

土 木 研 究 所 資 料

フィルダムの耐震安定計算に おける地震力とせん断強度

昭和63年2月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright ©1988 by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

フィルダムの耐震安定計算に おける地震力とせん断強度

フィルダム研究室 室長 松本 徳久
研究員 安田 成夫

要 旨

フィルダムが大きな地震動を受けたときの、応答倍率と振動形を、実験、実測および解析から求めた。ロック材料の三軸試験結果によれば、モールの破壊包絡線は、原点を通る上に凸な曲線で表される。そこで本論文では、3種の異なるせん断強度の表現を使い、地震による応答を考慮したモデルフィルダムの安定計算を実施することにより、せん断強度の表現方法がどのように安全率に影響を与えるかを論じたものである。

キーワード：フィルダム，ロック材料，耐震設計，簡便分割法，せん断強度

Earthquake Loading and Shear Strength in the Earthquake Resistant Design of Rockfill Dams

NORIHISA MATSUMOTO
Head, Filltype Dam Section

NARIO YASUDA
Researcher

Synopsis:

Magnification ratio and shape of response are obtained for filldams subjected to large earthquake shaking based on the experiments, field measurements and analyses. The results for rockfills show that the Mohr failure envelope is given by the upward convex curve which intersects the origin of the coordinates. The paper discusses how the expressions of the shear strength influence the safety factor considering the response characteristics during the earthquake by conducting the numerical stability analysis of the model filldam employing the three different failure envelopes.

Keywords : Filldam, Rockfill material, Aseismic design, Simplified slice method, Shear strength

目 次

1. ま え が き	1
2. フィルダムの耐震設計法	1
3. 地震時におけるフィルダムの応答倍率と振動形	3
4. ロック材料のせん断強度	11
5. モデルダムと材料	15
6. 安 定 計 算	19
7. せん断強度と安全率	19
8. モデルダムの安全率	24
9. 設計震度と安全率	28
10. 計算方法と安全率	31
11. ま と め	34

1. まえがき

フィルダムの地震力を考慮した安定計算において、設計震度と材料のせん断強度は、ダムの基本断面を定める上でともに重要な設計値である。本論文は、このふたつの設計値について、実験、実測および解析計算結果に基づいて検討したものである。

2. フィルダムの耐震設計法

地震の影響を考慮したフィルダムの設計法は、動的解析と震度法に大別される。動的解析とは、ダムが将来遭遇するであろう地震動を推定し、この地震動に対する時々刻々の加速度、変位、応力などの応答を求め、堤体の安定性を評価するものである。筆者らは、実物ダムで得られた実測加速度応答値と、室内試験から得られた物性値および基礎での地震記録から計算されるダム天端での応答値を比較し、入力地震動がダムの固有周期程度の場合には、加速度の応答値はよく合うこと、堤体内の応力については、二次元計算では、計算値は実測に比べて小さく、三次元的な影響を考慮する必要があることなどの結論^{1) 2)}を得ている。なお、ここでの動的解析に用いる物性値とは、せん断弾性定数、ポアソン比、および減衰定数を、繰返し載荷試験から拘束圧とひずみの大きさに依存した定数であると近似的に仮定した物性値³⁾のことである。

一方、震度法による耐震安定計算では、地震の影響は、設計震度というただひとつのパラメータにすべて集約される。設計震度が決定されれば、あとはすべて静的な計算で処理される。

したがって、動的解析と震度法を比較すれば、より現象を忠実に再現しているのは、動的解析であり、また動的解析における計算手法および物性値に関する研究は進歩しつつあるから、ますます動的解析の精度は高まるであろう。しかし、フィルダムの基本的な断面は、今のところ、震度法により決められており、動的解析は、震度法により決められた断面が、大きな地震に対しても安定であることを説明する手段として用いられている。1987年5月に国際大ダム会議第55回総会の際、“International Symposium on Earthquakes and Dams”というシンポジウムが開かれ、ダムの耐震設計問題が集中的に議論された。このときフィルダム耐震設計部会の議長W.D.L.Finn教授による基調報告でも、1960年代以降動的解析が発達してきているものの、実務的な設計は従来通りの手法によっていることが述べられている。⁴⁾すなわち、国内においても、国外においても、実務的な設計では、従来からの震度法によって基本的な断面が決定され、必要あるときに、動的解析による安全確認が実施されているわけである。

さて、それでは、より現象を忠実に再現していると考えられる動的解析が実務的な設計に余り使われてないのはなぜか。次の理由が考えられる。

- ① 入力地震動、物性値、安全性の評価等のそれぞれの段階で、設計基準に記述されているレベル以上の「高度の工学的判断」が必要であり、設計になじみにくい。
- ② 震度法には、長年の経験があり、実際にこれによって設計されたダムが地震に対して満足な挙動をしている。

上記①については、多いに議論のあるところであろう。実際、国際大ダム会議においても、動的

解析と設計の関係について、大議論が生じている。すなわち、実務家サイドからの設計の定義は、一定レベルの技術者ならば、主観によらずして、誰でも安定か不安定かの同一の判断に達するような、社会的にも認められた一定の手順を指すのである。一方、動的解析が設計に使えろという主として研究者側の主張は、できるだけ真実に近い形で設計を行うべきであり、動的解析は、すでにこの域に達していると主張している。

さて、地震動を受けたときのフィルダムの破壊モードは、間隙水圧が上昇して材料の強度が失われる液状化を除けば、天端や表面の一部のきれつが拡大しやがて、ゾーンの滑りとなる進行性破壊と考えられる。渡辺らによれば⁵⁾、動的解析によりこの進行性破壊を追う試みもあり、真の破壊モードからの耐震強度が評価されつつあり、この方面の研究も今後発展するであろう。しかし、筆者らは、現時点での実務的な耐震設計手法は、動的解析、実測、実験等研究成果を取り入れた上で、限界平衡法による安定計算であると考えている。その理由は、次のようである。

① わが国の堤防の高いフィルダムは、ロックフィルダムであり、堤体積の大部分を占めるロックゾーンの透水係数は 10^{-2}cm/s 以上あり、間隙水圧の消散は容易で、液状化の可能性は極めて低い。したがって安定性の検討の主要点は、仮定したゾーン（モビライズドプレーンと呼ばれることもある）が安定かどうかの検討であり、このときは動的解析によっても、このゾーンの慣性力の合力を求め、結局、限界平衡の考え方による検討となる。

② 現行設計法では震度を一定としているが、動的解析等の成果から現実に近い震度分布を与えれば、従来の限界平衡法の延長上で、現実の姿に近い安定性の検討が可能である。

さて、限界平衡法による地震時のフィルダムの安定計算の細部については、計算法と強度のとり方について、いくつかの問題点がある。

まず計算法についてであるが、現行フィルダム設計法の簡便分割法その他、ビショップ法をはじめとする多くの計算法があり、結局は滑り面上の垂直応力をどのような仮定で求めるかという問題であり、円弧の中心角と間隙圧にもよるが、通常のフィルダムの滑り計算では、計算方法によって安全率がおおよそ20%程度異なってくる。

もうひとつは、間隙水圧の変化を含む材料のせん断強度のとり方である。現在の実務的な設計では、三軸試験等による材料のピーク強度を用い、滑りあるいはせん断に伴う間隙水圧の変化を考慮していない。限界平衡法であればピーク強度ではなく残留強度を用いるべきであるとか、地震のような早い荷重によるせん断では間隙水圧の変化を考慮すべきとの主張もあるが⁶⁾、筆者らの本論文における検討では、現行法通り、ピーク強度を用い、間隙水圧は一定（静水圧のみ）として論を進めている。その理由は、①透水係数の大きいロックフィルダムを対象としていること、および②滑り面は未だ生じておらず、したがって滑りの安全率は、材料が持っているあるいは発現可能な抵抗力に対して定義されていると解することによる。

したがって本論文のねらいとするところは、①フィルダムの堤体の加速度分布を動的解析、実測、実験等から推定される形とし、②材料のせん断強度としては、ピーク強度をとり、内部摩擦角の拘束圧依存性を考慮し、③計算法は現行の簡便分割法を用いたら、どのような安全率が得られるかを

検討することにある。

3. 地震時におけるフィルダムの応答倍率と振動形

現行の震度法では震度を一定としているが、ここでは地震時におけるフィルダムの応答倍率（天端最大加速度／基礎最大加速度）と振動形を考えてみる。フィルダム堤体の上下流方向断面は三角形であるとし、地震動によって生ずるせん断ひずみは、堤体の同一標高では上下流方向に一定であるとすれば、1934年に発表された松村の解¹⁾が適用できる。

すなわち、

$$d_2(z) = d_0 \sqrt{\frac{v_1^2(z) + v_2^2(z)}{v_1^2(H) + v_2^2(H)}} \cos(pt + \phi) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし

$d_2(z)$; 標高 z における堤体の中心軸の水平方向変位

z ; 天端からの鉛直距離

$d_0 \cos pt$; 基礎の変位（周期は堤体の固有周期とし共振状態を仮定）

p ; 堤体の固有振動数 $\left(= \frac{2.40483}{H} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \sqrt{1-r} \right)$

ϕ ; z の標高における位相角

$$\phi = \arctan \frac{v_2(H) v_1(z) - v_1(H) v_2(z)}{v_1(H) v_1(z) + v_2(H) v_2(z)}$$

G ; 堤体のせん断弾性定数

ρ ; 堤体の密度

$\gamma = \sqrt{h}$; (h は減衰定数)

$$v_1(z) = J_0(\alpha z) J_0(i\beta z) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\alpha z) J_{2n}(i\beta z)$$

$$v_2(z) = -2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\alpha z) i J_{2n+1}(i\beta z)$$

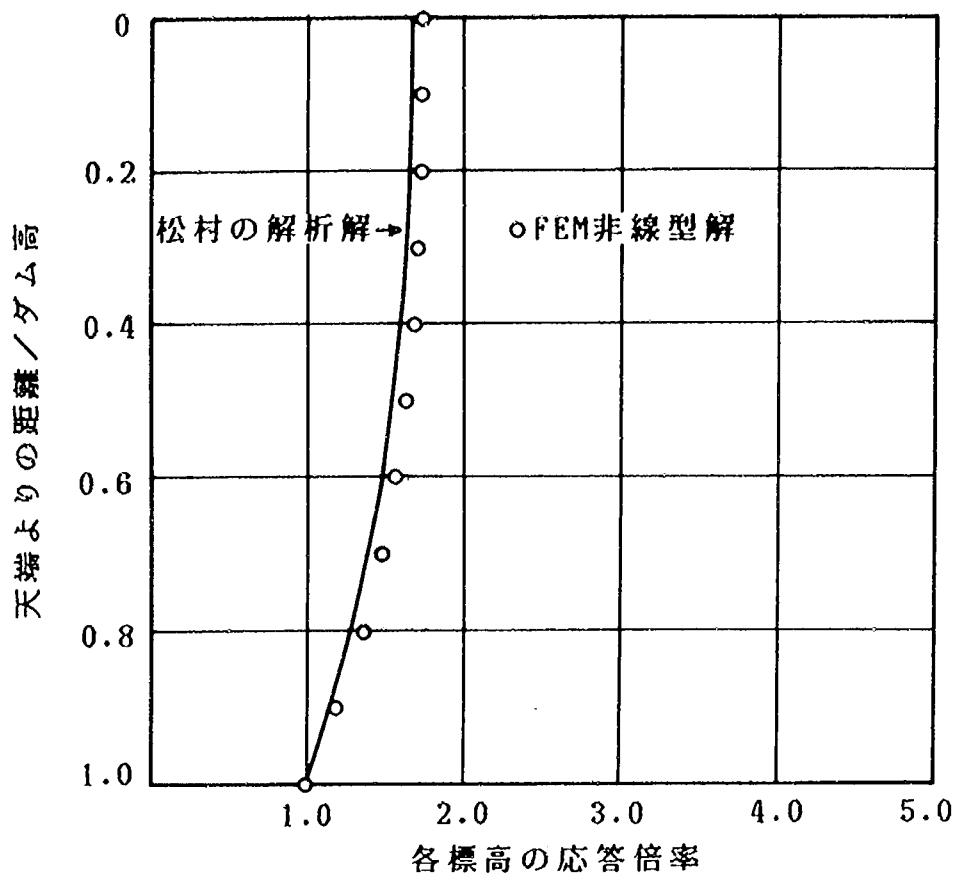
α, β ; 堤高 H と減衰に関する定数(γ)で定まる定数

$$\alpha = \frac{2.40483}{\sqrt{2} H} \sqrt{1-r} \left\{ \frac{\sqrt{1+4r(1-r)}+1}{1+4r(1-r)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

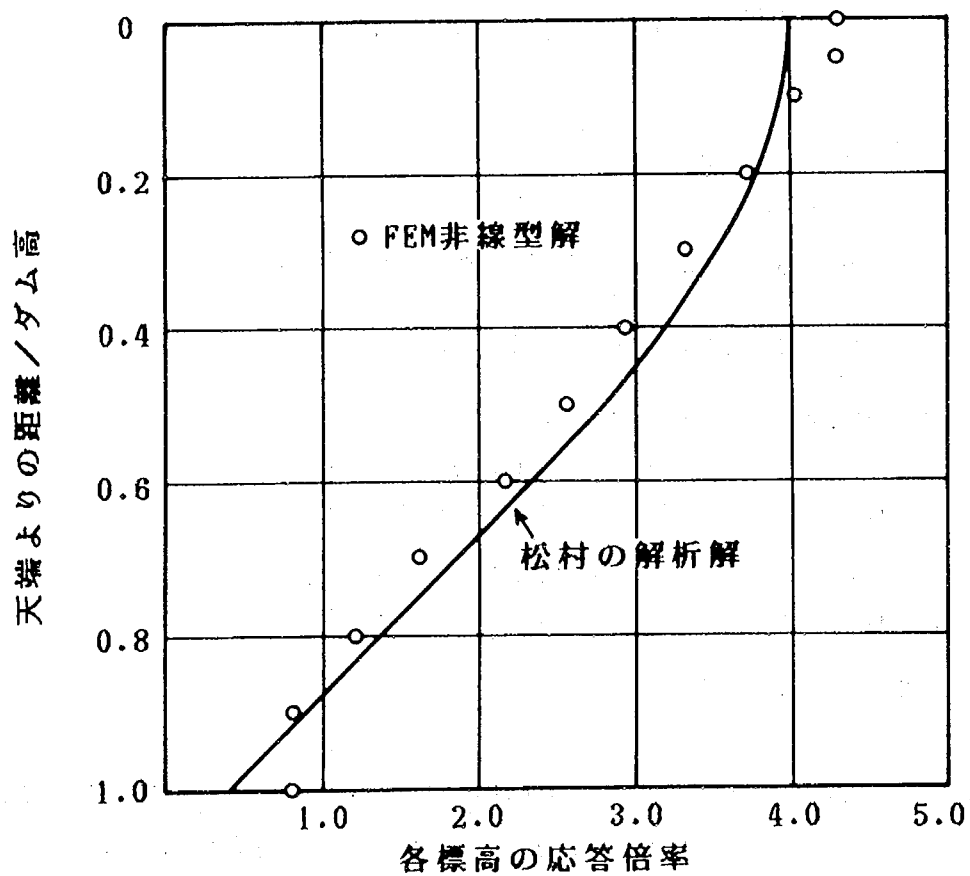
$$\beta = \frac{2.40483}{\sqrt{2} H} \sqrt{1-r} \left\{ \frac{\sqrt{1+4r(1-r)}-1}{1+4r(1-r)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

