

遠心載荷振動実験および三次元動的解析による ロックフィルダムの地震時安全性に関する研究

有賀 義明¹・曹 増延²・渡邊 啓行³

¹フェロー会員 博(工) 電源開発(株) 技術開発センター(〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88)

²Ph. D. (株) 開発計算センター エンジニアリング事業部(〒135-8451 東京都江東区深川 2-2-18)

³フェロー会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科(〒338-8576 埼玉県さいたま市下大久保 255)

非常に強い地震動を受けたロックフィルダムの地震時安全性の評価手法の高度化, 合理化を図るために, ロックフィルダムの遠心載荷模型振動実験および関連数値解析を行なった. 実験は, 高さ 40cm のダム模型を作成し, 40 G の遠心重力場において最大加速度 40 G までの地震動を入力加振して実施した. この実験により, 大ひずみレベルの堤体材料の動的変形特性, 地震時挙動の三次元性, 地震時の過剰間隙水圧の挙動, 堤体の損傷過程および損傷形態などを明らかにした. 更に, 遠心載荷模型実験の三次元シミュレーションにより, 強い地震動に対する堤体の動的変形特性について定量的な評価考察を加えた.

Key Words : *rock-fill dam, dynamic centrifuge test, failure process, failure model, numerical simulation, nonlinear property*

1. はじめに

ロックフィルダムの耐震性評価は, 何ら損傷が生じない段階の評価と何らかの損傷が生じた後の評価とに分けて考えることができる. 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. 従来, わが国では, 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ことから, 震度法および修正震度法に基づいて, 基本的に応力評価の領域における耐震設計が行われている.

ところで, 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分析してみると, 大きな地震動に遭遇した際に, 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報告されていない. しかし, 地震によりダム堤体に残留変形や亀裂等が発生した事例は幾つか報告されている^{1)~12)}. こうした過去の地震被害事例は, ロックフィルダムの耐震性評価の精度と信頼性を高め, より合理的な評価手法を確立するためには, 非常に強い地震動を受けた際のロックフィルダムの動的変形特性, 損傷過程, 損傷形態等を解明し, 損傷量(残留変形量等)を定量的に評価することが必要であることを示唆するものである. 更には, 構造的な損傷が発生した後のダムの貯水機能保持を合理的に確認することが必要であることを示すものである.

また, ロックフィルダムの損傷形態に関しては, 一般的に, 基本的な破壊形態として, すべり破壊が想定されているが, これまでの地震被害事例では, ロックフィルダムが円弧すべりで破壊した事例は報告されていない. そして, これまでに実施されている 1 G 場の模型振動実験による研究でも, 粘性のある土質材で構成されるアースフィルダムでは円弧すべり破壊が生じるが, 粘性のほぼない粗粒材で構成されるロックフィルダムに関しては, 円弧すべりの破壊形態は生じないとする研究報告が多い^{13)~18)}. しかしながら, これまでの地震被害事例に関しては, 過去に実ダムが遭遇した地震動レベルが必ずしも十分に高レベルであったとは限らず, また, 1 G 場の模型振動実験に関しては, 重力の影響に関する相似則が成立しないという制約があった. そのため, ロックフィルダムの損傷過程や損傷形態に関して, 非常に強い地震動が作用した場合にはどのようなのか, 相似則が成立する振動実験を実施した場合には果たしてどのような結果になるのかという点について未解明の課題が残存していた. 更に, ロックフィルダムの動的変形特性, 通常, 室内の振動三軸試験によって評価されるが^{19)~22)}, 一般に, 試験装置の載荷能力の制約から, 耐震性を評価する上で最も重要な, 大きなひずみレベルでの動的変形特性が評価できない場合が多く, 室内の振動三軸試験で評価した物性

値が実際の既設ダムの変形特性を忠実に反映したものであるかどうかについての実証がまだ十分にはなされていない^{23)~32)}。

このような必要性から、非常に強い地震動を受けたロックフィルダムの耐震性評価手法の高度化、合理化を図るために、重力の影響に関する相似則をほぼ満足する遠心载荷模型振動実験を行い、既往の研究では十分に解明されていなかった、大ひずみレベルでのロックフィルダムの動的変形特性、地震時の損傷過程および損傷形態、地震時の過剰間隙水圧挙動などについて明らかにした。そして、遠心载荷模型振動実験に関する数値シミュレーションを行い、強い地震動を受けたロックフィルダムの動的変形特性について定量的な評価考察を行った。さらに、弾塑性有効応力解析を行い、数値解析によりロックフィルダムで生じる過剰間隙水圧および損傷形態を予測する可能性があるかどうかについても考察した。

2. 遠心载荷模型振動実験によるロックフィルダムの耐震性の検討

(1) 実験目的

非常に強い地震動に対するロックフィルダムの耐震性を定量的に研究するために、拘束圧に依存する強度と剛性に関する相似則が明確である、遠心载荷模型振動実験を行った。遠心载荷模型振動実験の主な目的は、表-1に示したとおりである。

(2) 実験方法

a) ダム模型の形状

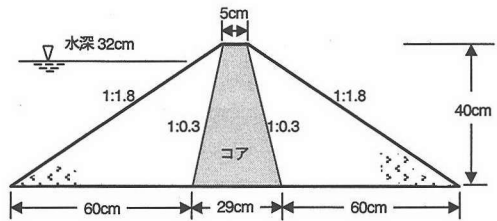
ダム模型の形状は、中央コア型ロックフィルダムを実験対象とし、高さ40cm、天端幅5cm、堤頂長90.5cm、上・下流面勾配1:1.8とした。ダム模型の中央断面の形状は、図-1に示すとおりである。谷形状に関しては、図-2に示したように、U字形の谷とV字形の谷の2種類を設定した。ダム模型の中央断面は、U字谷模型もV字谷模型も同じである。V字谷部の斜面勾配は1:1.13である。

b) ダム模型の材料

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で混合し作製した。ロック部は、神奈川県厚木産の砂岩・角礫岩の碎石を実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)し作製した。想定した実ダムの粒度分布および模型材料の粒度分布を図-3に示す。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。作製したロック部、コア部、谷部(V字谷模型)の模型材料の主な物

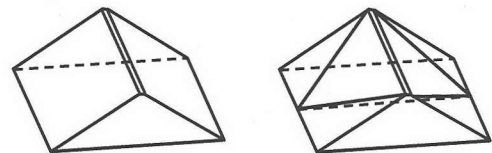
表-1 遠心载荷模型振動実験の目的

主な研究目的	
1	大ひずみレベルでの動的変形特性の評価 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 谷形状の相違による地震時応答特性の検討
3	地震動レベルと残留変形量との関連性の検討 強い地震動を受けた場合の残留変形量と地震動レベルとの関連性の解明
4	地震時間隙水圧の発生状況の把握解明 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 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



(U字谷模型、V字谷模型共通)

図-1 実験模型としたロックフィルダムの中央断面



(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

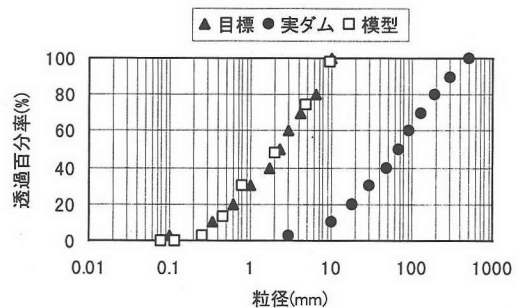


図-3 実ダムおよび模型材料の粒度分布

性値を表-2に示す。貯水材料には、水道水を使用し、貯水深は32cmとした。

表-2 ダム模型の物性値

項目	ロック部	コア部	谷部
密度 ⁽¹⁾ (t/m ³)	1.85	1.52	1.64
間隙比	0.33	—	—
一軸圧縮強度 (N/mm ²)	—	0.2	2.0
内部摩擦角(度)	37	—	—
透水係数 (cm/s)	2.3×10 ⁻¹	5.6×10 ⁻⁴	
S波速度 (m/s)	220	370	945

