

(64) 個別要素の集合体に対する地震応答載荷の数値実験

武蔵工業大学 正会員 片田敏行
武蔵工業大学大学院 学生会員 小室智昭
東京大学大学院 学生会員 目黒公郎

1. まえがき

最近、破壊解析に個別剛体要素法 (Distinct Element Method, D. E. M) と呼ばれる数値解析手法が用いられるようになった。この解析手法は解析対象媒質を非連続体として扱っているため、個々に分離した剛体要素を用いて回転運動を含む破壊後の大変位を経時的に解析、追跡することが可能である。伯野・岩下・目黒は、この個別要素法を基に連続体的挙動を示す非連続体にも適用できるような修正個別要素法を開発した¹⁰⁾。この解析手法を用いると、従来連続体的手法で解析されてきた土の挙動にも適用可能である。本研究では、この修正個別要素法を用いて振動三軸試験の供試体を模擬した個別要素の集合体に対する地震応答載荷実験の数値実験を行なったので、その解析結果を報告する。

動的材料試験において、材料を一定荷重で加振すると材料の剛性低下によって変位が著しく増大する。それゆえ、破壊付近における応力-ひずみ関係が正確に得られない。そのため、近頃ではオンライン地震応答載荷実験法によって、材料の動的試験が行われている例が見られる。土の場合でも、表層地盤の固有振動数を有する1自由度系のもとで、オンライン地震応答載荷実験が行われている。この解析により、従来の荷重制御方式では不可能であった飽和砂の完全液状化状態までの加振が可能となった。

そこで、土の供試体を模擬した個別要素より成る集合体にも、オンライン地震応答載荷実験と同じように1自由度系の応答変位を載荷し、その反力を求める。これを地震波の継続時間に渡って繰り返し、集合体の非線形動的復元力特性を求めることにする。本研究では、この修正個別要素法を用いて振動三軸試験の供試体を模擬した個別要素の集合体に対する地震応答載荷実験の数値実験によって、供試体が破壊する過程を追跡できるのではないかと考えている。

2. 地震応答載荷数値実験による破壊シミュレーション

個別要素より成る集合体に、荷重制御的にあらかじめ決められた荷重を載荷すると、材料試験の場合と同じ問題点が生じる。すなわち、荷重により集合体が破壊し始めても一定の荷重が作用するので、破壊の進行が実際現象よりも速く進むことになる。

これに対して、地震応答載荷は個別要素の集合体より構成される振動系の動特性を1自由度系で表し、地震による振動系の応答にしたがい個別要素の集合体に載荷を行う(図-1)。このため、個別要素の集合体の応答が非線形領域に入ると振動系の応答が変化するとつれて、個別要素に載荷される応答変位が変化する。このように実際現象により近い載荷条件のもとで数値解析を行う。

3. 個別要素法による土の復元力特性の数値解析

(1) 個別要素法の概略

DEMとは解析対象媒質を独立した小要素の集合体として取り扱う。この各要素を剛体と考え、要素の変形は接触点でのみ生じるものとする。接触点には、弾性スプリング、粘性

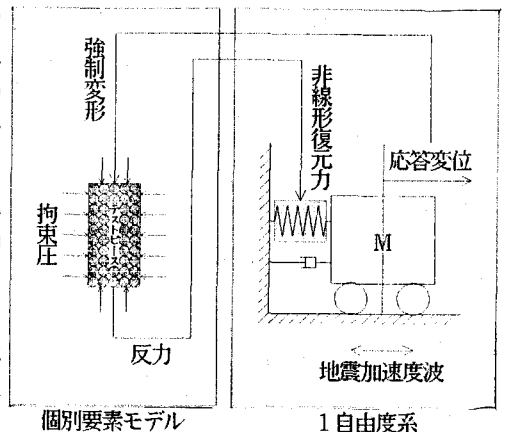


図-1 個別要素集合体に対する地震応答載荷数値実験の概念図

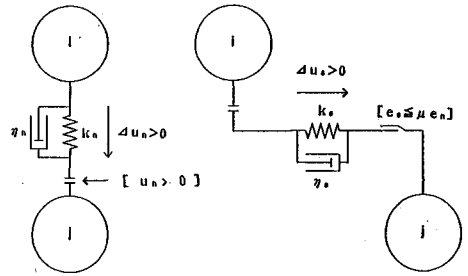
ダッシュポット、スライダーなどを配置し、これらを通じて要素間の力の伝達が行われるものとしている。つまり、各要素の物性は接触点に配置する弾性バネ、粘性ダッシュポット、スライダーなどにより表現される。このように、媒質を非連続体として解析する。

