

地震による岩盤斜面の崩壊後挙動の予測

アイダン オメル¹・大田良巳²、渡嘉敷直彦³・赤木知之³

¹正会員 東海大学 海洋学部 (〒424-0816 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)
E-mail: aydan@scc.u-tokai.ac.jp

²学生会員 東海大学 海洋学研究科 (〒424-0816 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

³正会員 琉球大学 工学部 環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1)

近年、中越地震や台湾集集地震で数多くの岩盤斜面崩壊が発生した。地震によって発生する斜面崩壊によって重要構造物の被害も懸念され、岩盤斜面の崩壊後の挙動を求めることが重要な課題になってきている。本研究では、地震による岩盤斜面の崩壊後の挙動を評価するための解析モデルを提案し、その解析モデルに基づいて室内模型実験をシミュレーションし、中越地震や台湾集集地震で発生した代表的な斜面崩壊事例を逆解析し、崩壊後の挙動を求め、実測値と比較している。本論文では、開発した解析モデルを簡単に紹介し、室内模型実験および中越地震や台湾集集地震で発生した代表的な斜面崩壊事例に対する解析結果を考察している。

Key Words : landslide, Newmark Method, visco-plastic, Chuetsu, earthquake, Kuzulu, Chiufengershan

1. はじめに

岩盤斜面の崩壊は土質斜面に比べ、規模が大きく社会的に大きな被害をもたらす。日本において1707宝永地震で崩壊した大谷崩れ、長野西部地震での御岳崩れ、世界的にはペルのHuancaran斜面崩壊、エル・サバドールの2001年の斜面崩壊、カナダのFrank斜面崩壊、スイスのElm村の斜面崩壊などが代表的な例である(図-1)^{1,2,3)}。近年では、台湾の1999年集集地震や2004年中越地震など数多くの岩盤斜面崩壊が発生している。

地震や豪雨といった様々な要因によって発生する自然および人口斜面の崩壊は、重要構造物(たとえば、原子力発電所、ダム、高速道路、鉄道)の被害をもたらすと懸念されている。したがって、岩盤斜面の崩壊後の挙動を求めることは、岩盤工学の分野における重要な課題になってきている。

本論文では地震による岩盤斜面の崩壊後の挙動を評価するための解析モデルを紹介し、その解析モデルに基づいて模型斜面の崩壊実験のシミュレーション、中越地震や台湾集集地震で発生した代表的な斜面崩壊事例を逆解析し、崩壊後の挙動を求めて実測値と比較し考察する。

2. 岩盤斜面の崩壊様式

岩盤斜面の破壊は、主に岩石(母岩)の力学特性、不連続

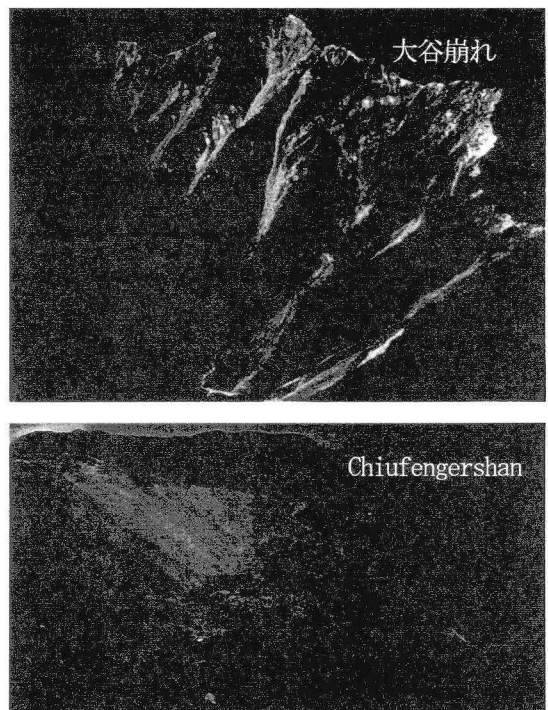


図-1 地震による自然斜面崩壊例

面の力学特性、不連続面の幾何学的特性の3つの要因に依存する。これらの要因の組み合わせによって、様々な破

壊様式が考えられる。HoekとBray(1977)⁴⁾は岩盤斜面の破壊様式を円形すべり、平面すべり、くさびすべりとトップリング破壊として4つに分類している。一方、Aydanら^{1,2,3)}は岩盤の不連続性を幾何学的にとらえ下記のように大きく3つに分類している(図-2)。

