

ロックフィルダム地震時応答特性に関する 遠心載荷振動実験

有 賀 義 明

フェロー会員 電源開発株式会社 総合技術試験所 (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88)

強い地震動を受けたロックフィルダムの動的変形特性、地震時間隙水圧および損傷様式等を把握解明するために遠心載荷模型振動実験を実施した。実験対象は中央コア型ロックフィルダムとし、ダム模型の形状は、高さ40cm、堤頂長90.5cm、上・下流面勾配1:1.8とした。ロック部は相似粒度を想定した碎石材料で、コア部は粘土と砂とセメントの混合体で作成した。40Gの遠心重力場において、ダム模型底面での最大加速度40Gまでの地震動を入力加振し、実験データに基づき大きなひずみレベルでのロック部の動的せん断剛性及び減衰定数を評価した。基礎岩盤が堅硬な場合は、谷形状がV字谷の場合よりU字谷の方が地震時の加速度応答は大きくなる傾向があること、ダム底面の最大加速度が20G程度(1G重力場の500gal相当)ではダムの変状は殆ど生じない等の結果を得た。

Key Words : Rockfill Dam , Centrifuge Shaking Test , Dynamic Shear Modulus , Damping Factor , Three-dimensional Effect ,

1. はじめに

ダムの耐震性評価は、何ら損傷が生じない段階の耐震性評価と何らかの損傷が生じた後の耐震性評価とに分けて考えることができる。ロックフィルダムに関しては、前者は“応力評価”の領域になり、後者は“変形評価”の領域になる。わが国ではロックフィルダムの耐震設計は、構造的な安定性の確保がダムの本来的機能である遮水機能の保持の前提となることから、“応力評価”の範囲の耐震設計が基本となっている。

ところで、国内外のロックフィルダムの地震経験事例を見ると、地震によりダム堤体に軽微な沈下や塑性変形等が発生した事例が報告されている。このことは、ロックフィルダムの耐震性評価法の精度・信頼性をより一層高めるためには、強い地震動に遭遇した際にロックフィルダムがどのように挙動するのか、また、沈下や塑性変形等の損傷がどのようにどの程度生じるのか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る。

このような観点から、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評価手法の高度化に関する研究の一環として遠心載荷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。

- ①地震時の変形特性の評価：強い地震動を受けたロックフィルダムの動的せん断剛性及び減衰定数の定量的評価。
- ②地震時応答特性の三次元性の検討：谷形状の違い等による地震時応答特性の相違についての比較検討。

による地震時応答特性の相違についての比較検討。

- ③塑性変形量に関する検討：強い地震動を受けた場合の塑性変形量と地震動レベルとの関連性の推定。

- ④地震時間隙水圧の検討：上流側堤体内部での地震時間隙水圧の発生状況、地震時の過剰間隙水圧の発生の有無等の把握解明。

- ⑤地震時損傷様式の解明：非常に強い地震動を受けたロックフィルダムの損傷過程、損傷様式の把握解明。

これらの研究項目の内、本稿では、主として、地震時の変形特性、地震時応答特性の三次元性、地震時損傷様式について報告する。

2. 実験方法

(1) 遠心載荷振動実験装置

遠心載荷振動実験装置は、米国カリフォルニア大学デービス校の実験装置を使用した。装置の主な仕様は、回転半径9.14m、最大搭載容量1,092tf・G、最大遠心加速度(静的)50G、最大振動加速度(動的)40Gである。

(2) 実験対象

中央コア型ロックフィルダムを実験対象とした。ダムの地震時応答特性に対する谷形状の影響を比較検討するために、U字形の谷とV字形の谷の2種類の谷形状を設定した。U字谷模型およびV字谷模型の概念を図-1および図-2に示す。

(3) ダム模型

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。ダム模型の形状と計器の配置は図-3 に示すとおりである。

コア部は、カオリン粘土：珪砂：セメント：水を重量比で 8 : 12 : 1 : 10 で混合し作成した。コア部の物性値は、湿潤密度 $1.64(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、S波速度 $370(\text{m}/\text{s})$ 、一軸圧縮強度 $0.2(\text{N}/\text{mm}^2)$ 、透水係数 $1.38 \times 10^{-5}(\text{cm}/\text{s})$ である。

