

応用要素法における要素寸法依存性の改善に関する研究*

ジェイアール東海情報システム(株) 正会員 ○西之谷 香奈
 東京大学生産技術研究所 正会員 目黒 公郎**

1. はじめに

兵庫県南部地震をはじめ、各地で発生する大規模地震による犠牲者の多くは建造物の崩壊によって発生している。これを踏まえると建造物が機能しう程度の損傷だけではなく、さらに大変形し、崩壊に至る破壊挙動を把握することがいかに重要であるかが認識される。このような立場から、Meguro・Hatem は応用要素法(Applied Element Method, AEM)^{1),2)}を開発した。AEMは微小変形から大変形、そして崩壊に至る一連の挙動を統一的に解析できる新しい解析手法である。しかし従来のAEM研究では解析アルゴリズムの確立に重点が置かれたために、用いられている材料モデルは非常にシンプルであった。また用いる要素寸法の違いが解析結果に与える影響が十分検討されていなかったため、解析対象によっては要素寸法依存性を生じる場合があった。そこで本研究では、鉄筋コンクリート(RC)造に解析対象を絞り、まず要素寸法依存性を分析する。そしてこの改善策として、クラックの発生により消費されるエネルギーが一定となるような材料特性を考慮した解析をおこない、その効果を検討する。

2. AEM の特徴

AEM では解析対象を仮想的な小要素の集合体として扱い、各要素は接線・法線方向に配置した2本のバネにより接続されている(図1)。材料モデルとしては図2と図3に示すモデルが用いられている。クラックの発生は該当箇所のバネの破壊として表現されるため、

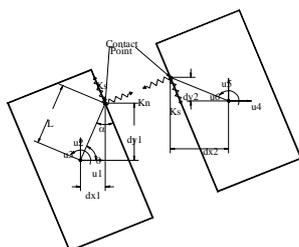
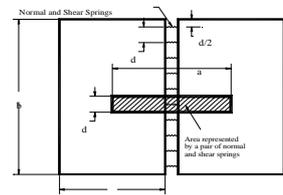


図1 AEMのバネ分布と幾何学的関係

クラックの発生位置とその方向をあらかじめ仮定することなく進行性破壊現象が追跡できる。また、RC のような複合材料の場合でも、要素モデルを変えることなく、配筋図どおりの位置に鉄筋の材料特性を有するバネを追加することで、1本1本の鉄筋の位置と量をダイレクトに反映した解析が可能となる。

3. 解析対象

3.1. 実験概要と実験結果

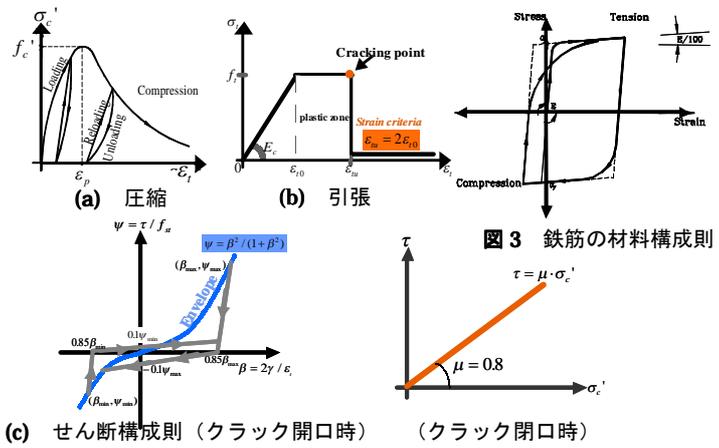


図2 コンクリートの材料構成則

表1 材料諸元 [tf/m²]

	圧縮強度	引張強度	弾性係数	降伏強度
コンクリート	2315	231	2.41 × 10 ⁶	—
主鉄筋(D29, D10)	—	—	1.856 × 10 ⁷	36506
帯筋(D6)	—	—	1.825 × 10 ⁷	36302

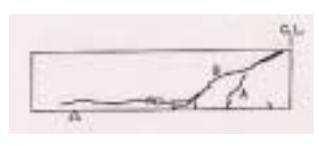
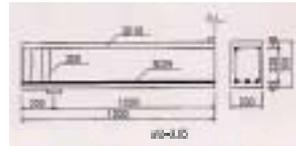


