

個別楕円要素法による粒状体構造物の破壊過程の検討

Analysis of Dynamic Failure of Coarse Particle Assemblage by Discrete Elliptic Element Method

松島 亘 志*・小長井 一 男*

Takashi MATSUSHIMA and Kazuo KONAGAI

1. はじめに

フィルダムやマウンド、海底の捨石基礎などの粒状体構造の地震時の安定解析は、Mohr-Coulombの破壊基準を用い、震度法により行われているものが多い。しかし、過去のいくつかの実験的研究によると、粗粒からなる構造の動的破壊には、砂や粘土の構造の破壊と異なる特徴があることが指摘されている。田村ら¹⁾は、大型振動台上に粒径5~10mmの碎石、2~6cmの玉砂利、10~30cmの玉石と大きさの異なる粒状材料を使って幅3m、高さ1.4mのフィルダム模型を作り、2.15Hz~3.5Hzの範囲の振動数で振動破壊実験を行った。その結果、粒径が大きくなるにしたがって、破壊加速度が増加することを確認し、破壊加速度が粒径の対数の一次関数として表現されるという経験式を提案している。小長井、田村²⁻⁴⁾はガラス粒子を積んだ堤体模型を同じ屈折率の液体に浸し、ここにレーザー光シートを通すことによって模型内部の任意の断面を可視化し、振動実験時の破壊過程を観測した。その結果、堤体斜面が滑り出す加速度が加振振動数の増加とともに増えることを確認している。このように粗粒からなる構造の破壊に、粒子のサイズや加振振動数の影響があることは、実際の構造物の動的安定性を議論する上できわめて重要な検討課題である。

模型実験で確認されたこれらの知見を、寸法の大きく異なる実際の構造の安定解析に役立てるためには、そのメカニズムを正確に把握した上で、適切な相似則を用いる必要があるが、コンピューターによるシミュレーションはこのような検討を容易にする有力な手段である。不連続体のシミュレーション技法としては、Cundall^{5),11)}によって提案された個別要素法 (Discrete Element Method: DEM)があるが、近年のコンピューターの性能の著しい発達に伴って、扱える粒子の数も飛躍的に増加し、多くの分野で用いられている⁶⁾⁻⁹⁾。伯野ら⁷⁻⁹⁾は、斜面の安定、土石流、埋設構造物地盤の相互作用等の動

*東京大学生産技術研究所 第1部

的問題の解析に個別要素法を用い、興味ある知見を示しているが、接触判定の容易さから、円形の要素を多用している。しかし粒子のサイズやその形状が構造に与える影響を検討する場合には、多角形¹⁰⁾や楕円¹¹⁾の要素を用いたり、あるいはいくつかの円要素を組み合わせ不整形な形の粒子を作る^{9),12)}などの工夫が必要となる。本研究では、比較的接触判定のアルゴリズムが構築しやすく、かつある程度形状の影響を取り込めるものとして、楕円要素を用い、堤体構造の破壊加速度の周波数依存性に焦点を絞り検討を加えることにする。

2. 楕円を用いた個別要素法

個別要素法のフローそのものは基本的に伯野ら⁷⁻⁹⁾と同様、粒子間の接触判定を行いながら、粒子そのものの運動を差分法で追跡していくものである。この手法は接触判定に多くの時間を割くものであるため、円以外の形状の要素を用いると著しく計算時間が伸びることになる。しかしながら粒状体構造に特有なダイラタンシー特性、内部摩擦角などに粒子の形状が与える影響はきわめて大きく、これを取り込んだ解析が不可欠である。楕円は円と同じく特殊な形ではあるが、離心率をさまざまに変えることで幅広く形状の影響を取り込むことが可能になる。楕円の接触判定は数理的に実係数4次方程式の実数根の存在を判定することに帰着する。ニュートン法、カルダノ法を用いてこれらの根を数値計算で解くことはできるが、ここでは解析的な判定の可能なFerrariの方法¹³⁾を用いた。なお接触判定を2段階とし、最初に楕円に外接する円どうしの接触判定を行い、この段階で非接触と判定されたものを第2段階のFerrari法による判定から除外することで、より大幅に計算時間の短縮を図ることができる。

