

I-14 アースダムの模型振動実験について

水資源開発公団

宇提文雄

〃 正頁

福岡敏夫

〃

〃 瀬古育二

1. まえがき フィルダムの地震時の安定性については、従来静的設計震度にもとづく円形すべり法によって検討されてきたが、最近では堤体の動的挙動を設計に反映するため、いろいろな角度からの実験的ならびに理論的研究が行われている。ここでは、特に地震時の挙動が懸念される均質砂質土を用いた高さ46.5mの傾斜コア型アースダムの動的特性を明らかにし、その耐震性を検討するため、小型振動台を用いて実施中の3次元弾性実験ならびに2次元動的破壊実験について報告する。

2. 3次元弾性実験

2-1. 模型および実験方法 堤体の弾性挙動として、まず固有振動周期と振動形状を知る必要があるが、兩岸の谷の形状によってその影響は無視できない⁽¹⁾。このため、現場の掘削図にもとづいて3次元模型を作成したが、使用した振動台(載荷積1.0²m²×1.5m)の規模から縮尺を1/500とし、地山は石膏で固定した。堤体使用する模型材料は、弾性係数を容易に加減でき安定性の高いものが望ましい。このような3次元模型では、すでにゼラチンを用いて成功した山王海ダム⁽²⁾の例もあるが、筆者等が実施した範囲ではゼラチンは強度が弱いという気温に左右されやすく、乾燥あるいは腐蝕のために弾性係数の安定性に不満が残った。このため各種の材料を調査した結果、安価でかつ作成が極めて容易なものとして高分子系溶液のアクリルアミドを採用することとし、これに珪藻土を混入することによって弾性係数の調整を行うほか、引張りに弱い欠点を補うことができた。図-1に材料強度を示すが、今回の実験では珪藻土の混入量を25%とし、この時の弾性係数は $E = 620 \text{ g/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.46$ 、変位 $\gamma = 1.16$ であった。この材料の固化時間は極めて短く、流し込み後5~10分間で乳白色の寒天状となる。脱型後天端仕上りとし、写真撮影用の標識を付して8mm撮影を行うとともに、振動形解析のため非接触式変位計(Gap-Sensor)で加振方向の水平変位測定を行った。さらに、模型表面の変位の方向性をも含めた3次元模型による振動形状を明らかにするため、堤体全面に木炭粉をふりかけ直径0.6mm程度の虫ピンを標的として格子状に埋設した後、真上から光弾性用大型カメラで全標的の平面挙動と各固有振動時について撮影した。加振方法は、上下流方向ならびにダム軸方向について夫々片振幅0.1mmの正弦波を入れた。なお、実物の固有振動周期は、ダムの固有振動周期が $L\sqrt{P/G}$ に比例することから次式によって求めることができる⁽³⁾。

