

個別要素法によるロックフィルダムの 地震時変状予測手法の開発

栃木 均¹・岡本敏郎²・内田善久³・鶴田 滋⁴

¹電力中央研究所 地盤耐震部 主任研究員
(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail:tochigi@criepi.denken.or.jp

²電力中央研究所 地盤耐震部 上席研究員
(同上)

E-mail:t-okamo@criepi.denken.or.jp

³東京電力(株) 建設部土木・建築技術センターダム技術グループマネージャー
(〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

E-mail:uchita.y@tepcoco.jp

⁴東京電力(株) 建設部土木・建築技術センターダム技術グループ副長
(同上)

E-mail:tsuruta.shigeru@tepcoco.jp

大地震時におけるロックフィルダムの耐震性を確認するためには、地震時における変状を考慮した検討が要求される。本研究では、ロックフィルダムの地震時変状を考慮した耐震性評価を行うことを目的として、個別要素法(DEM)を用いた粒状体モデルによる遠心載荷模型振動実験の数値シミュレーションを実施した。DEMによる粒状体モデルにおいて、数個の円を剛結させた要素を用いロック材粒子の寸法比を考慮したモデル化を行った。その結果、堤体表層での滑落による変位など、遠心載荷模型振動実験で示されたロックフィルダムの変形挙動が再現され、地震時変状予測手法としての適用性が示された。

Key Words : rock fill dam, centrifuge model test, granular assembly, distinct element method, Numerical analysis

1. はじめに

近年、ロックフィルダムのような土構造物においても対象とする地震動の加速度の増加に伴い、構造物の損傷領域にまで立ち入った検討が要求され始めている。この場合、堤体の沈下や変状を伴う地震時挙動を予測し、それらに基づく性能評価が行われる。

ロックフィルダムの地震時変状評価においては、ロック材の塑性変形や体積変化による変状の他、堤体の表層付近での滑りや滑落などによる変状も考えられる。特に、斜面部においては初期せん断応力の作用下で繰り返し作用する地震力を受けることになり、その場合の変状予測が求められる。地震時におけるこのような挙動の予測に関しては、個別要素法による手法が有効と思われる。

一方、ロックフィルダムの現行の耐震性の検討は、主として、等価線形解析によるFEM解析により行われており^{1)~4)}、堤体の応力評価に基づく安定性の検討がなされている。検討用の地震動が増大した場

合、これらの手法をそのまま適用すると解析上、過剰な引張り応力が生じることも考えられ、その適用限界を検討する上でも、地震時における終局挙動を評価し得る解析手法の開発が望まれている。これらのことから、本研究ではロックフィルダムの地震時変状予測手法として、個別要素法による粒状体モデルの適用を行い、同手法による遠心載荷模型振動実験の数値シミュレーションを実施した。

2. 対象とした遠心載荷模型振動実験^{5)・6)}

模型実験の遠心加速度は50G(Gは重力加速度)であり、アルミ製の剛土槽(高さ0.65m、長さ2m、奥行き0.7m)内に、堤体高さ55cmのロックフィルダムの模型を作成した。実物換算では高さ27.5mのダムに相当する。斜面勾配は上流側および下流側とも1:1.4である。図-1に実験模型の形状、寸法を示す。堤体の材料には20mm以上を除去したロック材

