - R_y S_{2x})$
(5)	S(1,5)	S(2,5)	S(3,5)	S(4,5)	$K_n (R_z N_x - R_x N_z)^2$ $+K_{1s} (R_z S_{1x} - R_x S_{1z})^2$ $+K_{2s} (R_z S_{2x} - R_x S_{2z})^2$	$K_n (R_z N_x - R_x N_z)$ $(R_x N_y - R_y N_x)$ $+K_{1s} (R_z S_{1x} - R_x S_{1z})$ $(R_x S_{1y} - R_y S_{1x})$ $+K_{2s} (R_z S_{2x} - R_x S_{2z})$ $(R_x S_{2y} - R_y S_{2x})$
(6)	S(1,6)	S(2,6)	S(3,6)	S(4,6)	S(5,6)	$K_n (R_x N_y - R_y N_x)^2$ $+K_{1s} (R_x S_{1y} - R_y S_{1x})^2$ $+K_{2s} (R_x S_{2y} - R_y S_{2x})^2$

マトリクスを計算するが、各自由度に相当する剛性マトリクスの要素は、対応する自由度方向に仮定する単位変位と各要素の重心に作用する力によって決定される。すなわち、左上 4 分の 1 部分の要素が表 1 で示されるサイズ (12 × 12) の剛性マトリクスとなる。見て分かるように、この剛性マトリクスはバネの剛性とバネの位置で決定される。

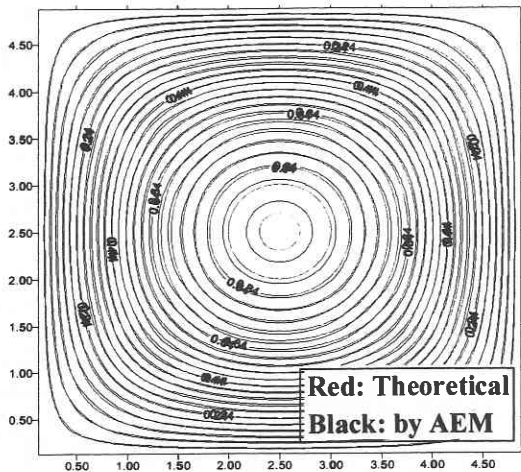
各バネは、そのバネに作用している主応力が材料特性から決まる破壊強度を越えた場合に破断する。その時点でバネに作用していた力は、破壊面の角度を考慮して周囲のバネに再分配される。こうすることで、クラックは任意の位置に発生し、応力条件に応じた適切な方向に自然と進展して行く。

3. 解析結果の例

図 3 ~ 図 6 に解析例を示す。図 3 は弾性材料から成るス



(a) Deformed Shape (scaled) and Dimension of the Slab (5 m x 5 m x 0.25 m)



(b) Comparison between Theoretical and Calculated Vertical Displacements

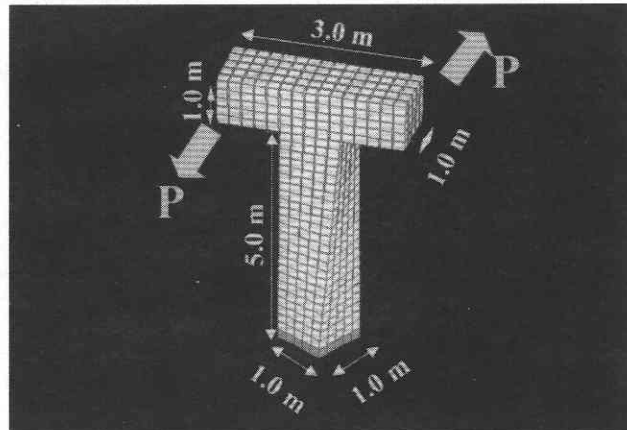
図 3 矩形スラブの自重による変形解析(理論値との比較)

ラブが自重で変形する現象を AEM 解析したものである。シミュレーション結果が理論値とよく一致していることがわかる。図 4 は T-型の柱の頂部にねじり荷重を作用させた際の柱の下端部における応力分布を解析したものである。理論値との比較から、解析結果の高い精度が確認できる。