$$T_p/T_m = L_p/L_m \cdot \sqrt{\rho_p G_m / \rho_m G_p} \quad (1)$$

但し p, m : それぞれ実物・模型とあらわす

T : 固有振動周期

L : 堤高

ρ, G : 堤体材料の密度・せん断弾性係数

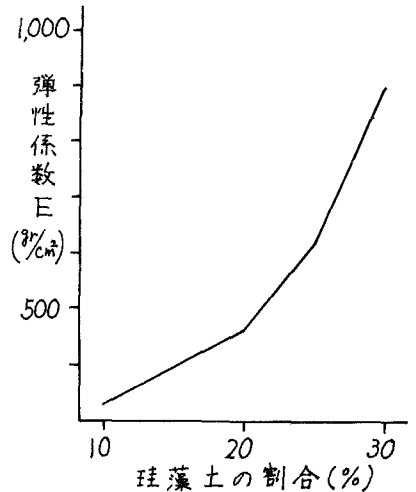


図-1

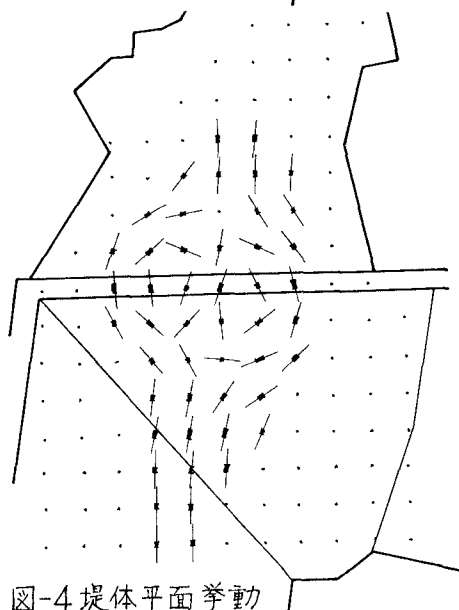
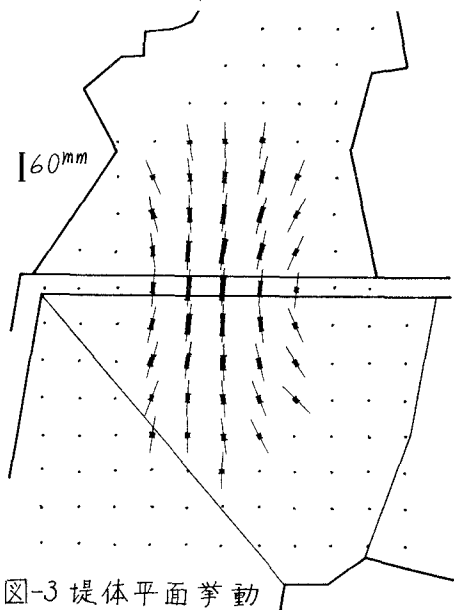
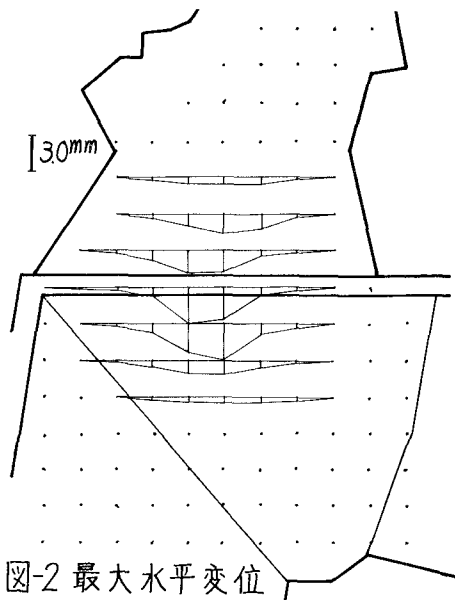
模型材料(アクリルアミド10%)の強度

2-2. 実験結果 模型の1次ならびに2次固有振動数は、上下流方向で夫々19, 29 Hz, ダム軸方向で21.5, 28 Hzであった。(1)式より T_p を計算すれば、夫々1.19, 0.78, 1.05 および0.81秒程度と推定

される。振動形については、ギャップセンサーで検出した変位記録のうち、上下流方向加振時の最大水平変位を各測点毎に結んだものが図-2である。これによれば、最大水平変位はダム軸よりやや上流側に生じており、振動台変位の約30倍となっている。しかし、このような方向の水平変位だけでは、2次振動以上の複雑な挙動は解明できない。このため、模型真上から各固有振動時の全体撮影を行い、キャビネ版の原盤から模型の1/2まで引伸し、ミクロメーターで各標的の全振幅を読みとって変位方向毎に書き出したものが図-3、4、5、6である。これによれば、振動の節なうびに方向が鮮明に判読できるため、2次振動以上の渦巻状の振動形状も明らかとなり、位相の逆転する節を中心に加振方向とほぼ直角に振動している部分のあることがわかる。同時に、これらの標的の動きは、堤体表面の各部にかなり引張力あるいはせん断力が生じていることも示している。また、全体的な振動の方向は必ずしも加振方向ではなく相当のズレが認められ、谷の影響が顕著にあらわれていると思われる。なお、図-3をみれば最大水平変位（全振幅5.2mm）はやはりダム軸中央部に生じており、図-2を測定したギャップセンサーの非線形性を含め、測定技術の検討が必要と思われる。なお、ストロボを振動周期に近い周期で発光させると、任意に振動速度をおとすことができるが、これによれば測点によっては若干のループを描いている。しかし、全体撮影の結果ではこれを検出できなかった。また、試験的に上流側に灌水したところ、30Hz以上の高次振動域でグラネット部から水がはね上り、水平方向加振にかかわらず相当の上下動のあることが推定された。

3. 2次元動的破壊実験

3-1. 模型および実験方法 動的破壊実験は、破壊の機構と強度を明らかにすることを目的としているので、模型の大きさが実物に近いほど良いが、今回は実験装置の大きさから2次元模型で精々1/200の縮尺となり、相似則



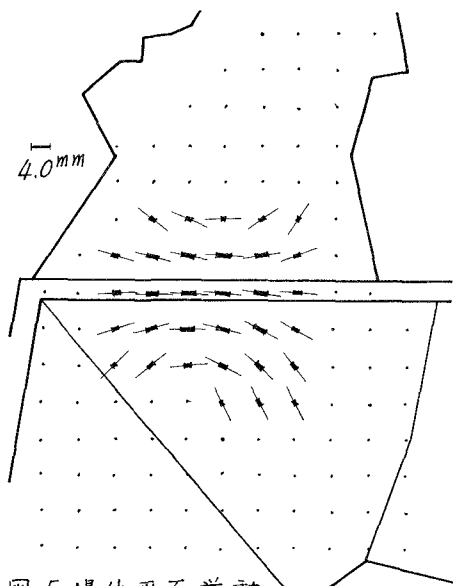


図-5 堤体平面挙動
(ダム軸方向 21.5 Hz・1次)