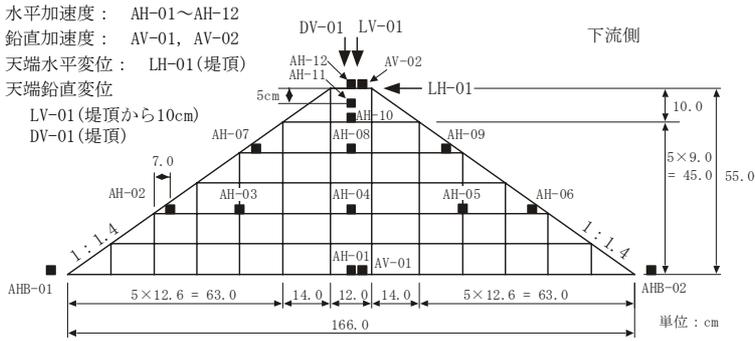


図-1 実験模型の形状、寸法（文献5）
（格子状の直線は色砂によるラインマーカーを示す。）

(CM~CH級)を用い、転圧による締め固めを行った高密度の実験（相対密度71%）と転圧を行わない低密度の実験（相対密度7%）を実施している。遮水ゾーンは考慮しないものとし、気乾状態におけるシェルゾーンのみの変形特性の検討を行っている。加振波には兵庫県南部地震による箕面川ダムの記録と振動数1.8Hzの正弦波を用い、それぞれ加速度振幅を段階的に大きくした加振を行った。計測項目は堤体の変位、土圧および加速度である。この他、堤体側面には色砂による格子状のメッシュを作成し、加振後の堤体断面の変形状況を記録した。また、模型材料としたロック材に関して、静的三軸試験および動的繰返し三軸試験を実施し、ロック材の力学特性を把握した。

3. DEM粒状体によるロック材のモデル化

(1) モデル化方法

DEMによる粒状体として数個の円を剛結させた要素^{7)~10)}を用い、ロック材の粒子の大きさと寸法比を考慮したモデルを用いた。

a) 粒度特性

図-2に模型材料としたロック材の粒度曲線を示す。粒状体モデルでは、粒度曲線における質量通過百分率を20%間隔に分割し、3~19mmまでの粒度範囲を4つの粒度階級で表した。それぞれの粒度範囲は、13.4~19.0mm, 10.0~13.4mm, 6.0~10.0mmおよび3.0~6.0mmであり、各粒度階級における粒状体の質量比は1:1:1:1である。

b) 粒子の寸法比

図-3に本研究で用いた二次元の粒子モデルを示す。このモデルは直線状に配置した半径 r_1 の円の両端に半径 r_2 の小円を2個結合させている。同図に示すように半径 r_1 , r_2 および半径 r_1 の円の数を変更し、粒子の寸法比が b/c , c/a および a/b となる3種類の粒子モデルを作成した。これらの3種類の粒子モデルを各粒度階級ごとに作成し、全体で12種類の粒子モデルを用いた。

a, b, cの寸法は、ふるい分けしたロック材から

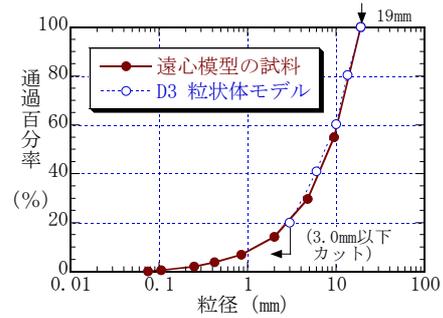


図-2 模型材料としたロック材と粒状体モデルの粒度曲線

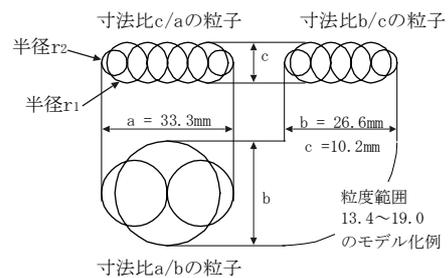
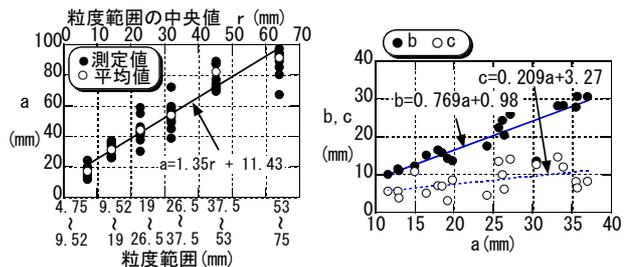