注*: ロック部は乾燥密度, コア部と谷部は湿潤密度

表-3 遠心載荷振動実験装置の主な性能

装置	項目	性能
静的 遠心載荷装置	回転半径	9.14m
	最大搭載容量	1092tG
	最大遠心加速度	50G
	載荷領域	2m×1m
動的 振動実験装置	形式	油圧サーボ式
	最大搭載質量	2500kg
	最大加振加速度	40G
	最大加振力	490kN
	最大速度	70cm/s
	最大変位	10mm

c) 遠心載荷装置と計測装置

遠心載荷振動実験には、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。使用した遠心載荷振動実験装置の基本性能を表-3に示す。主な性能は、回転半径9.14m、最大搭載容量1092tG、静的な最大遠心加速度50G、最大加振加速度40Gである。

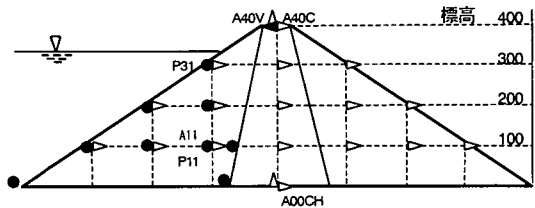
計測センサーの配置は、U字谷模型もV字谷模型も全く同様であり、図-4にその配置状況を示す。表-4に実験で使用した加速度計、変位計、過剰間隙水圧計の主な性能を示す。表面の変形、損傷を観測するため、毎秒500コマの撮影が可能な高速ビデオカメラを7ヶ所に設置した。このほか、実験前後に位置を観測するため、模型の表面と側面でマーカとして着色砕石を水平方向20cmと鉛直方向10cmメッシュで設置した。

d) 相似則

遠心載荷模型振動実験に関する相似則を表-5に示す。遠心載荷振動実験では、密度、ひずみ、応力、速度、剛性に関して、“模型：実物=1：1”の関係が成立し、深度方向に依存する物性や現象のうち、地盤剛性や強度の拘束圧依存性に関しては、力学的な相似性が成立する。したがって、模型実験で得られる応力～ひずみ関係は、そのまま実物に当てはめて考えることができ、実験結果に基づいた定量的な評価検討が可能である。加速度と周波数と透水係数に関しては、「模

表-4 主な計器の仕様

計器の種類	仕様
(加速度計型)	① 本体の寸法：検出部φ=12mm, L=15mm ② 動作環境：-18°C~+120°C ③ 入力レンジ：最大500G ④ 周波数特性：1Hz~10kHz, 位相特性ともフラット。計器校正を実施し、校正係数の変動が±3%以内。
(ひずみゲージ型)	① 動作環境：-20°C~+120°C ② 入力レンジ：最大700kPa ③ 直線性：±0.2% ④ 温度誤差：±0.2% ⑤ 計器校正：定期的に行い、压力容器内にセンサーを挿入して加圧し、圧力と出力電圧値の関係から校正係数を算出。
(変位計型)	① 本体の寸法：φ=15mm, L=200mm ② 動作環境：-55°C~+125°C ③ 入力レンジ：最大102mm ④ 直線性：±0.15% ⑤ 計器校正：定期的に行い、ダイヤル式校正装置(測定精度0.025mm)の変位と計器出力電圧値の関係から校正係数を算出。



凡例：▷ 加速度計 ◀ 変位計 ● 間隙水圧計

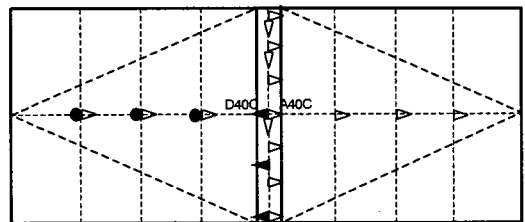


図-4 ダム模型での計器の配置

表-5 遠心載荷模型振動実験に関する相似則

項目	相似率	項目	相似率
遠心加速度	N	加速度	N
幾何寸法	1/N	速度	1
密度	1	変位	1/N
応力	1	時間	1/N
ひずみ	1	周波数	N
剛性	1	透水係数	N

注：本実験では、N=40

表-6 遠心載荷模型振動実験ケース

順序	実験ケース名		貯水	入力加速度波	
	U字谷	V字谷		目標	波形
1	LD.R.01	VD.R.01	無	1G	正弦波スイープ
2	LD.W.B1	VD.W.B1	無	0.5G	ホワイトノイズ
3	LD.S.02	VD.S.04	無	5G	正弦波(50Hz)
4	LD.M.08	VD.M.13	無	10G	箕面川波
5	LD.T.06	VD.T.11	無	10G	東海想定波
6	LD.S.12	VD.S.10	無	10G	正弦波(50Hz)
7	LD.W.R.01	VD.W.R.01	有	1G	正弦波スイープ
8	LD.W.B3	VD.W.B2	有	0.5G	ホワイトノイズ
9	LD.W.S.04	VD.W.S.03	有	5G	正弦波(50Hz)
10	LD.W.M.10	VD.W.M.11	有	10G	箕面川波
11	LD.W.T.10	VD.W.T.11	有	10G	東海想定波
12	LD.W.S.11	VD.W.S.10	有	10G	正弦波(50Hz)
13	LD.W.M.20	VD.W.M.23	有	20G	箕面川波
14	LD.W.M.30	VD.W.T.20	有	20G	箕面川/東海
15	LD.W.T.17	VD.W.S.24	有	20G	東海/正弦波
16	LD.W.S.23	VD.W.M.32	有	30G	正弦波/箕面川
17	LD.W.T.24	VD.W.T.28	有	30G	東海想定波
18	LD.W.S.30	VD.W.S.32	有	30G	正弦波(50Hz)
19	LD.W.M.33	VD.W.M.36	有	40G	箕面川波
20	LD.W.T.32	VD.W.T.36	有	40G	東海想定波
21	LD.W.S.34	VD.W.S.36	有	40G	正弦波(50Hz)
22	LD.W.W.A	VD.W.W.A	有	0.5G	ホワイトノイズ

【備考】

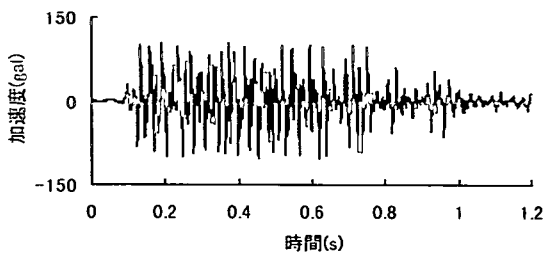
実験ケース名：「谷形状×貯水有無×波形×最大加速度」

/谷形状：U=U字谷模型，V=V字谷模型

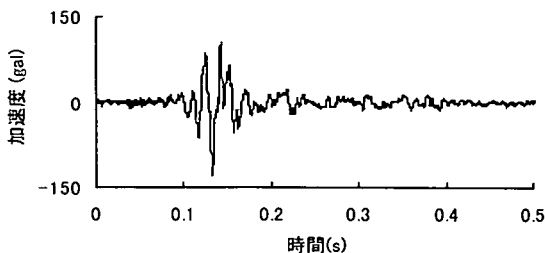
/貯水の有無：D=貯水なし，W=貯水あり

/波形：W=ホワイトノイズ，S=正弦波，M=箕面川波，T=東海想定波

/最大加速度：数字=最大値，B=加振前，A=加振後



(a) 東海想定波



(b) 箕面川波

図-5 振動実験に使用した入力波

型：実物=40：1]の関係が成り立ち，時間軸に関しては「模型：実物=1：40]の関係が成り立つ。

e) 静的遠心力と入力波

遠心載荷時の静的遠心加速度は40Gとし，40Gの遠心力場で実験を実施した。入力波は，ホワイトノイズ，サイン波，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)を使用した。実験に使用した，東海想定波および箕面川波を，それぞれ図-5(a)と図-5(b)に示す。サイン波の振動数については，加振レベルが30G以上の場合，模型の固有振動数が約50Hzに低下することを勘案して，加振波の振動数を50Hzと設定した。