ロック部は、神奈川県厚木産の砂岩・角礫岩の碎石を既設ダムの代表的な粒度分布を想定した相似粒度に配合調整(最大粒径 9.5mm)し作成した。ロック部の主な物性値は、乾燥密度 $1.85(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、飽和密度 $2.12(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、透水係数 $5.7 \times 10^{-3}(\text{cm}/\text{s})$ 、内部摩擦角 37 度である。

V字谷模型の谷部は、カオリン粘土：珪砂：セメント：水を重量比で 10 : 10 : 10 : 15 で混合し作製した。谷部の物性値は、湿潤密度 $1.64(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、S波速度 $945(\text{m}/\text{s})$ 、一軸圧縮強度(材令 10 日) $2.0(\text{N}/\text{mm}^2)$ である。谷部の斜面勾配は 1 : 1.13 である。

貯水材料は、ダム模型との実ダムとの関連性を考えた上で特に粘性流体は使用せず、普通の水を使用した。貯水深は 32cm とした。

(4) 遠心加速度(静的)と入力地震動

遠心载荷時の静的な遠心加速度は 40G とし、40G の遠心重力場で模型振動実験を実施した。

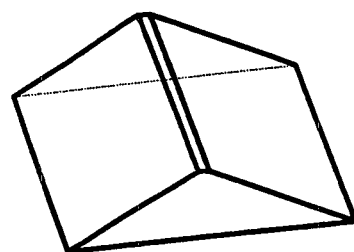
入力地震動としては、ホワイトノイズ、東海地震を想定して作成した模擬地震動(以下、模擬地震動：図-4 参照)、兵庫県南部地震の際に箕面川ダムで観測された地震動(以下、実地震観測波)、サイン波(周波数 50Hz)を使用した。模擬地震動、実地震観測波およびサイン波は、ダム模型底面での最大加速度を 10G、20G、30G、40G の 4 段階に設定して入力加振した。

3. 実験結果

(1) 固有振動数と入力加速度レベル

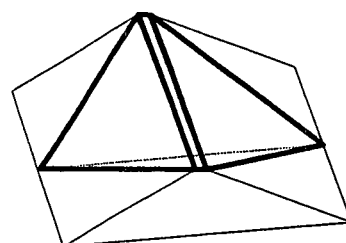
U字谷模型に関して、ダム模型の伝達関数(天端/底面)の卓越周波数より評価した固有振動数とダム模型底面での入力加速度レベルとの関係を図-5 に示す。図中、貯水なしの場合を白抜きで、貯水ありの場合を黒塗りで示したが、貯水の影響として、貯水により固有振動数が若干低くなる傾向が認められた。40G 遠心重力場の入力地震動の最大加速度 10G、20G、30G は、通常の 1G 重力場では、それぞれ 250gal、500gal、750gal に相当するが、こうした入力加速度レベルに対して固有周振動は大きく変化した。

同様に V 字谷模型に関して、固有振動数と入力加速度レベルとの関係を図-6 に示す。非線形性の現われ方は V 字谷模型よりも U 字谷模型の方が顕著であった。ここ



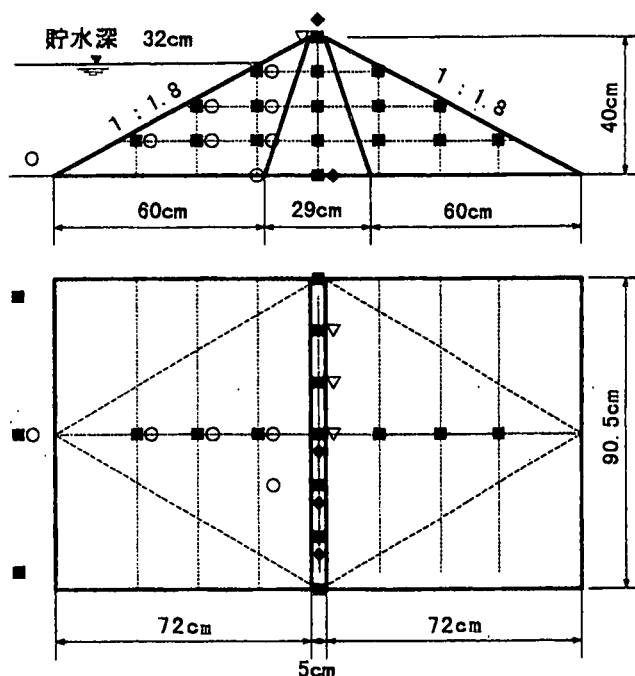
ダム模型高：40.0cm
堤頂長：90.5cm
天端幅：5.0cm
上流面勾配：1 : 1.8
下流面勾配：1 : 1.8
貯水深：32.0cm

