

# 均質化理論に基づく安定性評価解析法 の岩盤斜面への適用

京谷孝史<sup>1</sup>・欧陽立珠<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 東北大学 助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)  
E-mail:kyoya@civil.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 工博 鹿島建設(株) 東北支店 (〒980-8621 仙台市青葉区二日町1-27)

著者らは、実務においても入手が容易な岩石コアの力学特性と不連続面分布の画像情報を用いて、不連続性岩盤の巨視的な変形強度特性を推定し、それを用いた極限荷重解析によって岩盤構造物の安定性を評価する方法を提案している<sup>1)</sup>。本研究では、複数の専門家によって「危険」と判断された道路脇岩盤斜面に提案手法を適用して、斜面の安定性についての定量評価を実施し、それを通して提案手法の妥当性および実用化の可能性を検証している。

**Key Words :** homogenization theory, stability analysis, strength of discontinuous rock mass

## 1. はじめに

1996年2月10日に北海道豊浜トンネルで発生した大規模な岩盤崩落事故を契機として、全国一斉にトンネル抗口部と落石覆工施工箇所についての緊急点検が実施され、その結果、危険と判断された箇所には対策が施されることとなった。

しかし、このような大規模かつ詳細な点検作業によって「危険」と判断された多くの岩盤斜面それぞれは、実際にはどの程度の危険性を有していたのであろうか？もし、それら岩盤斜面の安定性を何らかの合理的な手法によって定量的に評価することが出来れば、具体的な危険度のランク付けのもとでの重点的・効率的な対策を可能ならしめ、道路などの社会基盤施設の合理的・効率的な維持管理の実現に結びつくことが期待できる。

著者らはそうした現実的要請に応えるべく、実務において入手が容易な岩石コアの力学特性と不連続面分布の画像情報のみから、岩盤の巨視的な変形強度特性を推定するとともに、それに基づいて岩盤構造物の安定性を評価する解析手法を提案した<sup>1)</sup>。

本研究では、その提案手法を上述の一斉点検において「危険」と判断された斜面の一つである国道45号沿いの道路脇斜面に適用し、対策工が施されていない状態における安定性の定量的評価を試み、それを通して提案手法の実岩盤への適用性を検証する。

## 2. 亀裂分布情報と岩石の力学特性を用いた岩盤構造物の安定性評価解析

均質化法に基づいて評価される岩盤の変形強度特性は、岩盤全体が十分に小さな基本構造単位(ユニットセル)の繰返しによって構成された均質体であると理想化したときの変形特性を表す。この均質化操作を通して、無数の分布不連続面や異種岩石を含む複雑な内部構造を特徴とする岩盤は、推定評価された力学特性を持つ等価な連続体に合理的に置き換えられる(図-1参照)。そして、この等価均質体に対して極限荷重解析を適用することにより岩盤構造物の極限荷重を合理的に推定することができる。

以下では、均質化法に基づく安定性評価解析手法の手順を説明する。詳細については参考文献1)を参照されたい。

### (1) 画像情報を利用した岩盤のユニットセルの抽出とその有限要素モデルの作成

現位置岩盤の露頭において撮影された写真やスケッチなどの画像情報をスキャナーで読みとり、コンピュータのディスプレイに表示する。そして、岩盤の代表的内部構造を示している不連続面分布や異種岩石の混在が見られる領域を、その岩盤の基本構造単位(ユニットセル)として抽出して、ディスプレイ上の各画素(ピクセル)の色値を表す整数値配

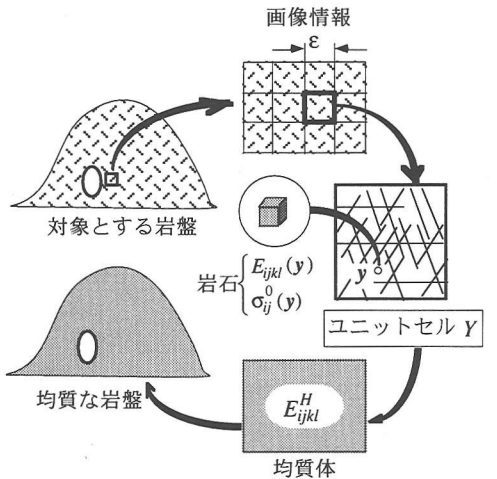


図-1 均質化法による不連続性岩盤の均質化プロセス

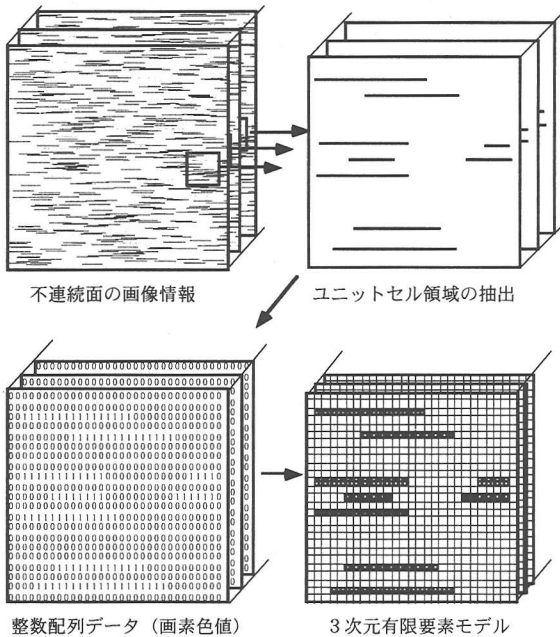


図-2 岩盤のユニットセルと有限要素モデルの作成

列データ (0~255) に変換する。白い紙の上に黒い線で亀裂が描かれた2色のスケッチであれば、基質部の白い部分には0、亀裂を示す黒の線に沿って255の値がスケッチの通りに並んだ配列が得られる。

この整数値配列をもとに、一つの画素に一つの3次元立方体要素を割り当てて有限要素モデルを構成する。ここで、ユニットセルの奥行き方向の構造が推定できる複数の画像データがあれば、それらを補間することによってユニットセルの3次元的な構造を表現する有限要素モデルが作成できる。そうでなければ1つの画像データが示す構造が奥行き方向に

連続する擬3次元モデルになる(図-2参照)。

こうして画像情報からユニットセル有限要素モデルを作成する一方で、対象とした岩盤から岩石のコアサンプルを採取し、室内試験によって岩石の弾性定数および破壊基準を決定しておく。そして、岩石の力学特性値を基質部の要素の物性値として与える。また、亀裂を薄い弱層として理想化し、亀裂部を構成する要素には、ポアソン比をゼロ、ヤング率には非常に小さな値を与える。

