

フィルダムモデルの振動破壊性状に及ぼす粘着力の影響について

On Effects of Cohesion on Vibration Failure Behavior of Models of Fill Dam

韓 國 城*・田 村 重四郎*・加 藤 勝 行*

Guo cheng HAN, Choshiro TAMURA and Katsuyuki KATO

1. 緒 言

フィルダムの耐震性を研究する場合、実物のダムの地震観測、模型の振動実験および数値解析などの方法を用いて研究を進めている。模型の振動実験の場合、フィルダムは土構造物であるため、物理モデルを用いて動的実験を実施することは、相似律に難点がある。このため、研究の目的に応じて、適切な解析モデルを用いて検討するのがよいであろう。弾性領域とみなされる範囲については、寒天、ゼラチン、シリコンゴム等を模型材料として使用され、今まで、いくつかの実験が実施されている。動的破壊実験については、砂・シルト等で模型を築造し、振動による破壊状況の調査が行われている。著者らはこれらについて実験的研究を進めてきたが、ここでは、フィルダムの破壊機構を究明するため、模型を砂で築造し加振振動数、砂の内部摩擦角、見かけの粘着力等に留意しながら振動破壊実験を行った。その結果、破壊時の入力加速度と破壊状況は、模型の固有振動数に対する加振振動数と関係があり、また、含水比によって強い影響を受けることが判明した。それについて報告する。

2. 実験装置と実験方法

模型試験は二種類の二次元模型を用いて行った。1つの模型は高さ 35 cm、上下流面の勾配 1:2 の三角形の模型（以下小型模型と呼ぶ）で幅 30 cm の砂箱の中に築造した。砂箱の両面はガラス板で、底面は厚い木板である。模型の築造方法はリフト 5 cm で積み上げ、木塊を 10 cm の高さより落下させることにより軽くつき固めた場合およびまったく自然に積み上げた場合の 2 種類である。つき固めた場合の堤体の密度は $1.41 \sim 1.50 \text{ g/cm}^3$ であり、含水比は 0.8~1.7% となっている。他の模型は高さ 70 cm、堤頂幅 14 cm、上下流面勾配 1:2 の模型（以下中型模型という）で、幅 90 cm の砂箱中に築造された。砂箱の一方の側面はガラス面であり、底面は厚い木板である。模型の築造に当たっては、リフト 10 cm で積み上

げたのち厚み 48 mm の板を 20 cm の高さより落下させて締め固めたが、落下回数は模型によって異なり、1回または 3 回である。堤体の密度は $1.32 \text{ g/cm}^3 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$ 程度であり、含水比は 1.53%~2.4% である。模型材料はいずれも小名浜砂で、有効粒径 $D_{10} = 0.14 \text{ mm}$ 、均等係数 $\bar{u}_d = 1.32$ 、比重 2.71 である。

小型模型では、底板の加速度を記録し、破壊状態を調べるため、模型内部に高さ 5 cm ごとに着色砂を入れてある。また、特定の模型については破壊状況を映画で記録した。中型模型では、堤体内部の数個所に加速度計を埋設し、また、この種類の模型については、破壊過程における模型表面の変状をビデオで記録するとともに、堤体内部には、築造に当たって、模型上下流方向の中心部に高さ 10 cm ごとに幅 5 cm の軟かい紙片を水平に埋め込み、実験後、その変位、変状を調べ、堤体内部における沈下およびすべり動き等を調査した。

3. 実験結果

3.1 小型模型

加振振動数は 2~5 Hz で、模型の固有振動数よりかなり低い。実験結果を概括すれば、含水比が小さい場合（1%以下）では、加振力の増加とともに表層の砂がばらばら滑落して模型がくずれれるが、含水比が 1.3% 程度になると、斜面の表層が全体的に滑動し崩落する。例えば、模型が締め固められておらず、加振振動数が 2 Hz の場合、含水比が 0.97% では、加振力が 554 gal に達すると、図-2 の a のようにくずれれるが、含水比が 1.27% では、加振力が 400~450 gal に達すると、堤頂が 15 mm の沈下が生じ、707 gal に達すると、図-2 の b のようにすべりが起きる。また、破壊時の加速度も含水比によって明確な差があるのが認められる。図-3 は加振振動数が 2~5 Hz

