

不連続性岩盤斜面の総合的安定性評価システムについて

名城大学 清水 泰 弘
名古屋大学 アイダン・オメル
名古屋大学 市川 康 明
名古屋大学 京谷 孝 史
名古屋大学 川本 眺 万
中部電力 土山 茂 希

1. はじめに

岩盤は、その成因とその後の地殻変動等に起因した多くの不連続面を内包している。これらの不連続面に内包する岩盤が形成する斜面の安定性を評価するためには、不連続面の方向と力学特性、岩石強度および斜面の幾何形状等を考慮しなければならない。また、この安定解析には、それぞれの破壊形態に適合した解析法を選ぶ必要がある。本研究では、不連続性岩盤斜面を対象として、現地調査結果のデータにもとずいて適切な解析法を選び解析を実行するシステムを開発したので報告する。

2. 不連続性岩盤斜面に対する総合的安定性評価システム

不連続性岩盤斜面の総合的安定性評価システムは、

システム1： 地質調査結果の整理と評価

システム2： 可能な破壊様式とそれに対応する安定解析の選択と評価

システム3： 不連続面群と岩石の力学特性の評価

システム4： 各種の破壊様式に対する安定解析

システム5： 総合評価

等のサブシステムから構成される。各サブシステムについて以下に説明する。

システム1： 地質調査結果の整理と評価

現地踏査により岩種とともに、断層、シーム、破碎帯、層理、節理等について詳細に調査する。不連続面についてはその方向、間隔、連続性、粗さ、壁面強度、間隙幅、充填物、浸透水、セットの数、ブロックサイズの各項目を調べる。これらの調査データを整理し斜面の地質構造を明らかにするとともにその後の解析に使用できる形でデータを入力する。

また、これらのデータから不連続面の方位 (dip direction) と傾斜 (dip) を赤道および極ステレオネット上に投影して表示する。併せて切取斜面の方位と傾斜を同じ図に投影表示する。さらに、この図に摩擦角 ϕ も加え、平面すべりやくさび形すべり等に対して安定性を評価する資料とする。

システム2： 可能な破壊様式とそれに対応する安定解析の選択と評価

不連続性岩盤斜面は、内包している不連続面の方向、間隔、連続性、ブロックサイズ等によりいろいろな破壊様式が考えられる(図-1)。この破壊様式は次のように大きく三つに分類することができる。¹⁾

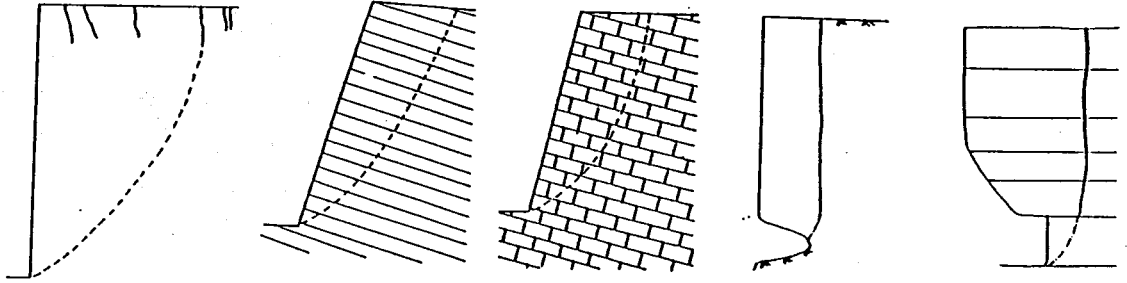
1) 岩石の強度のみに依存する破壊様式

a) せん断すべり破壊(図-1-a)

b) トップリング破壊(図-1-b)

A General System for The Stability Evaluation of Slopes in Discontinuous Rock Mass,
Yasuhiro Shimizu (Meijo Uni.), Ömer AYDAN, Yasuaki ICHIKAWA, Takashi KYOYA, Toshikazu KAWAMOTO
(Nagoya Uni.), Shigeki TSUCHIYAMA (The Chubu Electric Power Co. Int.,)

