

(158) 地震による構造物崩壊被害の シミュレーション

東京大学地震研究所 正会員 ○目黒 公郎
東京大学地震研究所 正会員 伯野 元彦

1. はじめに 日本など一部の防災先進国では、防災対策の対象は今やハード・ウェアの段階から、ソフト・ウェアの段階へと移行している。しかし、近年の自然災害においても多数の人的被害を受けているような防災途上国では、依然としてハード・ウェアの防災対策が最重要課題であることに変わりはない。一部の防災先進国では防災の対象にもならない問題が、多くの防災途上国では、依然として深刻であり、人命の救助という点からも早急に解決されるべき問題であることは少なくない。構造物の崩壊によって多くの人命が奪われる地震被害などは、その典型的なものと言える。そこで本研究では、地震による構造物の崩壊メカニズム（破壊モードや破壊の進行過程など）を解析すべく、崩壊過程のシミュレーションを試みた。

本来破壊とは、空間的にも時間的にも広がりを持った現象であり、その進展過程や破壊後の挙動が学問的にも防災上も重要な意味を持つ。「どこがどんな形で壊れるのか?」、「時間的には短い現象か? 長い現象か?」、「どこまで壊れるのか?」、「壊れたものの影響はどこまで及ぶのか?」などが大きな問題となってくる。これまで破壊を扱うには、実験を行うか、実際の災害を待たなくてはならない状況もあり、難しい点多かった。しかし幸いにして、最近では電子計算機の力を借りたシミュレーション解析も可能になってきている。そこで本研究では『広がりを持った破壊』をうまく解析し得るように、適用範囲を連続体多層(相)媒質まで拡張した個別要素法(Extended Distinct Element Method 又は Modified DEM と呼ぶ)¹⁾を用いて、地震による構造物崩壊過程のシミュレーションを行った。本研究の解析は同時に、個別要素法を新しく位置づけた利用法の提案でもある。すなわち、EDEMを適用範囲を非連続体領域まで拡張した多自由度系のLumped Mass System (Extended Multi-Degree-of-Freedom System, Extended MDOF)として位置づけた利用法である。近年の電算機の性能の向上はめざましいが、解析対象物の媒質構成上の特質や規模によっては、構成要素を媒質レベルで1対1に対応づけるモデル化はまだ望めない。また工学的に重要となる基本的な振動モードや破壊モードの解析では、多数の要素を用いた媒質レベルでのモデル化の必要性も無い。これらの点を踏えてのEDEMの新しい利用法である。通常のMDOFを用いた動的応答解析法では、構造体に破壊が生じたり進行していく過程の動的挙動を解析することは非常に難しい。しかしEDEMを用いた動的応答解析法では、破壊前の挙動はもちろん破壊発生後も何等問題無くその挙動を追跡できる。例えば、破壊の発生や進行に伴って、構造体としての振動特性が変化する現象なども自然と表現される。

2. 拡張個別要素法(Extended DEM, EDEM)とは 解析対象媒質が強い非連続性や不均質性を有する場合や、解析対象現象が破壊現象(崩壊・粉碎・滑り・はく離・衝突など)を伴う大変形問題である場合などは、その挙動や現象を連続体解析法で表現するには多くの困難を伴う。これらは、媒質を独立した小要素の集合体と見なす非連続体解析法を用いることで解析できる可能性が高い。拡張個別要素法(EDEM)とは、このような非連続体解析法の1手法であり、汎用性と適用性を高めるために、解析対象を連続体多層(相)媒質まで拡張した個別要素法である。Fig.1とFig.2に、EDEMにおける媒質のモデル化と解析のフローチャートを示す。EDEMモデルを構成するある1要素*i*(質量*m_i*、慣性モーメント*I_i*)について、次の運動方程式が成り立つ。

$$m_i \cdot \ddot{u} + C_i \cdot \dot{u} + F_i = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$I_i \cdot \ddot{\phi} + D_i \cdot \dot{\phi} + M_i = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 F_i は要素に働く合力、 M_i は要素に働く合モーメント、 $C_i \cdot D_i$ は減衰定数、 u は要素の変位ベクトル、 ϕ は要素の回転変位である。変位ベクトル u と回転変位 ϕ は、式(1)と(2)を時刻歴で数値積分することによって求められる。各要素に作用する力は、法線・接線方向にそれぞれ配置した要素バネ (element-spring) と間隙バネ (pore-spring) の歪から求められるが、間隙バネが破壊した後は、要素バネによる反力のみが作用する事になる。間隙バネの破壊基準としては、法線方向に関しては引張り限界歪を設定し、接線方向に関してはクーロンの破壊基準を用いた。

