

不連続変形法による斜面崩落モデルの 地震応答解析

佐々木猛¹・萩原育夫¹・佐々木勝司¹・堀川滋雄¹・吉中龍之進²・大西有三³

¹正会員 サンコーコンサルタント(株) 技術統括部 (〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)
E-mail:sasakit@suncoh.co.jp

²正会員 埼玉大学 地圏科学研究センター (〒338-8570さいたま市桜区下大久保225)

³フェロー会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501京都市左京区吉田本町)

本研究では、不連続変形法(DDA)による地震応答解析の理論概要を述べる。また、これらに加えて新たに接触による粘性減衰の定式化を行った。解析モデルとして中越地震の小千谷近辺の崩落斜面を選び、その近くで記録した東西および上下の地震入力波を斜面の基盤に入力した。これらを用い、実際に発生した地震による斜面崩落現象を DDA により再現し、その応答性状、斜面崩落挙動についてブロック形状、減衰係数などのパラメータによる検討を行った。これらの解析結果は実際の崩落形状、到達時間、崩落速度などを良く表現しており、本手法の地震による斜面崩落現象に対する適用性を示した。

Key Words : rock falling, DDA, seismic response analysis, dynamic problem

1. はじめに

わが国では、斜面崩落事故の引き金の約 30%以上が地震を原因としている。また、これらの斜面の大部分が道路や鉄道、民家に接していることが多く、平成 16 年 10 月に発生した新潟県中越地震や、平成 17 年 3 月の福岡沖玄海地震では、これらにより大きな被害を及ぼしたことは記憶に新しい。このような事故を事前に予測し、適切な対策を講ずることは、国民の生命や産業活動を守るために極めて重要である。

このような背景から著者は、これまでに不連続変形法(DDA)による地震応答解析の適用性を岩盤崩落としては、比較的小規模な問題としての落石や石積構造で検討してきた^{1)~4)}。

今回は新潟県中越地震で発生した大規模な斜面崩落を事例とし、このような現象を解析するために必要な地震波の入力方法、崩落ブロックのモデル化法、物性パラメータがどの程度結果に影響を及ぼすかについて検討した。また、これまでの理論に加えて、新たにブロック間の接触による粘性減衰の定式化を行い、これらがブロックの衝突運動に及ぼす影響も検討した。本文では、これらの理論概要、接触による粘性減衰の定式化、斜面崩落モデルによるパラメータ解析の結果を報告する。

2. DDAによる地震応答解析の理論概要

(1) 運動方程式

動的大変形解析の弾性体ブロックの接触を含む運動方程式を統一的に表現すると、系全体のポテンシャルエネルギー Π^{sys} は式(1)のようになる。

$$\Pi^{sys} = \sum_{i=1}^n \Pi^{(block)i} = \sum_{i=1}^n \left(\Pi^i + \sum_{j=1}^m \Pi_{PL}^{i,j} \right) \quad (1)$$

式(1)の右边第 1 項は各ブロックの連続体としてのポテンシャルエネルギーであり、第 2 項はブロック i のブロック j に対する接触のポテンシャルエネルギーである。第 1 項は式(2)で表される。

$$\begin{aligned} \Pi^i = & \int_V \frac{\rho^i}{\rho^0} \left[\dot{\mathbf{r}}_{ij} \delta D_{ij} - \frac{1}{2} \sigma_{ij} \delta (2 D_{ik} D_{kj} - \mathbf{v}_{k,i} \mathbf{v}_{k,j}) \right] dV \\ & - \int_{\Gamma} \bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{u} d\Gamma - F(x, y) \int_V [\rho(\ddot{\mathbf{b}} - \ddot{\mathbf{u}}) - c\dot{\mathbf{u}}] \cdot dV \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)の第 1 項は速度場のひずみエネルギー、第 2 項は表面摩擦エネルギーであり、第 3 項は慣性力及び減衰力によるエネルギーである。ここに、 $\ddot{\mathbf{u}}$:加速度、 $\dot{\mathbf{u}}$:速度、 ρ :質量、 b :物体力、 c :減衰定数、 $\bar{\mathbf{t}}$:表面摩擦力、 V :ブロックの体積、 Γ :ブロックの表面積である。