f) 加振方法と実験ケース

地震波の入力加振は，まず予備実験として，最大加速度1Gの正弦波スイープ，0.5Gのホワイトノイズ，5Gの正弦波(50Hz)による加振を行った。その後，貯水無し状態で，ダム模型底面での目標最大加速度を10Gに設定して「箕面川波→東海想定波→正弦波(50Hz)」の順で入力加振した。この加振順序は，ダムに発生する応力や変形挙動に対する各入力波の影響度を勘案して決めた。そして，本実験として，貯水有りの状態で，目標最大加速度を10G，20G，30G，40Gの4段階に設定して入力加振した。各実験ケースの実験条件は，表-6に示すとおりである。

(3) 実験結果

U字谷模型1体とV字谷模型1体の合計2体による

実験結果を以下に示す。

a) 固有振動数

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することができた，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-6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の遠心力場における，入力波の最大加速度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振動数は大きく変化した。同様に，V字谷模型に関して評価した，固有振動数と入力加速度レベルとの関係を図-7に示す。固有振動数と入力加速度の関係については比較的バラツキは少なく，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。

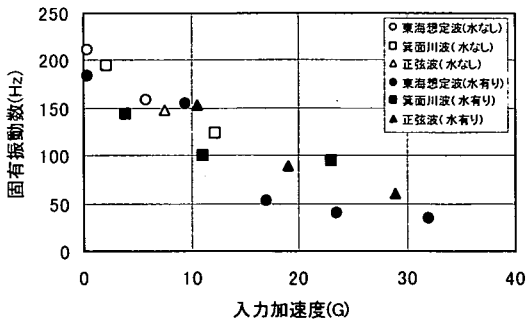


図-6 U字谷模型の固有振動数と入力加速度レベル

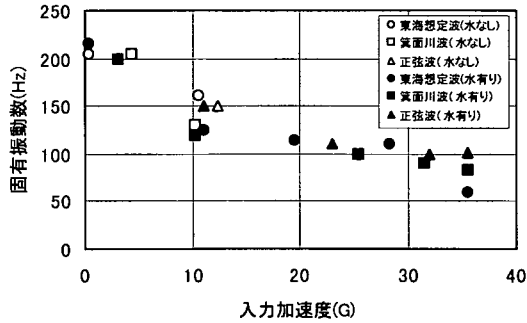


図-7 V字谷模型の固有振動数と入力加速度レベル

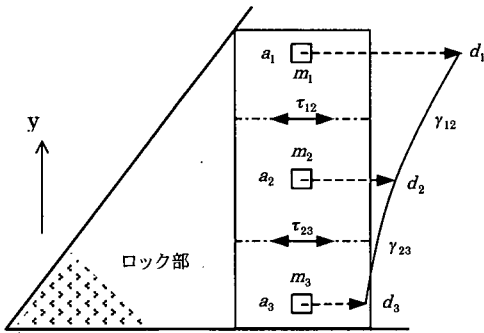


図-8 計測結果に基づく応力-ひずみ関係の求め方

b) 大きなひずみレベルでの動的変形特性

振動数 50 Hz のサイン波を段階的に振幅を調整して入力加振した時の、加速度時刻歴と変位時刻歴に基づいてロック部の動的せん断応力と動的せん断ひずみとの関係³³⁾を求めた。実験対象は成層地盤ではないが、図-8に示すように、計算上、計測センサーを中心としたブロックの質量を評価した。計測された加速度と変位はこれらのブロックの平均値と見なす。ブロックの質量 m_i と加速度 a_i を乗じることにより各ブロックの慣性力を求め、次第に層内せん断応力 τ_{ij} を算定した。そして計測された変位の差分と離間距離の関係から当該区間のせん断ひずみ γ_{ij} を算定した。一般的に表すと、式(1)の関係が成立す。

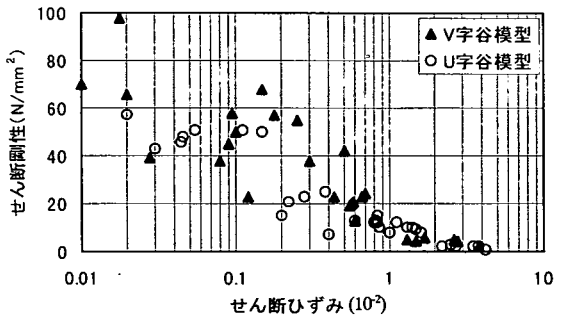


図-9 実験から評価したロック部の動的せん断剛性

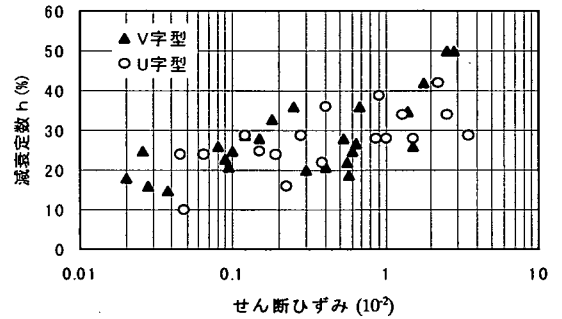


図-10 実験から評価したロック部の減衰定数

$$\gamma_{ij} = (d_i - d_j) / (y_i - y_j) \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \tau_i + a_j \cdot m_j$$

式(1)により得られた応力-ひずみ関係から、等価線形化法に基づき等価せん断剛性係数 G と等価減衰定数 h を算出した。

この応力-ひずみ関係から評価した動的せん断剛性の結果を図-9に、減衰定数の結果を図-10に示す。概ね 5×10^{-2} までのひずみレベルに対する動的変形特性の結果が得られた。減衰定数については、バラツキが大きいが、 2×10^{-4} から 3×10^{-2} までのひずみレベルに対する数値は概ね 15~47%であった。

c) 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-11に、V字谷模型の天端中央の加速度時刻歴を図-12に示す。天端中央の加速度応答について、U字谷模型とV字谷模型の実験結果を比較すると、U字谷模型では、模型底面で東海想定波を最大加速度 23.7G で入力した時の天端での最大加速度が 81.7G、応答倍率は約 3.4であったのに対して、V字谷模型では、模型底面で最大加速度 28.4G で入力した時の天端の最大加速度は 51.3G、応答倍率は約 1.8であった。加振レベルが大きくなるにつれて、加速度応答は、V字谷模型よりもU字谷模