図-3 二次元の粒子モデル



(a) 寸法 a と粒度の関係 (b) 寸法 b, c と寸法 a の関係

図-4 ロック材の寸法 a, b, c

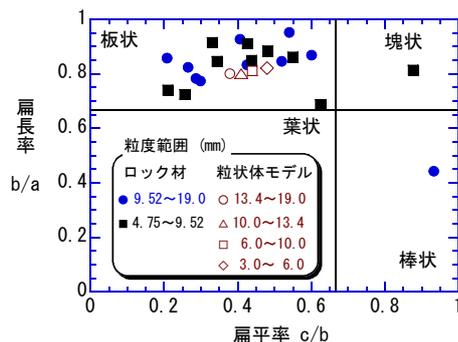


図-5 ロック材と粒状体モデルの粒子の寸法比

得た粒子寸法の計測データに基づく。図-4に粒径と長辺長 a の関係および長辺長 a と中間長 b および短辺長 c の関係を示す。図中の回帰式を用いて、粒度範囲の中央値から a を定め、次に a の値から b , c を定めた。図-5には、このようにして定められた粒子モデルの寸法比をロック材のデータと共にZinggの分類法¹¹⁾により示す。

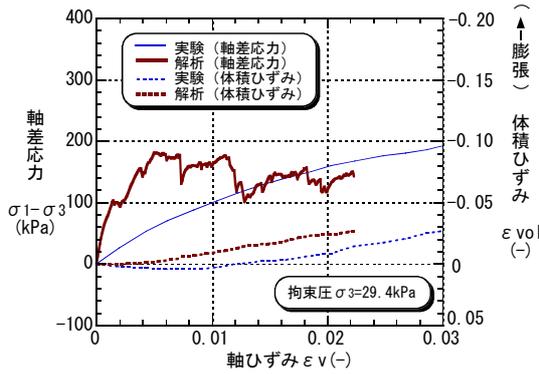


図-6 静的三軸試験の解析結果 (高密度)

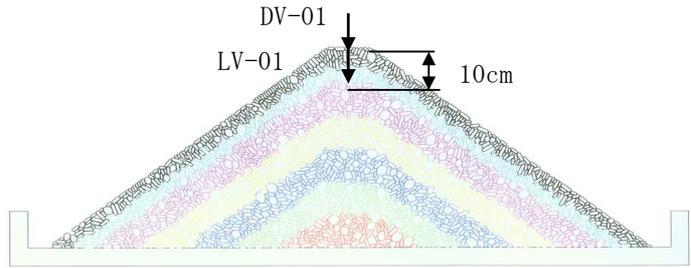


図-8 遠心载荷模型振動実験の解析モデル (高密度, 図中の色分けは入力物性区分を示す.)

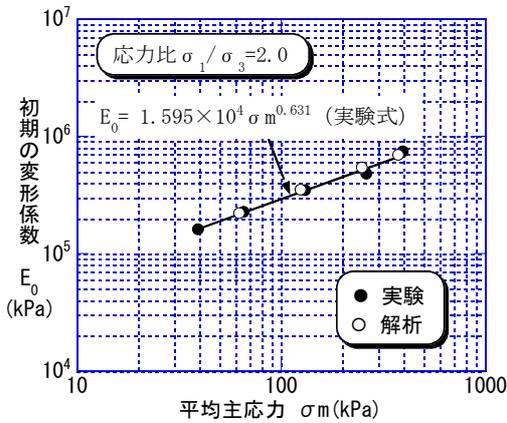


図-7 初期の変形係数 (高密度)

载荷板を介して軸方向に強制変位を与えた。ひずみ速度は毎秒1%としている。粒子間の摩擦係数は0.7として解析した。

解析結果として、軸差応力および体積ひずみと軸ひずみの関係を図-6に示す。軸差応力と軸ひずみの関係については、解析結果は三軸試験の結果に比べて軸差応力の上昇が大きく、約0.5%程度の軸ひずみにおいて最初のピークが表れているが、以降、粒子配置が変化していくことにより変形が進んでいる。変動幅は大きいものの、解析結果は最終的に三軸試験で示された軸差応力と軸ひずみの曲線に近づく傾向を示す。体積ひずみについては、軸ひずみが増加するにつれて体積膨張を示しており、密な場合の実験結果が定性的に表現できている。

4. 解析パラメータの設定

各粒子間の接触点には、接線方向と法線方向のばねとダッシュポットによる力学モデルを設定し、接線方向の滑りを考慮した。粒子間のかみ合いにより粒状体の強度を表すものとし、それらを接触点の摩擦係数により調整するものとした。接触点におけるばね定数は、動的繰返し三軸試験による初期の変形係数を反映させて定めるものとした。以下に、それらの解析パラメータ設定のための解析例を示す。

