

岩盤斜面安定解析のための2次元個別要素モデル

西村 強^{1*}・福田 毅²・辻野 考治¹

¹鳥取大学大学院 工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²(株)地層科学研究所 大阪事務所 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-7-19 第7新大阪ビル)

*E-mail:tnishi@cv.tottori-u.ac.jp

本研究では、個別要素モデルを用い、岩盤斜面内で発生する進行的な破壊とそれが大変形に至る過程を解析した。要素間に結合力を考慮した要素接触モデルを用い、まず、円形要素の2次元積層体から切り出した岩石供試体モデルの示す圧縮強度と引張強度を求めた。これに続いて、同積層体より一様勾配の2次元斜面モデルを切り出した後、遠心加速度模型実験を参考に重力加速度を増加させて斜面モデルの安定性を解析した。この手順により供試体モデルに破壊が生じたときの荷重状態あるいは(数百mの)実斜面内の荷重状態を再現できると考えた。設定する加速度の大小に対する斜面の安定性および要素間の接触モデルに破壊が生じて斜面が大変形に至る過程を解析結果として報告している。

Key Words: rock slope, distinct element analysis, progressive failure, scale

1. 緒言

国土の4分の3が山地を占め、構造運動や火山活動の影響を受けた脆弱な岩盤が広く分布する我が国では、岩盤崩壊は至る所でみられる地質学的現象であると同時に、避けては通れない災害の一つとなっている。岩盤斜面崩壊による被害が甚大であることは、越前海岸(1990)、豊浜トンネル(1996)、そして、えりも町(2004)の事例を見れば明らかである。土砂斜面に比べ、素因と誘因が複雑に絡む現象であるため、岩盤崩壊についての調査・対策工の完成度の高いマニュアルというはまだまだなく、調査方法から解析手法、対策工事手法まで、まだ進化段階にあるとされる¹⁾。

岩盤斜面を構成する岩盤は、必ずと言えるほど数種の岩種で構成されており、また、不連続面を含んでいる。このような岩盤斜面の安定性を評価するとき、連続した一面をあるいは数面の断続的な不連続面を連結した面をすべり面として仮定して解析を実施することがある。この仮定の導入は、採用する数値解析法が必要とする入力条件とも関連する(例えば、極限平衡解析)が、小規模な斜面崩壊に対する解析であり、ごく少数の不連続面の方向や強度が斜面の安定性に対して支配的な場合では有効と判断できる。しかしながら、鉱山跡地の大規模な斜面や自然斜面の例に対しては、一つの面があるいは複数の面が(崩壊前から)連結して存在しているとは考えにくい。Einstein, et. al.²⁾などが指摘するように主要な不連続

面の連続性(persistence)が与える影響は、むしろ限定的であり、既存の不連続面付近に生じるであろう応力集中とそれに伴う破壊や時間依存性の性質として表現される強度低下などが斜面の不安定化そして崩壊に至らせる過程の解析が重要ではないかと考えられる。

2. 岩盤斜面解析における崩壊過程のモデル化

1.に述べた観点から 既往の研究例を幾つか示すと以下のようなものである。金子らは、亀裂面の変位くい違い量を直接変数とする変位くい違い法を用いて均質岩盤斜面における亀裂生成・伸張過程を解析し、均質岩盤斜面の崩壊過程とその安定性を考察している³⁾。Eberhardtらは、岩盤斜面内の進行性破壊を表現する手法としてFEMとDEMのHybrid解析法を採用し、強度定数(粘着力、内部摩擦角)の低減モデルを導入した解析を実施している。1991年に発生したRanda rockslideの解析例を通じて進行的な破壊を視覚的に示すとともに、今後の崩壊規模・形態の推定を試みている⁴⁾。岡村らは、石膏を主体とした混合材料を用いて模型岩盤斜面を作成して遠心載荷実験により斜面の変形、すべり面の形成過程および破壊発生条件を考察している。安定係数(斜面高さに相当する深さにおける土被り圧と粘着力の比)を指標に選んで、限界平衡解析および有限要素解析により実験結果の検証と斜面の安定性の検討に利用している⁵⁾。石丸らは、岩盤