式(1)の右边第 2 項は不連続面の接触のポテンシャルエネルギーを表し、DDA の場合はペナルティを用い、

二次形式で以下のように評価される。

$$\Pi_{PL}^i = \frac{1}{2} p_n [(u^j - u^i) \cdot n]^2 - \frac{1}{2} p_s [u_s^j - u_s^i]^2 \quad (3)$$

ここに、 p_n 法線方向のペナルティ係数、 p_s 接線方向のペナルティ係数、 $(u^j - u^i) \cdot n$:法線方向の貫入量、 u_s :せん断方向のスベリ量、 n :接触面の方向余弦である。

(2) 接触粘性減衰の定式化

DDA(Shi,1984)は式(4)に示す Hamilton の原理による接触を含む運動方程式をひずみエネルギー最小化原理により釣合い方程式を求めて定式化している。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (4)$$

ここに、 M : 質量マトリックス、 C : 減衰マトリックス、 K : 剛性マトリックス、 F : 外力ベクトル、 $\ddot{u}$: ブロック重心加速度、 $\dot{u}$: ブロック重心速度、 u : ブロック重心の剛体変位、剛体回転、ひずみである。

式(4)の減衰マトリックス C は粘性係数 η_e と質量マトリックス M を用いて、式(5)で表される。

$$C = \eta_e M \quad (5)$$

粘性係数 η_e の物理的意味は、ブロック自身の減衰や空中にある状態での空気抵抗、ブロック自身のひずみ減衰などとして評価される³⁾。

一方、地震応答解析では、図-1 に示すように、解析領域の境界条件と地震波入力の関係から、解析領域の境界で反射波を緩和させるための粘性境界を考慮することが一般的である。ここでは、DDAにこの機能を導入するため、ブロック間の接触Voigt型の粘性減衰を検討する。図-2 にVoigt型接触粘性減衰モデルを示す。従来のDDAでは、接触は図中のブロックの法線および接線方向のペナルティ P_n 、 P_s の二つを用いて、ブロック同士の貫入がゼロになるように収束計算を行い釣合方程式を解いている。ここでは、これらに法線および接線方向の粘性 η_{pn} 、 η_{ps} を付加し、接触機構を導入した。

Voigt 型粘性減衰の場合は、接触部の貫入量 d および貫入のひずみ速度 $d/\Delta t$ は共通であり、貫入による

$$f_t = f_p + f_\eta = pd + \eta_p \cdot \dot{d} = pd + \eta_p \frac{d}{\Delta t} \quad (6)$$

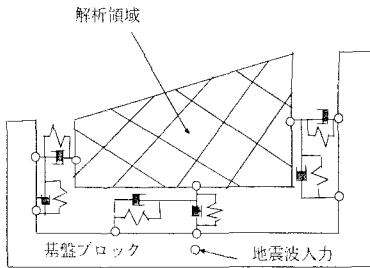


図-1 接触問題の解析境界領域と地震波入力

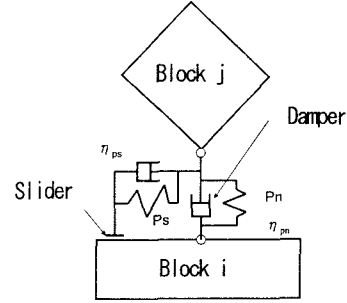


図-2 Voigt 型接触粘性減衰

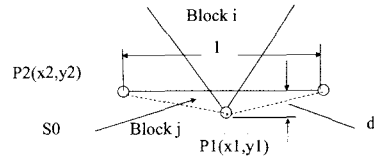


図-3 Penalty 法によるブロックの接触機構

総反力 f_t は、ペナルティによる力 f_p とダッシュポットによる力 f_η の和となり、式(6)で表される。また、貫入量 d をブロックの座標と重心の変位で表すと式(7)となる。

$$f_t = f_p + f_\eta = pd + \frac{\eta_p}{\Delta t} d = (p + \frac{\eta_p}{\Delta t}) d \quad (7)$$

