

(54) フィルダム模型の振動時の安定解析

東京大学生産技術研究所 田村 重四郎

中国 大連工学院 韓 国城

東京大学生産技術研究所 加藤 勝行

東京大学 大学院 岡本 晋

第一章 緒言 筆者等は、フィルダムの地震時の強度を解明するため、二次元模型の振動破壊実験、模型材料の力学試験を実施し、振動時の応答解析を行い、破壊機構の力学的究明に努めて来た。ロックフィルダム模型については、岡本博士、大町博士等と摩擦力系を基本として破壊機構のモデルを提案した。しかし、定量的には堤体材料の内部摩擦と動的応力の関係がはっきりしていなかった。このため、砂模型を使用して、粘着力を考慮に入れた模型実験を実施した。その結果、粘着力と摩擦力とを総合的に考慮した破壊機構のモデルを作成することができた。このモデルについては、第六回日本地震工学シンポジウムで一部発表した。ここでは、安定解析方法の主たる考え方をのべ、このモデルに基づいて堤体の法面のすべり破壊に及ぼす堤体材料の内部摩擦角の影響を調べたので報告する。

第二章 安定解析の方法

2-1 解析理論 ダム模型の法面のすべりに対する安定解析の方法を順に項目にのべれば次の様である。

i) 堤体材料のせん断強度(τ_s)を粘着力(C)及び内部摩擦角(ϕ)を用いて下式であらわすものとする。

$$\tau_s = C + P \tan \phi$$

P : 直応力

ii) 振動に対する堤体の応答計算を行い、堤体内部の応力状態を求める。

iii) 応答計算から求められた堤体内のせん断応力(τ)とせん断強度(τ_s)を比較して、せん断応力がせん断強度を超える部分を滑動可能領域とする。

iv) 応答計算で求めた各点の応力状態より滑動可能方向を定め、隣接する点のこの方向を接線的に結んで、滑動可能領域内で滑動可能面を作成する。

v) 滑動可能面が堤体内に連続的に形成され、これが堤体表面に達したとき滑動する。

ii) の応答計算に際しては、実際の力学的諸数値を用いる必要のあることは言うまでもないが、この方法の概念の主な点はiii)~v)にある。すなわち、滑動可能領域と滑動可能方向の存在を想定し、これが堤体内に連続的に形成されることを条件としているところである。次にこれらについて説明する。

2-2 堤体内における局部応力の特性 図-1に示したのはモールの円で、一点における滑動可能領域と滑動可能方向の概念を説明するためのものである。フィルダムはマシナな構造物であり、堤体内部の応力状態も、強度も又位置によって大きく異なっているわけではない。隣接する点の変位、変形は互いに影響し合い、拘束し合う。局部的に応力状態が変化し、たとえば一部滑動を生じても応力の再配分が行われ、応力状態は局部的に変化するが内部的に平衡し、全体としてはほとんど変わらない。振動荷重が加わった場合、この様な傾向は更に助長されることになる。この様な応力状態を経時的に求めて行くことは、材料の複雑な力学特性を考えればほとんど不可能である。そこで、局部的に材料の強度以上の応力状態(過応力状態と呼ぶ)があると仮定した。過応力状態が堤体内で相対的に広い範囲にあった場合、堤体の安全性について、この様な仮定は適当ではないであろう。

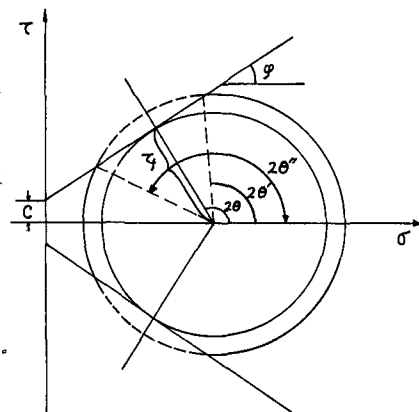


図-1 応力円と滑動可能面

しかし、局部的な場合には、この仮定は妥当であると考えられる。

図-2は、堤体の一部にすべりが発生するか、又は相対変位がしやすくなった力学状態を仮定して、これを剛性の低下に置きかえ、堤体全体の応力状態を再計算したものである。

図-2(a)で堤体の一要素の剛性を ϕ にした応力状態が図-2(b)である。局部的な応力の変化がみられるが、その周辺及び堤体全体としてはほとんど応力の変化が生じていないことがわかる。このことは、堤体内に局部的な過応力状態が存在し得ることをあらわしている。この様な滑動可能領域に対応して滑動可能方向を設定した。この方向は、応力の再配分によって実際には定まるものであるが、前述の理由により、ここでは図-1に示した様に算定応力状態で定まる最もすべりやすい方向の両側にその範囲を設定することにした。