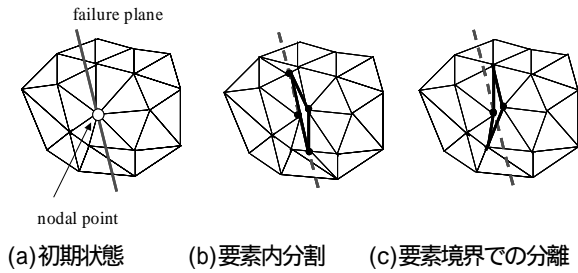


図-1 不連続面の生成と伝播のモデル化

斜面の地震時破壊現象を研究する手法として遠心場を利用した振動実験を実施している。実験材料の調整法などの実験手順の検討と既存の不連続面が斜面の崩壊に与える影響を調べた例を報告している⁶⁾。数値解析からみれば、既存および生成される破壊面のモデル化が重要であり(金子ら, Eberhardtら), また, 実験からみれば, 応力を実物と同レベルに保つことと材料を如何に選定するか(岡村ら, 石丸ら)が注目点のようである。

本文は, 力学解析法に個別要素法 (DEM)⁷⁾を用い, 斜面に生じる進行的な破壊とそれが大変形に結びつく過程を表現する解析技術の開発を試みている。不連続面の進展を表現する解析手順としては, 大きく次のように整理できる(図-1参照)。

(1) 適用する破壊規準に基づいて, 不連続面の発生と進展方向を求める。その指定方向に沿い要素を(その都度)分割する(図-1(b)参照),

(2) 予め弾塑性解析を実施して, 想定される不連続面進展方向に沿う要素境界により分割を行っておく。亀裂進展は, 既存の要素境界の分離で表現する(図-1(c)参照)。

以上の手順を有限要素法や個別要素法のように領域を分割する手法に用いる場合, 要素分割に演算時間を要する, また, 特に(2)の手法では, 不連続面の進展方向が事前の弾塑性解析に影響されるとなどの問題点が指摘できる。このような問題点の低減策として, 円形要素に要素間の結合(すなわち引張応力とモーメントの伝達)を認める接触モデルを採用して一様勾配の斜面の解析を試みた。結合要素間の破壊は, 要素境界上で生じ, 不連続面の方向は該当2要素間を結ぶ線分に垂直となる。不連続面の逐次進展を解析するとき, 最小進展長は円形要素の直径に依存することになるので, 要素径の設定に注意する必要がある。また, 個別要素解析では, 要素間定数(例えば, 接触剛性係数)と要素集合体として特性(例えば, ヤング率)の関係を(一軸試験などの)模擬供試体を利用して求めることがある。斜面モデルでは, 模擬供試体の解析で得られる特性を保持しながら, かつ, 実斜面で生じる応力レベルで解析を実施することが望

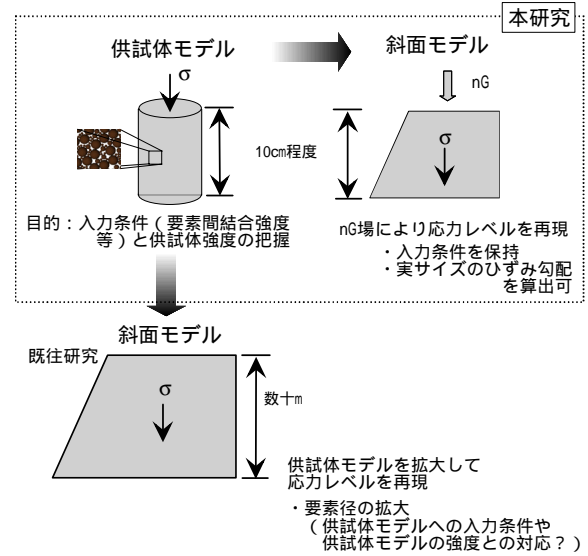


図-2 nG場を利用した解析手順

ましい。次章には, これらに対する一つの手順を述べることにする。

3. 供試体モデルと岩盤斜面モデルに発生する荷重レベル

本章では, 模擬供試体(例えば, 一軸圧縮供試体モデル)の強度変形特性を反映させた斜面モデル作成に関する一手順を述べる。DEM解析において, 供試体強度を求めた後に斜面解析を実施するにあたり, (要素数の制限を理由に何の考察もなく, 数mに)要素径を大きくして, 数百mの実寸法斜面内の応力レベルの再現する例があるとしよう。このような解析手順を用いるとすれば, 要素間物性などの入力条件が斜面解析に与える影響や応力状態の再現性の説明に合理性を欠いていると考えられる。つまり, 剛性係数など要素間の入力条件は同じで良いのか, 変更するとすれば, その根拠はどこにあるのかという点である。

