

不連続変形法による降雨に起因する 斜面崩壊の予測解析

入江 敬^{1*}・小山 倫史¹・酒井 直樹²・西山 哲¹・安田 祐樹¹・大西 有三³

¹ 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

² (独) 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

³ 京都大学 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

*E-mail: irie@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

日本の国土のおよそ七割は山地であり、狭い平野部は既に利用し尽くされ、山地にも発電所等の重要構造物や道路、鉄道といった周辺住民のライフラインが多く存在している。さらに、日本列島は温暖湿潤気候帯に属しており、世界的に見ても降雨の多い地域であり、降雨を起因とする斜面崩壊が多く発生している。特に近年では、ゲリラ豪雨と呼ばれる短時間に多量の降雨が発生するケースが増えており、降雨起因の斜面崩壊発生の予測および発生後の挙動予測は益々重要になっているといえる。そこで本研究では、降雨起因の斜面崩壊発生・挙動予測に貢献すべく、不連続変形法 (DDA) を用いて、斜面を模擬した大型降雨実験の予測解析を実施した。斜面内の雨水浸透挙動を有限要素法 (FEM) を用いて解析しており、その解析結果を不連続変形法に反映した解析を実施した。

Key Words: slope collapse, prediction analysis, DDA

1. はじめに

日本列島は温暖湿潤気候帯に属し、さらに国土の七割以上が山地であるため、豪雨を原因とする斜面災害が数多く発生する。崩壊土砂がどこまで到達するか、すなわち被害範囲がどこであるかを予測することはハザードマップの作成や危険個所の特定において非常に重要である。従来、崩壊土砂の到達範囲の予測には、崩壊土砂の移動距離と量に基づく経験式が使われてきた¹⁾。しかし、適用できる地質構造が明確でない等の問題点を抱えている。また、崩壊土砂の範囲予測における重要な要素として地下水の存在を挙げられ、雨水浸透挙動斜面の安定性に大きく影響している。一方、土砂の崩壊とは、個々の粒子 (土砂) がそれぞれ大変位する挙動であり、不連続体として扱う必要がある。従って、崩壊土砂の到達距離予測に不連続面の影響を考慮できる、不連続体解析手法が必要である。

そこで、本研究では数値解析手法による斜面崩壊の予測に貢献すべく、不連続体解析手法の一つである、不連続変形法 (DDA: Discontinuous Deformation Analysis)²⁾ を用いて大型模型崩壊実験の予測解析を行った。これまで不連続変形法はトンネル安定性問題等の静的問題³⁾

だけでなく、落石問題⁴⁾ や地震応答問題⁵⁾ をはじめとした動的問題にも適用されてきた、汎用性の高い数値解析手法である。しかし、不連続変形法において、地下水の挙動を考慮した解析例 (応力 浸透連成解析) はあまり見られない。そこで本研究では、斜面内の雨水浸透挙動に関して有限要素法 (FEM: Finite Element Method)⁶⁾ を用いて解析し、その解析結果を不連続変形法における物性値に反映させる、すなわち、雨水浸透に伴う強度の低下として扱うことで解析を実施した。

2. 大規模斜面模型および実験概要

大規模斜面模型による降雨・崩壊実験は防災科学技術研究所にある大型降雨実験施設を用い、施設内に大規模斜面模型を作製し行う (写真-1)。模型の形状は、総斜面長は、23m (うち斜面部 16m)、幅 3m、深さ 1.6m (土層深 1.2m)、高さ 7.8m の複合斜面型模型 (図-1) であり枠組みは鋼製である。水路末端はスリット型擁壁 (浸透水は金網を通じて自然排水) で斜面土の流出を抑止している。水路末端以外は非排水条件である。斜面底面には粗度として、棧が水平方向に一定間隔で固定されている。また、片側壁は強化ガラスを用いて、土層内部の変

