

(145) コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムの地震時変形挙動

電源開発株式会社 正員 有賀 義明

1 はじめに 世界の技術的開発可能包蔵水力は、年間約1500万GWhと推定されているが、その既開発率は現在約15%である。水力エネルギーは、クリーンな自然エネルギーとして、将来的にも電力エネルギーの中で重要な役割を果たして行くものと考えられるが、国際的な場では、地球環境問題等の関連から、水力発電の重要性はより一層増大して行くものと想定される。ところで、コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムは、我が国では、小淵ダム、石淵ダム、野反ダム、皆瀬ダム等、数例の建設事例があるが、比較的馴染みが薄いように思われる。一方、海外では、1895年に建設されたMorenaダム（米国、高さ54m）をはじめとして、現在までに約150のコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムが建設されている。その内、高さ50mを超えるものは、建設中を含めると現在約100を数える。

コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムは、薄いコンクリートスラブと粒形材料の集合体であるロックフィルダムが結合した構造体であることに大きな特徴がある。表面遮水壁とダム本体とが、それぞれ変形特性、強度特性が異質の材料から構成されているため、コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムの安定性を評価確認するためには、両者の接合面における相対的挙動特性の把握解明が肝要となる。コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムは、世界の場では今後も継続的に建設される機会が出てくるものと思われるが、地震地帯において、コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムを合理的に安全に建設して行くためには、地震時の安定性について十分な評価検討を行っておくことが大切である。本稿では、コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムの地震時挙動、表面遮水壁とダム堤体の地震時の相対挙動等について、模型振動実験により定性的な検討を行った結果を紹介する。

2 模型振動実験 自然の地盤材料でダムの縮尺模型を作成し、通常の振動台を用いて振動実験を行う場合、重力によって生じるダム堤体内部の拘束圧の再現が困難であることから、相似則を満足させた振動実験を行うことができない。今回の振動実験については、このような基本的な制約がある。したがって、今回の模型振動実験から得られた結果は、必ずしも実現象を忠実に反映し得るものではないが、実現象を推定するための定性的な知見を得るための小さな実物として位置付けて振動実験を行った。ダム模型の作成に際しては、幾何学的な相似則については、ひとつの目安として縮尺を1/100を想定した場合の相似性が保たれるように配慮して、ダム模型の形状、使用地盤材料の粒度組成等の設定を行った。

(1) ダム模型：ダム模型は、砕石した後に粒度調整した筑波産の花崗岩（最大粒径15mm）を用いて作成し、その形状は、過去の建設事例を参考に、高さ1.00m、上流面勾配 1:1.4、下流面勾配 1:1.5、堤頂長2.00m、堤頂幅0.10m、堤底幅3.00m、堤体容積3.10m³とした（図-1参照）。コンクリート表面遮水壁については、スラブのたわみ量が等価になるように想定して、厚さ5mmの透明の塩化ビニル板を使用した。

(2) 実験ケース：ダムの地震時変形挙動に対する貯水の影響を比較するために、貯水がない場合とある場合の2ケースについて実験した。貯水がある場合の水深は0.80mとした（表-1参照）。

(3) 加振方法：表-3に示したような性能を持つ大型振動台を使用して、正弦波加振により振動実験を行った。加振パターンは、図-2に示したように「0galから立ち上げ、所定の加速度で1分間加振した後、0galまで引き下げる」パターンを基本型として、最大加速度を50galピッチで漸増させながら50galから500galまで加振した。加振周波数は、振動台の性能上の制約から、最大加速度50gal～250galについては30Hz、最大加速度300gal～500galについては15Hzとした。

(4) 測定方法：ダム堤体全体の変形は、加振後、堤体表面の変形状況をメジャーにより計測した。堤体内部の応答、表面遮水壁の応答、表面遮水壁とダム堤体との相対挙動については、図-1のように加速度計を配置して加速度応答波形を記録し評価検討した。

表-1 ダム模型と実験ケースの概要

実験ケース		I	II
模型形状	ダム高 (m)	1.00	
	堤頂長 (m)	2.00	
	天端幅 (m)	0.10	
	上流面勾配	1 : 1.4	
	下流面勾配	1 : 1.5	
容 積(m ³)	3.10		
表面遮水壁 (塩ビ板)		厚さ 5 mm	
貯 水 (水深 0.8m)	貯水なし	貯水あり	
湿潤重量 (t)	5.803	5.887	
湿潤密度 (t/m ³)	1.872	1.899	
固有振動数 (Hz)		29.6	26.5
S波速度 (m/s)	天端~基礎	83	91
	3H/4~基礎	94	107
	2H/4~基礎	100	116
	1H/4~基礎	139	145