J_n ; n 次のベッセル関数

式(1)によって示されるフィルダム堤体の振動形 ($h=20\%$ の場合) を図-1、2 に示す。図-1 は、基礎が最大加速度の位相での加速度分布、図-2 は天端が最大加速度の位相における加速度分布である。図-3 は位相を無視して各標高における最大加速度を示したものである。図-1、2



図－1 基礎が最大加速度のときの堤体各標高における加速度分布（ $h=20\%$ の場合）



図－2(a) 天端が最大加速度のときの堤体各標高における加速度分布（ $h=20\%$ の場合）

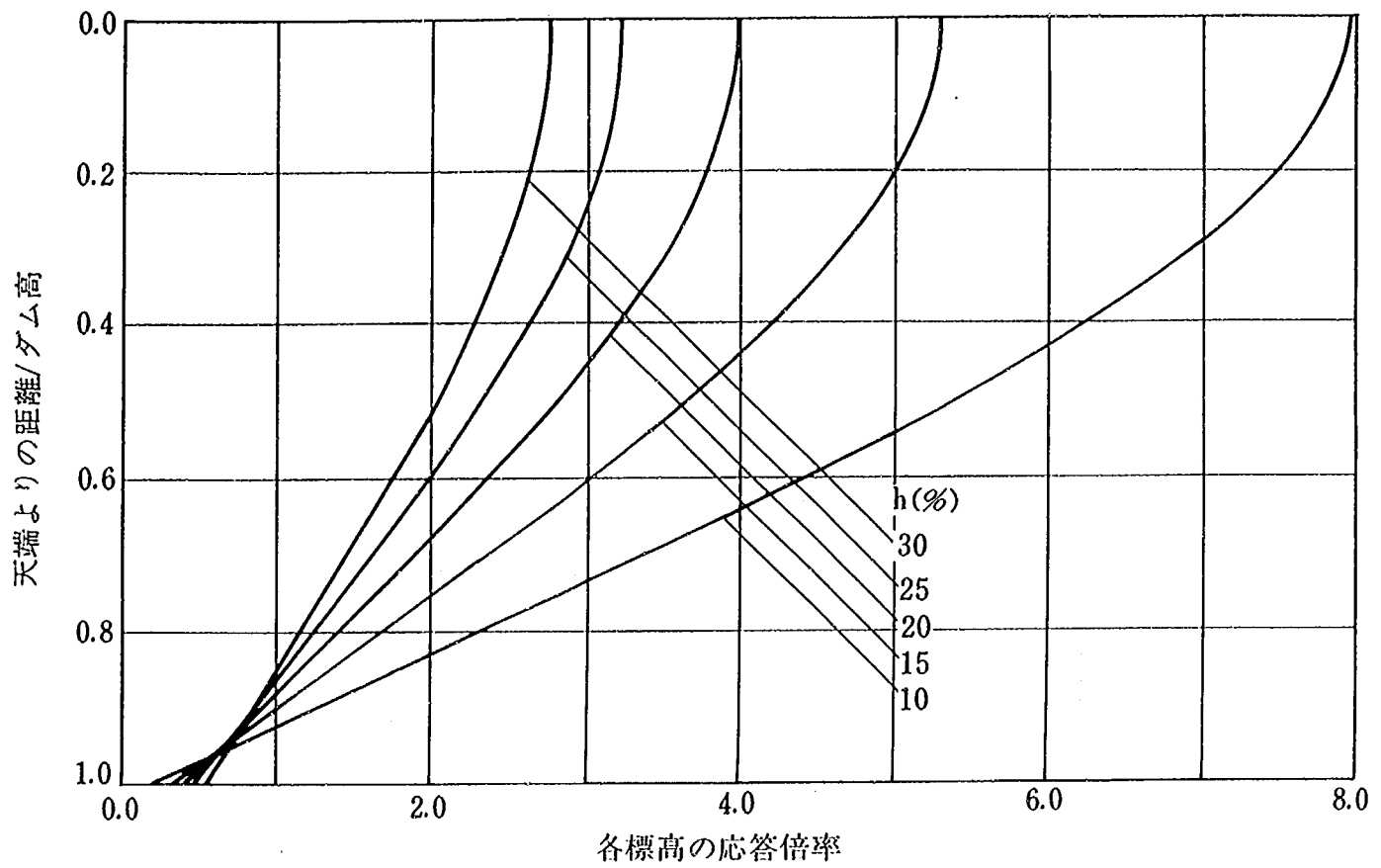


図-2(b) 天端が最大加速度のときの堤体各標高における加速度分布 ($h=10\sim30\%$)

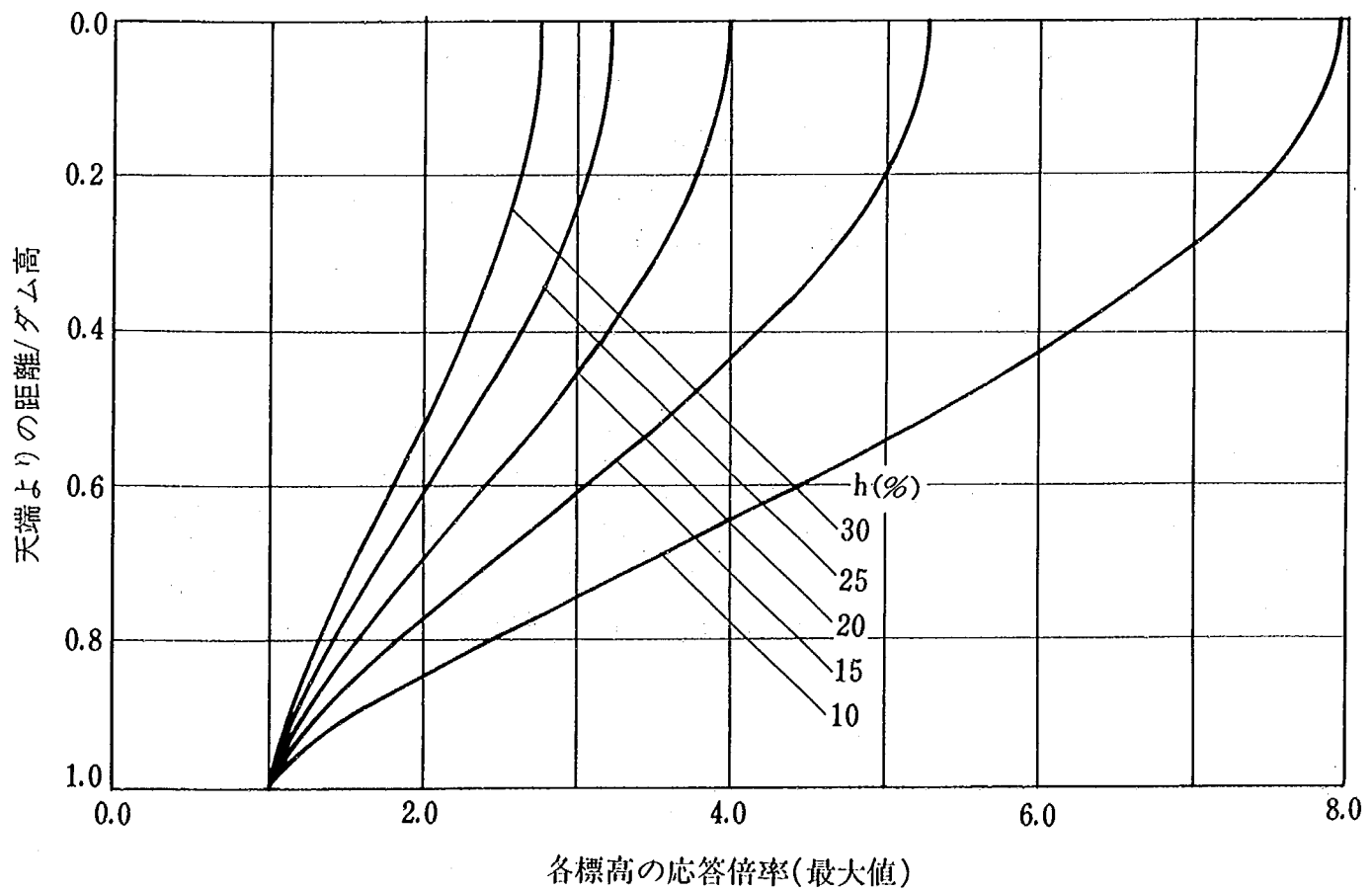


図-3 各標高における最大加速度

には、材料の非線型性（せん断弾性定数と減衰定数が拘束圧とせん断ひずみの大きさに依存すると仮定）を考慮したFEM解析結果（地動が共振周期として求めた定常解）を記入してあるが、少なくとも中心軸付近の振動形は、松村の解とFEM結果が極めて近いことがわかる。なおFEM解析は、図-4の二次元断面に、図-5に示すひずみ依存性のあるせん断弾性定数と減衰定数と図-6の初

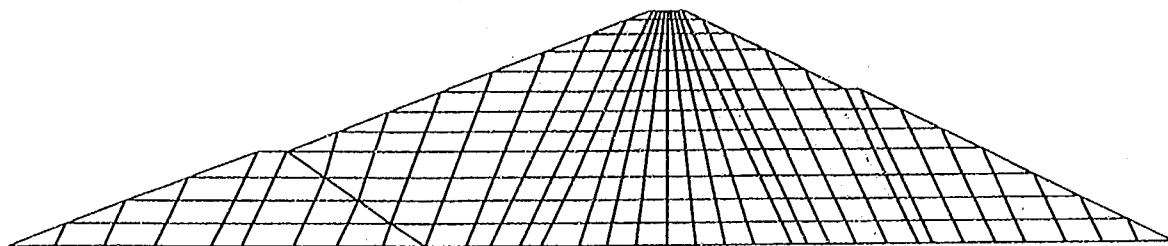


図-4 有限要素断面（七ヶ宿ダムを想定）

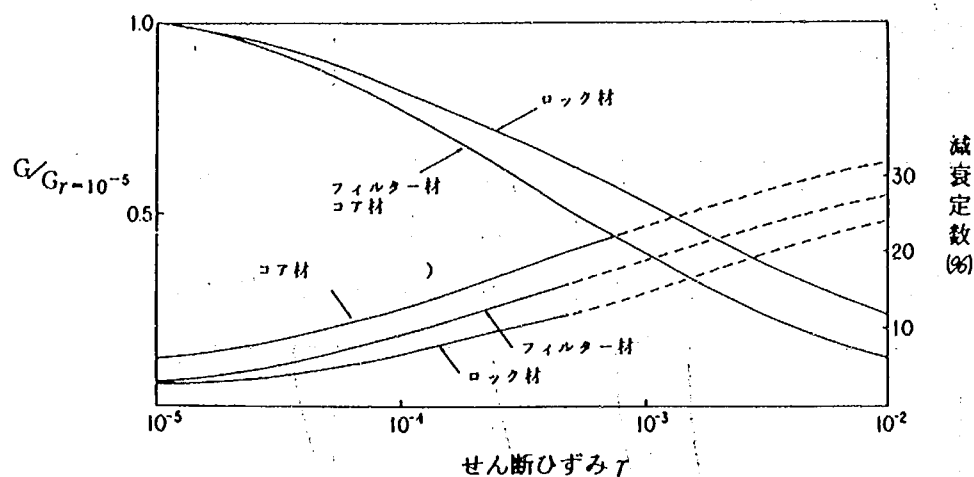


図-5 基準化したせん断弾性係数，減衰定数～せん断ひずみ
（但し逸散減衰定数を含まない）

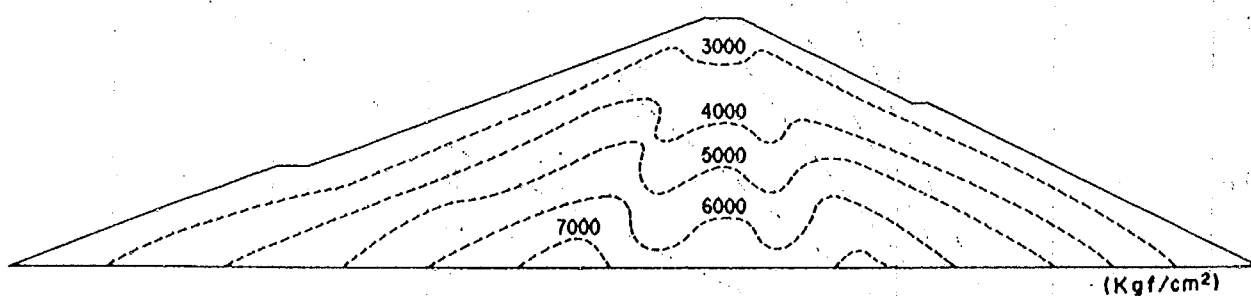
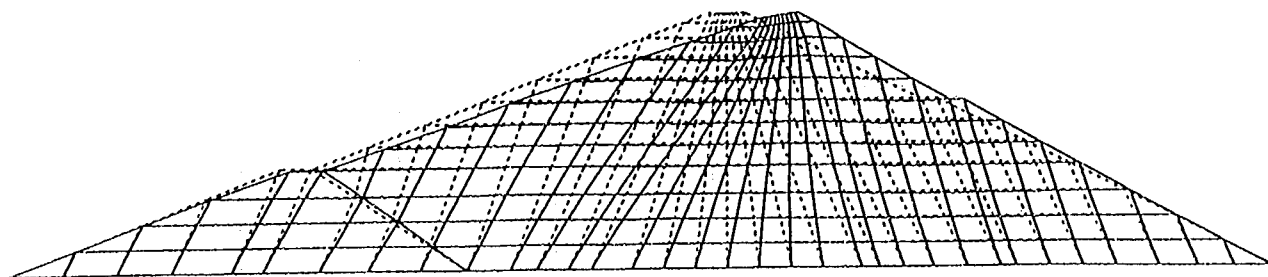
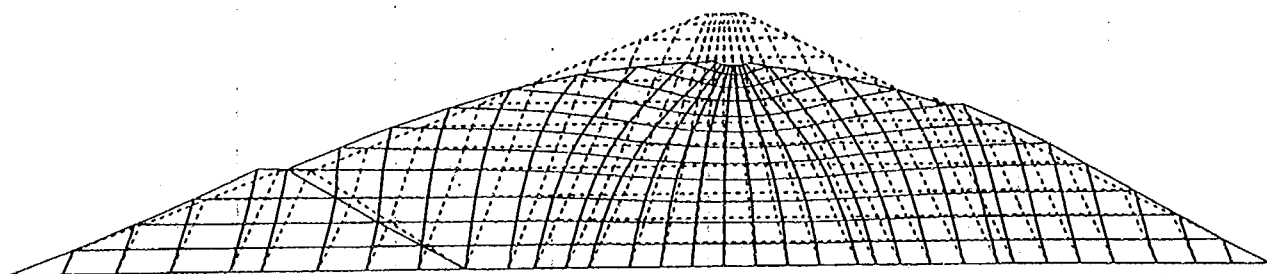