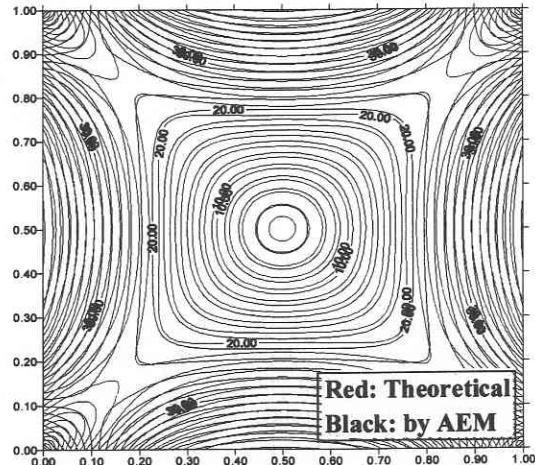
図 5 は、中空の弾性体の円柱の頂部に、側方から荷重を載荷させた場合の変形を解析したものである。幾何学的な非線形性が問題となる大変形領域までの現象が、何ら問題なく追跡できていることがわかる。図 6 は、落下物の衝撃を受けたコンクリートスラブが崩壊していく様子をシミュレーションしたものである。完全剥離、再接触現象、剛体運動などが自然と表現されていることがわかる。

4. ま と め

本研究では応用要素法 (AEM) を 3 次元に拡張し、幾



(a) T-Shape Column under Torsion



(b) Comparison between Theoretical and Calculated Shear Stresses at the Base

図 4 T-型の柱にねじり荷重を作用した場合の応力分布(理論値との比較)