粘性減衰を考慮した、接触によるポテンシャルエネルギーは式(8)で示される。

$$\Pi_{p\eta} = f_t d = \frac{1}{2} (p + \frac{\eta_p}{\Delta t}) d^2 \quad (8)$$

また、DDA ではブロックの貫入量 d は式(9)で表される。

$$d = \left[[E_i] [D_i] + [G_j] [D_j] + \frac{S_0}{l} \right] \quad (9)$$

ここに、 S_0 : 貫入面積、 l : 接触辺長、 Δt : 時間刻み、ブロック重心の未知数、

$$\{D_i\} = \{u_0 \ v_0 \ r_0 \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}\} \quad (10)$$

ブロック間の接触マトリックス、

$$\begin{aligned} [E_i] &= \frac{1}{l} (y_2 - y_3 \quad x_3 - x_2) T_i(x_1, y_1) \\ [G_j] &= \frac{1}{l} (y_3 - y_1 \quad x_1 - x_3) T_j(x_2, y_2) \\ &\quad + \frac{1}{l} (y_1 - y_2 \quad x_2 - x_1) T_j(x_3, y_3) \end{aligned} \quad (11)$$

ブロックの変位マトリックス

$$[T_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0)/2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

である。

式(8)の貫入量 d に式(10)、式(11)、式(12)を代入し、式(10)の未知数で式(8)を微分することにより、接触による等価な剛性と外力が得られる。

(3) 釣合方程式の解法

式(4)の運動方程式は、Newmark の β , γ 法で、 $\beta=0.5$, $\gamma=1.0$ とし、これを増分変位に対する連立方程式の式(13)を各時間刻みで解くことにより得られる。

$$\tilde{K} \cdot \Delta u = \tilde{F} \quad (13)$$

$$\tilde{K} = \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{2\eta}{\Delta t} M + \frac{\rho^c}{\rho^0} [K_e + K_s] \quad (14)$$

$$\tilde{F} = M \left(\frac{2}{\Delta t} + \eta \right) \cdot \dot{u} + (\Delta F - \sum [\sigma dv] - M \alpha(t)) \quad (15)$$

ここに、 Δu : 増分変位、 K_e : 線形項の剛性マトリックス、 K_s : 剛体回転に伴う初期応力マトリックス、 $\alpha(t)$: 地震加速度の時刻歴である。

3. 解析事例

(1) 解析モデル

新潟県中越地震では強震動に伴って流れ盤斜面や崩壊跡地形箇所では比較的大きな斜面崩壊が発生したことが報告されている。大規模岩盤崩壊では、岩盤ブロックの形成(断裂)・崩落・破砕など、様々な形態の変形が複雑に組み、崩壊が進展するものと想定される。

解析の目的は、崩落パターンのモード、崩落岩塊の到達距離、到達時間に対する主要な解析パラメータの影響と実現象との関連を明らかにすることである。

今回の解析モデルは、航空写真や現地踏査などから概ねの崩落形状、崩落岩塊の大きさが判明している。図-4に震源と崩落斜面の地質分布を示す。当該箇所は本震の震源から約8kmの位置にあり、周辺には軟岩相当の新第三紀堆積岩類が20~25度程度の傾斜(当該斜面では流れ盤構造)で分布する。崩壊土塊は図-5に示すように数m~10m規模の岩塊と岩屑等からなり、崩壊土塊の中央からやや前方(移動方向側)は凸状の形状を呈し、崩壊前斜面末端(想定)から100~150m程度の位置まで到達した。検討箇所周辺では流れ盤構造をなす斜面でのすべり崩壊

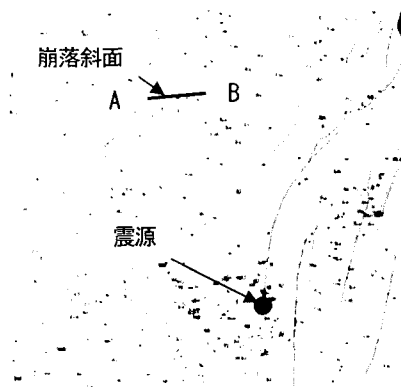


図-4 崩落斜面近傍の地質(産業技術総合研究所)