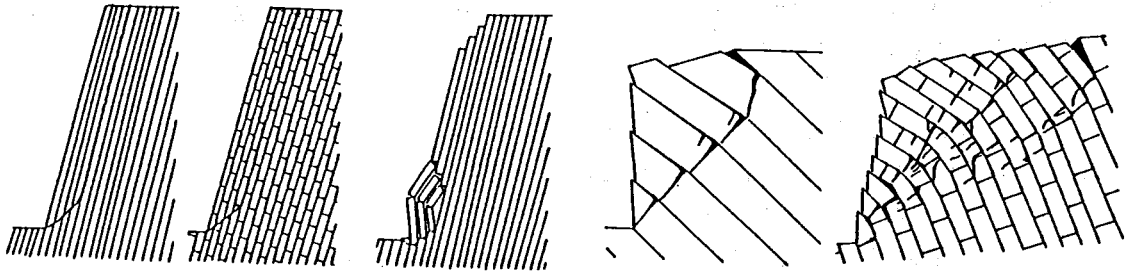
1) 岩石の強度のみに依存する破壊様式



(a) せん断すべり破壊

(b) トップリング破壊

2) 岩石と不連続面の強度に依存する破壊様式

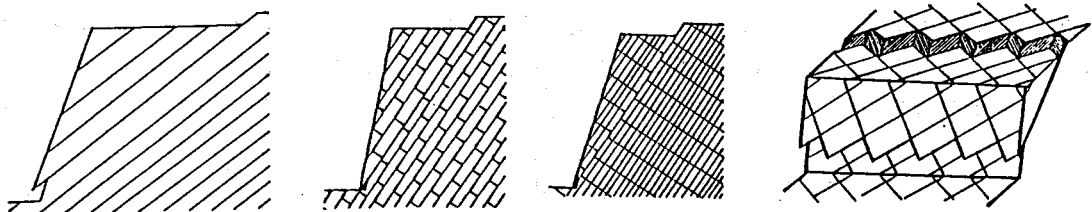


(c) せん断とすべりの
複合破壊

(d) バックリング
破壊

(e) たわみ性トップリング破壊

3) 不連続面の強度に依存する破壊様式



(f) 平面すべり破壊

(g) くさび形すべり破壊



(h) トップリング破壊

図-1 岩盤斜面に見られるさまざまな破壊様式

- 2) 岩石と不連続面の強度に依存する破壊様式
 - c) せん断とすべりの複合破壊 (図-1-c)
 - d) バックリング破壊 (図-1-d)
 - e) たわみ性トップリング破壊 (図-1-e)
- 3) 不連続面の強度に依存する破壊様式
 - f) 平面すべり破壊 (図-1-f)
 - g) くさび形すべり破壊 (図-1-g)
 - h) トップリング破壊 (図-1-h)

斜面が特定された場合に可能な破壊様式は、前述のシステム1によつて作られたステレオネット図や地質構造によつて推定される。

例えば、互層の岩盤斜面に対しては層の傾斜角 α ($\beta = \alpha - 90^\circ$) と斜面の傾斜角 i および内部摩擦角 ϕ の関係によつて表-1の様な破壊様式が選択される (図-2参照)。他の地質構造を持つ斜面についても可能な破壊形態が同様に準備されている^{2) 3) 4) 5)}。

