

応用要素法 (AEM) を用いた RC 梁部材の荷重－変形関係の推定

正会員 李 煥九\*1 同 晉 沂雄\*1 同 崔 琥\*2  
同 松川 和人\*2 同 高橋 典之\*3 同 中埜 良昭\*4

応用要素法 RC 曲げ部材 静的非線形解析

1. はじめに

筆者らは、無補強組積造 (URM) 壁を含む RC 造架構の耐震性能評価を目的として、URM 壁の面外転倒を含む架構全体の挙動を解析的に再現可能な応用要素法 (AEM, Applied Element Method) に基づく非線形解析プログラムを開発してきた。本論文では、URM 壁を含む RC 造架構の検討を行うための前段階として、RC 部材単体での AEM 解析による荷重－変形関係の推定を試みる。既往の研究<sup>[1], [2]</sup>では、部材角 1.0% 程度までの比較的小さい変形領域を中心として解析結果の妥当性が検証されているが、本研究では部材角が 1.0% を超える大変形領域をも含めた検討を行っている。

2. AEM の概要

AEM は、脆性的な材料を持つ部材の大変形解析で使われている DEM (個別要素法, Discrete Element Method) において微小変形解析での精度を改良するため、目黒・Hatemi らにより開発されたものである<sup>[2]</sup>。AEM における要素の概念を図 1 に示す。AEM は、同図に示すとおり、各要素間を軸ばねおよびせん断ばねで構成されるばね要素で形成され、各材料剛性により要素の剛性マトリクスが作成される。1 個のばね要素の剛性マトリクスは 6×6 行列で、その左上部の 3×3 マトリクスを式(1)に示す<sup>[2]</sup>。これらの各ばね要素の剛性マトリクスを組み合わせ、全体剛性マトリクスを作成し、式(2)により全要素に作用する荷重および変位ベクトルが求められる。

$$[K]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} S_1^2 Kn + C_1^2 Ks & -S_1 C_1 Kn + S_1 C_1 Ks & -S_1 C_2 LKn + C_1 S_2 LKs \\ -S_1 C_1 Kn + S_1 C_1 Ks & C_1^2 Kn + S_1^2 Ks & C_1 C_2 LKn + S_1 S_2 LKs \\ -S_1 C_2 LKn + C_1 S_2 LKs & C_1 C_2 LKn + S_1 S_2 LKs & C_2^2 L^2 Kn + S_2^2 L^2 Ks \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、軸ばねの剛性  $Kn = E \times d \times t/a$ 、せん断ばねの剛性  $Ks = G \times d \times t/a$ 、 $E$ : ヤング係数、 $G$ : せん断弾性係数、 $a, d, L, \theta, \alpha$ : 図 1 参照、 $t$ : 奥行き幅、 $S_1: \sin(\theta + \alpha)$ 、 $S_2: \sin \alpha$ 、 $C_1: \cos(\theta + \alpha)$ 、 $C_2: \cos \alpha$ 。

$$[K_G] \cdot \{U\} = \{F\} \quad (2)$$

ここで、 $[K_G]$ : 全体剛性マトリクス、 $\{U\}$ : 変位ベクトル、 $\{F\}$ : 荷重ベクトルである。

3. 弾性解析による適切な要素分割数・ばね数の検討

本論文の目的である大変形領域での非線形解析を行うためには、計算時間と精度のバランスをあらかじめ認識しておくことが効率的である。本章では、4 章での非線形解析に先立ち、対象試験体と似た形状を持つ片持ち梁部材を対象に、要素分割数およびばね数が計算精度や時間に及ぼす影響を調べるため、簡単な弾性解析を行う。用いた計算機は OS が Windows7、CPU は Intel 社の Core i7(2.69GHz)、使用可能メモリは 3.49GB である。解析モデルを図 2 に示す。本解析