## (2) 岩盤の平均弾性係数の算定

ユニットセルが占める領域を $Y$ 、その内部の点を $y$ とし、点 $y$ に存在する岩石や弱層部(亀裂部)の弾性係数を $E_{ijkl}(y)$ と表す(図-1参照)。そして、ユニットセルに関する以下の方程式を周期境界条件のもとで解く。

$$\int_Y E_{ijpq}(y) \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY = \int_Y E_{ijkl}(y) \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY \quad (1)$$

( $i, j, k, l = 1, 2, 3$ )

ここに、 $v_i$ は仮想変位ベクトルの第 $i$ -成分を表す。これから自由指標( $k, l$ )の6通りの組み合わせに対応した6つの解ベクトル $\chi_p^{kl}(y)$ が得られ、岩盤の平均弾性係数 $E_{ijkl}^H$ が次式の積分で与えられる<sup>1)</sup>。

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left( E_{ijkl}(y) - E_{ijpq}(y) \frac{\partial \chi_p^{kl}(y)}{\partial y_q} \right) dY \quad (2)$$

これを岩盤のユニットセル有限要素モデルに適用する。まず、式(1)の有限要素離散化から

$$[K][\chi] = [P] \quad (3)$$

なる節点方程式を得る。ここに、

$$[K] = \sum_k^N \int_{Y_k} [B]^t [E] [B] dY_k \quad (4)$$

$$[P] = \sum_k^N \int_{Y_k} [B]^t [E] dY_k \quad (5)$$

であり、 $N$ はモデルの全要素数、 $Y_k$ は $k$ 番目の要素の体積を表す。式(4)の $[B]$ は変位ひずみ関係行列、 $[E]$ は材料の弾性係数行列であり、係数行列 $[K]$ は通常の弾性問題の要素剛性行列と同じである。また、式(5)の行列 $[P]$ は、式(1)の左辺に見る通り、ユニットセル内の弾性係数の分布状態によって定まる(全自由度数 $\times 6$ )行列となる。

式(3)を周期境界条件のもとで解けば節点値ベクトル $[\chi]$ が得られる。 $[\chi]$ は(全自由度数 $\times 6$ )行列であり、各列ベクトルが6つの独立なベクトル $\chi_p^{kl}$ の節点値を表す。

$[\chi]$ を得た後、均質化弾性係数 $[E^H]$ は、式(2)を離

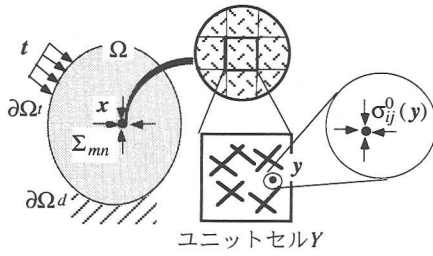


図-3 巨視的平均応力と微視的応力

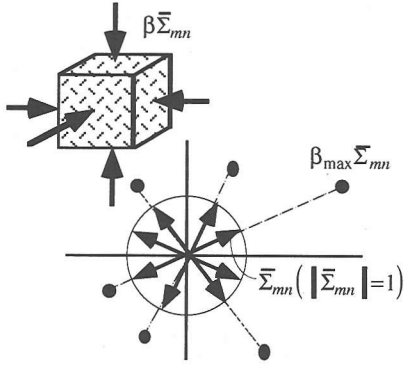


図-4 ユニットセルに対する数値強度試験

散化した式

$$[E^H] = \frac{1}{|Y|} \sum_k^N \int_{Y_k} ([E] - [E][B][\chi^{(k)}]) dY_k \quad (6)$$

によって得られる。ここに、 $|Y|$ はユニットセルの全体的積、また、 $[\chi^{(k)}]$ は先に求めた $[\chi]$ から $k$ 番目の要素に対応する節点値を抜き出して構成した(要素の自由度数 $\times 6$ )行列である。

### (3) 岩盤の巨視的破壊基準の決定

図-3に示すように、均質化法では、岩盤内部のある点近傍に作用する巨視応力が $\Sigma_{mn}$ であるとき、そこに存在する微視的内部構造(ユニットセル)を構成する岩石材料に作用する応力が微視応力 $\sigma_{ij}^0(y)$ が次式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$\sigma_{ij}^0(y) = \left[ \left( E_{ijkl}(y) - E_{ijpq}(y) \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q} \right) (E^H)^{-1} \right]_{klmn} \Sigma_{mn} \quad (7)$$

これを有限要素法により離散化すると

$$\{\sigma^0\} = \left[ ([E] - [E][B][\chi^{(i)}])[E^H]^{-1} \right] \{\Sigma\} \quad (8)$$

である。ここに、 $[\chi^{(i)}]$ は $i$ 番目の要素における $[\chi]$ の節点値ベクトルである。

岩盤の初期破壊を「岩盤中の点 $x$ の近傍にあるユニットセルの内部において、微視応力 $\sigma_{ij}^0(y)$ が岩石

材料の強度を超えるような点 $y$ が現れれば、岩盤中の点 $x$ において巨視的な破壊が始まる」と定義すると、式(8)を利用して以下のように岩盤に対する巨視的破壊基準が定まる。

まず、岩石の破壊基準 $f(\{\sigma^0\})=0$ を室内試験によって定めておく。その一方で、図-4に示すように、巨視応力 $\{\Sigma\}$ の6次元空間に単位球を考え、その球面上に均等に分布するように十分な数の単位大きさの巨視応力 $\{\bar{\Sigma}\}$ を準備する。

各単位応力 $\{\bar{\Sigma}\}$ について、それをユニットセルに一樣に作用させたときにユニットセル内部に発生する微視的応力 $\{\sigma^0\}$ を式(8)によって算定し、その微視的応力がユニットセル内のいたるところで先に求めてある岩石の破壊基準を超えないようにしつつ、単位応力 $\{\bar{\Sigma}\}$ を何倍まで大きく出来るかという倍率係数の最大値 $\beta_{\max}$ を求める。 $\beta_{\max}$ は全ての要素内応力 $\{\sigma^0\}$ を岩石の破壊基準式に照らした $f(\{\sigma^0\})$ の最大値を探すことによって算定できる<sup>1)</sup>。すると巨視応力 $\beta_{\max}\{\bar{\Sigma}\}$ がその単位応力方向の巨視的破壊応力点を与えることになる。

こうして全ての単位応力 $\{\bar{\Sigma}\}$ に対して得られた巨視破壊応力点を6次元二次曲面

$$F(\{\Sigma\}) = \{\Sigma\}^t [A] \{\Sigma\} + \{b\}^t \{\Sigma\} - 1 = 0 \quad (9)$$

$$\{\Sigma\} = \{\Sigma_x \ \Sigma_y \ \Sigma_z \ \Sigma_{yz} \ \Sigma_{zx} \ \Sigma_{xy}\}^t$$