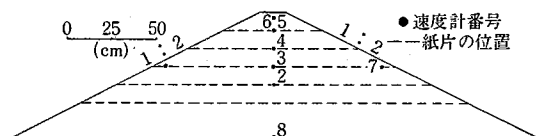


図-1 測定装置の配置

* 東京大学生産技術研究所 第 1 部

研 究 速 報

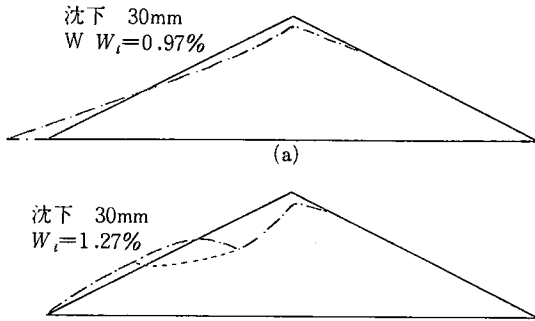


図-2 小型模型の破壊状態

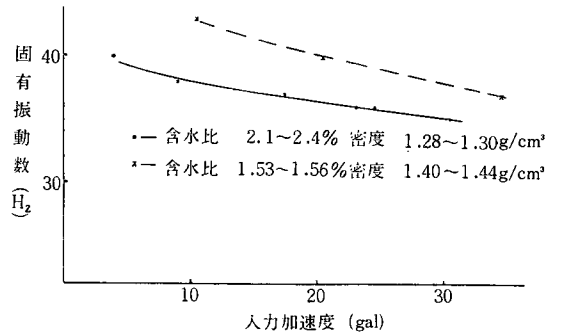


図-4 模型固有振動数と入力加速度の関係

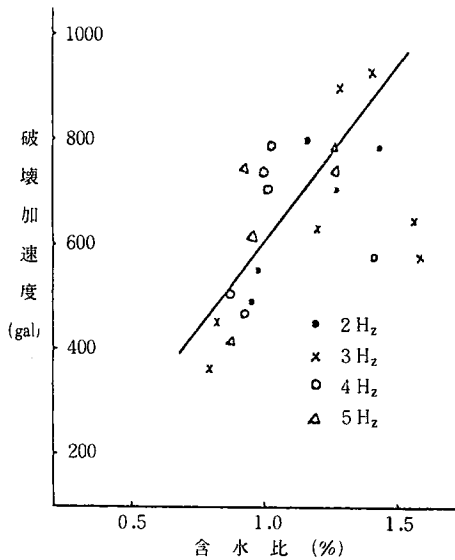


図-3 含水比と破壊加速度の関係

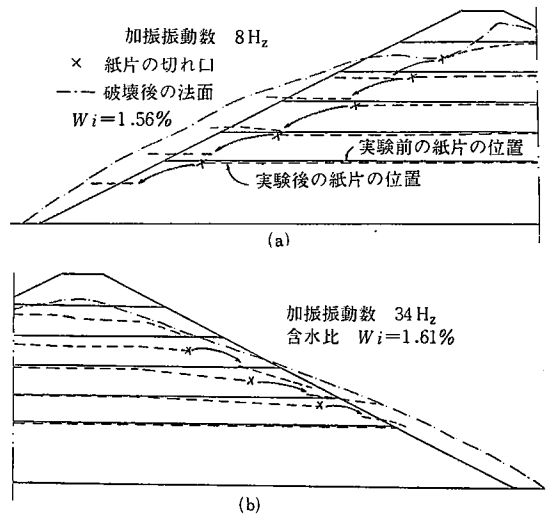


図-5 中型模型の破壊状態 (含水比 1.56% と 1.61%)