図-6 初期せん断弾性係数

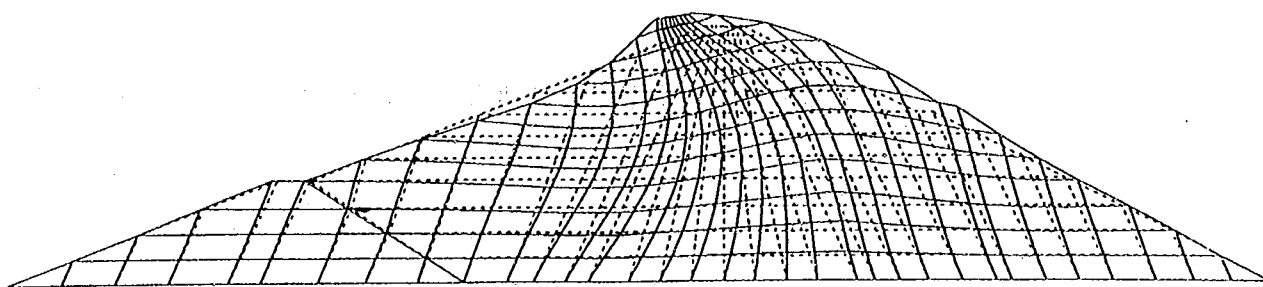
期せん断弾性定数の分布を与え、第一次の固有周期を持つ正弦波を入力し、定常振動となったときの加速度分布を求めたものである。また、固有モードは図-7に示す。なおFEMの定常振動解において、入力正弦波の最大加速度は100gal、全要素における平均減衰定数は20%である。



第一次モード (1.66Hz)



第二次モード (2.54Hz)



第三次モード (3.00Hz)

図-7 モード図

次に式(1)より、応答倍率 (d_2/d_0) を求め、減衰定数 h の関数として示したのが、図-8である。式(1)あるいは図-8によれば、フィルダムの共振時の応答倍率は、ダムの高さに無関係で、減衰定数のみによって決まる。そこで、フィルダムの減衰定数であるが、土研フィルダム研究室にお

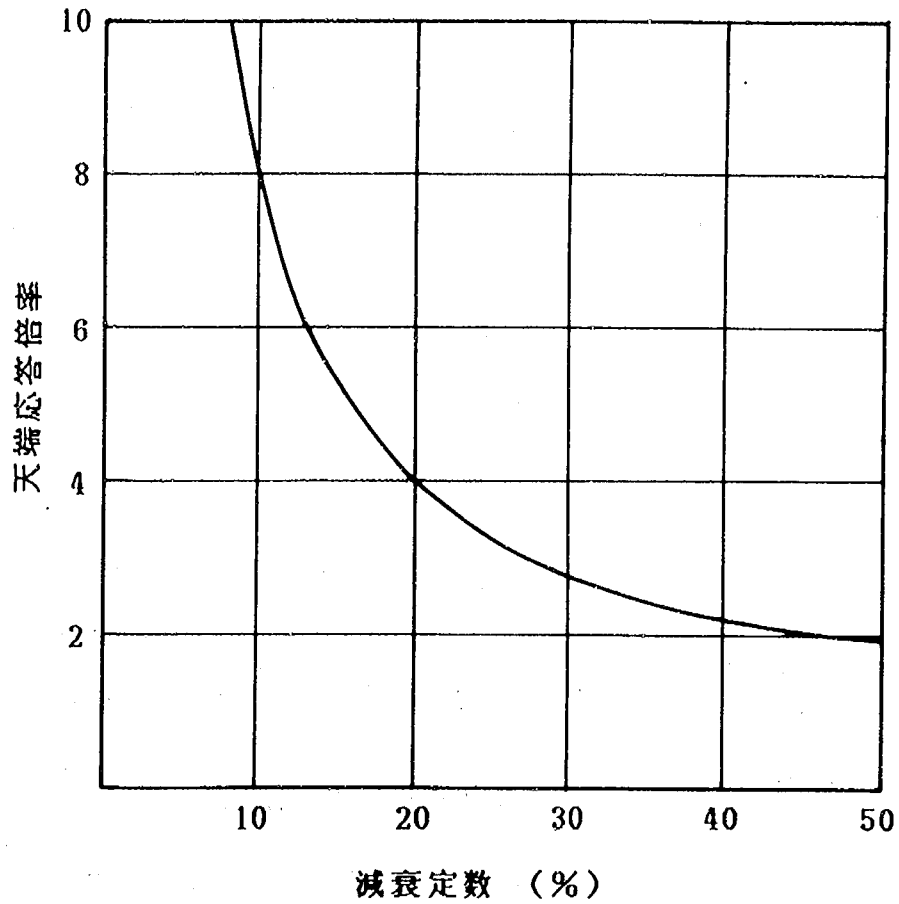


図-8 応答倍率 (天端が最大加速度となるとき)

けるロック材料の繰返し三軸試験結果では、図-9に示すように微小ひずみ時 (1×10^{-5}) で2%、大ひずみ時 (5×10^{-4}) で8%くらいである。ゾーン型のロックフィルダムでは、堤体はコア、フィルタ、ロックの3ゾーンより構成されるが、一般にロックゾーンが全堤体積の85%くらいを占めている。したがって堤体全体の減衰をロック材の減衰定数で代表させても誤差は少ないであろう。いま、大地震時におけるひずみを 5×10^{-4} くらいとし、堤体と基礎の間の逸散減衰を10~15%とすると、材料によって減衰定数が変わることとを考慮すれば、フィルダムの減衰定数は、およそ15%から25%の範囲と考えられる。このような考えによれば、フィルダムの応答倍率は、基礎と天端が同一位相のとき1.6~1.8倍、基礎と天端の位相が式(1)の ϕ だけずれて天端が最大加速度のとき、3~5倍となる。ただし以上の議論は基礎の地震動が堤体の一次固有周期に一致する正弦波という仮定に基づいており、実際の地震波は、固有周期付近の成分を多く含む場合があるにせよ、正弦波ということはないから、実地震に対する応答は、もっと小さいはずである。

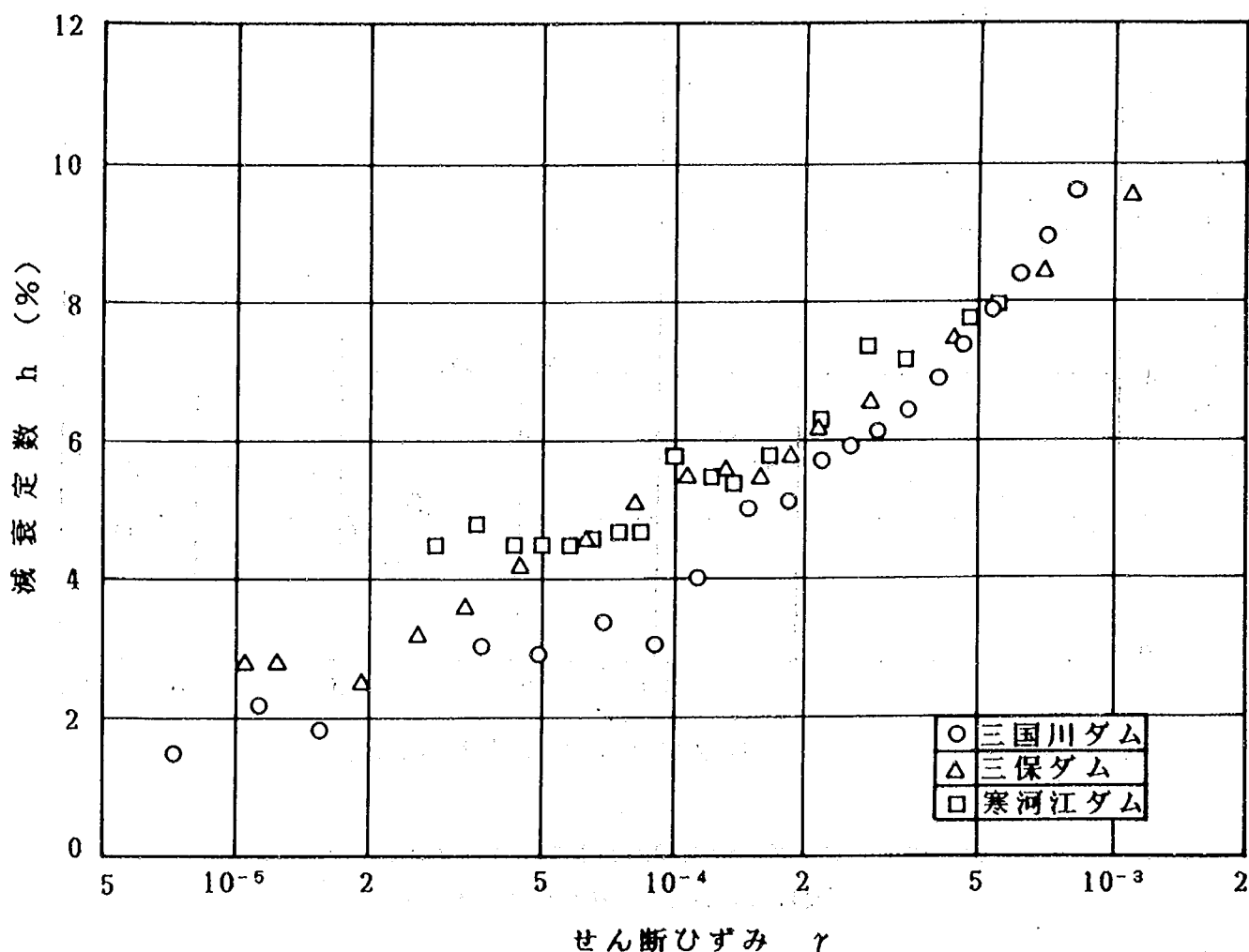


図-9 減衰定数～せん断ひずみ (ロック材料繰返し三軸試験)

また一方、1978年宮城県沖地震から、1987年千葉県東方沖地震までのこの約10年間の主として建設省所管のフィルダムの実測記録を整理してみると図-10となる。⁸⁾ 図-10によれば、基礎の加速度が大きくなるにつれて応答倍率が下がり、フィルダムの非線型性があることがわかる。ただし、図-10において、基礎の加速度の大きなものは、周波数特性が堤体の固有周期に比して高周波側にあるので、加速度増大に伴う応答倍率の低下を、減衰の増加による非線型性のみで説明するのは正しくはない。基礎の加速度が10gal付近のものは、周波数が堤体の固有周期に近く、堤体中のひずみも 1×10^{-5} 程度で小さく、減衰も小さいために5～6倍の応答倍率を示している。

以上、解析および実測結果を総合するならばフィルダムの応答倍率は、基礎と同一位相時に1.5倍、天端が最大加速度となるとときに3倍程度を考えれば、十分であろう。

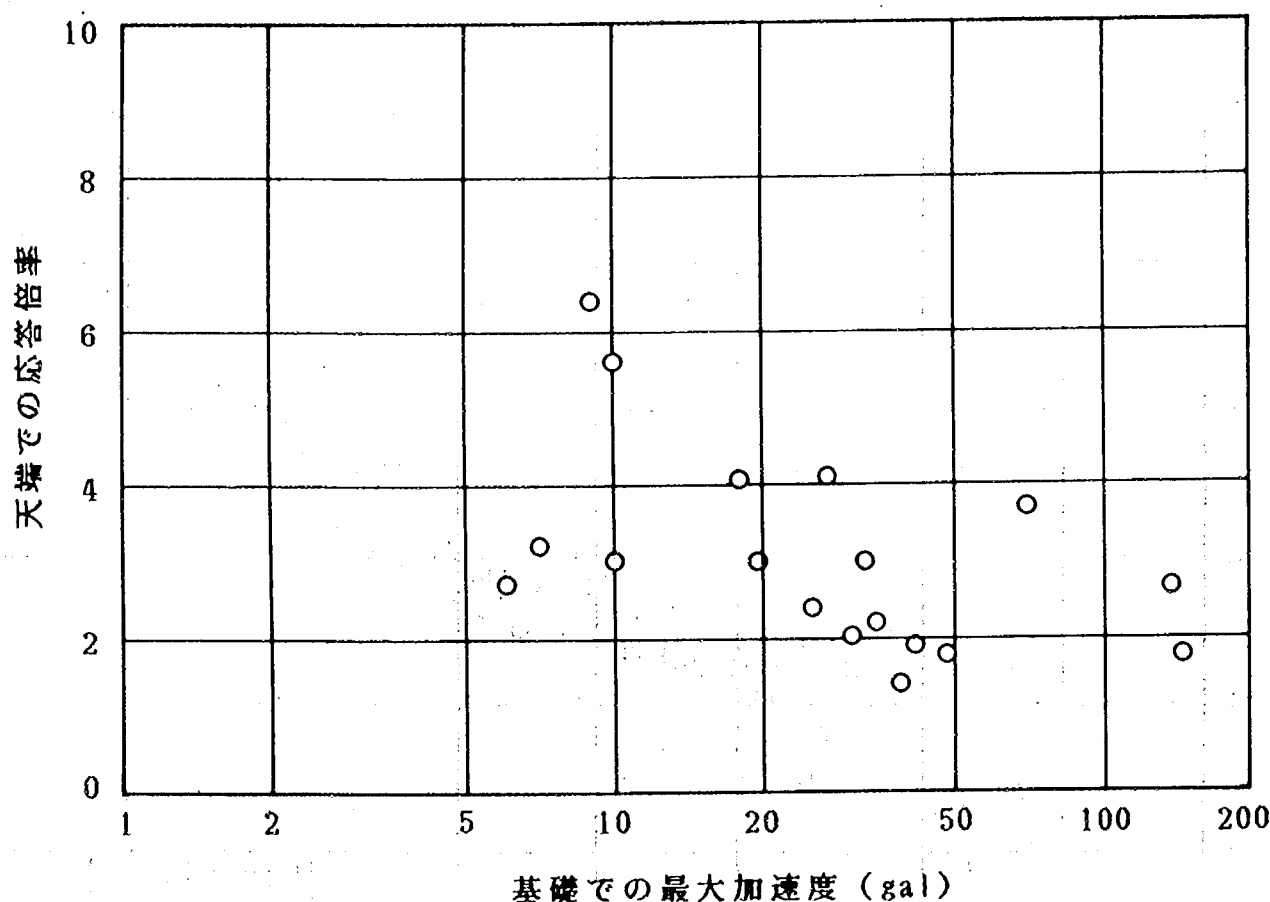


図-10 フィルダムの実測応答倍率（上下流方向，参考文献8）
の資料に新しいデータを加えてある）

4. ロック材料のせん断強度

ロックフィルダムの安定計算に用いるせん断強度は、三軸試験あるいは一面せん断試験等の室内試験結果に基づいて決定されている。具体的には、3 または 4 程度の相異なる拘束圧下で得られたせん断強度を、モールの破壊包絡線が直線であることを仮定し、粘着力および内部摩擦角を求める。このとき、ロック材料の場合、試験結果から得られた粘着力成分は、見掛けの粘着力と称して、設計上は考慮しない場合が多い。それは、ロック材料のような粗粒材料の場合、破壊包絡線から見掛けの粘着力が得られても、拘束圧が零となったとき真に存在するとは考えにくく、実験上の精度等も考慮し、安全側で設計値を決めているわけである。

