

1. まえがき

現在原子力発電所の建設にあたっては、安全性の問題として構造物は直接強固な岩盤に支持されねばならず、後背地には切り取りによる長大な岩盤斜面が生じる。この斜面の安定性に関しては、非常に重要な問題にもかかわらず未解明の点を残しているのが現状である。このため、まず初めに土質構造物としての斜面の安定解析法である分割法を岩盤斜面に対して適用できるのか、できるとすればどのような仮定が必要かを解明することは実用上重要な問題である。

そこで、筆者らは平面すべりを仮定した岩盤斜面を対象に、2個のコンクリートブロックを用いたモデル実験を行い、分割法 (Kovari-Fritz 法¹⁾ および Janbu 法²⁾ を用いてその安定解析法を実施した³⁾。分割法では、それぞれの手法は不静定内力の取扱いに特徴がある。そこで、簡単なモデルで内力に関する検証を行った。

2. 実験方法

本実験は図-1に示すようにジャッキで任意に傾斜角を変化できる2枚の木製底板と、2個のコンクリートブロックからなる装置で行った。コンクリートブロックには、底面を種々の角度にしたものを作成したが、各々のブロックの重量はほぼ一定 (4.25 kgf) で、実験方法は以下の手順で行った。

- 1) 2つのブロックの角度に対して、底板の傾斜角をジャッキで調節し鉛直に接触した状態で底板上に置いた場合、すべりだすかすべらないかを判定する。
- 2) 1)の状態ですべりだす場合には、図-1のように斜面下側のブロック (以下ブロック1と記す。) に滑車を介して荷重を加え、すべりだす直前の外力 (支持力: R_1) を求める。
- 3) 次に、1)の状態ですべらない場合には、逆に上側のブロック (ブロック2) に荷重を加えすべりだす直前の外力 (稼動力: R_2) を求める。

ここで、ブロックと底板間およびブロック間の内部摩擦角によって、表-1に示すように実験は8つのケースに分けられる。 $\phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \phi^*$ はそれぞれブロック1と底板、ブロック2と底板およびブロック相互間の内部摩擦角を表す。また、表中太線部分は厚さ1.5mmのテフロンをはさんだ場合である。これらの摩擦角は実験前にブロックとばねばかりを用いて求めたもので、粘着力はゼロであった。実験の種類は以下に示す3種類である。

- a) 外力を作用させない場合 (実験Aと略称。)

表-1の1から8の8つのケースについて、すべるかすべらないかの挙動観察だけ行う。

- b) 外力を作用させる場合 (実験B)

前述の実験の手順 2), 3) で示したように、ケース1からケース8までの実験Aの結果に対して、ブロックに支持力または稼動力を与える。この場合、作用角と作用位置をパラメーターとし、図-2に示すように作用角は水平面に対して -30° , 0° , 30° の3通り、作用位置はブロックの重心高さを中心に3点を設定した。この場合実験は徐々に载荷・除荷を行い、

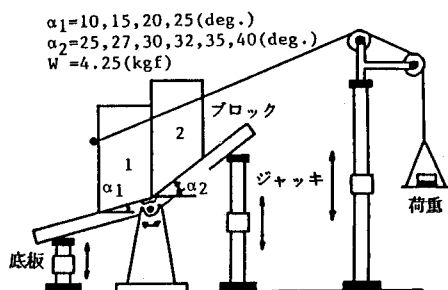


図-1 実験装置

表-1 実験の種類

	1	2	3	4	5	6	7	8
ϕ_1	25.5	25.5	20.1	20.1	25.5	25.5	20.1	20.1
ϕ_2	25.5	25.5	25.5	25.5	20.1	20.1	20.1	20.1
ϕ^*	36.9	24.8	36.9	24.8	36.9	24.8	36.9	24.8

(DEGREE)

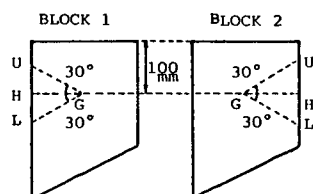


図-2 外力の作用点 (実験B)