(1) 粒状体モデルの摩擦係数

粒状体モデルの力学特性を把握し摩擦係数の設定を行うため要素試験用の矩形供試体モデルを作成し、模型材料であるロック材の静的三軸試験を対象とした数値シミュレーションを実施した。供試体モデルの寸法は、幅20cm、高さ約35cmである。粒状体の母集団からランダムに抽出した粒子モデルを自由落下により型枠内に密詰めにし、三軸試験の供試体と同様に密な供試体モデルを作成した。解析モデルと三軸試験供試体の相対密度は共に $Dr=71\%$ である。解析は二次元で行い、供試体モデルの軸方向および横方向に初期拘束圧29.4kPaを与えて圧密した後、上部

(2) 粒状体モデルのばね定数

粒状体モデルの接触点におけるばね定数の設定を行うため、上記(1)節で用いた供試体モデルを用いて模型材料であるロック材の動的繰返し三軸試験を対象とした解析を実施した。ここでの検討では、三軸試験で得られた初期変形係数 E_0 の拘束圧依存性を考慮し、それぞれの拘束圧ごとに平均主応力 σ_m の0.63乗に比例させてばね定数を設定した。三軸試験と同様に側圧 σ_3 と軸圧 σ_1 の応力比を $\sigma_1/\sigma_3=2.0$ とした初期圧密を行い、軸方向に振動数1.0Hzの正弦波による軸方向荷重を5波与えて軸方向の変形係数を求めた。図-7に初期変形係数の平均主応力による変化を示す。ここで初期変形係数は、実験および解析とも 1.0×10^{-5} のひずみレベルにおける値を示している。平均主応力を5通りに変化させ、それぞれの場合について試験結果の変形係数 E_0 に対応するばね定数を定めた。その結果、法線方向および接線方向のばね定数 k_n , k_s を(1)式により設定することにより試験結果との良好な対応が得られた。

$$k_n = 2.55 \times 10^4 (\sigma_m)^{0.63} \quad (\text{kN/m}) \quad (1)$$

$$k_s = 5.89 \times 10^3 (\sigma_m)^{0.63}$$

$\sigma_m : (\text{kPa})$

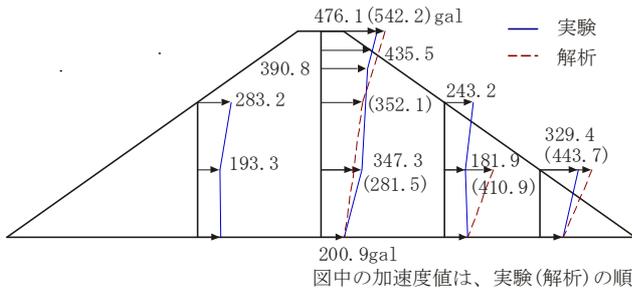


図-9 最大加速度分布 (箕面川波, 200gal 加振)

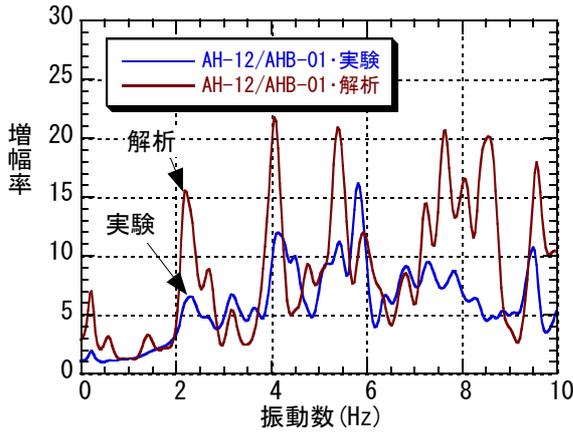


図-10 堤頂における加速度の伝達関数 (水平方向, 箕面川波, 200gal 加振)