システム3： 不連続面群と岩石の力学特性の評価

不連続性岩盤の物性値は、現位置岩盤試験によつて求めることができるが、この試験が行なわれないと

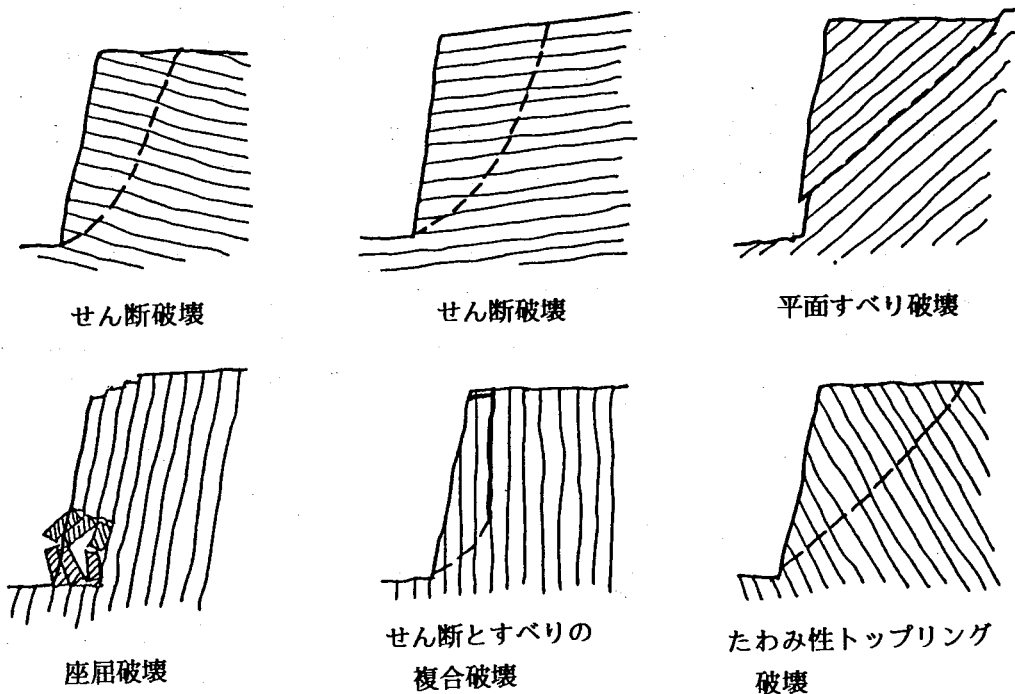


図-2 不連続岩盤斜面の互層の破壊様式

表-1 不連続岩盤斜面の互層の破壊様式分類

		α				
		$0 \leq \alpha < \phi$ $\alpha < i$	$\phi \leq \alpha \leq i$	$i \leq \alpha < 90^\circ$	$90^\circ \leq \alpha < 90^\circ + i$ $\beta < i$	$90^\circ + i \leq \alpha < 180^\circ$ $\beta \geq i$
破壊様式		せん断破壊	すべり破壊 すべりとせん断の複合破壊	すべりとせん断の複合破壊 座屈破壊	たわみ性トップリング破壊 せん断破壊	せん断破壊

きは、岩盤分類やデータベースあるいは逆解析法によって推定することができる。今回のシステムでは、岩盤分類や逆解析法によって岩盤物性を推定するルーチンを持っている。

システム4： 各種の破壊様式に対する安定解析

システム2で分類した破壊様式に対応した安定解析法が用意されている。このサブシステムの中では、与えられた条件によって安定解析を実行すると同時にデータを変動させパラメトリックスタディーを行なうことが可能である。

システム5： 総合評価

それぞれのシステムによって得られた結果を総合的に判定して斜面の安定性が評価されさらに、斜面の安定化に対する対策や施工法の選択を行なう。この総合評価に関しては、統一的なシステム化は困難であり、今回はほとんど技術者の判断に依存する形に成っている。

3. 岩盤斜面の安定性の評価事例

この評価システムを利用した岩盤斜面の安定性の評価事例を以下に述べる。今回の地質調査は、あるダムを取付道路建設現場を中心に29地点について行なわれた。この道路は標高1150m程度の尾根が南北に続く高地の東側斜面の標高1030m付近に建設され、幅員は3.5mを有し、延長は351mである。しかしながら建設予定地は最大斜面勾配 65° 平均勾配が 42° とかなりの急傾斜地であり、深部が流紋岩その上部に砂岩と泥岩の互層の岩質となっている。この互層は層理面を初め多くのジョイントを含んでいる。

現位置調査結果によると道路際の山側斜面の斜面の方位角は 55° から 138° の間に分布し、傾斜角は 35° より 47° の間にある。峰部と谷部の傾斜角度を比較すると、谷部の方が一般に小さく、その平均値は谷部が 36° 、峰部は 43° であった。

現場踏査によって得られたデータをシステム1によって整理してステレオネットを作成した。このステレオネット図の一例(D計測点)を図-3に示す。この図のBPは層理面、SFは切取斜面、J1, J2, J3は計測した節理群のセット、・印は極(pole)を示している。本計測点では、層理面の方位角が 210° 、傾斜角 40° 切取面の方位角 103° 、傾斜角 63° である。斜面に出てくる不連続面の交線はJ

