

(94) 粒状体シミュレーションによる 地盤－構造物連成系の非線形破壊解析

○東京大学大学院 学生会員 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

従来の地盤－構造物連成系の挙動解析は、主に次の2つの手法を用いて行なわれてきた。

① 有限要素法(FEM, BEM)グループ。

② Lumped Mass System グループ。

前者は解析対象媒質を均質な連続体と近似して取扱う手法であり、後者は解析対象物全体を、巨視的に簡単な質点－バネシステムとしてモデル化し解析を行なう手法である。両者の手法とも基本的には解析対象物に破壊が発生するまでの解析を主眼とするものであり、破壊の進行過程や破壊発生後の挙動解析、あるいは大変形問題などの解析には、多くの困難を伴う。

ところで、地盤－構造物連成系の地震被害例として、地震動や地盤の液状化を原因として発生する基礎の浮き上がりや、基礎杭と地盤のはく離あるいは引き抜きなどがある。これらは地盤と構造物の相互作用によって発生する非線形破壊現象であるが、上述の①や②の手法を用いて解析を行なうのは困難である。そこで本研究では、これらの問題への対応を目的とし、地盤－構造物連成系の新たな解析手法として、非連続体解析法の1手法である個別要素法(Distinct Element Method, DEM)¹⁾の適用を試みた。すなわち、地盤と構造物を共に粒状要素の集合体としてモデル化し、解析適用範囲を複合材料から成る連続体媒質にまで拡張した改良個別要素法(Modified Distinct Element Method, MDEM)²⁾を用いて、地盤－構造物連成系の非線形破壊解析を行なった。MDEMは、破壊発生までの解析に加えて、大変形問題や破壊の進行過程までの一連の解析が可能である。媒質を独立した小要素の集合体と考えるので、材料の不均一性も要素のばらつきという形で考慮できる。また、滑り面の形成やダイレクشنシー効果などの解析対象物の非線形性が自然と表現される特徴を持つ。更に、巨視的な観点からの破壊モードの解析に加え、個々の要素間の微視的破壊のメカニズムまで追跡することができるなどの点で優れている。

2. 解析法

本研究で用いたMDEMとは、要素の間隙物質の効果を“間隙バネ”の導入によりDEMに取り入れた岩下モデル³⁾を基に、間隙バネの修正と物性値パラメータの配列化により、解析適用範囲を連続体的な性質を持つ多層媒質にまで大きく拡張した非連続体解析法である。MDEMにおける媒質のモデル化は、Fig.1に示す通りである。

MDEMモデルを構成するある1つの円形要素 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。

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

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

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 ・ 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。

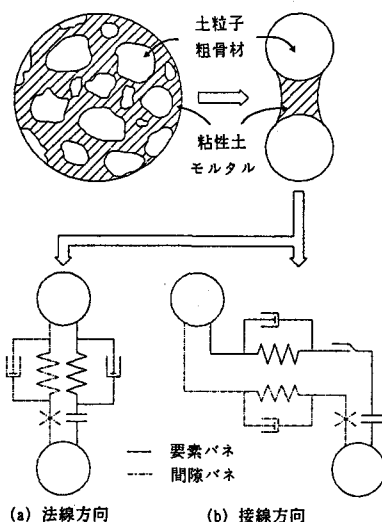


Fig.1 媒質のMDEMモデル化

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と間隙バネ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。解析に用いる物性値パラメータは、媒質を伝わる波動伝播速度から決定する方法を用いた。すなわち、モデルの波動伝播速度が解析対象媒質の波動伝播速度と調和するように、法線方向のバネ定数は P 波速度 (V_p) から、接線方向のバネ定数は S 波速度 (V_s) から決定した。タイムステップ Δt は、応力波が Δt 間に隣接する要素を飛び越えて伝播して行く事を避ける理由から、式(3)により決定した。

$$\Delta t < D_{\min} / V \quad \dots (3)$$

ただし、 $D_{\min}$ は隣接する要素間の最小距離、 V は波動伝播速度である。

MDEMモデルは、間隙バネが要素間に存在している間は連続体として挙動し、間隙バネが設定した破壊基準を越え、破壊されていくにつれて徐々に連続性を失い、やがて個々の要素が完全に独立した完全非連続体として挙動する。MDEMを用いれば、連続体から非連続体までの一連の連続した解析が可能であり、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、何等问题なく解析できる。MDEMモデルは、間隙バネが破壊されていくに従って徐々に塑性化し、構造系としての非線形性が自然と表現されていく特徴を持つ。また、地盤やコンクリートなどの粒状物質の集合体において、特徴的に見られるダイレタンシーの効果を、自然と取込むことができる。