- I) 岩石や岩盤の力学特性に依存する破壊様式
 - a) せん断破壊
 - b) 曲げ破壊
- II) 岩石と不連続面の力学特性に依存する破壊様式
 - a) せん断とすべりの複合破壊
 - b) 座屈破壊
 - c) たわみ性トップリング
- III) 不連続面の力学特性に依存する破壊様式
 - a) 平面すべり破壊
 - b) くさびすべり破壊
 - c) トップリング破壊
 - d) トップリングとせん断の複合破壊

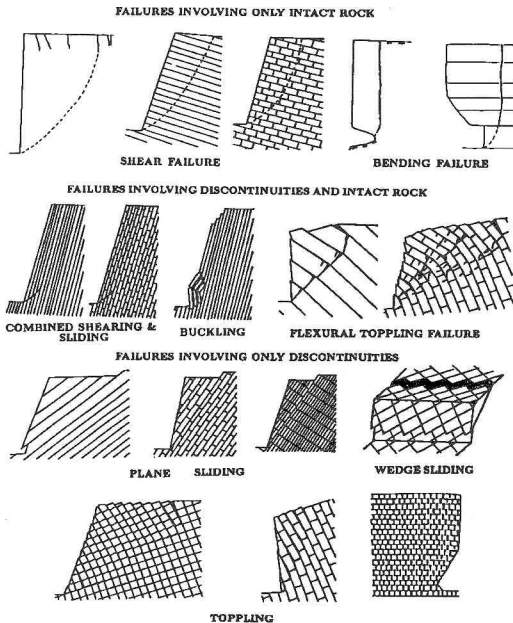


図-2 岩盤斜面の破壊様式の分類^{1,2,3)}

3. 斜面の崩壊後の形態

岩盤斜面の崩壊中および崩壊後の形態は破壊モード、破壊面の幾何学形状と摩擦特性、不連続面の分布とその力学特性、地下水などに大きく依存する。Aydan & Shimizu(1993)⁵⁾は乾燥状態で斜面角、連続的な不連続面の方向を変化させて、岩盤斜面の崩壊後の到達距離、幾何学形態などについて模型実験を実施した(図-3)。