本手順では, 遠心加速度模型実験を参考にして, 重力加速度を増加させる解析手順を導入して上記への対案とした。実物の $1/n$ の幾何学的相似模型を nG (G :重力加速度)の遠心力場においての場合の実物と模型の関係を考える。添字 p, m はそれぞれ実物と模型を表すものとする。まず, 幾何学的には,

$$\text{長さに関して} \quad L_m = L_p/n \quad (1)$$

$$\text{面積に関して} \quad A_m = A_p/n^2 \quad (2)$$

$$V_m = V_p/n^3 \quad (3)$$

となる。したがって、岩盤の単位体積重量は $\gamma_m = n\gamma_p$ 、高さ $z_m (= z_p/n)$ における自重による鉛直応力 $\sigma (= z\gamma)$ は、

$$\sigma_m = \gamma_m z_m = (n\gamma_p)(z_p/n) = \sigma_p \quad (4)$$

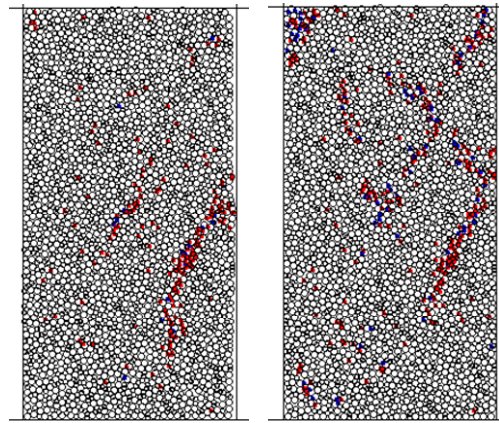
となる⁸⁾。つまり、模型と実物の鉛直応力が等しくなる。以上を参考にして、遠心加速度場を想定した岩盤斜面モデルの解析を実施すれば、図-2 に示すように、 nG におかれた縮尺斜面解析モデル内には、数十 m の実斜面と同等の荷重レベルを発生させることが可能となる。また、このようにすれば、供試体破壊時に発生する荷重レベルが岩盤斜面モデル内に再現できると考えられるばかりでなく、予め設定した領域内に要素を配置して集合体を作成し、それより供試体モデルと斜面モデルの両方を切り出すことにより、同一の構造（要素配列）を用いた解析が可能である。両モデル間において要素配置などの幾何学的関係が明確であり、かつ、入力する加速度の大小と斜面モデル内の要素の変位に注目すれば、斜面の安定性を評価する客観的指標に利用できる可能性があると考えた。また、剛体間の接触を表現するパネーダシュポット系モデルに、要素間に結合物質の存在を加味して、その物質の引張破壊やせん断破壊を考慮したモデル⁹⁾を導入すれば、斜面内に生じる進行的な破壊も表現できるとも考えた。

4. 供試体モデルの解析

供試体モデルを作成して、要素間の接触剛性係数や結合に与える条件（剛性や強度）と供試体としての強度の対応を調べた例を示す。それは、後述の斜面を構成する積層体の特性を供試体レベルの変形強度特性で示しておくためである。図-3 に示すように高さ $h_0=120\text{cm}$ 、幅 $w_0=60\text{cm}$ の圧縮解析モデルと、図-4 に示す直径 $d_0=60\text{cm}$ の圧裂解析モデルを用いる。これらは、以下の手順により作成したものである。まず、2次元平面内に剛な境界で囲まれた長方形領域を仮定して、その内部に擬似乱数を用いて円要素の中心座標を与えて円形要素を配置する。次に、面内の所定の方向に重力に相当する加速度を作用させて要素同士を運動させて、要素同士が接触している状態を作成する。続いて、その積層体より圧縮解析モデルあるいは圧裂解析モデルのサイズとなるように要素群を切り出した後、供試体が自立できるように、接触点間に結合力を導入して解析モデルとしたものである（これを初期状態とする）。このモデルに用いた円形要素の直径は表-1 に示す3種であり、各直径の要素数が予め設定した数となるように要素を生成している。表-1 に接触剛性