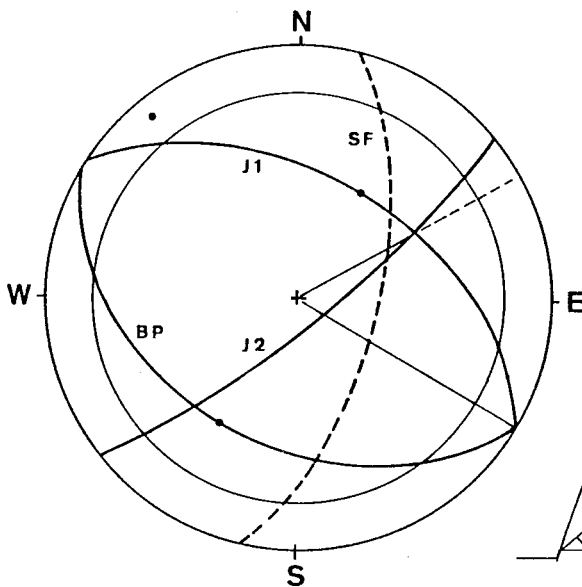


図-3 D計測点 (NO.8+10.00) のステレオネット

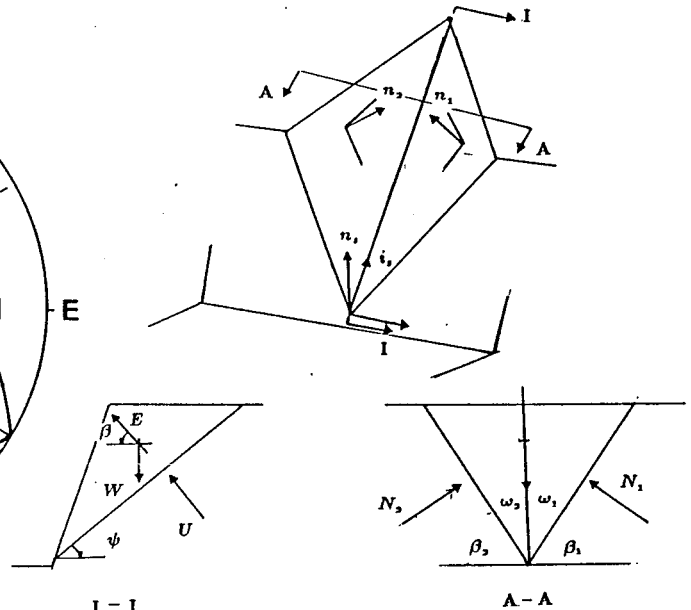


図-4 くさび形すべり破壊の解析モデル

1面とJ2面によるもので、その交線方位角は60° 傾斜角が46° となることが判る。

得られたステレオネットと地質構造のデータによりシステム2を用いてa) くさび破壊、b) せん断破壊、c) たわみ性トッピング破壊という3種の可能な破壊様式が導入される。これらの3種の破壊様式について以下のように詳細な検討を行なった。

a) くさび破壊について

例えば、D計測点では、J1面とJ2面によってくさびブロックが形成される。このくさびブロックの交線方位角は60° 傾斜角が46° となり、切取斜面の傾斜角より小さいので切取斜面上にくさびブロックが現われることは前述した。D地点の傾斜角(63°)が摩擦角より大きいのでこのくさびブロックはすべる可能性が有ると判断された。

くさび形すべりに対する等価な摩擦角は、

$$\phi^* = \tan^{-1}(\lambda \tan \phi)$$

と定義される(詳細については参考文献6)を参照)。

ここで ϕ^* はくさび形すべりに対する等価な摩擦角、

$$\lambda = \cos \omega_1 + \cos \omega_2 / \sin(\omega_1 + \omega_2),$$

この等価な摩擦角は、くさびの形状によって増加すると考えられる(図-4参照)。D計測点に対してその関係を解析した結果は図-5のようである。この図では岩盤の摩擦角(ϕ)くさび形を形成する二面の交角(2ω)、くさびの交線の傾斜角(ψ)の値を変化させ、等価な摩擦角(ϕ^*)を求めている。この地点の摩擦角は30°であるので、D計測点ではくさびすべりが起こる可能性が有ると判断された。