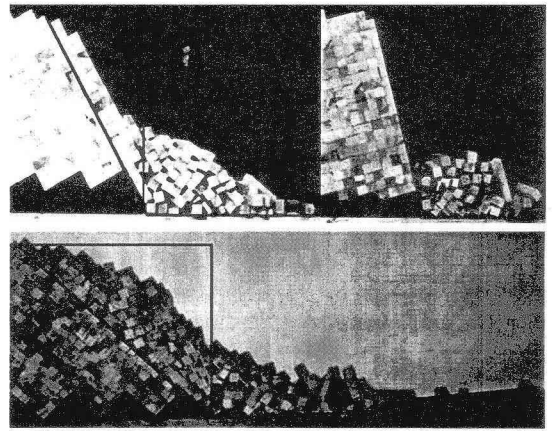


図-3 模型実験における斜面の崩壊後の様子

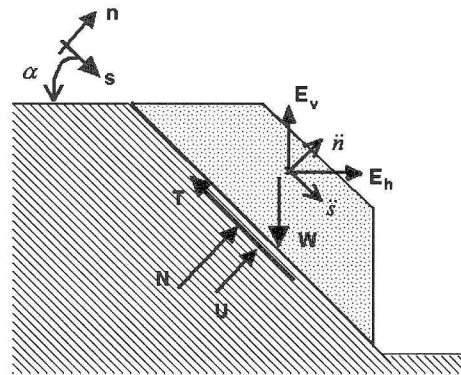


図-4 崩壊した斜面の力学モデル

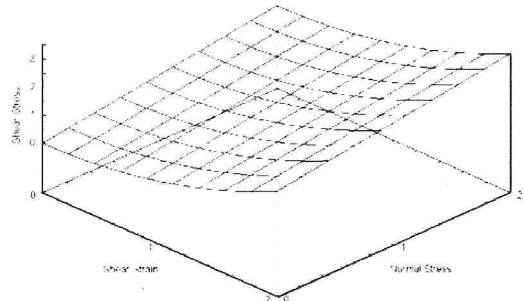


図-5 Bingham タイプ破壊基準

4. 岩盤斜面の崩壊後挙動の予測のモデル化

岩盤斜面の崩壊後の挙動をモデル化するため、様々な解析手法が考えられる^{6,7,8,9)}。ここで、最も単純でかつ有効的な手法であるNewmark法の考え方に基づいて有効応力およびBinghamタイプの降伏関数を用いた簡易な手法を紹介する。図-4に示したように崩壊物がモデル化されとした場合、崩壊物の重心に対する運動方程式を次式で書き表すことができる。

$$\sum F_s = W \sin \alpha + E_h \cos \alpha - E_v \sin \alpha - T - \frac{W}{g} \frac{d^2 s}{dt^2} = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_n = W \cos \alpha - E_h \sin \alpha - E_v \cos \alpha - N - U - \frac{W}{g} \frac{d^2 n}{dt^2} = 0$$

ここで W :崩壊物体の重量, U : 水圧力; E_h , E_v : 水平および鉛直地震力; T : せん断抵抗; N : 垂直力; s : s -軸変位; n : n -軸変位; t : time; g : 重力加速度. 運動する崩壊物に対してBinghamタイプのせん断抵抗は下記のように与えられるとする (図-5).

$$T = cA + N \tan \phi + \eta \frac{W}{g} \left(\frac{ds}{dt} \right)^b \quad (2)$$

ここで η : 粘性係数; ϕ : 摩擦角; A : 崩壊物の破壊面積; b : 定数; c : 粘着強度.

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \eta \left(\frac{ds}{dt} \right)^b - B(t) = 0 \quad (3)$$

ここに

$$B = (g - a_s) [\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi] + a_s [\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi] - g \beta(t) \cos \alpha \tan \phi - c \frac{A}{m}$$

もし, 図-6に示すように破壊面は脆性的な挙動を示す場合, 上式における摩擦角と粘着強度については, 残留状態の物性値を利用する.

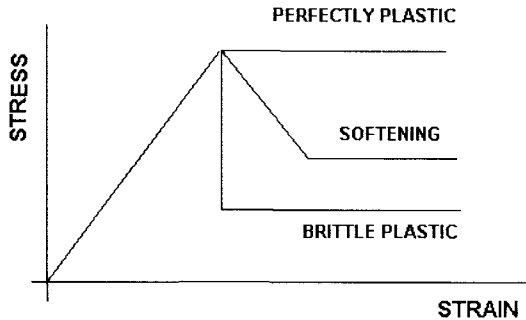


図-6 破壊面周辺の岩盤応力・ひずみ挙動

破壊物体の破壊時および運動中における破壊面近傍の間隙水圧の評価は, 最も重要であるが大変複雑である. ここで導入する有効応力係数は静的成分と動的な成分で構成されるとし, その値を以下のように仮定する.

$$\beta(t) = \beta_s + \beta_d \quad (4)$$

ここに

$$\beta_s = \frac{\gamma_w h_w}{\gamma_s H}; \quad \beta_d = \left(\frac{\gamma_s H}{\gamma_w h_w} - 1 \right) \frac{|a|}{g}$$

上式における $|a|$ は運動方向に対する絶対加速度である.

式(3)を解く際の初期条件は下記の通りである.

$$t = t_0 \text{ で } s = s_0 \text{ および } v = v_0 \quad (5)$$

一般的に式(3)を解く場合, 破壊面の幾何学形状, 地震による加速度と有効応力係数は時間と共に変化するため厳密解を求めることが困難である. 本研究では差分法を用いて解いた.