3. 堤体構造の破壊過程の検討

両側に勾配1:2の斜面を持つ堤体を検討の対象とする。文献2), 3), 4)の模型実験を参考にして、粒径1~2

研 究 速 報

cmほどの楕円粒子を高さ約25cmに積み上げてこれを堤軸直角方向に正弦波で加振し、その振幅を徐々に上げながら破壊過程のシミュレーションを行った。

数値計算は32bitのパーソナルコンピュータで行っている。使用オペレーティングシステム、およびプログラム言語はそれぞれOS/2, FORTRAN-77である。

3-1 モデルの作成

堤体モデルと同様の勾配をもつ二等辺三角形の枠を設け、その中に粒子を乱数発生させる(図1(1))。この時点で重力が鉛直上向きにかかっているものとし、これらの粒子を枠内に詰めこむ。この後床を設け(図1(2))、重力の向きを鉛直下向きに元に戻して床上に三角形に粒子を積み上げる(図1(3))。床に直接接している粒子を固定した後、三角形の枠をはずして、すべての粒子が静止した時点で堤体の完成となる(図1(4))。

積み上げられた楕円の寸法は短軸の長さ2bで代表させている。これは、実際にふるいを用いた粒度分析で、2bの最小幅を持つ粒子が通過する可能性があることを考慮したものである。粒子の扁平度は短軸の長軸に対する比 $k(\approx\sqrt{1-e^2})$: e =離心率)で表現している。今回のモデルでは、 k は平均0.5, 分散0.1の正規分布, b は平均0.01m, 分散0.1m²の正規分布に従うものとし、 k の最大値を1.0, 最小値を0.2, b の最大値を0.015m, 最小値を0.05mとし、その範囲に入らなかったものは切り捨てた(図2, 3)。楕円粒子表面の動摩擦係数(ν)は1.0としているが、これは楕円粒子そのものの摩擦係数というよりも、起伏にとんだ粒子の複雑な形状を含めた効果を表

わすことを意図したものである。

接触時の粒子間の相互作用を表現するため、DEMでは粒子間の接触面の法線方向にVoigtモデル、接線方向にVoigtモデルとスライダーを直結したモデルを挿入する。これらのモデルのばね定数や粘性減衰係数は、動的問題を取り扱ったいくつかの論文の中で、以下の方針で設定されている。

(I) 積み上げた粒子を伝播する弾性波速度からばね定数 k を定める。

(II) 反発係数 e ,あるいは粒状体の全体の振動の減衰から c を定める。

(III) 時間刻み Δt は、1ステップの間に弾性波の進む距

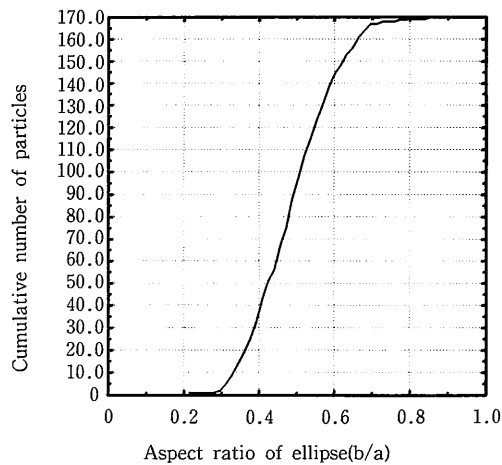


図2 楕円粒子のアスペクト比 (b/a) に関する加積曲線

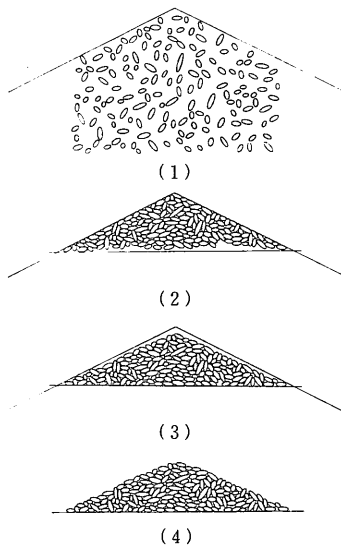


図1 粒子のパッキング

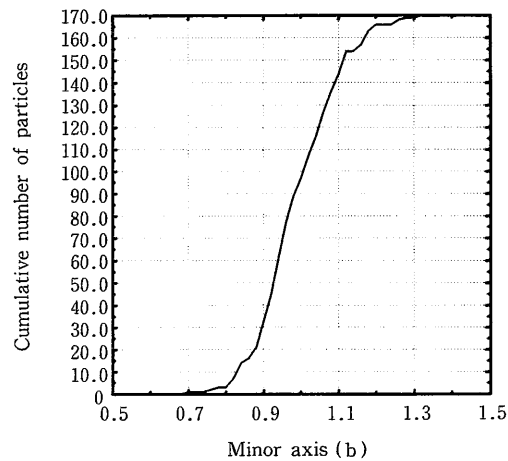


図3 楕円粒子の短軸に関する加積曲線

研 究 速 報

表 1 計算で用いたパラメータ

要素数N	170個	時間増分 Δt	1.0×10^{-4} sec
粒子密度 ρ	2.0×10^3 kg/m ³	動摩擦係数 ν	1.0
法線方向ばね定数 k_n	3.0×10^4 N/m	法線方向減衰係数 C_n	5.0 kg/s
接線方向ばね定数 k_s	1.0×10^4 N/m	接線方向減衰係数 C_s	5.0 kg/s