質量 m 、慣性モーメント I のある1つの円形要素について、次の運動方程式が成り立つ。

$$(1)$$

$$(2)$$

ただし、 F は要素に働く合力、 M は要素に働く合モーメント、 C と D は減衰定数、 ϕ は要素の回転変位、 K は弾性スプリングのバネ定数を表している。



(a)法線方向 (b)接線方向

図-2 DEMの接触点における力学モデル

図-2に示す力学的モデルに用いられている直方向バネ(バネ定数 k_n)と、接線方向バネ(バネ定数 k_s)を要素バネという。直・接線方向にそれぞれ配置してあるダッシュポット(粘性係数 γ_n 、 γ_s)とともに、DEMの基本となるものである。

また、要素間のバネ定数は対象媒質のヤング率 E 、ポアソン比 ν 、密度 γ からLameの定数 μ ・ λ を求め、それより決定する。ここでLameの定数 μ は剛性率 G と同じものであり、これから S 波速度 V_s と P 波速度 V_p を計算する。さらに、直方向のバネ定数には V_p が、せん断方向のバネ定数には V_s が関与すると仮定して、直方向、およびせん断方向のバネ定数を求める。

全ての要素について(1)式、(2)式が求められるので、原理的にはこれらを連立させて解けばよい。しかし、実際問題としては莫大な計算量となる。また、解析対象全体の系がばね、ダッシュポットの複合連成系となるので、解析が非常に困難である。そこで、Cundallは時間領域で差分近似をすることにより前進的に数値解析することを提案した。すなわち、1ステップ前の時刻での要素変位から今回要素に作用している力を求め、ニュートンの第2法則により加速度を求め、これを積分して速度、変位を求めるという方法である。

DEMは時間領域で数値積分を行うことにより解析を行う手法である。ゆえに、解析の安定性には、時間間隔 Δt が大きな影響を及ぼす。DEMは、要素の接触により力や波動を伝播させていく方法なので、1ステップの間に波動が隣接する要素を乗り越えて、先の方の要素に伝わってしまうと反力の評価がうまくできない。そこで、本研究ではこの考え方にに基づき Δt を次式を用いて決定する。

$$\Delta t \cdot V = D_{min}$$

$$\therefore \Delta t = \frac{D_{min}}{V} \quad (3)$$

(2)個別要素による土のモデル化

土の振動三軸試験では直径5cm、高さ10cmの供試体を用いた。そこで、解析に用いる個別要素の集合体もこの寸法に準じる大きさとした。しかし、個別要素解析は2次元で行うので、集合体も2次元モデルである。この点が実際の供試体と異なる。

また、個別要素の集合体に対する拘束圧は、

$$\text{拘束圧} = \text{砂の単位体積重量} \times \text{深さ}$$

で与えられる。集合体の単位体積重量は約1.80 gf/cm³と仮定した。それ

ゆえ、深さ10m程度にある土を解析対象とすると、復元力を取り出すために振動三軸試験機にセットされ

表-1 個別要素とその集合体の特性

全要素数 (内部要素数)	(211個)
要素の 単位体積重量	1800 N/m ³
要素ばねの 剛性係数	4.6 × 10 ⁴ N/m
要素ばねの 速度減衰係数	1.5 × 10 ³ N/m/s
要素ばねの せん断ばね係数	1.6 × 10 ⁴ N/m
要素ばねの せん断減衰係数	1.0 × 10 ³ N/m/s
要素ばねの 回転ばね係数	1.0 × 10 ⁴ N/m
要素ばねの せん断ばね係数	4.6 × 10 ² N/m/s
要素ばねの せん断減衰係数	1.6 × 10 ² N/m
要素ばねの せん断減衰係数	1.0 × 10 ³ N/m/s
拘束圧	1.80 Kg f/cm ²
最大入力加速度	200 cm/s ²
1自由要素の 固有振動数	1.0 Hz
1自由要素の 減衰定数	0.1
時間間隔	0.00005 秒