図4 実験供試体 [mm] 図5 実験終了時のひび割れ状況

表2 解析ケースごとの要素数・バネ数

	Case1 (1cm)	Case2 (1.5cm)	Case3 (2cm)	Case4 (3cm)	Case5 (5cm)	Case6 (8cm)	Case7 (10cm)	Case8 (15cm)
要素数	7224	3216	1812	808	294	204	76	36
バネ数	141750	62490	34860	15230	5310	3600	1220	510

本研究で対象とした実験は、せん断破壊先行型RC梁の単調荷重試験である。図4に実験供試体を、表1に材料諸元を示す。支点の境界条件はピンローラーである。図5に実験終了時のひび割れ状況を示す。

3.2. 解析モデル

AEM 解析モデルについて説明する。要素寸法は1cm～15cm(正方形)の8種類を用いて解析を行った。各ケースにおける全要素数、全バネ数は図2に示す通りであり、荷重条件は、(1cm/100step)の変位制御とした。

3.3. 解析結果

3.3.1. 荷重-変位関係とクラックパターン

解析結果の荷重-変位関係を図6に、各ケースで得られた最大耐力時のクラック分布の例を図7に示す。

図6から、要素寸法が小さくなるに従い、最大耐力およびそのときの変位は小さくなる傾向が確認できる。また、図7から、要素寸法が小さいケースほど破壊時に消費するエ

*キーワード：応用要素法, 数値構造解析, 鉄筋コンクリート, 要素寸法依存性, エネルギー消費
 **〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 東京大学生産技術研究所B棟2F 目黒研究室 Tel:03-5452-6436

エネルギーが小さくなるため、より多くのバネが破壊することが分かる。ここで、ケース7と8では要素寸法が大きすぎるため破壊モードが実験結果とは異なっている。したがって以

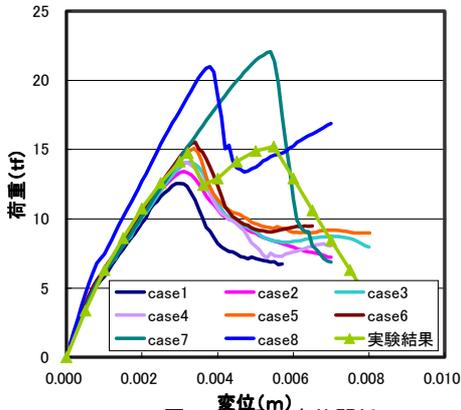


図6 荷重-変位関係

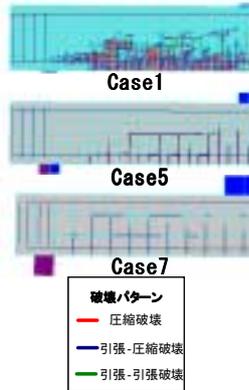


図7 クラックパターン

後の改善に関しては、対象外とする。

3. 3. 2. 供試体に蓄えられるエネルギー

各ケースにおいて、最大耐力時に供試体に蓄えられているバネのエネルギーを比較したものを図8に示す。この

比較から、ケース4～6では供試体に蓄えられるエネルギーは荷重-変位関係の傾向と同様に、要素寸法が小さいほど少なくなる

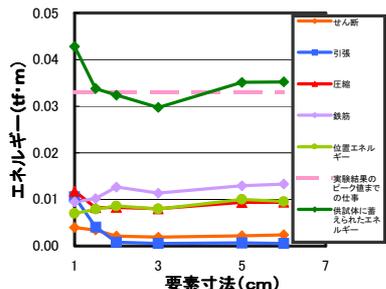


図8 供試体に蓄えられるエネルギー

一方、ケース1～3では、供試体内部に蓄えられるエネルギーが要素寸法の小さいものほど高い値を示す。この範囲では、1ステップあたりに破壊するバネ数が非常に多くなる。その結果バネ一本一本の応力-ひずみ関係に不安定な状態が生じ、エネルギー計算に影響が出るものと考えられる。したがってこの範囲のケースも以後の改善では対象外とした。

