

応用要素法：高精度数値震動台としての可能性

目黒 公郎¹・ハテム-タグエルディン²

¹正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

²正会員 Ph.D., エジプト・カイロ大学講師

Applicability of Applied Element Method (AEM) for Numerical Shaking Table Experiment System is discussed. The AEM is developed to simulate total behavior of structures from elastic to highly nonlinear behavior, such as geometrical and material nonlinear behavior, and collapse process accurately with reasonable CPU time. Complicated material modeling and special knowledge on location and/or direction of cracks are not necessary before the analysis. As the method is very new, quantity of the results is not enough comparing to the other well-known methods. However, AEM has high potential for structural analysis and it can be a powerful tool for efficient use of 3-D Full-Scale Earthquake Testing Facility that will be constructed by Science and Technology Agency.

Key words: Applied Element Method, AEM, buckling, post-buckling behavior, large deformation, Computer simulation

1. はじめに

実物大構造物の崩壊現象が再現できる(であろう)3次元6自由度大型震動台が、科学技術庁によって平成16年の完成を目標に具体化してきた。この震動台は兵庫県南部地震で記録された地震動をも十分に再現できるスペックを有し、実物大構造物の動的破壊挙動を理解する上で非常に貴重な情報を提供してくれるものと期待される。しかしこの震動台が完成されたからと言って、我々が対象とする全ての種類や規模の構造物をその上に載せて破壊挙動を観測することはできない。また最近発生したトルコや台湾の地震に見るように、兵庫県南部地震をはるかに越える地震動(特に速度や変位)が発生し得ることも分かってきた。これらの点を踏まえて重要なことは、上記の大型震動台による実験結果を補足する「崩壊過程を高精度に数値解析できる手法」の整備である。本研究では、上記の目的から開発を進めている新しい構造解析手法(応用要素法:AEM)を紹介し、その可能性を論ずる。

2. 応用要素法(AEM)とは?

応用要素法は「崩壊に至るまでの破壊現象を、高い精度で、しかも簡単なモデルで解析すること」を目標に開発を進めている手法である。このような手法を確立するには、現象を「慣性力の影響」、「荷重の荷重方向」、「解析対象の幾何学的変形の大小」、「材料特性の非線形性」などの観点から分類し、いずれの現象に対しても対応できる解析手法であることを示す必要がある。すなわち、表-1に示すI~VIのような各現象を高精度にシミュレーションできる理論を構築し、そのモデルを用いた解析結果を理論解や実験結果と比較分析することで解析手法としての信頼性を示さなくてはならない。ここで、I~VIの現象をごく簡単にまとめておく。

()内は各領域の現象例、あるいはAEMを用いて既に解析を実施した例を示している。

- I : 弾性体(線形材料)から構成される構造物(解析対象物)が静的な一方向荷重を受ける場合の微小変形領域での挙動。(AEMの基本理論、ポアソン比の影響の導入。)^{1), 2)}
- II : 非線形材料から構成される構造物(解析対象物)が静的な一方向荷重を受ける場合の微小変形領域での挙動。(静的一方向荷重による鉄筋コンクリート(RC)構造の破壊実験)³⁾
- III : 線形または非線形材料から構成される構造物(解析対象物)が周期的に荷重方向に変化する荷重を静的に受ける場合の微小変形領域での挙動。(静的交番荷重によるRC構造の破壊実験)⁴⁾
- IV : 弾性材料から構成される構造物(解析対象物)が静的な荷重(一方向荷重あるいは交番荷重)を受ける場合の大変形領域に至るまでの挙動。(弾性材料の座屈現象など)⁵⁾
- V : 線形または非線形材料から構成される構造物(解析対象物)が動的な一方向荷重を受ける場合の大変形領域に至るまでの挙動。(落下物などの衝撃荷重を受ける構造物の崩壊挙動など)^{6), 7)}
- VI : 線形または非線形材料から構成される構造物(解析対象物)が動的交番荷重を受ける場合の大変形領域に至るまでの挙動。(地震による構造物の崩壊挙動)⁸⁾