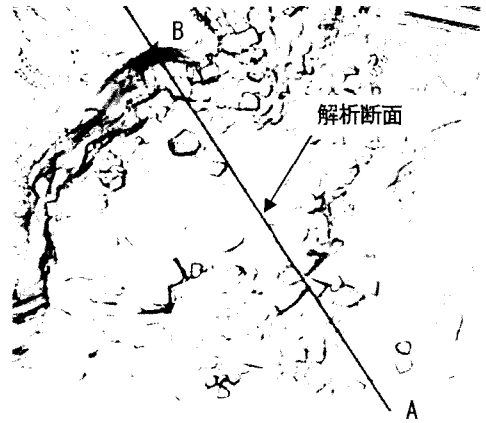


図-5 崩落後の地形

が報告されており、当該箇所においても同様の崩壊形態が想定された。しかし、崩落斜面内部の詳細は不明である。現地状況をもとに推定した検討箇所の想定断面を図-6に示す。

図-7に崩落斜面に近い地点の加速度記録(新潟大学、NIG019, 37.30, 138.8東西)および図-8に上下の入力地震波形を示す。図-9、図-10にそれぞれのフーリエスペクトルを示す。これを見ると、東西方向は1.5Hzから5Hzの間で200Galを越える大きな振幅となっている。また、上下方向は各周波数に関係なく平均150Gal程度の振幅を示している。地震波の入力は図-6に示す基盤ブロック下端から10mとし、境界条件はブロックの下端を固定とした。

不連続体解析は結果がブロックのパターンに強く依存するため、主要なパラメータの一つとして、ブロックの大きさに注目し、崩壊モードの違いを検討した。ここでは、岩盤斜面を平均的規模のブロックの集合体として表現し、図-11に示すブロックの大きさ5~10mが混在する大分割(Model-1)モデルと、図-12に示すブロックの大きさ2~3mが混在するモデル(Model-2)を比較した。

表-1に解析に用いたパラメータおよび物性値を示す。想定される現地の斜面の弾性係数と単位体積重量は1~3GPa, 20~25kN/m³の間とされたため、これらを物性のパラメータとし、その影響を比較した。

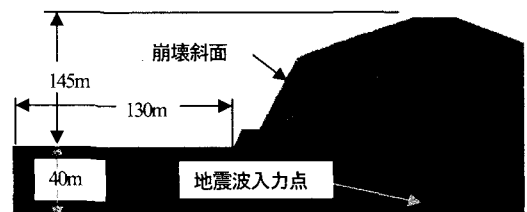


図-6 想定断面(A-B)

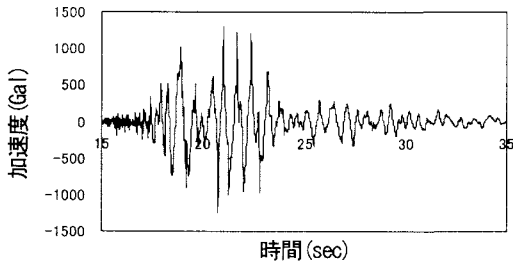


図-7 入力地震波(東西方向)

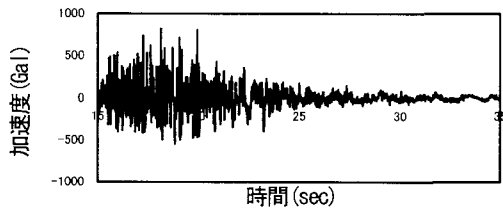


図-8 入力地震波(上下方向)

