

コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムの破壊性状に関する基礎的研究 I ——型式が異なるロックフィルダムの破壊実験——

Fundamental Research on Failure of Concrete-Faced Rockfill Dam (I)

——Experiments on the Failure of Rockfill Dam Models with Facing and without facing——

田 村 重四郎*・孔 憲 京**・小長井 一 男**・羅 休**
Choshiro TAMURA, Xianjing KONG, Kazuo KONAGAI and Xiu LUO

1. 序 言

コンクリート表面遮水壁ロックフィルダム (以下、表面遮水壁ダムと略称する) は、堤体特に上流面の沈下、変形のため、高さが増すにつれて漏水量が増加することがあって、一般には建設されなかった。1960年頃より、従来のダンプ、射水による締固めから、大型機械を用いた施工—振動ローラーによる薄層転圧へと代わり、最近の工法で沈下量、変形量を著しく減少させることに成功している。また、表面遮水壁は従来の10~15m間隔に格子状の継目を設けることなく、スライディングフォームを用いて連続的に鉄筋コンクリートを打設する工法が用いられている。このような締め固め工法の発展および表面遮水壁の設計法の改良と施工技術の進歩などによって、完成後の堤体変形に伴うコンクリート表面遮水壁のクラックを原因とする漏水が減少し、世界的に見直され、築造されることが多くなった¹⁾。

近年、世界の一部地域では高さ200m程度のロックフィルダムでも幾つか表面遮水壁型を採用している。採用の理由は、堤体の安定性に対し間隙水圧を考慮する必要のないこと、貯水池の水圧を上流面の押さえ荷重と考えることができること、他の型式のロックフィルダムに比べて上流法面勾配を急にすることができ、したがって堤体断面を小さくすることができること、表面遮水方式であるため水位の急低下に対し安定性が比較的变化しないこと、他の型式のロックフィルダムに比べて、含水比管理の必要がなく、施工上気象条件の制約が少なく、工程を短縮できること、などが挙げられ、大きな利点を有している、経済性に優れている。

しかしながら、今まで建設されたこの表面遮水壁型ダムは、地震がほとんどないかあるいは中程度の地震活動度の所にあり、地震を経験した例がきわめて少ない。また地震観測、応答解析、模型実験のほとんどは耐震性が

高いとされているコア型ダムについて行われていて、この型式についての研究はきわめて少ない。現在各国のダム設計基準では、ゾーン型ロックフィルダムが対象になっていて、震度法および修正震度法が適用されており、円弧滑り法により耐震性が評価されているのが普通である。表面遮水壁ダムはゾーン型ダムとは構造的に異なるので地震に対する応答も異なるものと推測される。上述のようにこの型式の大型ダムの建設が進められる状況の下で、安定性、耐震性の評価方法の確立は早急に行わなければならない重要な課題であり、その研究は急務である。

表面遮水壁ロックフィルダムの地震時安定性を研究する場合、類似した材料を用いた他の型式のロックフィルダムの研究は参考になるであろう。田村等は大型振動台を用いて、玉石、碎石等を材料とした二次元模型の振動実験を行って、ロックフィルダムの動的破壊性状を検討した²⁾。その結果をまとめると次のようになる。

①材料の粒径が大きいほど、法面の滑り発生時の振動台の加速度は増加する。

②破壊加速度は法面勾配が緩くなるに従って増加するが、増加の割合は勾配が1:2.5を過ぎると減少する。

③法面崩壊はダムの上半分に集中し、勾配が緩くなるにつれて下部の法面の深い部分まで層状に滑る傾向が現れる。

④斜面に小段がある場合、押え盛土がある場合、滑りにくい。

⑤湛水している場合のほうが、湛水のない場合に比べ破壊加速度は小さい。

今回は、千葉実験所にある二次元振動台上に均一型ロックフィルダムと表面遮水壁型ロックフィルダムの三次元模型を築造し、湛水しない状態で、正弦波で加振して破壊させ、その破壊性状を次の3点から調査した。