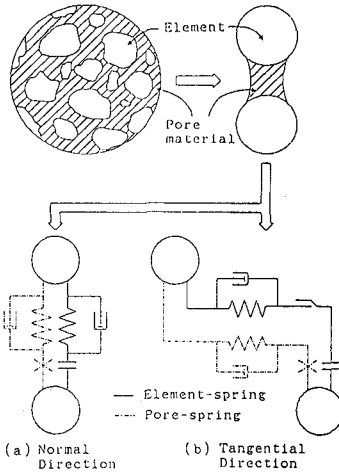


Fig.1 EDEM modeling of the medium

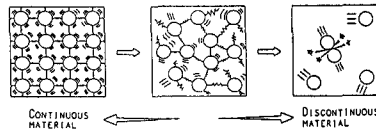


Fig.3 Behavior of the EDEM model

EDEMでは、要素間に存在する間隙物質や要素の角の影響によるかみ合わせ効果を、間隙バネ (pore-spring) としてモデル化しているが、間隙バネによって連結された複数要素の塊は、平進・回転を含め、あたかも1つの物体の様挙動する。またこの要素の塊は、間隙バネが破壊するに従って徐々に塑性化し、やがて完全非連続体として挙動する。従来のDEMが完全非連続体を解析対象とし、有限要素法(FEM)や境界要素法(BEM)が連続体を解析対象とするのに対して、EDEMは複合材料から成る媒質の連続体から非連続体に至るまでの一連の挙動解析が、統一的に連続して可能である。しかも要素同士が完全に離れて大きな変形を生じたり、初期と違った要素と接触して新たな応力場を形成したりする現象も何等問題なく解析できる (Fig. 3)。更に、ダイラタンシー効果、媒質の不均質性、応力や歪の局所化の問題などを自然と取込むことができるなどの長所を持つ。

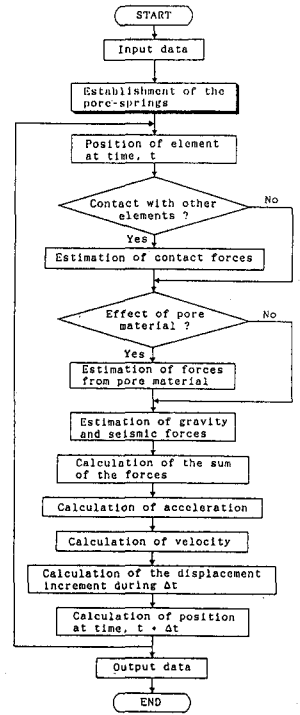


Fig.2 Flow of the EDEM simulation

3. シミュレーション結果

地震による構造物の崩壊メカニズム (破壊モードや破壊の進行過程など) を解析すべく、Figs. 4~9 に示すモデルを用いて、地震による構造物の崩壊過程のシミュレーションを試みた。Fig. 4 は、上部デッキの柱の脚下部にヒンジを有する2階建て構造物の地震時崩壊過程のシミュレーションであり、ロマ・プリータ地震(1989年)におけるインターステート 880号線サイプレス高架橋の被害に対応している。Fig. 5 は、スレンダーな構造物が共振的応答をした場合に見られる転倒型の崩壊被害である。Fig. 6 は、soft-first-storyタイプの構造物で良く見られる1階部に破壊が集中する地震被害のシミュレーションである。Fig. 7 は、建て増しなどによって中途階の柱の耐力が上下階に比べて低い構造物の解析例であり、フィリピン地震(1990年)で多く見られた中途階に破壊が集中する“だるま落とし”型の地震被害に対応している。Fig. 8 も、フィリピン地震(1990年)での Hyatt Hotel Tower 型の被害のシミュレーションである。Fig. 9 は、柱の強度が上層階にいくに従って著しく低下する構造物の解析例であり、メキシコ地震(1985年)などで多く見られたビルの“パンケーキ状崩壊”被害に対応している。

崩壊を伴うこれらの地震被害は、いずれも従来の手法では解析が非常に困難な現象ばかりであるが、EDEMを用いたシミュレーション結果は、これらをうまく表現し、過去の実際の地震被害とも良く一致した。