H : ダム模型の高さ (H=1.00 m)

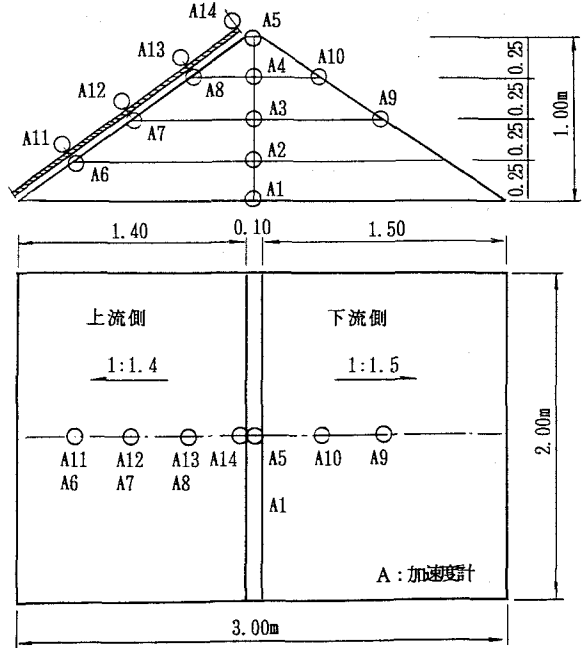


図-1 ダム模型の形状と加速度計の配置

表-2 ダム模型に使用した地盤材料の粒度組成

材料名	筑波産花崗岩
比重	2.65
最大粒径	15 mm
粒 度 (mm)	通過百分率 (%)
15.0	100.0
10.0	81.3
4.8	54.4
2.0	28.2
0.074	1.6

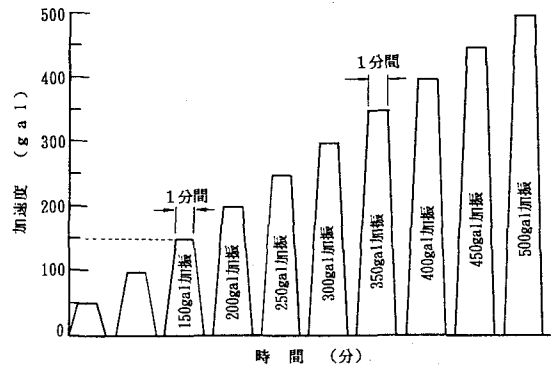


図-2 加振パターン

表-3 大型振動台の性能

項目	性能
振動盤寸法	5m × 5m
最大搭載量	22t
加振方式	アンバランスマス式
最大加振力	56tG
振動方向	水平、上下、斜
振動波形	正弦波
周波数範囲	5~50Hz
最大加速度	16G
最大変位振幅	5.7mm

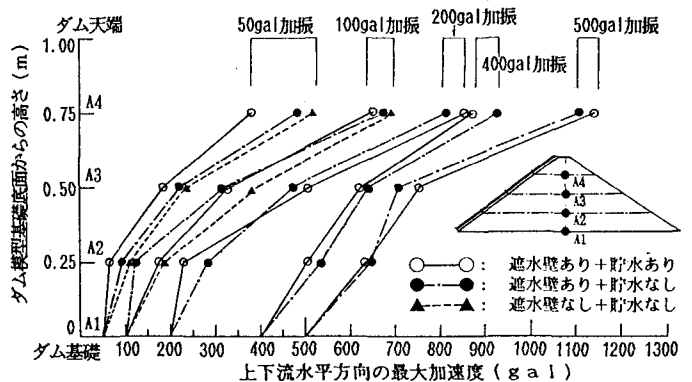


図-3 ダム中央堤体内部における加速度分布 (位置 : A1、A2、A3、A4)

3 実験結果 ダム堤体内部の加速度の増幅特性を把握するために、A1, A2, A3, A4で記録された上下流方向水平成分の最大加速度をプロットした結果を図-3に示す。A1~A4の区間の加速度応答倍率は、50gal加振の場合7~9、200gal加振の場合4~4.5、500gal加振の場合2~2.5であった。加速度レベルが大きくなると、ダム堤体の非線形性・非連続性の影響を反映して、ダム堤体内部の応答倍率は小さくなることが理解できる。また、同図より、表面遮水壁は、特に加振加速度が小さい場合に全体的にダム堤体の加速度応答を低減する効果を持つものと推察することができる。