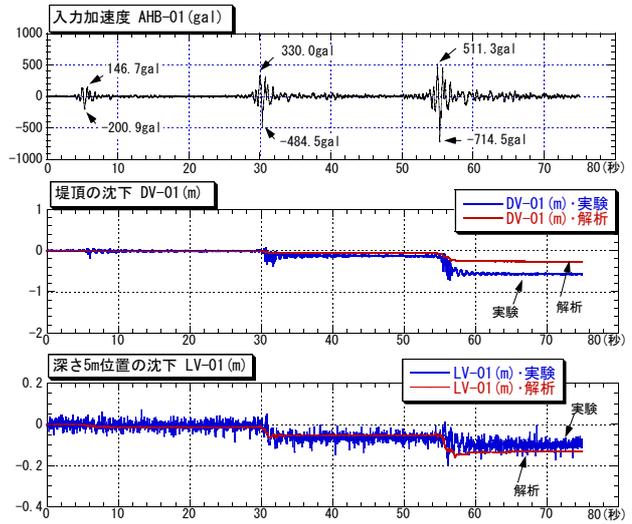


図-11 堤体の沈下 (箕面川波, 高密度)

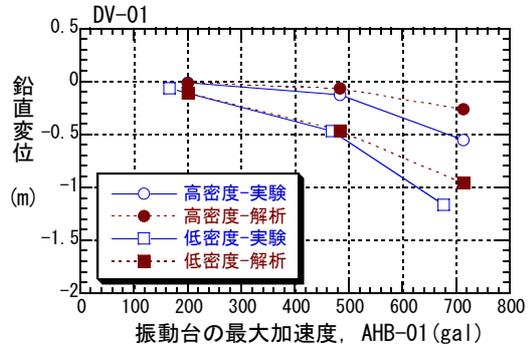


図-12 堤頂の鉛直変位

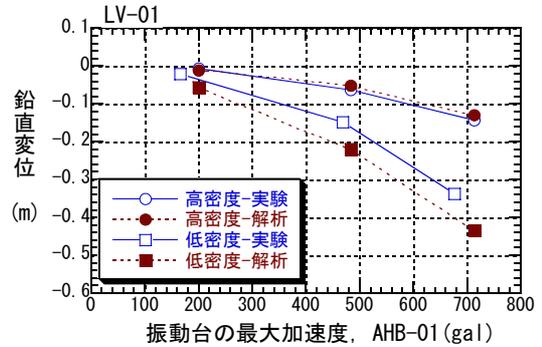


図-13 堤体の圧縮変位

5. 遠心载荷模型振動実験の数値シミュレーション

ロックフィルダムの変状予測手法としての本粒状体モデルの適用性の検討を行うため、遠心载荷模型振動実験を対象とした数値シミュレーションを実施した。

(1) 解析モデル

遠心载荷試験の解析は50Gの重力場で行うものとし、実験模型と同じ寸法の高密度および低密度の解析モデルを作成した。図-8にそれらの解析モデルを示す。パッキング解析は、任意に抽出した2623個(高密度)および2493個(低密度)の粒子モデルを1G場で所定の型枠内に自由落下させることにより行った。その後、堤体の上部型枠の自重による圧密を行い、堤体の密度を調整した。完成した解析モデルの相対密度は高密度では $Dr=87\%$ 、低密度では $Dr=56\%$ である。

入力物性の内、粒子密度は堤体全体の質量が模型と等しくなるようにし、ばね定数は、堤体内の拘束圧の変化を考慮して図中に色分けした物性区分ごとに(1)式により与えた。粒子間の摩擦係数は4章の検討により0.7とした。ダッシュポットの定数は、粒子の衝突による衝撃波を吸収させる目的で、法線方

向および接線方向についてそれぞれ $Cn=16$ (kN/m/sec), $Cs=8$ (kN/m/sec)程度の値とした。試行的検討として、ダッシュポットの定数を1/20に低下させた解析も行ったが、800galの入力を行った場合、堤頂の沈下量DV-01の変化は5%程度であった。

振動台上で計測した水平加速度を入力し、目標最大加速度を200gal, 400galおよび800galとした地震波加振の場合を解析した。以下に実物換算した場合のそれらの解析結果を示す。