で近似すれば、岩盤に対する破壊基準 $F(\{\Sigma\})=0$ が得られる。ここに、 $[A]$ 、 $\{b\}$ は巨視応力 $\{\Sigma\}$ の空間における二次曲面を表す係数行列と係数ベクトルである。

### (4) 岩盤構造物に対する極限荷重解析

解析対象とする岩盤を、均質化法によって決定した巨視的破壊基準に従う弾完全塑性体として理想化すると、岩盤に対して、比例載荷を行う際の極限荷重を求める問題は、以下のように、荷重係数 $\alpha$ の最大化を図る線形計画問題として定式化される<sup>1),2)</sup>。

$$\begin{cases} \text{maximize } \alpha \\ \text{subject to} \\ \left[ \tilde{N} \right]^t (\alpha \{ \tilde{\Sigma}^s \} + \{ \tilde{\Sigma}^r \}) \leq \{ \tilde{R} \} \\ \left[ \tilde{B} \right]^t \{ \tilde{\Sigma}^e \} = \{ \tilde{F} \} \\ \left[ \tilde{B} \right]^t \{ \tilde{\Sigma}^r \} = \{ 0 \} \end{cases} \quad (10)$$

上式中、 $[\tilde{B}]^t$ は各要素の変位ひずみマトリックスから構成される系全体のつり合いを表す行列を表す。 $\{ \tilde{F} \}$ は単位荷重に対応する節点荷重ベクトルであり、 $\{ \tilde{\Sigma}^s \}$ はそれとつり合う静的可容応力ベクトル、 $\{ \tilde{\Sigma}^r \}$

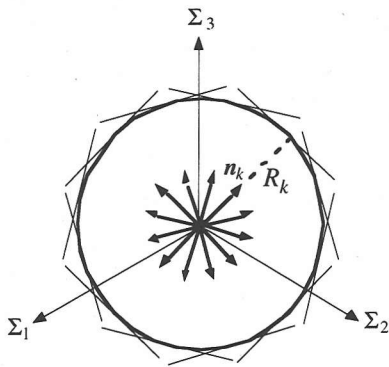


図-5 破壊基準面とそれを覆う接平面群

は自己つり合いを満たす残留応力ベクトルであり、それぞれ全要素のすべての成分を並べたベクトルである。また、制約条件中の不等式は降伏条件を表している。図-5に示すように、式(9)に定めた岩盤の破壊基準面内部の凸領域 ( $F(\{\Sigma\}) \leq 0$ ) は、有限個の接平面で覆うことにより、凸多面体(錐)

$$[N]^t \{\Sigma\} \leq \{R\} \quad (11)$$

に置き換えられる。ここに、行列  $[N]$  とベクトル  $\{R\}$  は、 $n_k$  を  $k$  番目の接平面の外向き単位法線ベクトル、 $R_k$  を原点からその接平面への距離として、

$$\begin{aligned} [N] &= [n_1 \ n_2 \ \dots \ n_k \ \dots \ n_m] \\ [R] &= \{R_1 \ R_2 \ \dots \ R_k \ \dots \ R_m\}^t \end{aligned} \quad (12)$$

ように構成する。式(10)における  $[\tilde{N}]$  および  $\{\tilde{R}\}$  は、この  $[N]$  と  $\{R\}$  を全体系に適合するように並べた行列およびベクトルである。

式(10)において、静的可容応力  $\{\tilde{\Sigma}^s\}$  には、均質化法で先に定めた岩盤の平均弾性係数を用いた線形解析によって得られる弾性応力を用いることができる。したがって、次のような手順で岩盤に対する極限荷重解析が実施できることになる。

- i) 不連続面情報と岩石の力学特性からユニットセル有限要素モデルを作成する。
- ii) 均質化法によって、岩盤の平均弾性係数  $[E^H]$  と巨視的破壊基準  $F(\{\Sigma\})$  を定める。
- iii) 対象岩盤の弾性係数を  $[E^H]$  として、所与の荷重系の単位荷重  $\{\tilde{F}\}$  を与えて線形弾性問題を解いて  $\{\tilde{F}\}$  に対する弾性応力分布  $\{\tilde{\Sigma}^e\}$  を求める。
- iv) 巨視的破壊基準  $F(\{\Sigma\})$  について、いくつかの接平面を求め、式(10)に用いる行列  $[\tilde{N}]$  とベクトル  $\{\tilde{R}\}$  を準備する。
- v) 弾性応力分布  $\{\tilde{\Sigma}^e\}$  を  $\{\tilde{\Sigma}^s\}$  とし、行列  $[\tilde{N}]$  およびベクトル  $\{\tilde{R}\}$  を用いて、式(10)の線形計画問題を解いて荷重係数  $\alpha$  を求めることにより、極限荷重が得られる。

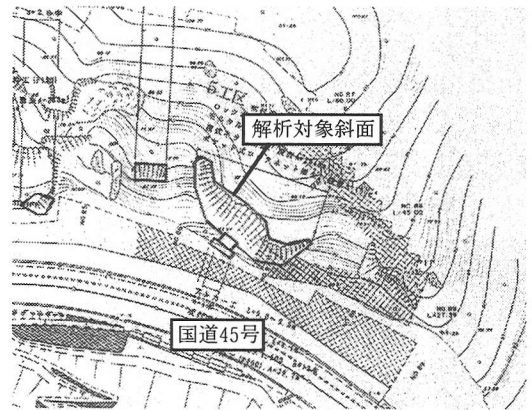


図-6 解析対象斜面付近の地形図

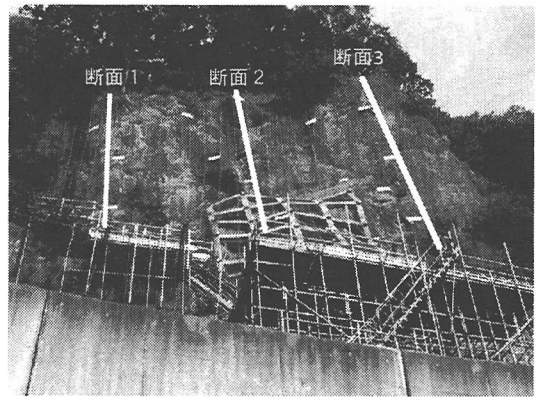


写真-1 解析対象斜面の様子

### 3. 実際の岩盤斜面への適用

#### (1) 対象とする斜面と問題の設定

対象とする斜面は国道45号沿いのリアス式海岸地帯における岩盤斜面である。この一帯は中生代ジュラ系及び白亜系の地層から成り、安山岩及び安山岩質凝灰岩が分布していることが知られている。

岩盤斜面周辺の地形図を図-6に示す。対象とする斜面には標高80~90m付近に明瞭な遷急線があり、それより上方は比較的緩やかに傾斜しているが、下方は傾斜角約80度の急崖となっている。