4. 要素寸法依存性の改善

4. 1. 消費エネルギーを一定とする材料特性の決定

本研究で対象とした供試体では、最大耐力を迎えるまで、斜め引張破壊が卓越する。ここで、解析結果が実験結果と最もよく一致するケース5を基準要素寸法とし、ケース4と6において、最大耐力までに引張破壊を生じるバネが消費したエネルギーを比較すると(図9の水色線)、ケース4では破壊するバネ数が多いため消費エネルギーが大きく、逆にケース6では小さくなっている。このことから、ケース4と6に関して基準要素寸法と等しい引張エネルギーを消費させるには、個々のスプリングのエネルギー吸収能が要素寸法によらず一定となるように変化させることで実現できると考

えられる。また、引張破壊したバネ1本あたりのエネルギー消費量は引張側の材料構成則の面積で表されるので、具体的には引張強度と引張塑性限界ひずみを変化させれば消費エネルギーも変化することになる。そこで、基準要素寸法の引張消費エネルギーに対するケース4と6の引張消費エネルギーの比を m_4 、 m_6 とし、引張強度と引張塑性限界ひずみ各々について、 m の平方根 $(m)^{1/2}$ を材料特性の倍率と定めた。

4. 2. 解析結果

引張消費エネルギーが一定となるような材料特性の倍率 $(m)^{1/2}$ を、ケース4と6に適用した解析結果を

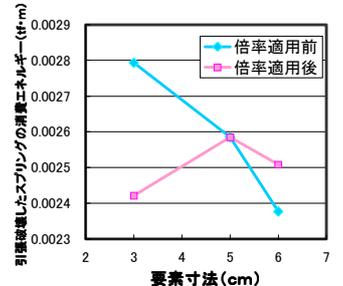


図9 引張消費エネルギーの比較

図10に示す。各ケースでの $(m)^{1/2}$ は、 $(m_4)^{1/2}=1.04$ 、 $(m_6)^{1/2}=0.96$ である。この結果から、いずれのケースにおいても、倍率 $(m)^{1/2}$ を用いることで基準要素寸法であるケース5に近い解析結果を得ることが分かる。また、倍率適用後の引張消費エネルギーを比較しても(図9の桃色線)、基準要素寸法の引張消費エネルギーとの差が適用前よりも小さくなることが確認された。

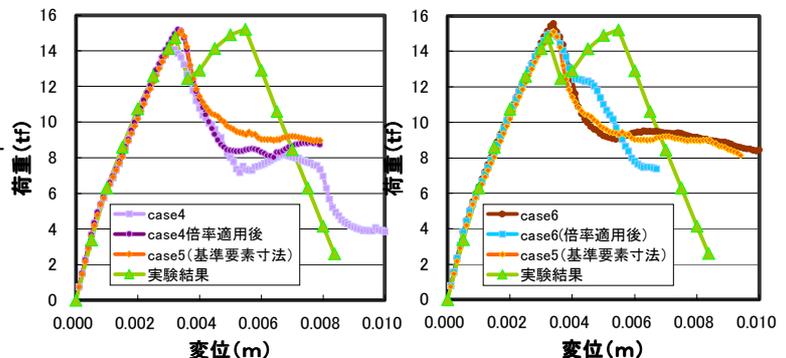


図10 材料特性の倍率を適用した解析結果の荷重-変位関係

5. まとめと今後の課題

本研究ではせん断補強筋のないRC梁を対象とし、AEMが抱える問題のひとつである要素寸法依存性の傾向を分析し、引張消費エネルギーが要素寸法によらず一定となる材料特性の倍率を適用することで、要素寸法依存性の改善が可能であることを示した。今後の課題は、様々な解析対象について、その大きさと基準要素寸法との関係を明らかにし、本研究の改善案の適用を容易にすることである。

参考文献

1) Megro, K and Tagel-Din, H: Development of A New Efficient Technique for Nonlinear Structural Analysis, 土木学会第52回年次学術講演会論文集 第1A部 pp.56-57.