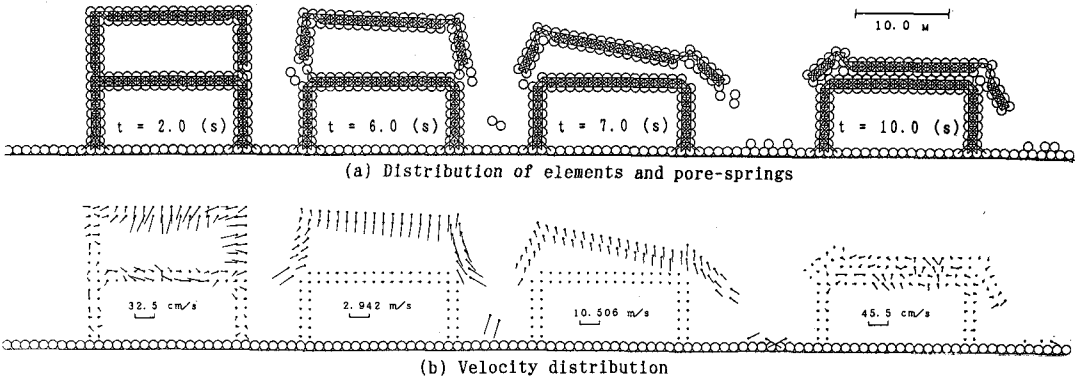


Fig.4 Collapse of a double-deck bridge with hinges at the bottom ends of upper deck columns (Cypress Interstate Bridge as seen in the Loma Prieta Earthquake, 1989)

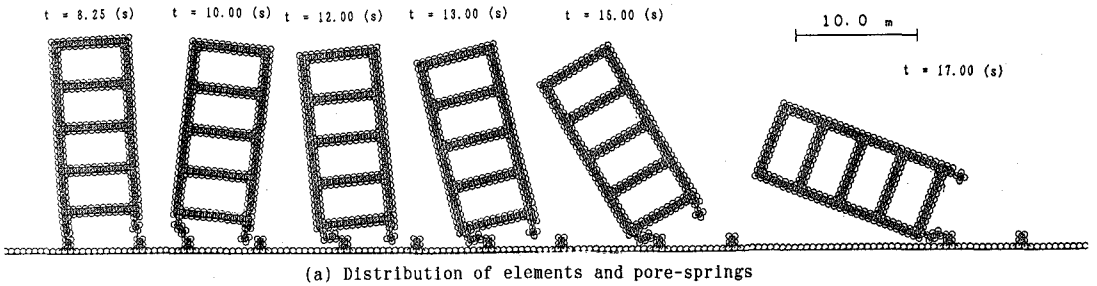


Fig.5 Collapse of a slender structure from resonance due to an earthquake

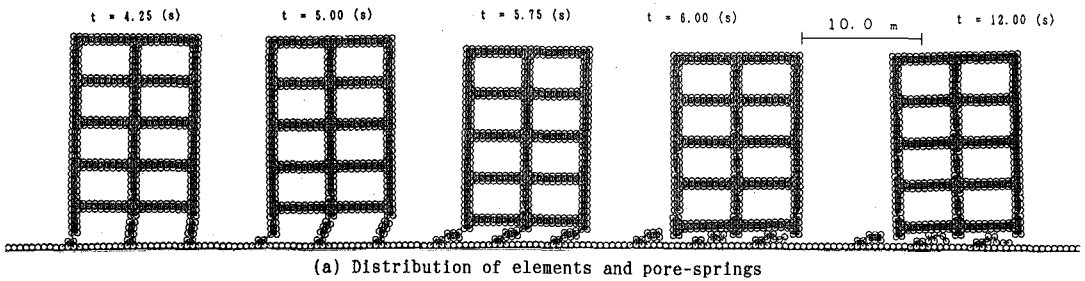


Fig.6 Collapse of a soft-first-story type structure due to an earthquake

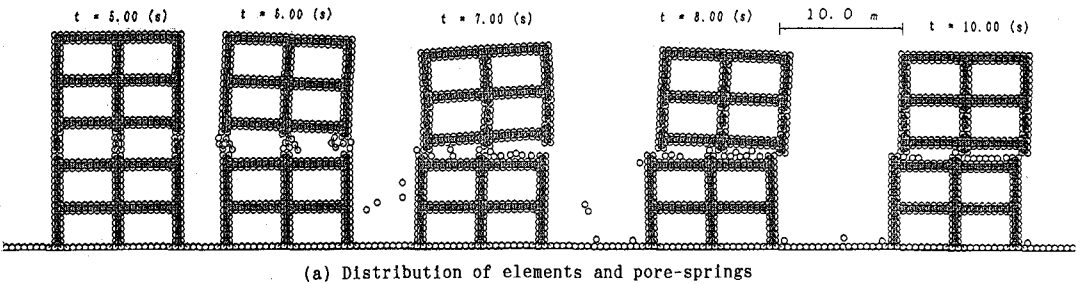
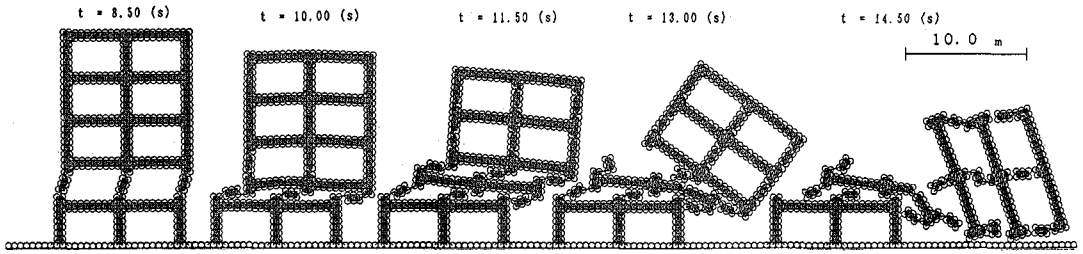
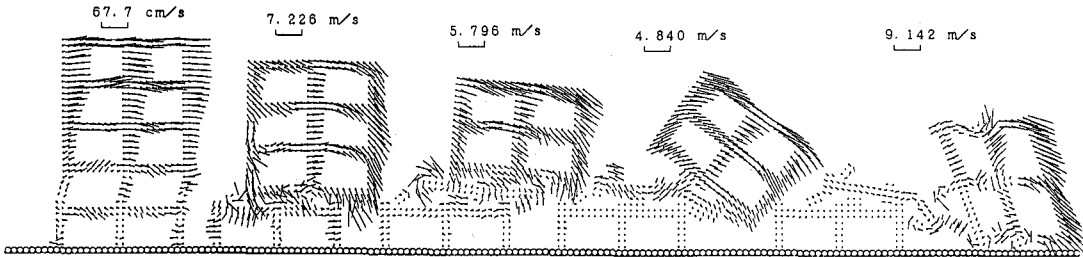