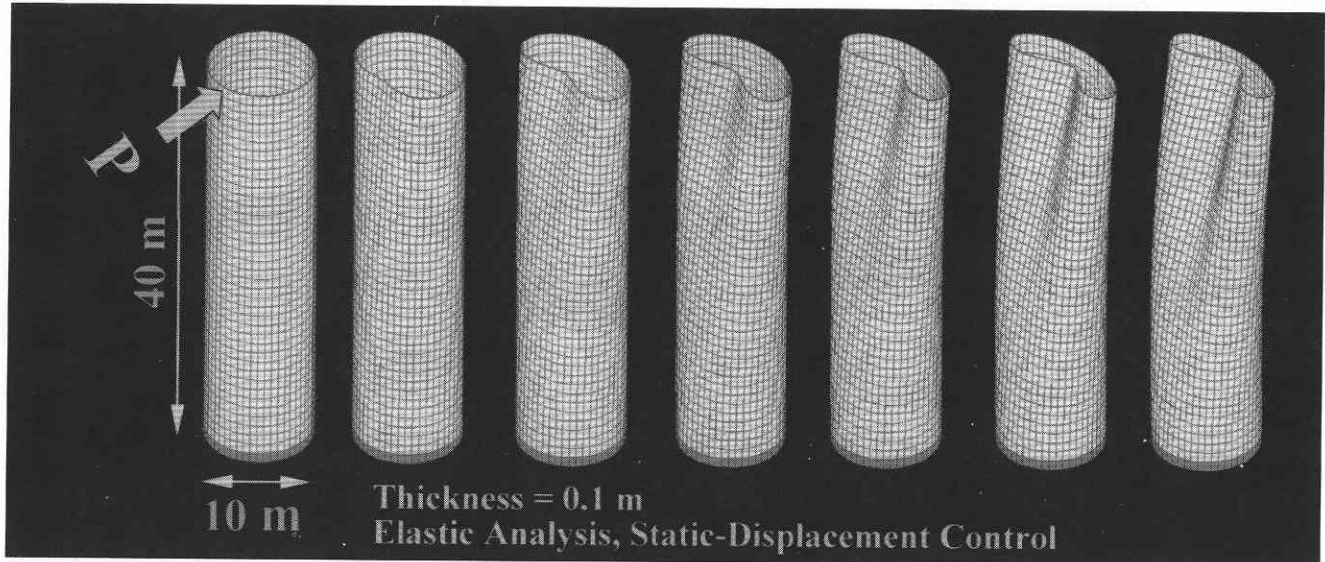


図5 中空の円柱に側方荷重が作用した場合の変形シミュレーション

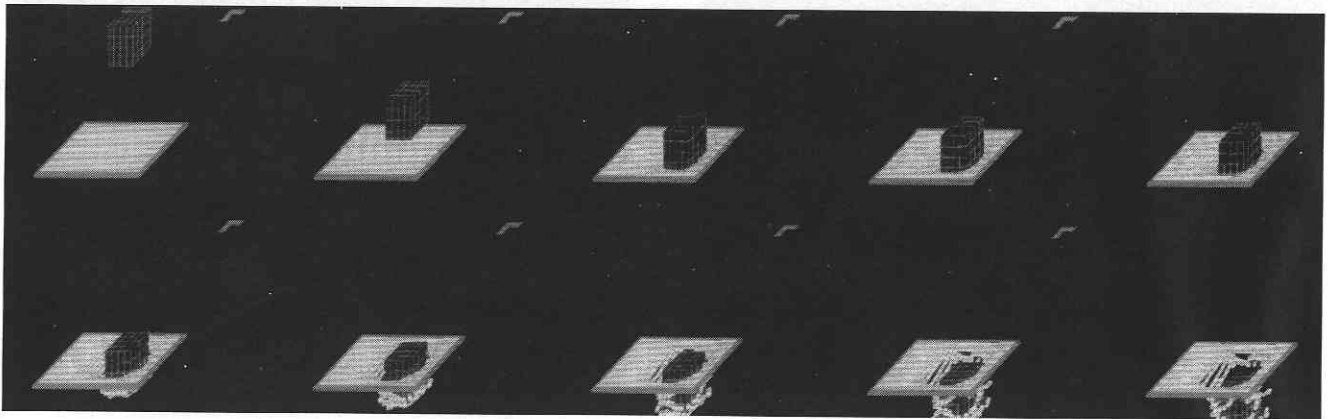


図6 落下物によるコンクリートスラブの破壊シミュレーション

つかの現象の解析を試みた。微小変形から大変形，破壊現象などに適用した解析結果の精度は高く，今回開発した3次元 AEM が，構造物の様々な挙動解析に高い適用性と可能性を有することが確認された。

(1999年8月10日受理)

参考文献

- 1) Kimiro MEGURO and Hatem TAGEL-DIN: An Efficient Technique for Fracture Analysis of Structures, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center (ERS), No.30, pp.103-116, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 1997.3.
- 2) Hatem TAGEL-DIN and Kimiro MEGURO: Consideration of Poisson's Ratio Effect in Structural Analysis using Elements with Three Degrees of Freedom, Bulletin of ERS, No. 31, pp. 47-56, 1998.3.
- 3) Kimiro MEGURO and Hatem TAGEL-DIN: A New Simplified and Efficient Technique for Fracture Behavior Analysis of Concrete Structures, Proceedings of the Third International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FRAMCOS-3), Vol. 2, pp. 911-920, Gifu, Japan, 1998.10.
- 4) Kimiro MEGURO and Hatem TAGEL-DIN: Simulation of Post-Buckling Behavior of Structures using Applied Element Method, Bulletin of ERS, No. 32, pp.125-135,1999.3.
- 5) Kimiro MEGURO and Hatem TAGEL-DIN: A New Simple and Accurate Technique for Failure Analysis of Structures, Bulletin of ERS, No. 31, pp. 37-46,1998.3.
- 6) Hatem TAGEL-DIN and Kimiro MEGURO: Simulation of Collapse Process of A Small-Scale RC Building Subjected to Magnified Base Excitation, Proceedings of the 25 th JSCE Earthquake Engineering Symposium, 1999.7.
- 7) Okamura H. and Maekawa K.: Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete, Gihodo Co. Ltd., Tokyo, 1991.
- 8) CUNDALL, P. A: A Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movements in Blocky Rock Systems, Symposium. ISRM, Nancy, France, Proc., Vol. 2, pp.129-136, 1971.