表-1 応用要素法が解析対象とする現象の範囲

| Geometry | Material | Static | | Dynamic | | | |
|-------------------------------|-----------|---------------------|--------|-----------|--------|--|--|
| | | Monotonic | Cyclic | Monotonic | Cyclic | | |
| Small deformation (linear) | Elastic | I | III | V | VI | | |
| | Nonlinear | II | | | | | |
| Large deformation (nonlinear) | Elastic | IV | | | | | |
| | Nonlinear | Covered in dynamics | | | | | |
| Collapse process | | No meaning | | | | | |

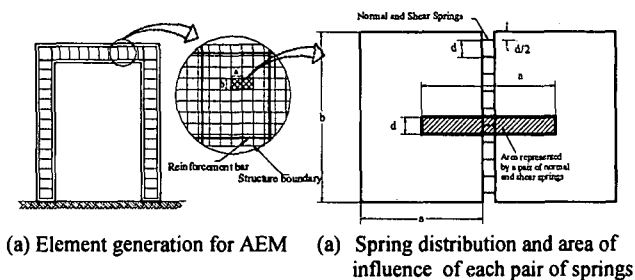


図-1 AEMにおける構造物のモデル化

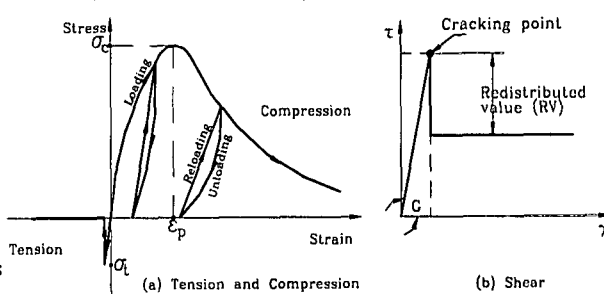


図-3 無筋コンクリートの材料モデル

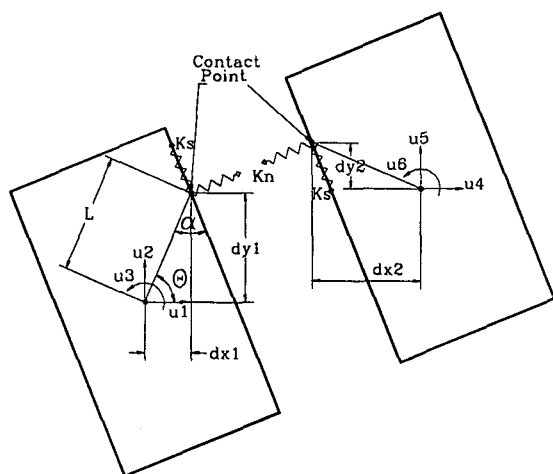


図-2 3自由度を持つ2要素間のある1点に設置された法線・接線方向のバネ

なお、表-1の中でハッチの入っている領域は、現象として考えにくいものや他の領域の現象を示すことでカバーされることを示す。また3次元の問題については文献9)を参照されたい。

2.1 要素の定式化

AEMでは図-1に示すように、解析対象構造物を仮想的に分割した小要素の集合体として考える。図-1(b)に示す $a \times b$ の大きさを持つ要素が、解析において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ことになる。1要素の範囲内では、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、要素間には自由にクラックが入ることから、複数個の要素を対対象範囲として見た場合には、コンクリートと鉄筋の間には相対変位が考慮される