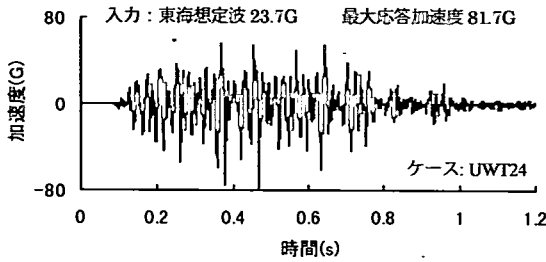


図-11 U字谷模型の天端中央の加速度時刻歴

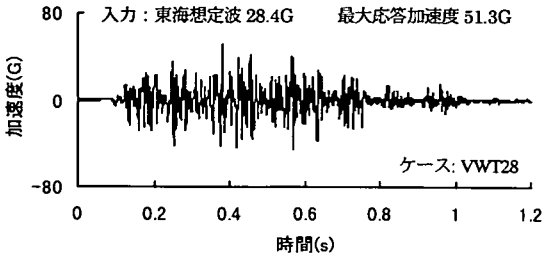


図-12 V字谷模型の天端中央の加速度時刻歴

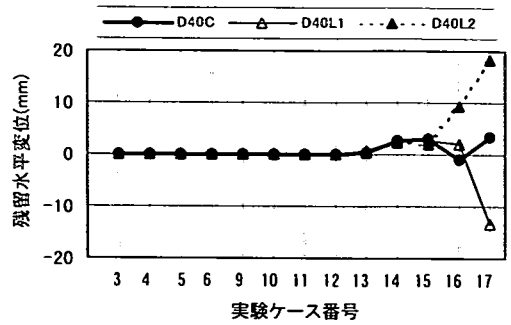
型の方が大きくなった。これは、V字谷模型の谷部の剛性が大きく、谷部の固有振動数が加振波の卓越振動数から離れているため、谷部での地震動の増幅が小さく、その分、ダム部での増幅が小さくなったと推定される。ちなみに、ダム模型の初期のS波速度は、谷部 945 m/s、コア部 370 m/s、ロック部 220 m/s である。

d) ダム模型の残留変形と地震動レベル

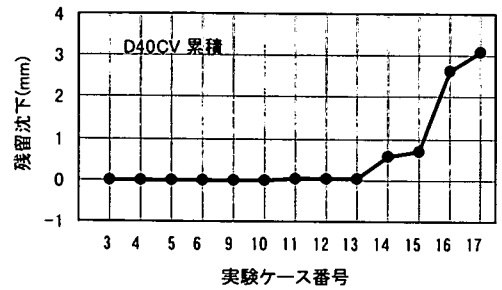
U字谷模型およびV字谷模型の天端ロック部での累積残留変形を図-13および図-14に示す。横軸の数字は、実験ケース番号である。水平方向の変形は下流方向を正、鉛直方向の変形は下方を正としている。ただし、U字谷模型では13段階目以降、V字谷模型では12段階目以降、加振時にコア頂部が損傷し変位計測自体が不可能となったため、図-13および図-14にはそれ以前の段階までの記録を掲載している。

e) 強い地震動を受けた際の損傷形態

目標最大加速度 40Gまでの加振を行った後の、U字谷模型の最終残留変形の状況を図-15に、同様に、V字谷模型の最終残留変形の状況を図-16示す。目標最大加速度 40Gは、実ダムでは1Gの最大加速度に相当するが、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することはなかった。図-15および図-16に示した残留変形の最終形状は、振動を受けてダム模型の全域で塑性変形が発生した結果と見られるが、高速撮影から判定した変形は、頂部ロック材の剥離離脱による転がり落下であった。まず、振動を受けて緩み、その後、加振レベルが大きくなる

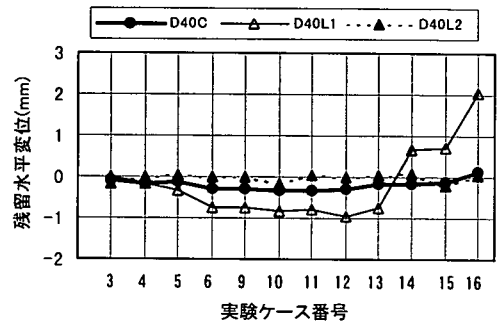


(a) 累積残留水平変形量

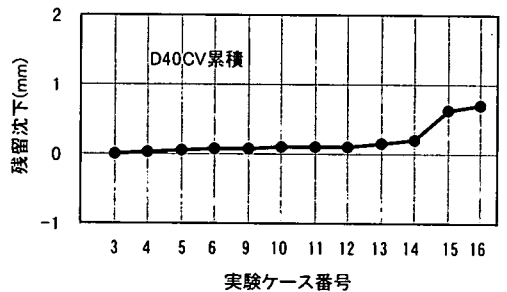


(b) 累積残留鉛直変形量

図-13 U字谷模型天端での残留変形の出現過程



(a) 累積残留水平変形量



(b) 累積残留鉛直変形量

図-14 V字谷模型天端での残留変形の出現過程

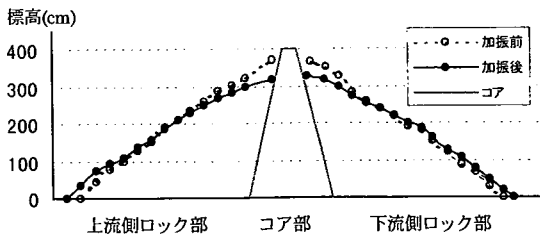


図-15 U字谷模型中央断面の残留変形の最終形状

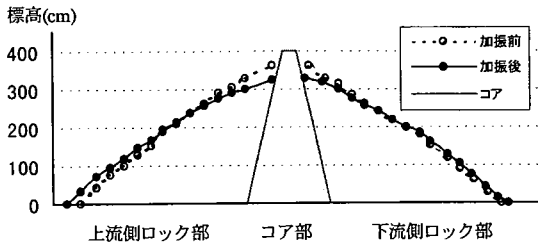


図-16 V字谷模型中央断面の残留変形の最終形状

につれて上方のロック材が下方に転落移動した。また、実験終了後の模型解体および観察では、加速度計の位置の変化は極めて少なく、ロック部の内部の変形は少ないと推定された。

f) 地震時の間隙水圧

図-4 に示した、間隙水圧計によって湛水時の上流ロック部の間隙水圧を記録した。例として、目標最大加速度 40G の箕面川波および東海想定波を入力加振した際の、U字谷模型の上流側ロック部の代表点 2ヶ所（表層部 P31 点と深層部 P11 点）での過剰間隙水圧の時刻歴を図-17 と図-18 に示す。これらの間隙水圧の正の残留分が過剰成分であり、有効応力の減少につながる。加振終了後、ロック部の表層部では、過剰間隙水圧の残留はほとんど見られないが、ロック部の深層部では残留分が観測された。本実験では貯水に水を使用したため、過剰間隙水圧について定量的な評価をすることは難しいが、実験で観察された過剰間隙水圧の残留分の大きさは、最大でも初期有効応力の約 10% 程度であった。なお、図-19 に深層部計測点の加速度応答および間隙水圧のフーリエスペクトルを示す。両者の主要動成分である 45 Hz 付近では、ほぼ同様なスペクトルが現れており、この分の間隙水圧は弾性体積変形による水圧の変化であると推定される。一方、85 Hz 付近では、間隙水圧の応答のみがやや卓越しており、この範囲の振動成分は過剰間隙水圧の発生、上昇に対して主に寄与していると考えられる。