写真-1 模型破壊後紙片の変位と移動

の場合、破壊時の加速度と含水比の関係を示したのである。そのうち、含水比が 1.4%~1.6%、加速度が 550~650

gal の範囲にある 3 つのデータを除いて、最小自乗法で求めたのが実線である。データのばらつきはあるが、破

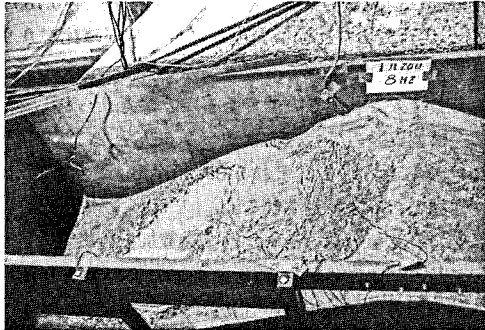


写真-2 模型斜面のすべり状態

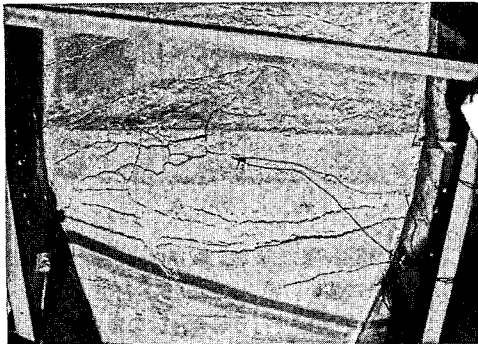


写真-3 含水比2.4%時の模型堤頂近辺のきれつ状態

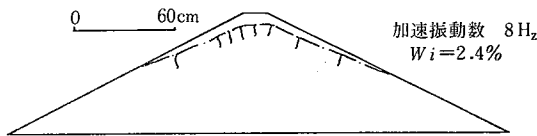


図-6 中型模型の破壊状態 (含水比2.4%)

壊加速度が含水比に強く依存する傾向は明らかに示している。

3.2 中型模型

実験は加振振動数を、12, 18, 26, 34 Hz に固定して加振力を徐々に増加しながら実験を行った。模型の固有振動数は加振力のレベルによって低下するが、それらの関係は図-4 に示している。

A. 破壊状況：図-5 は実験後、紙片の変位と変状から調べた破壊状態の結果を示した例である (写真-1 は実験後、紙片の変位と移動状況を撮影したので、図-5 の a に対応する)。実験結果によると、加振振動数が、模型の固有振動数よりかなり小さい場合とそれに近い場合とでは、その破壊形状は異なる。例えば、加振振動数が 8 Hz の場合 (以下低振動数加振という)、加速度レベルの増加によって、最初は斜面に縦きれつ (模型軸方向) と横き

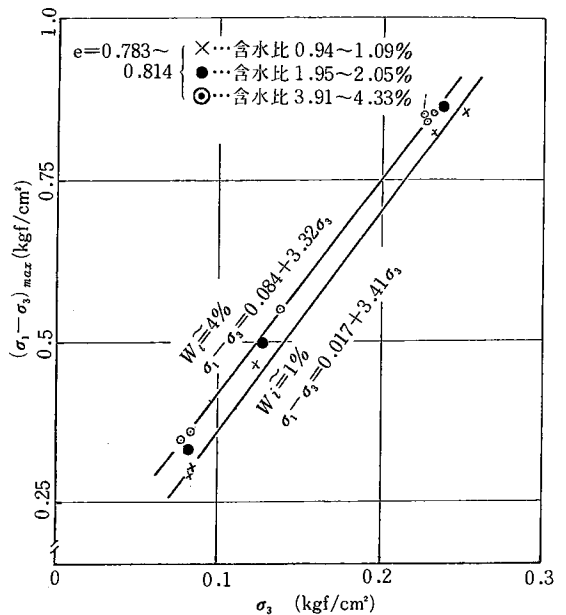


図-7 不飽和砂の強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ と拘束圧 σ_3 の関係

れつ (上下流方向) が生じ、その後、堤頂にもきれつが発生する。それと同時に堤頂近傍の表面の砂がばらばら落ち始め、堤頂の沈下も始まる。さらに高い加速度レベルに達すると、急に斜面全体がすべり出す。写真-2 はすべりが生じた直後、振動台を止め、撮影したもので、斜面の表層が全体としてすべり出したもようを現している (図-5 の a に対応する)。そのとき、斜面に埋めた加速度計の波形も急に变化するのが認められる。

模型の固有振動数に近い振動数で加振した際 (34 Hz) は、加速度レベルの増加とともに、まず堤頂が沈下する。つづいて、堤頂にきれつが入り、堤頂近辺の斜面にもきれつが生じる。加速度がなお増加すると、堤頂と堤頂近傍の砂がすべり出し、ついになだれ状態になる。表面から見れば、8 Hz の場合のような斜面の全体的なすべり現象はない。また、斜面に埋設した加速度計の波形も急な変化はなかった。しかしながら、模型内部に設置した紙片の移動から表層内部のすべりも生じていることが確かめられた。

また、図-5 に示したように、堤体の沈下はほとんど堤頂近辺で発生しており、堤頂から模型の高さの半分程度の所まで、大部分の沈下が終わっているようである。

B. 含水比の影響：小型実験にも述べたように、中型模型実験においても、砂の含水比が模型に与える影響は大きいことが分かった。例えば、含水比が 2.4% では、低振動数加振の場合、加速度が 560 gal に達すると、堤頂に 8 cm の沈下が起こり、堤頂と斜面に大きな縦きれつが