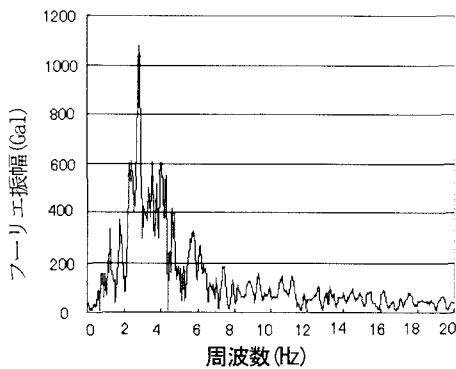


図-9 フーリエスペクトル(東西方向)

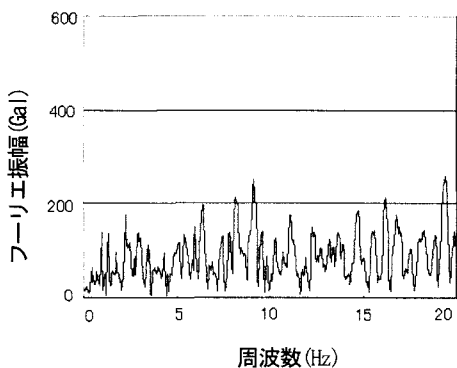


図-10 フーリエスペクトル(上下方向)

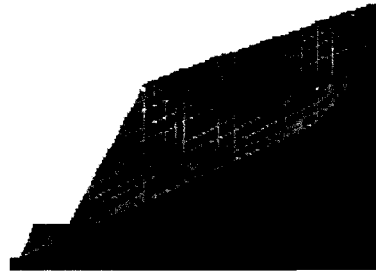


図-11 Model-1(粗ブロックモデル)

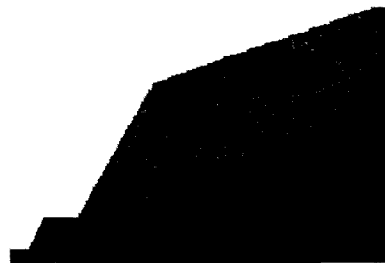


図-12 Model-2(細ブロックモデル)

表-1 パラメータおよび物性値

設定項目	パラメータおよび物性値	
時間刻み	0.001sec	
弾性係数	3GPa	1GPa
単位体積重量	25kN/m ³	20kN/m ³
ポアソン比	0.30	
摩擦係数, 粘着力	$\phi = 30^\circ$, $c = 0.2\text{MPa}$	
ペナルティ係数	2GN/m ³	
減衰定数(ブロック)	0.05	
速度エネルギー比	岩盤 VS 岩盤 : 0.80 岩盤 VS 未固結体積物 : 0.40	

表-1 に解析に用いたパラメータおよび物性値を示す。想定される現地の斜面の弾性係数と単位体積重量は 1～3GPa, 20～25kN/m³ の間と思われたため, これらを物性のパラメータとし, その影響を比較した。

(2) 解析結果

図-13 にCase-1(Model-1, $E=3\text{GPa}$, 25kN/m^3)の各時間での変形を示す。図中の線はブロックの軌跡である。これらを見ると, 崩壊は斜面頂部付近の岩盤が最初にブロック化し, これらが前方斜面を押し出すように挙動している。崩落は基盤ブロック上のすべり面に沿って移動し, 15秒後には法尻から約 90mに到達している。

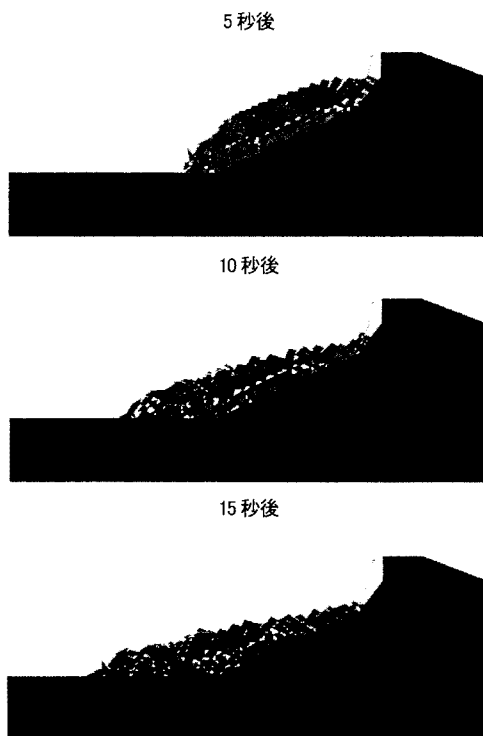


図-13 解析結果(Case-1, $E=3\text{GPa}$, 25kN/m^3)

