

P76 地震による斜面崩壊の発生予測に関する USGS 手法の適用事例

静岡大学大学院農学研究科

○小沼佳記

静岡大学農学部

土屋 智・逢坂興宏

岐阜大学大学院連合農学研究科

今泉文寿

1. はじめに

アメリカ西海岸は日本と同様に斜面災害をもたらす地震が多発する地域である。同地域は早くから強震観測網が発達したため、地震動と斜面崩壊の発生に関する多くのデータが得られている。アメリカ地質調査所 (USGS) はそれらのデータを用い、斜面崩壊の発生予測に関して物理モデルを考慮した経験式を公表してきた。一方、日本では経験式を構築するために必要なデータの蓄積はまだ十分ではないが、USGS で考案された経験式が適用可能であれば、崩壊発生位置の予測手法のひとつとなり得ると考えられる。そこで本研究では、USGS による崩壊発生の予測に関する経験式の適用を試みた。

2. 解析方法

Newmark 法 (Wilson and Keefer, 1985) は、斜面の安全率を 1.0 に低下させる大きさの加速度を限界加速度 (A_c) とし、 A_c より大きい加速度を 2 回積分して変位に変換したものを、斜面の変位量として評価する物理モデルである (図-1)。これによれば A_c が大きくなるほど斜面変位は小さくなり、 A_c は地震に対する斜面の抵抗力の指標となる。一方、 A_c は (1) 式で表され、それに用いる地震時の斜面安全率 (F_s) は無限長斜面の安定をもとに (2) 式で表される。

$$A_c = (F_s - 1)g \sin \theta \quad (1)$$

$$F_s = \frac{c}{\gamma h \sin \theta} + \frac{\tan \phi}{\tan \theta} - \frac{m \gamma_w \tan \phi}{\gamma \tan \theta} \quad (2)$$

ここに、 A_c は限界加速度 (m/s^2)、 g は $9.8 (m/s^2)$ 、 θ は傾斜角 ($^\circ$)、 c は粘着力 (tf/m^2)、 γ は土砂の単位体積重量 (tf/m^3)、 h は崩壊深 (m)、 ϕ は内部摩擦角 ($^\circ$)、 m は飽和層の割合、 γ_w は水の単位体積重量 (tf/m^3) である。

斜面変位を評価する Newmark 法の計算は、積分を 2 回行うため複雑である。そこで地震動をひとつの数値で表す Arias 強度 (I_a) と A_c を対応させて、近似的に斜面の変位量を推定する手法が考えられ、カルフォルニア州で発生した地震を中心に 13 例の地震動を用いて経験式 (3) が考案されている (Jibson et al, 1998)。

$$\log D_n = 1.521 \log I_a - 1.993 \log A_c - 1.546 \quad r^2 = 0.83 \quad (3)$$

ここに、 D_n は斜面の変位量 (cm)、 I_a は Arias 強度 (m/s) で (4) 式で求められる。

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [\alpha(t)]^2 dt \quad (4)$$

ここに、 $\alpha(t)$ は加速度 (m/s^2) である。また既往の 31 例の地震動を整理し、 I_a をマグニチュード (M) と震源距離 (r : km) で表す経験式 (5) も考案されている (Wilson and Keefer, 1985)。

$$\log I_a = -4.1 + M + 2 \log r \quad (5)$$

Northridge 地震 (1994, $M=6.7$) に対して (3) 式により 10m メッシュごとの D_n を求めたところ、崩壊は D_n が数 cm のメッシュに多く発生したと報告されている (Jibson et al, 1998)。そこで本研究では (3) 式による D_n と静岡地震 (1935, $M=6.4$) で発生した崩壊の関係を検討してみた。

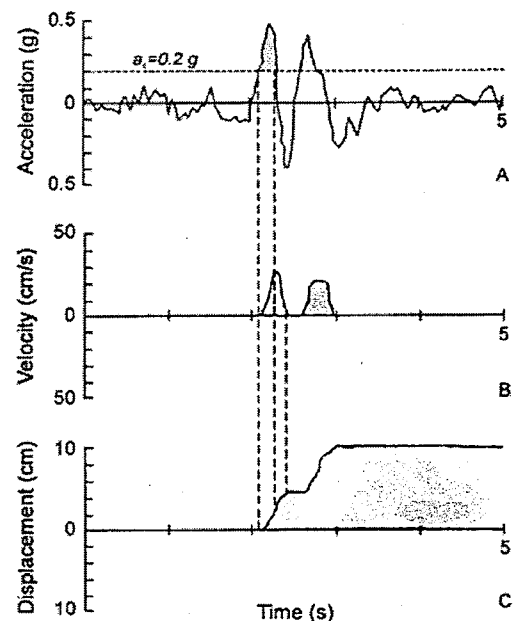


図-1 Newmark 法の概念 (Jibson et al, 1998)

対象地は静岡地震により崩壊が発生した有度丘陵に設定した。地質は全域に渡って第四紀の未固結な堆積層である。Jibson et al (1998) は解析にあたって地質ごとに c , ϕ を固定し, h は全域で一定としている。本研究ではそれに従い,