斜面全体の様子を写真-1に示す。岩盤を構成する安山岩、安山岩質凝灰岩は中硬岩から硬岩に属する堅硬な岩である。しかし、斜面には割れ目が多く分布し、表層では割れ目の開口による浮き石化が著しい。そのため、昭和40年代における建設当初において、落石対策工としてのロックキーパーが設置されている。

豊浜トンネルの事故を契機に全国的な規模で行われた岩盤調査の結果、この岩盤斜面に対しては重大

な危険性が指摘され、様々な対策方法が検討された。その結果、この斜面に対しては恒久的な安定化対策は不可能との判断が下され、最終的に斜面を回避するように路線を付け替えるという決定が下された。これを受けて、付け替え道路が完成するまでの供用期間中の現路線の安全を確保するために、斜面に対しては半恒久的な安定化対策工としてフリーフレーム、ロックアンカー、ロックボルトなどの支保工、および開口割れ目に対する間詰めモルタル注入、防護ネットなどが施工された。また、それと同時に厳重な管理・モニタリングシステムが構築され、常時その動きが監視されている。

ここでは、これら半恒久的対策工が施工される以前（無支保状態）の斜面を対象として、先に述べた解析法によって「危険」の度合を定量的に評価することを試みる。安定性の評価指標には、斜面が自重に対してどの程度の余裕があったか、すなわち、自重を単位外荷重として、斜面がその何倍まで耐えられるかという荷重係数を安全率と定義して指標とする。不連続面分布の画像情報と岩石コアの特性のみを用いた提案手法は実際の岩盤斜面の安定性に対してどの様な定量評価を与えるのか？そうした検討を通して、提案手法の妥当性、適用性を検証するものである。

しかし、この定量評価が妥当か否かの判断は難しい。何故ならば、その手掛かりとしては、

- 1) 対策前の斜面は「危険である」との判断を下されるような状態にあったこと、しかし、
- 2) 対策前の斜面では小さな転石の発生は確認されているが斜面崩壊と呼ぶべき破壊現象は一度も起きていない、

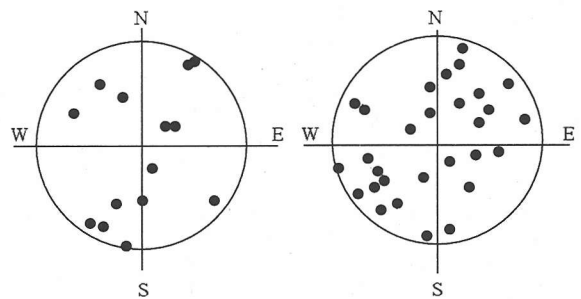
という2つの定性的事実があるだけで、解析の結果と比較出来るような定量的に観測された事象がないからである。しかし、2つの定性的事実を照らし合わせたとき、以下のような議論は可能である。

まず、解析が「斜面は崩壊する」との結果を導いたとすれば、斜面は対策工の施工以前にも何ら破壊現象は起きていないので、明らかに評価手法のどこかが間違っていると結論せざるを得ない。

また、「斜面は崩壊しない」という結果を導いた場合でも、それが「極めて安定である」という推定につながるような結果であれば、解析の結果は「危険」と判断された実際の斜面の状態に対応していないことになり、やはり解析法のどこかが間違っていると考えるべきである。「斜面は崩壊しない」しかし「必ずしも安全とは言い切れない」というような結論に導くような結果をはじめ出した時に限り、解析法は妥当な結果を与えたと結論できると考える。



写真-2 亀裂分布を調査した岩塊の露头



道路脇の岩塊 解析対象岩盤

図-7 亀裂分布のステレオ投影図

こうした問題設定のもと、以下に実施した解析について順を追って述べる。

## (2) 不連続面の調査

対象とする岩盤斜面全体は防護ネットで覆われており、さらには亀裂部に間詰めモルタルが注入されているために亀裂の詳細な観察は不可能であった。しかし、道路を挟んで対象斜面の反対側には、道路建設の開削時に取り残されたと幅約10m、高さ約4m程の岩塊があり（図-6参照）、その表面においてクリノメーターによる亀裂面の走向傾斜の測定と分布状況のスケッチおよび写真撮影を実施した（写真-2）。

対象斜面については、対策工が施される前に亀裂の方向を示すステレオ投影図が作成されている。図-7にそのステレオ投影図と、道路を挟んだ反対側の岩塊において得られたステレオ投影図を比較している。データ数に差はあるが、当然のことながら両者は酷似しており、今回の調査で得た亀裂分布の写真ならびにスケッチを対象斜面の亀裂分布情報として採用しても良いことが確認できる。

### (3) 岩石供試体の室内試験

岩石供試体は、対象とする斜面において対策工を施工時に行われた調査ボーリングのコア(直径5cm)を利用して、それらの健全な部分から直径5cm、高さ10cmの円柱供試体を約70本作成した。

対象とする岩盤斜面は安山岩と安山岩質凝灰岩で構成されていることは事前に判っていたが、供試体は写真-3のように黒色の安山岩、きめ細い凝灰岩粒が混在して白色を帯びた安山岩質凝灰岩(細粒)、粗い凝灰岩粒が混在する灰色を帯びた安山岩質凝灰岩(粗粒)の三種類のグループに分類することができた。

これら三種類の供試体に対して一軸圧縮試験を実施してヤング率と一軸圧縮強度を調べた。得られたヤング率と一軸圧縮強度をそれぞれ縦軸と横軸に取って整理した結果を図-8に示す。ヤング率と一軸圧縮強度の組み合わせは岩石の種類毎に一定の範囲で分布していることが判る。

この結果から、解析に用いる三種類の岩石の物性値として、図-8中に矢印で示しているように、最大のヤング率と一軸圧縮強度の組み合わせを安山岩の物性値、最小のヤング率と一軸圧縮強度の組み合わせを安山岩質凝灰岩(粗粒)の物性値、その間の平均的なヤング率と一軸圧縮強度を解析用の安山岩質凝灰岩(細粒)の物性値として用いることとした。このようにして定めた解析用の岩石物性値を表-1に示す。ただし、表中、一軸圧縮試験では把握できないポアソン比と内部摩擦角は参考文献(3)を参照してそれらの平均的な値を用いている。また、岩石の単位体積重量については、岩種による差異が認められなかったため全供試体の平均値とした。

### (4) 岩盤のユニットセル有限要素モデル

#### a) ユニットセルのデジタル画像データの作成

図-9に示すように、現地で撮影した岩盤露頭の写真からユニットセル領域を抽出し、トレーシングペーパーに書き写す。それを2.(2)で述べた方法に従って、イメージスキャナーでコンピューターに取り込み、作画ソフトを利用して亀裂を示す曲線をフリーハンドでなぞって画素単位の情報を持つ画像データ(pic形式)を作成する。こうして、本解析では図-10に示す三通りのユニットセル画像データを作成した。この画像データでは、亀裂を表す曲線の太さは、作画ソフトの機能を利用して自由に変えられる。