以上の考え方は、モールの破壊包絡線が直線で表されるという仮定に基づいているが、ロック材料のせん断強度の試験結果によれば、破壊包絡線は直線ではなく、原点を通る上に凸の曲線で近似できる。⁹⁾ これは、ロック材料の内部摩擦角は、拘束圧の増加に対して一定ではなく、減少していることを意味している。また、この内部摩擦角の拘束圧依存性は、砂についての精密な研究の他¹⁰⁾、ロック材についても他の少なからぬ研究者によっても指摘されている。^{11) 12) 13)}

図-11は、ロック材料の三軸圧縮試験結果の 1 例である。この図には、異なる 5 側圧を与えた場合の軸荷重のピーク値により、供試体の破壊時のモールの応力円が 5 個描いてある。また、これら 5 個のモール円の包絡線がこの供試体材料の破壊基準を与えたと考え、直線の包絡線および原点を通る曲線の包絡線も記入してある。

すなわち、垂直応力 σ'_n のときのせん断強度を τ_f とし、破壊包絡線が直線であるとする、

$$\tau_f = C' + \sigma'_n \tan \phi' \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし C' ; 見掛けの粘着力

ϕ' ; 内部摩擦角

前述の理由から $C' = 0$ とすると

$$\tau_f = \sigma'_n \tan \phi \quad \dots\dots\dots (3)$$

包絡線が曲線であるとし、曲線が簡単なべきの函数 $A(\sigma'_n)^b$ で表されたとすると、

$$\tau_f = A(\sigma'_n)^b \quad \dots\dots\dots (4)$$

さて、図-11の場合、式(2)、(4)における強度定数は、 $C' = 1.16 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\phi' = 40.69^\circ$ 、 $A = 1.411$ 、 $b = 0.844$ であり、図-11からもわかるように $4 \text{ kgf/cm}^2 < \sigma'_n < 12 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲では式(2)と式(4)はほぼ同一の τ_f を与える。したがって、円弧滑り計算において、滑り面に働く σ'_n が、この範囲にあれば、式(2)と式(4)は、ほぼ等しい安全率を与えるはずである。また、式(3)は、式(2)よりも常に小さな τ_f を与えることは言うまでもなからう。

さて、図-11において、 $\sigma'_n < 4 \text{ kgf/cm}^2$ の応力の小さな領域で、式(2)または(4)のどちらが適切かは、

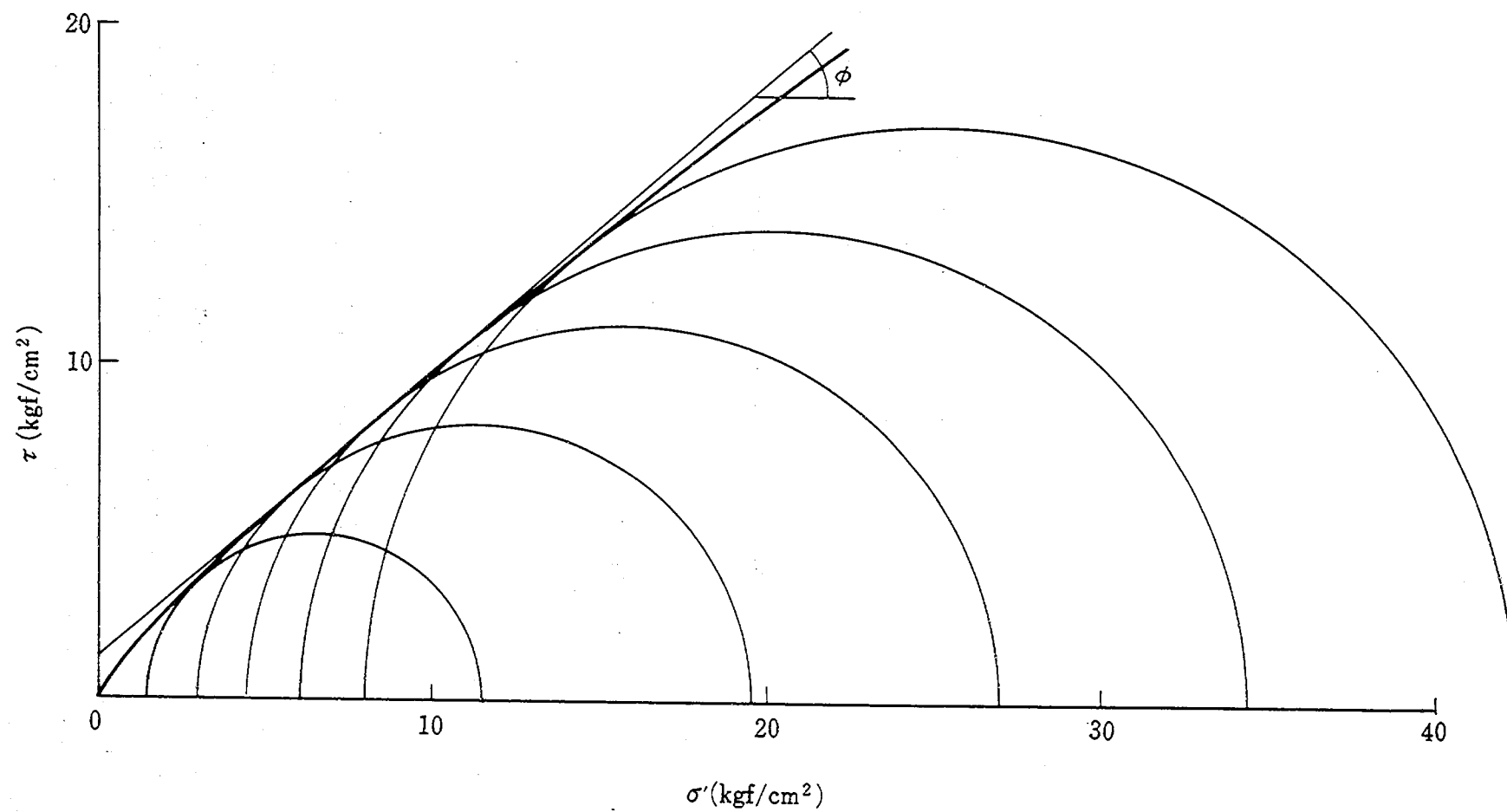


図-11 5個のモールの応力円

は、重要な問題である。ロック材料を試験する三軸試験機は、通常大きな側圧での試験を前提として製作してあるから、低拘束圧下でのせん断強度を精度よく求めることは、容易ではない。

図-12は、軸荷重および側圧を低荷重用に改造した三軸試験機により、求めたモールの応力円である。拘束応力は0.2、0.4、0.6、0.8kgf/cm²の4ケースであり、試験にあたっては細心の注意を要する応力条件である。これによると、低拘束圧の状態では、包絡線が曲がっていること、あるいは拘束圧が小さいほど内部摩擦角が大きくなっていることがわかる。

図-12においても、破壊包絡線は、式(4)で表されるようであるが、極めて小さな σ'_n に対しても、式(4)が適用できるかどうかは疑問がある。ここで粘着力を零とし、一個のモールの応力円へ原点から接するように引いた直線の勾配を内部摩擦角 ϕ'_0 としたとき、次式が成り立つ。

$$\phi'_0 = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_{1f} - \sigma'_3}{\sigma'_{1f} + \sigma'_3} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし

σ'_{1f} ; 破壊時の軸応力

σ'_3 ; 側圧

一方、式(4)が成り立つとして、これから ϕ'_0 を表現すると

$$\phi'_0 = \tan^{-1} \frac{\tau_f}{\sigma'_n} = \tan^{-1} A (\sigma'_n)^{b-1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(6)において、図-11の $A=1.411$ 、 $b=0.844$ を仮定し、 $\sigma'_n=0.1\text{kgf/cm}^2$ とすると $\phi'_0=63.7^\circ$ となる。 $\sigma'_n < 0.1\text{kgf/cm}^2$ のような低拘束圧下の ϕ'_0 は、実験で確かめているわけではなく、 σ'_n の小さいときに式(4)がせん断強度の表示式として適用性を持つかどうか疑わしい。しかし、このことは、式(4)を後述の簡便分割法による円弧滑りの安定計算に用いる際大きな欠点とはならない。それは、数m以下の土被りの表層滑りの安全率を求めるとき以外は、滑り円弧の大部分において $\sigma'_n > 0.5\text{kgf/cm}^2$ の条件で式(4)を使えるからであり、問題となるのは円弧が斜面と交わる表面のごく一部であり、 σ'_n が小さくなる場合それに対応するスライスの面積も小さくなり、全体の計算には支障がない。

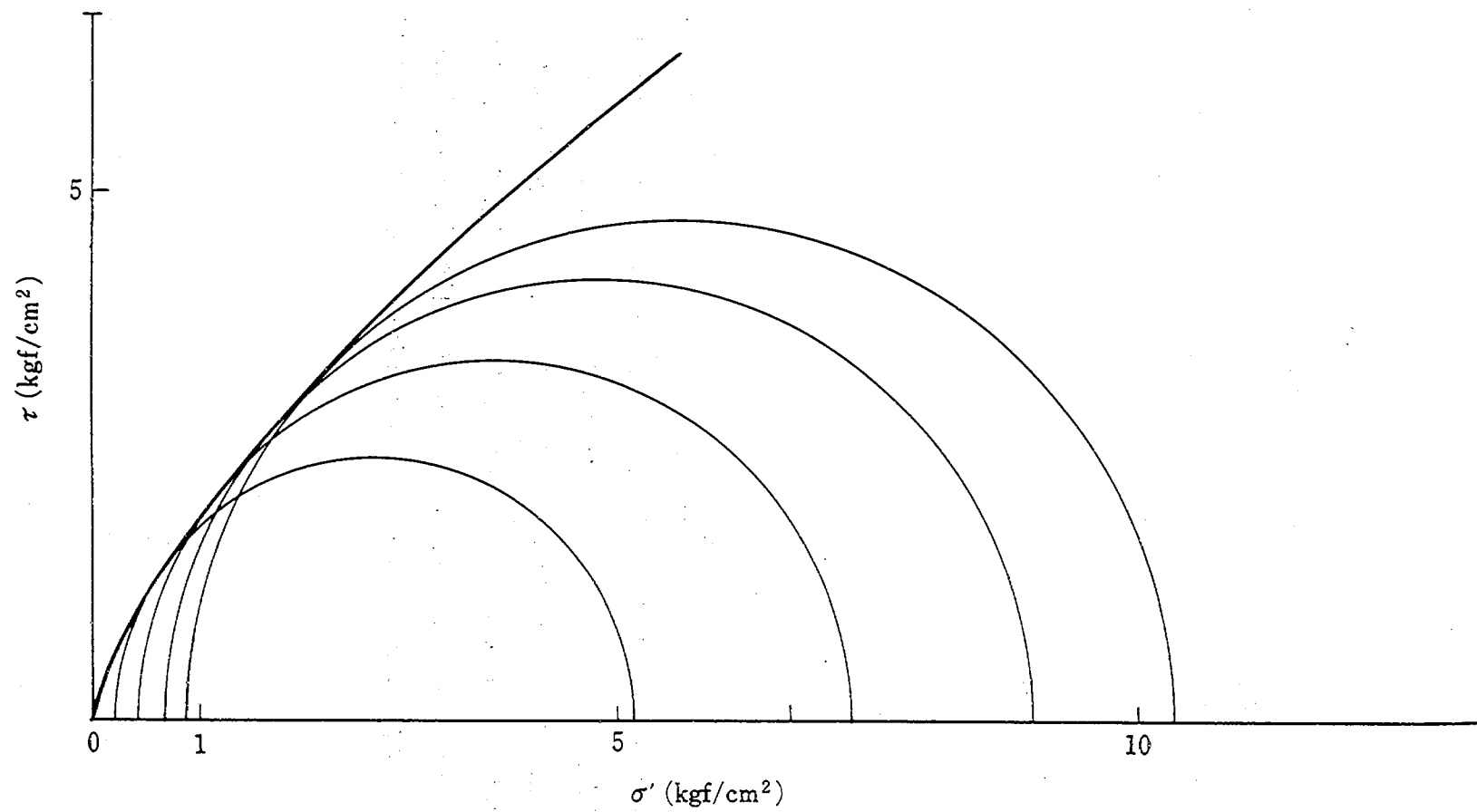


図-12 低拘束圧下における4個のモールの応力円

5. モデルダムと材料

モデルダムの滑りに対する安定計算を実施するわけであるが、その断面を図-13に示す。ダムの高さは81m、上流・下流法勾配は、それぞれ1:2.6、1:2.0である。この断面は、建設省が現在施工中の七ヶ宿ダムにほぼ等しく設定してある。

堤体の円弧滑りによる破壊を考えたとき、破壊の様相は滑り面上の各部分において異なり、大まかに圧縮せん断・単純せん断・伸張せん断状態に分けられる。またダム軸方向にはひずみが零である二次元の滑りで安定性を検討していることから、破壊は平面ひずみ状態を仮定しているが、ここでは通常の室内における三軸状態の圧縮試験から材料のせん断強度を定めている。すなわち、ロック材料については図-14、フィルタ材料については図-15を用いて、式(2)の C' と ϕ' 、および式(4)の A と b を決めた。

この結果を表-1に示す。

表-1 堤体材料の強度定数

	せん断抵抗角 ϕ'	(見掛けの)粘着力 C'	式(4)によるせん断強度の係数 $\begin{matrix} A \\ b \end{matrix}$ (kgf/cm^2 の単位系)	湿潤重量	水中重量
ロック材	44.12°	1.54 kgf/cm^2	1.778 0.804	1.94 t/m^3	1.15 t/m^3
フィルター材	36.86°	0.55 kgf/cm^2	1.0 0.908	2.13 t/m^3	1.22 t/m^3
コア材	30°	1.00 kgf/cm^2		2.22 t/m^3	1.22 t/m^3