研究速報

入ったが、すべりは生じなかった(図-6と写真-3)。ところが、前に述べたように含水比が1.56%では、456 galの入力加速度ですべり出した。このことは、含水比の増加によって模型の強度が増して、せん断抵抗力が増加したものと考えられる。

4. 含水比による砂の強度変化

小型模型と中型模型実験結果によると、いずれにしても含水比の影響が大きいのが判明され、それを解析するため、低拘束圧下における不飽和砂の三軸圧縮実験を行い、含水比による見かけの粘着力と内部摩擦角等を調べた。試験装置は東京大学生産技術研究所龍岡研究室で開発された二重セルを持つ三軸圧縮試験機を用いた。実験に使用された砂は、模型に使われた小名浜砂で、拘束圧は0.07 kg/cm²から0.3 kg/cm²の範囲で行った。実験結果によると、応力比の最大値 $(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$ (σ_1 は軸圧、 σ_3 は東圧)は、同じ拘束圧の場合、含水比の増加に伴って増大し、拘束圧が低いほど含水比による変化の割合が大きく、ゆるい砂ほど小さい値をとる等のことがわかった(詳細な結果については文献3を参照)。

実験結果の例として、最大主応力差と拘束圧の関係を示したのが図-7である。データの点はいずれも間隙比 $e=0.783-0.814$ の範囲内における実測値で、実線は含水比 $W=1\%$ と4%のデータに対して最小自乗法で求めた直線である。これらの直線から見かけの粘着力 C と内部摩擦角 ϕ を求めると、含水比 $W \cong 1\%$ と4%の場合、 $C=0.004 \text{ kg/cm}^2$ と 0.02 kg/cm^2 で、 $\phi=39.1^\circ$ と 38.6° になる。見かけの粘着力は含水比により明確に増加するが、内部摩擦角はあまり変わらないようである。また、砂を密に締め固めることによって見かけの粘着力が増える傾向もあるようである。

概括すれば、含水比の増加によるせん断強度の増加は見かけの粘着力の変化として表され、低い拘束圧になるほど、含水比の変化による $(\sigma_1-\sigma_3)_{\max}/\sigma_3$ または $(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$ の変化が大きくなるのである。このことは、砂の構造物の表面ほど、せん断強度が含水比の影響を強く受けることを示している。

5. 実験結果の考察

前に述べた見かけの粘着力の値は間隙比 $e=0.783-0.814$ の場合であり、模型実験の場合は、間隙比が0.93前後である。したがって模型実験の場合、砂の粘着力は三軸実験結果より小さい値であることが考えられる。ゆえに、模型実験の場合、含水比が1.56%と2.4%では、見かけの粘着力がそれぞれ 0.004 kg/cm^2 と 0.008 kg/cm^2 程度であると推定される。

以上のことを考慮すると、低振動数加振の場合、含水比1.56%のとき、456 galの加速度で斜面がすべり出したが、2.4%の含水比では加速度が560 galに達してもきれつだけ生じ、また、小型模型でも含水比の増加によって、模型の破壊加速度が増加するのは、主に含水比の増加に従って見かけの粘着力が増して、せん断強度が増大したものと考えられる。また、小型模型実験結果で述べた含水比の相違によって、法面表層の破壊状態が異なるのも、含水比によるせん断強度の変化によるものと思われる。

6. あとがき

砂で築造した模型の動的破壊実験では、含水比が破壊状態、破壊加速度に強い影響を持つことが判明したので、砂を用いて動的破壊実験を行う場合、砂の含水比に留意しながら、低拘束圧下における強度特性を厳密に調べる必要があると考えられる。模型の動的数値解析も行っているが、その結果については、別の機会に報告する予定である。

おわりに、三軸圧縮実験においては、第5部の龍岡文夫助教授、佐藤剛司技官にいろいろお世話になり、小型模型実験は電源開発(株)福原明氏のご協力を受けたものであり、実験に当たっては第1部の酒井清武技官の参加があった。ここに名を記して謝意を表します。

(1982年7月5日受理)

参考文献

- 1) 田村重四郎、韓國城、加藤勝行：“フィルダム模型の振動破壊実験” 土木学会第37回年次学術講演会 1982
- 2) 佐藤剛司、龍岡文夫、大河内保彦、山田眞一：“土質実験法の合理化について” 第17回土質工学研究発表会 1982
- 3) 韓國城、佐藤剛司、龍岡文夫、田村重四郎：“低拘束圧下における不飽和砂の強度変形特性” 生産研究 1982.9