#### b) 有限要素モデル化についての検討

本研究で用いる解析手法では、ユニットセルの画像を一画素が一要素に対応する有限要素モデルに置き換えて、それをを用いた数値計算によって均質化弾性係数および巨視的な破壊強度を求めるのであるが、

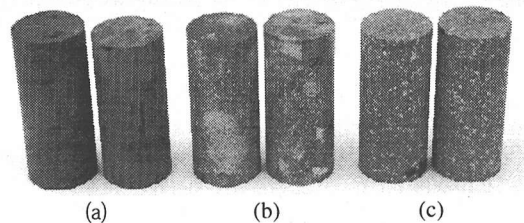


写真-3 三種類の岩石供試体の様子：(a)安山岩；(b)安山岩質凝灰岩(粗粒)；(c)安山岩質凝灰岩(細粒)

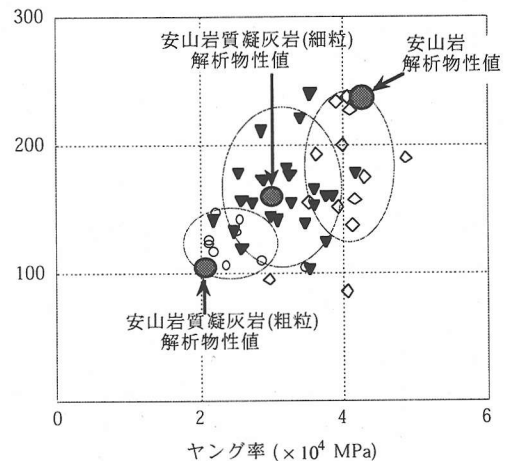


図-8 供試体のヤング率と一軸圧縮強度の分布

表-1 三種類の岩石の力学特性値

|                   | 安山岩                 | 安・凝灰岩<br>(細粒)       | 安・凝灰岩<br>(粗粒)       |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ヤング率<br>$E$ (MPa) | $3.893 \times 10^4$ | $3.089 \times 10^4$ | $2.181 \times 10^4$ |
| ポアソン比<br>$\nu$    | 0.2                 | 0.2                 | 0.2                 |
| 粘着力<br>$c$ (MPa)  | 60.5                | 44.6                | 30.3                |
| 内部摩擦角<br>$\phi$   | $35^\circ$          | $35^\circ$          | $35^\circ$          |

その際、

- 1) 岩盤のユニットセルとして抽出した領域全体をどの程度の画素数で表現するか(要素分割数をどうするか)、また、
  - 2) 曲線で示されている画像上の亀裂の幅をどの程度の画素数(要素数)で表現するか、
- というモデル化に際しての幾何学的条件の違いによって、算定される変形強度特性が大きく左右されることが懸念される。

そこで、実際に斜面に対する解析を実施するのに

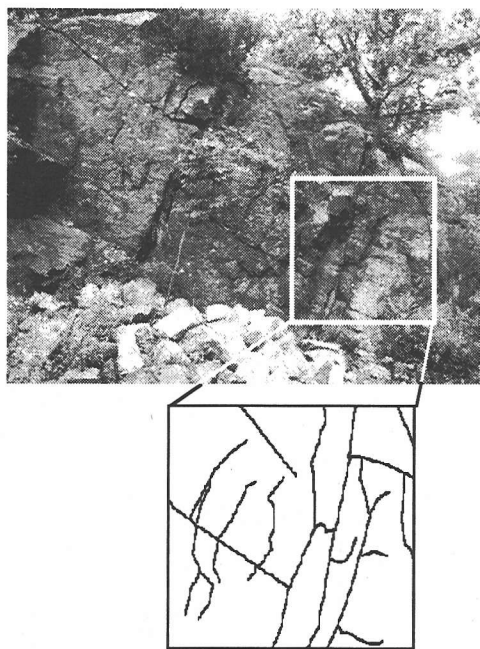


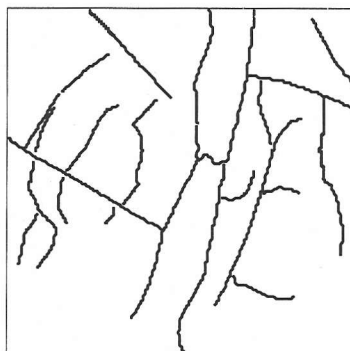
図-9 ユニットセル領域の抽出例

先立って、図-10(b)に示したユニットセル画像データを用いて上記の2つの問題を検討することとした。

まず、亀裂の幅を2画素(2要素)に固定し、ユニットセル領域全体の要素分割数を1万要素(100×100画素)から25万要素(500×500画素)まで変化させ、均質化解析の結果得られる体積弾性係数の変化の様子を調べた。亀裂の幅を2要素に固定しているので、領域全体の要素分割数を変えることは、ユニットセルに占める亀裂部分の体積含有率を変化させることを意味する。

結果を図-11に示す。図に明らかなように、分割が9万要素(300×300画素)を越えると、ユニットセルに占める亀裂の体積含有率の変化の割合が相対的に小さくなることを反映して、体積弾性係数はわずかの増減は見られるもののほとんど変化しないことが読みとれる。すなわち、亀裂の幅を2要素で表現するならば、この岩盤露頭で観察された亀裂分布のユニットセルについては9万要素以上の有限要素分割を行えば十分に安定した数値解が得られることを示している。この結果を踏まえて、本解析においては、ユニットセルについては16万要素(400×400画素)程度の要素分割を行うことにした。

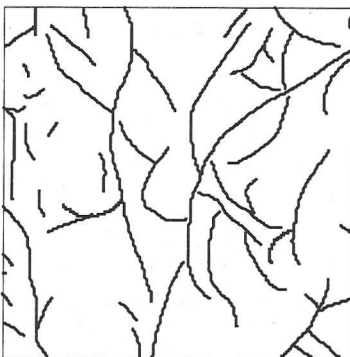
亀裂の幅を2要素より大きくすれば、亀裂の体積含有率は相対的に大きくなるので、その場合には、均質化弾性係数マトリックスが落ち着くまでには図-10に示したよりもさらに多くの有限要素分割が必要となることが予想される。



(a)ユニットセル1



(b)ユニットセル2



(c)ユニットセル3

図-10 三通りのユニットセル画像データ

そこで、次に亀裂についてはどの程度の幅でモデル化すれば良いかを検討した。同じユニットセル画像を用い、今度はユニットセル全体の要素数を16万要素(400×400画素)に固定しておいて、画像上において亀裂の幅を1から10画素(すなわち、1から10要素)にまで変化させて均質化体積弾性係数の変化を調べた。