5. 適用と考察

(1) 模型岩盤斜面への適用

図-4に示した木製のブロックの模型岩盤斜面に対して行った解析結果の内, 一例をここで紹介する. 斜面の高さは38cm, 斜面角は90°で, 連続な不連続面の傾斜角は60°である. 実験は重力場下で斜面の支えを瞬間的に外すことにより斜面の崩壊が再現された. 解析結果と解析に用いたパラメータを図-7に示す. 崩壊物の運動は約400msで終了している. 図中に崩壊物の重心の移動距離とその速度の時間的な変化を示している.

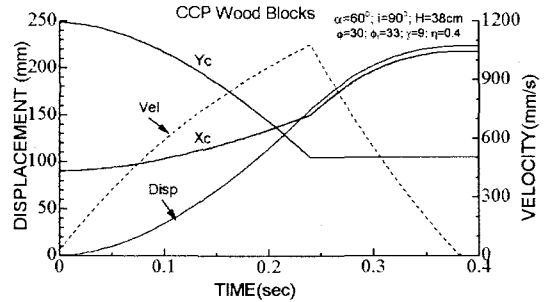
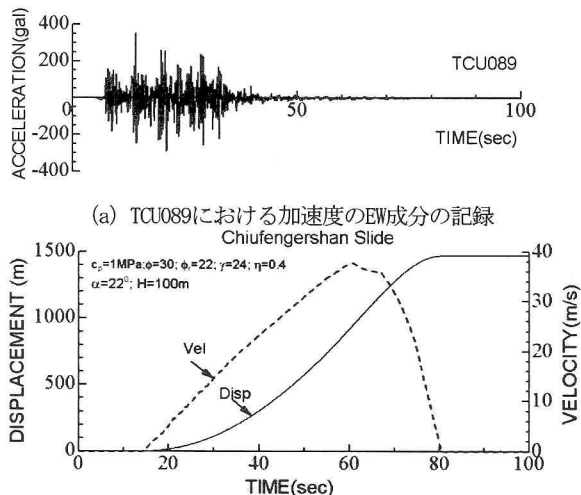


図-7 模型斜面の崩壊後の運動に対する解析結果

(2) Chiufengershan地すべりへの適用

台湾集集地震により数多くの大規模な岩盤斜面破壊が発生した. 崩壊が起きた場所は車籠埔断層の周辺地域に集中していた. その中でも大規模な斜面崩壊のおきたChiufengershan(九分二山)の斜面崩壊に着目する. 大規模崩壊現場の地質的に砂岩と泥岩, 頁岩で構成されている. 地震前に豪雨によって岩盤斜面は飽和されていることと斜面高さが約100mであるとする, 破壊面の粘着強度を考慮しないと斜面は静的に不安定となる. そのため, 破壊面に粘着強度が存在するものとし, その値を1MPaであるとした. また, 同様な岩盤の不連続面の摩擦実験より飽和状態における摩擦角は乾燥状態のものより約8°低下するとした.

斜面崩壊近傍で TCU089 強震記録を用いて、解析した結果を図—8 に示す。斜面の崩壊は地震による揺れによって発生し、地震による揺れが収まった後約 45 秒にわたって斜面崩壊物が移動している。その移動量は約 1500m であり、最大速度は約 40m/s に達している。これらの結果は実測値とほぼ一致している。



