

# 遠心載荷振動実験によるロックフィルダムの 地震時損傷に関する検討

有賀 義明<sup>1</sup> ・ 曹 増延<sup>2</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工修 電源開発株式会社 茅ヶ崎研究センター (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88)

<sup>2</sup> Ph.D 株式会社開発計算センター 科学システム事業部 (〒135-8451 東京都江東区深川 2-2-18)

The dynamic centrifuge model tests were made in order to clarify the damage process and failure mode of rockfill dam which was subjected to the extreme strong earthquake motions. The dam models were constructed to a scale of 1/40, and tested at 40G of static gravity. The shape of dam model is 40cm in height, 90.5cm in crest length, and 1:1.8 of slope. The maximum acceleration of input motions were set up at 10G, 20G, 30G and 40G. According to the test results, the process and mode of damage of rockfill dam were examined.

**Key Words :** rockfill dam, dynamic centrifuge model tests, damage process, residual deformation, 3-D dynamic simulation analysis

## 1. はじめに

ダム堤体の構造的な安定性の確保がダムの貯水機能保持の前提になると考えられることから、ロックフィルダムに関しては、表層すべりや円弧すべり破壊を想定した震度法解析に基づいて、ダム堤体に損傷や破壊が発生しないという判定基準によって耐震設計が行われている。

これまでの国内外のロックフィルダムの地震遭遇事例を調査してみると、大きな地震動に遭遇した際に、ロックフィルダムの貯水機能が損なわれるような重大な地震被害を受けた事例はこれまでに報告されていない。しかし、ダム堤体に軽微な亀裂が発生したり残留変形が発生した事例は幾つか報告されている。こうした地震遭遇事例は、ロックフィルダムの耐震性評価の精度を更に向上させ、より合理的な耐震性評価手法を実用化するためには、非常に強い地震動に遭遇した際のロックフィルダムの地震時変形特性、沈下、亀裂、残留変形等の発生メカニズムと発生量等を定量的に評価することが必要であることを明示するものであり、更には、構造的な損傷や破壊が発生した後のダムの貯水機能保持の確認を合理的に行うことが必要であることを示唆するものである。

模型振動実験によってフィルダムの動的応答特性や損傷様式について研究した事例については、これまでも貴重な研究成果が報告されている<sup>1),2),3),4),5)</sup>が、通常の1G場の模型振動実験では、重力の影響に関する相似則を満足させることが困難であるため、損傷過程や損傷様式

の検討に関しては、相似性が満足された場合に果たして同様の再現性が得られるかどうかについて不確実性が残存している。このような背景から、重力の影響に関する相似則をほぼ満足し得る遠心載荷振動実験技術を用いて、非常に強い地震動を受けたロックフィルダムの地震時損傷について模型振動実験を行った。本研究の主な目的はつぎのとおりであるが、本稿では、地震時の間隙水圧、地震時の損傷過程、損傷様式に関して報告する。

- ① 大ひずみレベルでの動的せん断剛性と減衰定数の評価
- ② 谷形状が地震時応答に及ぼす影響に関する比較検討
- ③ 地震動レベルと残留変形量との関連性の検討
- ④ 地震時間隙水圧の発生状況の把握解明
- ⑤ 地震時の損傷過程、損傷様式の把握解明

## 2. 実験方法

### (1) 遠心載荷振動実験装置

使用した遠心載荷振動実験装置の概要を表-1に示す。

表-1 遠心載荷振動実験装置の性能概要

装置	項目	性能
遠心載荷 装置 (静的)	回転半径	9.14m
	最大搭載容量	10.7MN・G
	最大遠心重力	50G
振動振振 装置 (動的)	最大搭載質量	2500kg
	最大振動加速度	40G
	最大加振力	490kN

## (2) 実験対象

実験対象は、図-1に示した中央断面を持つ中央コア型ロックフィルダムである。谷形状の違いによる地震時応答特性の比較検討を行うために、図-2に示したような、U字形状とV字形状の2種類の谷形状を設定した。