計算結果を図-12に示す。図に見るように、体積

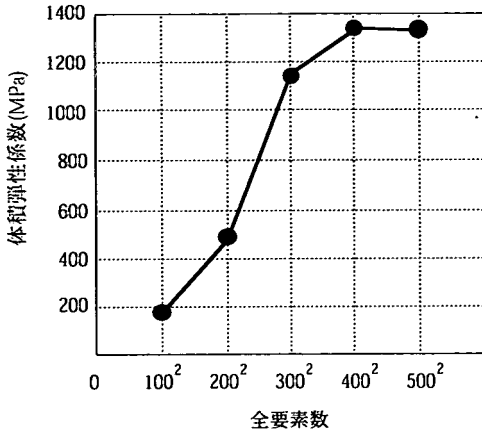


図-11 ユニットセル領域の全要素数と均質化体積弾性係数の計算結果

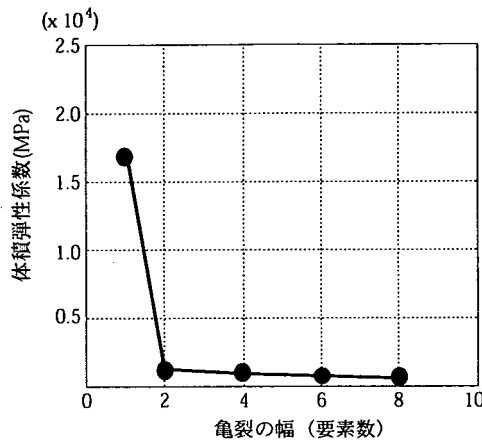


図-12 亀裂幅方向の要素数と均質化体積弾性係数の計算結果

弾性係数は、亀裂の幅を1要素から2要素に増加させた時には非常に大きく変化し、それ以降、2要素から順次亀裂幅を増加させた時には一定の緩やかな減少を示している。2要素以降の弾性係数の緩やかな減少は、亀裂幅の増加による亀裂部分(弱層部分)の体積含有率の増加に伴う変化を示している。そして、幅が1要素から2要素に増えた時の急激な変化は、亀裂部分(弱層部分)に対して幅方向に1要素しか与えない時の数値計算が不安定なものであることを表しているといえる。これから、亀裂のモデル化に際しては幅方向に2要素以上を与えれば良いことが判る。

この結果と先ほどの検討結果とを合わせて、本解析ではユニットセル領域を16万要素(400x400画素)程度に分割し、亀裂を弱い薄層に理想化する際に幅方向に2要素分の厚みを持たせてモデル化することとした。

### (5) 均質化法による岩盤の変形強度特性の推定

表-1に示している三種類の岩石の物性値と、図-10に見る三通りの亀裂パターンを組み合わせた計9ケースについて、2.(3)に述べた方法によって岩盤の均質化弾性係数を算定した。その際、亀裂部は薄い(幅方向に2要素)弱層として扱い、数値解が安定的に得られる範囲内で非常に柔らかい等方弾性体としてモデル化することとし、ヤング率0MPa、ポアソン比0を与えた。これらの物性値をユニットセル有限要素モデル(約16万要素)に要素の材料特性として与え、均質化法によって図-10に見るような亀裂が分布するときの岩盤の平均弾性係数行列 $[E^H]$ を算定した。得られた弾性係数行列の例として、図-10(b)の亀裂パターンにおいて、基質部が安山岩からなる場合の計算結果を示す。亀裂の影響によって異方的な弾性係数になっている。

(ユニットセル2, 安山岩の場合)

$$\begin{bmatrix} 2.086 & 0.206 & 0.458 & 0 & 0 & -0.285 \\ & 4.281 & 0.897 & 0 & 0 & -0.546 \\ & & 37.08 & 0 & 0 & -0.166 \\ & & & 4.166 & -0.728 & 0 \\ Sym. & & & & 2.563 & 0 \\ & & & & & 1.053 \end{bmatrix}$$

(単位:  $\times 10^3$  MPa) (13)

式(13)に与えられる岩盤の均質化弾性係数は、紙面内( $x_1$ - $x_2$ 面内)に図-10(b)のパターンの亀裂が分布し、紙面奥行き方向( $x_3$ 軸方向)にそのパターンが連続している、まるで不規則な断面形状の柱を寄せ集めたような構造体の弾性係数を表していると解釈できる。そして、直交異方性体では現れない非対角成分が第6列(第6行)に現れていたり、 $x_3$ -軸方向の軸方向弾性係数が1オーダー大きくなっているのが特徴的である。

このような均質化弾性係数行列を9通りの組み合わせについて求めた後、それらの組み合わせについて岩盤の破壊基準を決定した。

ユニットセルを構成する岩石の破壊条件は、以下に示すDrucker-Prager型の基準を用いて表している。

$$f(\sigma_{ij}^0) = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (14-1)$$

上式中、 $J_1$ は微視応力 $\sigma_{ij}^0$ の第1不変量、 $J_2$ はの偏差成分の第2不変量であり、定数 $\alpha$ 、 $K$ は表-1に示す岩石コアの粘着力 $c$ と内部摩擦角 $\phi$ から

$$\alpha = \frac{6 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}, \quad K = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (14-2)$$

と与えられる定数である。これは主応力空間においてMohr-Coulomb基準面に外接する円錐面を与える。

構成岩石の破壊条件をこのように定めておいて、



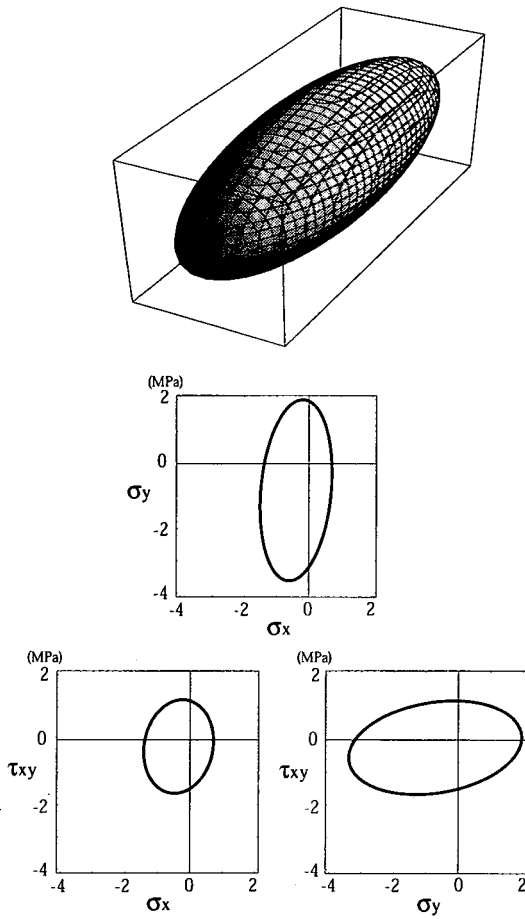


図-13 岩盤に対する巨視的破壊基準面  
(ユニットセル1, 基質部は安山岩)