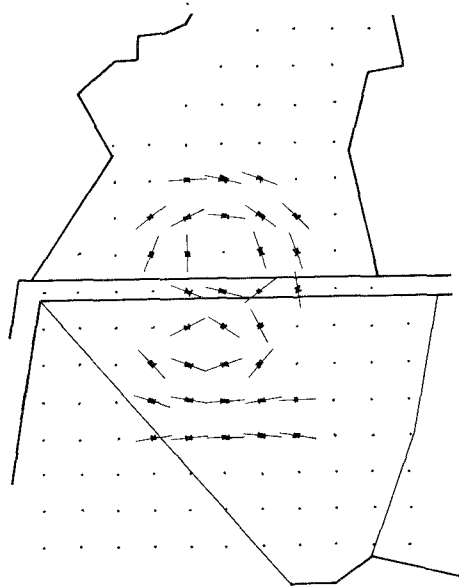


図-6 堤体平面挙動
(ダム軸方向 28 Hz・2次)

を満足させることは非常に難しい。動的破壊実験においては、主外力であり堤体の重量と地震慣性力、主抵抗力であり堤体材料の摩擦力と粘着力および堤体破壊に深い関係をもつ堤体変位について相似関係が成立しなければならぬ。このためには、模型に使用する材料強度が次式を満足することが必要である。

$$C_m/C_p = (\gamma_m/\gamma_p) \cdot \lambda \quad \text{但し } C: \text{粘着力 } \gamma: \text{密度 } \lambda: \text{縮尺}(L_m/L_p) \quad (2)$$

$$\tan \varphi_m = \tan \varphi_p \quad \text{但し } \varphi: \text{内部摩擦角} \quad (3)$$

現地の砂質材料を使用する場合、摩擦角は模型と実物で同じであるから問題となるのは粘着力 C_m である。相似則からは、 $C_m = \lambda \cdot C_p$ とするように模型の粘着力をおとせばよいが、そのためには含水比を変えて乾燥砂に近い状態にする必要がある。これで相似則も満足させたとしても、乾燥砂と実物の湿润砂では破壊機構が異なってくるものと思われる。しかしながら他に適当な材料が見あたらないため、結局、現地の材料を用いて破壊に対する含水比の影響をみることにした。現地材料は、成田層群の砂質土とコア材としての関東ロームであり、表-1に土質試験結果も、図-7に砂質土の粒度加積曲線を示す。実験方法は、まず均一砂模型によって破壊の形状を明らかにすることとし、2.0m x 1.0m の水槽の中に二次元模型を作成した。砂は含水比の違いによって乾燥砂、湿润砂、飽和砂の三種とし、模型形状は上下流を対称として法面勾配を 1:1.0 ~ 3.5 の範囲で変化させた。実験は、振動数一定で破壊が生じるまで振幅を増加し、ダム天端に設けた加速度計で記録した。その他、破壊の様子を 8mm カメラで撮影し、破壊の形状をスケッチした。

表-1 土質試験結果

材料名	突固め回数	比重 G_s	含水比 $W(\%)$	間隙比 e	湿润密度 ρ_w (g/cm^3)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	飽和度 S ($\%$)	三軸圧縮 ($\sigma_1 - \sigma_3$)		直接せん断 ($C - \mu$)		透水係数 K (cm/sec)	備考
								$C_{\sigma_1 - \sigma_3}$ (kg/cm^2)	$\phi_{\sigma_1 - \sigma_3}$ ($^\circ$)	$C_{\sigma_1 - \sigma_3}$ (kg/cm^2)	$\phi_{\sigma_1 - \sigma_3}$ ($^\circ$)		
関東ローム	20	2.86	12.0	3.783	1.316	0.598	90.7	6.1	15.3	5.0	28.3	1.2×10^{-7}	コアゾーン
成田層砂	25	—	14.0	0.729	1.760	1.544	51.3	0.49	33.20	0.41	37.10	1.2×10^{-3}	ランダムゾーン