但し、コア材については式(4)によるせん断強度のとり方をしていない。

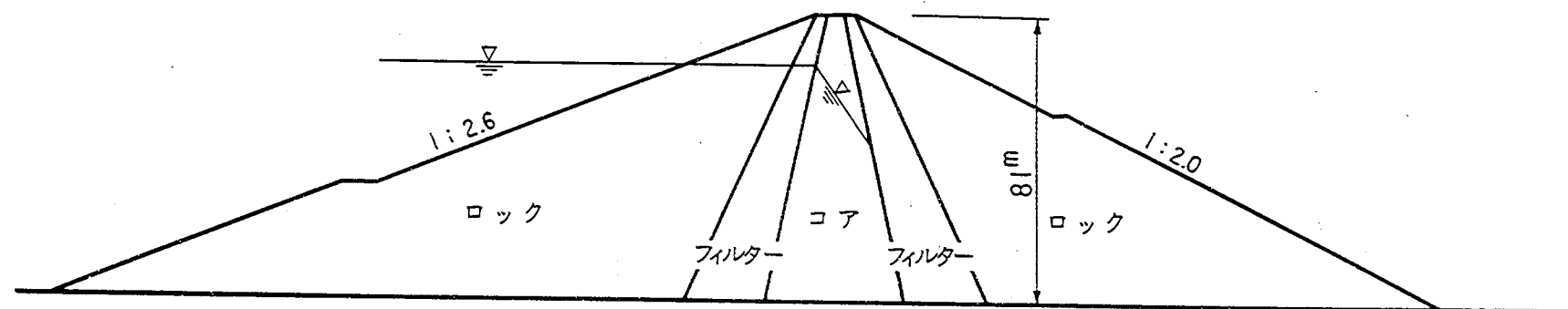


図-13 モデルダムの断面

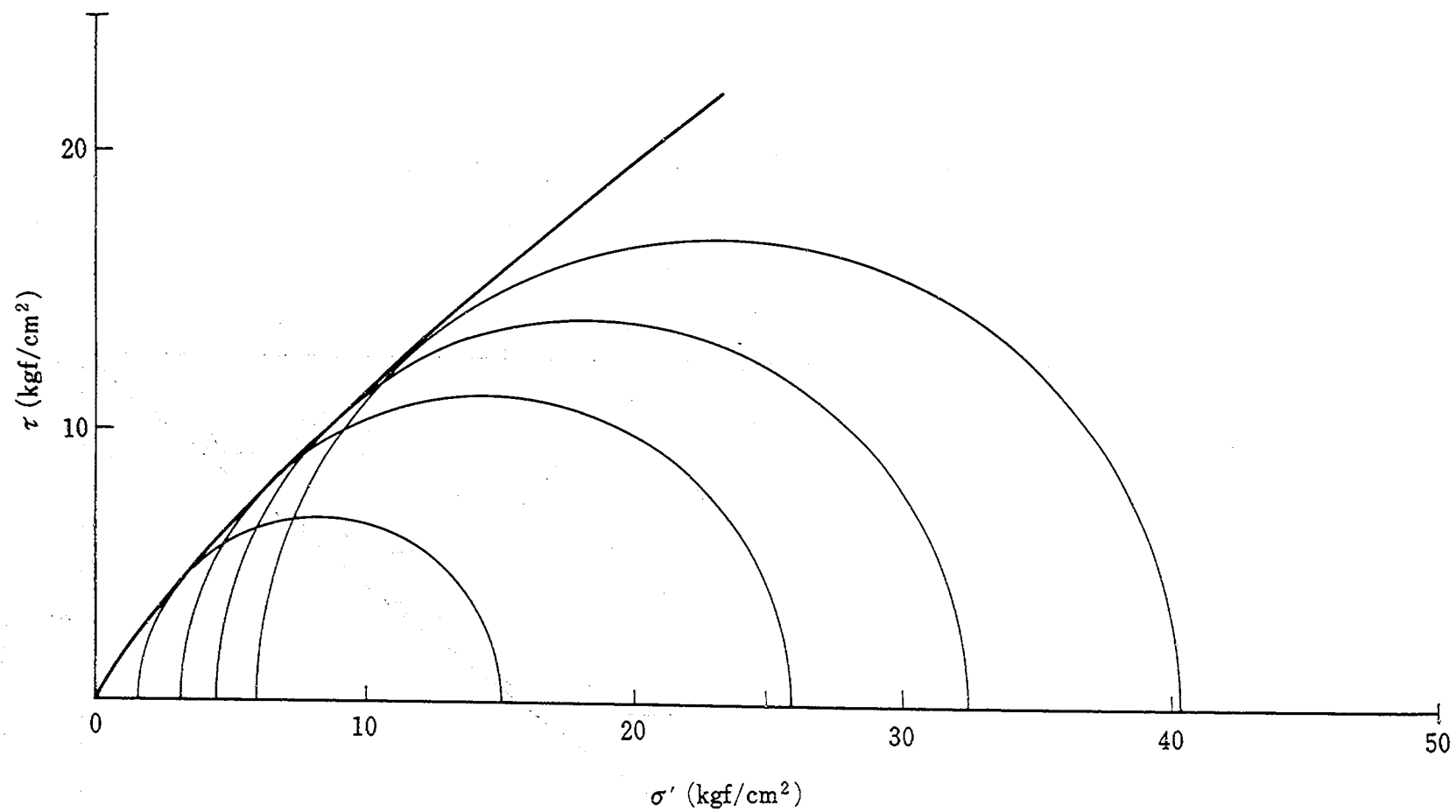


図-14 モールの応力円, ロック材

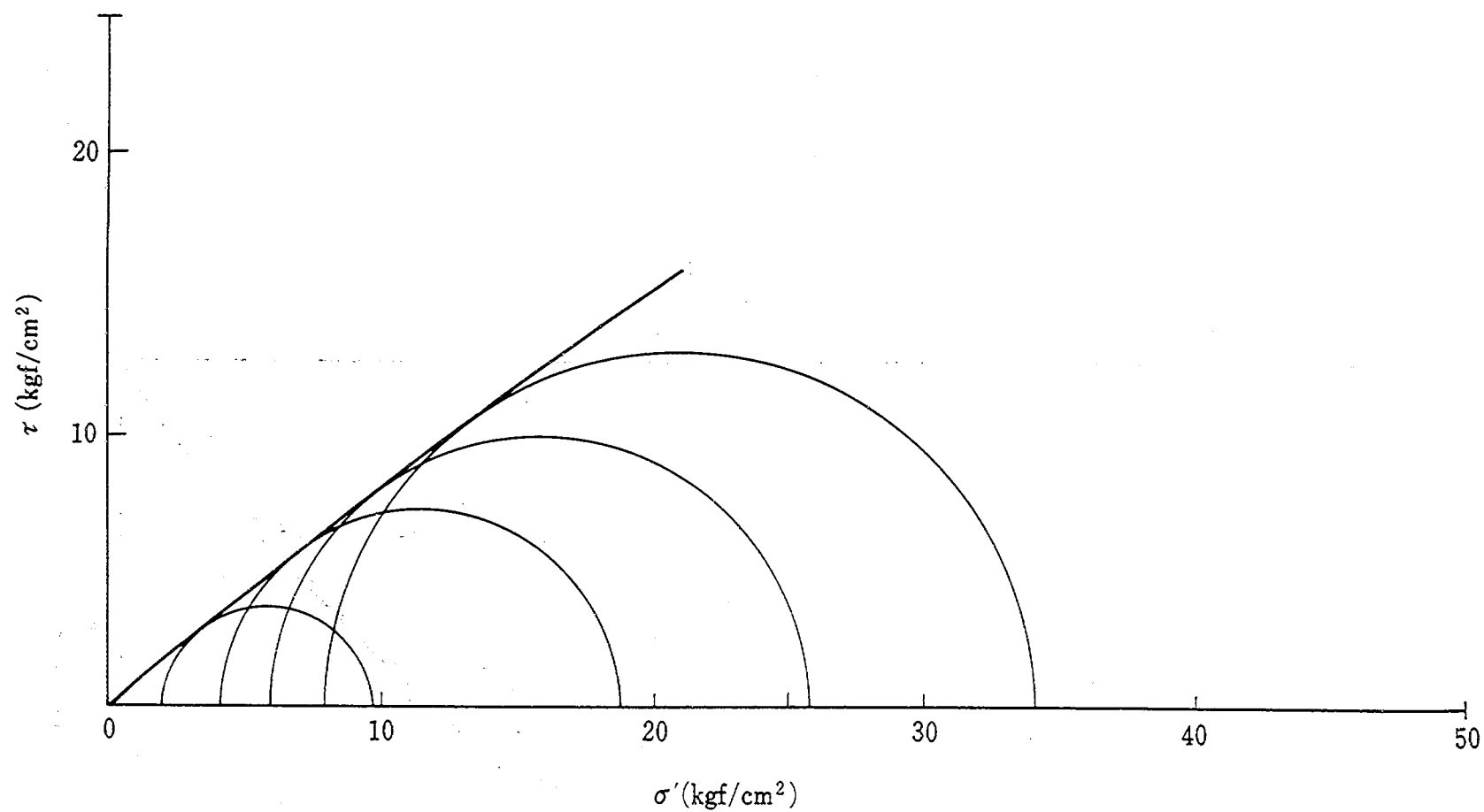


図-15 モールの応力円, フィルタ材

6. 安定計算

滑りに対する安定計算は、簡便分割法による円弧滑りを用いた。

円弧滑りの安全率には、抵抗モーメントと滑動モーメントの比により求まるモーメントによる安全率もあるが、本計算では、現行の設計法に基づいて、式(7)に示すように円弧の滑り面上のせん断抵抗およびせん断応力の比による安全率 F_s を用いた。

$$F_s = \frac{\text{滑り面上のせん断抵抗の和}}{\text{滑り面上のせん断応力の和}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

具体的には式(8)で与えられる。¹⁴⁾

$$F_s = \frac{\sum \{ C' \cdot \ell + (N - U - N_e) \cdot \tan \phi' \}}{\sum (T + T_e)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで C' ; 各スライスの滑り面の材料の粘着力

ϕ' ; 各スライスの滑り面の内部摩擦角

ℓ ; 各スライスの滑り面の長さ

N ; 各スライスの滑り面上に働く荷重の垂直分力

T ; 各スライスの滑り面上の接線分力

N_e ; 各スライスの滑り面上に働く地震荷重の垂直分力

T_e ; 各スライスの滑り面上の接線分力

U ; 各スライスの滑り面上に働く間隙水圧

7. せん断強度と安全率

ここでは、上流法面の2つの固定点を通る円弧について表面から深さ5mピッチ毎に、前述の式(2)~(4)の3種類のせん断強度の表示式を用いて安全率を計算した。式(2)あるいは式(3)を用いた計算では式(8)をそのまま用い粘着力 C' を考慮するか否かの差である。

一方、式(4)の場合には式(8)の分子は修正されて、式(9)によって計算を進めることになる。

$$F_s = \frac{\sum A \cdot (N - U - N_e)^b}{\sum (T + T_e)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、ここにおける A 、 b は式(4)における強度定数、他の記号は式(8)と同じである。

図-16に計算を行った円弧を示す。計算は貯水池が空虚で円弧を含む断面が湿潤状態、および湛水状態の2通り実施した。浅い円弧と深い円弧の垂直応力を図-16に示してあるが、当然のことながら湛水することによって減少している。

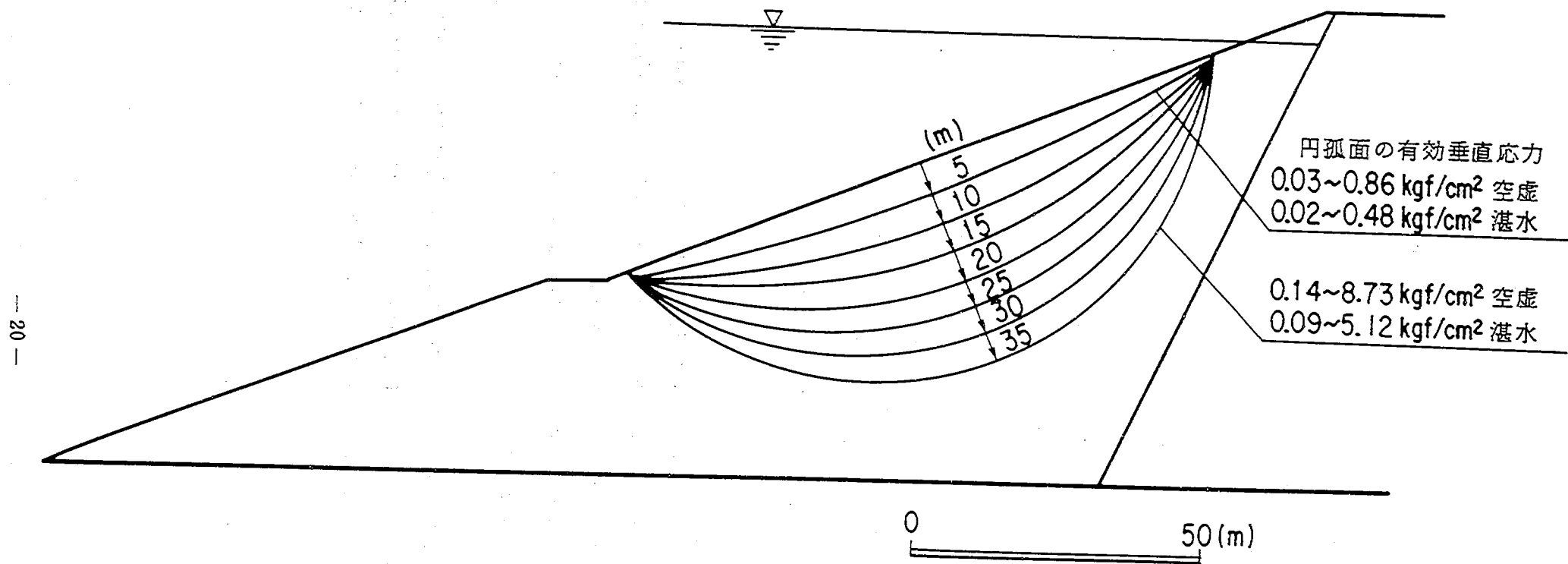


図-16 斜面上の2点を通る円弧（上流側）

図-17は、せん断強度をパラメータとして、滑り円弧の深さに対応した安全率を示している。図-17(a)は空虚時、図-17(b)は湛水時である。粘着力を考慮した式(2)以外は、全円弧に渡って空虚時の安全率が高くなっている。空虚時の方が安全率が高いのは、前述したように湛水による垂直応力の減少と飽和重量による地震力の増加が大きく影響しているのである。しかし式(2)の浅い円弧の場合、湛水時の方が空虚時よりも逆に安全率が高くなっているが、応力レベルの低い、浅い円弧では粘着力による抵抗力が大きいため湛水によるせん断抵抗力の減少分が小さく、滑らせようとする力の減少が大きく影響することによる。