た集合体の拘束圧Pは、

$$P = 1.80 (\text{gf/cm}^3) \times 1000 (\text{cm}) = 1.8 \text{ kgf/cm}^2$$

となる。この拘束圧に対して、集合体の解析を行うことにする。解析に用いた個別要素の集合体の特性を表-1に示す。この集合体は特に土の種類を想定したわけではない。解析の一例として想定した。

4. 1自由度系の動特性の決定

(1)地盤のモデル化

オンライン地震応答載荷実験法では、振動系全体の振動特性を考慮しながらその振動系を構成する材料の載荷実験を行う。このため、振動系の1次モードを考慮した1自由度系を地震加速度で加振し、その応答変位を供試体に加えて反力を求める。この反力を用いて次のステップの応答を計算する。本研究でも、同じように1自由度系を地震加速度で加振し、その応答変位を個別要素の集合体に加える。このため、解析に必要な1自由度系の固有振動数は $f=1.5 \text{ Hz}$ 、減衰定数は $h=0.10$ と仮定し、この動特性のもとにおける非線形復元力特性を解析する。この値は著者らが行った飽和砂のオンライン地震応答載荷実験で用いた値と同じである。

(2)想定地盤の質量

振動系を1自由度系でモデル化した場合のオンライン地震応答載荷では、1自由度系の質量mの値を定める必要がある。本研究では先ず1自由度系の固有振動数を仮定した上で、この質量を決定した。具体的には、1自由度系の固有振動数 f_0 と、表層地盤の1次波動の1次固有振動数と等しいとして、1自由度系の仮想質量を求めた。この時求められる仮想質量は仮定した固有振動数を満足する地盤モデルの仮想質量である。すなわち、

$$m = \frac{4 H \rho}{\pi^2} \quad (4)$$

ただし、m: 質量、H: 地盤深さ、 ρ : 質量密度

5. 土の動的破壊の数値シミュレーション

(1)入力波⁶⁾

入力波の種類が異なると、最大加速度値が同じでも、復元力特性は異なるかも知れない。R. O. Gモデルを用いた地震応答解析結果より1自由度系の履歴エネルギー量を計算した例を見ると、入力波の種類が異なると最大入力加速度が同じでも、その吸収量は異なる⁶⁾。すなわち、単一成分波の卓越した狭帯域成分波の