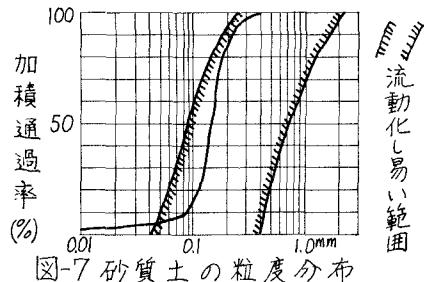


図-7 砂質土の粒度分布

3-2. 実験結果 乾燥砂を用いた法面勾配の異なる4ケースについて破壊加速度を求め、法面勾配との関係を示したのが図-8である。この場合の「破壊」は、模型表面の砂が移動しはじめた状態をさす。4ケースとも破壊の形態は同じであり、まず天端法面の崩落から始まり、漸次斜面上部から中央部に向って砂の崩落が進行する。破壊時の加速度は振動数との相関性が薄く、図に示すように法面勾配に左右される。とくに、法面勾配が2割5分までは、法面勾配に比例して破壊加速度が増大することがわかる。この結果は、大型振動台での田村博士等の研究⁽⁴⁾とよく類似している。湿潤砂の場合は、乾燥砂の破壊形態と全く異なる。図-9に法面勾配が1:3.5の同一断面形状において、砂の含水状況によって破壊の形とそのときの加速度がどのように変化するかを示した。まず破壊の形状をみると、乾燥砂が崩落による破壊を示すのに対し、湿潤砂の場合はダム軸に平行でかつ斜面に垂直なクラックが発生し、さらに加振を続けると楔形の沈下をもたげて破壊する。破壊時の加速度は、湿潤砂の場合含水比の低いときが約700~900 gal、含水比の高いときが約500~700 galで含水比が高くなるほど砂の強度が低下していることがわかる。また、湿潤砂の法面勾配と破壊時加速度との関連は乾燥砂ほどの顕著な差がなく、この程度の含水比の砂模型では法面勾配よりも材料強度の影響が大きいと思われる。さらに含水比を上げ模型作成後表面に水がしみ出る程度の砂とした場合、破壊形状は再び変化する。便宜上この砂を飽和砂と呼称したが、含水比30%、飽和度75%前後である。破壊形状は、図-10に示すとおり平面的に卵形の溝が次々に形成され、斜線で示した円盤状の土塊が浮上した感じで振動する。これは、流動化による破壊と思われるが、破壊時加速度は約100 galと乾燥砂や湿潤砂にくらべて著しく低下している。

4. あとがき 小型模型では、媒体の応答を乱さないような測定技術が非常に難しいが、分解能の良い大型カメラを利用することによって、3次元模型の複雑な挙動をとらえることが出来た。今後はさらに、ストロボ等の併用によって位相差まで写真真読したいと考えている。また、ランダムゾーンに用いる砂質土の動的特性は、さらに究明を要するほか、コア材を含む複合断面についても引き続き破壊形状を明らかにしていく必要がある。

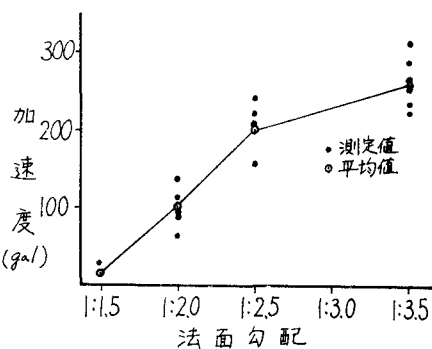


図-8 法面勾配と破壊加速度

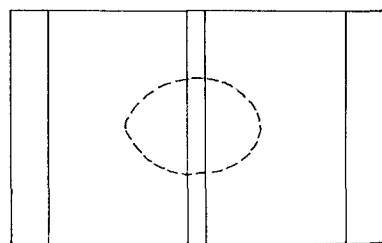
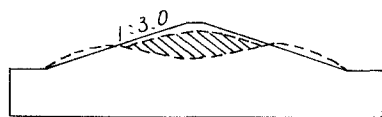


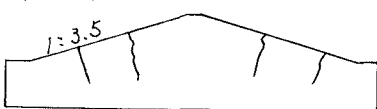
図-10 飽和砂による破壊形状 (5Hz)

(1) 乾燥砂



$W=1.45\%$
 $\gamma_d=1.152 \text{ g/cm}^3$
 $\alpha=263 \text{ gal}$

(2) 湿潤砂



$W=22.7\%$
 $\gamma_d=1.265 \text{ g/cm}^3$
 $\alpha=690 \text{ gal}$

(3) 湿潤砂



$W=27.6\%$
 $\gamma_d=1.290 \text{ g/cm}^3$
 $\alpha=690 \text{ gal}$

図-9 砂の含水状態と破壊形状 (5Hz)

- 参考文献 (1) 浜田政則他 三次元有限要素法によるフィルダムの動的解析 斗27回土学会年次講演概要
 (2) 岡本舜三他 地震時におけるアースダムの挙動 東大生研報告16巻4号 (3) 岡本舜三 耐震工学
 (4) 田村重四郎他 ロックフィルダムの大型模型の振動破壊実験 斗27回土学会年次講演概要