極限平衡状態となった瞬間の荷重を測定し、同じ実験を少なくとも3回実施した。

c) 内力の作用位置を考慮した場合(実験C)

斜面の安定解析を行う場合、スライス間の内力の作用位置が問題となる。そこで、2つのブロック間に直径3mmのアルミニウム棒をはさみ、 $\phi^* = 0$ として実験Aと同様にすべる、すべらないを調べた。ブロック間のアルミニウム棒を固定するため、ブロック1にガムテープを接着面が表になるように張り付け、任意の作用位置を確保できるようにした。作用点の位置によりすべったりすべらなかったりした場合は、その臨界位置を測定した。実験はケース1・7の場合についてのみ行った。

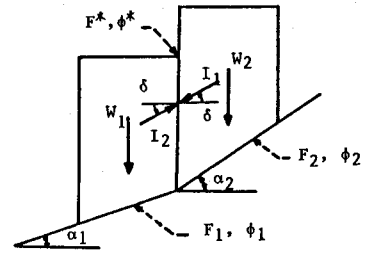


図-3 Kovari-Fritz法

3. 実験結果および解析結果

まず初めに実験結果を説明する手法としてKovari-Fritz法の概略を説明する。実際の岩盤斜面では、Kovari-Fritzはブロック間の内部すべりが十分な数だけ起こらないと、全体のすべりが生じないと考えた。ここで、この手法における仮定を列挙すると以下のようになる。

- 1) 岩塊からなる各ブロックはいずれも剛体。
- 2) 内部すべり面の数・位置・角度・強度パラメーターなどはいずれも既知。
- 3) 張力はブロック間で存在しない。
- 4) せん断抵抗はMohr-Coulombの破壊規準を適用。
- 5) 安全率は全すべり面(外部および内部)において等しい。

いま、外力の作用していない図-3に示す2ブロック間の内力(I_i ; $i=1,2$)は粘着力の無い場合、力のつり合いと破壊規準によって以下のような関数形で表せる。

$$I_i = f(F_i, W_i, \alpha_i, \phi_i, \delta) \quad (i=1,2) \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 F_i :ブロックと底板の安全率 W_i :ブロックの重量 α_i :底板の傾斜角 ϕ_i :ブロックと底板の内部摩擦角 δ :内力の作用角である。

また、内力の作用角は

$$\delta = g(F^*, \phi^*) \quad F^*, \phi^*: \text{内部すべりの安全率と摩擦角} \quad \dots \dots (2)$$

と表せ、 $I_1 = I_2$, $F_1 = F_2 = F^*$ を用い(1),(2)式でくり返し計算を行うと安全率が求まる。外力が作用する場合には、外力をW方向とI方向に分割することにより同様に求まる。Janbu法に関しては文献2)を参照されたい。

次に、実験結果と解析値を比較しながら考察を行う。

1) 実験A

実験Aは外力を作用させない場合である。まず始めに、予備実験として単一ブロックによる実験では、ほぼ $\alpha = \phi$ においてブロックはすべりだすという結果が得られた。そこで、単一ブロック実験ですべらなかったブロックを、2個のブロックではブロック1に、他をブロック2として使用した。4種類の α_1 に対して6種類に α_2 を変化させた192種類の実験について両解析結果は概ねうまく(解析結果が実験結果を説明できなかったものは5%程度)挙動を説明し得ていた。しかし、図-4に示すようにJanbu法による安全率の値はKovari-Fritz法に比べて約90~95%と小さくなっている。

次に、 $\alpha_1 = 10^\circ, 20^\circ$ のときの α_2 を横軸に、安全率の解析値を縦軸にとって図示するとそれぞれ図-5・6のようになる。ここで、パラメータとして8種類のケースをとっている。(a)はKovari-Fritz法、(b)はJanbu法による結果である。また、図中のプロット点は黒丸が実験結果と解析結果が一致した場合を、白丸は一致しなかった場合を表している。(a)図から α_1 にかかわらず安全率はケース1, 2, 5, 6, 3, 4, 7, 8の順に減少し、外部・内部すべり面の内部摩擦角 ϕ が小さくなるほど、安全率は低下する。また、ケース3, 5