(1)均一型ダムと表面遮水壁型ダムとの振動破壊性状の比較、検討

(2)断面形状がその破壊性状に及ぼす影響

*東京大学名誉教授

**東京大学生産技術研究所 第1部

研究速報

(3)鉛直方向の震動がその破壊性状に及ぼす影響
本報告では、(1)について報告する。

2 実験方法

2.1 模型制作と模型材料

模型はすべて高さ60cm, 堤長230cmで(図-2(a)), 実験した模型の形状, 加振方法は表-1に示している。ロック部の材料は空気乾燥した石灰岩の碎石7号(比重 $G_s=2.673$, 最大粒径 $D_{max}=13mm$)で, 粒度曲線は図-1に示すとおりである。模型を築造した砂箱はコンクリート製で地山勾配は両岸とも1:1.5である。模型の製作は厚さ10-12cmで撒き出し, 足で丁寧に踏み固めて行った。表面遮水壁の材料は, 小名浜砂, 鉄粉, 生石灰, 水を一定の割合で混合したモルタルで, これを上流斜面に厚さ0.4cm, 幅10cm(堤軸方向)で法面下部から堤頂まで帯状に塗布した。表面遮水壁の継目にはオイルを塗り接着を防いでいる。模型は完成後空气中で乾燥させ約60時間後実験を行い, 表面遮水壁の力学特性が模型ごとに変わらないようにしている。乾燥後の表面遮水壁密度は $2.1(t/m^3)$, ヤング率 $E=15000(kgf/cm^2)$, 引っ張り強度 $\sigma=1.1(kgf/cm^2)$ であった。また, 表面遮水壁とロック部との間のフィルターとして碎石6号(比重 $G_s=2.673$, 最大粒径 $D_{max}=5mm$)で, 約5-7mmを舗設した。

表-1 模型実験ケース

実験番号	天端幅(cm)	上流勾配	下流勾配	加振方式	位相(度)
126~130	8	1:1.4	1:1.4	水平	
206~207	8	1:1.4	1:1.4	水平, 鉛直	0
210~211	8	1:1.4	1:1.4	水平, 鉛直	180
218~219	15	1:1.4	1:1.4	水平	
302~303	8	1:1.4	1:1.8	水平	
403~404	8	1:1.4	1:1.4	水平, 鉛直	180
405*	8	1:1.4	1:1.4	水平	
502~504	8	1:1.4	1:1.4	水平	

* 均一型式ダム

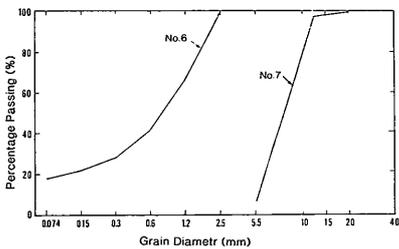


図-1 実験に用いた碎石材料の粒度曲線

2.2 測定計器の配置

計測器は図-2(a)に示すように模型内5点および法面近くの3点合計8点に水平および鉛直方向加速度計をおのおの配置した。さらに, 振動によって発生する表層滑りの範囲を把握するために着色した礫の柱を上下流面に対称におのおの3本, さらに上下流面法肩に1本づつ合計8本設置した。破壊実験終了後模型の表層部分を除き, この礫の柱の位置を確認し, 滑り面の位置を確定した。

