

(116) 水平・鉛直の2方向加振した場合のフィルダム模型の振動破壊について

東京大学生産技術研究所 正会員 田村重四郎
東京大学生産技術研究所 正会員 ○ 加藤勝行
東京大学生産技術研究所 学生会員 森田道比呂

1. 緒言

フィルダムの地震時の安定については、複雑をさけるため、鉛直方向の地震力が作用する場合、これと水平方向の地震力と合成し換算した水平力、所謂合成震度の考えで標準断面について検討が行われているのが普通である。入力として実地震動波形を使用して検討する場合、多くの組合せが考えられ、安定を評価することは容易ではない。地震力が鉛直方向からも作用した場合の、ダムの安定に及ぼす地震力をあらかじめ簡単な新しい基準があれば便利である。

一方震央付近では、大きな鉛直方向地震動加速度が発生することが、最近の地震観測でしばしば報告されている。単に最大加速度によって安定を検討することは適当でないことはよく知られているが、鉛直加速度が安定の要素である場合、これをどの様に評価するかは重要である。

この2つの観点から、水平及び鉛直方向の2方向から模型ダムを加振して破壊実験を行った。その結果2方向加振の場合の斜面安定に対して、一次元的にみる耐震安定評価軸と呼ぶことの出来る新しい座標が存在し得ること及び、破壊に及ぼす鉛直方向加速度の影響は水平方向加速度のそれに比して小さいことなどが分かったので報告する。

2. 模型

模型は3次元模型で、高さ50cm、上下流の勾配は多くの模型で1:2を採用している。鉛直方向加速度が作用した場合、堤体に圧密が発生し、側方(ダム軸方向)の境界における拘束を増すと考えられるため、実際のダムの場合を参考にして兩岸1:1.5の勾配の地山をコンクリートで作製し、その上に模型を築造した。又、地山との間で支らない様模型は底面に固定されている。ダム模型材料は小呂宋砂(比重2.71, $D_{50}=0.140$, $D_{30}=0.176$, $U_c=1.320$)である。法面の安定に対し模型材料の粘着力が極めて大きな影響を与えるため、模型築造に当り含水比の管理には特に注意した。又一定の密度を得る様留意した。本実験では含水比は1.30~1.91%であり、密度は1.37~1.48 gr/cm^3 である。(図-1, 2)

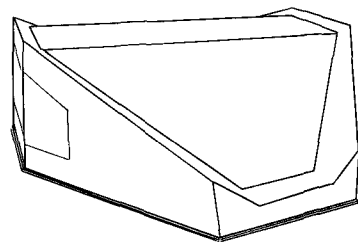
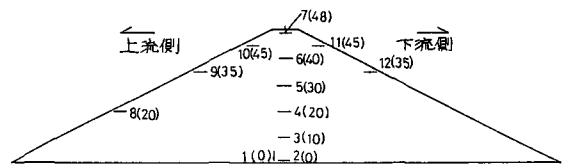


図-1



カッコ内は高さ (cm)

図-2

3. 実験及び測定

水平方向と鉛直方向とは同じ振動数の正弦波形で加振し、振動数を一定として、水平方向加速度と鉛直方向加速度の比を一定に保ちながら加速度を増加させて模型を破壊させた。振動数は主として8Hzである。

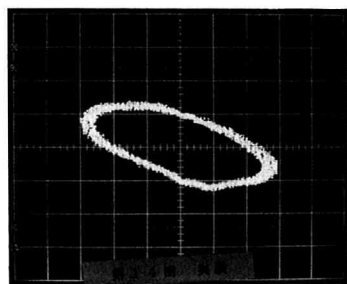
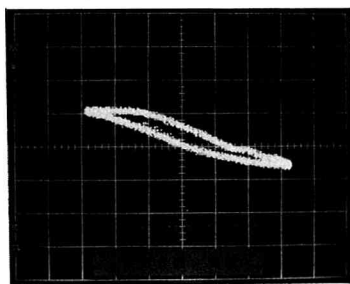
2方向の加振波形の關係は次の様である。