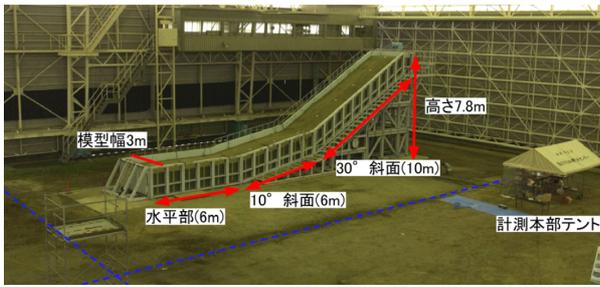


写真-1 大規模斜面模型の全景

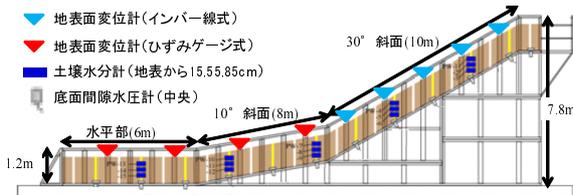


図-1 斜面模型概要

表-1 物理特性と実験条件

項目	値 (単位)
土の種類	マサ土
乾燥密度	2.69(g/cm ³)
粘着力	5(kPa)
内部摩擦角	34(degree)
間隙比	0.85
初期飽和度	45(%)
降雨強度	100(mm/h) (一定)

形状が外側から確認できるようになっている。また、土試料としてはマサ土を用いており、その物性値は表-1に示すとおりである。

実験の概要をまとめる。初期飽和度約45%の砂質土斜面に100mm/hrの降雨を2時間与える。また、図-1に示すように、センサー(地表面変位、土壌水分計、地下水位)を設置する。地表面変位は伸縮計およびひずみゲージタイプ、土壌水分計はADR型で、飽和度に換算する。地下水位は水圧を計測し、水位に変換する。

3. 不連続変形法の一般理論⁷⁾

(1) 概要

不連続変形法は解析対象をブロックの集合体として表現し、各ブロック重心で定義された剛体変位、剛体回転及びブロックのひずみを主変数として定式化を行う。定式化にはポテンシャルエネルギー最小化原理を用いており、接触を含む運動方程式は式(1)に示すようなハミルトンの原理に基づいた方程式で表わされる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (1)$$

ただし、 M は質量マトリックス、 C は減衰マトリックス、 K は剛性マトリックス、 u はブロック重心における変位、 \dot{u} は速度、 \ddot{u} は加速度である。

さらに、式(1)はニューマークの β, γ 法によって時間に関して離散化され、式(2)になる。

$$\begin{aligned} \tilde{K} \cdot \Delta u &= \tilde{F} \\ \tilde{K} &= \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{2\eta}{\Delta t} + K_e + K_f \quad (2) \\ \tilde{F} &= \frac{2}{\Delta t} M \dot{u} + (\Delta F - f) \end{aligned}$$

ただし、 Δt は時間刻み、 Δu は変位増分、 K_e はブロックの弾性、 K_f はブロックの変位拘束・接触などに関する剛性マトリックスである。また、 f 及び ΔF はそれぞれのブロックの初期応力に関するベクトル、体積力や点荷重などに関するベクトルである。

(2) 準静的解析と動的解析

不連続変形法ではトンネル安定性解析をはじめとした静的問題のみならず、落石問題をはじめとした動的問題を扱うことができる。変形が十分に低速な静的問題では、慣性力の影響はほぼ無視できる。そこで不連続変形法では、静的問題を解く際には各タイムステップで速度を0にすることによって準静的解析を行っている。すなわち、準静的解析では以下に示す式(3)において静的動的係数 k_{01} の値を0に設定する。

$$V_i^{(n+1)} = k_{01} \cdot V_f^{(n)} \quad (3)$$

ただし、 $V_i^{(n+1)}$ は $n+1$ ステップ目の初期速度ベクトル、 $V_f^{(n)}$ は n ステップ目の最終速度ベクトルを表わす。一方、変形が高速で発生する動的解析では、 $V_i^{(n+1)}$ と $V_f^{(n)}$ の値は一致している。すなわち、静的動的係数 k_{01} の値は1に設定されている。

4. 不連続変形法による大規模斜面模型崩壊予測解析

(1) 数値解析モデルの作成および物性値

解析断面作成に際しては、斜面を構成する土槽を一つの土台ブロックとし、斜面の地盤層を多角形ブロックの集合体から成る粒状体としてモデル化した(図-2)。地盤層を構成する粒状体は概ね八角形であり、粒径は 11.8 ± 2.3 cmである。また、解析に用いたパラメータは表-2に示すとおりである。