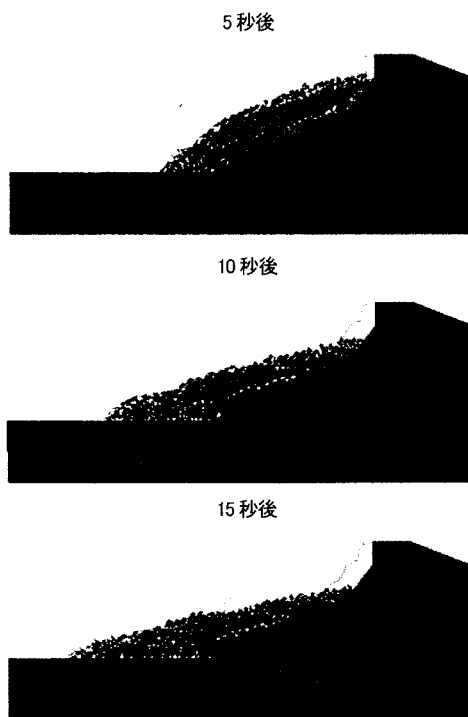


図-15 解析結果(Case-3, $E=3\text{GPa}$, 25kN/m^3)



図-14 解析結果(Case-2, $E=1\text{GPa}$, 20kN/m^3)

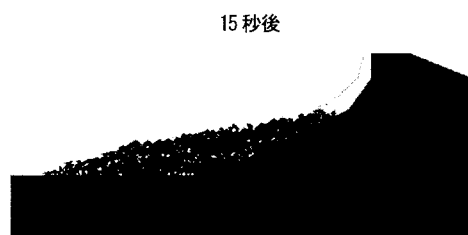


図-16 解析結果(Case-4, $E=1\text{GPa}$, 20kN/m^3)

斜面中央部のブロックは一団となって移動し、これらの変形モードは観察された状況を概ね表現している。図-14はCase-2(Model-1, $E=1\text{GPa}$, 20kN/m^3)の結果である。

Case-2は単位体積重量が 20kN/m^3 でありCase-1の80%である。そのため、ブロック間の摩擦力が小さくなり、到達距離が10mから15m程度長くなっている。

図-15にCase-3(Model-2, $E=3\text{GPa}$, 25kN/m^3)の各時間での変形を示す。到達距離はCase-2と同程度である。このことは、ブロックが細かくなると同じ重量でも到達距離が長くなることを示している。

図-16はCase-4(Model-2, $E=1\text{GPa}$, 20kN/m^3)の15秒後の結果である。この場合Case-2と同様に単位体積重量が小さい分、到達距離がさらに15m程度長くなっている。

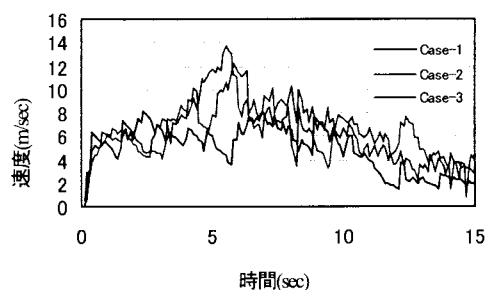


図-17 斜面法尻ブロックの速度比較

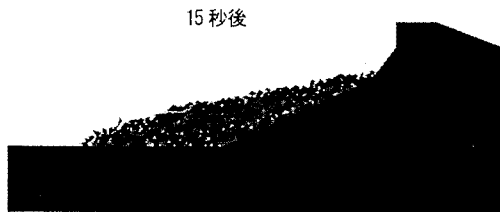


図-18 ブロック間に接触減衰を考慮した場合(Case-5)