それぞれの要素は2次元では並進2、回転1の3自由度を有する(3次元問題では6自由度となる)。1

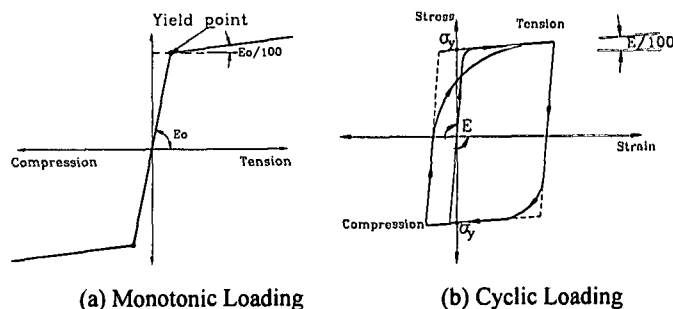


図-4 鉄筋の材料モデル

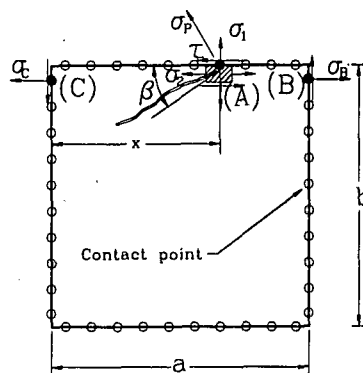


図-5 各バネの位置における主応力の求め方

要素につき3自由度を仮定することから、要素自体は剛体としての扱いになるが、要素の周辺に配置する分布バネによって、要素の各位置における力のやり取りが表現され、また要素の集合体としての構造体は、力学条件に基づいて変形可能となる。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に示すように、ある1点に設置された一組の法線方向と接線方向のバネで2つの要素が結ばれているものと仮定する。この接触点における剛性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。

$$\begin{bmatrix} \sin^2(\theta + \alpha)K_n & -K_n \sin(\theta + \alpha)\cos(\theta + \alpha) & \cos(\theta + \alpha)K_s L \sin(\alpha) \\ + \cos^2(\theta + \alpha)K_s & + K_s \sin(\theta + \alpha)\cos(\theta + \alpha) & -\sin(\theta + \alpha)K_n L \cos(\alpha) \\ -K_n \sin(\theta + \alpha)\cos(\theta + \alpha) & \sin^2(\theta + \alpha)K_s & \cos(\theta + \alpha)K_n L \cos(\alpha) \\ + K_s \sin(\theta + \alpha)\cos(\theta + \alpha) & + \cos^2(\theta + \alpha)K_n & + \sin(\theta + \alpha)K_s L \sin(\alpha) \\ \cos(\theta + \alpha)K_s L \sin(\alpha) & \cos(\theta + \alpha)K_n L \cos(\alpha) & L^2 \cos^2(\alpha)K_n \\ -\sin(\theta + \alpha)K_n L \cos(\alpha) & + \sin(\theta + \alpha)K_s L \sin(\alpha) & + L^2 \sin^2(\alpha)K_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

すなわち、左上4分の1部分の要素が式(1)で示されるサイズ(6×6)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。こうして決定された各接触点のバネごとの剛性マトリクスを、それぞれの要素の周りに設置された全てのバネ(法線+接線)について足し合わせることでグローバル剛性マトリクスを定義する。

支配方程式は、式(2)で表される。

$$[K_G][\Delta] = [F] \quad (2)$$

ここで、 $[K_G]$ はグローバル剛性マトリクス、 $[\Delta]$ は変位ベクトル、 $[F]$ は作用荷重ベクトルである。荷重制御の場合には、 $[F]$ が既知となる。変位制御の場合には、制御したい要素に対して仮想変位 $[\Delta]$ を与えることで、荷重を作用させる。

2.2 材料のモデル化と破壊基準

ここでは代表的な建設材料であり、鉄筋とコンクリートという異なった2種類の材料から成る複合材料である鉄筋コンクリート(RC)を対象としたモデル化を紹介する。RCの挙動がうまく表現できれば、他の様々な材料や媒質にも本手法が適用可能であることを示すことになると考えられるからである。AEMにおけるRCのモデル化では、FEMで良く用いられるような鉄筋比を考慮したRCの材料特性を要素の材料モデルとして平均的に扱うことはしない。鉄筋は鉄筋として、コンクリートはコンクリートとしてそれぞれモデル化するが、これらは全く他の研究者の成果の借り物である。より正確な材料モデルが提案されれば、次はそれを借用するという立場に立っている。今回は、コンクリートの材料モデルとしては、図-3に示す前川モデル¹⁰⁾を、鉄筋については図-4に示す材料モデルを用いている。AEMでは図-1にも示したように、用いる要素の大きさから考えて、鉄筋バネは配筋図に従って正確に設置することができる。ゆえに任意の鉄筋比の鉄筋コンクリートが、鉄筋バネを鉄筋の位置にダイレクトに配置することで自動的にモデル化される。この時かぶりの厚さなども自動的に考慮されるという長所を持つ。