表面遮水壁のひずみ分布を知るため, 抵抗線ひずみ(紙基盤)を模型中央断面の遮水壁表面(図-2(b))に貼付している。

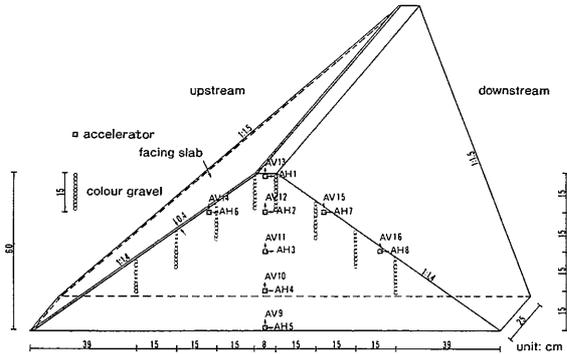


図-2(a) 三次元模型の寸法および計測器配置図

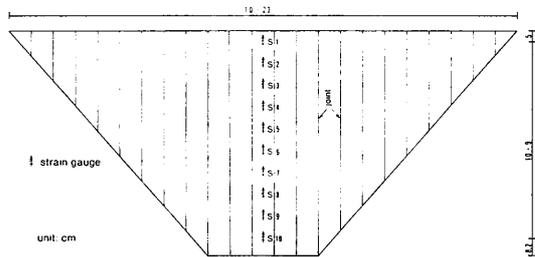


図-2(b) 表面遮水壁の継目分布およびひずみゲージ配置図

2.3 加振方法およびデータ処理

振動台は水平方向加速度(AH)と鉛直方向加速度(AV)と比を一定に保ちつつ, 一定速度(8.5gal/s.)で加速度を増加していくようパーソナルコンピュータで制御した。ただし, 図-3に示してあるように模型の破壊(滑り開始あるいは表面遮水壁にクラック発生)が発生すると, 一定の加速度で10回程度振動が継続した後, 急速に振動を止めるように設定されている。加振振動数は10Hzで正弦波形である。

3. 実験結果とその考察

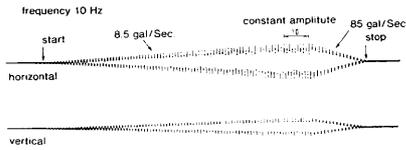


図-3 マイコン制御による入力波形

データ収録システムについては、動ひずみアンプを介して収録装置（東京測振製，SAMTAC-64）で、全記録の信号を同時にサンプリング（200Hz）しながら、磁気テープに記録した。これと同時に模型の破壊過程をビデオカメラで記録した。

3.1 破壊過程

均一型ダム模型および表面遮水壁型ダム模型を水平堤軸直交方向に加振し、その破壊性状を比較した。加振振動数10Hzは、模型の基本振動数が50Hz以上と推定されるので、これに比べてかなり低い。

振幅を増して行くと、均一型模型では堤長の中央部、堤高の上部約1/4の部分において上下流法面で表面の礫粒子が動きはじめ、加速度の増加とともに数個づつ回転しながら滑落するようになり、さらに加速度が増すと表面が雪崩状に崩落する状態（ここでは表層滑り開始と言う）に達する。加速度の増加に従ってこの状態の領域は両岸方向、下方に拡大する。

表面遮水壁では、表面の礫粒子が動きはじめてから、

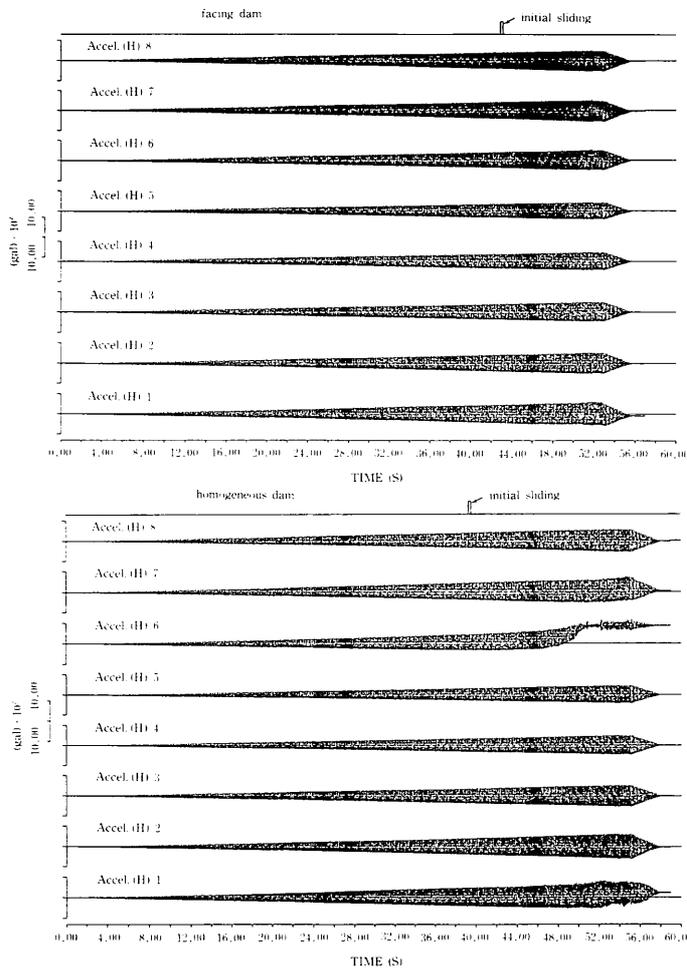
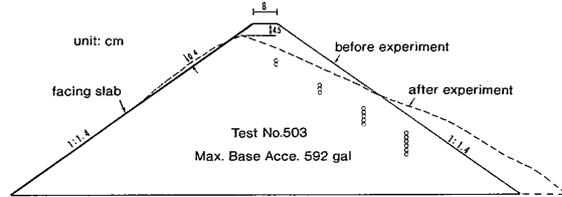
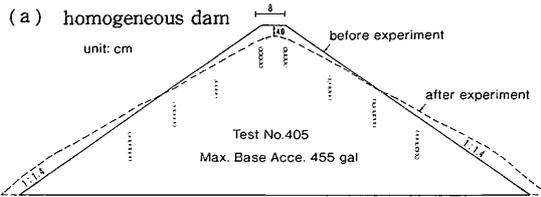