図—8 Chiufengershan地すべりに対する解析結果

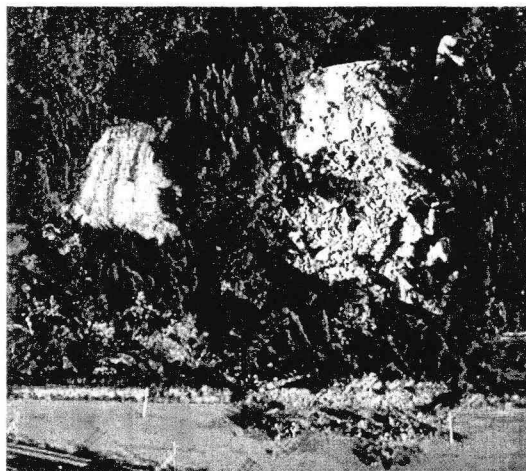
(3) 小千谷市白岩地域の斜面崩壊への適用

新潟県中越地震に起因する斜面崩壊は東山丘陵（特に山古志村付近）に集中して発生した。その集中は、震源域（余震域）が東山丘陵に重なったことに加えて、東山丘陵の地形および地質の影響によると考えられる。東山丘陵の地形は、基本的に細粒砂岩と泥岩の互層（軟岩）の褶曲構造である。東山丘陵の地質は、新第三紀鮮新世から第四紀更新世前期に堆積した海成堆積岩で構成されている。泥岩、細粒砂岩ならびに泥岩を主体とする細粒砂岩泥岩互層が多く、少量の礫岩と礫層がある。どの層も固硬度は低く、軟岩である。

中越地震で観察された大規模な斜面崩壊の内、小千谷市白岩地域で発生した地滑りへの適用例を紹介する（図—9）。

新潟県中越地震で発生した大規模な斜面の崩壊はほぼ

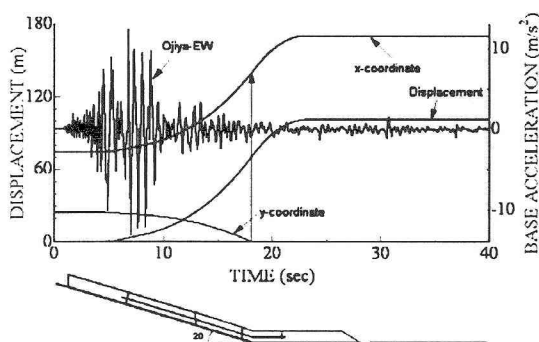
西向きで流れ盤の地質構造を有する斜面で発生した。したがって、K-NETの小千谷市で記録された強震記録の東西（EW）成分と上下（UD）成分を用いて解析を行うこととした。破壊面は層理面であり、破壊形態は平面すべり破壊である。



図—9 小千谷市白岩地域の斜面崩壊の様子

破壊面の摩擦係数を現地から採集されたブロックの傾斜実験より 0.6、残留状態における摩擦係数を 0.5 とした。飽和状態で斜面が安定しているため粘着強度を 30kPa 以上であると推定した。

解析結果を図—10 に示す。斜面の崩壊は地震による揺れによって発生し、揺れが収まった後約 15 秒にわたって斜面崩壊物が移動している。その移動量は約 124m であり、最大速度は約 15.7m/s に達している。これらの結果は実測値とほぼ一致している。