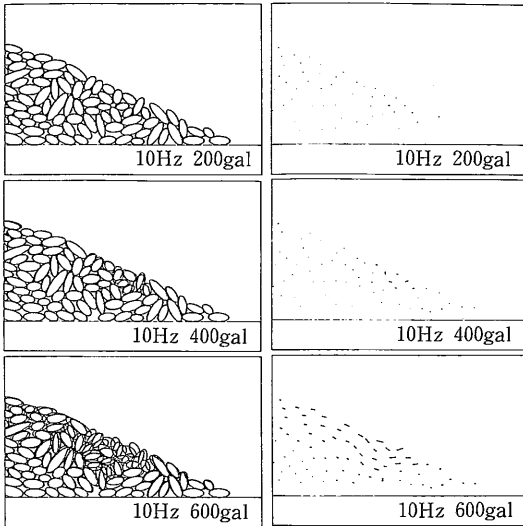


図 4 楕円粒子の移動状況

離が粒子間の最小距離を超えない程度に小さくする。

(IV)衝突した粒子同士の接触時間が Δt に対して十分大きくなるように Δt を決める。

(III)の条件は安定した時刻歴解析を行ううえで重要であるが、 Δt は著しく小さくなり、結果として膨大な計算時間が必要となる。粒子の剛体運動が支配的な挙動を検討する場合には、ばね定数の値がある程度以上大きければ、その影響は粒子形状の効果に比べて著しく小さく、計算結果に大きな差が生じない。そこで今回は計算時間の短縮のため、法線方向、接線方向のばね定数 k_n 、 k_s は表 1 に示される値を用いている。

3-2 加振実験のシミュレーション

堤体を載せた床を、振幅を徐々に増す正弦波で加振し、異なる加振振動数 (5Hz, 10Hz, 20Hz) での破壊の進行を追跡した。加速度振幅の増加速度、および加振時間は周波数によらず一定とし、それぞれ790gal/sおよび1.5秒である。

図 4 に10Hzで堤体を加振したときの、堤体右半分の粒子の位置、および粒子の重心の軌跡を時間を追って示す。加振の初期の段階 (0~400gal) で堤体頂部がわずかに沈下し、斜面がはらみだす。さらに加振加速度の振幅が増加すると、斜面の滑動が開始する。斜面はある厚みをもって一体となって滑り、その軌跡は、それより下にある滑

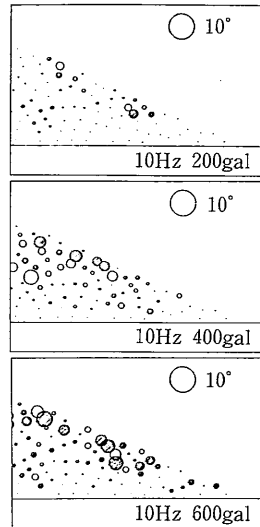


図 5 楕円粒子の回転角の増分

らない粒子あるいはかみ合った粒子塊の起伏を乗り越えるように波打っている。構成粒子の数が少ないため粒子配列の違いの影響により、モデルの右側と左側で破壊開始の加速度や詳細な挙動がやや異なっているが、左右とも全体的な傾向は変わらない。

図 5 は10Hzで堤体を加振している間の、一周期間の粒子の回転角の変化を円の大ききで示したものである。この中で白い円は反時計回り、ハッチのかかった円は、時計回りの回転を表わしている。加振初期の段階では回転を伴う粒子は堤体表面に集中しているが、加振加速度が増加するにつれ、モデルの内部にも回転の卓越した粒子が増えていく。

図 6 は、5Hz, 10Hz, 20Hzと周波数を変えて堤体を加振したときのおおののケースで、堤体を構成するすべての粒子の重心の初期状態からの移動量の総和Lを加振加速度の関数として表わしたものである。これによると、加振振幅が400gal程度までは加振振動数による差が顕著でなく、それ以降に大きな違いが生じている。図 4 で10Hzで加振した場合の200, 400, 600galの各段階での粒子の状態を対応してみると、図 6 の累積変位Lが急増した段階で表層の滑りが顕著になっている。周波数が増えると同じ加速度振幅でも変形が小さくなる傾向は過去の実験結果^{2)~4)}でも認められる。