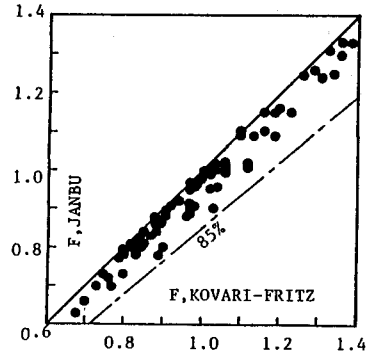


図-4 安全率の比較

の比較により外部すべりに対しては ϕ_2 の変化より ϕ_1 にわずかではあるが影響される。ケース1, 2・ケース7, 8より外部すべり面の内部摩擦角が変化しなければ、内部すべりの摩擦角が多少小さくなくても安全率にはあまり影響がないこともこれらの図から読み取れる。一般的に Janbu法では内部すべり面の摩擦角を考慮しないので、ケース1, 2の区別ができず同じ曲線で表され、実験結果との不一致もKovari-Fritz法と比べて多い。

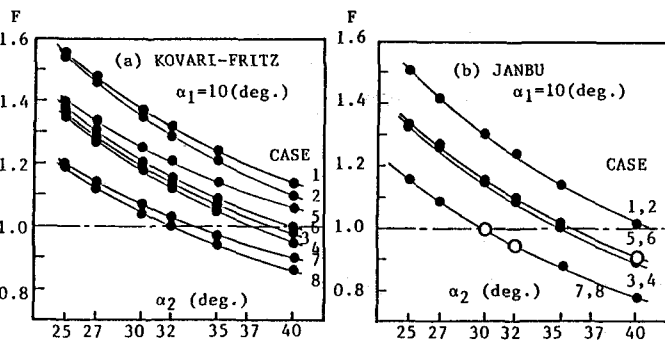


図-5 ケースによる安全率の比較 ($\alpha_1=10^\circ$)

実験Aの結果をさらに検討するために次のような実験を行った。Kovari-Fritz法から前述のように内力Iとその作用角 δ が求まる。そこで、2個のブロックの安定問題を計算から得られた内力Iを作用角 δ で作用させることで単一ブロックの問題として表し、Iと δ の値を検証した。ここで、作用点は重心高さとした。実験はブロック1に作用させる場合と、ブロック2に作用させる場合に分けられるが(各々102種類)、実験Aと比較すると20%は結果に差があった(安全率が1に近い場合)。

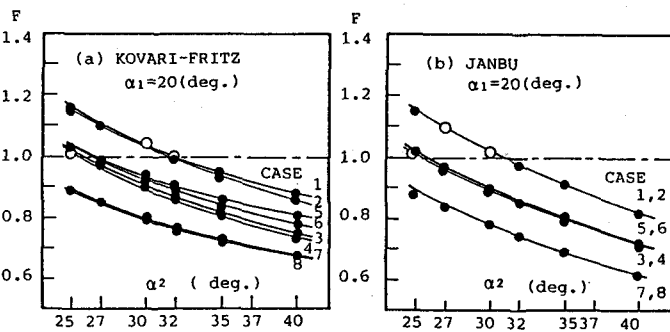


図-6 ケースによる安全率の比較 ($\alpha_1=20^\circ$)

2) 実験B

実験Bの結果の一例として、 $\alpha_1 = 15^\circ$ 、ケース2・4の結果を図-7に示す。図中の曲線は α_2 をパラメータとしたKovari-Fritzの理論曲線である。縦軸は外力の作用角を、横軸は水平外力が重心点を通る場合(図-2参照)の実験値を示しており、3回行った実験結果の平均値である。一般に、 $R_1 - \theta$ 関係は $\theta = 0^\circ$ 近傍に最小値を持ち、実験値と解析値を比較すると $\pm 40\%$ の範囲で解析値は実験値を説明できることが分かった。