表-1 円要素に与えた特性

円要素	密度	$\rho=2650(\text{kg/m}^3)$
	直径	$D=2.0, 1.4, 1.0(\text{cm})$
	接触剛性係数	$k_n=100\text{MN/m}$ (法線) $k_s=25\text{MN/m}$ (接線)
	静止摩擦係数	$\mu=0.577$ ($\tan^{-1}\mu=30^\circ$)
結合物質	剛性係数	$E_n=100\text{MN/m}^2$ (法線) $E_s=25\text{MN/m}^2$ (接線)
	せん断強度	$\tau=1.0\text{MN/m}^2$
	引張強度	$\sigma_t=1.0\text{MN/m}^2$



(一軸圧縮解析) (二軸圧縮解析)

図-3 破壊点図(圧縮解析)

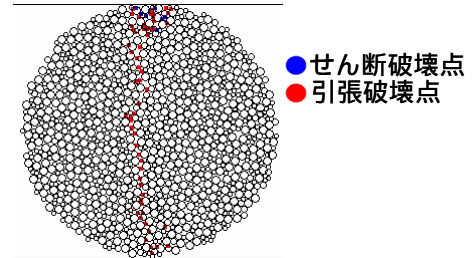


図-4 破壊点図(圧裂解析)

表-2 解析条件と供試体モデルの解析結果

時間増分	$\Delta t=1.0 \times 10^{-5}(\text{sec})$
変形増分(Δt あたり)	$\Delta u_y=1.0 \times 10^{-6}(\text{cm})$
模擬供試体の特性	
配合比 $D_{20}:D_{14}:D_{10}$	45:17:38
一軸強度 $q_u(\text{MN/m}^2)$	1.440
圧裂強度 $\sigma_t(\text{MN/m}^2)$	0.156
ヤング率 $E(\text{MN/m}^2)$	145.0
ポアソン比 ν	0.295
粘着力 $c(\text{MN/m}^2)$	0.359
内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	36.9

係数や結合物質に与えた解析条件を示している。

表-2 に作成した積層体の要素直径の配合比を、全体を 100 として示した。この表において、例えば D_{20} の下添字 20 は、直径が 2.0cm であることを示しており、積層体作成段階では所定の直径の要素の個数を入力して要素を生成しているため、(17, 38 などの) 表中の数値となっている。

圧縮試験および圧裂試験を模擬した手順で解析を行う。圧縮試験を模擬した解析では、図-3 の上下の線分要素の変位とその線分要素への接触力の総和をモデル幅（左右端の要素の距離）で除して載荷応力とした。また、供試体の上部、中央部および下部において、注目要素を各 2 点計 6 点選び、それらの上下方向ならびに横方向の変位（つまり 2 点間の距離変化）を出力して、軸ひずみ ε_y および横ひずみ ε_x を求めた。このようにして、ひずみを求めた後、平面ひずみ状態を仮定してヤング率 E とポアソン比 ν を求めて供試体の特性とした。

$$\nu = \frac{(\varepsilon_x / \varepsilon_y)}{(\varepsilon_x / \varepsilon_y) - 1} \quad (5)$$

$$E = (\Delta\sigma / \Delta\varepsilon_y)(1 - \nu^2) \quad (6)$$

表-2 に圧縮解析・圧裂解析より求めた供試体モデルの

物性値を示す。なお、二軸圧縮解析時では、側圧 (p_x) を一定に保っておき、上部載荷板に y 軸負の方向へ変位増分を与え、軸圧 (p_y) が最大値を示す時をもって供試体は破壊に至るとした。また、異なる側圧 (p_x) に対して同様の手順を繰り返して、破壊時の応力に基づいてモール円を描き、包絡線の切片と傾きにより粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ の値を決定した。