ユニットセルに対して巨視応力空間において原点から適当な間隔で放射状に広がる728通り<sup>1)</sup>の単位応力  $\{\bar{\Sigma}\}$  を数値的に与え、2.(4)に述べた方法に従って岩盤の破壊基準を定めた。そしてさらに極限荷重解析に用いるために平面ひずみ条件下での基準に変換した。

例として、式(13)に均質化弾性係数が与えられているケース (ユニットセル1, 基質部は安山岩) についての破壊二次曲面を式(15)に、また、それが  $\sigma_x$ - $\sigma_y$ - $\tau_{xy}$  空間において描く曲面を図-13に示す。

$$F(\{\Sigma\}) = \{\Sigma\}^t [A] \{\Sigma\} + \{b\}^t \{\Sigma\} - 1 = 0 \quad (15-1)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0.997 & -0.075 & -0.085 \\ & 0.161 & -0.065 \\ \text{Sym.} & & 0.557 \end{bmatrix} \quad (15-2)$$

$$\{b\} = \{0.673 \quad 0.201 \quad 0.172\}$$

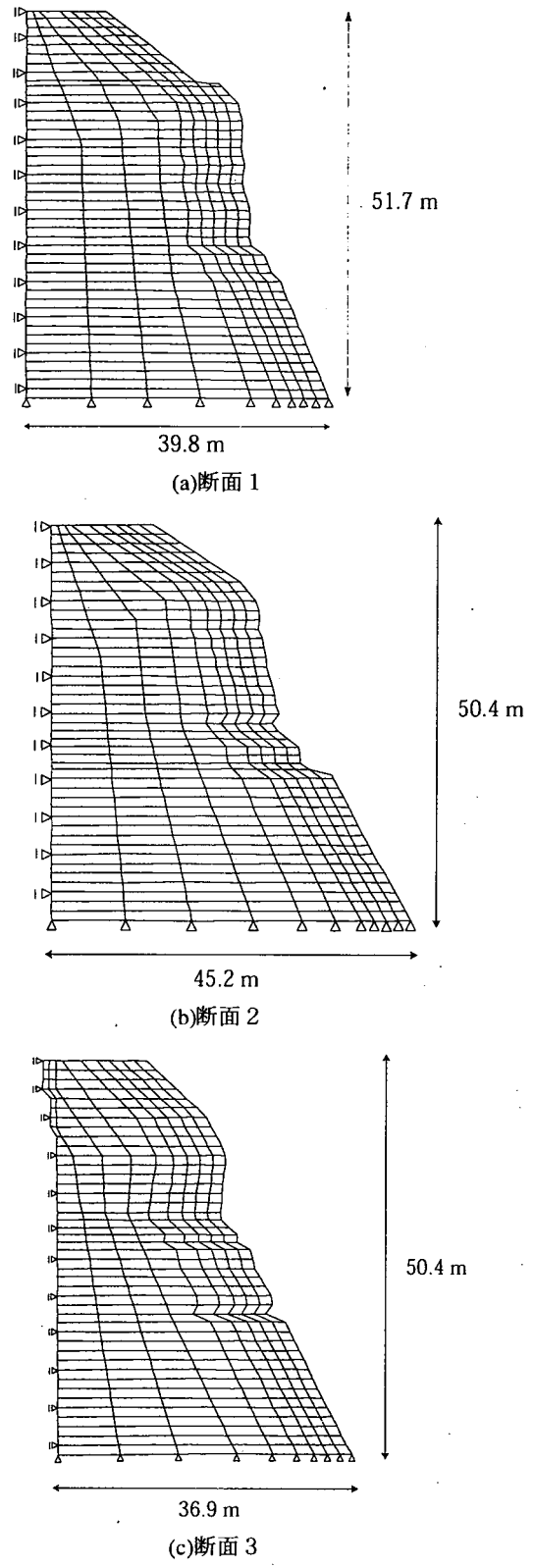


図-14 解析の対象とした斜面形状と有限要素モデル

表-2 自重に対する破壊安全率

| (断面1)           |   |       |               |               |
|-----------------|---|-------|---------------|---------------|
|                 |   | 安山岩   | 安・凝灰岩<br>(細粒) | 安・凝灰岩<br>(粗粒) |
| 一軸圧縮<br>強度(MPa) |   | 232.5 | 171.3         | 116.5         |
| ユニット<br>セル      | 1 | 4.09  | 3.01          | 2.05          |
|                 | 2 | 3.04  | 2.20          | 1.53          |
|                 | 3 | 3.68  | 2.71          | 1.85          |
| (断面2)           |   |       |               |               |
| ユニット<br>セル      | 1 | 4.16  | 3.07          | 2.09          |
|                 | 2 | 3.45  | 2.54          | 1.73          |
|                 | 3 | 4.21  | 3.11          | 2.12          |
| (断面3)           |   |       |               |               |
| ユニット<br>セル      | 1 | 4.18  | 3.09          | 2.10          |
|                 | 2 | 3.45  | 2.54          | 1.73          |
|                 | 3 | 4.12  | 3.04          | 2.07          |

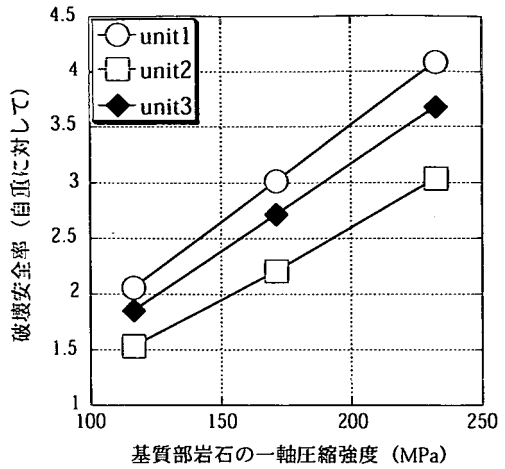
(6) 極限荷重解析による岩盤斜面の安定性評価

対象とする斜面の安定性評価は、写真-1の中に示している3カ所の断面を抜き出して平面ひずみ条件のもとでの極限荷重解析によって行う。3カ所の断面それぞれを断面1、2、3とする。図-14に各断面の有限要素モデルを示す。