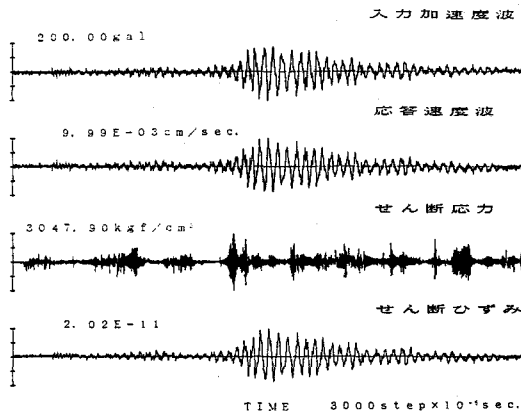


図-3 個別要素の集合体に対する載荷実験結果
—十勝沖地震余震(5/18)・大船液記録の場合—

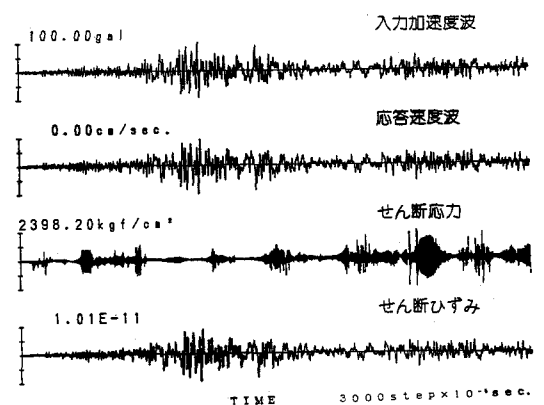


図-4 個別要素の集合体に対する載荷実験結果
—日本海中部地震・秋田港湾記録の場合—

入力波のとき履歴吸収エネルギー量が大きくなり、広帯域成分を有する入力波のとき履歴吸収エネルギー量は小さくなる。この傾向は飽和砂のオンライン実験結果より得られる履歴吸収エネルギー量でも同様であった。このことは入力波の波形特性が異なると供試体の壊れかたが違うことを示している。しかし、本研究ではまず第一に個別要素モデルを用いて供試体の動的破壊の数値シミュレーションが可能かどうかの検討することにした。そこで、上記に述べた解析に用いられた入力波のうちで最も履歴吸収エネルギー量が大きい波形（大船渡記録）を用いることにした。さらに、比較のために、日本海中部地震における秋田港湾記録（EW成分）も用いた解析も行った。

なお、1自由度系の応答計算に当たっては、中央差分法を用いて応答加速度を求めた。

(2)解析結果

個別要素の集合体に対して地震応答載荷を行った結果、得られた1自由度系の応答波形および集合体のせん断応力とせん断ひずみを図-3に示す。これらを見て特徴的なことはせん断応力波に極めて高周波な成分が卓越していることである。さらに、その波形も入力波形とは異なり、入力波の後半に大きな値が見られる。これらの解析結果は要素バネと間隙バネより成る個別要素の集合体が外力によりずれるとき、瞬間的にパルス的な大きなせん断抵抗値を示すことを意味している。

6. あとがき

本研究は土より成る供試体を模擬した個別要素の集合体に対して地震応答載荷の数値実験を行った。すなわち、個別要素より構成される振動系の動特性を1自由度系で表し、地震による振動系の応答にしたがい個別要素の集合体に載荷を行った。①せん断応力波には極めて高周波の成分が見られる、②入力波形とせん断応力波形は互いにかなり違う、など定性的に興味深い解析結果が得られた。しかし、1自由度系の応答加速度値やせん断ひずみ値が小さいことなど定量的な評価を加えるには、さらに検討を要するである。

謝辞

本研究で使用した地震加速度記録は運輸省港湾技術研究所で公開されたものです。謝意を表します。また、本研究で使用した個別要素法解析のプログラムは東京大学地震研究所伯野研究室で作成したものです。記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 加藤勉・秋山宏：強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷，日本建築学会論文報告集、第235号、pp.9-18、昭和50年9月。
- 2) 秋山宏：建築物の耐震極限設計、東京大学出版会、1980年9月。
- 3) 土岐憲三ほか：構造物地盤系の終局安全性の分配とそれに基づく耐震設計法の開発、昭和60年度科学研究費補助金（総合研究A）研究成果報告書、pp.109-119、昭和61年3月。
- 4) 足立紀尚・龍岡文夫：土の力学（Ⅲ）-圧密・せん断・動的解析-、技報堂出版、1981年。
- 5) 石原研而：土質動力学の基礎、鹿島出版会、1982。
- 6) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男：昭和58年(1983年)日本海中部地震の港湾地域における強震記録、港湾技研資料、No.458、運輸省港湾技術研究所、1983.9。
- 7) 片田敏行・阿部幸樹・東山晃：ひずみエネルギー蓄積効果を用いた飽和砂地盤の液化化過程の考察、土木学会論文集、第388号、pp.43-50、1987年12月。
- 8) 小室智昭・片田敏行・織本慶一：地盤の履歴エネルギー吸収状況に及ぼす入力特性の影響、第43回土木学会学術講演会講演概要集、昭和63年10月。
- 9) 高梨晃一・宇田川邦明・田中尚：電算機-試験機オンラインシステムによる構造物の非線形地震応答解析-その3 2層鉄骨フレームの解析例、日本建築学会論文報告集、第288号、昭和55年2月。
- 11) K. MEGURO, K. IWASHITA AND M. HAKUNO: "Fracture Tests of Masonry Concrete Elements by Granular Assembly Simulation.", Proceedings of 9WCEE (1988), Vol. VI. pp.181-186