全体的には、当然のことながら安全率は式(2)、式(4)、式(3)の順に小さくなる傾向にある。また、円弧が深くなるにつれて各式による安全率の差異は小さくなるが、図-11から理解されるように、垂直応力の増加に伴い各式によるせん断強度が一致してくるからである。

式(3)は従来のロックフィルダムの設計に用いる強度定数であるが、浅い円弧ほど低い安全率を与える。他方、破壊包絡線を曲線とする式(4)では、全体的に式(2)よりも安全率が大きくしかも浅い円弧が必ずしも弱点になることはないようである。

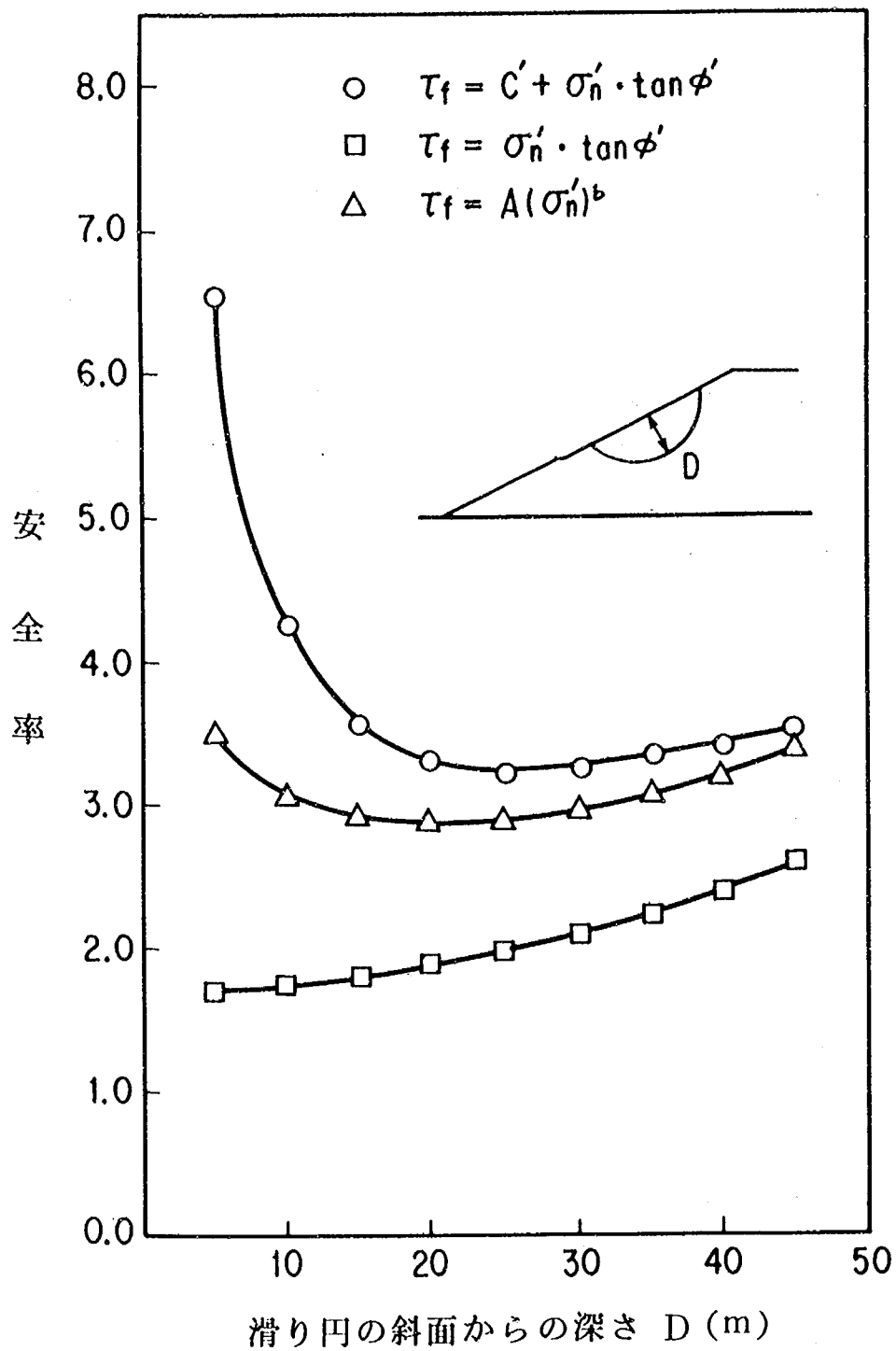


図-17(a) 斜面上の2点を通る円弧の安全率 (貯水位なし)

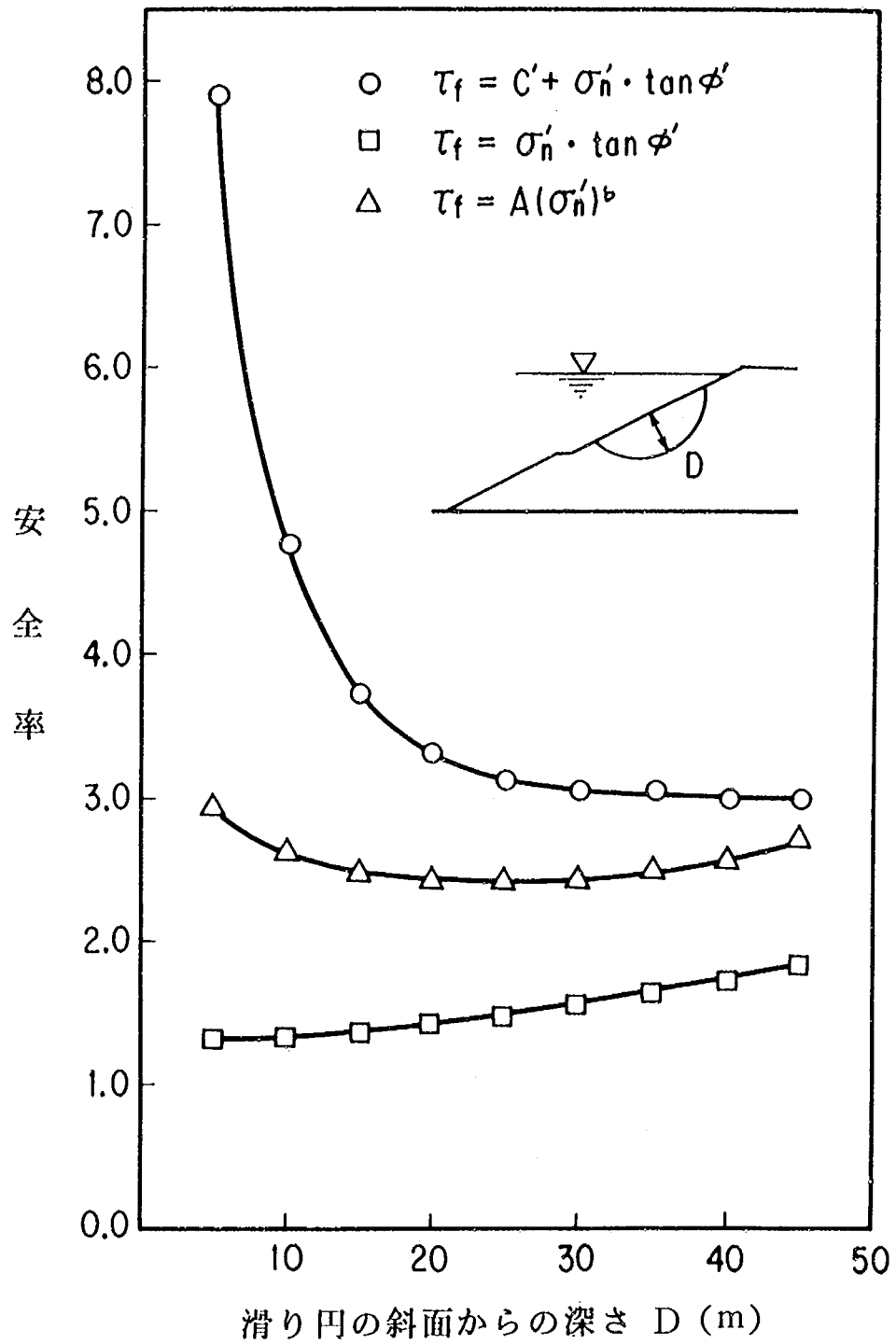


図-17(b) 斜面上の2点を通る円弧の安全率（湛水）

8. モデルダムの安全率

通常的设计計算では、円弧の中心座標をある点に定め、円弧半径を変えて安全率を求め、次に円弧の中心座標を変えて最小の安全率を捜す。図-18に半径の大きな円弧と小さな円弧の中心座標を示す。せん断強度を式(3)で表現したときには、モデルダム上流側の低い安全率は、主にこれら2つの中心座標を結ぶ線上付近に生じている。

図-19、図-20は各中心座標における滑り円の半径と安全率の関係である。ここでも安全率は、強度定数の式(2)、(4)、(3)の順に小さくなっている。また、式(2)、(4)の安全率は滑り円半径の増加に伴って一様に減じる傾向にあり、低下の度合は半径の小さな図-20が半径の大きい図-19よりも大きくなっている。