図-1 U字谷模型の概念



ダム模型高：40.0cm
堤頂長：90.5cm
天端幅：5.0cm
上流面勾配：1 : 1.8
下流面勾配：1 : 1.8
貯水深：32.0cm
谷部の勾配：1 : 1.13

図-2 V字谷模型の概念



【備考】 ■：加速度計(上下流成分：26ch) ○：間隙水圧計(9ch)
◆：加速度計(ダム軸成分：4ch) ▽：変位計(3ch)

(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

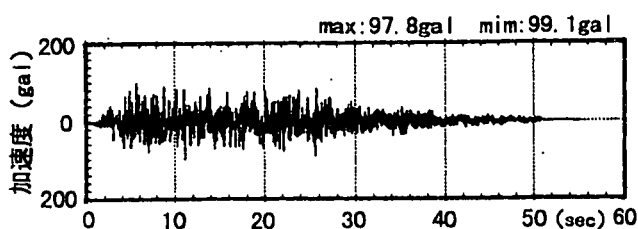


図-4 東海地震を想定して作成した
模擬地震動の原波形

に示した固有振動数は天端中央（コア部）の伝達関数より求めたが、同じ標高のコア部とロック部の加速度時刻歴の周波数特性はほぼ同等であり、コア部とロック部の挙動はほぼ同様であったと考えられる。

（２）大きなひずみレベルでの動的変形特性

サイン波加振の際の加速度時刻歴データに基づきロック部の動的せん断応力と動的せん断ひずみの関係⁹⁾を求め、この応力～ひずみ関係よりロック部の動的せん断剛性と減衰定数を評価した。動的せん断剛性の評価結果を図－７に、減衰定数の評価結果を図－８に示す。今回の実験では、約 5×10^{-2} までのひずみレベルの結果が得られた。減衰定数についてはバラツキが大きく、今後も検討が必要であるが、0.001 から 0.5 までのひずみレベルに対する数値として 20～30%程度の結果が中心となった。

（３）地震時応答の三次元性（谷形状の影響）

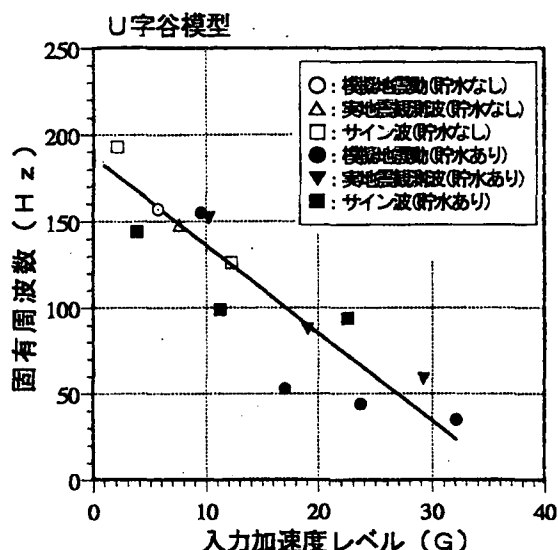
谷形状の違いによる地震時応答の比較例として、U字谷模型の天端中央の加速度時刻歴を図－９に、同様に、V字谷模型の天端中央の加速度時刻歴を図－１０に示す。図－９は模擬地震動をダム模型底面で最大加速度 23.7G で入力した時の応答加速度時刻歴であり、その最大加速度は 81.7G、応答倍率は約 3.4 である。図－１０は模擬地震動を最大加速度 28.4G で入力した時の応答加速度時刻歴であり、その最大加速度は 51.3G、応答倍率は約 1.8 である。この例が示すように、今回のU字谷模型とV字谷模型との比較では、地震時の加速度応答はU字谷模型の方が大きくなった。これは、V字谷模型の谷部の剛性が大きいため、谷部での地震動の増幅が小さく、その分、ダム模型の増幅が小さくなったものと考えられる。ちなみに、今回のダム模型の初期のS波速度は、谷部 945 (m/s)、コア部 370 (m/s)、ロック部 220 (m/s) であった。