図-3 には、供試体への載荷応力が最大値となった時

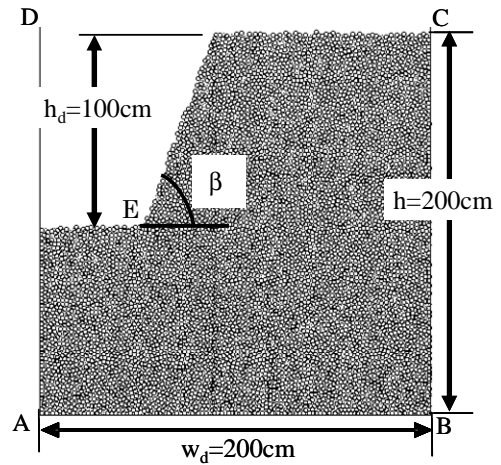


図-5 岩盤斜面解析モデル

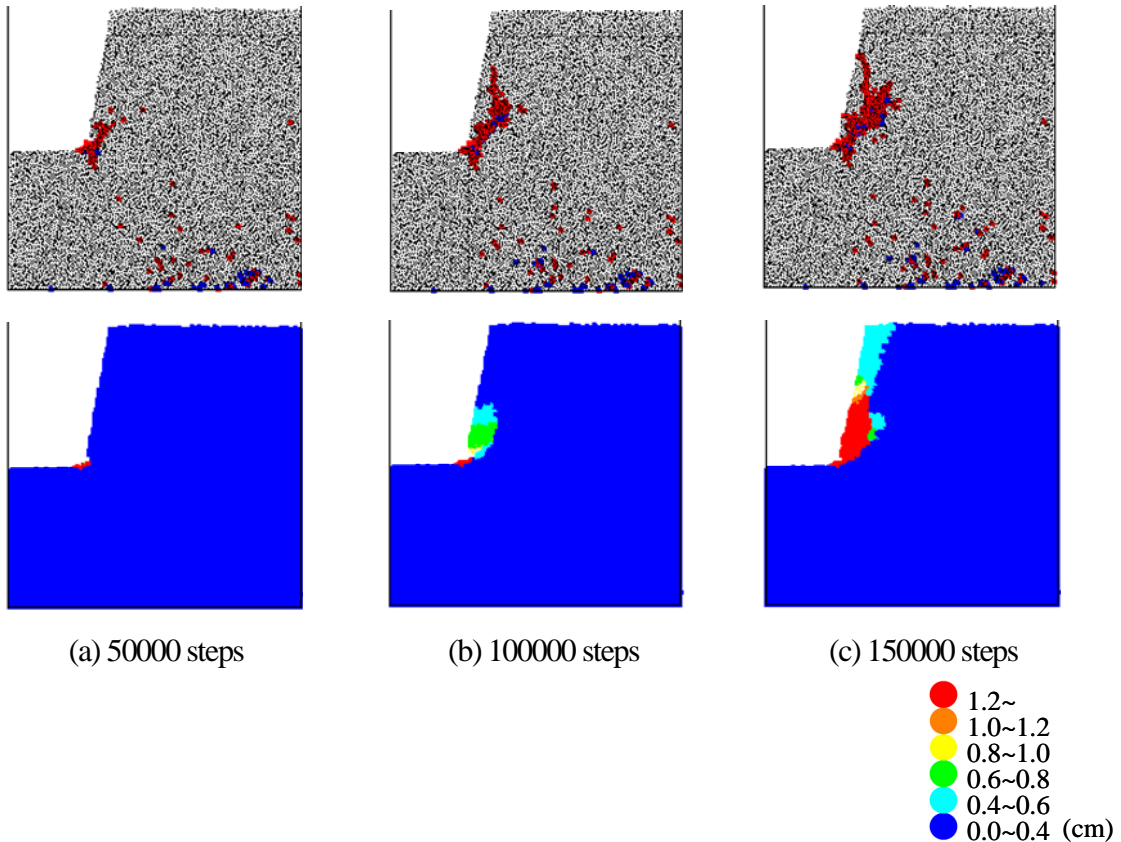


図-6 斜面内に生じる破壊点（上）と要素の変位分布（下）

の破壊点の分布図も示している。この図より、破壊点ではせん断破壊ばかりでなく引張破壊も生じていること、破壊点を連ね、それを破壊面と呼ぶならば、それは軸方向に対して傾きを有するなどの解析上の観察ができる。図-4 に圧裂解析における破壊点の分布図を示す。この図より圧裂引張解析では破壊面が供試体モデルの中心線付近に発生している。

5. 岩盤斜面モデルの崩壊解析

図-5 に示すように高さ $h_d=100\text{cm}$ 、幅 $w_d=200\text{cm}$ 、斜面傾斜角 β の岩盤斜面モデルを設定する。解析定数は表-1 に示したとおりであり、図は、 $n=100$ として各要素の変位増分が静止判定基準となった状態である。この後、 n を段階的に増大させたとき、岩盤斜面モデルの各円形要素は静的安定状態に達するか、それとも、要素間の結合物質に 3. で模擬した破壊が生じて斜面が不安定状態に至り、(要素個々の変位が集積して斜面が) 大変形に至るかに注目して解析するものである。

上述のような大変形に至った一例として、図-6 に、 $\beta=80^\circ$ 、 $n=145$ (5G ずつの段階的な増加過程で決定) としたときの破壊点の分布(上)と要素変位図(下)を示す。まず、斜面 E 点(図-5) 付近の要素間に破壊が生じて、その後、斜面上部でも観察されるようになる。また、変位図より要素の変位量も E 点付近から斜面上部に向い徐々に大きくなる様子がわかる。図中の step 数は、 n の値に増分を与えて後、表-2 中の Δt で繰り返した計算回数を示している。この繰り返し回数に Δt を乗ずると、 n の増加により荷重増分を斜面全体に与えて以降の経過時間となるが、実時間としての評価は出来ないと思われる。むしろ、所定の变形(たとえば図-6 の(b)に示す変位)が発生するために必要とされたエネルギーに相当するものと捉えるべきと考えている。

DEM 解析により求めた崩壊時の換算限界高さ $H_d (=nh_d)$ と円弧すべりを仮定した限界平衡解析¹⁰⁾より求められる限界高さ H_e を比較した例を図-7 に示す。限界平衡解析に際しては、 $\gamma=25\text{kN/m}^3$ と仮定し、表-2 に示した c 、 ϕ の値を用いている。この図より、 c 、 ϕ が与えられたときの斜面傾斜角の変化に対する限界高さの変化に注目すると、DEM 解析結果の与える換算限界高さ H_d の変化は、限界平衡解析が与える限界高さ H_e のそれより小さいことがわかる。さらに、 $\beta=70^\circ$ 程度を境界にして、これ以下の角度では DEM 解析結果の与える換算限界高さ H_d が、限界平衡解析の与える限界高さ H_e より低く、これ以上の角度では、DEM 解析結果の与える換算限界高さ H_d が高いことがわかる。このように H_d と H_e の変化の様子が異なることに

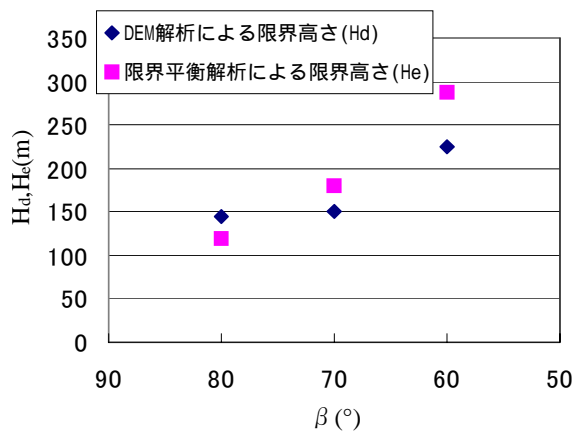


図-7 DEM 解析と限界平衡解析による限界高さ

は、円形要素の集合体として斜面をモデル化していることばかりでなく、破壊モード(せん断、引張)、破壊面形状あるいは全般破壊・逐次破壊の差などが影響していると考えられる。

次に DEM 解析により求めた結果から岩盤強度を逆算し、これにより斜面の限界高さを予測することを考えてみる。 $\beta=70^\circ$ 、高さ 150 m (DEM 解析により求めた崩壊時の換算限界高さ)の解析例に同じく $\gamma=25\text{kN/m}^3$ と仮定し、表-2 に示した ϕ の値を用いて限界平衡解析を適用すると、岩盤の粘着力は $c_e=0.300(\text{MN/m}^2)$ と算定された。この c_e の値を用いて限界平衡解析により求められる $\beta=60^\circ$ に対応する限界高さは $H_e=240\text{m}$ となり、DEM 解析により求めた換算限界高さは $H_d=225\text{m}$ であるので、限界平衡解析により求められる限界高さ H_e の方が 15m 高いという結果となる。一方、 $\beta=80^\circ$ に対応する限界高さは $H_e=100\text{m}$ となり、DEM 解析により求めた換算限界高さは $H_d=145\text{m}$ であるので、数値解析により求めた換算限界高さ H_d の方が 45m 高いという結果となる。

以上のことから、斜面傾斜角の変化に伴う限界高さの変化を比較すると、DEM 解析が与える(換算)限界高さ H_d の変化の方が限界平衡解析の与える限界高さ H_e のそれに比べ小さいこと、また、限界平衡解析により求められる限界高さ H_e は、DEM 解析により求めた換算限界高さ H_d に比べ、急傾斜地斜面では安全側、緩傾斜地斜面では危険側の予測を与えることが示された。

6. 結言

集合体としての強度を知るための供試体解析モデルと斜面解析モデルに同寸法の要素を採用するとともに、斜面内応力状態の再現に対しては、遠心加速度場の原理を参照して重力加速度を増大させる解析手順を報告した。

限界平衡解析との比較を示したが、斜面傾斜角の変化に対する限界高さの変化は限界平衡解析の方が DEM 解析結果のそれに比べ大きくなっていた。これには、破壊面の形状や地盤材料の破壊条件などの差異が影響していると考えられる。また、DEM 解析において、要素配列や要素径の影響を本文では取り扱っていない。要素径は破壊面進展の最小単位となるため解析結果に及ぼす影響を検討しておく必要があると考えている。

今後は実斜面を模擬できる 3 次元モデルの開発を通じて、崩壊危険部位の抽出および破壊時加速度を用いた斜面安全度の客観的把握を可能にする手法の研究を実施する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会編: 岩盤崩壊の考え方 - 現状と将来展望 -, CD-ROM, 2004 .
- 2) Einstein, H. H., Veneziano, D, Baecher, G. B. and O'reilly, K. J: The effect of discontinuity persistence on rock slope stability, *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, Vol. 20-5, pp.227-236, 1983.
- 3) 金子勝比古, 古賀誠, 野口義文: 均質岩盤斜面の崩壊過程に関する数値解析的検討, 資源・素材学会誌, Vol.109, pp.797-802, 1993 .
- 4) Eberhardt, E., Stead, D., Coggan, J. S. : Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes – the 1991 Randa rockslide, *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, Vol. 41, pp.69-87, 2004.
- 5) 岡村宏, 菅原勝彦, 秋元昌胤, 久保田智, 兼重修: 遠心荷重実験における均質岩盤斜面の崩壊, 日本鉱業会誌, Vol.95, pp.7-14, 1979 .
- 6) 石丸真, 河合正: 遠心場振動破壊実験に用いる亀裂性岩盤斜面模型の試作, 土木学会第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.36, pp.231-234, 2007 .
- 7) Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. *Symposium on rock mechanics*, Nancy, Vol. 2, pp.129-136, 1971.
- 8) 高田直俊, 日下部治: 講座 遠心模型実験 3 .原理, 土と基礎, Vol.35, No.12, pp.89-93, 1987.
- 9) Potyondy, D.O., Cundall, P. A. : A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, Vol. 41, pp.1329-1364, 2004.
- 10) Hoek, E & Bray, J. (小野寺透, 吉中龍之進訳): 岩盤斜面工学, pp.169-175, 朝倉書店, 1979 .

DISTINCT ELEMENT MODELING FOR PROGRESSIVE FAILURE IN ROCK SLOPE

Tsuyoshi NISHIMURA, Tsuyoshi FUKUDA and Koji TSUJINO

This paper investigates a numerical modeling of progressive failure in rock mass using Distinct Element Analysis. The numerical modeling consists of two analyses. One is to get the mechanical properties of synthetic specimens of circular rigid elements with the bonded effect between elements. The other is to analyze deformation of a scaled rock slope in an accelerated field where the gravitational acceleration is increased, representing the centrifugal experiment. Over several stages of the applied acceleration to the scaled slope model, evolution of displacements and the resulting initiation of failure surface are displayed.