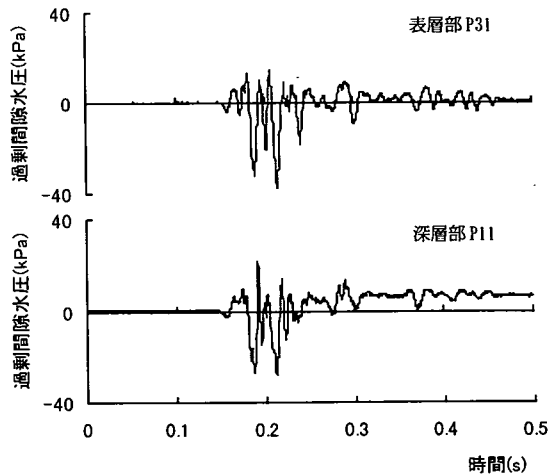


図-17 箕面川波加振時の間隙水圧時刻歴（U字谷模型）

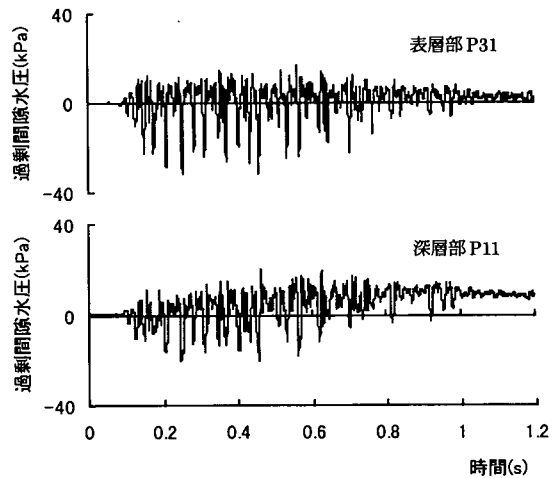


図-18 東海想定波加振時の間隙水圧時刻歴（U字谷模型）

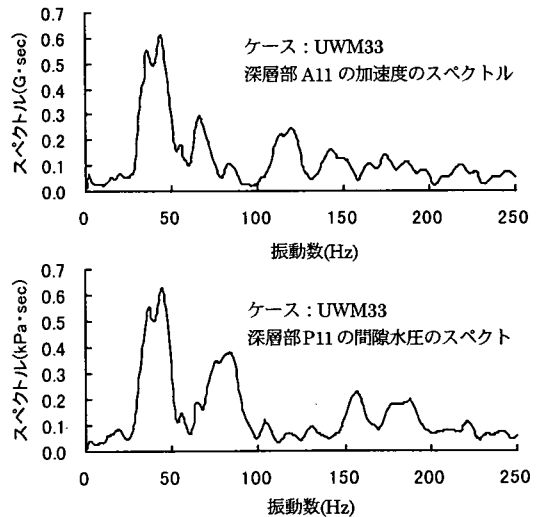


図-19 加速度と間隙水圧のスペクトルの比較

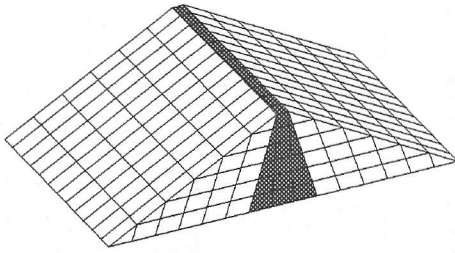


図-20 U字谷模型の三次元再現解析モデル

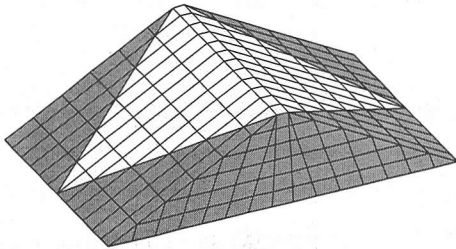


図-21 V字谷模型の三次元再現解析モデル

表-7 三次元再現解析における初期物性値

ゾーン	G_0 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)	ν	減衰定数 h (%)
上流ロック部	60.0	2.10	0.33	0.15
コア部	225.5	1.52	0.17	0.05
下流ロック部	60.0	1.84	0.33	0.15
谷部	1465.5	1.64	0.17	0.05

【備考】 G_0 : 初期動的せん断剛性, ν : ポアソン比

3. 三次元動的解析による遠心载荷振動実験の再現解析

(1) 解析目的

数値解析による遠心载荷模型振動実験の再現性を検証するために、ダム-貯水池連成系の三次元解析モデルを作成し、筆者らが開発した時間領域の非線形解析プログラム“UNIVERSE”^{34)~39)}を用いて、等価線形解析により三次元再現解析を行った。これにより、遠心载荷模型振動実験により得られた堤体材料の動的変形特性および非破壊段階の堤体の地震応答を確認した。

(2) 解析方法

実験条件に合わせて、U字谷模型およびV字谷模型の三次元動的解析モデル(図-20と図-21に示す)を作成し、境界条件は、下方、側方境界ともに固定境界とした。解析用物性値は、実験により評価した値(ロック部の物性は図-9と図-10に示す)を用い、等価線

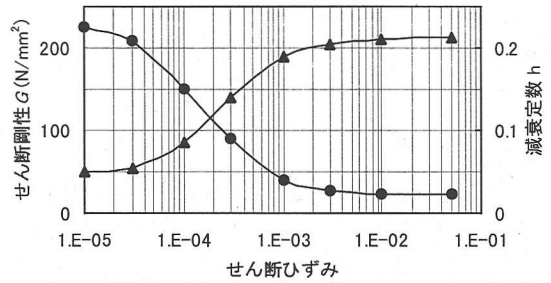


図-22 コア部の動的変形特性の非線形性

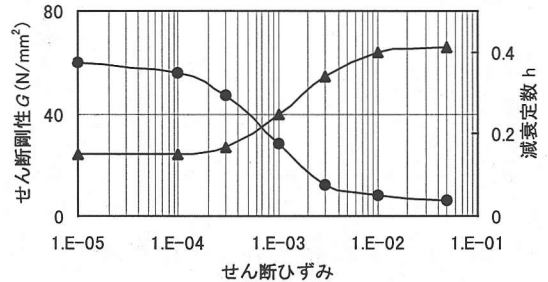
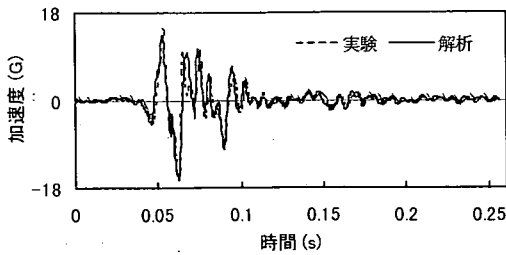


図-23 ロック部の動的変形特性の非線形性

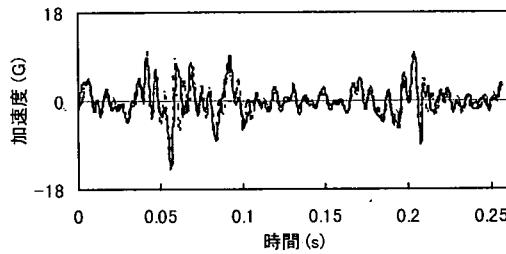
形化法に基づき物性値を設定した。初期物性については、拘束圧の依存性を考慮しながら、平均値として表-7に示す値を設定した。コア部およびロック部の物性のひずみ依存性は、遠心载荷振動実験の結果に基づき、図-22と図-23に示すように設定した。加振レベル20G(目標値)までのU字谷模型とV字谷模型のそれぞれ4ケース(表-8参照)を再現対象とし、入力波としては、遠心载荷実験におけるダム底面の加速度時刻歴をそのまま使用した。

(3) 解析結果

ダム模型底部に対するダム模型天端の加速度応答倍率に関して、実験結果と解析結果の比較を表-8に示す。また、「U字谷模型、貯水有」の実験ケースに関する、ダム天端の加速度時刻歴の再現解析結果を図-24に示す。同様に、「V字谷模型、貯水有」に関する、再現解析結果を図-25に示す。図-24と図-25より明らかなように、解析結果と実験結果は非常に良く一致し、良い再現性が得られた。貯水有の実験に関しては、U字谷、V字谷モデル共に下流側に比して上流側の応答が若干大きい傾向がある。これは貯水と堤体の相互作用の影響および間隙水圧の影響と考えられる。加速度応答倍率に関しては、箕面川波の場合よりも東海想定波の方が応答倍率が大きい。これは、東海想定波の卓越振動数(実験では120~200 Hz)の方が、箕面川波(実験では60~80 Hz)よりもダム模型の固有振動数(図-6と