図-4 堤体内各位置の加速度波形

研究速報



(a) homogeneous dam

(b) facing dam

図-5 均一型ダムと表面遮水壁型ダムの破壊形状の比較

表層滑り開始までの過程は均一型の場合と類似しているが、大きく異なる点は、このような状況が下流面だけに発生することであり、下流法面上部が表層滑り開始の時点では上流の遮水壁は変状が視認できず、安定していると思われることである。

図-4は堤体内各測点の加速度波形であり、図-5は表面滑り開始後振幅を一定とし約1秒間加振した後、振動台を停止させたときの破壊状況である。図-5(b)に見られるように表面遮水壁では上流面での変状は起こっていないかあるいは微小なものであることがわかる。

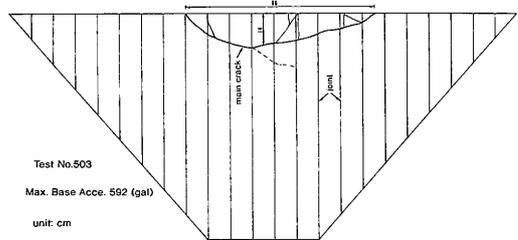
図-5(b)の模型を再加振し、遮水壁の破壊が起こるまで加速度を増加させた。前述のような破壊状態になった後、さらに加速度を増加すると、下流法面の崩壊が進行して、堤頂部は崩落により低くなり、遮水壁の上の部分が下流側の支持を失うに至る。振動台の加速度が560galになり、堤高が4-5cm位低下すると、表面遮水壁の上部には折れるように水平に亀裂が発生し、上部は下流側に傾く。亀裂は左右両岸方向へ進行するとともに遮水壁の縦目地も上部で一部分開口する。この時点で加速度を一定とし、1秒間加振した後急激に加速度を下げ停止させた。図-6(a)は試験終了後の断面であり、図-6(b)は遮水壁の亀裂分布である。

断面表面の位置は10cm間隔で測定し、その後下流表面のフィルを表面から順に丁寧に取除いて行き、着色した礫柱を見だし、柱頭の位置を確認している。この破壊段階では、法面上部で遮水壁が上流側にはらみだしていることがわかる。このことは、下流面とは様子が異なるが上流法面においても変形が発生していることを示す。