つぎに、遮水壁表面(A12, A13)と遮水壁のすぐ背後に位置するダム上流側堤体表層(A7, A8)の加速度応答を、図-4(50gal加振時)、図-5(100gal加振時)、図-6(200gal加振時)、図-7(500gal加振時)に示す。これらの図より、ダム上流側堤体表層では遮水壁表面に比して加速度は概して大きいこと、ダム上流側堤体表層の加速度は貯水がない場合に比して貯水がある場合は小さくなること、遮水壁表面の加速度は貯水がある場合かえって大きくなること、遮水壁表面とダム上流側堤体表層の加速度応答の差は貯水がないと大きい、貯水があるとその差は小さくなること、したがって、貯水による水圧は遮水壁とダム堤体の地震時応答(振幅・波形)の差を縮めるように作用すること等の点を指摘することができる。図-8および図-9には、遮水壁表面(A12, A13)とダム上流側堤体表層(A7, A8)で記録された加速度応答波形を示す。貯水がない場合、遮水壁とダム堤体はそれぞれの固有の特性に応じて振動し易いためか、遮水壁表面とダム上流側堤体表層の応答は振幅も波形も異なる様相を呈した。貯水がある場合は、貯水による水圧が遮水壁とダム堤体とを密着させる方向に影響するため、A7とA12の応答はほぼ同様の結果を示すようになった。しかし、A8とA13の比較においては、貯水の水深が0.80mであるため遮水壁上部には水圧が作用していないこと、また、遮水壁の端部がフリーなため遮水壁は自由に振動することが可能であったことから、貯水がある場合でも、A8とA13は相異なる加速度応答を示した。

強い振動を受けた後のダムの変形状況の一例として、500gal加振後のダムの最終の変形状況を図-10に示す。ダム上流側については、遮水壁がダムの変形挙動を拘束・抑制するため、ダム上流側の変形量は小さくなること、ダム下流側については、ダム表面の粒形材料が振動をうけて下方へと転落して行くため、ダム下流側の変形量は非常に大きくなること、遮水壁については、振動により粒形材料が外側(上下流側)へと移動しようとするため、遮水壁は外側へと膨脹するように変形すること等の結果を得た。500gal加振後のダム天端中央部の最終沈下量は、実験ケースI(貯水なし)では16.0cm、実験ケースII(貯水あり)では12.5cmであった。遮水壁背面における遮水壁とダム堤体との相対挙動(振動により発生したズレ)については、透明な塩ビ板を介した観察により、数cmから十数cmオーダーの相対変位が発生していたことを確認した。

4 まとめ 花崗岩の砕石を用いて高さ1.00mのダム模型を作り、正弦波加振により振動実験を実施したところ、コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムの地震時挙動について、つぎのような定性的な知見を得た。①コンクリート表面遮水壁は、ダム堤体上流面に対して、ダム堤体表面の地震時応答を抑制するように作用する。②振動を受けることにより、ダム堤体の粒形材料は上下流側ともに外側下方へと移動しようとする。その結果、表面遮水壁は全体として外側(上流側)へと膨らむように変形する。③ダム堤体下流面については、ダム表面の個々のロック粒子が、振動を受けてダム表面を転がりながら下方へ落下する現象が支配的であった。④貯水は、ダムの振動を抑制するように作用し、コンクリート表面遮水壁とロックフィルダム堤体との間の相対的挙動の差異を縮小するように作用する。⑤遮水機能が健全であるかぎり、非常に強い地震動を作用させてもダム模型は破壊しなかった。なお、薄いコンクリートスラブは、ロックフィルダム堤体の地震時応答を低減し変形を抑制する点で優れた機能を有するのではないかと推察される。薄いコンクリートスラブをゾーン型ロックフィルダムに対して、ダムの耐震性、制振性を向上させるための構造体として活用することも有効なのではないかと考察される。

【参考文献】 1)Water Power and Dam Construction Handbook 1993 2)山村勲：最近のコンクリート表面しゃ水壁型ロックフィルダムの設計と施工について、大ダム No. 99, 1982 3月

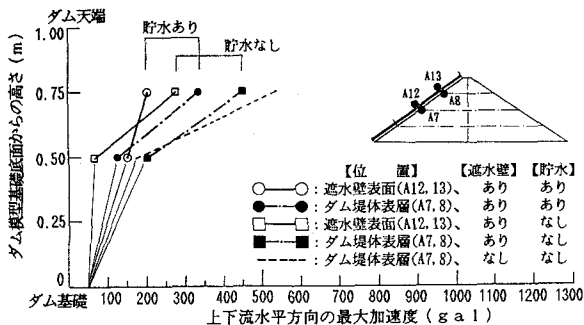


図-4 遮水壁表面とダム上流側堤体表層の加速度応答の比較 (50gal加振時)