一方、式(3)では深部を通過する円ほど安全率が高くなる傾向にある。

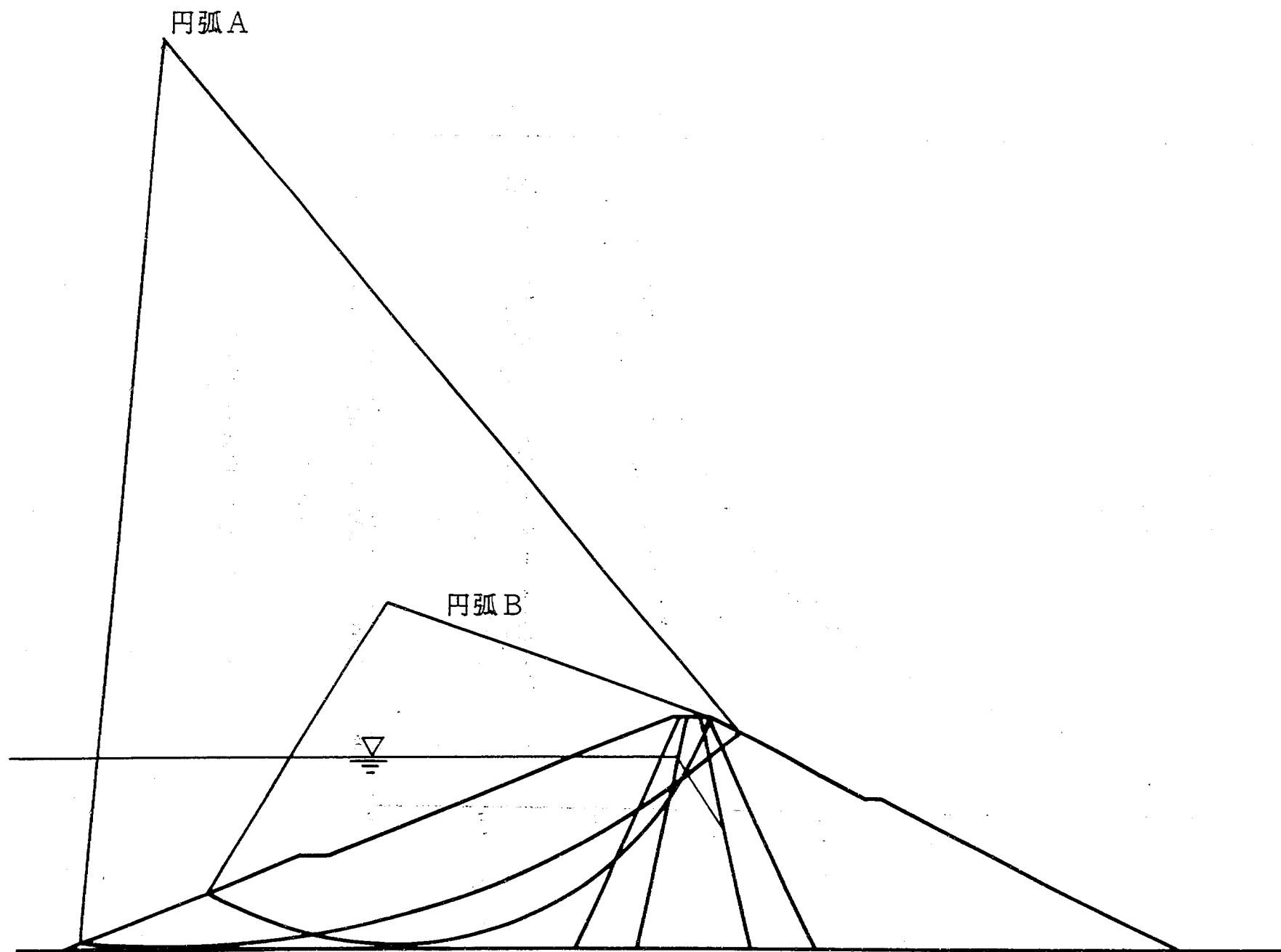


図-18 滑りを検討した円弧

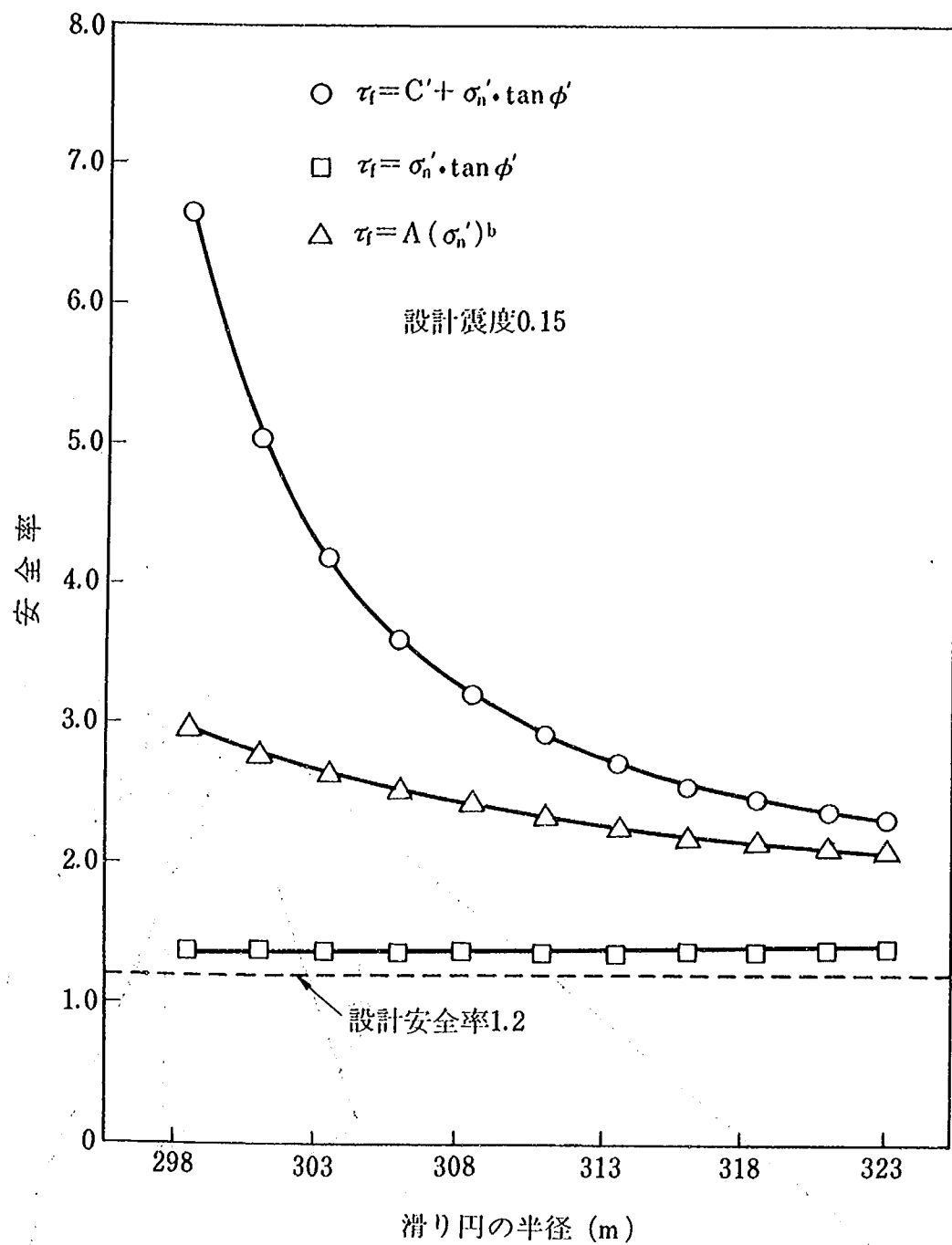


図-19 半径の大きな円弧Aの安全率

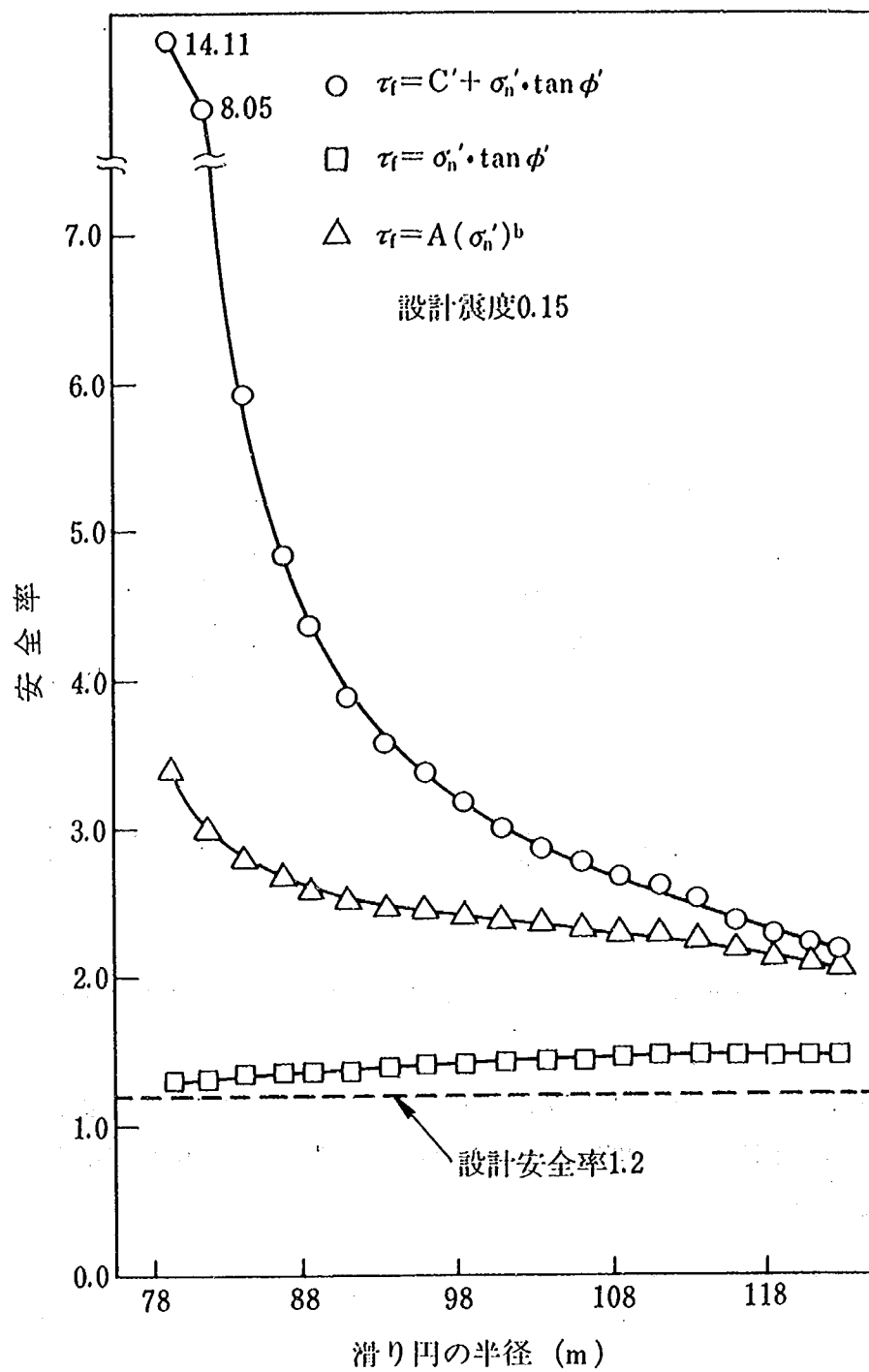


図-20 半径の小さな円弧Bの安全率

9. 設計震度と安全率

式(2)、(4)は、式(3)に比べると大きな安全率を与えるが、ここでは特に式(4)で計算を行ったときの設計震度と安全率の関係について述べる。

検討した円弧は図-18における円弧Aである。図-21に設計震度 k をパラメータとしたときの安全率を示す。設計震度は堤体の高さ方向に一様にかけているが、半径の増大に伴う安全率の低下傾

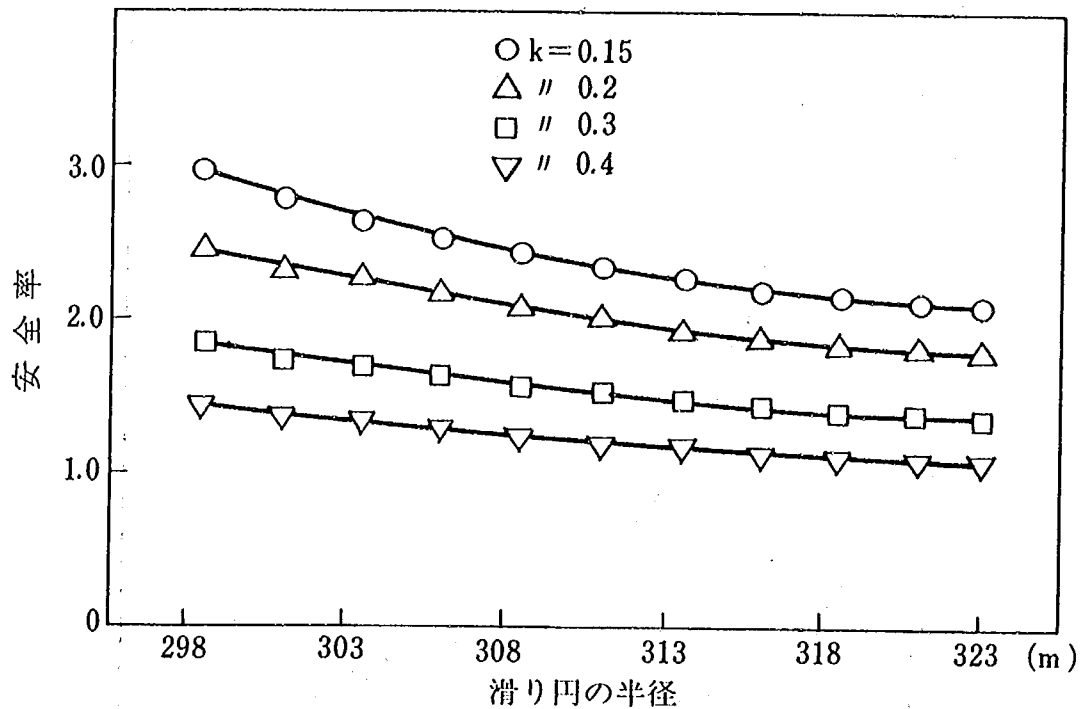


図-21 設計震度をパラメータとしたときの安全率（半径の大きな円弧A）

向はいずれの設計震度についても同様である。さて安全率は最大円において最小となるが、そのときの安全率と設計震度の関係が図-22である。これによれば設計震度0.43程度までに対して安全率は1.0を下回ることがない。

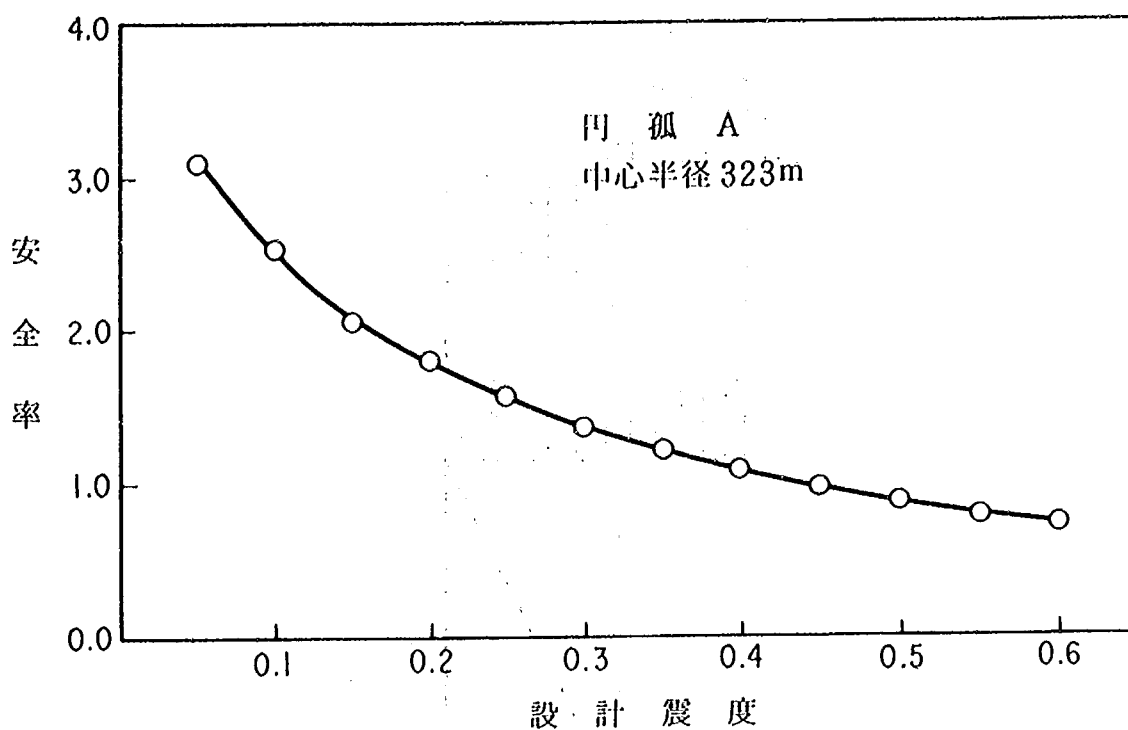


図-22 安全率と設計震度の関係

3章の所論に基づいて、震度が一定ではなく、深さ方向に震度分布を持つ場合の安全率を図-23に示す。なお、ここでの震度分布は、図中の実線に示されているように条件として最も厳しい共振時の振動形に基づいている。ただし、実際の計算では図中の破線に示されているように堤高の1/4以上が設計震度0.45、それより下部では高さを3等分し、設計震度をそれぞれ0.37、0.27、0.12と高さ方向に分布させてみた。安全率は堤体上流部をくまなく計算して得られている。最小値は設計震度が大きい部分を含む浅い円弧で生じており1.149で、ダム振動形を考慮した震度分布においても式(4)を用いた計算を行うと安全率1.0を下回らない。

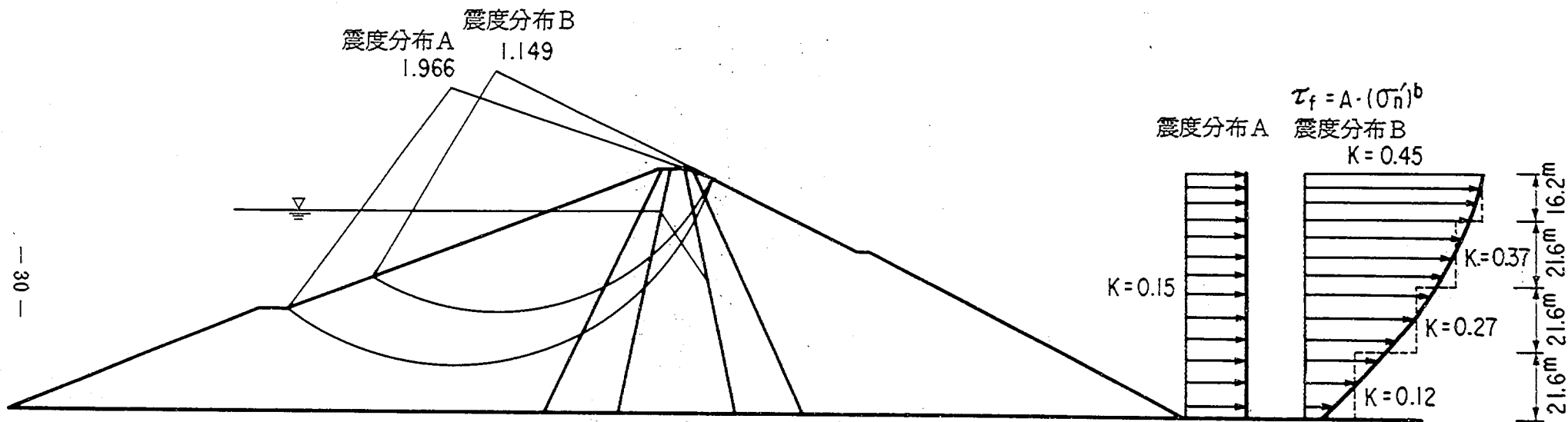


図-23 深さ方向に設計震度分布を持つ場合の安全率

10. 計算方法と安全率

6章の安定計算の項で、堤体の滑りに関する安全率は、計算方法によって異なると述べた。計算方法には種々あるが、ここでは簡便法とビショップ法（スライス側面の不静定力の鉛直成分は均合っていると仮定する簡便ビショップ法）の2方法を採用し、安全率の差を試算した。計算方法の違いとは、滑り面上の垂直応力を求める仮定の差である。また、同じ仮定で滑り面上の垂直応力を求め、安全率を抵抗モーメントと滑動モーメントの比で定義するか、あるいは抵抗せん断力と滑動せん断力の比で定義するかによって安全率は異なってくる。