## (3) ダム模型の製作材料

ダム模型の形状は、高さ40cm、天端幅5cm、堤頂長90.5cm、上・下流面勾配1:1.8とした。計器の配置は図-3に示すとおりである。ロック部に使用した模型材料の概要、コア部ならびにV字谷模型の谷部に使用した模型材料の概要をそれぞれ表-2、表-3に示す。

貯水材料は、実ダムとダム模型との相似性を考慮した上で、通常の水を使用し、貯水深は32cmとした。

表-2 ロック部の模型材料

項目	内容
材料の種類	神奈川県厚木産の砂岩・角礫岩の碎石
粒度特性	実ダムの相似粒度、最大粒径：9.5mm

表-3 コア部と谷部の模型材料の配合(重量比)

部位	セメント	材引粘土	硅砂	水
コア部	1	8	12	10
谷部(V字谷模型)	10	10	10	15

## (4) ダム模型の物性値

ダム模型の主な物性値を表-4に示す。

表-4 ダム模型の物性値

項目	ロック部	コア部	谷部
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.85(*1)	1.52(*2)	1.64(*2)
間隙比	0.33	—	—
一軸圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	—	0.2	2.0
内部摩擦角(度)	37	—	—
透水係数(*3)(cm/s)	$2.3 \times 10^{-1}$	$5.6 \times 10^{-4}$	$5.6 \times 10^{-4}$
S波速度(m/s)	220	370	945

[備考] \*1:乾燥密度、\*2:湿潤密度、\*3:遠心重力場の数値

## (5) 加振方法

遠心載荷振動実験は、40Gの遠心重力場で実施した。入力地震動としては、ホワイトノイズ、東海地震を想定して作成した模擬地震動(以下、東海想定波と記す)、兵庫県南部地震の際に箕面川ダムで観測された地震動(以下、箕面川波と記す)、正弦波(周波数50Hz)を使用した。入力波の最大加速度は、ダム模型底面10G、20G、30G、40Gの4段階に設定した。

## 3. 実験結果

### (1) 地震時の間隙水圧について

U字谷模型の底部で最大加速度40Gの東海想定波および

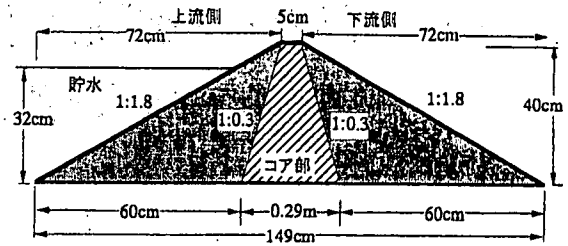
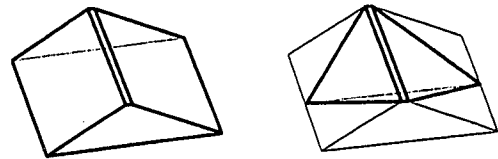
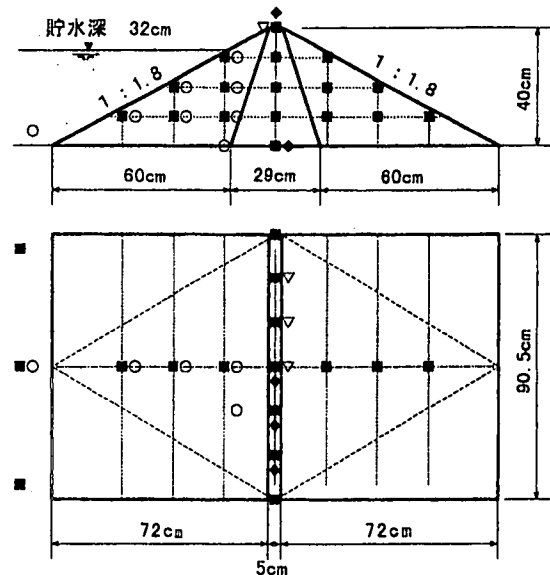


図-1 実験対象とした中央コア型ロックフィルダムの中央断面(U字谷模型、V字谷模型共通)