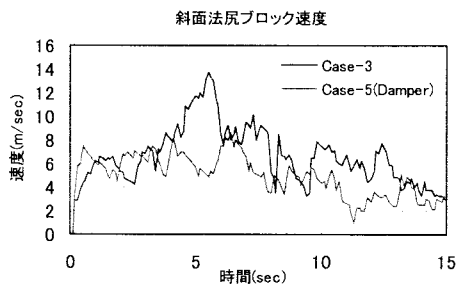


図-19 接触減衰の有無による法尻ブロックの速度比較

図-17は、各 Case の斜面法尻ブロックの経過時間に対する速度分布を示す。Case-1、Case-2 の同じブロック形状の場合は、移動速度は単位体積重量が小さい方が速いことを示している。また、ブロック形状が細かくなると、平均的に速度が多少大きく、そのばらつきも大きくなることが分かる。当該斜面は崩落の幅が 200m から 300m と広く、断面によってブロックの形状や到達距離が異なっているが、崩落形状と到達距離はここで設定したパラメータとその結果の範囲に概ね合っている。

図-18 はブロック間に接触粘性減衰を考慮した場合の 15 秒後の結果である(Case-5)。接触の粘性係数は、ペナルティ係数（ブロックの弾性係数と同等）に対して、法線方向を 5%、接線方向を 10% と仮定している。

図-19 は Case-3、Case-5 の法尻ブロックの速度を比較したものである。粘性減衰の影響は 5 秒前後で、最大速度が減衰がない場合の約 1/3 程度になっている。この効果は速度が大きくなる時間帯で顕著である。また、到達距離は Case-5 が 5% 程度短くなっている。この特性は式 (6) の Voigt 型減衰が速度比例型となっているためである。

4. 結論および今後の課題

本研究では、地震により発生した大規模斜面崩落事故を DDA によりモデル化し、その適用性を検討した。

その結果、崩落形状、崩落岩塊の到達距離、到達時間に影響するパラメータとして、ブロック形状と単位体積重量の違いが影響していることが分かった。また、ブロック間の接触粘性減衰の効果は、ブロックの最高速度が大幅に低下し、その到達距離も短くなることが判明した。これらを、パラメータとすることにより、二次元解析でも崩壊現象を概ね再現可能であることを示した。

今後の課題としては、実際の現象は三次元的であり、崩落岩塊は法尻に向かって三次元的に広がって行く傾向があり、2 次元解析ではモデル化の関係から、その到達距離がやや長くなっている。したがって、実際の現象をある程度の精度で予測するためには、これらのモデル化や斜面における地震波の特性、入力方法などの基本的な検討をさらに進める必要がある。

参考文献

- 1) Shi, G. H.: Block system modeling by Discontinuous Deformation Analysis, Univ. of California, Berkeley, Dept. of Civil Eng. pp.10-15, 1989.
- 2) 佐々木猛, 大西有三, 吉中龍之進: 不連続変形法(DDA)とその岩盤工学への適用に関する研究, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.11-20, 1994.
- 3) 佐々木猛, 萩原育夫, 佐々木勝司, 吉中龍之進, 大西有三, 西山哲: 不連続変形法による斜面崩落モデルの地震応答解析, 第 9 回計算工学講演会論文集, pp.201-204, 2004.
- 4) Sasaki, et al.: Earthquake response analysis of a rock falling model by Discontinuous Deformation Analysis, ISRM Symposium 3rd Asia Rock Mechanics Symposium, Millpress, pp.1267-1272, 2004.

EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF A ROCK FALLING BY DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS

Takeshi SASAKI, Ikuo HAGIWARA, Katsuji SASAKI, Sigeo HORIKAWA
Ryunoshin YOSHINAKA and Yuzo OHNISHI

It is known that, the earthquake is one of the triggers of rock fallings at rock slopes and it is often caused by an earthquake in Japan. This paper describes the falling model of a rock slope caused by at Niigata Prefecture Chuetsu earthquakes in 2004 23, October using Discontinuous Deformation Analysis (DDA). The results of DDA analyses are show good agreement compared with actual physical phenomena of certain site of a rock slope at the disaster area.