$$(\text{鉛直方向加速度}) / (\text{水平方向加速度}) = 0.0 \sim 0.7$$

位相差

$$0^\circ \sim 79^\circ$$

写真1は2方向加振の場合のリサージュ曲線の例で、左が位相 0° 、右が 54° の場合である。破壊までに要した時間は2~3分である。測定は中央断面の6点に埋設した加速度計の記録、模型内に薄く平面的に挟入した



位相 0°

位相 54°

写真1. リサージュ曲線（加速度）

色粉砂による内部変状の確認（実験終了後調査）、及び光学カメラ及びビデオカメラによる表面変状の記録を行った。又、振動台の加速度波形は2現象フラウン管オシログラフにより随時確認した。

4. 実験結果

4-1 破壊性状

模型で略々共通に認められた変状・破壊の過程をまず説明する。図-3は加振方向と対応させて、ダムの上流下流を指定していることをあらわしたもので、この場合水平・鉛直方向加振の位相差は 0° （又は 180° ）としている。リサージュ曲線が楕円の場合は長軸の方向を加振方向とする。リサージュ曲線が水平・鉛直各軸を主軸とする楕円である場合は、上下流両法面が破壊するため、解崩がより困難となるのでされた。

堤体外面で認められた亀裂を発生順に示すと次の様である。

- ① 天端の左右岸付近に発生する微かな横亀裂
- ② 下流法面で高さ40cm付近に入る縦亀裂
- ③ 上流法面で高さ40cm付近に入る縦亀裂
- ④ 天端付近に生じる縦亀裂
- ⑤ 下流法肩付近に主縦亀裂が発生し滑動