つぎに、くさびすべりが起こるブロックの規模を推定する。ブロック理論⁷⁾によるとこのすべり破壊部は大規模な形状となることが予想されるが、地質構造からみてこの破壊部分が大きくなるとは考えられない(写真-1および図-6参照)。

b) せん断破壊について

つぎにせん断破壊について考える(図-7参照)。せん断破壊に対して安定解析を実行するためには粘着力cと摩擦角 ϕ が必要となる。現位置のせん断強度試験がなされていないので、システム3を使ってc

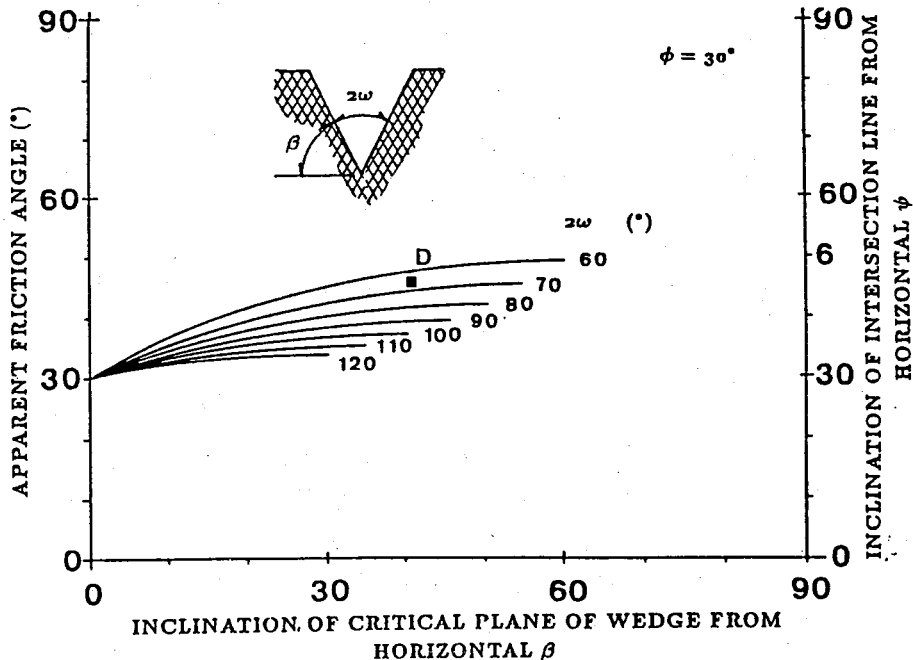


図-5 くさびブロックの等価な摩擦角(ϕ^*)と水平角(β)の関係

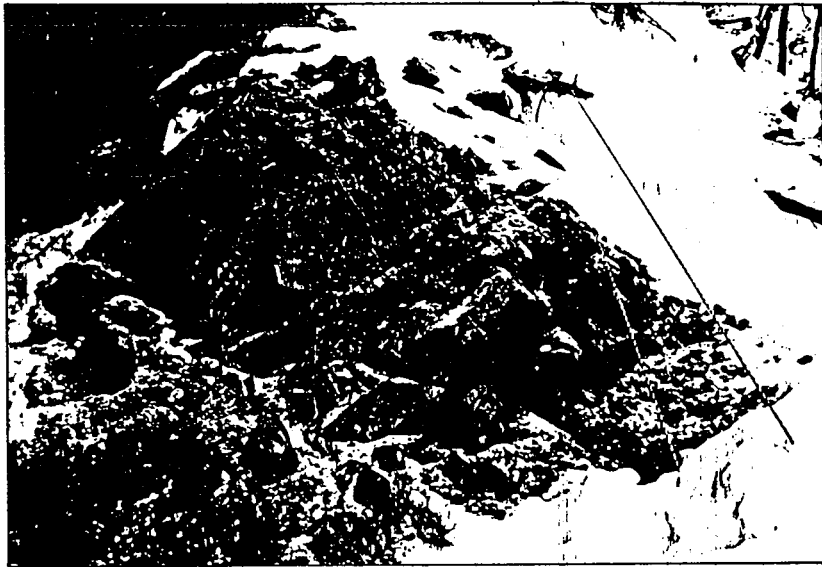


写真-1 取付道路付近の露頭写真

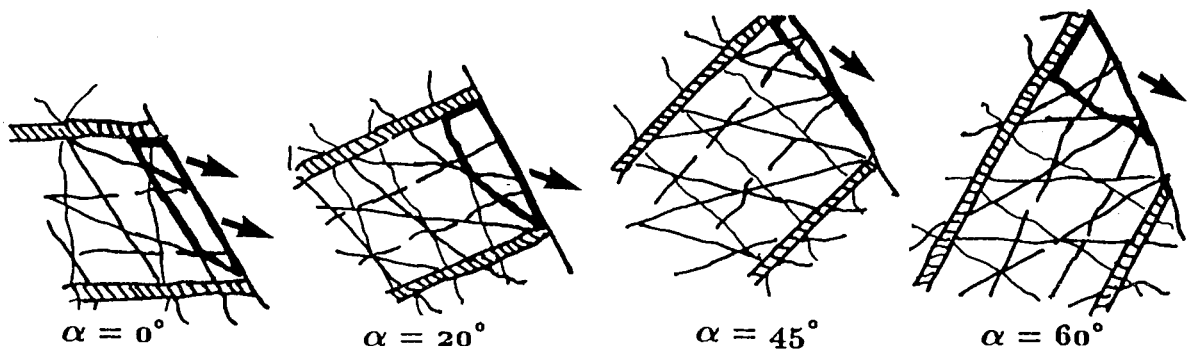


図-6 岩盤の亀裂状況から推定される崩壊規模

と ϕ を予測した。この岩盤は泥岩・砂岩の互層であり、せん断すべりに対しては泥岩の強度に依存すると考えられるので、摩擦角を 20° と設定する。この摩擦角の下で c/γ (γ は岩の単位体積重量)をパラメータとして斜面高さとその勾配を計算すると図-8のようになる。ただし、平均震度は $\eta=0.2$ であり、岩盤は飽和しているとした。いま、この地点の自然斜面の高さと平均斜面勾配が図-8中の黒点・で与えられるので、 c/γ は8から11 (m)であると考えられる。