(1) U字谷模型の概形 (2) V字谷模型の概形

図-2 U字谷模型とV字谷模型の概形



《備考》 ■: 加速度計(上下流方向) ○: 間隙水圧計  
◆: 加速度計(ダム軸方向) ▽: 変位計  
(U字谷模型とV字谷模型の計器の配置は全く同様)

図-3 ダム模型の形状と計器の配置

表-5 入力地震動の加振順序(貯水有りの状態)

順序	加速度	入力波形
1	1G	正弦波スイープ
2	0.5G	ホワイトノイズ
3	5G	正弦波(50Hz)
4	10G	東海想定波→箕面川波→正弦波(50Hz)
5	20G	東海想定波→箕面川波→正弦波(50Hz)
6	30G	東海想定波→箕面川波→正弦波(50Hz)
7	40G	東海想定波→箕面川波→正弦波(50Hz)
8	0.5G	正弦波(50Hz)

[備考] 貯水無し状態で「1」から「4」(10G)まで加振した後、水を溜めて貯水有りの状態で加振。

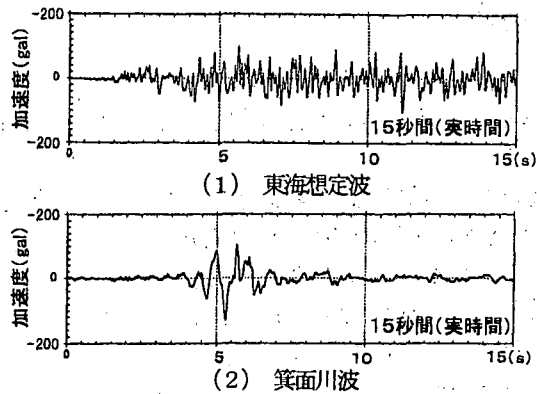


図-4 振動実験に使用した東海想定波と箕面川波

箕面川波を入力加振した際の、上流側ロック部の代表点2ヶ所（表層部と深部）で記録した地震時の間隙水圧の時刻歴を図-5に示す。これらは、加振時の応答波と相似の形状を示しており、振動により発生した動水圧となっている。加振終了後、ロック部の表層では、過剰間隙水圧の残留は見られなかったが、ロック部の深部では残留が見られた。しかし、その大きさは、最大でも有効応力の約12%程度であった。今回の実験では、いわゆる“液状化”現象は発生しないことを確認した。なお、地震時の間隙水圧の発生量は、U字谷模型に比してV字谷模型の方が小さかった。

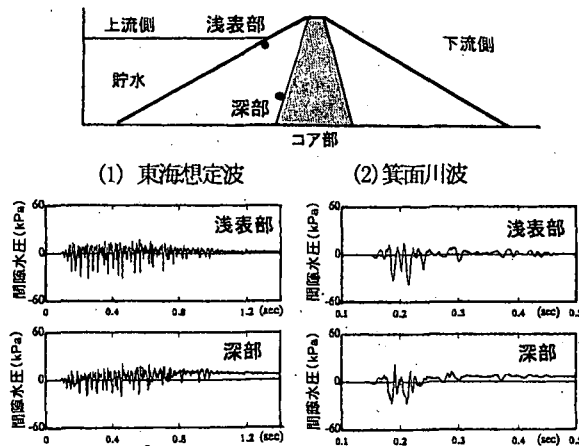


図-5 地震時の間隙水圧の時刻歴 (U字谷模型の例)

## (2) 地震時の損傷過程と損傷様式

最大加速度 40G までの加振を行った後の、U字谷模型の残留変形の状況を図-6に示す。U字谷模型の表層部に残留変形が最初に出現したのは、箕面川波 29.2G 加振時であったが、大規模な破壊が一気に進行するような現象、いわゆる円弧すべり破壊が発生しないことを改めて確認した。図-6に示した変形形状は、一見、振動によりダム模型全体が塑性変形を起こしたかのように錯覚しがちであるが、ロック部の内部はほとんど変形しておらず、損傷は、ダム模型の頂部表層の粒形材料が、まず地震動を受けて緩み、地震動レベルが大きくなった際に振動を