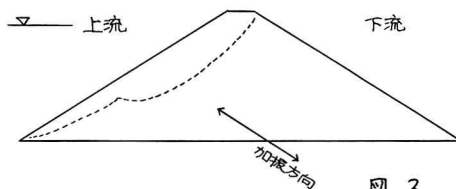


図-3

図に高さ1.4mの2次元モデルで同様な振動破壊実験を実施した結果では、①の発生より前に堤頂に微かな縦亀裂が入るのが確認されている。

①は発生が殆んど成長しない亀裂である。堤体の振動に伴う堤体の圧密沈下によって発生するものと考えられる。発生しない場合もある。

②③は加速度の増加に従って左岸及び右岸側から中央部に向って次第に成長して行き、略々一本の亀裂となる。

④は長さ数cmから数10cmの数本の亀裂からなり、破壊（滑動）直前には振動を伴って開閉しているのがわかる。

⑤の亀裂の部分には、それ以前に亀裂が発生していない場合が多い。

又、上記の亀裂の他に上流面で高さ20~30cmに縦亀裂の発生がみられる場合がある。

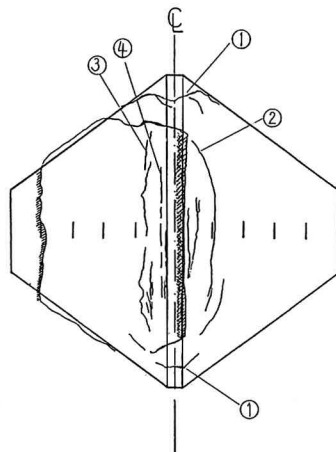


図-4

亀裂の発生状況の例を示すと図-4の様である。最終的な滑動面が堤長の中央部分で略々一様に発生していることがわかる。

図-5は実験後の模型の断面の例を示したものである。ヒリ線が発生していること、ヒリ線が必ずしも1本の円弧ではあらわし得ないことなどがわかる。

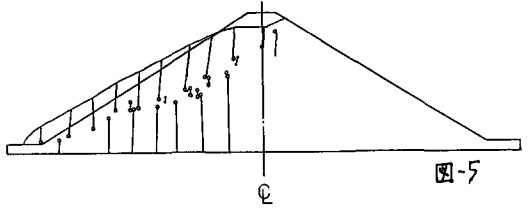


図-5

4-2 破壊加速度

図-6, 7, 8は法面の滑動が発生した時の水平方向及び鉛直方向の加速度の関係を示したものである。

図-6は位相差がない場合で、模型材料砂は密度1.44~1.53, 含水比1.40~1.68%である。3本の直線は夫々含水比範囲を1.68~1.60%, 1.59~1.55%, 1.54~1.40%として回帰直線を求めたものである。図より含水比をパラメータとして水平加速度と鉛直加速度との関係が平行線で示し得ることがわかる。直線の勾配は略々0.48(水平/鉛直)である。

図-7は同様に位相差がない場合で、含水比は1.58~1.92%であるが、大部分は約1.9であり、又密度は1.35~1.39で図-6の場合にくらべてかなり低い。但し本ケースでは、含水比の測定精度が図-6の場合にくらべ、かなり高くなっている。図中27, 28と付番してある点は勾配が1:1.6のケースで、破壊時の加速度が1:2.0の場合にくらべて小さいことがわかる。図-7においても図-6の場合と同様、含水比をパラメータとして回帰直線を引くことができる。この場合の勾配は略略0.5である。