(2) 有限要素法による雨水浸透解析

地盤層内の雨水浸透挙動に関して、有限要素法により解析を実施した。本研究では、赤井らにより定式化⁸⁾

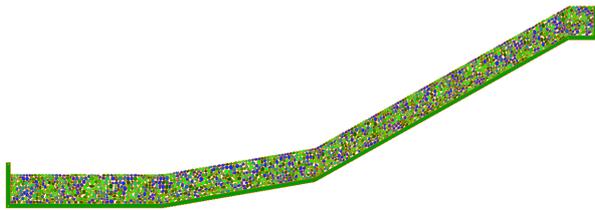


図-2 不連続変形法における解析モデル

表-2 不連続変形法の解析に用いたパラメータ (1)

項目	パラメータ	値 (単位)
ブロックの 材料物性	単位体積質量	表-3
	ヤング率	75,000(MPa)
	ポアソン比	0.25
	粘性係数	0.1
粒子間の パラメータ	摩擦角	34°
	粘着力	5000(Pa)
	引張強度	0(Pa)
	速度エネルギー比	0.1
ブロック間の ペナルティ係数	垂直ペナルティ	10(MN/m)
	せん断ペナルティ	10(MN/m)
準静的 or 動的		表-3

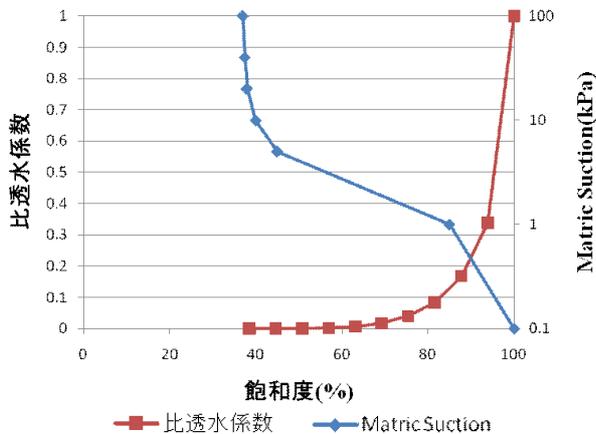


図-3 不飽和特性

された飽和-不飽和浸透流の支配方程式 (式 (4) 参照) を基本として, 有限要素法により離散化した.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_r(\theta) k_s \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_r(\theta) k_s \frac{\partial \psi}{\partial z} + k(\theta) k_s \right) = (C(\psi) + \alpha S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (4)$$

ただし, k_r は比透水係数, k_s は飽和透水係数, θ は体積含水率, ψ はサクション, z は位置水頭, C は比水分容量, S_s は比貯留係数を表わし, α は不飽和領域のとき 0, 飽和領域のとき 1 となる定数である.

解析に用いた不飽和特性 (飽和度とサクションの関係および比透水係数の関係) を図-3 に示す. モデル底部を固定水頭とし, 定常解析を行った結果を初期条件とした. また, 飽和透水試験の結果, 透水係数は $3.1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ であった. 降雨強度等は表-1 に示すとおりである. なお, 地表面を流量固定の降雨境界とし, 水路末端を浸出面境界とした. 有限要素法による浸透流解析結果を図-4 に示す.