受けて上方から下方へと転落する現象が主体であった。

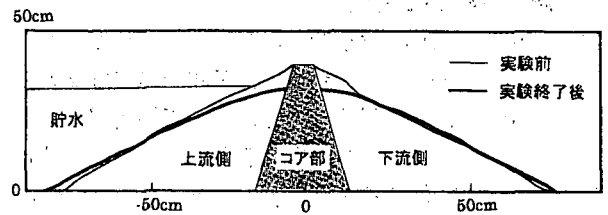


図-6 U字谷模型中央断面の残留変形の形状

## 4. 数値解析による検討

### (1) 三次元的動的解析による地震時応答の再現

遠心載荷振動実験時のダム模型の地震時応答を再現するために、三次元ダム-基礎-貯水池連成解析プログラム“UNIVERSE”<sup>6)</sup>を用いて、等価線形解析により三次元的FEM解析を行った。U字谷模型の三次元的動的解析モデルを図-7に示す。解析用物性値は、表-4に示した数値を使用した。再現解析では、動的せん断剛性と減衰定数を図-9のように設定した場合に、実験値と解析値は非常に良く一致した。「U字谷模型、貯水あり、東海想定波」の実験ケースに関する、実験と解析の比較結果は図-8に示しておりである。

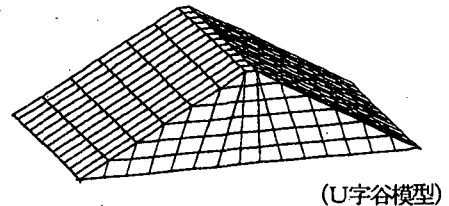


図-7 再現解析に用いた三次元解析モデル (下方：剛基盤、側方：固定境界)

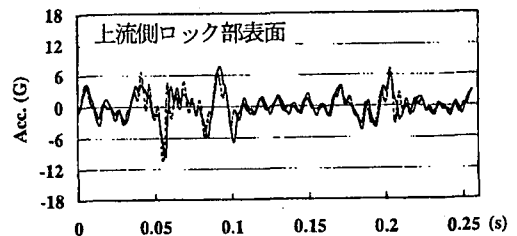
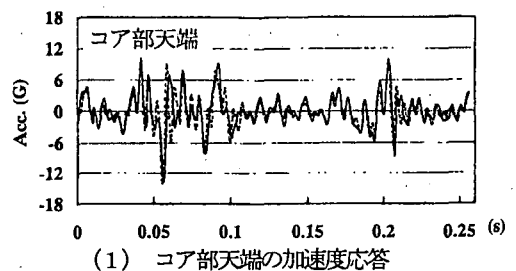


図-8 U字谷模型の実験結果と解析結果の比較

(2) 三次元動的解析の境界条件の違いによる  
減衰定数の比較検討

剛土槽を用いた模型実験では側方へのエネルギーの逸散はほとんどないと考えられるが、実際の場合では周辺へのエネルギーの逸散が考えられる。ダム模型に閉じ込められたエネルギーについて検討するために、三次元動的解析モデルの側方境界を固定境界とした場合と粘性境界とした場合について比較解析を行った。そして、実験結果と解析結果が一致するようにダム模型の減衰定数を調整した。その結果を図-9に示す。粘性境界を設定した場合の減衰定数は、固定境界を設定したよりも約15%小さな数値となった。この差は、側方からの逸散分に相当するものと解釈することが可能ではないかと思われる。

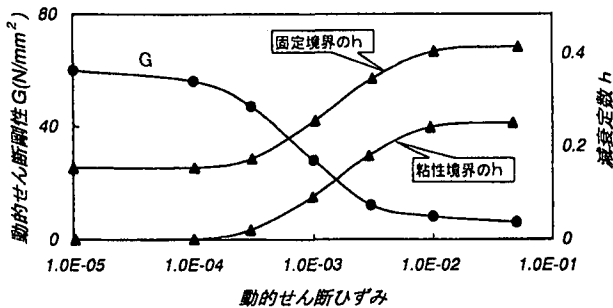
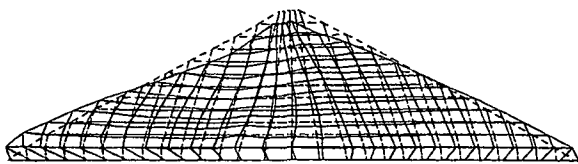