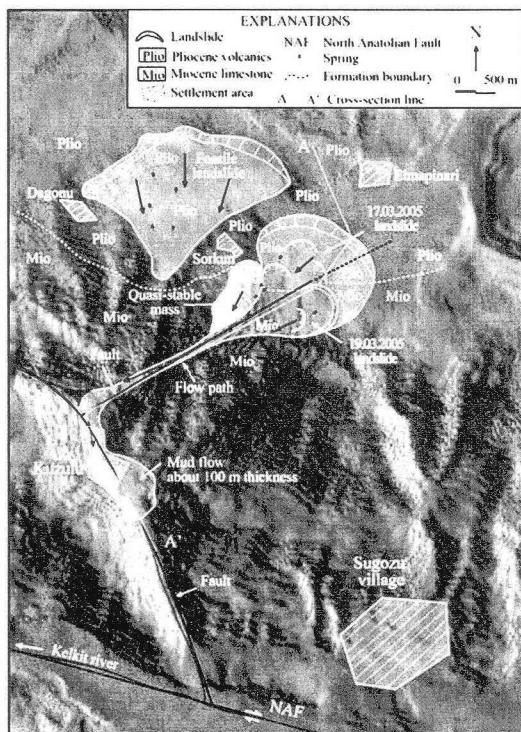


図—10 小千谷市白岩地域の地すべりに対する解析結果

(4) Kuzulu地すべりへの適用

2005年3月17日にトルコ共和国黒海地域で地すべりが発生した。風化火山岩で形成されている岩盤斜面は雪解

け水の上昇にとる有効応力の低下によって発生したと思われる（図—11）。崩壊した部分は落差が1000mを越えている位置からKuzulu村を直撃し、村全体が崩壊物で埋まり、15人が死亡した（図—12、図—13）。崩壊物は高音響発生5分後に村を直撃したと報告された。現地調査結果に基づいて、本論文で紹介する手法に基づいて行った解析結果を図—14に示す。



図—11 Kuzulu地域の地質と移動状況¹⁰⁾



図-12 地すべり発地点の様子

崩壊した部分の約60%は、未だ地すべり発地点に残っている（図—15）。この不安定な部分は同様な土石流を発生させる可能性が極めて高い。地すべりが発生したこの地点はトルコの有名な活断層である北アナドル断層

（NAF）より北に約4—5kmが離れている^{11,12)}。この地域近くでErzincanに1939年にM8クラスの地震が発生している。また、同地点に1983年にM6.8の地震が発生し、その際に500galを超える加速度が記録された。

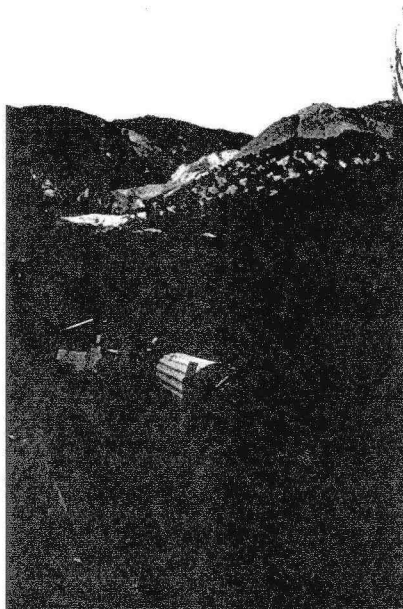


図-13 崩壊物に直撃されたKuzulu村の様子

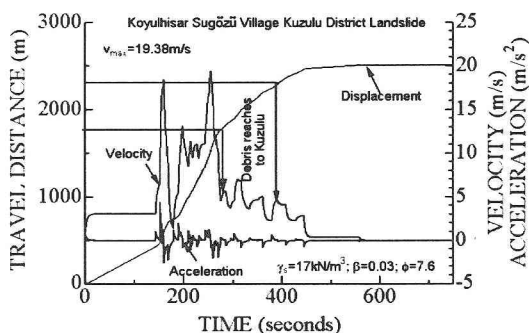


図-14 2005年3月17日の地すべりの逆解析結果

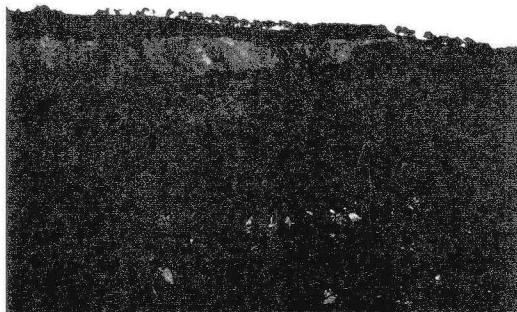


図-15 Kuzulu地すべり地点の不安定な部分の様子

現在不安定な部分に対してErzincanで記録された強震記録と図-14に示した解析で利用したパラメータを用いて解析を行った結果を図-16に示す。この結果より地震によって現在不安定に残っている部分の土石流としての運動が発生する可能性が高いことが推察される。その移動距離は崩壊物の性質が大きく変わらなければ、2005年3月17日のものとほぼ同様と推察される。