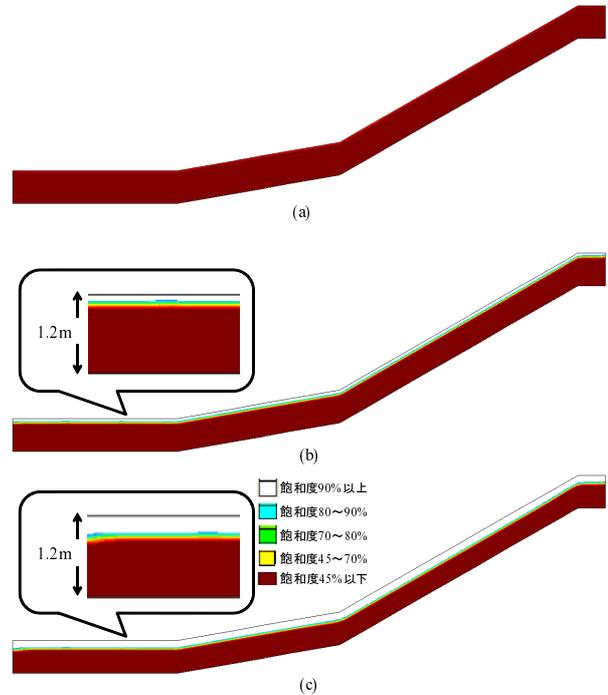


図-4 有限要素法による地盤内雨水浸透解析結果
(a) 解析モデル (b) 解析開始 60 分後 (c) 解析開始 120 分後

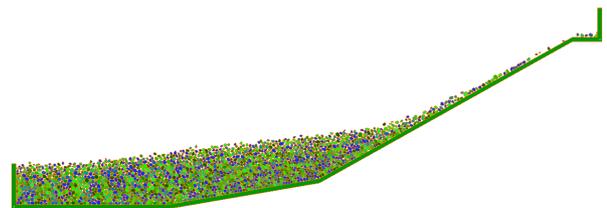


図-5 (I) 解析開始直後から動的解析を行った場合の解析結果

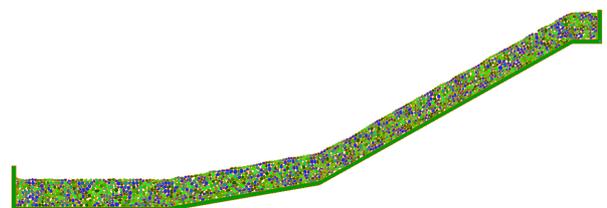


図-6 (II) 解析開始後 3 秒間準静的解析を行った場合の解析結果

表-3 不連続変形法の解析に用いたパラメータ (2)

解析時刻	パラメータ	値 (単位)
0~5(sec)	準静的 or 動的	準静的
	単位体積質量	2897(kg/m ³)
	摩擦角	34°
	粘着力	5000(Pa)
5~7(sec)	準静的 or 動的	動的
	単位体積質量	2897(kg/m ³)
	摩擦角	34°
	粘着力	5000(Pa)
7~60(sec)	準静的 or 動的	動的
	単位体積質量	2897(kg/m ³)(下部)
		3150(kg/m ³)(上部)
	摩擦角	18.7°(下部)
		0°(上部)
	粘着力	5000(Pa)

(3) 不連続変形法による崩壊予測解析

a) 自重解析

不連続変形法のブロックは弾性体であるため、解析開始直後は自重によって地盤層のブロックが上下方向に振動することが予想される。特に、本研究で用いている数値解析モデルは、粒状体の集合であり、必ずしも解析開始直後に各ブロックが安定な状態にあるわけではなく、自重によってモデル全体が振動・崩壊する可能性がある。そこで、崩壊予測解析を行うのに先立ち、自重解析を行った。解析パターンとしては、(I) 解析開始直後から動的解析を行うパターンと (II) 解析開始後 3 秒間は準静的解析を行い、その後動的解析を行うパターンを解析した。解析開始後 16 秒後の解析結果をそれぞれ図-5、図-6 に示す。これらの結果から、準静的解析を行わない場合、自重による振動に起因して崩壊が生じてしまうことが分かる。

一般に、本解析モデルのような、粒子の集合体のモデルを作成する場合、初期状態で安定することを保証するのは困難だと考えられ、本解析モデルのように、粒子を用いたモデルでは自重解析が必須であるといえる。

b) 崩壊予測解析

前項までの結果を踏まえ、大規模斜面モデルの降雨に起因する崩壊の予測解析を実施した。すなわち、準静的解析による自重解析を行い、その後動的解析による自重解析、降雨の影響を反映した解析という順序で行った。有限要素法による解析結果は、地盤層内のブロックの密度(雨水浸透による飽和度の変化を考慮)およびブロック