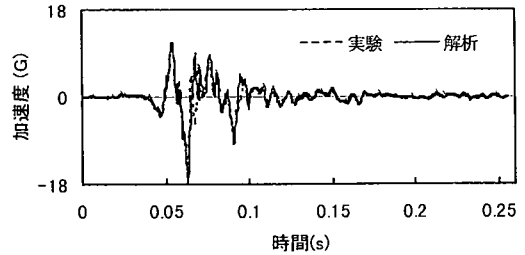


(a) Case-3[U字谷, 貯水有, 箕面川波 10G]

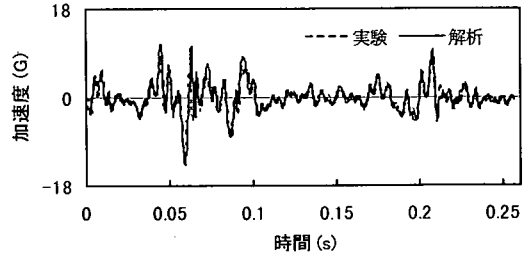


(b) Case-4[U字谷, 貯水有, 東海想定波 10G]

図-24 U字谷模型の天端における加速度時刻歴に関する遠心載荷振動実験結果と三次元解析結果の比較



(a) Case-7[V字谷, 貯水有, 箕面川波 10G]



(b) Case-8[V字谷, 貯水有, 東海想定波 10G]

図-25 V字谷模型の天端における加速度時刻歴に関する遠心載荷振動実験結果と三次元解析結果の比較

表-8 ダム底部に対するダム天端の加速度応答倍率に関する実験結果と解析結果の比較

解析ケース	実験ケース	谷形状	実験	解析
Case-1	UD.M.08	U字谷	1.55	1.53
Case-2	UD.T.06	U字谷	2.12	1.84
Case-3	UW.M.10	U字谷	1.50	1.57
Case-4	UW.T.10	U字谷	2.02	2.09
Case-5	VD.M.13	V字谷	1.45	1.42
Case-6	VD.T.11	V字谷	1.98	1.67
Case-7	VW.M.11	V字谷	1.59	1.46
Case-8	VW.T.11	V字谷	1.64	1.64

D:貯水無, W:貯水有, T:東海想定波, M:箕面川波

図-7 参照)に近かったためと考えられる。U字谷モデルとV字谷モデルの比較においては、U字谷モデルの方が大きな増幅となった。これは、U字谷モデルでは、ダム模型底部から入力された地震波が天端に伝播する際に増幅したのに対して、V字谷モデルでは、谷部が堅硬であったために谷部での増幅が小さくなり、堤体における増幅区間も短縮されたことによる結果と考えられる。

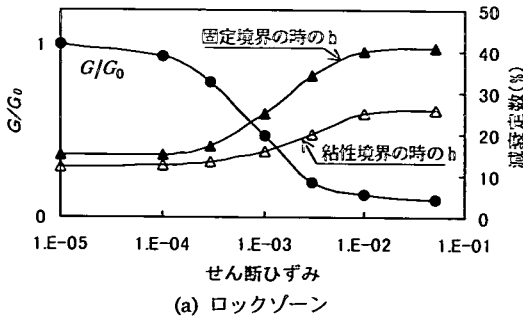
4. 三次元的解析によるエネルギー逸散に関する比較検討

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。したがって、再

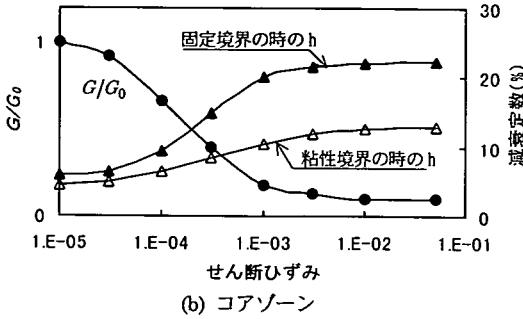
現解析では、基礎岩盤の境界条件は、側方境界および下方境界ともに剛基盤(固定境界)を設定するのが妥当と考えられ、この解析条件で実施した再現解析は、実験結果と非常に良い対応を示した。一方、実際のダムでは、周辺地山へのエネルギーの逸散があると考えられ、遠心載荷振動実験の結果を単に相似則に従って実ダムへ換算した場合、模型の固定境界条件と実ダムのエネルギー逸散境界条件の違いによる誤差が生じる。そこで、ダム模型の境界条件による影響を評価するために、三次元再現解析モデルの境界に粘性境界を設定した比較解析を行った。今回の実験では、上下流方向加振であったため、堤体の上下方向の挙動が比較的小さいと判断され、解析では模型底面を剛基盤、側方境界を粘性境界と設定した。設定した粘性境界条件は仮想仕事原理に基づくものである⁴⁰⁾。解析に用いたダム堤体モデルの物性は、前出の表-7、図-22、図-23に示したものと同様であり、側方の基礎地盤の物性については、堤体と同値であると仮定した。

逸散減衰の影響を評価する手法として、境界条件の違いによる堤体の応答の変化に着目した。そして、粘性境界とした場合の堤体の加速度応答が、固定境界とした場合と一致するようにダム模型の内部減衰定数を調整し、粘性境界による影響が内部減衰としてどれくらいに相当するかを検討した。

側方境界を粘性境界とした場合と固定境界とした場合の加速度応答が一致するように、減衰定数を調整し

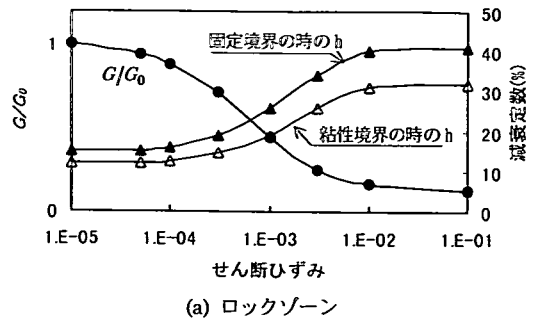


(a) ロックゾーン

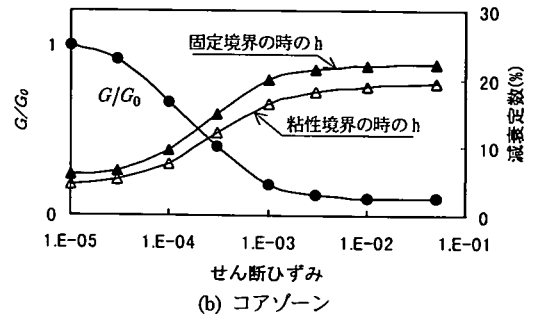


(b) コアゾーン

図-26 側方の境界条件に応じたU字谷モデルの等価せん断剛性比と減衰定数



(a) ロックゾーン



(b) コアゾーン

図-27 側方の境界条件に応じたV字谷モデルの等価せん断剛性比と減衰定数

た結果を、図-26と図-27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場合に比して、U字谷模型では最大15%、V字谷模型では最大9%小さくなった。この差は、模型実験の結果に基づいて実ダムの挙動を評価しようとするとき考慮すべき数値であると考えられる。