3.2 堤体加速度分布

図-4は、図-5(a),(b)の状態に達するまでの加速度波形である。いずれの模型でも滑り開始が発生するま

(a) 中央断面破壊形状



(b) 遮水型亀裂分布

図-6 表面遮水壁型ダムの最終破壊形状

では各測点の加速度の増加が一次直線で示されることがわかる。また、遮水壁を備えた模型では前述のように最大加速度429galを加えているが、堤頂のAcc[H]・1,下流法面上のAcc[H]・7と最終部分を除けば、加速度波形は整合的である。遮水壁のない模型では、43秒すなわち365gal前後より、Acc[H]・6に加速度の軸が動いて、加速度計が傾斜したと見られる変化が生じ、また51秒すなわち

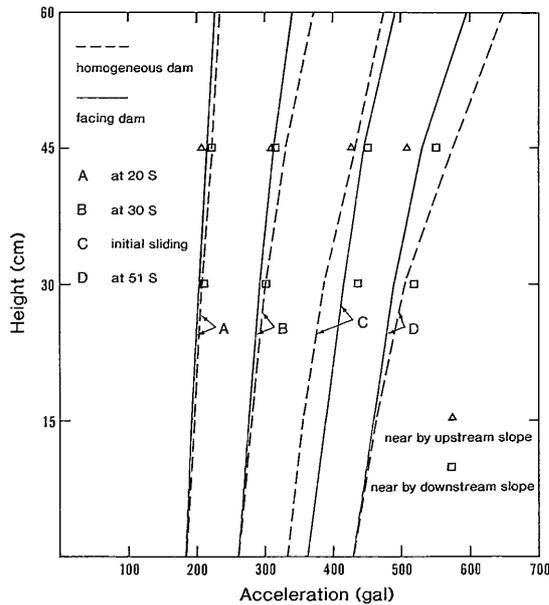


図-7 均一型ダムと表面遮水壁型ダムの加速度分布比較

研究速報

430gal前後から堤頂のAcc[H]・1, 法面上のAcc[H]・7に波形の変形と, 加速度計が傾斜したのが原因と推測される波形の乱れが見られる外は各測点の波形は整っている。170gal(A), 255gal(B), 滑り開始の時点(C)すなわち, 均一型模型では336gal, 遮水壁型模型では366gal, および429galの時の各測点における応答加速度の高さ方向の分布を示したものが図-7である。この図で, 入力加速度の増加と共に堤体上部に行くに従って応答加速度が増すこと, 一般にその倍率は均一型模型の方が大きいこと, 滑りが発生するときの堤頂部の加速度は模型によらず略々一定であること注意を要する。換言すれば, 遮水壁の存在により堤頂部分の振幅が減少することを意味し, これは, 耐震性の向上の可能性をあらわす。

4. ま と め

碎石で作成した同じ形状の均一型模型と表面遮水壁型模型の振動破壊実験結果を比較して, 次のことがわかった。

(1) 堤体の崩壊は上部の法面の表面の滑落である。均一型模型では上, 下流法面の上部で同時に発生している。遮水壁型模型では, 初期の段階では下流法面のみに発生し, 上流側は遮水壁があり, 安定している。

(2) 入力振動に対する堤体の応答特に堤頂部の応答は, 遮水壁型模型が均一型模型に較べて増幅度は小さい。これにより堤頂部の安定性を増している。

(3) 遮水壁は上流法面の安定性に多きな影響を与える。

(4) 特に堤体上部について遮水壁の力学特性と堤体との関係を究明する必要がある。

あ と が き

本実験では, 片桐俊彦, 鈴木琢弥両技官から協力を受け, 日本大学の学生伴敬秀, 山田進一君の両君が参加しており, 東京大学大学院生前原充宏, 三神厚両君からも協力を受けている。第一部岡田研究室, 第二部藤田研究室, (株)東京測器には計測器の便をうけた。ここに記して謝意を表します。(1992年3月5日受理)

参 考 文 献

- 1) Concrete Face Rockfill dams-Design, Construction and Performance, ed. by Cooke, J.B. and Sherad, J.L., Proceedings of a Symposium at the ASCE Convention in Detroit, Michigan, Oct. 21, 1985
- 2) 田村重四郎, 岡本舜三, ほか, ロックフィルダム模型の振動破壊実験—貯水のない場合—, 土と基礎, July 1972