次に、 R_1 の作用点の影響に関する結果であるが、図-8は図-2で作用点をHに取ったときの R_1 の値(R_{1H})と、作用点をU, Lに取ったときの R の値(R_{1U} , R_{1L})の比を、作用角 θ を横軸としてプロットしたものであり、ケース4、 $\alpha_2 = 15^\circ$ の結果である。底面中心まわりのモーメントを考えると、 R_1 が一定とすれば R_1 の作用線と底面中点との距離が大きいほど、ブロックに作用するモーメントは大きくなる。しかしながら、 R_{1U}/R_{1H} , R_{1L}/R_{1H} の値には一般的な相関は見られない。図-9 (a), (b)は横軸に R_{1H} 縦軸にそれぞれ R_{1L} , R_{1U} を取って、各ケースをパラメータとして図化したものである。図から、いずれのケースにおいてもプロット点は $\pm 30\%$ に点在している。このように、作用点を考慮して外力を与える場合、本研究のような簡単な場合でも、単に载荷ブロックのモーメントのみを考慮するのは不適当であり、実際には阿ブロックの底面傾斜角やブロック高さ等々が複雑にからみ合い作用点と外力の相関が定まると考えられる。これらの結果は、作用点を考慮しないKovari-Fritz法では説明できない。

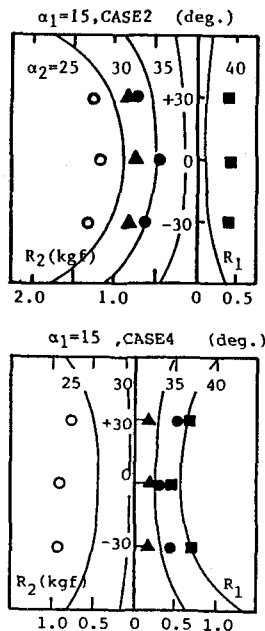


図-7 $R_1 - \theta$ 関係

3) 実験C

この実験は、内力をアルミ棒を用いて集中荷重に置き換えブロック間に相互作用させるため、ブロック間は接触面を持たず $\phi^* = 0^\circ$ となる。

作用点の検証方法は、実際には実験Bと同様に困難である。ケース1の結果を図-10に示すが、黒丸・二重丸・白丸はそれぞれ作用点の位置によらず安定・作用点の位置によって安定性が変化する・作用点の位置によらず不安定を表している。図中に示されるように、Kovari-Fritz法から求めた安全率が1に近い状態ではI₁の作用点によりブロックは安定だったり不安定だったりする。いま作用点高さをしとすると、この場合にはLには安定と不安定の境界値が存在し、これをL_cとするとL > L_cでは不安定であった。2個のブロックの接触相当長さをL*とし、クリティカルな状態についてのL_c/L*の値(%表示)を図中に記している。

実験Cでは、 α_2 の値が大きくなると、ブロック2が内力の作用点を中心に転倒するようなすべり方をした。このことは、内部すべり破壊のモードと違ったモードで、すべりが生じていると考えられる。

4. 結論

本研究の結果以下のような知見が得られた。

- 1) Kovari-Fritz法とJanbu法は2個のブロックによるモデル実験を概ね説明できた。しかし、前者に比べて後者の安全率は少し小さい。
- 2) 外部すべり面の内部摩擦角は、内部すべり面の内部摩擦角に比べて安全率に大きな影響を与える。
- 3) Kovari-Fritz法では力の作用位置に関して考慮していないので、本実験のような簡単なモデルでも説明できないことがある。しかし、実験モデルでは明らかに内部すべりが発生しているので、その挙動をある程度説明できる。
- 4) 内力の作用点に関しては不明な点が多く、さらに研究をする必要がある。