(2) 加速度応答

図-9に200gal加振の場合の堤体の最大加速度分布を示す。解析結果には粒子の衝突による衝撃波の影

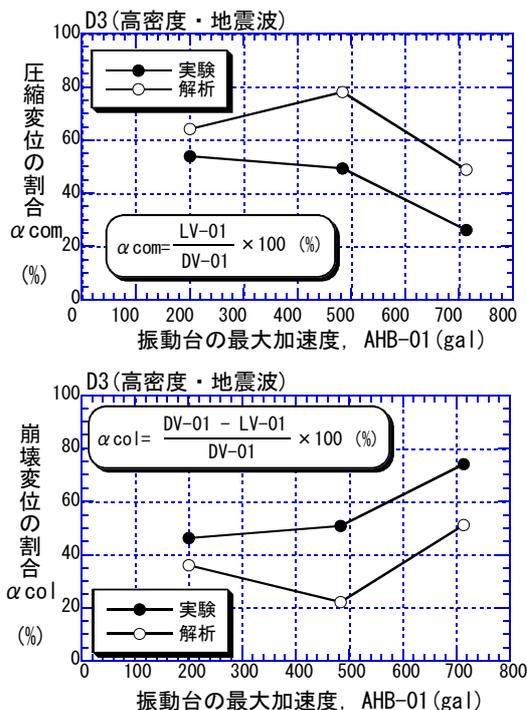


図-14 堤体の圧縮変位と崩壊変位の割合

響とみられるひげ状のパルスが多く含まれており、最大加速度の大きさが不明な出力点もある。その影響の少ない測点を比較すると、堤頂における最大加速度の増幅率は、実験結果が約2.4倍であるのに対して解析結果は約2.7倍となっている。その他の出力点をみても堤体の中央付近では、底部からの加速度の増幅特性が概ね表現できている。

図-10には堤頂における水平方向の伝達関数を示す。実験開始時に行ったホワイトノイズ加振により堤体の固有振動数が4~5Hz付近にあることが把握されている。200gal加振の場合においても実験、解析とも4.1Hz付近に固有振動数に対応するピークが示されている。

(3) 変形挙動

図-11に地震波による加振を行った場合の堤体の沈下に関する時刻歴を示す。ここでは、沈下をマイナスで示している。堤頂の鉛直変位 (DV-01) は、高密度の実験のケースで最大加速度715galの加振により0.55m (累積変位) であり、堤体高さ27.5mの約2%の沈下が生じている。一方、解析で得られた堤頂沈下量は0.27mであり、要素試験の解析 (図-6) で示されたように、実験結果よりも変形しにくいモデルとなっていることの影響が表れている。入力加速度と沈下の対応をみると、地震波の主要動はおよそ2秒程度であり、実験結果および解析結果とも地震波の主要動に対応して堤体の沈下が進行していく挙動が示されている。

図-12, 13には堤頂の鉛直変位 (DV-01) および堤頂から深さ5mの位置 (実物換算値) の鉛直変位 (LV-01) と振動台加速度の関係を示す。実験結果に関する振動台加速度と鉛直変位の関係は、地震波加振の

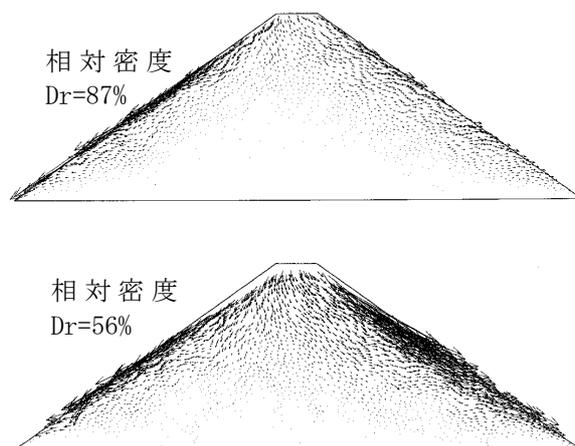


図-15 堤体断面の最終変形状況 (解析結果)

場合、加速度が大きくなるにつれて鉛直変位の増加の割合が著しくなる傾向にある。この傾向は高密度の場合よりも低密度の場合においてより顕著である。解析結果においても高密度および低密度の場合とも実験結果と同様の増加傾向が示され、DV-01やLV-01による堤体上部の沈下特性が表現できている。