図-7 不連続変形法による解析結果



図-8 水平方向の変位

間の摩擦角⁹⁾に、解析開始 7 秒後に反映させた。解析に用いたパラメータを表-2、表-3 に示す。既往の研究から、地盤内に水が存在する場合、ブロック間の強度に換算して、地盤の強度は 8 割以上低減している可能性がある⁹⁾。そこで、本研究においても、飽和度が 90% 以上の部分(図-4 参照)についてはブロック間摩擦角を 0° に、飽和度が 45% 以下の領域については 18.7° に設定した。すなわち、地盤の強度が飽和度に依じて低減していると仮定し、ほぼ飽和している領域についてはブロック間強度がほぼ失われているとし、それ以外の部分については飽和度の分ブロック間強度が低減していると仮定して($34 \times \frac{100-45}{100} = 18.7$)解析を行った。なお、飽和度が 90% 以上の領域と 45% 以下の領域の間に飽和度 45~90% の領域が存在するが、それぞれの層厚は不連続変形法のブロック 1 個分よりも小さいことから、本解析では全て飽和度 90% 以上の領域に含まれていると判断した。本解析では、上記のような過程を用いたが、今後、不飽和土の力学試験により飽和度に依じた強度変化を把握し、解析に反映する必要がある。

解析開始 60 秒後の結果を図-7 に示す。飽和度 90% 以上の部分を極端に小さい強度にしたことから、地盤上部のみが崩壊することが予想されたが、図-8 からわかるように、底部から全体が移動する結果となった。これは、本解析で用いた、解析モデル下部のブロック間摩擦角 $\phi = 18.7^\circ$ が解析モデルの平均傾斜角約 21° を下回っていたためだと考えられる⁹⁾。また、その他の原因としては、地盤の物性値を一度しか変更しなかったことも挙げられる。実現象では、降雨に伴って時々刻々物性値が連続的に変化しており、本来連続的に変化させるべきであるが、本解析では一段階で急激に変化させてしまったため、解析結果に影響を及ぼした可能性がある。

5. 結論および今後の課題

本研究では、不連続変形法を用いて大規模斜面モデルの降雨・崩壊の予測解析を実施した。不連続変形法による予測解析を行う準備として、雨水浸透解析を有限要素法を用いて解析を行った。また、不連続変形法によって粒状体を解析する際、解析開始直後に準静的解析を行うことにより、自重状態で安定することを確認する必要性を示した。

以上の二つの結果を踏まえ、有限要素法の結果から得られる、雨水浸透に伴う地盤内の飽和度分布に応じて、不連続変形法での各ブロックの物性値を変更することにより、飽和・不飽和浸透解析の結果を不連続変形法に反映させた。物性値変更のうち、ブロック間強度の変更（すなわち、雨水浸透に伴う強度の低下）および単位体積重量の増加が最も解析結果に影響を与えたと考えられ、その低減率の差から考えて本予測解析の崩壊モードは、表層崩壊になることが推測された。しかしながら、本研究における解析では図-8からもわかるように、底部から斜面全体が移動する結果となった。この原因は、解析モデル下部のブロック間摩擦角 $\phi = 19.8^\circ$ が解析モデルの平均傾斜角約 21° を下回ったことや、地盤の物性値を時刻に関して連続的に変化させず、一段階で急激に変化させてしまったことが考えられる。

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 解析モデルが粒子状のブロックである場合、動的解析開始前に準静的解析を行わなければ、自重崩壊を起こす可能性がある。
- 崩壊予測解析においては、物性値の設定条件から、モデル上層の動きが卓越すると予想されたが、実際には斜面全体が移動する結果となった。これには、物性値を一段階で急激に変化させることが影響した可能性がある。

一方、今後の課題としては以下の事が挙げられる。

- 実際に大型降雨装置を用いて斜面崩壊実験を行い、本研究の解析結果と比較する。
- 降雨による物性値の変化は実際には連続的に起こっているはずであり、不連続変形法内での物性値変化を一段階で変化させるのではなく、連続的に変化させる（応力・浸透連成解析の実施）。

また、不連続変形法を実斜面の災害予測に適用するに当たっては、以下の項目を更に検討する必要がある。

1. 実斜面から数値解析モデルを作成する際の手法。

2. 不飽和状態の地盤の物性値の把握。
3. 地盤材料によって水の影響により、どの程度地盤の強度が低下するのか検討する。
4. 大変形・変位問題における応力・浸透連成解析手法の開発。

1 は不連続変形法に限らず、全ての数値解析手法に関わる課題であると考えられる。実斜面では、斜面内部を視認できない場合が多く、不連続面の幾何学情報が限られており、必ずしも解析モデルに十分反映させることができない。