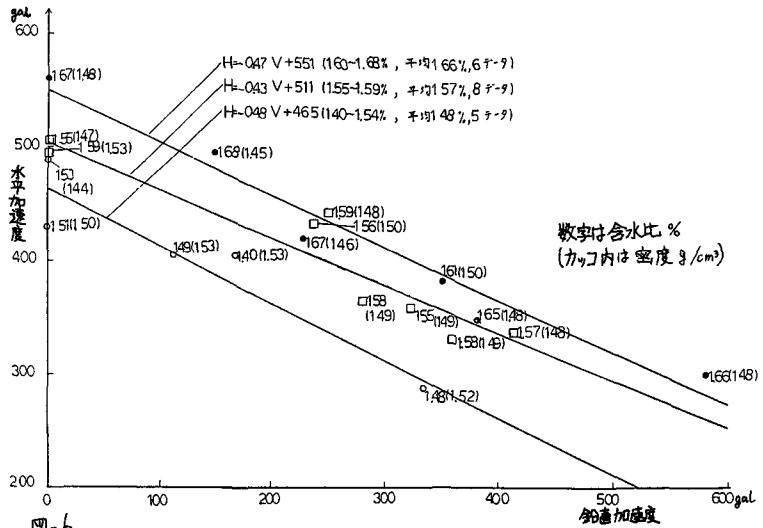


図-6

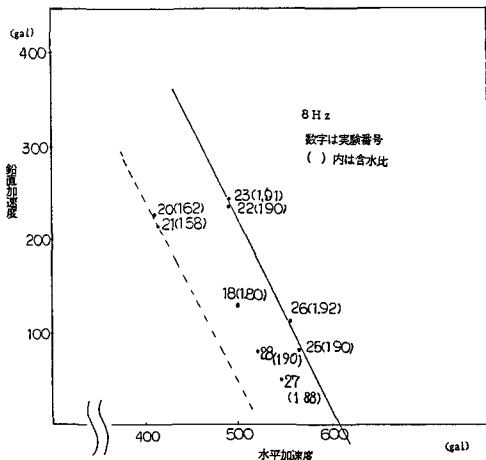


図-7

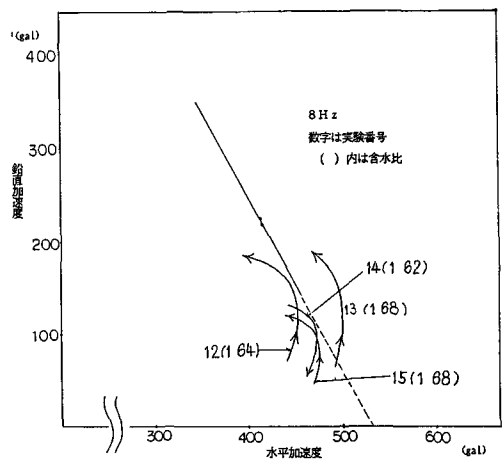


図-8

図-8は位相差がある場合である。弧状の曲線はリサーチ曲線の1部を示している。4ケースの内③の弧のみが右に移動しているが、この場合は高さ40cmの面における加速度倍率が他の3ケースの場合にくらべて小さい。直線は図-7より含水比1.65%の回帰直線を求めて引いたものである。リサーチ曲線が必ずしもなめらかな曲線でないことを考慮すれば、③を除けば他はかなりよく直線に接しているとみてよいであろう。

4-3 耐震安定評価軸

図-9はダムの斜面に原点を置いて、鉛直方向加速度を縦軸に、水平方向加速度を横軸にとって、図-6, 7に示される回帰直線を模式的に示したものである。これ等の平方線の上では法面が滑動することをあらわす。即ち、含水比(粘着力)をパラメータとして、破壊基準値が一定であることを示している。そこでこの直線群に、原点より垂線を引きこれを新しい座標軸とすれば、この座標軸は破壊基準値を示すことになる。これを耐震安定評価軸と呼ぶことにする。任意の水平加速度・鉛直加速度が同時に作用したとき、その点をこの座標に投影し、所定の座標値(耐震安定評価値)以内であれば滑動しないことを示す。又あらかじめこの軸の勾配θが分かっているれば、水平方向破壊加速度値から、任意の鉛直加速度と水平加速度が同時に作用したときの法面の安定性を換算することができる。又適当な安全率を想定することも可能である。

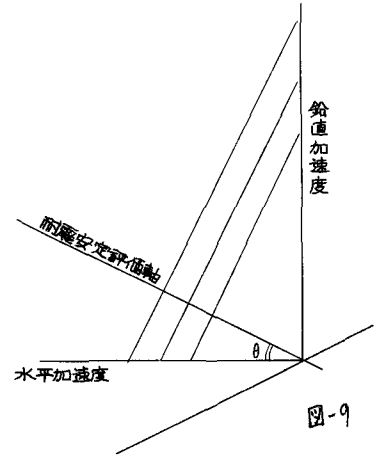


図-9

4-4 鉛直加速度の破壊に及ぼす効果

図-9に示すθとしては、図-6, 7から分かる様に本実験では

$$\tan \theta = \frac{1}{2}$$

が適切である。換言すれば、法面の滑動破壊に関しては、鉛直加速度は水平加速度の50%の影響しかもたないことを意味する。

耐震安定評価値(K')は

$$K' = K_H \cos \theta + K_V \sin \theta$$

であらわされ、本実験では $\theta = \tan^{-1} \frac{1}{2}$ であるから

$$K' = 0.86 K_H + 0.5 K_V$$

K_H : 水平震度

K_V : 鉛直震度

となる。従来の合震度では K_H と K_V が積の形式であるのに対し、耐震安定評価値は和の形式になっていて、 K_V が大きな値である場合、安定性評価の差は大きい。

5. まとめ

以上、小名浜砂を用いたフィラダム模型の振動破壊実験結果に基づいて、水平・鉛直2方向から同時に加振した場合の法面安定の評価方法を提案した。耐震安定評価値の導入により、2方向から加振した場合の斜面の安定の評価は簡単になった。

本研究は限られた材料を用いて行われたものであり、その意味で結果は定性的である。現在、材料特性の究明に当たっている。

なお、本研究の一部は元東京大学大学院学生岡本晋氏(現大成建設)の研究に負う所が大きい。