この図を使って切取斜面の安定性を計算すると、図-9の曲線群が得られる。斜面の計画高さや角度は図中の斜線部で示した領域に収まるので、この斜面はせん断破壊に対しては安定であると予想される。

c) たわみ性トップリング破壊について

たわみ性トップリング破壊について考える(図-10)。この解析では岩盤の引張強度 σ_t が必要となるが、現位置地での岩盤の引張強度試験は行なわれていない。しかしながら、一般には c/γ と σ_t/γ とは近い値を示すと考えられる。このため前記の c/γ の値を利用し、 σ_t/γ を4から10まで変化させ層厚(t_{s0})を0.5~1.0mとして安定解析を行なった結果、図-11を得た。このモデルでは荷重作用点 Scf ($Scf=X_i/h_i$ 、図-10参照)を0.75から1.0の間で変化させた。この図から Scf の値が0.75である時は現在の切取斜面は安定であり、 Scf の値が1.0になると不安定となることが判る。

この切取岩盤斜面の安定解析の結果、不安定性が生じた場合の対策が以下のように考えられる。

- 1) くさび形破壊は局所的に起こると考えられるので、その補強としては吹き付けコンクリートで十分である。
- 2) せん断破壊に対しては、切取斜面は安定で有るので無対策でよい。
- 3) たわみ性トップリング破壊に対しては、 $Scf=1.0$ の場合に斜面が 60° 以上であると不安定となる。たわみ性トップリングでは、斜面の変状がのり肩に集中的に現われるので、施工中においてはこの部分の観察を常時行なう必要がある。