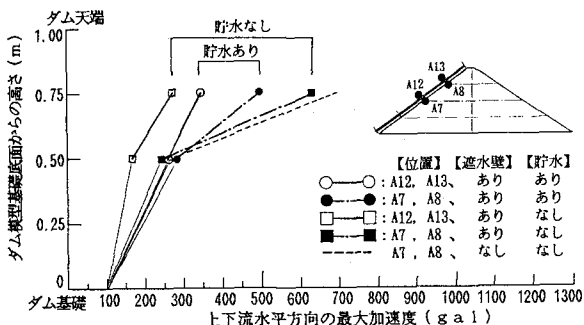


図-5 遮水壁表面とダム上流側堤体表層の加速度応答の比較 (100gal加振時)

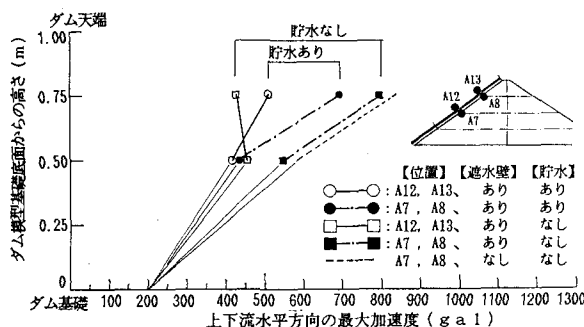


図-6 遮水壁表面とダム上流側堤体表層の加速度応答の比較 (200gal加振時)

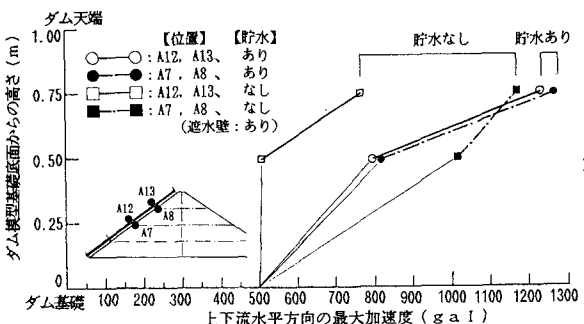


図-7 遮水壁表面とダム上流側堤体表層の加速度応答の比較 (500gal加振時)

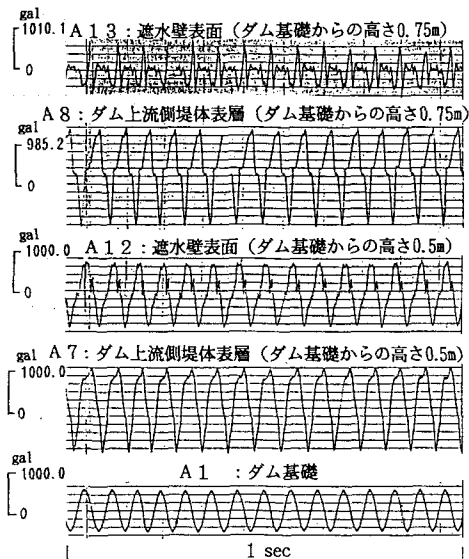


図-8 遮水壁表面とダム上流側堤体表層の加速度時刻歴の比較 (500gal加振時、貯水なし)

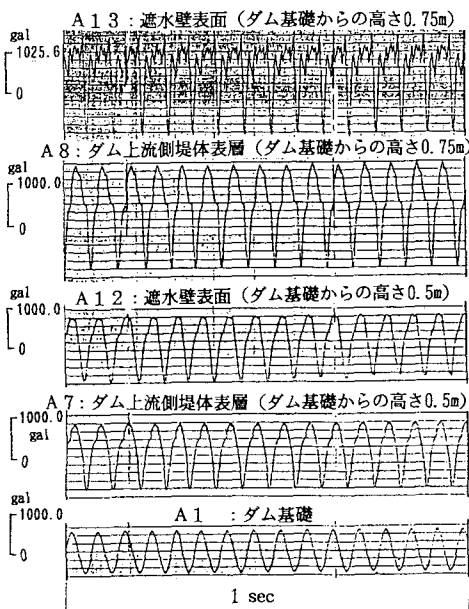


図-9 遮水壁表面とダム上流側堤体表層の加速度時刻歴の比較 (500gal加振時、貯水あり)

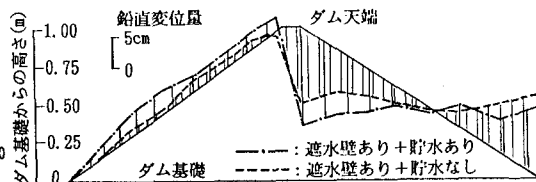


図-10 500gal加振後のダム模型の最終変形量