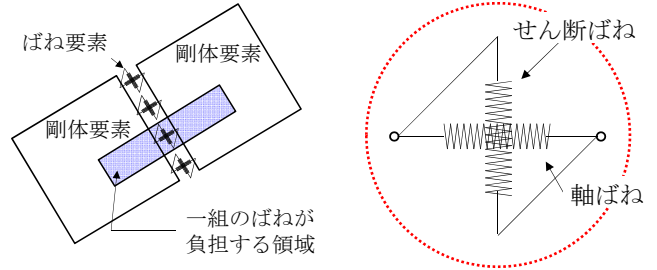


図 1 AEM 要素の概念図

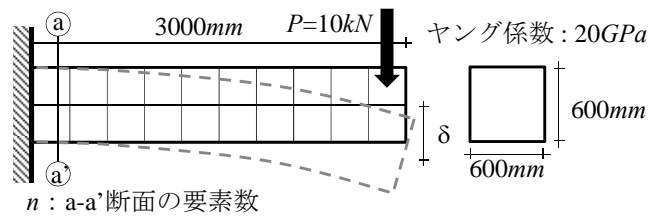


図 2 弾性解析モデル

表 1 断面の要素数およびばね数による撓み delta の比較

断面要素数 (n)	要素間のばね数	理論値 (mm)	解析値 (mm)	理論値/解析値	計算時間の比率
2 個	1 個	$\frac{PL^3}{3EI} + k \frac{PL}{GA} = 0.429$	0.578	1.347	1.0
	5 個		0.437	1.018	1.2
	10 個		0.434	1.010	1.4
5 個	1 個		0.454	1.059	1.8
	5 個		0.436	1.017	3.4
	10 個		0.436	1.016	10.0
10 個	1 個		0.441	1.028	5.8
	5 個		0.437	1.018	47.7
	10 個		0.437	1.017	174.0
20 個	1 個		0.438	1.021	57.4
	5 個		0.437	1.019	731.7
	10 個		0.437	1.019	2848.2

におけるパラメータは断面の要素数 (4 ケース) および要素間のばね数 (3 ケース) であり、計 12 ケースと設定した。表 1 のように、荷重 10kN が作用する際の撓み delta の理論値に対する解析結果の比率を検討した結果、要素分割が細かいほど、またばね数が増加するほど両者間の誤差は減少するものの、その解析時間は増加する傾向が見られた。特に、断面の要素数が 20 個の場合、ばね数が増加するにつれ解析時間が急激に増加する傾向が見られた。表 1 の結果から、ばね数あるいは要素数をある程度以上増加させると理論値と解析値の比率は 1.02 に収束する傾向が見られ、10 以上の要素数または 5 個以上のばねを用いた場合、解析結果が理論値を誤差 2.8% 以内で推定できることがわかった。

#### 4. RC 梁部材の大変形領域を含む非線形解析

本章では、RC 梁部材の大変形領域を含めた非線形解析を試みる。解析対象試験体は、せん断補強筋の間隔をパラメータとした F-60 試験体（せん断補強筋間隔：60mm）および FS-90 試験体（せん断補強筋間隔：90mm）である<sup>[3]</sup>。試験体の詳細（F-60 試験体）および材料諸元を図 3(a)および表 2 にそれぞれ示す。

図 3(b)に解析モデルを示す。同図に示すように、試験体の梁部分のみを解析対象とし、前章の検討結果に基づき各要素サイズは 40mm×40mm（断面の要素数：10 個）、要素間のばね数は 5 個とした。また、試験体頂部に設置した加力治具部はばねを剛体とした。解析は部材角 18%までの変位制御で行った。

コンクリートおよび鉄筋の材料モデルを図 4(a)~(c)にそれぞれ示す。図 4(a)のコンクリートの圧縮側には岡村・前川モデル<sup>[4]</sup>を用い、引張側は引張強度に達するまでは線形とし、その後は引張軟化モデルを用いた。図 4(b)の鉄筋の構成則はバイリニアを用い、降伏強度を超えてからはヤング係数の 1/100 の勾配とモデル化した。これらの各構成則には表 2 に示す実験時の材料試験から得られた強度およびヤング係数を用いた。また、コンクリートおよび鉄筋のせん断弾性係数はそれぞれのヤング係数との関係から得られた値を用いた。ただし、コンクリートの場合、主応力度が引張応力度を超えるとひび割れが発生すると仮定し、その後のせん断応力度はひび割れ発生時のせん断応力度の 1/10 とした（図 4(c)）。

F-60 試験体および FS-90 試験体の実験結果と解析結果における荷重-変形関係を図 5 に示す。F-60 試験体の解析結果においては、主筋降伏時の耐力が実験結果より低いものの、部材角 1.0%を超える大変形領域においても、特に最大耐力点（部材角 11.5%）までは耐力を良く推定できている。一方、FS-90 試験体においてはひび割れ発生以降の耐力が過小評価となり、最大耐力（部材角 8%）も約 15%程度過小評価した。また、両試験体とも最大耐力以降の耐力低下は表現できていない。以上の結果より、本研究で用いた AEM プログラムは、大変形領域の中でも安定して耐力を保持している領域については、概ね約 15%程度の誤差範囲でその耐力を推定できたが、耐力低下域も含めた推定という意味では課題が残る結果となった。