（４）ダム模型の残留変形と地震動レベル

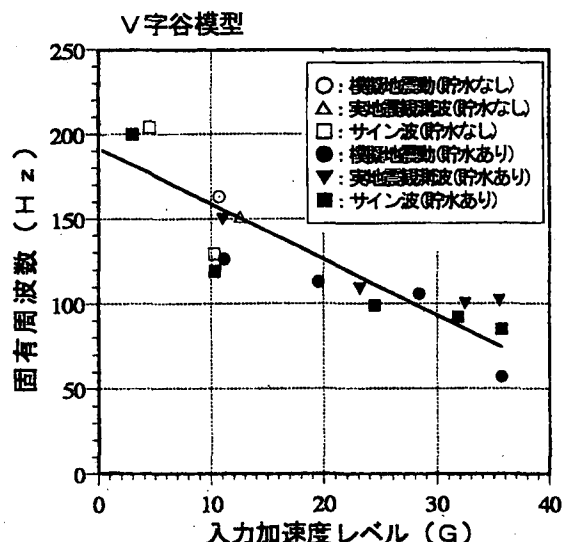
U字谷模型天端の水平方向の残留変形の出現過程を図－１１に示す。横軸には加振ケース名を記述した。この加振ケースは、図の右側の表に示した入力地震動の加速度値に対応する。残留変形が最初に出現したのは、実地震観測波をダム模型底面で 29.2G で加振した時であった。

（５）非常に強い地震動を受けた場合の損傷様式

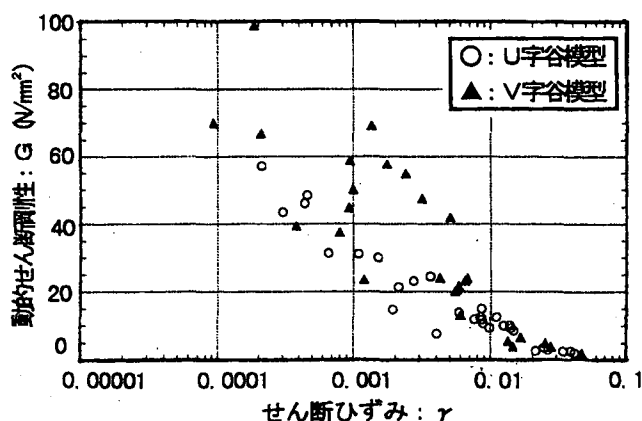
ダム模型底面で最大加速度 40G までの入力地震動（模擬地震動、実地震観測波、サイン波 (50Hz) の３種類）をダム模型に作用させたが、大規模な破壊が一気に進行するような現象、いわゆる円弧すべり破壊のような現象は発生しなかった。ダム模型の表層のロック部粒形材料が地震動を受けて緩み振動し上方から下方へと転落する現象が主体であった。



図－５ U字谷模型の固有振動数と入力加速度レベルの関係



図－６ V字谷模型の固有振動数と入力加速度レベルの関係



図－７ 大きなひずみレベルにおけるロック部の動的せん断剛性

4. まとめ及び考察

遠心載荷模型振動実験で得られた加速度時刻歴データに基づき約 5×10^2 までの動的せん断ひずみに対するロック部の動的せん断剛性および減衰定数を評価した。初期の動的せん断剛性は $80 \sim 100 (\text{N/mm}^2)$ (S波速度: $200 \sim 220 (\text{m/s})$) 程度であった。大きなひずみレベルにおける減衰定数は $20 \sim 30\%$ 程度の数値が中心であった。なお、この結果に基づき、地盤—構造物—貯水池連成系の三次元動的解析プログラム“UNIVERSE”²⁾を用いて、今回の遠心載荷模型振動実験の三次元再現解析を実施したところ実験値と解析値は大変良く一致した。この再現解析の結果は、今後、別途報告する予定である。

U字谷模型とV字谷模型を比較した結果、U字谷模型の方がV字谷模型よりも地震時応答が大きくなった。これはV字谷模型の谷部の剛性が高く、谷部での増幅がV字谷模型では小さかったためと考えられる。ダム地点の基礎岩盤が堅硬な場合は、ダム基礎とダム左右岸の最大加速度が余り変らない地震観測事例もあり、基礎岩盤が堅硬な場合はこのような傾向になるのではと考察される。