ここで堤体上部の沈下量に関して、堤体の圧縮による変位と、斜面部の滑りや滑落による崩壊による変位に分類した分析を行った。すなわち、堤頂から深さ5mの位置における鉛直変位 (LV-01) は堤体の圧縮による変位の影響を強く受けていることから、これを圧縮変位とした。一方、堤頂の鉛直変位 (DV-01) は堤体の圧縮変位と斜面の滑りや滑落によって生じた崩壊による変位の両方が含まれていると考えられることから (DV-01) - (LV-01) を崩壊変位として表すものとした。図-14にはそれらの変位と振動台加速度との関係を示す。実験結果に関する圧縮変位の割合は、加速度が大きくなるにつれて減少していく傾向を示し、代わりに崩壊変位の割合が増加する傾向にある。解析結果においても圧縮変位と崩壊変位の加速度との関係として実験結果に示された全体的な傾向が再現されている。

図-15には、堤体の変形状況に関する解析結果を示す。同図は、各粒子の重心における変位ベクトルを示している。高密度および低密度の場合とも堤体の表層付近で滑落による変位が生じている状況が表れており、低密度の場合にはこの滑落による変位が生じた領域が高密度の場合よりも深い位置に及んでいる。

6. まとめ

ロックフィルダムの地震時における変状予測手法として個別要素法による粒状体モデルの適用を行い、遠心載荷模型振動実験を対象とした数値シミュレーションを実施した。その結果、堤体の圧縮変位や表層の滑落による崩壊変位の挙動が表現でき、同手法

の適用の可能性が示された。今後、強度特性などに関する検討など、解析モデルの改善を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 上村洋司, 大本家正, 安養寺 学: 短周期成分の卓越する地震動におけるロックフィルダムの挙動解析例, 土と基礎, 34-8, No.1627, pp.27-33, 1986.
- 2) 岩下友也, 吉田 等: ロックフィルダムの実測地震応答解析とすべり安定性の評価, ダム技術, No.126, pp.27-35, 1997.
- 3) 土岐憲三, 橋本徳昭, 川西正夫, 山田雅行: 周辺活断層を考慮したダムの耐震設計について, 大ダム, No.162, pp.55-63, 1998.
- 4) 田代幸英, 大内 周, 栗津善文, 松田智行: アスファルト全面表面遮水壁型調整池の耐震性評価, ダム工学, Vol.11, No.1, pp.15-25, 2001.
- 5) 内田善久, 鶴田 滋, 星野吉昇, 山口博史, 佐藤清, 松田 隆: 遠心模型振動実験によるロックフィルダムの地震時変形特性の評価, 土木学会第57回年次学術講演会, I-768, pp. 1535-1536, 2002.
- 6) 岡本敏郎, 内田善久, 鶴田 滋, 星野吉昇, 松田隆: ロックフィルダムの遠心荷重模型振動台実験および既往の振動台実験例と実ダムでの観測例に基づいた地震応答および残留変形量からみた地震時安定性評価, 土木学会地震工学論文集 (投稿予定), 2003.
- 7) 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. (JSCE), Vol.8, No.3, pp.131-142, 1991.
- 8) 土倉 泰, 深沢哲也, 村上幸利: 動的粒状要素法による落石挙動の解析, 土木学会論文集, No.523/III-32, pp.125-132, 1995.
- 9) 桑原直範, 前田健一: 個別要素法解析による粒子特性が異なる粒状体中の微細構造の発達・消滅の考察, 応用力学論文集, Vol.13, pp.469-480, 2000.
- 10) Matsushima, T. and Saomoto, H., Proc. NUMGE2002 : Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mestast(ed), pp.239-246, 2002.
- 11) (社) 土質工学会: 粗粒材料の変形と強度, pp.7-9, 1986.

(2003. 6. 30 受付)

DEVELOPMENT OF DEFORMATION PREDICTION METHOD FOR ROCKFILL DAM DURING EARTHQUAKE BY DISTINCT ELEMENT METHOD

Tochigi, H., T. Okamoto, Y. Uchita, and S. Tsuruta

On the seismic stability of rock fill dam, ultimate behavior such as damaged process during earthquake is one of the remained assignments. In this study, numerical simulation of centrifuge model tests for rock fill dam is conducted by distinct element granular model. Several circular shaped elements are connected rigidly to fit proportion ratio of rock particles in the modeling of rock material by distinct element method. By this granular model, deformation characteristics of rock fill dam varying with acceleration and density shown in centrifuge model tests are reproduced with good accuracy.