Fig.7 Collapse of a structure with a weak middle floor (as seen in the Philippine Earthquake, 1990)

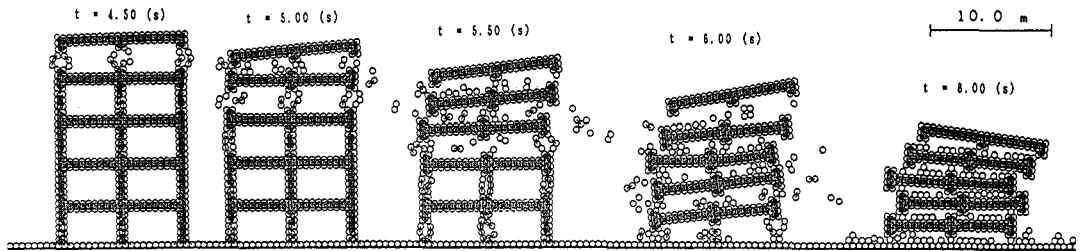


(a) Distribution of elements and pore-springs

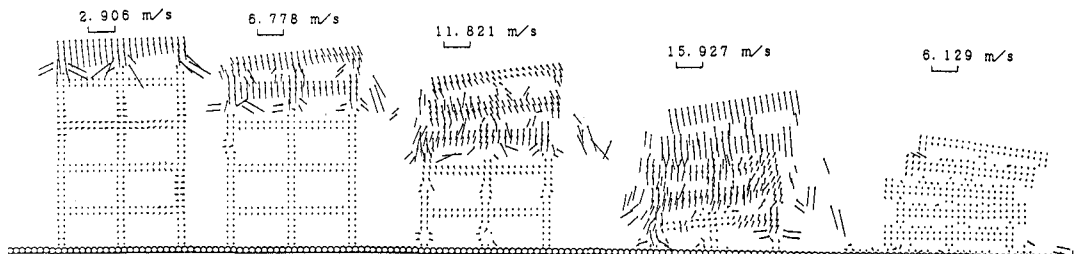


(b) Velocity distribution

Fig.8 Collapse of a structure (the Hyatt Hotel Tower type collapse, as seen in the Philippine Earthquake, 1990)



(a) Distribution of elements and pore-springs



(b) Velocity distribution

Fig.9 Pancake-type collapse of a structure (as seen in the Mexico Earthquake, 1985)

4. おわりに 本研究では、崩壊を伴う構造物の地震被害のメカニズムを解析すべく、EDEMを用いて構造物の崩壊過程のシミュレーションを試みた。いずれも従来の解析手法では適用が困難な現象であるが、EDEMを用いたシミュレーション結果は、実際の地震被害とも良く対応した。本研究により、地震による構造物の崩壊過程（時間的・空間的に広がりを持つ破壊現象）のシミュレーション手法として、EDEMが大きな可能性を有することと、EDEMを Extended MDOFとして位置付けた解析の有用性が確認された。

☆☆参考文献☆☆

- 1) MEGURO, K. and HAKUNO, M.: Fracture Analyses of Concrete Structures by the Modified Distinct Element Method. Structure Eng./Earthquake Eng. Japan Society of Civil Engineers, Vol.6, No.2, pp.283-294. 1989.