3自由度を持つ要素を使用する場合の最も大きな問題の1つに、斜めひび割れのモデル化がある。もともと連続体である解析対象を仮想的に要素の集合体として分解して考えるような場合には、主応力に

よる破壊基準を用いることが重要である。DEM¹¹⁾やRBSM¹²⁾で一般的に用いられているように、法線方向と接線方向のバネを独立に扱った破壊基準を適用すると、本来仮想的に分割したはずの要素の境界の影響を強く受けることになる。ただし、粒状体構造物やレンガ造の建物のように、構造物が本当に個々の独立した要素から構成されている場合には、この破壊基準は妥当である。

図-5に示すように、任意の点Aにおける主応力 σ_p をその位置のせん断応力と法線応力(τ と σ_1)、B点とC点における法線応力を用いて求めた2次応力(σ_2)から計算する。この主応力 σ_p を材料強度と比較し、 σ_p が限界値を越える場合には、法線方向と接線方向のバネを切断する。そして主応力の方向を考えた上で、次の解析ステップ時にバネの破壊によって開放される力の再配分を行う。再配分された力は要素の中心に力とモーメントとして伝えられる。

3. 解析例の紹介

下記にAEMの解析例として数例のシミュレーション結果を紹介する。いずれも従来の解析手法では解析が困難な現象であるが、精度良く解析できていることがわかり、AEMが高い可能性を持つ手法であることが認識される。解析には、ごく一般的な性能(記憶容量 256-512KB、演算速度 500MHz程度)のパーソナルコンピュータを用いている。

3.1 2層RC構造の単調載荷実験のAEM解析

図-6と図-7に2層RC構造の単調載荷実験のAEMシミュレーション結果を示す。荷重条件やバネの分布数を変えた幾つかのケースを行ったが、いずれの場合も応力-変位曲線、クラックの進展の様子が、高い精度で再現された。解析に用いた材料の特性は、実験と同様である(D6の $\sigma_y=3,740\text{kgf/cm}^2$, D13の $\sigma_y=3,240\text{kgf/cm}^2$, $\sigma_c=233\text{kgf/cm}^2$, $\sigma_t=21.3\text{kgf/cm}^2$, $E_c=194\text{tf/cm}^2$)。

3.2 RCビルモデルの振動台破壊実験¹³⁾のAEM解析

図-8に示す1/15スケールのRCビルの模型を用いた振動台破壊実験をAEMでシミュレーションし、両者の結果を比較する。入力地震動は形状が同じで振幅の違う5地震動(40, 200, 400, 600, 800Gal)である。これらの地震動を振幅の小さい方(40Gal)か

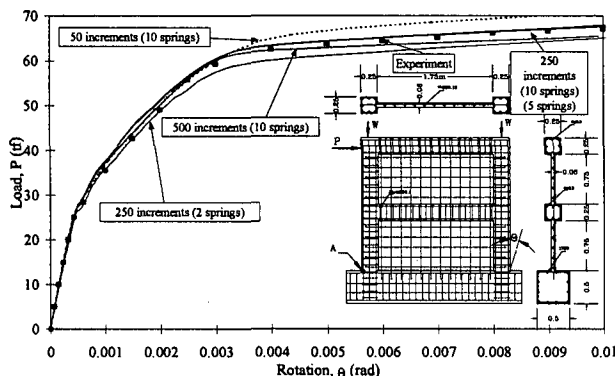


図-6 2層RC構造の破壊解析(実験との比較)

