地すべり危険度予測手法の研究

佐々恭二*

研究の目的

地すべり・斜面崩壊・土石流など各種地すべり現象による災害の軽減を目的として、地すべりの 発生場所、発生時間、発生危険度および発生した場合の災害範囲予測手法の研究を推進する。

研究の方法

佐々恭二が、1988年に発表した「地すべり運動の地盤工学的モデル」(Sassa 1988)をベースとし て、定常状態強度は、土粒子が破砕し体積収縮を引き起こす限界の応力(σss)に対応し、初期の垂 直応力によらないとの実験事実(Okada 他,2000)と土砂が非排水せん断を受けた時のピーク強度か ら定常状態強度までの強度低下グラフ(Igwe 他,2007)のモデル化、また、斜面土層が地震・降雨 をうけた場合の応力バランスが、土塊の加速を生み出すことのモデル化を通じて、地すべりの発生 過程(運動開始ーピーク強度-定常状態強度)と運動過程(定常状態での運動-地すべり拡大-停 止)を統合的に解析できる三次元シミュレーションを開発した。そしてシミュレーション結果と限 界釣り合い(Limit Equilibrium)に基づく斜面安定解析との比較検証をおこなった。さらに 2006 年に降雨の後の弱い地震で発生し、1000人以上が死亡したイテ島大規模高速地すべりへの適用を行 なった。

3. 得られた成果

開発した地すべり発生運動統合シミュレーション(LS-RAPID)の基礎概念を図1に示す。運動土 塊の中に柱状要素を考え(図1左)、それにかかる力の合力が柱状要素の土塊の加速に寄与すると考 え、すべての力と運動を水平面状に投影して計算するものである。図1右は柱状要素にかかる力(土 塊の自重、水平土圧、地盤反力、間隙水圧、水平及び鉛直地震力)を示している。(1)式に示すご とくこれらの力(ベクトル)の合計が、柱状土塊を加速させると考えるものである。柱状要素の自 重および地震力のうち、すべり面に垂直な成分は、各々地盤反力および発生する過剰間隙水圧によ ってキャンセルされ、斜面成分のみが加速に貢献すると仮定している。また、降雨により土層内に 発生する水圧と地盤反力は、せん断抵抗の値に含まれる。



図1地震降雨による高速地すべり発生運動統合シミュレーションモデル(LS-RAPID)の基礎概念

*特定非営利活動法人アイシーエル・学術代表

地震力のうち、鉛直地震力は、鉛直土圧を変化させるので水平土圧の値に影響を与える。シミュレ ーションは、三次元的問題を二次元的に解くためにすべての力、運動を水平面に投影し、水平面上 でX、Yに方向に分解して解いている。(1)式の関係は図2に示す二つの式に変換される。この両 式に柱状要素内に流入する土量分だけ柱状要素内の土塊の高さが増大する(すなわち土塊の密度は



運動中に変化しない)との仮 定の3つの式から運動が解析 される。

発生は、ピーク強度の達す る変位(DL)と定常状態に達 する変位 (DU) の間の強度低 下を log のグラフで直線で近 似し、また、空間上に固定し たメッシュ内の土塊の累計変 位量が、DL まではピーク強度、 DL に達すれば低下し始め、DU で定常状態強度になると仮定 してモデル化した。



Fig.12 Landslide initiation in RAPID and Slope Stability Analysis-

(tan φ_p=0.8, C_p=50kPa, τ_{ss}=50kPa, k=0.5, B_{SS}=0.99, tan φ_m=0.60, mesh: 10 m, area: 350x440 m, α=0, min. cal. time=10 sec, « Red color line is the border of moving mass) + *1: <u>Fellenius</u>, *2: Bishop simplified, *3:Janbu simplified, *4: Spenser, *5: Morgenstern Price+