3. 解析モデル

Fig. 2 に示すモデルを用いて、上部構造に水平荷重を作用させた場合について、地盤－構造物連成系の非線形破壊解析を行った。図中の太線で示された部分が上部構造で、2層のラーメン構造をしている。モデルは等径円要素の六角形配置から成り、要素数は上部構造要素1486個、地盤要素9794個、領域壁要素 636個、総要素数11916個である。

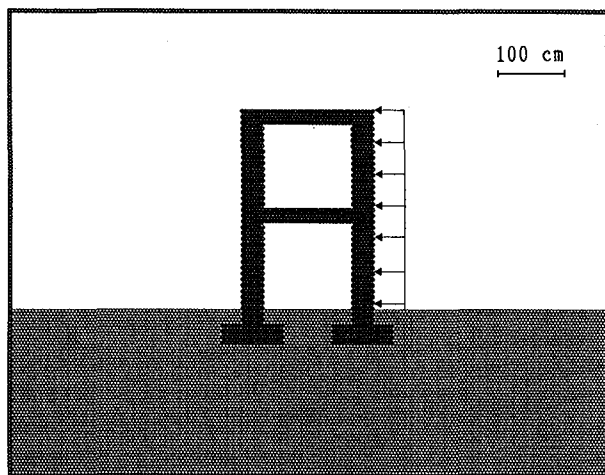


Fig. 2 地盤－構造物連成系解析モデル

4. 解析結果

Fig. 3 ～ Fig. 8 に解析結果を示す。

Fig. 3 と Fig. 4 は、解析の初期段階において要素間に働いている法線方向圧縮力（直力）と接線方向力（せん断力）の分布を示したものである。荷重載荷による応力波が、基礎部分から地盤に伝播して行く様子が分かる。波動の伝播速度を比較すると、せん断応力波に比べて直応力波が大きい傾向が見られるが、これはS波とP波に相当しているものと考えられる。

Fig. 5 と Fig. 6 は、地盤－構造物連成系の進行性破壊の様子を示したものである。Fig. 5 は各stageにおける間隙バネの分布図であり、Fig. 6 は各要素に作用している合力をベクトル表示したものである。Fig. 5 を見ると、stage1 で右フーチング右端付近に、引張りを原因とする地盤破壊がまず生じる。stage2 では、引張り破壊の進行に加え、せん断変形を原因とする地盤破壊が、右フーチング左端付近から発生し進行して行く。stage3 では、破壊は上部構造にまで及ぶが、その発生箇所は Fig. 6 から分かるように応力集中が発生している脚下部や隅角部に集中している。これらの現象は、実際の地震被害においてもよく見られるものである。Fig. 7 は、stage3 でのクラック分布図であり、荷重載荷方向に平行な向きに微小なクラックが発生し、それらがあるゾーン（バンド）に連なる事によって破壊が形成されている様子が分かる。Fig. 8 は、

stage3 における基礎付近の変位分布図であるが、右フーチング基礎付近の地盤に破壊が発生し、その破壊面を不連続境界として基礎とその付近の地盤の浮き上がり現象が見られる。

5. おわりに

MDEMを用いて、個別要素法による地盤－構造物連成系の非線形破壊解析を試みた。その結果、荷重載荷による応力波が地盤内を伝播して行き、引張りやせん断変形を原因とする地盤破壊が発生した。上部構造では、応力集中の発生する脚下部や隅角部に破壊が発生し、基礎の浮き上がり現象もシミュレートできた。これらの現象は、実際の地震被害と調和的なものであり、個別要素法による地盤－構造物連成系の非線形破壊解析の可能性が認められた。

☆☆参考文献☆☆

- 1)Cundall,P,A, “ A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movement in Blocky Rocksystem ”, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc., 2, pp.129-136.
- 2)目黒公郎・伯野元彦, “粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析” 東京大学地震研究所集報 , 63, pp.409-468, 1989.
- 3)岩下和義, “粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析 -その1- ” 東京大学地震研究所集報 , 63, pp.201-235, 1989.