なお、ビショップ法による安全率 F_B は次式で定義される。

$$F_B = \frac{\sum_{i=1}^n \{ (c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi') / M_i(\theta) \}}{\sum_{i=1}^n (W_i \sin \theta_i + k W_i \ell_i)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし $\ell_i = \frac{i \text{ 要素の地震力の作用線と円弧中心の距離}}{\text{円弧の半径}}$

$$M_i(\theta) = \cos \theta_i + \frac{1}{F} \sin \theta_i \cdot \tan \phi'$$

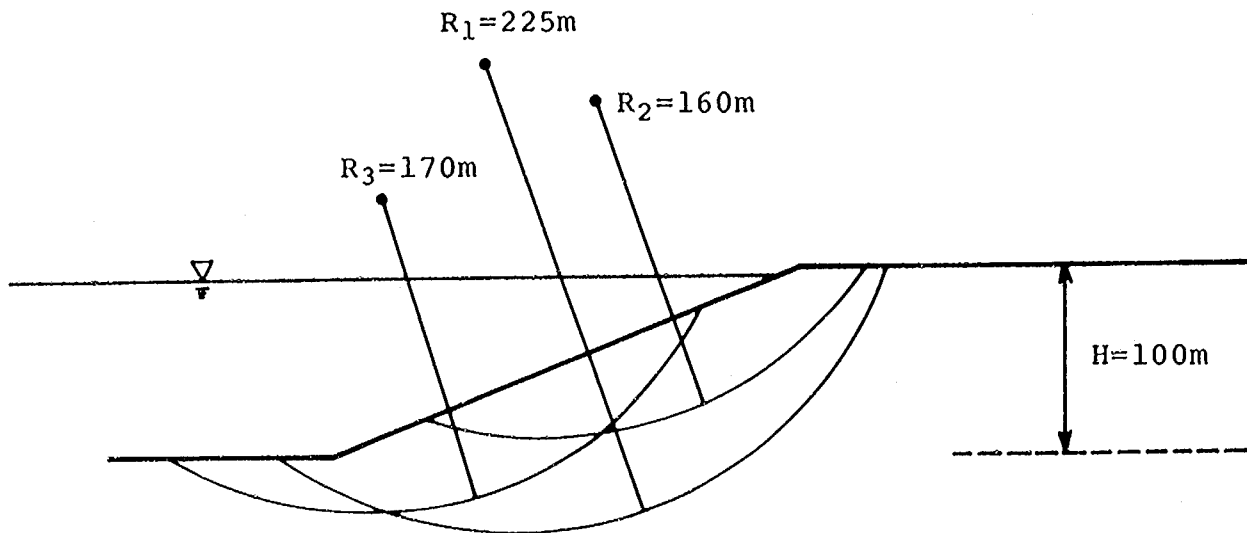
- i ; スライスの番号
- θ_i ; 滑り面が水平面となす角
- c' ; 粘着力（有効応力表示）
- ϕ' ; 内部摩擦角（有効応力表示）
- W_i ; スライス重量
- u_i ; 滑り面上の間隙水圧
- b_i ; スライスの幅
- k ; 震 度

ビショップ法では、繰り返し計算が必要であるが、一般に収束性は良く数回程度で十分で、パーソナルコンピュータで計算可能である。なお式(6)はモーメントで定義した場合の安全率であり、せん断力による定義では $\ell_i = 1.0$ となる。

まず、せん断力定義の安全率のときの、簡便法とビショップ法による安全率の差を図-24に示す。すなわち、ビショップ法の方が簡便法よりも10~20%大きな安全率を与える。

次に簡便法の場合、モーメントによる安全率とせん断力による安全率を、図-16に示した円弧について、図-25に示す。両者は、浅い円弧では差は少ないが、深くなるとモーメントによる安全率が、せん断力による安全率よりも大きくなる。また、せん断強度を $\tau_f = C' + \sigma'_n \tan \phi'$ 方式および $\tau_f = A(\sigma'_n)^b$ 方式で表わしたとき、モーメントによる安全率も中程度の深さの円弧のとき最小の安全率となる。

以上の結果ビショップ法の安全率は簡便法の安全率よりも10~20%大きいことがわかった。また、モーメント定義の安全率は、特に深い円弧においては、せん断力定義の安全率より大きい。本来、



(1) 空虚時

すべり円弧	安全率		$\frac{F_B}{F_S}$
	簡便式 F_S	ビショップ式 F_B	
R_1	1.438	1.622	1.13
R_2	1.556	1.758	1.13
R_3	1.361	1.578	1.16

(2) 貯水時 (水深 95m)

すべり円弧	安全率		$\frac{F_B}{F_S}$
	簡便式 F_S	ビショップ式 F_B	
R_1	1.262	1.446	1.15
R_2	1.249	1.419	1.14
R_3	1.342	1.577	1.18

計算条件

分割数 = 16

$\gamma_{sat} = 2.1\text{t/m}^3$

$\gamma_t = 1.9\text{t/m}^3$

$c = 2\text{t/m}^2$

$\phi = 35^\circ$

$k = 0.12$

図-24 簡便式とビショップ式の比較

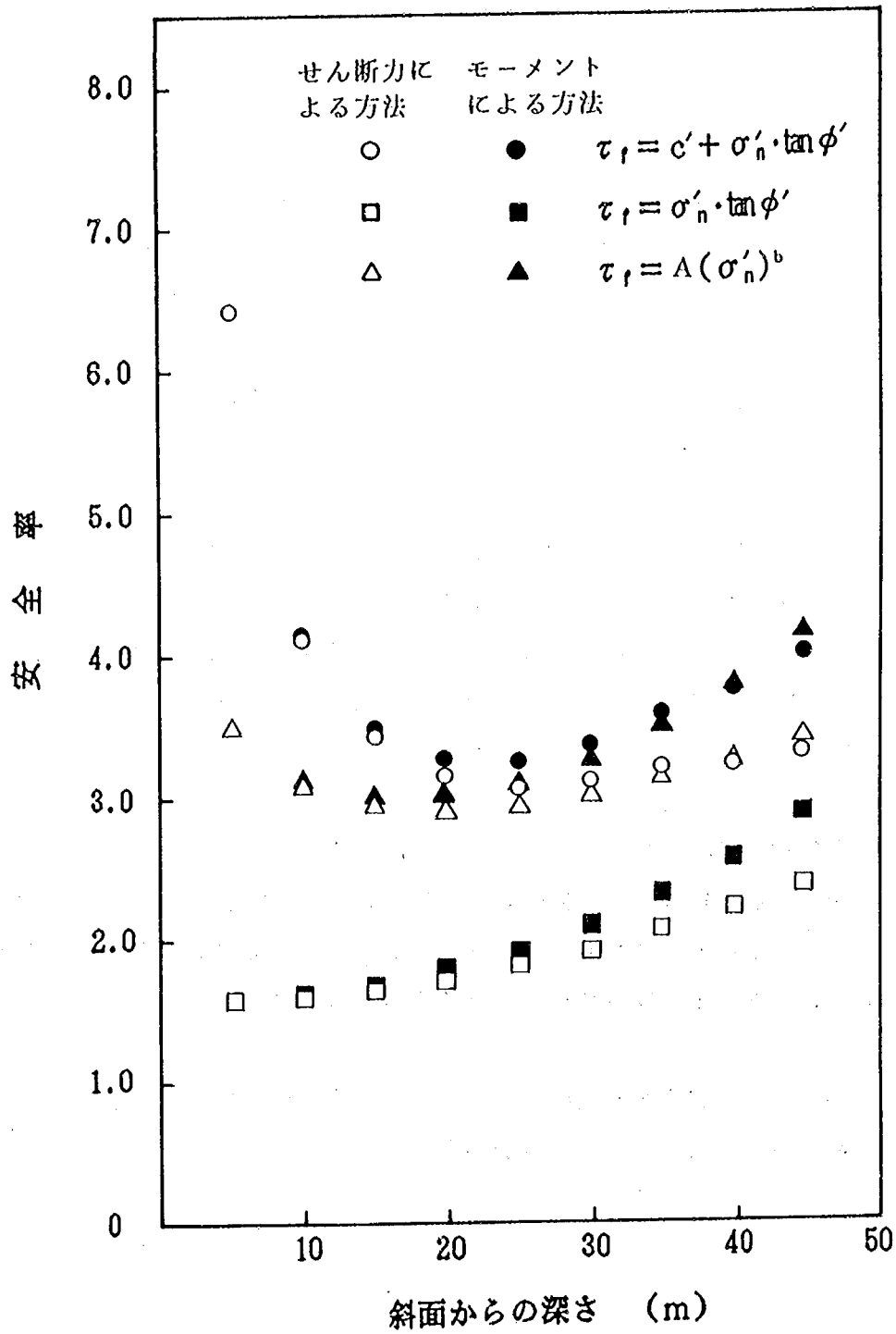


図-25 斜面上の2点を通る円弧の安全率（せん断力による方法とモーメントによる方法）

円弧滑りに対する安全率はモーメントで定義されており、滑り面の形状を円弧と仮定するときには、モーメントによる安全率を採用すべきであると考える。

11. ま と め

以上の検討から次の結論を得た。

解析および実測によれば、大地震時の共振状態におけるフィルダムの応答倍率は、3倍程度である。深さ方向に設計震度を振動形を考慮した形に設定し、かつロック材料の内部摩擦角の拘束圧依存性を考慮した安定計算が、フィルダムの耐震安定計算法として検討に値する。設計震度とせん断強度が、安全率に対して与える影響は次の通りである。

- 1) せん断強度として式(2)、(3)、(4)のどれを採用するかによって、堤体の滑りに対する安全率は大きな影響を受ける。同一の滑り円弧に対しては、当然のことながら、式(2)、(4)、(3)の順に大きな安全率となる。安全率の差は表層を通る円弧ほど大きい。
- 2) 最小の安全率を与える円弧については、式(2)または(4)のときは、同一中心座標の円弧に着目した場合、表層ほど大きな安全率となり、式(3)では表層の滑りが一番小さな安全率を与える。
- 3) 設計震度に関して、モールの破壊包絡線を曲線とした式(4)を使えば設計震度が一定のとき0.4程度まで安全率1.0を下回ることはない。また応答倍率を考慮した震度分布においても天端で0.45程度でも安全率は1.0を下回らない。現実には大きな加速度を受けて、フィルダムが安定なことが説明できる。
- 4) 式(4)と図-2の震度分布の組み合わせた安定計算法が検討に値する。
- 5) モーメント定義の安全率は、特に深い円弧においては、せん断力定義の安全率より大きい。本来、円弧滑りに対する安全率はモーメントで定義されており、滑り面の形状を円弧と仮定するときには、モーメントによる安全率を採用すべきであると考える。

謝 辞

本論文をとりまとめるに当たり、土木研究所フィルダム研究室各位特に志賀三智、大久保雅彦両技官には大変お世話になりました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松本徳久, 安田成夫, 志賀三智; 「ロックフィルダムの地震時挙動」, 第18回地震工学研究発表会, 土木学会, 1985
- 2) N.Matsumoto, " Comparison of Measured and Computed Response of Gosho Dam due to two Earthquakes " , International Symposium on Earthquakes and Dams. Vol.2, Beijin, China, May, 1987
- 3) 松本徳久, 安田成夫, 大久保雅彦; 「粗粒材料の動的剛性率, 減衰比およびポアソン比」, 土木技術資料, Vol.28, No.7, 1986
- 4) 松本徳久; 「ダムの耐震設計北京シンポジウム」, ダム技術, Vol.5, No.4, pp.16-24, 1987
- 5) H.Watanabe, S.Sato and K.Murakami, " Evaluation of Earthquake Induced Sliding in Rockfill Dams " , Soils and Foundations, Vol.24-3, 1984
- 6) 望月秋利, 三笠正夫; 「フィルダムの安定解析法」, 土と基礎, Vol.32-4, pp.19-26, 1984
- 7) 松村孫治, 「地震動による土堰堤の変形」, 内務省土木試験所報告, No.28, 1934
- 8) 松本徳久, 安田成夫, 志賀三智; 「ダムサイトで観測された地震動の特性」大ダム, No.108, 1984
- 9) 松本徳久, 渡辺和夫; 「ロック材料のせん断強度」, 土と基礎, Vol.35-12, No.359, pp.49-54, 1987
- 10) 龍岡文夫, プラダンテージ, 林煥群, 堀井宣幸; 「各種のせん断試験による砂の内部摩擦角」, 土と基礎, Vol.35-12, No.359, pp.55-60, 1987
- 11) Marsal, R.J.(1967); "Large Scale Testing of Rockfill Materials", Proc. of ASCE, Vol.93, SM2, pp.27-43
- 12) de Mello, V.F.B.(1977); "Reflections on Design Decisions of Practical Significance to Embankment Dams", Geotechnique, 27-3, pp.279-355
- 13) Charles, J.A. and Wattsk.s.(1980); "The Influence of Confining pressures on Shear Strength of Compacted Rockfill " , Geotechnique, 30-4, pp.353-367
- 14) 北条紘次, 原田譲二; 「改訂ダム設計基準によるフィルダムの安定計算方法」土木技術資料, Vol.14-4, pp.41-55, 1972

フィルダムの耐震安定計算に
おける地震力とせん断強度

I S S N 0 3 8 6 - 5 8 7 8
土木研究所資料第2629号
昭和 6 3 年 (1 9 8 8)
松 本 徳 久 , 安 田 成 夫

キーワード：フィルダム, ロック材料, 耐震設計, 簡便分割法, せん断強度

要 旨 フィルダムが大きな地震動を受けたときの, 応答倍率と振動形を, 実験, 実測および解析から求めた。ロック材料の三軸試験結果によれば, モールの破壊包絡線は, 原点を通る上に凸な曲線で表される。そこで本論文では, 3 種の異なるせん断強度の表現を使い, 地震による応答を考慮したモデルフィルダムの安定計算を実施することにより, せん断強度の表現方法がどのように安全率に影響を与えるかを論じたものである。



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所
フィルダム研究室
行

No. 16

No. 16

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 2629号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印