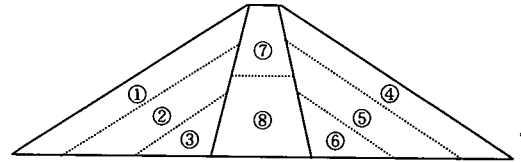


図-28 二次元弾塑性解析モデルにおける物性分布

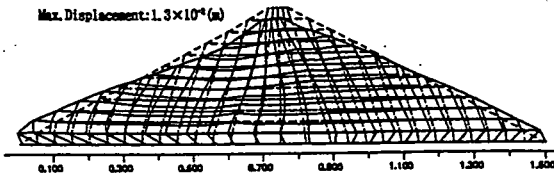
5. 弾塑性有効応力解析による過剰間隙水圧および残留変形の検討

(1) 解析条件

遠心載荷振動実験でダム模型に発生した過剰間隙水圧が、どの程度、ダムの地震応答に影響したか、また、残留変形の形状をどの程度模擬的に再現できるかどうかを検討するために、二次元プログラム“FLAC”を用いて弾塑性有効応力解析を試みに行った。解析は、U字谷模型の中央断面を対象とし、差分法により離散化した二次元解析モデルを作成して行なった。FLACでは、弾塑性解析に関してはMohr-Coulombモデルが、地震時の過剰間隙水圧の解析に関してはFinnモデルが用いられており、解析で仮定した物性値は表-9に示すとおりである。解析モデルのゾーニングは図-28に示すとおりである。箕面川波(目標最大加振加速度30G)で加振したケースを解析対象とし、地震時の間隙水圧応答および残留形態に着目して解析を行った。

表-9 二次元弾塑性解析で仮定した解析用物性値

項目	ゾーニング				
	①④	②⑤	③⑥	⑦	⑧
せん断弾性係数 (N/mm ²)	50	60	70	200	220
体積弾性係数 (N/mm ²)	150	180	210	330	370
密度 (g/cm ³)	1.7	1.8	1.9	1.52	1.52
粘着力 (N/mm ²)	0.08	0.08	0.08	0.1	0.1
内部摩擦角(度)	35	35	35	37	37
ダイルトン角(度)	15	15	15	15	15
間隙率	0.45	0.45	0.45	0.3	0.3
透水係数 (cm/s)	2.3x 10 ⁻¹	2.3x 10 ⁻¹	2.3x 10 ⁻¹	5.6x 10 ⁻⁴	5.6x 10 ⁻⁴
Finnモデルパラメータ	C ₁ =0.19, C ₂ =1.00, C ₃ =0.10, C ₄ =0.50				



(U字谷模型中央断面、箕面川波 30G加振時)

図-29 二次元弾塑性解析による残留変形の評価例

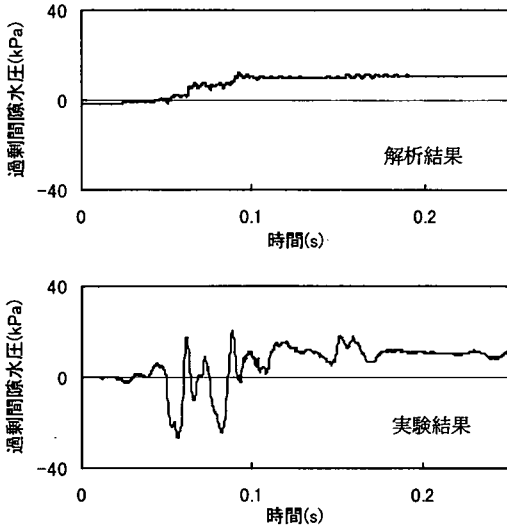


図-30 間隙水圧に関する解析と実験の比較
(箕面川波目標 30G加振)

(2) 過剰間隙水圧

一例として、図-30にP11点(図-4参照)の過剰間隙水圧の時刻歴に関する解析と実験の比較結果を示す。解析では、負の間隙水圧は算出されないことから応答波の波形は実験結果と異なっている。しかし、主要動後の過剰間隙水圧は実験結果と同オーダーである。その値は、初期有効拘束圧の10~20%程度であり、しかも、ロック部の深さが浅いほど過剰間隙水圧が小さく、地震時堤体の剛性に対する影響は小さいものと考えられる。

(3) 残留変形

U字谷模型の残留変形状に関する解析結果の一例を図-29に示す。解析により得られた堤体の残留変形の特徴は、天端付近のロックの沈下と、上下流面の下半部のはらみだしである。このような外形が実験の結果と概ね一致しているが、両者には本質的な差異がある。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であり、模型実験では天端付近のロ

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するのに対して、二次元弾塑性解析では全体的な塑性変形の結果として残留変形が発生している。ロックフィルダムの残留変形の評価に関しては、簡便に残留変形量を推定するための便宜的な方法と地震時の損傷過程を正確に再現し得る精度の高い方法の両面からの取組みが必要であると考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた主な結論は、つぎのとおりである。

- ① 大きなひずみレベルでの動的変形特性:遠心载荷模型振動実験に基づいて、約 5×10^2 までのせん断ひずみに対する動的せん断剛性と減衰定数の非線形性を定量的に評価した。
- ② 地震時の加速度応答に及ぼす谷の影響:U字形とV字形の2種類の谷形状を設定して比較検討した結果、V字谷模型よりもU字谷模型の方が地震時の加速度応答および間隙水圧が大きくなった。これは、V字谷模型の谷部の剛性が高く、谷部の固有振動数と加振波の卓越振動数と離れていることによるものと考えられる。
- ③ 残留変形と地震動レベルとの関連:残留変形が顕著に出現し始めたのは、U字谷模型では箕面川波を29.2Gで加振した時、V字谷模型では箕面川波を23Gで加振した時であった。実ダムに換算すれば、それぞれ715galと560galに匹敵するが、ダム底部で概ね500gal程度までは残留変形は生じないものと推察される。これは、過去のロックフィルダムの地震被害事例とも概ね符合する。
- ④ ロックフィルダムの損傷過程:ロックフィルダムの損傷過程に関しては、ダム表層のロック部の粒形材料が振動を受けて緩み、強い振動を受けた際に上方から下方へと転落する現象が主体である。こうしたメカニズムの残留変形を解析評価する手法の開発が必要である。
- ⑤ 非常に強い地震動を受けた際の損傷形態:非常に強い地震動を受けた際のロックフィルダムの損傷形態に関しては、ダム基礎で1G相当の地震動を作用させた場合でも、円弧すべりの破壊形態は生じなかった。これは、粘着力がなく固結性の低いロック材料においては、地震動を受け場合に個々の材料の結合が緩み、地震動が大きくなるにつれて個々の材料が非連続的な挙動をするようになることが理由であると考察される。
- ⑥ 地震時の間隙水圧:間隙水圧の時刻歴は、加速度応答波形と相似の形状を示し、弾性体積変化により発

生した水圧が主体を占めている。模型底面で最大加速度 40G (実ダムでは1Gに相当) の地震動を作用させた場合でも、ロック部の表層部では過剰間隙水圧の残留は見られなかった。深部では過剰間隙水圧の残留が生じたが、過剰間隙水圧の残留分は、最大でも初期有効応力の 10~20%程度であった。この結果から、ロックフィルダムでは過剰間隙水圧による堤体材料剛性の低下は非常に小さいと考えられる。

- ⑦ 弾塑性解析による残留変形の評価に関する問題点: 遠心載荷振動実験により解明したロックフィルダムの変形過程と弾塑性解析における変形メカニズムには本質的な差異があると考えられる。弾塑性解析により最終変形形態を予測したとしても、この本質的な差異に注意することが必要である。今後、地震時の損傷過程を考慮した残留変形の評価手法の精緻化が必要である。

7. おわりに

本研究では、ロックフィルダムの耐震性能を照査する際に重要なポイントになる、大きなひずみレベルでの動的変形特性、地震時応答に及ぼす谷形状の影響、非常に強い地震動を受けた際の残留変形、損傷過程、損傷形態、地震時の間隙水圧の発生等について、遠心載荷模型振動実験によって明らかにし、三次元的解析によって定量的な評価考察を加えた。非常に強い地震動に対してロックフィルダムは高い耐震性能を有していると考えられる。その耐震性能をより合理的に照査するためには、地震時に発生する残留変形を精度良く評価すること、そして、残留変形が発生した後の遮水機能の保持を合理的に評価することが、今後の重要な課題である。