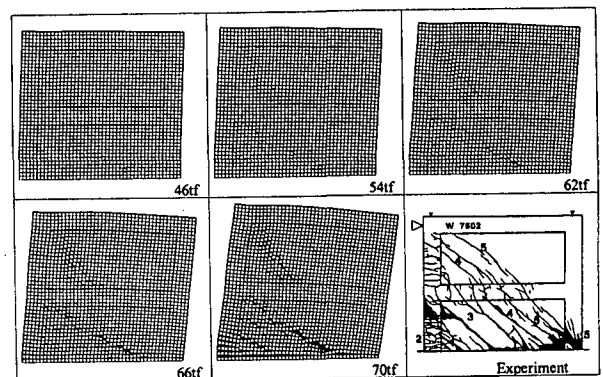


図-7 載荷途中におけるクラックの進展状況

ら順に、800Gal まで加えていく。AEM 解析の結果からは、破壊の進展にともなって構造物応答の非線形性が高くなっていく様子がシミュレーションされた。600Gal と 800Gal を入力した際の屋上の変位応答を示したものが図-9 と図-10 であるが、実験結果に驚くほど近いシミュレーション結果が得られている。この解析結果を得るために利用した事前情報は、実験と同じ材料パラメータ ($\sigma_y=4,400 \text{ kgf/cm}^2$ (D3), $\sigma_y=3,000 \text{ kgf/cm}^2$ (D2 and D1), $\sigma_u=1.5\sigma_y$, $\sigma_c=350 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_t=20 \text{ kgf/cm}^2$, $E_c=250 \text{ tf/cm}^2$) と配筋図、入力振動外力だけである。

図-11 は極端に強い地震動を作用させた場合の崩壊過程をシミュレーションしたものである。実際の実験では、用いた振動台の性能の限界から、完全に崩壊に至るまでの現象は再現できなかったが、AEM 解析は数値解析であるために、いかなる入力も作用させることも全く問題ない。

4. まとめ

本報では AEM の概略を紹介し、数値震動台としての可能性について述べた。解析結果の精度を決定する大きな要因は、「対象とする現象に対して、用いる解析モデルが数値解析手法として対応可能な性能を有しているかどうか」と「用いる材料モデルが適切かどうか」である。AEM における材料のモデル化は全くシンプルであり、しかもそれは材料を専門とする研究者の成果の借用である。しかし解析結果として得られる応答の非線形性は高く、また理論解や実験結果との整合性も非常に高い。AEM は開発されてからの日が浅いため、十分な実績の蓄積はまだない。しかし弾性体の挙動から崩壊過程までを含めた複雑な非線形挙動を、簡単なモデルで高精度に追跡できる高いポテンシャルを持つ。高精度数値震動台として可能性も高いと考えられる。

REFERENCES

- 1) Meguro Kimiro and Tagel-Din Hatem: 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.
- 2) Hatem, T.D. and Meguro, K.: Consideration of Poisson's Ratio Effect in Structural Analysis using Elements with Three Degrees of Freedom, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center (ERS), Institute of Industrial Science (IIS), The University of Tokyo, No. 31, pp.47-56, 1998.3.
- 3) Meguro, K. and Hatem, T.D.: An Efficient Technique for Fracture Analysis of Structures, Bulletin of ERS, IIS, The University of Tokyo, No.30, pp.103-116, 1997.
- 4) Meguro, K. and Hatem, T.D.: Development and Application of a New Model for Fracture Behavior Analysis of Structures, Proc. of Workshop on Earthquake Engineering Frontiers in Transportation Facilities, Post-Earthquake Reconstruction Strategies: NCEER-INCEDE Center-to-Center Project, Technical Report NCEER-97-0005/INCEDE Report No.1997-01, pp.265-279, 1997.10.
- 5) Meguro, K. and Hatem, T.D.: Simulation of Post-Buckling Behavior of Structures Using Applied Element Method, Bulletin of ERS, IIS, The University of Tokyo, No. 32, pp.125-135, 1999.3.
- 6) Meguro, K. and Hatem, T.D.: A New Simple and Accurate Technique for Failure Analysis of Structures, Bulletin of ERS, IIS, The University of Tokyo, No. 31, pp. 37-46, 1998.3.
- 7) Hatem, T.D. and Meguro, K.: Applied Element Simulation of Collapse Analysis of Structures, Bulletin of ERS, IIS, The University of Tokyo, No. 32, pp.113-123, 1999.3.
- 8) Hatem, T.D. and Meguro, K.: Simulation of Collapse Process of A Small-Scale RC Building Subjected to Magnified Base Excitation, Proc. of 25th JSCE (Japan Society of Civil Engineers) Earthquake Engineering Symposium, 1999.7.