振動時の堤体内部の応力分布は、一般に滑らかに変化し、急激な変化はみられないこと、法面の滑動がかなり広い範囲で発生することも考慮すれば、各点の滑動可能方向を接線的に連続した滑動可能面と、滑動可能領域に想定し得るものと考えられる。

2-3 実験結果と解析結果の比較 図-3は実験に使用した砂模型の安定解析の例を示したものである。模型の剛性は実測値から求め、材料の粘着力及び内部摩擦角は土質試験から決定したもので、堤体表面からの深さによって変化している。ポアソン比は至依存性を無視して一定とした。引張応力が生じた場合、その部分の材料

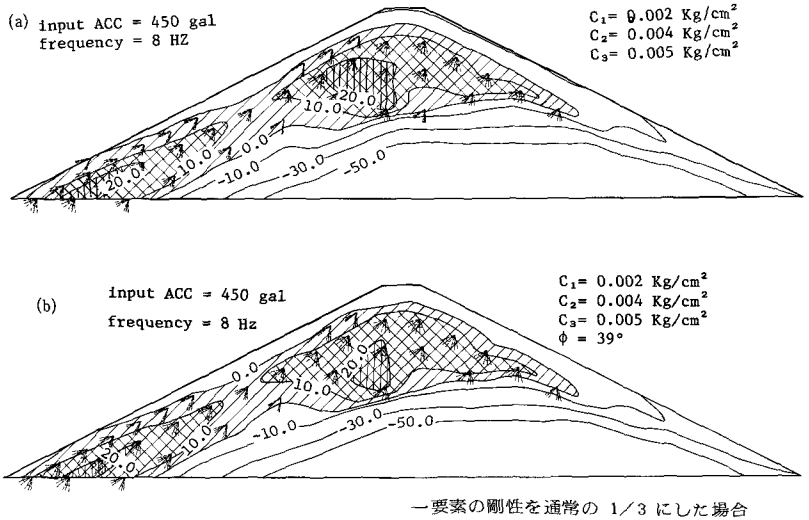


図-2 滑動可能領域と方向に及ぼす堤体内部の部分的降伏の影響

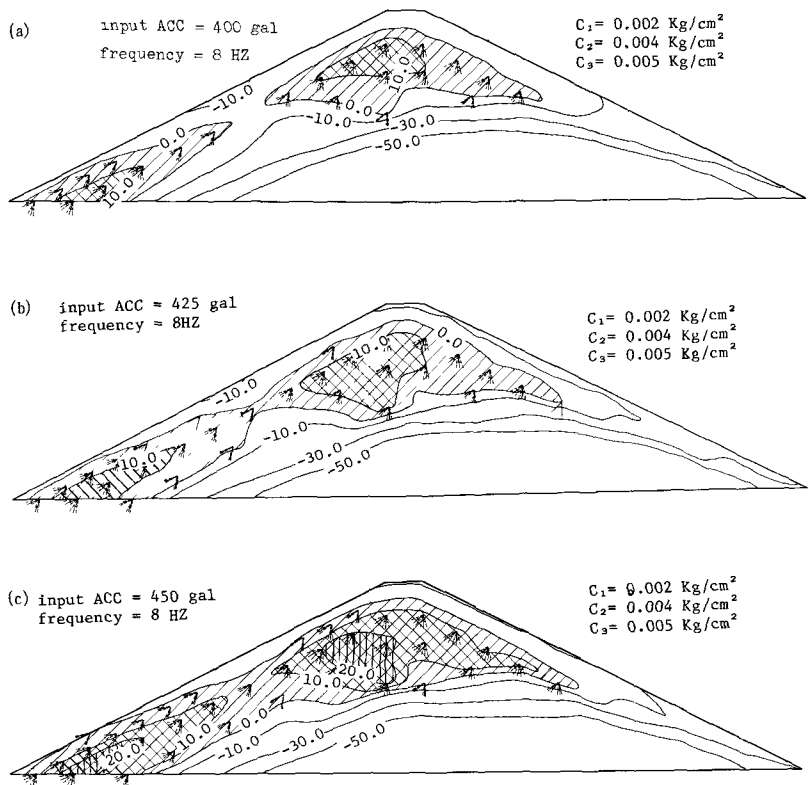


図-3 滑動可能領域と方向の計算結果 (含水比 1.56%, 加振振動数 8Hz の場合)

のヤング係数は一定の方式で急激に低下させた。減衰定数は共振曲線より決めた15%を採用しているが、破壊近くになるとこれより大きい値を示しているものと考えられる。10～15波の正弦波形の入力に対し直接積分法により定常的な応答を等価線形法により計算した。