謝辞: 遠心載荷振動実験の実施に際しては、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きました。記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 有賀義明: 過去の事例に見るロックフィルダムの地震被害と最大加速度との関係, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集, I-83, pp.314-315, 1993
- 2) 田村重四郎: 昭和 59 年長野県西部地震の震央域のダムの挙動, 土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集, I-299, pp.597-598, 1985
- 3) 田村重四郎: メキシコ地震被害調査報告, 大ダム No.116, pp.40-51, 1986
- 4) 菊沢正裕: ロックフィルダムはなぜ地震に強いのか!, 水と土 No.70, pp.19-26, 1987
- 5) 三浦健志, 伊藤洋, 中村晋, 藤井義文: ロマブリエタ地震によるダムの被害, 土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集, I-597-598, pp.1224-1227, 1990
- 6) 田村重四郎, 岡本舜三, 久保慶三郎, 龍岡文夫, 韓国城, 小川好, 野中昌明: 海城・唐山地震の被害と中国の耐震研究, 生産研究, Vol.34, No.1, pp.10-24, 1982
- 7) 安田正幸: フィルダムの耐震設計の動向, 発電水力, No.144, pp.52-59, 1976
- 8) Kutzner, C.: Design and Construction of Earthquake-Resistant Earth and Rock-fill Dams, *Geo-technical Engineering*, Vol.16, pp.1-25, 1985
- 9) Romo, M.P., Raserdig, D.: Computed and Observed Deformation of two Embankment Dams under Seismic Loading, *Dams and Earthquake*, pp.267-274, 1981
- 10) Stroppini, E.W.: The Oroville Earthquake and Oroville Dam, *Eng. Found. Conf. Eval. Dam Safety*, pp.301-328, 1977
- 11) Housner, G.W., Scott, R.F.: Earthquake Consideration in Dam Design, *Water Power & Dam Construction* Vol.31, No.7, pp.31-37, 1979
- 12) Okamoto, S.: *Introduction to Earthquake Engineering* (2nd Edition), University of Tokyo, 1984
- 13) 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論文集, pp.703-710, 1975
- 14) 田村重四郎, 韓国城, 加藤勝行: フィルダム砂模型の振動破壊機構に関する研究 - 特に粘着力の影響について, 第 6 回日本地震工学シンポジウム論文集, No.116, pp.921-927, 1982
- 15) 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, Vol.28, No.5(268), pp.25-32, 1980
- 16) 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, No.95, pp.57-64, 1981
- 17) 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, No.339, pp.127-136, 1983
- 18) 渡辺啓行, 五月女敦: 模型土質料面の傾斜破壊実験と数値解, 土木学会論文集, No.376/III-6, pp.31-40, 1986
- 19) Zienkiewicz, O.C., Chang, C.T., Bettess, P.: Drained, undrained, consolidation and dynamic behavior assumptions in soils, *Geotechnique*, Vol.30, No.4, pp.385-395, 1980
- 20) 津国正一, 岩下友也, 館野悟, 中村昭: 初期せん断応力が作用する密な疎粒材料の動的強度特性, 第 31 回地盤工学研究発表会発表講演集, No.539, pp.1077-1078, 1996
- 21) 松本徳久, 安田成夫, 芳方良一: ロック材料の三軸試験お

- よびねじり単純せん断試験による非排水動的挙動, 土木学会論文集, No.554, pp.173-184, 1996
- 22) 岩下友也, 館野悟, 吉田等, 津国正一: 粗粒材料の動的せん断強度とダイレータンスー特性の関係, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, B8-6, pp.529-532, 1997
- 23) 平田和太: フィルダムの動的解析における地下逸散減衰の評価, 電力中央研究所我孫子研究所報告, No.U88061, 1989
- 24) 松本徳久, 安田成夫, 豊田光雄, 志賀三智: 三保ダムにおける実地震記録の解析, 土木技術資料, Vol.26, No.7, pp.9-15, 1984
- 25) 藤沢侃彦, 永山功, 吉田等, 佐々木隆, 岩下友也: 地震時におけるダムの安全性に関する検討, 土木技術資料, Vol.39, No.3, pp.26-31, 1997
- 26) 松本徳久, 成田成夫: ロックフィルダムの動的解析における入力物性値と非線形解析, ダム技術, Vol.3, No.4, pp.15-30, 1985
- 27) 渡辺啓行: フィルダムの動的解析-I-動的解析の方法-, 大ダム, No.87, pp.46-64, 1979
- 28) 大町達夫: ロックフィルダムが地震に強いのはなぜか, 電力土木, No.223, pp.3-13, 1989
- 29) 建設省土木研究所: フィルダム堤体の三次元的地震時挙動特性に関する検討報告書, 土木研究所資料, ISSN0386-5878, 資料, No.2356, pp.1-148, 1986
- 30) Dakoulas, P., Gazetas, G.: Seismic Shear Vibration of Embankment Dams in Semi-cylindrical Valleys, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.14, No.1, pp.19-40, 1986
- 31) Gazetas, G., Dakoulas, P.: Seismic Analysis and Design of Rock-fill Dams State-of-the-art, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No.11, pp.27-61, 1992
- 32) 岩下友也, 井根健, 吉田等: フィルダムの堤敷における地震時動的相互作用と堤敷観測波からの基盤入射波の推定, *ダム工学*, Vol.8, No.4, pp.270-282, 1998
- 33) 石原研而: 土質力学の基礎, 鹿島出版会, pp.238-240, 1982
- 34) 電源開発株式会社: "UNIVERSE" A Program for the 3-D Static & Dynamic Analysis of Dams, 1999
- 35) Hiroyuki Watanabe, Zengyan Cao, Kenji Kikuchi: Dynamic Behavior of A Rock-fill Dam and It's Material Properties, *19th ICOLD*, Q73.R40, pp.673-693, 1997
- 36) Watanabe, H., Cao, Z.: Upstream Boundary of Reservoir In Dynamic Analysis, *Journal of Engineering Mechanics, ACSE*, Vol.124, pp.468-470, 1998
- 37) 有賀義明, 渡辺啓行, 吉田昌稔, 曹増延: 三次元ダム-基礎-貯水池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論文集, E4-18, pp.2021-2026, 1998
- 38) 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講演論文集, B8-6, pp.445-448, 1999
- 39) 有賀義明, 曹増延: 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, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, e-12, pp.259-262, 2000
- 40) 三浦房紀, 沖中宏志: 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析手法, 土木学会論文集, No.404/I-11, pp.395-404, 1989

(2001.11.13 受付)

STUDY ON SEISMIC STABILITY OF ROCK-FILL DAM DURING STRONG EARTHQUAKES BY MEANS OF DYNAMIC CENTRIFUGE TEST AND 3-D DYNAMIC ANALYSIS

Yoshiaki ARIGA, Zengyan CAO and Hiroyuki WATANABE

A centrifugal dynamic experiment and relevant numerical analyses have been carried out for assessing the seismic stability of a rockfill dam against strong earthquakes. The central core dam model was 40 cm in height and both the upstream and downstream slopes were 1:1.8. A reservoir 32 cm deep was coupled with the dam and the valley was alternatively modelled in a U shape or a V shape. The whole model was set at a gravity field 40G and shaken by various waves of the maximum acceleration 40G. Numerical simulations were performed for interpreting the experiment. Such work has resulted in an understanding of the seismic stability of the rockfill dam. The dynamic properties of the dam materials in large strain status have been quantitatively evaluated. The behaviors of excessive pore water pressure in rock zone have been examined. The damage process and the failure mode have been understood primarily.