図3地すべり発生・運動統合シミュレーションモデル(LS-RAPID)と各種斜面安定解析法の比較

次に開発したモデルを検証するために、350x440mの仮想の単純斜面を考え、LS-RAPID と5つの斜面安定解析方法の比較を行った。間隙水圧比(r_n)を変化させて、地すべりの発生の有無 を調べたものが図3である。モノクロなので見えないかもしれないが、移動速度が瞬間的にでも 0.5 m/sec に達したメッシュ範囲はピンクの線で囲まれる。r_n=0.4では斜面上部の2カ所で局所破 壊が生じてピンクの線で囲まれた部分が2箇所現れたが、全層の移動=地すべりには至らなかった。 (A)。しかし r_n =0.52, 0.6 では地すべりが発生した(C, E)。一方、中央断面に関して2次元 の限界釣り合い(地すべり土塊の全体が同時に破壊するとの仮定)での5つの解析法では、もっと も単純な Fellenius 方をのぞく、Bishop, Janbu, Spenser, Morgenstern & Price の4つの方法で は、いずれも発生・非発生の境界は、r_u =0.5 と 0.6 の間に現れた。違いの原因は、2次元の解析 と3次元解析 (LS-RAPID) の違いもあると思われるが、主要な差は,LS-RAPID では局所的な破壊に よるその場所での強度低下により周辺の土塊に拡大する進行性破壊が解析できるが、斜面安定解析 では地すべり土塊全体が同時に破壊すると仮定しているためであると考えられる。そこで局所的破 壊が生じにくいように、DL=2m, DU=5m を与えて計算したものが、図3のB,D,Fである。局所破 壊が生じ始めるのが、r_u =0.5 (D),地すべりが発生するのは r_u =0.6(F)になり斜面安定解析の結果 と一致する。



図4 2006年レイテ島地すべりの斜写真とほぼ同角度でのシミュレーション結果(等高線:20m)

このシミュレーション方法を 2006 年のレイテ島の大規模高速地すべりに適用したが、レイテ島 のような大規模地すべりでは、運動土塊自体がいくつものサブブロックに分かれて運動し、相互の 衝突、運動量の変換、また運動経路中の壁、段差などの場所では、運動中に消費されるエネルギー はすべて摩擦エネルギーであるとの(1)式の仮定が崩れるメッシュ、崩れる瞬間がある。この仮 定が崩れる現象が生じる場所・瞬間はあらかじめ予測できないので、速度と土塊厚さが、生じ得な い値(閾値)になった場所/瞬間に限って摩擦以外のエネルギー消費を発動することにした。摩擦以 外のエネルギーの中核は、運動エネルギーなので、そのため、Voellmyの乱流係数(Körner.1980)と

同様な考え方で運動エネルギーに比例する値 α (m v²)を摩擦抵抗として差し引くことにした。

レイテ島では α =1.0、閾値は運動速度=80 m/sec、土塊厚さ=200mを用いた。なお運動絵練りギー分を差し引いた結果土塊厚さがマイナスになるメッシュではゼロとしたので、 α =0.2-10 までは、ほぼ同じ結果になった。

図4がレイテ島地すべりの写真と計算結果をくらべたものである。計算は、フィリピン火山地震研究所から提供された地形図およびレイテ島地すべりを発生させた観測地震波から推定した斜面にかかる推定地震波(鉛直、東西、南北:震度係数 K_{EW}=0.12, K_{NS}=K_{UD}=0.061)と現地から採取した土砂の非排水載荷リングせん断試験機の結果を用い行った。図4の等高線は20m、計算範囲は3760x1960mである。この地すべりでは約2000万m3の土塊が集落を押しつぶし、斜面末端の皮近くまで達した。その写真とシミュレーションの結果を比べると、地すべりの後に発生した二次的泥流の画面左方向への薄い流れが表現されていないものの地すべり土塊の本体の移動はほぼ再現されたといえる。

4. 謝辞

本研究の遂行にあたって協力をいただいた永井修(アイシーエル)、Renato Solidum(フィリピン 火山地震研究所)、山崎洋一(五大開発)、太田英将(太田ジオ)各氏に感謝の意を表します。

発表論文

- Kyoji Sassa, Osamu Nagai, Renato Solidum, Yoichi Yamazaki, Hidemasa Ohta (2010). An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake & rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide. International Journal "Landslides", Vol.7, No.3 出版予定 (18 pages, online 出版済み DOI 10.1007/s10346-010-0230-z)
- 2) 佐々恭二・永井修、山崎洋一、太田英将、Renato Solidum (2010) 地震降雨による高速地すべり 発生運動統合シミュレーションモデル (RAPID2)構築と 2006 年レイテ島地すべりへの適用. 第4 9回日本地すべり学会研究発表会論文, pp. 187-188.

参考文献

- 1) Igwe O., Sassa K, and Wang FW (2007). The influence of grading on the shear strength of loose sands in stress-controlled ring shear tests. Landslides 4 (1): 43–51.
- 2) Körner, H (1980). Model conceptions for the rock slide and avalanche movement. Proc. Iternational Symposium "INTERPRAEVENT 1980", Bad Ischl, Vol.2:15-55
- 3) Okada Y., Sassa K., and Fukuoka H. (2000). Liquefaction and the steady state of weathered granite sands obtained by undrained ring shear tests: A fundamental study on the mechanism of liquidized landslides. Journal of Natural Disaster Science 22 (2): 75-85.
- 4) Sassa K. (1988): Geotechnical model for the motion of landslides. Proc. 5th International Symposium on Landslides. "Landslides", Balkema, 1: 37–56.