図中 $C_1 \sim C_3$ は材料の粘着力を示し、等値線に付された数字は、応答計算で得られたせん断応力とせん断強度の差を 10^{-4} kgf/cm^2 を単位として示したもので、 $\oplus$ 値は滑動可能なことを示す。8 Hz、400 galで加振した場合、滑動可能領域(ハッチ部分)は、堤頂及び法尻部分に発生する。加速度的増加と共に両領域は法面に沿って拡大し、遂に法面中部で接合する。

図-4には安定評価結果と二つの実験結果とを併せて示した。点線はすべり線であり、一点鎖線、二点鎖線は破壊実験後の模型の表面形状をあらわしている。実験で得た振動台の崩壊時の加速度は夫々456.470 galであり、計算結果と略々一致し、すべり線も

Calculation: input ACC = 425 gal test: F. ACC(456~470) gal
frequency = 8 HZ max ACC(478~490) gal
frequency = 8 HZ
 $C_1 = 0.002 \text{ Kg/cm}^2$
 $C_2 = 0.004 \text{ Kg/cm}^2$
 $C_3 = 0.005 \text{ Kg/cm}^2$

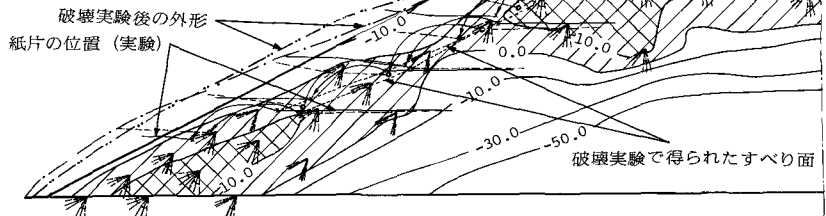


図-4 実験結果と計算結果との比較

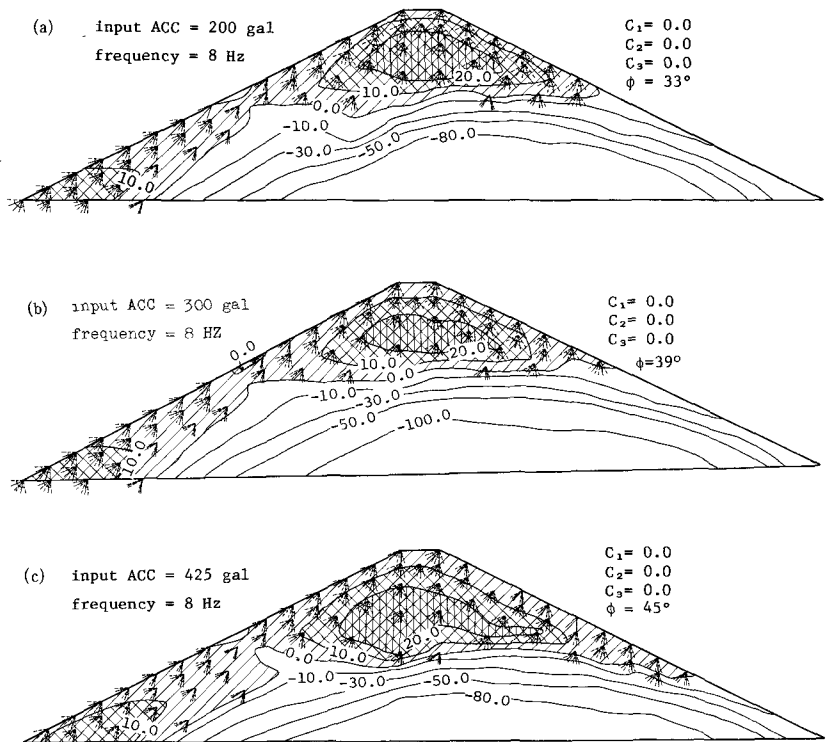


図-5 内部摩擦角を変化させた時の計算結果 (粘着力 $C=0$ の場合)

又両者がよく一致すること分かる。堤体材料の粘着力の増加と共に滑り線の法面からの深さが増し、かつ破壊時の加速度が増すことなどの実験結果とこの安定評価方法による解析結果とはよく一致している。

第三章 材料の内部摩擦角の破壊に及ぼす影響 破壊に対する粘着力の影響については既に報告した。ここでは、前述の安定解析方法を使用して、内部摩擦角がどのような影響を与えるか、又粘着力とどのような関連を持つかが調べてみた。

図-5 (a), (b), (c)は粘着力がない場合、内部摩擦角を夫々 33° , 39° , 45° としたときの応答計算結果である。何れも頂部及び法尻部分に滑動可能領域が発生し、法面中部において接合した状態を示している。図より明らかな様に頂部のみならず、法面全体で表層から滑動が生ずるのであることが推測される。三者共、安定上からみた応

力状態はよく類似しているが、加速度の大きさが異なっている。 $\phi = 33^\circ, 39^\circ, 45^\circ$ に対応して 170, 300, 425 gal と著しく増加していることが分かる。