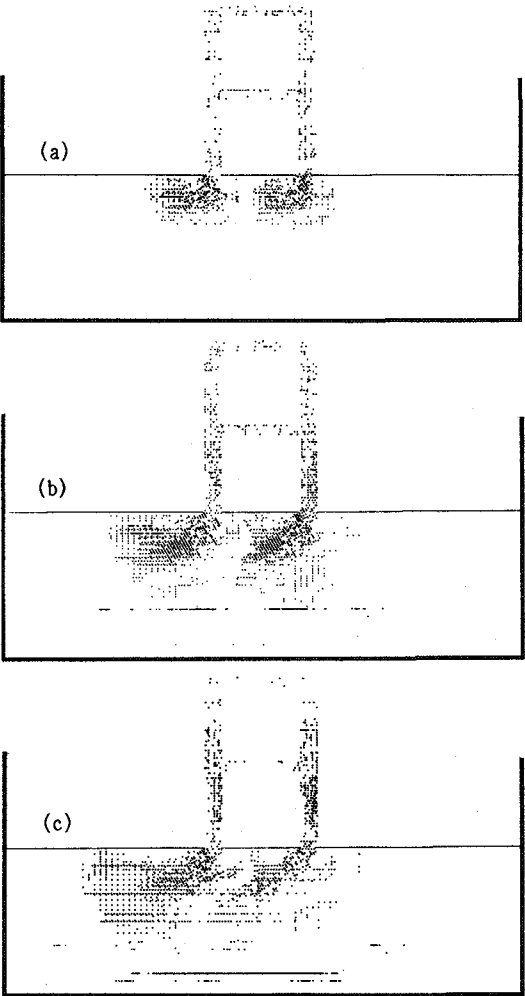
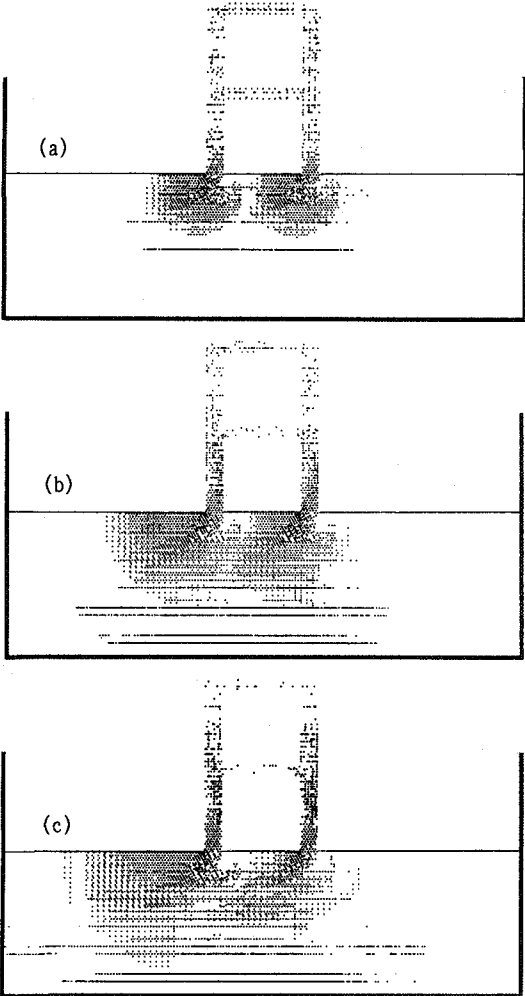


Fig. 3 法線方向圧縮応力波伝播の様子 (1/100 s 毎) Fig. 4 接線方向応力波伝播の様子 (1/100 s 毎)