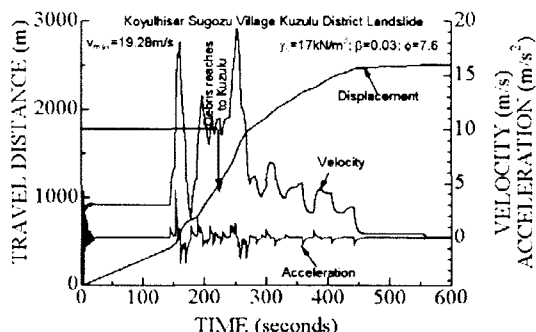


図-16 地震によるKuzulu地すべりの解析結果

6. 結論

地震による岩盤斜面の崩壊後挙動を予測する解析モデルを提案し、その解析モデルを用いて室内模型実験のシミュレーション、中越地震や台湾集集地震で発生した代表的な斜面崩壊事例を逆解析し、崩壊後挙動を求め、実測値と比較した。また、地すべり発生した地点に残っている不安定な崩壊物が地震によって再運動の可能性を検討した。提案された解析モデルが岩盤斜面の崩壊後挙動を予測することで、妥当であることを確認した。

参考文献

- 1) Aydan, Ö. 1989. The stabilisation of rock engineering structures by rockbolts. Doctorate Thesis, Nagoya University.
- 2) Aydan, Ö., Y. Ichikawa, Y. Shimizu, and K. Murata (1991). An integrated system for the stability of rock slopes. *The 5th Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Cairns, 1, 469-465.
- 3) Aydan, Ö. and T. Kawamoto (1992). The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilisation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 25(3), 143-165.
- 4) Hoek, E. & Bray, J.W (1977): Rock slope engineering. Ed. Inst. Min. & Metall., Revised 2nd Ed., London.
- 5) Aydan Ö. and Y. Shimizu (1993). Post-failure motions of rock slopes. *Int. Symp. Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering*, Istanbul, 409-415.
- 6) Aydan, Ö., Y. Shimizu and T. Kawamoto (1992). The reach of slope failures. *The 6th Int. Symp. Landslides, ISL 92*, 1, 301-306, Christchurch.
- 7) Aydan, Ö., H. Üçpırtı, H. Kumsar, (1996). Stability of slopes having an inclined sliding surface with a visco-plastic behaviour. *Korea-Japan Joint Symp. on Rock Eng.*, 437-444.
- 8) Aydan, Ö., Ulusay, R. (2002): A back analysis of the failure of a highway embankment at Bakacak during the 1999 Düzce-Bolu earthquake. *Environmental Geology*, 42, 621-631.
- 9) Aydan, Ö., Seiki, T., Shimizu, Y. and Hamada, M. (2000): Some considerations on rock slope failures due to earthquakes. Chonqing-Waseda Joint Seminar on Chi-Chi Earthquake.
- 10) Kılıç, R. (2005). Personal communication on Kuzulu Landslide. Ankara University, Department of Geological Engineering.
- 11) Sivas Governor Office (2005): Koyulhisar landslide (in Turkish) <http://www.sivas.gov.tr/>.
- 12) MTA-HU (2005): 17/03/2005 Kuzulu (Sivas-Koyulhisar) landslide (An Evaluation Report). March 2005, Ankara. (In Turkish).

PREDICTION OF POST-FAILURE MOTIONS OF ROCK SLOPES INDUCED BY EARTHQUAKES

Ömer AYDAN, Yoshimi OHTA, Naohiko TOKASHIKI and Tomoyuki AKAGI

In this article, a theoretical model for the simulation of the landslides with the consideration of Bingham type yielding criterion together with water pressure increase due to ground shaking resulting from earthquakes has been presented and it is applied to laboratory rock slope models, actual landslides caused by 1999 Chi-chi earthquake, 2004 Chuetsu earthquake. Furthermore, the possibility of motion of the unstable mass of Kuzulu landslide in Turkey in the case of an earthquake similar to that of 1992 Erzincan earthquake has been investigated. The computational results yielded likely displacement, velocity and acceleration responses of landslide bodies, which may be used for the assessment of impact effects of landslides on structures. Although the method is simple, it is very effective and reliable for assessing the motions of landslides and their effect on structures.