以上のように、2個のブロックによる実験から結論を急ぐのではなく、実験装置を改良し良いデータを取るとともに、さらに3個のブロックによる実験解析を実施し、岩盤斜面の安定性の問題について研究を行う予定である。最後に、本実験に協力してくれた元京大生平田靖郎君(現鹿島建設)に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Kovari, K. & P. Fritz (1977); Proc. 16th Symp. Rock Mech. ASCE, New York, pp. 25-34
- 2) Janbu, N. (1973); Embankment - Dam Eng., Casagrande Vol., John Wiley & Sons
- 3) 足立ほか(1986); 土木学会第41回講演会概要集, pp. 609-610

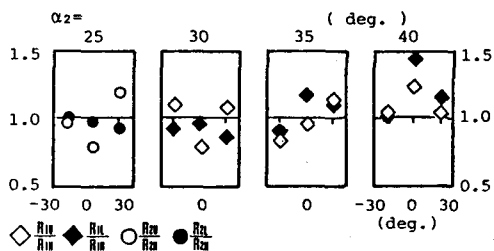


図-8 外力の作用点による R_1, R_2 の違い
(ケース4, $\alpha_1=15^\circ$)

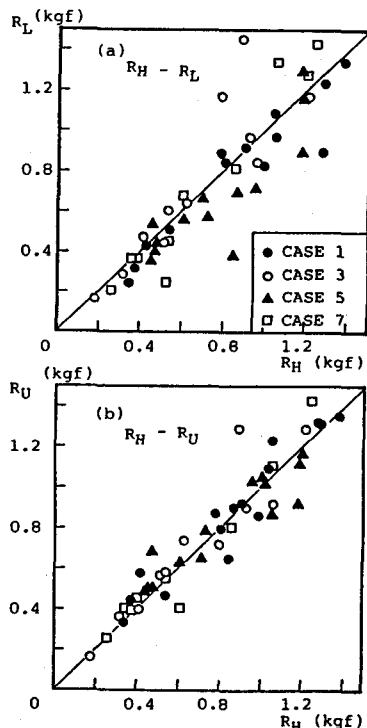


図-9 $R_{1H}-R_{1L}, R_{1U}$ 関係

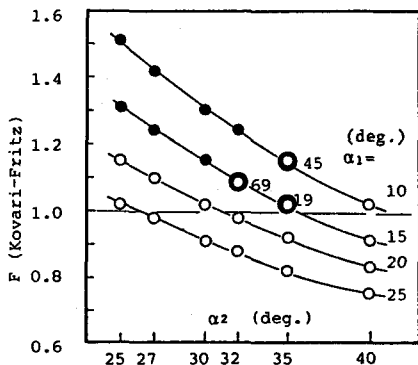


図-10 実験Cの結果(ケース1)

(103) A fundamental study on the stability of rock slopes
against plane failure

T. Adachi

M. Kimura

(School of Civil Engineering, Kyoto Univ.)

and

S. Nomura

(Takenaka-Doboku Co.)

The stability of rock slopes is a very important problem for foundation engineering. However there remain many unknown problems. At the beginning, practically it is valuable to study whether a slice method which is one of the ordinary stability analyses for the soil slopes is applicable to the rock slopes, and if necessary, to find what kind additional assumptions are required.

To realize the failure mechanism of rock slopes on a few plane surface, the simplest model tests are carried out by using two concrete blocks (See Fig.1). The parameters of this model test are the angle of a slope, the internal friction angle and the location of the internal force. The results of model tests are compared with two theoretical predictions, the Kovari-Fritz's method and the Janbu's method. The following results are obtained.

- 1) Generally speaking, the Kovari-Fritz's method and the Janbu's method can explain the behavior of the model tests with two concrete blocks. The predicted factor of safety by the Janbu's method, however, is somewhat smaller than that by the Kovari-Fritz's method.
- 2) The internal friction angle of the outer failure surface affects the factor of safety more than that of the inner failure surface.
- 3) The location of the internal force is not clear, therefore more precise and three or four blocks model test are necessary to study the failure mechanism of rock slopes.