(2) 式に用いる定数は既往のせん断試験の結果 (中田ら, 1992) から $c=0.7$ (tf/m²), $\phi=35$ (°), $\gamma=1.3$ (tf/m³) として, $h=1$ (m) と仮定した。なお静岡地震発生時の土壌水分量は不明なため $m=0$ とした。(3) 式に用いる I_a は加速度波形が存在しないため (5) 式で求め, 対象地内の地震動は一定とし $M=6.4$, $r=10$ (km) とした。以上の条件より 10mメッシュごとに D_n を求めた。なお安全率が 1.0 を下回るメッシュには Jibson et al (1998) に従い最小の安全率として 1.01 を与えてある。ただし Newmark 法で計算される D_n は実際に斜面が動いた距離とは一致せず, 斜面変位量を表すひとつの指標として扱わなければならない (Jibson et al, 1998)。

3. 結果と考察

(3) 式より求めた斜面変位 D_n の分布図を図-2 に示す。斜面変位量 (cm) $D_n \geq 10$, $1 \leq D_n < 10$ のメッシュが帯状に分布し, 図-3 に示す静岡強震地域踏査報告 (1935) による崩壊地の位置とよく対応しているように思われる。この結果より (5) 式で求めた I_a も妥当と判断される。予測される地震に対して加速度波形を作成することは困難であり, (5) 式は予想される地震に対して斜面崩壊を予測する際に有用であると考えられる。

図-2 の右上にも $D_n \geq 10$ のメッシュが集中しているが, 図-3 と照合すると道路建設により地形改変された場所と推察される。右下にも $D_n \geq 1$ のメッシュが見られるが静岡地震による崩壊は発生していない。したがって, $D_n \geq 1$ のメッシュが多数集中して分布することが崩壊発生条件にあたりと判断される。地質が未固結である段丘崖では地震による崩壊が多発することが多く報告されているが (例えば国際航業, 1999), USGS による手法はこの特徴をよく表現している。

4. おわりに

USGS により提案された地震による斜面崩壊に関する経験式は, 本研究で対象とした事例に適用した結果, 地質が未固結である段丘崖での崩壊の発生位置を予測できるようなのである。今後は本研究とは異なる条件でも経験式 (3), (5) の妥当性を検討していく必要がある。

参考文献

- 1) Wilson and Keefer (1985) Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding, USGS professional paper 1360, pp.317-345.
- 2) Jibson et al (1998) A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: An example from the Los Angeles, California, area, USGS Open-File Report 98-113.
- 3) Miles and Keefer (2000) Evaluation of seismic slope-performance models using a regional case study, Environmental and Engineering Geoscience, Vol. 6, No. 1, pp.25-39.
- 4) 石川芳治ほか (2000) 米国における予測手法, 地震砂防, pp.136-155
- 5) 和達清夫ほか (1935) 静岡強震地域踏査報告, 中央气象台
- 6) 国際航業 (1999) 1999年9月21日台湾大地震 (集集地震) の記録, pp.62
- 7) 中田ほか (1992) 丘陵斜面における表層崩壊のハザードマップ作成について, 静岡大学修士論文, pp.51

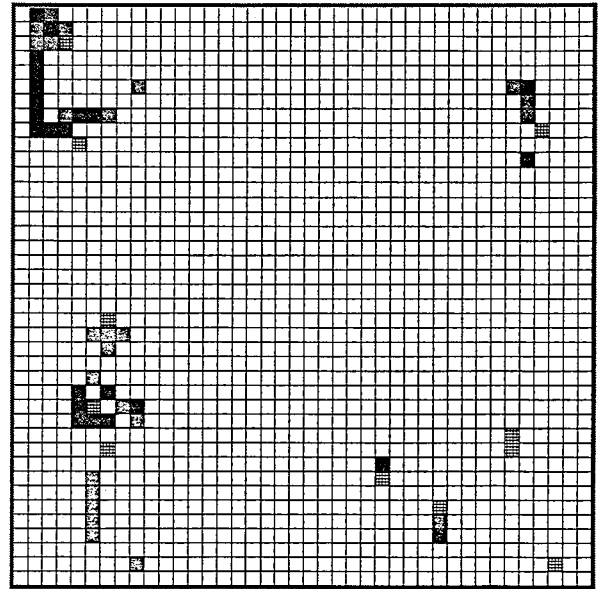
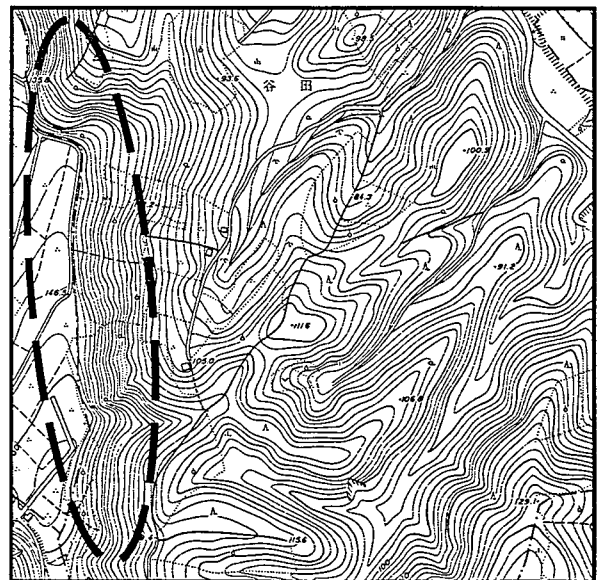


図-2 斜面変位 D_n の分布図



点線は崩壊した段丘崖を示す

図-3 静岡地震による崩壊地