- 9) Meguro, K. and Hatem, T.D.: 3-Dimensional Applied Element Simulation of Failure Behavior of Structures, SEISAN-KENKYU Vol.51, No.11, IIS, The University of Tokyo, pp.41-44, 1999.11.
- 10) Okamura, H. and Maekawa, K.: Nonlinear analysis and constitutive models of reinforced concrete, Gihodo Co. Ltd., Tokyo, 1991.
- 11) Meguro, K., Iwashita, K. and Hakuno, M.: Fracture Analysis of Media Composed of Irregularly Shaped Regions by the Extended Distinct Element Method, Structural Eng./ Earthquake Eng., Vol. 8, No. 3, pp. 131s~142s, JSCE, 1991.
- 12) Kawai, T.: Recent developments of the Rigid Body and Spring Model (RBSM) in structural analysis, Seiken Seminar Text Book, IIS, The University of Tokyo, pp.226-237, 1986.
- 13) Okada, T., Kumazawa, F., Horiuchi, S., Yamamoto, M., Fujioka, A., Shinozaki, K. and Nakano, Y.: Shaking Table Tests of Reinforced Concrete Small Scale Model Structure, Bulletin of ERS, IIS, The University of Tokyo, No. 22, pp. 13-40, 1989.

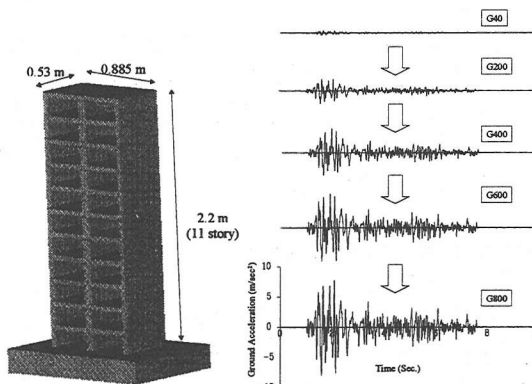


図-8 振動台実験に用いた RC ビルモデル(1/15)と入力地震動 (波形は同じで振幅の異なる 5 地震動)

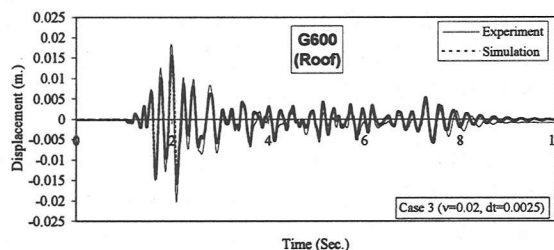


図-9 振幅 600Gal における変位応答 (屋上) (減衰 2%, 時間増分=0.0025s)

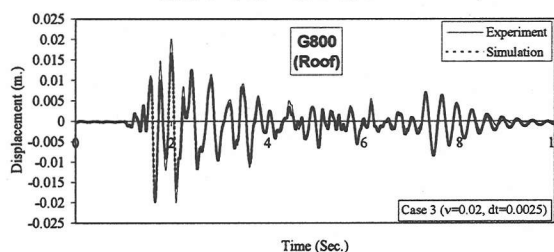


図-10 振幅 800Gal における変位応答 (屋上) (減衰 2%, 時間増分=0.0025s)

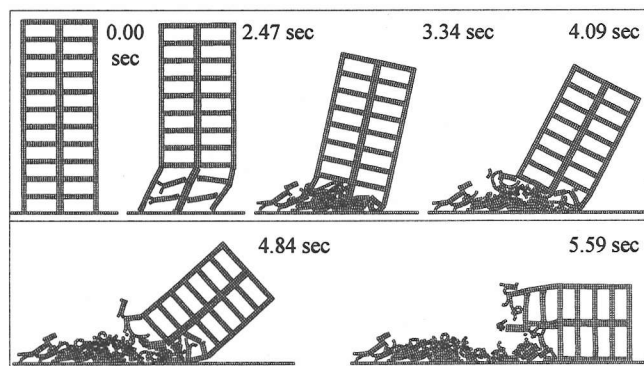


図-11 極端に強い地震動を入力して行った RC 構造物の崩壊過程の AEM 解析 (地震動振幅 1,200Gal, 時間スケールを 2 倍にした場合。実際の実験では、振動台の能力の関係からこの現象の再現はできていない。)