#### 5. まとめ

本研究では、既の実験した RC 梁部材の荷重-変形関係を大変形領域も含めて AEM 解析により推定することを試みた。その結果、耐力を安定して保持する領域ではその耐力を概ね推定できたが、耐力低下域では課題が残る結果となった。今後は、両試験体における実破壊パターンも含めて、実験結果をより精度良く推定する手法の検討を行う。

#### 【参考文献】

[1]Julisa Paola Mayorca Arellano, Strengthening of Unreinforced Masonry Structures in Earthquake Prone Regions, Doctoral thesis, The University of Tokyo, 2003.9 [2]Hatem TAGEL-DIN, A New Efficient Method for

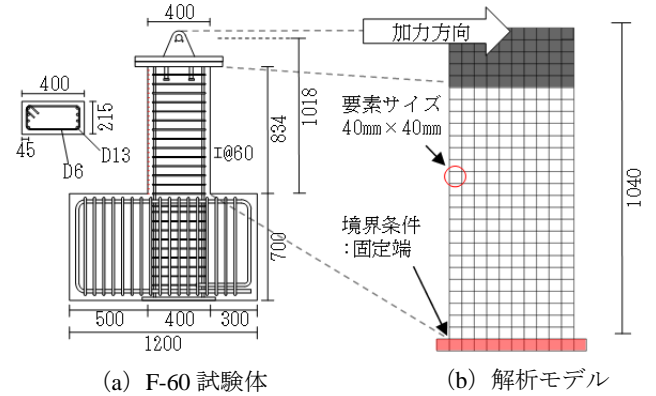


図 3 解析対象試験体

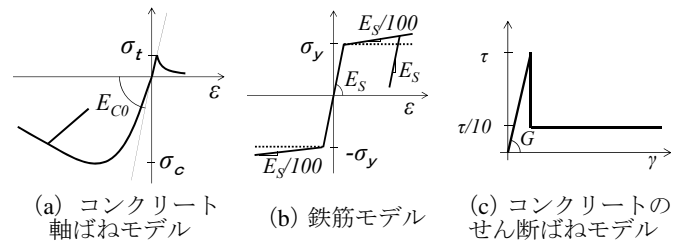


図 4 材料モデル

表 2 材料試験結果

試験体	コンクリート		鉄筋			
	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	主筋	主筋降伏強度 (MPa)	補強筋 (mm)	補強筋降伏強度 (MPa)
F-60	30.5	2.2	8-D13	412.8	D6@60	417.8
FS-90	32.5	1.9	8-D16	568.4	Φ9@90	358.1

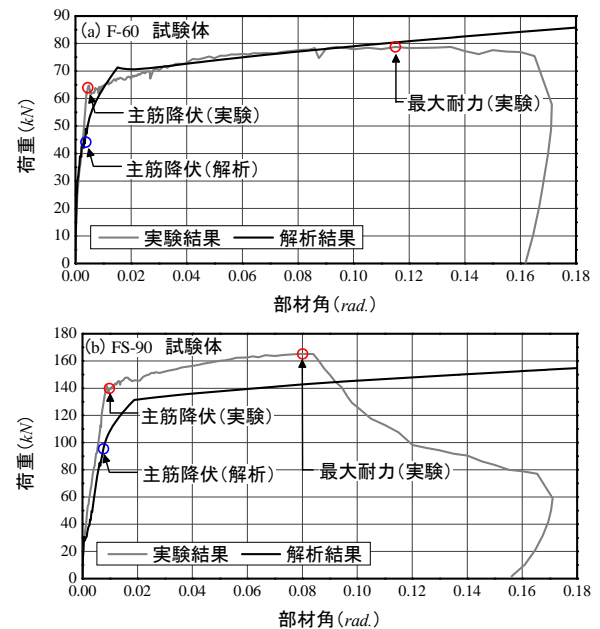


図 5 荷重-変形関係の比較

Nonlinear, Large Deformation and Collapse Analysis of Structures, Doctoral thesis, The University of Tokyo, 1998.6 [3]高橋典之他：鉄筋コンクリート梁部材のひび割れ長さ評価手法に関する研究(その 1~2), 日本建築学会学術講演梗概集, 2012 年 [4]岡村甫, 前川宏一, 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成側, 技報堂出版, 1991.5

\*1 東京大学 工学系研究科 大学院生  
\*2 東京大学 生産技術研究所 助教・博士(工学)  
\*3 東北大学 工学研究科 准教授・博士(工学)  
\*4 東京大学 生産技術研究所 教授・工博

\*1 Graduate Student, Graduate School of Eng., The Univ. of Tokyo  
\*2 Research Associate, IIS, The Univ. of Tokyo, Ph.D.  
\*3 Associate Professor, Tohoku Univ., Ph.D.  
\*4 Professor, IIS, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.