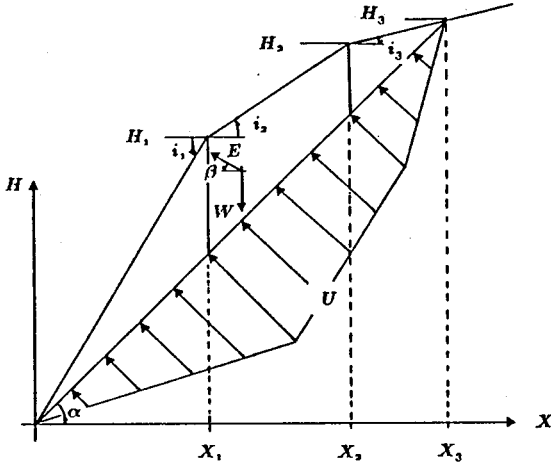


図-7 せん断破壊の解析モデル

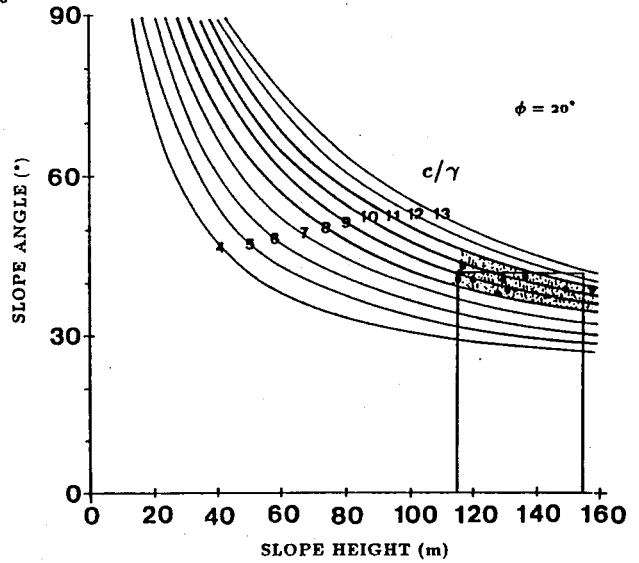


図-8 c/γ の値の変化による自然斜面の勾配と斜面高さの関係

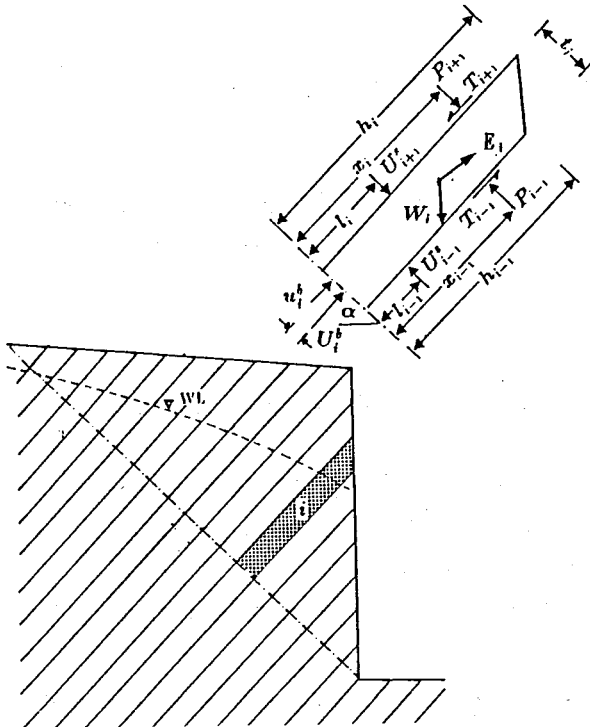


図-10 たわみ性トップリング破壊の解析モデル

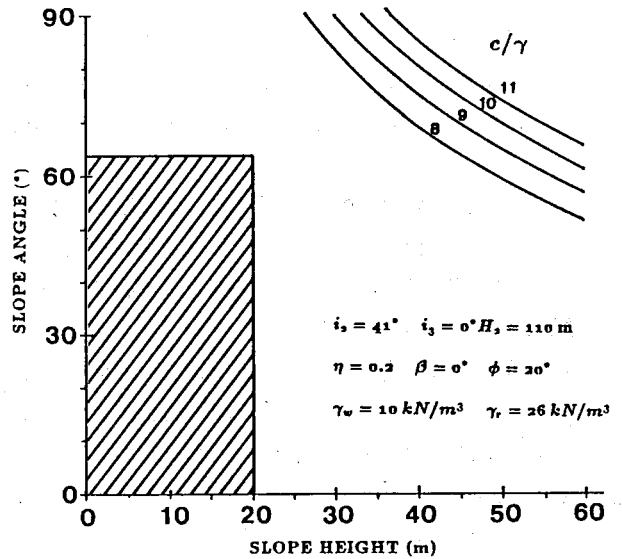


図-9 安全率が1.0の時の c/γ の変化による設計切取斜面の勾配と斜面高さの関係

4. おわりに

岩盤斜面の安定性に対する総合安定性評価システムを開発した。このシステムの有効性を明らかにするために実際の岩盤斜面の安定性評価に適用したところ良い結果を得た。しかしながら、このシステムは現在のままでは不十分であるので今後更に改良を行なう予定である。