非常に強い地震動を受けたロックフィルダムの損傷様式については、今回の実験から、ダム基礎で980ga相当の地震動が作用した場合でも、いわゆる円弧すべりの破壊様式は発生しないことを確認した。ロックフィルダムの破壊様式については、1G場振動実験に基づく既往研究報告があるが、1G場振動実験では重力に関する相似則を満足させることが難しい。そのため、重力の影響を再現できた際の円弧すべりの発生如何に関しては未解明の点が残存していたものと考えられる。今回の遠心載荷振動実験では、この点を一步クリアにすることができたものと考えられる。

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精度良く照査するためには、今後、地震時に発生する“変形評価”および“変形発生後の性能評価(遮水機能保持)”が重要であり、今後こうした課題について取り組む必要があると考えている。

謝辞：遠心載荷振動実験装置の使用に際して、カリフォルニア大学デービス校 Bruce L. Kutter 教授のお世話になった。実験の実施等に関しては、(株)大林組技術研究所の松田隆氏、樋口俊一氏、森拓雄氏に大変ご協力いただいた。記して深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 石原研而：土質動力学の基礎、p 238～240、鹿島出版会
- 2) 有賀義明、渡辺啓行、吉田昌裕、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.

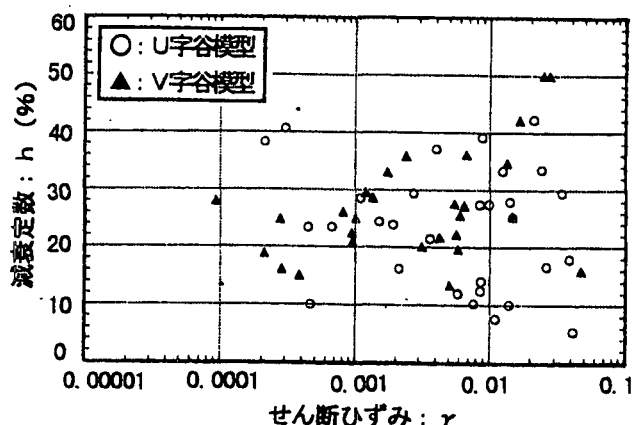


図-8 大きなひずみレベルにおけるロック部の減衰定数

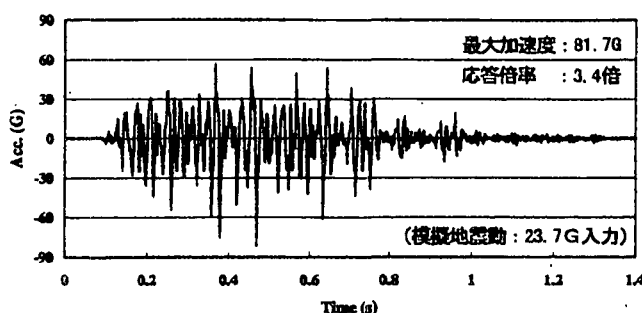


図-9 U字谷模型のダム天端中央の加速度時刻歴

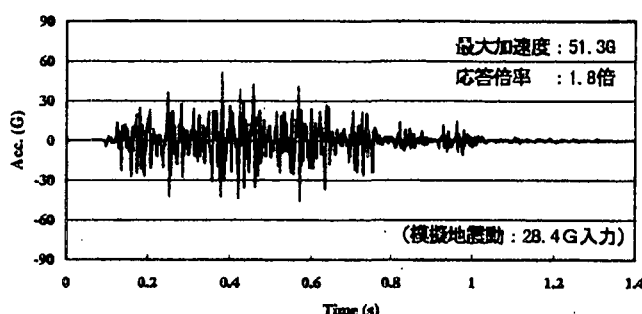


図-10 V字谷模型のダム天端中央の加速度時刻歴

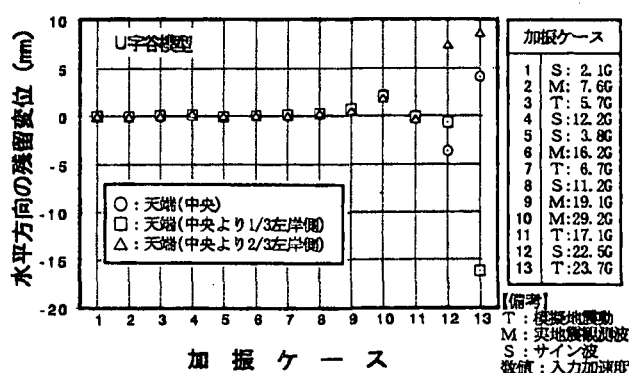


図-11 U字谷模型天端の水平方向の残留変形の出現過程