図-9 U字谷模型の実験結果と解析結果が良く一致した時の動的せん断剛性と減衰定数

(3) 二次元弾塑性解析による残留変形の評価

ダム模型に発生した残留変形を再現できるかどうかを検討するために、二次元解析プログラム“FLAC”を用いた弾塑性解析を試みに行った。箕面川波（最大加速度30G）で加振した場合のU字谷模型の残留変形に関する評価結果の一例を図-10に示す。実験結果と解析結果を比較すると、変形形状の概略はある程度模擬することは可能と思われるが、模型実験では全体的に下流側に変形する傾向があるのに対して、数値解析では逆に上流側に変形する傾向があり、両者には基本的な差異がある。これは、模型実験と数値解析の変形メカニズムの違いによるものと考えられる。模型実験では天端付近の個々のロック粒子が振動により下方へ転落することで残留変形が発生したのに対して、数値解析では全体的な塑性変形の結果となっている。また、貯水の影響についても両者では相異が認められた。



(U字谷模型中央断面、箕面川波30G加振時)

図-10 二次元弾塑性解析による塑性変形の評価例

5. まとめ

40Gの遠心重力場で実施したロックフィルダムの模型振動実験およびその数値解析の結果から、つぎのような結果を得た。

- ①上流側ロック部では、振動を受けることにより動水圧が発生するが、過剰間隙水圧の残留分は、最大でも有効圧力の12%程度であり、“液状化”現象は発生しなかった。
- ②ダム底部で980gal相当の地震動が作用した場合でも、“円弧すべりによる破壊”は発生しなかった。
- ③地震時の損傷としては、個々のロック粒子が振動によって上から下に転落する現象が支配的であった。
- ④遠心載荷模型振動実験から評価されたロック部の初期動的せん断剛性は80~100(N/mm<sup>2</sup>)、大きなひずみレベルにおける減衰定数は20~30%であった。
- ⑤この結果に基づき、地盤一構造物一貯水池連成系の三次元動的解析プログラム“UNIVERSE”<sup>2)</sup>を用いて、遠心載荷模型振動実験の再現解析を実施したところ、実験結果と解析結果は大変良く一致した。
- ⑥非常に強い地震動に遭遇したロックフィルダムの耐震性を評価するためには、地震時に発生する残留変形を的確に予測評価すること、そして、残留変形発生後の遮水機能保持を照査することが必要であり、今後こうした課題に取り組む必要がある。

謝辞：遠心載荷振動実験の実施に際して、カリフォルニア大学デービス校Bruce L. Kutter 教授、(株)大林組技術研究所松田隆氏、樋口俊一氏、森拓雄氏に多大なるご協力をいただいた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田村重四郎, 岡本舜三, 加藤勝行, 大町達夫: ロックフィルダムの模型の振動破壊実験による動的破壊機構の研究, 第4回日本地震工学シンポジウム, pp703-710, 1975
- 2) 渡辺啓行: 模型振動実験からみたフィルダムの動特性, 土と基礎, 28-5(268), No. 1169, pp25-32, 1980
- 3) 長谷川高士, 菊沢正裕: 振動台模型実験におけるフィルダムの動的挙動, 農業土木学会論文集第95号, pp57-64, 1981
- 4) 大根義男, 建部英博, 成田国朝, 奥村哲夫: フィルダムの耐震設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集第339号, 1983
- 5) 渡辺啓行, 五月女敦: 模型土質斜面の傾斜破壊実験と数値解, 土木学会論文集第376号, III-6, pp31-40, 1986
- 6) 有賀義明, 渡辺啓行, 吉田昌稔, 曹増延: 三次元ダム-貯水池-基礎岩盤連成系における逸散減衰に関する一考察, 第10回日本地震工学シンポジウム, E4-18, 1998. 11.
- 7) 有賀義明: ロックフィルダムの地震時応答特性に関する遠心載荷振動実験, 土木学会第25回地震工学研究発表会, B8-6, pp445-448, 1999