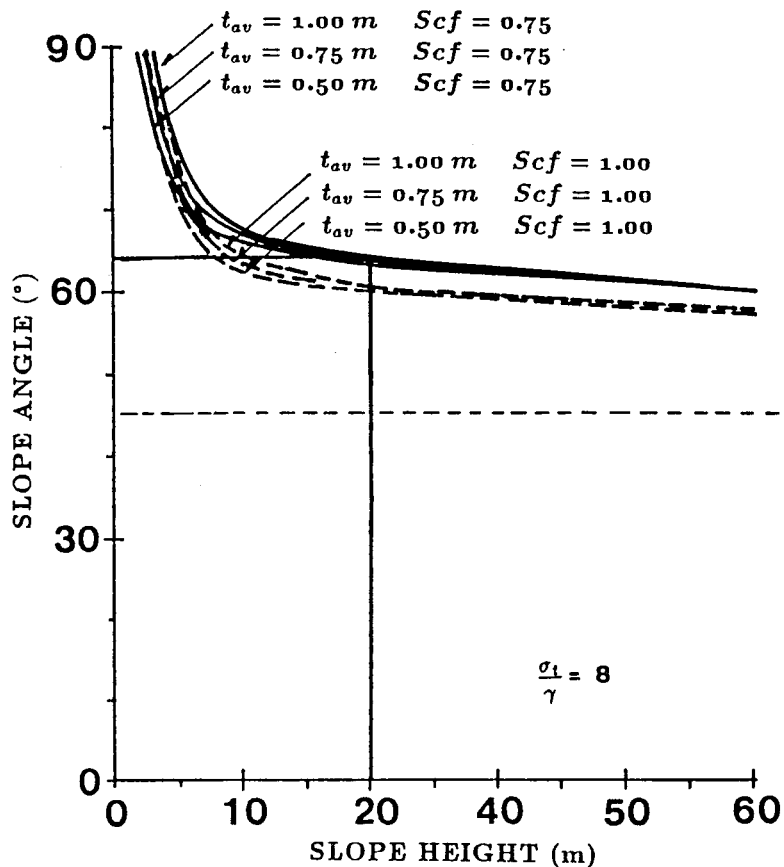


図-11 解析結果の比較による設計切取斜面の勾配と斜面高さの関係

5. 参考文献

- 1) Aydan, Ö., Kyoya, T., Ichikawa, Y., Kawamoto, T., Shimizu, Y.,: A Model Study on Failure Modes and Mechanisms of Slopes in Discontinuous Rock Mass, 第23回土質工学研究発表会, 昭和63年6月 pp.1089-1092
- 2) 清水泰弘, Ömer AYDAN, 市川康明, 川本眺万: 不連続性岩盤斜面の地震時における安定性と崩壊形状, 土木学会論文集, 第400号/Ⅲ-10, 1988年12月, pp.189-198
- 3) オメル・アイダン, 川本眺万: 不連続性岩盤斜面のトップリング破壊とその安定化について, 日本鉱業会誌, 103巻197号, 1987年11月, pp.763-770
- 4) Ömer AYDAN, Yasuhiro SHIMIZU, Yasuaki ICHIKAWA, : The Stability of Slopes in Rock Mass With Two Discontinuity Sets, Rock Mechanics and Rock Engineering, 1989, (to be appeared)
- 5) Evert HOEK, John BRAY, 岩盤斜面工学, 朝倉書店, pp.43-47
- 6) 清水泰弘, Ömer AYDAN, 市川康明, 川本眺万: 不連続性岩盤斜面の安定性の予測について, 土木学会論文集, 第VI部門, 1989, (投稿中)
- 7) Richard E. Goodman, Gen-han Shi, : Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall