

重力増加手順を導入した個別要素解析

Distinct Element Analysis with the Gravity Increased Procedure for Progressive Failure in Slope

平松大周 Hironori HIRAMATSU (鳥取大学大学院工学研究科)
 栢野伸也 Shinya KAYANO (鳥取大学大学院工学研究科)
 西村 強 Tsuyoshi NISHIMURA (鳥取大学大学院工学研究科)

本研究の目的は、要素間結合モデルを導入した個別要素法 (DEM) による岩盤斜面の安定解析手法を開発することである。解析では、重力増加手順を導入して縮尺解析モデル内に実斜面規模の応力レベルを表現している。従来の解析では、すべりが卓越する崩壊モードを表現したが、本文では、斜面内に弱面を有するモデルを作成し、トップリング崩壊の解析例を報告する。その結果、弱面部の強度設定が崩壊形態に影響を与えることを示した。さらに、地震動のような外力が作用する問題を意識して、水平荷重を衝撃荷重で与える手順により解析を試み、その解析例を報告する。

キーワード：岩盤斜面，個別要素法，進行性破壊，トップリング，衝撃荷重 (IGC : G6, G13)

1. 緒言

岩盤は複雑な地質構造より形成され、特に断層、節理、層理等、大小様々な不連続面が存在するため、従来の極限平衡解析では安定性を評価することが難しい。そのため、不連続面を直接モデル化する方法として、ジョイント要素を用いた有限要素法 (JFEM)、剛体パネモデル (RBSM)、個別要素法 (DEM)、不連続変形法 (DDA) などの解析手法が開発されている。また、不連続面の数が膨大にある岩盤については、不連続面を含む岩盤を等価な連続体に置き換える手法として、クラックテンソル法やマイクロメカニクスに基づく連続体理論 (MBC) が開発されている。実斜面に適用するにあたっては、各手法の特徴を把握し、解析しようとする挙動に対して適切な解析手法を選定する必要がある¹⁾。このうち、DEMは、岩盤を構成する岩塊の個々の動きを、大変形に至るまで追跡することが可能であり、大規模崩壊に至る過程を解析する手法として適していると考えられる。近年では、要素間に結合力を考慮できるモデルも提案され、岩石供試体内の破壊過程のシミュレーションなどに利用されるようになってきている。このような供試体解析では、直径数 mm の円形要素を用いて解析が進められるが、その要素を用いて実斜面を作成することは不可能である。供試体寸法モデルが示す力学的性質を保持し、そして実斜面内の応力レベルで安定性を評価するためには、何らかの手法を考案する必要がある。

そこで、一つの積層体を作成した後、その積層体より、力学特性を把握する供試体モデルと斜面モデルを切り出し、斜面モデルには重力加速度を増加させることにより荷重を行う手順を発表した²⁾。本文は、要素間結合モデルを導入した個別要素法³⁾による岩盤斜面の安定解析手法を、弱面を有する斜面の解析および衝撃荷重による解

析へ適用することを検討した。従来の解析では、すべりが卓越する崩壊モードを表現したが、本文では、斜面内に弱面を有するモデルを作成し、トップリング崩壊の解析例を報告する。さらに、地震動のような外力が作用する場合には、モデル設定や解析手順を工夫する必要がある。本文では、荷重を衝撃荷重で与える手順により解析を試みた。既報の解析では、重力加速度を段階的に増加させる手順を用いたが、衝撃荷重を想定した手順では、鉛直方向加速度が一定の状態でごく短時間にわたり、水平方向加速度を作用させた。以上のように、本文では、斜面内部の弱面の存在が崩壊モードに与える影響、並びに水平方向の荷重が斜面の安定性・崩壊域の大きさに与える影響を例示する。

2. 重力増加手順と斜面の進行性破壊

2.1 重力増加手順の概略

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を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。これに対して、本研究では遠心加速度模型実験を参考に重力を増加させる手順を導入している。

実物の $1/n$ の幾何学的相似模型を ng (g : 重力加速度) の加速度場においた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、

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

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

$$\text{体積に関して} \quad V_m = V_p / n^3 \quad (3)$$

となる。したがって、岩盤の単位体積重量は $\gamma_m = n\gamma_p$ 、深さ $z_m (=z_p/n)$ 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⁴⁾。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、 ng 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、両者に同等の荷重レベルを発生させることが可能であり、斜面モデルは（数百 m の高さを有する）斜面内の荷重レベルを意識したことになる（図-1）。また、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だけでなく、あらかじ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。さらに、段階的に n を増加させるとき、各段階で、静的安定状態に至るか否かを判定すれば、斜面の換算限界平衡高さ H_d 、および、それを超える高さでの崩壊形態を表現できる。要素間接触モデルには、剛体間の接触を表現するバネ-ダッ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を導入している。

2.2 進行性破壊

崩壊後に計算により求めた破壊面上の平均的な土のせん断強度が、その土の実験室で求めたせん断強度より小さいことを、Bjerrum は応力集中に伴う局所的な破壊と残留強度への移行、そして、斜面内での逐次進行で説明した⁵⁾。いわゆる、進行性破壊の概念である（図-2）。前節に述べた重力加速度増加手順による斜面への载荷では、斜面内の応力状態が破壊条件を満たすという極限状態を

仮定していないので、前述の進行性破壊も表現するのではないかと想像できる。このことは、極限平衡解析（LEM）結果との比較によって考察できる。すなわち、斜面高さ H_d における安全率あるいは安全率が 1 を下回る斜面高さ H_e と H_d との比較によって検討できる。これについては 4.1 に記述する。

3. 積層体としての力学特性の把握と斜面モデル設定

図-3 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。3 種（ $D=2.0, 1.4, 1.0\text{cm}$ ）の異なった円形要素をランダムに配列させた不規則配列モデルを作成した。モデルの斜面傾斜角は $\beta=60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ の 3 種を設定した。隣接する円形要素間の力-変位関係は、図-4 に示すように、接触剛性と結合物質によりモデル化した。表-1 に接触剛性係数や結合物質に与えた解析条件を示す。まず積層体としての力学特性を把握するために、供試体モデルを用いて圧縮解析および圧裂解析を行った。図-5 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、直径 $d_0=60\text{cm}$ の圧裂解析モデルを用いる。なお、モデルは原積層体から

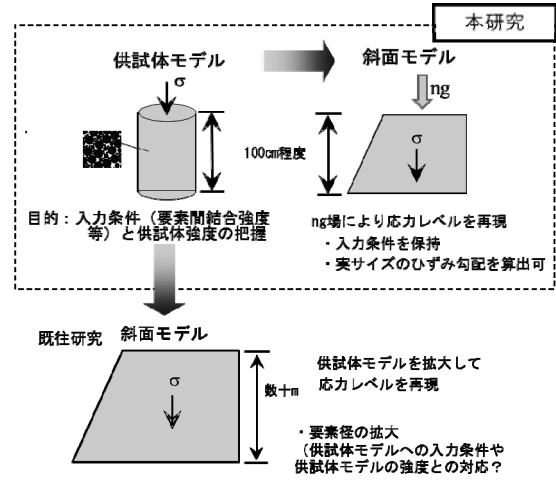


図-1 ng 場を利用した解析手順

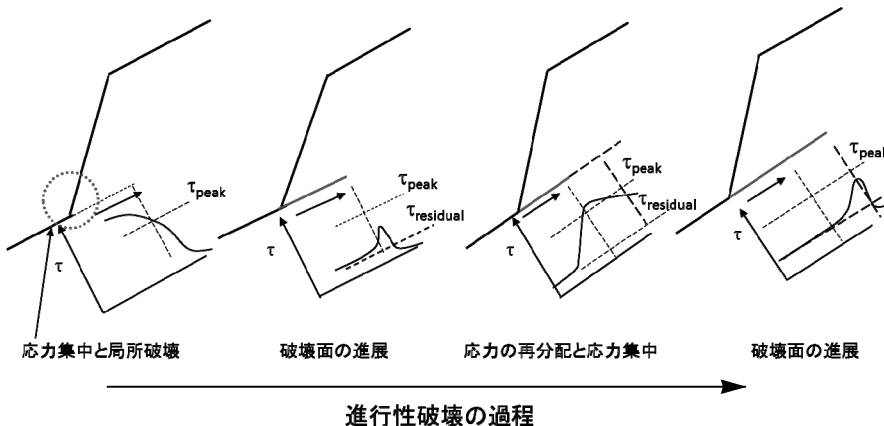


図-2 応力集中と破壊面の進展

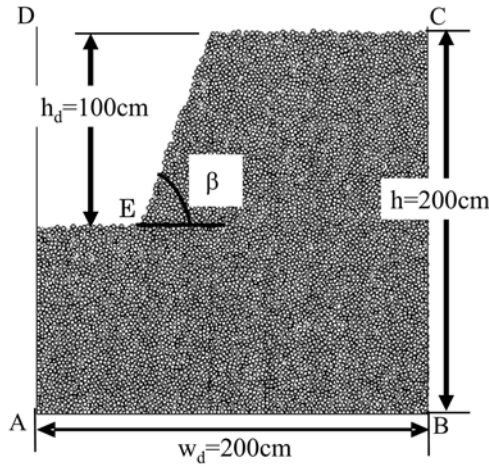


図-3 岩盤斜面解析モデル

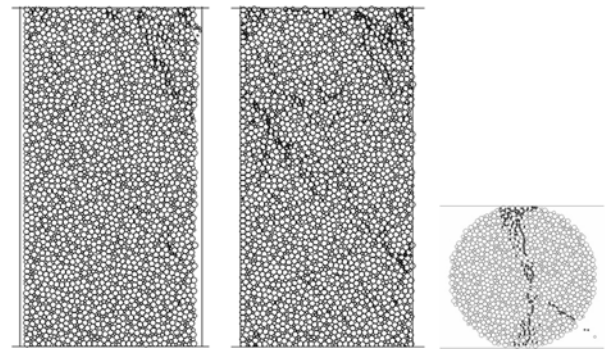


図-5 供試体解析モデル

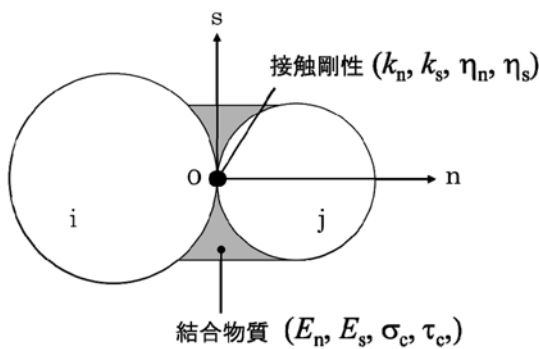


図-4 要素接触と結合

圧縮解析モデル(120×60cm²)および圧裂解析モデル(直径60cm)を切り出して作成した。また、図-5には荷重ピーク時の破壊点の分布も示している。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。表-2中の要素直径の配合比は、全体を100として示しており、下添字はD₂₀の場合は、直径が2.0cmであることを示している。

表-1 円要素に与えた特性

円要素	密度	$\rho = 2650 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
	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	$\mu=0.577 \text{ (}\tan^{-1} \mu=30^\circ\text{)}$
結合物質	剛性係数	$E_n=100 \text{ MN/m}^2 \text{ (法線)}$ $E_s=25 \text{ MN/m}^2 \text{ (接線)}$
	せん断強度	$\tau_c=1.0, 2.0 \text{ MN/m}^2$
	引張強度	$\sigma_c=1.0, 2.0 \text{ MN/m}^2$

表-2 供試体モデルの解析結果

入力値	配合比 D ₂₀ : D ₁₄ : D ₁₀	45 : 17 : 38			
	引張強度 σ_c (MN/m ²)	1.0	1.0	2.0	2.0
	せん断強度 τ_c (MN/m ²)	1.0	2.0	1.0	2.0
解析結果	一軸圧縮強度 q_u (MN/m ²)	1.46	1.63	1.82	3.11
	圧裂引張強度 σ_t (MN/m ²)	0.402	0.426	0.722	0.869
	粘着力 c (MN/m ²)	0.480	0.374	0.485	0.734
	内部摩擦角 ϕ (°)	28.9	43.4	33.6	37.7
	ヤング率 E (MN/m ²)	145			
	ポアソン比 ν	0.295			

4. 斜面の崩壊解析

4.1 準静的荷重による解析

4.1の解析では、重力加速度を段階的に増大させる手順をとり、各段階で静止安定状態となるか否かを判定するので、荷重の荷重形態としては準静的荷重と言える。図-6に示すように、加速度(n_1g)において、静止状態が得られたとする。この時点では、適用された加速度(n_1g)の作用では要素間の破壊はほとんど起こらず、一回の計算時間 1step($\Delta t=1.0 \times 10^{-5} \text{sec}$)における全要素の変位増分は減少し、モデルは静的安定状態に達している。これは、 n_1g により導入されたエネルギーが要素間の接触点と結合物質の両方にひずみエネルギーとしてモデル内に吸収されたことを意味する。続いて($n_1+\Delta n$) g に増加させる。ここ

で、本解析例においては、増分 Δn は最小で5とする。このとき要素間に破壊が生じ、要素個々の変位が集積して斜面が大変形に至った場合、換算限界高さは n_1h_d より大きく、($n_1+\Delta n$) h_d より小さいことになる。斜面が大変形に至るまで n を増加させる手順を繰り返し、解析を行うものとする。図中のstep数は、 n の値に増分を与えた後、時間差分間隔 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 を乗ざると、荷重増分(5g)を斜面全体に与えてからの経過時間となる。これは、解析における経過時間であるが、文献によれば時間に関しては、 $t_m=t_p/n$ が成り立つ⁶⁾ことから、実時間への読みかえも可能である。ここで添字 p, m はそれぞれ実物と模型を表す。例えば、後出の図-7の30000stepのとき、 $\Delta t=1.0 \times 10^{-5} \text{sec}$ 、 $n=185$ であるので555secと計算される。

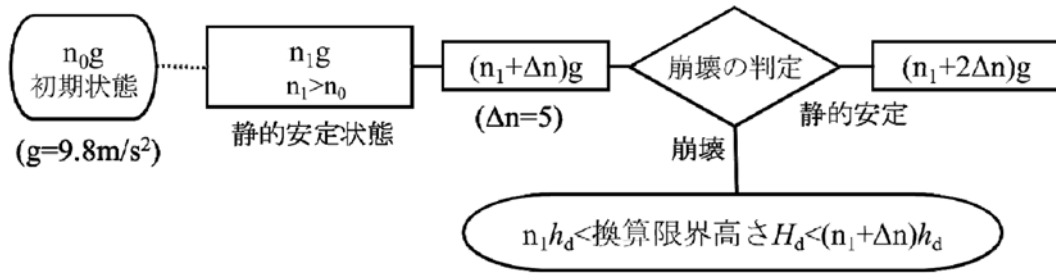


図-6 重力増加手順による解析フロー

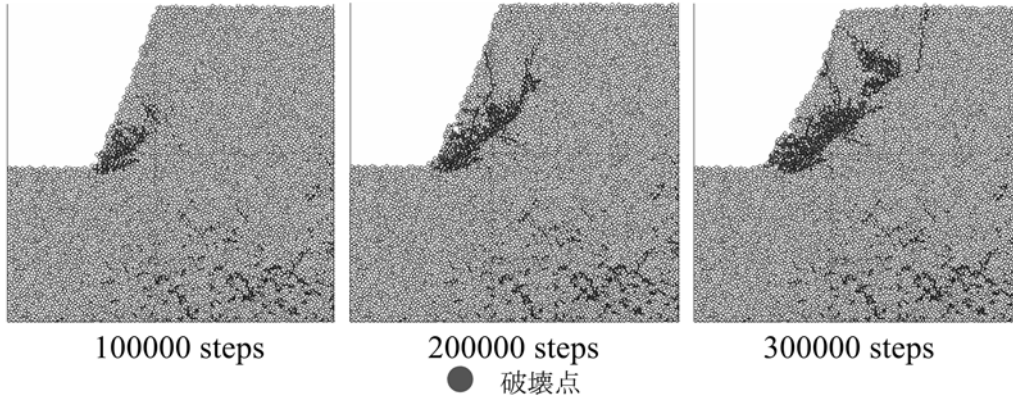


図-7 斜面モデル解析結果 ($\beta=70^\circ$, $\sigma_c=\tau_c=1\text{MPa}$, $n_1=185$ における破壊点図)

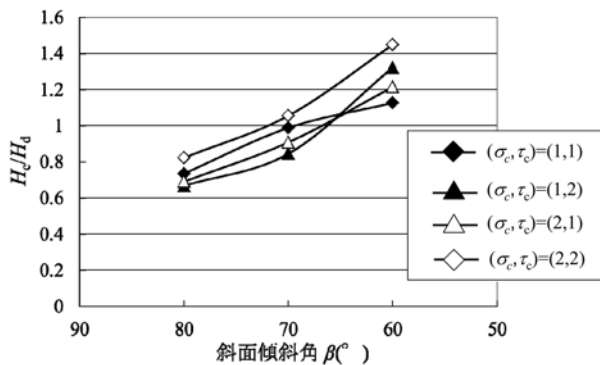


図-8 DEM解析と極限平衡解析による限界高さの関係

(a) すべり破壊

図-7 に、 $\beta=70^\circ$ 、 $\sigma_c=\tau_c=1\text{MPa}$ のモデルにおける破壊点の分布図を示す。鉛直加速度を 185g ($n=185$) に増加させた段階で斜面は崩壊に至った。まず斜面 E 点 (図-3) 付近の要素間に破壊が生じて、法面や斜面上部へ向かって破壊が進行している。その後、上部地表面でも破壊が観察されるようになる。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極限平衡解析⁷⁾より求められる限界高さ H_e を比較した例を図-8 に示す。極限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、 $\beta=70^\circ$ 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、極限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。このように極限平衡解析の与える限界高さが $\beta=70^\circ$ 以上で DEM 解析結果に比較して過小な評価を与えていることには、極限平衡解析では亀裂の伸長・発生などの逐次破壊が考慮

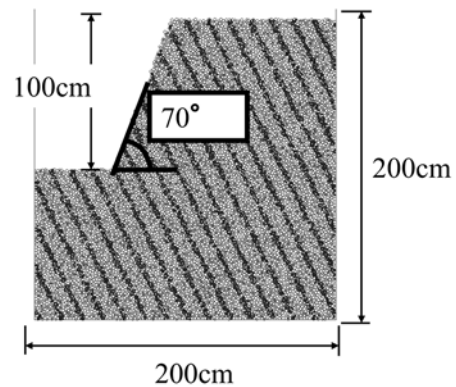


図-9 弱層を含むモデル

されていないことなどが関係していると考えている。

(b) トップリング破壊

弱層が斜面内部に存在する場合のモデル化及び解析を実施した。図-9 のように、 $\beta=70^\circ$ 、弱層の間隔 10cm、水平に対する弱層の傾斜角を 65° とする受け盤を想定したモデルを設定した。図中の色が濃い部分が弱層を示している。弱層の設定方法は、弱層に相当する部分の要素間結合強度の値を、表-2 に示す初期値よりも小さくすることにより設定した。弱層の強度が斜面の限界高さや崩壊形態に影響を与えたと考え、弱層部の要素間結合強度の値を変えて解析条件として与えた。なお、要素間の結合強度の初期値は $\sigma_c=\tau_c=1\text{MPa}$ と設定した。図-10 は、弱層部の結合強度が $\sigma_c=\tau_c=0.75\text{MPa}$ と、 $\sigma_c=\tau_c=0.25\text{MPa}$ のケースの破壊点分布図である。崩壊形態と弱層強度の関係に注目すると、弱層強度が大きい場合、すなわち弱層とそれ以外の部分との強度の差が小さい場合はすべり破壊となる傾向がある (図-10 上)。一方、弱層の強度が小

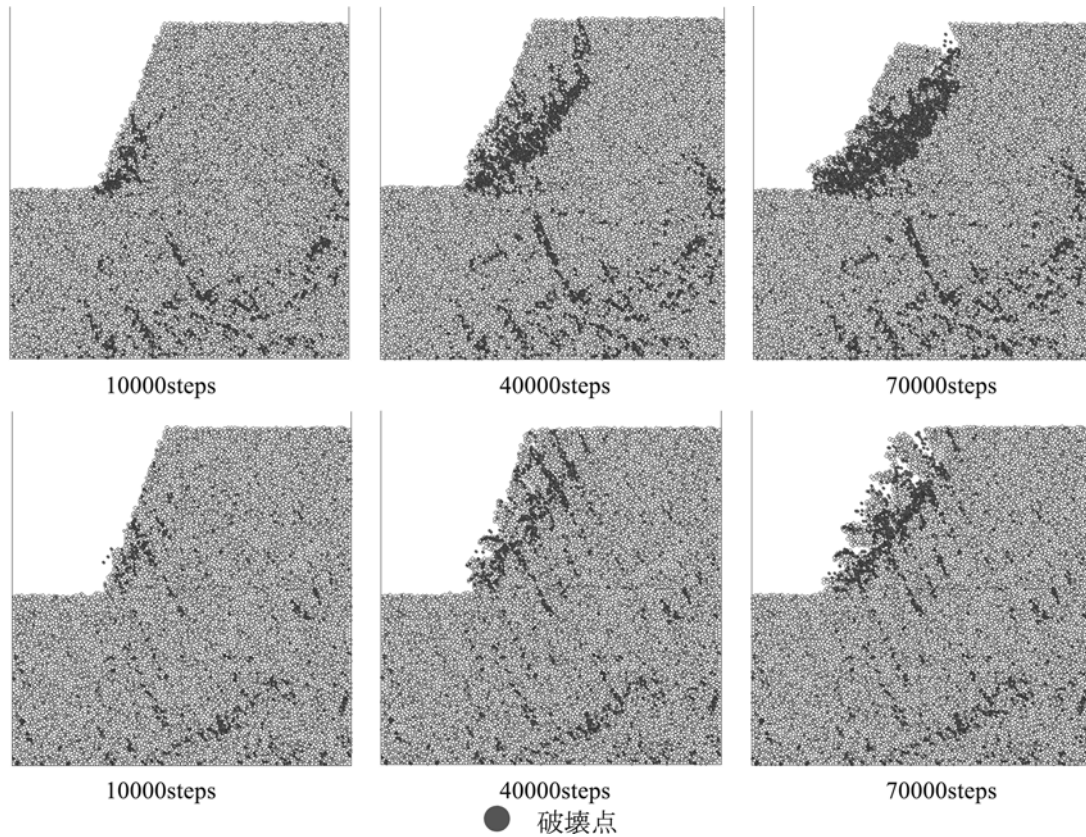


図-10 弱層を含むモデルの解析結果

[$\beta=70^\circ$, 要素結合強度 (初期値 $\sigma_c=\tau_c=1\text{MPa}$, 弱層部(上) $\sigma_c=\tau_c=0.75\text{MPa}$, (下) $\sigma_c=\tau_c=0.25\text{MPa}$)]

さい場合には、トップリング崩壊に類似した崩壊形態を示しており、受け盤の特徴が顕著に表れている(図-10下)。またトップリングでは、崩壊域の境界が比較的直線を示していることが見てとれる。トップリングが発生する条件は、斜面上のブロック挙動から分かるように、斜面の傾斜角、ブロックの内部摩擦角およびブロックの高さと幅との関係によって決まるとされている⁸⁾。本解析においては、弱層強度が $\sigma_c=\tau_c=0.25\text{MPa}$ のケースがトップリング崩壊を示していることから、モデルの設定条件を適切に設定することにより種々の崩壊形態を表現できる可能性があると思われる。

4.2 衝撃破壊解析

4.1 に記述した解析では、荷重は準静的荷重であったが、鉛直方向の増加に加え、加速度の水平方向成分を考慮すれば震度法に相当する解析が可能である。ここでは、その水平方向成分の作用が極めて短時間、すなわち衝撃荷重とされる条件で解析を実施した。遠心加速度場における振動試験により地震時崩壊機構の解明を試みる研究も実施されており⁹⁾、これについては準静的荷重と衝撃荷重の中間の状態と位置づけられている¹⁰⁾。解析には振動荷重の入力も可能であるが、(i) 片方向衝撃荷重の繰返しを模擬した時、各衝撃荷重間では、破壊面が保存されている、(ii) 簡易な模型実験との対比が容易である、などの理由から、このような条件を採用した。衝撃荷重の

入力、加速度場の鉛直方向成分 $a_v=ng$ に対して、水平方向成分 $a_h=k(ng)$ が、モデルに一樣に、 $T(\text{s})$ 間作用するとした。 T 経過後は、 $a_h=0$ として、斜面モデルが静的安定状態に復するか、それとも、崩壊に至るかを鉛直方向加成分 $a_v=ng$ のもとと解析を続行した。 $n_0=75$ とした基準状態に対して、図-11 の左列に $n=115, k=0$ とした解析を、中央と右列に衝撃破壊解析として $n_0=75$ のまま、 $k=40$ の例を示す。ただし、用いたモデルの要素配列は 4.1 の解析とは異なり、表-2 の供試体物性値とは対応していない。斜面傾度は $\beta=80^\circ$ 、要素結合強度を $\sigma_c, \tau_c=1\text{MPa}$ とした。衝撃荷重継続時間 T は、時間差分間隔 $\Delta t=1.0 \times 10^{-5}(\text{s})$ の 15step 分とした。これは、表-1 に示す解析条件より計算される一自由度振動系の固有周期 $2.9 \times 10^{-4}(\text{s})$ に対して、1/2 程度である。図-11 中の数値は、衝撃荷重の载荷回数である。11 回までは、斜面は静的安定状態に復するが、12 回目の载荷による破壊面の進展により斜面は崩壊に至る。

5. 結言

要素結合を考慮した DEM による斜面の崩壊解析手法を、弱面を有する斜面の解析および水平外力が衝撃荷重として作用する場合の解析例を示した。

- (1) 弱面を有するモデルとして受け盤斜面のモデルを作成した。解析結果としてトップリング崩壊の

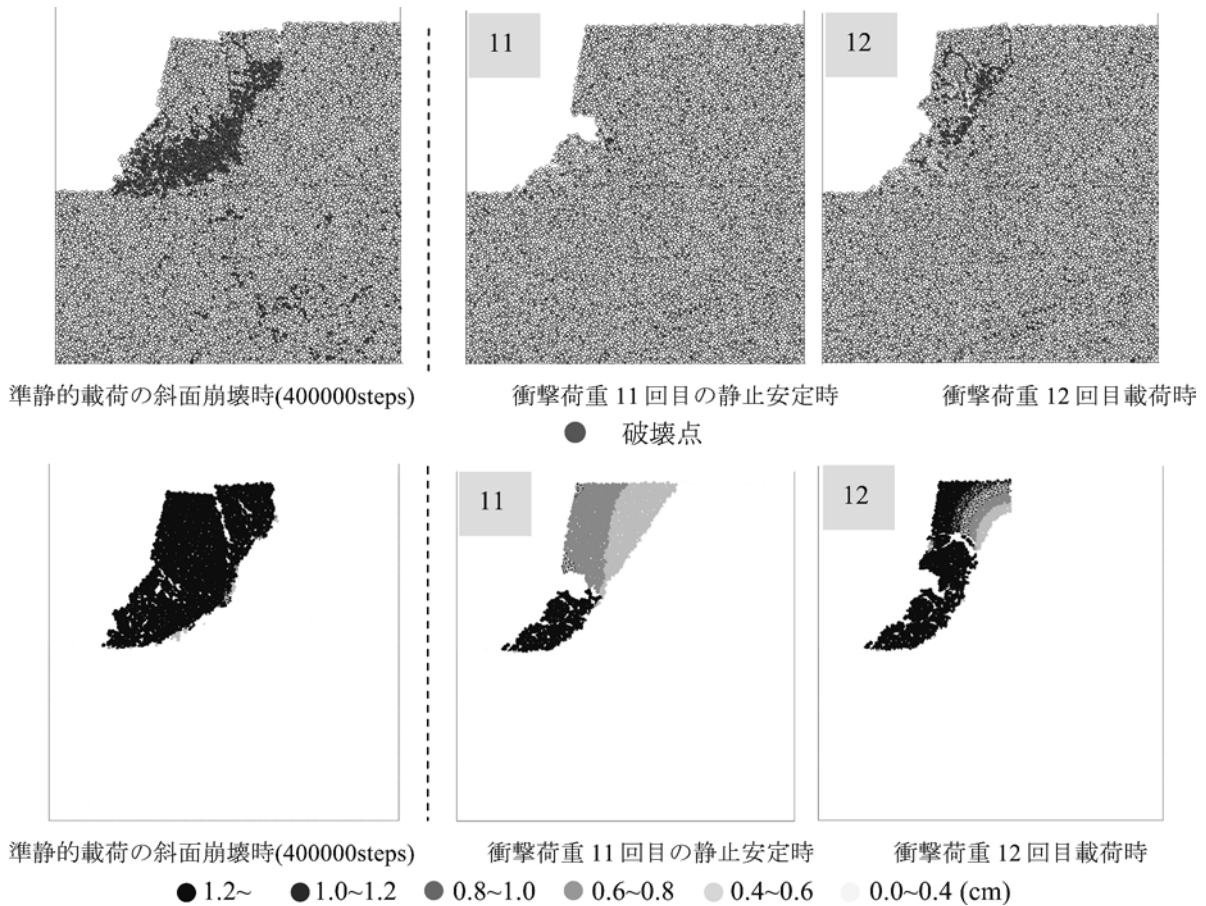


図-11 準静的荷重および衝撃荷重荷重による崩壊解析例, $\beta=80^\circ, \sigma_c=\tau_c=1\text{MPa}$ (上:破壊点分布図, 下:変位分布図)

例を報告した。弱面の強度の設定は崩壊形態に影響し、弱面強度を非弱面部の75%に設定した場合はすべり破壊、25%ではトップリング破壊を示した。破壊面形状(崩壊域との境界線)は、トップリング破壊は比較的直線形を示した。本解析のモデル作成の際には、斜面内に弱面を任意に設定できることから、弱面の位置や要素結合強度等の入力条件を検討することで、様々な斜面を想定した崩壊解析が可能であると思われる。

- (2) 衝撃荷重による解析では、荷重が衝撃荷重となるように水平方向加速度を微小時間与える手順により解析し、その一例を示した。本解析手順の再現性を検証するべく、斜面モデルの衝撃振動実験を実施し、実験結果とDEM解析および極限平衡解析との比較を検討する予定である。

参考文献

1) 倉岡千郎, 木下慎逸, 桜井達朗, ダマラフセイン, 大角恒雄: 不連続性岩盤斜面における数値解析の適用と課題, こうえいフォーラム7号, 1998.
 2) Tsuyoshi NISHIMURA, Tsuyoshi FUKUDA, Kouji TSUJINO: Distinct Element Analysis for Progressive Failure in Rock Slope, Japanese Geotechnical Society (JGS), Soils & Foundations, Vol.50, No.4, pp.505-513,

2010.8.
 3) Potyondy, D.O., Cundall, P. A.: A bonded-particle model for rock systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, Vol. 41, pp.1329-1364, 2004.
 4) 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.
 5) Bjerrum, L.: Progressive failures in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 93(SM), pp. 1-49, 1967.
 6) 日下部治, 谷口栄一: 講座 遠心模型実験 9. 適用事例一動的問題, 土と基礎, Vol.36, No.8, pp83-84, 1988.
 7) 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.
 8) 日本材料学会: 岩の力学—基礎から応用まで, pp. 646-647, 1993.
 9) 石丸真, 河井正: 遠心場振動破壊実験に用いる亀裂性岩盤斜面モデルの試作, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.231-234, 2007.
 10) 石川信隆, 大野友則, 藤掛一典, 別府万寿博: 基礎からの衝撃工学, 森北出版, pp.193-194, 2008.

(2011年6月27日 受付)