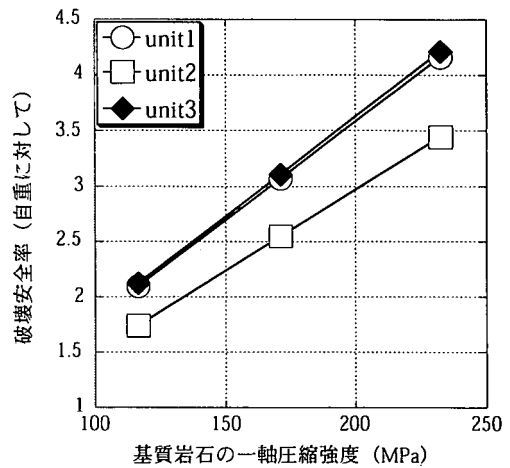
各断面に対し、図-10に示しているような亀裂パターンが紙面奥行き方向( $x_3$ -方向)に連続しているとして、岩盤の強度として先に求めた9通りの破壊基準を与える。

解析では、まず式(13)に代表例を示したような岩盤の弾性係数 $[E^H]$ を用い、自重 $\{\bar{F}\}$ を与えて弾性解析によってこれとつりあう静的可容応力 $\{\bar{\Sigma}^s\}$ を求める。ここで、必ずしも均質化弾性係数を用いる必要はないが、単位外荷重に対する変位を知りたい場合もあるので、開発した解析コードでは均質化解析によって得られた均質化弾性係数を用いるようにしている。しかし、今の場合には与えた単位外荷重が自重なので、得られた変位には現実的な意味はない。

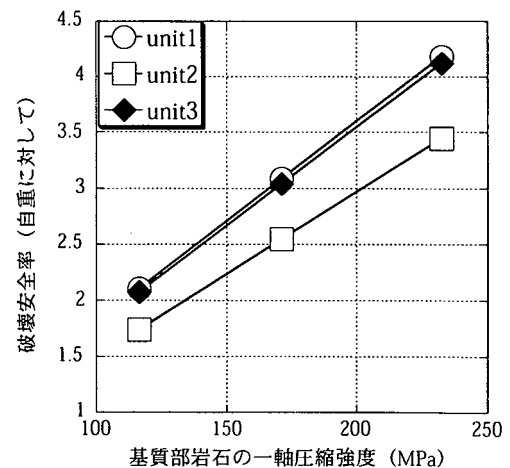
次に、破壊基準を接平面で覆って凸多面体に置き換え、式(10)の $\{\bar{N}\}$ ならびに $\{\bar{R}\}$ を決定する。そして、 $\{\bar{\Sigma}^s\}$ と共にこれらを式(10)に用いて荷重係数 $\alpha$ を求める。この荷重係数は、斜面が自重が $\alpha$ 倍になるまでは壊れないという自重に対する破壊安全率を表すことになる。



(a) 断面1



(b) 断面2



(c) 断面3

図-15 斜面の自重に対する安全率

このようにして算出した破壊安全率を表-2 および図-15に示す。各断面に対しては、3種類のユニットセルと3種類の岩石物性値の組み合わせについて9通りの安全率を求めている。

結果に見るとおり、自重に対する破壊安全率は1.53~4.21の範囲に分布した。この結果は、対象斜面は対策工を施す以前においてもひとまずは自立することを示すもので、対策を施す以前に崩壊は無かったという事実と合致している。そして、最悪のシナリオ（断面1，ユニットセル2，基質部が凝灰岩質安山岩(粗粒)の組み合わせ)における安全率1.53という値は、対策以前の斜面が、現地調査を行った専門家たちに「崩壊の危険性」を感じさせるものであったことに符号していると考えられる。

この1.53という安全率が「崩壊の危険性」を具体的にどのように反映しているのかについては大いに議論の余地がある。しかし、定性的に「危険」であると指摘された斜面に対して、本解析法が定量的な安全指標として、もっともらしい安全率を評価値として与えることができたという事実を強調したい。こうした結果は、本解析法の実斜面への適用性を示唆するものであると判断する。

#### 4. おわりに

本研究では、著者らが既に提案している安定解析手法の実用化を図ることを目的に、全国一斉点検において「危険」と判定された岩盤斜面の一つを取り上げてその安定性についての定量評価を行った。

本研究で用いた解析手法では、入力情報として現位置調査による亀裂の分布パターンおよび室内試験による岩石コアの力学特性のみを用いる。この二つの特性は不連続性岩盤の挙動を支配する最も基本的な属性であり、しかも、我々が実務において入手可能な情報である。現実の複雑な岩盤に対して、そうした基本的な支配要因を用いた解析手法はどのよう

な具体的評価を提示し得るのか。それを調べるのが本研究の目的であった。そして、複数の専門家が「危険」と判断した斜面に対して、平時の自重の1.53倍が加わると崩壊するという評価を与え、本手法の現実の岩盤への適用性が示された。

本手法は岩盤斜面の形状、岩石の物性値、亀裂の分布状況を示す画像データがあればよく、その応用範囲は広い。例えば、広域にわたる道路斜面の管理において、航空写真のデジタルデータ化によって広域のラフな安定解析を行って危険箇所を粗く特定しておき、該当地区において本手法による精密な安定性評価を行えば、危険度が一定尺度のもとに定量的に評価できることになる。そのようなシステムが実現すれば、さらに合理的・効率的な維持管理体制が確立できると思われる。本研究の実用化のひとつの方向であると考えている。

**謝辞：** 本研究では、国土交通省東北地方整備局三陸国道事務所、同宮古維持出張所および(財)道路保全センター東北支部からの多大なるご支援をいただいた。心からの謝意を表したい。また、岩石試験および解析作業においては東北大学大学院工学研究科土木工学専攻の石見政男技官と比嘉靖弘君（現沖縄県庁）に協力頂いた。ここに記して併せて感謝の意を表したい。

#### 参考文献

- 1) 京谷孝史, 寺田賢二郎, 欧陽立珠: 岩石の力学特性と不連続面画像情報による岩盤の変形強度特性評価, 土木学会論文集, No. 631/III-48, 131-150, 1999.
- 2) Cohn, M. Z. and Maier, G. (eds): Engineering plasticity by mathematical programming, Proc. NATO Advanced Study Institute, Pergamon Press, 94-134, 1977.
- 3) Lama, R.D. and Vutukuri, V.S. 著, 増田秀夫, 田中壮一訳: 岩の力学的性質II, 古今書院, 1992.

(2000.10.20 受付)

## AN APPLICATION OF THE STABILITY ANALYSIS METHOD BASED ON THE HOMOGENIZATION THEORY TO A ROCK SLOPE

Takashi KYOYA and Lizhu OUYANG

The stability of a rock slope beside the Root 45, which has been qualitatively judged as "a dangerous slope" by many experts of the Ministry of Construction of Japan, is quantitatively evaluated by the analysis method that has already been proposed by the authors based on the homogenization theory, and the validity of the proposed analysis method is examined. In the analysis only graphical image of crack pattern and the mechanical properties of intact rocks consisting of the rock mass are used. The results analyzed show rather good evaluation for the "dangerous state" of the rock slope, and the validity and applicability of the method is confirmed.