また、実斜面の多くには地下水が存在しており、不連続変形法を実斜面に適用する上でその影響は無視できない。従って、2~4の項目の検討が必要である。3に関しては、不飽和特性および雨水浸透メカニズムを解明し、雨水浸透によって飽和度分布がどのように変化するか予測することが必要である。また、飽和度の変化に伴い、土の強度がどの程度低下し、不連続変形法にどのように反映させるのか詳細に検討する必要がある。また、4については、大変形・変位が生じた場合、浸透流解析において、メッシュの更新を逐次行う手法や、PFC¹⁰⁾のような手法が挙げられる。

謝辞：本論文の執筆にあたり、多くの方の助力を頂きました。特に、サンコーコンサルタント株式会社の佐々木猛様と基礎地盤コンサルタンツ株式会社の三木茂様からは、不連続変形法に関しまして大変貴重な助言を頂きました。深く感謝申し上げます。また、有限要素法の解析におきましては京都大学大学院工学研究科の長野航兵氏にアドバイスをいただきました。深く感謝致します。

参考文献

- 1) 森脇寛：崩土の到達距離予測，地すべり，Vol.24, No.2, pp10-16, 1987.
- 2) Shi, G. H. and Goodman, R. E. : "Discontinuous Deformation Analysis -A New Method for Computing Stress, Strain and Sliding of Block Systems", Key Questions in Rock Mechanics, Cundall et. al. eds, Balkema, pp.381-393, 1988.
- 3) 大西有三，山向薫，佐々木猛：不連続変形法 (DDA) によるトンネルを含む岩盤斜面モデルの解析，土木学会年次学術講演概要集第3部 Vol.47, 1992.
- 4) Shimauchi, T., Nakamura, K., Sakai, N., Hagiwara, I., Ohnishi, Y. and Nishiyama, S.: Studies on the property of impact velocity ratio and application to the rockfall simulation by DDAball, Proceedings of International Mini-Symposium for Numerical Analyses, 2008.
- 5) Sasaki, T., Hagiwara, K. and Horikawa, S.: Earthquake response analysis of a rock-fall by discontinuous deformation analysis, Proceedings of 7th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, 2005.

- 6) 小山倫史, 西川啓一, 李圭太, 高橋健二, 長野航兵, 大西有三: ゲリラ豪雨時における斜面の安定性評価のためのリアルタイム雨量計の開発及び応力浸透連成解析, 降雨と地震に対する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム論文集, pp.247-252, 2009.
- 7) 大西有三, 佐々木猛, Gen-Hua Shi 著, 日本計算工学会編: 不連続変形法 (DDA), 計算レクチャーシリーズ 6, 丸善株式会社, 2005.
- 8) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文集, 第 264 号, pp.115-124, 1977.
- 9) 入江敬, 小山倫史, 西山哲, 安田祐樹, 大西有三: 不連続変形法によるすべり面せん断抵抗角減少を考慮した地すべりの解析, 第 5 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.153-157, 2010.
- 10) 清水賢之, 落合博貴, 岡田康彦: 間隙水圧を考慮した粒子流体連成モデルを用いた個別要素法による土石流シミュレーション, 土木学会論文集 C, Vol65, No.3, pp.633-643, 2009.

A PREDICTION ANALYSIS OF SLOPE COLLAPSE CAUSED BY HEAVY RAIN BY USING DDA

Kei IRIE, Tomofumi KOYAMA, Naoki SAKAI, Satoshi NISHIYAMA,
Yuki YASUDA and Yuzo OHNISHI

In the mountainous area of Japan, slope collapses due to heavy rains are one of the major hazards which threaten not only our daily lives but also the various important structures such as electric power plants. Hence, from the engineering point of view, to predict the slope collapses due to heavy rains and estimate the damage caused by slope collapses are important and challenging issues. For this purpose, numerical simulations, especially discontinuum based approach will be useful and Discontinuous Deformation Analysis (DDA) was used for various problems.

In this study, prediction analyses of large-scale model tests for slope collapse were conducted. The infiltration behavior in the slope was analyzed by FEM preliminarily and its result was used in DDA analyses.