図-6 は粘着力がある場合、相互の関連がどのようなものかを示したものである。ここに示した例の粘着力は法面表層部で 0.002 kg/cm^2 、中層部で 0.004 kg/cm^2 、下層部で 0.005 kg/cm^2 の場合である。図-6 (a), (b), (c) は、夫々 $\phi = 33^\circ, 39^\circ, 45^\circ$ に対応して安定度を調べたものである。滑動可能領域の発生と、その領域の拡大伸長と共に法面中央部における接合の過程は同様であり、接合部分を通る滑動可能面を画くことが出来る。しかしながら、加速度を比較した

場合、 $\phi = 33^\circ, 39^\circ, 45^\circ$ に夫々対応して、類似した安定の状態に達する加速度は 325, 425, 520 gal であり、大に増加していることがわかる。図-5 の結果と対比した場合、前者の破壊に対する影響は略々独立している様に考えられる。

図-7 は、内部摩擦角、粘着力及び滑動可能加速度の関係を示したものである。前者共、法面のすべり破壊に対して強い効果をもっていることが推測される。

まとめ 以上、湛水がない場合のフィルダム模型の安定解析方法をのべ、この方法を用いて法面のすべり破壊に対する堤体材料の内部摩擦角の影響、ならびに粘着力がある場合の関連について述べた。

材料の力学的性質の表現方法、計算方法等々、なお検討すべき点が残されているが、法面安定の評価に役立つものと考えられる。

参考文献 岡本舜三：素掘坑の強さに関する弾性学的考察 (上), (下) 土木学会論文集 (1949)
 編 国城、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)
 田村重四郎、韓 国城、加藤陽行：フィルダム模型の振動破壊機構に関する研究—特に粘着力の影響について—
 第6回 日本地震工学シンポジウム (1982.12)

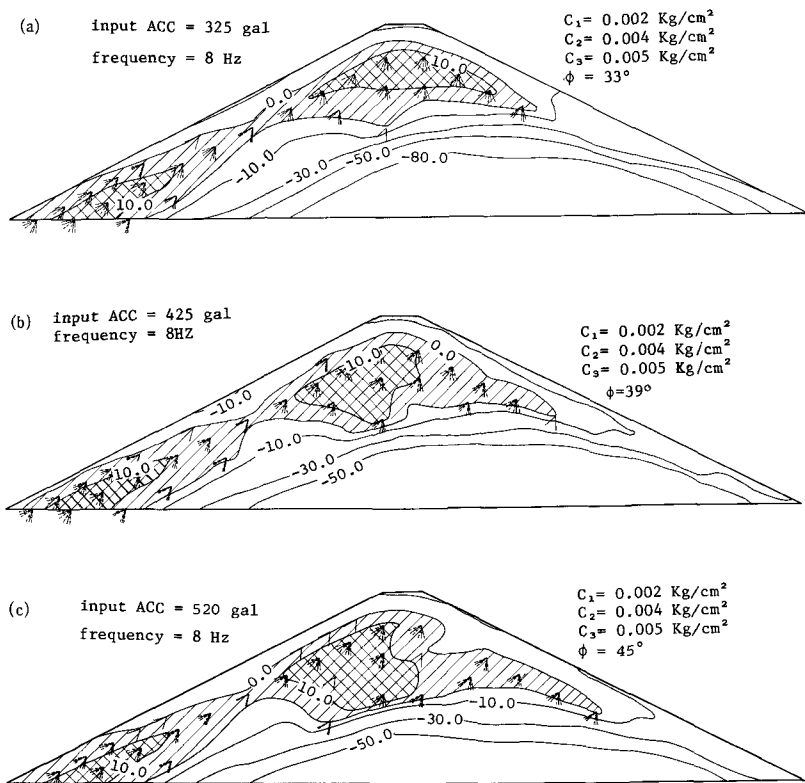


図-6 内部摩擦角を変化させた時の計算結果 (粘着力 $C=0$ の場合)

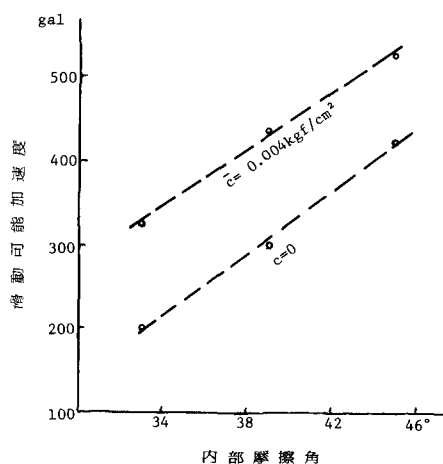


図-7 滑動可能加速度と内部摩擦角、粘着力との関係