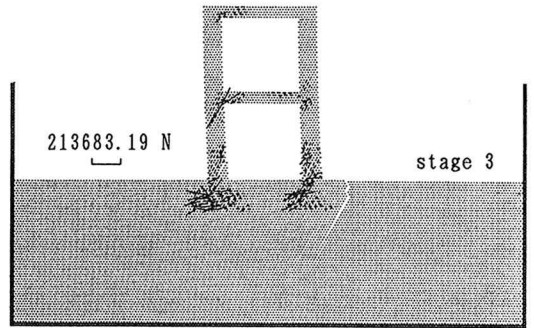
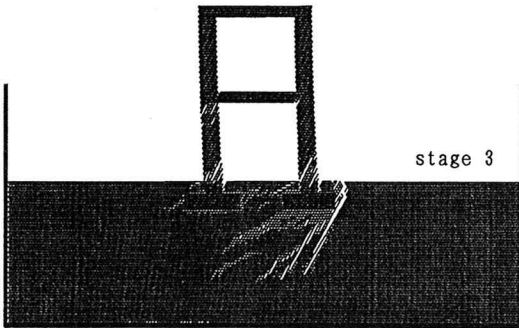
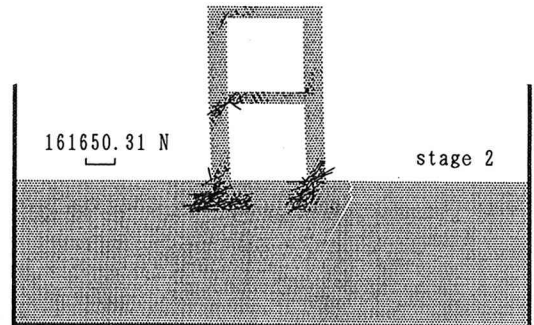
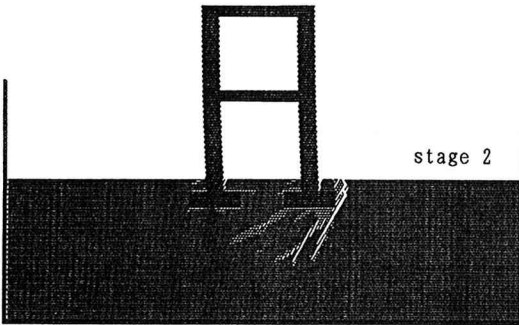
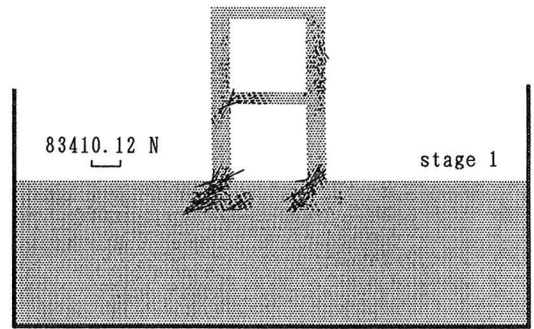
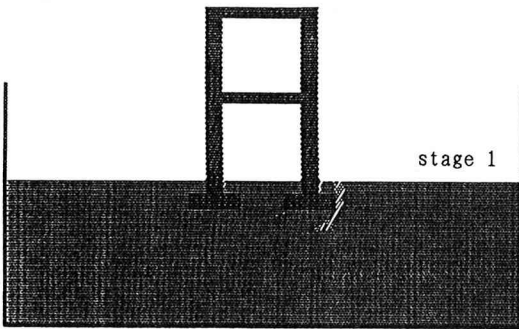


Fig. 5 地盤－構造物連成系の非線形破壊過程
(間隙バネ分布図)

Fig. 6 地盤－構造物連成系の非線形破壊過程
(合力ベクトル分布図)

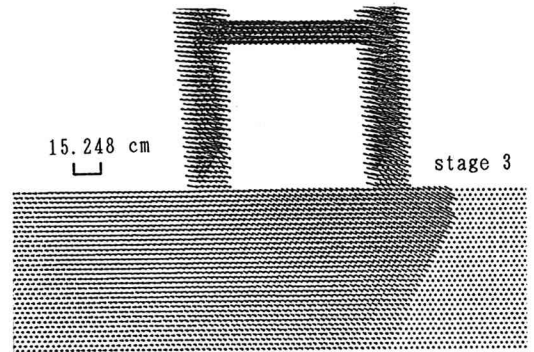
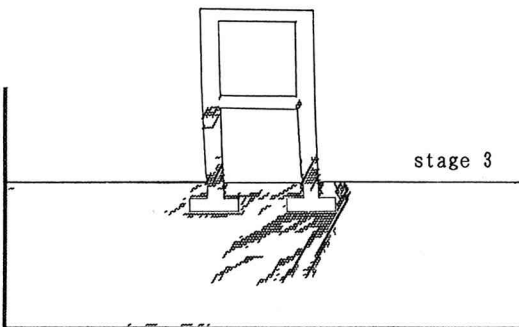


Fig. 7 地盤－構造物連成系の非線形破壊
(stage3 におけるクラック分布図)

Fig. 8 構造物基礎付近の地盤変状
(変位分布図)