4. ま と め

粗粒から構成される堤体の動的破壊について、楕円要素を用いた数値シミュレーションによって検討を加えた。その結果を取りまとめると以下ようになる。

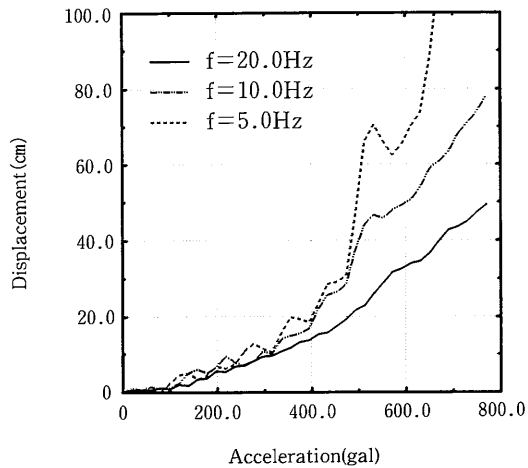


図6 加振加速度と累積変位の関係

(1) 楕円粒子からなる堤体構造を正弦波で加振すると、堤体頂部がわずかに沈下し斜面がはらみ出し、振幅をさらに増すと堤体斜面の滑動が開始する。このとき表層部は堤体内部でかみ合った粗粒の上の凸凹の軌跡を描きながら滑っていく。

(2) 加振振動数を増加させると、同じ加速度振幅に達した時点での累積変形は小さくなる。この傾向は、過去に行われた模型実験結果でも認められる。

なお本研究の一部は文部省科学研究費（課題番号：02805052）の援助を受けて行われたものであり、本研究を行うにあたって、日本大学生産工学部、田村重四郎教授、東京大学地震研究所、伯野元彦教授、東京大学生産技術研究所、龍岡文夫教授、同国際災害軽減工学研究センター、目黒公郎博士から助言をいただいた。

(1992年1月16日受理)

参考文献

- 1) 田村重四郎, 岡本舜三, 加藤勝行: ロックフィルダム模型の振動破壊実験—貯水のない場合—, 土質工学会誌, Vol. 20, No. 7, 1972.

- 2) Konagai, K. and Tamura, C.: Visualization of Dynamic Behavior of Particle Assemblage in Underwater Granular Structure Models, Bul., Earthquake Resistant Structure Research Center, No. 22, pp. 3-12, 1989.
- 3) Konagai, K. and Tamura, C.: Visualization of Dynamic Change in Configuration of Underwater Particle Assemblage, Proc., European Conference on Structural Dynamics, EUROODYN'90, Vol. 2, pp. 837-841, 1991.
- 4) 小長井一男, 田村重四郎: 粒状体構造模型内部の動的挙動の可視化と解析, 第8回日本地震工学論文集, Vol. 2, pp. 1221-1226, 1990.
- 5) Cundall, P. A.: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1988.
- 6) 岸野祐二: 新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析, 土木学会論文集, 第406号, III-11, pp. 97-106, 1989.
- 7) 伯野元彦: 粒状体の運動—数値シミュレーション—, 地学雑誌, Vol. 98, No. 6(900), pp. 112-120, 1989.
- 8) Iwashita, K. and Hakuno, M.: Granular Assembly Simulation for Dynamic Cliff Collapse due to Earthquake, Proc. 9th World Conf. on Earthquake Eng., Vol. III, pp. 175-180, 1988.
- 9) Meguro, K. and Hakuno, M.: Fracture Analyses of Media Composed of Irregularly Shaped Regions by the Extended Distinct Element Method, Proc., JSCE, No. 437/I-17, pp. 37-48, 1991.
- 10) Cundall, P. A.: A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movement in Blocky Rock System, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc., Vol. 2, pp. 129-136, 1971.
- 11) Katsuki, S. and Ishikawa, N.: Earth Pressure Analysis of Filled Materials by Distinct Element Method Using Ellipse Model, Proc., JSCE, No. 432/I-16, pp. 11-19, 1991.
- 12) 中瀬 仁: 改良個別要素法による平面ひずみ圧縮試験のシミュレーション, 第46回土木学会年次学術講演会, 第三部, 1991.
- 13) 一松信 他: 新数学事典, 大阪書籍, 1979.