

速報

山地斜面における地震時の崩壊土砂移動量の推定手法の検討*¹浅野志穂*²

キーワード：地震時斜面崩壊，土砂移動，地震加速度，Newmark 法

I. はじめに

近年大きな地震による山地災害が各地で発生している。この内、山地の斜面崩壊は、中山間地域に深刻な被害を与えるため、被害を軽減するための効果的な対策手法が求められており、それには斜面崩壊の発生メカニズムの解明が必要である。特に山腹斜面からの崩土の到達範囲予測や崩壊危険箇所の推定などのためには崩壊土砂の移動と地震動の関係について明らかにすることが必要である。しかし地震発生予測が困難なため、現地観測から動的地震動や斜面変位の研究を行うことが難しく、土砂移動と地震動の関係については不明な点も多い。

そこで本研究では実験斜面を用いた地震時崩壊実験を行い、得られた崩壊土砂の移動と地震動の関係について検討を行った。特にここでは試験により得られた移動量に対する既往の斜面変位量予測手法の適応性について検討を行った。本研究は実験装置の仕様の都合で地震動の水平方向成分のみを検討した。

ここで実際の地震動は上下動成分も含んだ様々な方向に発生する。地震動の上下動成分については水平成分に対する位相差の違いだけでも崩壊発生への影響の仕方が変わると考えられ、既往の研究例でも斜面崩壊に及ぼす影響が小さいとする研究と大きいとする研究の両者があり現状まだ未解明な部分が多い（秦ほか，2006）。本研究は実験装置の都合と実験条件の単純化のために水平方向成分のみの検討としたが、上下動成分の影響については今後更に検討が必要である。なお、本実験は兵庫県による林野庁森林土木モデル事業の一環として実施されたものである。

II. 実験手法

地震時崩壊実験は、振動台上に設けた人工斜面に震動を与えて行った。実験斜面は1995年兵庫県南部地震時の花崗岩山地における表層崩壊発生斜面を模して、実斜面の1/5スケールで作成した（図-1）。斜面土層は、基盤面を想定して作成した架台上に、実斜面の表層土密度に合わせた密度調整を行いながら作成した。実験斜面の各場所に水平方向の加速度計と地中変位計を設置し動的計測を行った。実験斜面の諸元や計測手法については浅野ほか（2003）に従う。今回検討対象としたのは図に示した加速度2地

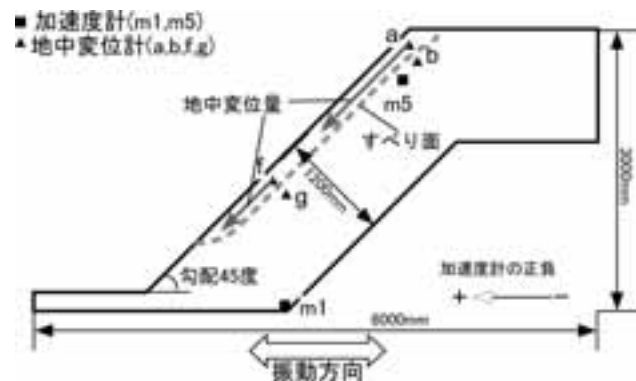


図-1. 実験斜面断面図と土砂移動範囲

点、変位4地点である。aとfは深度10cm、bとgは深度30cm、m1は架台底面の加速度、m5は斜面上部加速度である。実験斜面に与える振動は、一定の加速度振幅を持つ周波数3Hzの正弦波を10秒間、斜面下向き水平方向に与えた。10秒間の正弦波の前後5秒間は起振のためのウォームアップとクールダウンの振動を加えた。3Hzの周波数は兵庫県南部地震時の卓越周波数1Hzに、香川（1978）に従ってスケール効果を考慮して決めた。実験は振幅の小さいケースから始めて崩壊が生じなければ、振幅を1段階大きくして再度実験を行うということを繰り返して、崩壊が発生するまで行った。実験は計測器のトラブルで加速度と移動量を同時に記録できなかったため、同じ条件で実験を2回行いそれぞれの崩壊発生時の加速度と移動量の時刻同期をとって実験結果とした。1回目は250cm/s²(=gal)に、2回目は300cm/s²の振動台加速度で崩壊した。変位量は250cm/s²の時に発生した崩壊の記録、加速度は300cm/s²で崩壊した実験の250cm/s²の振動台加速度時の実験記録である。

III. 移動量推定手法

地震時の斜面移動予測として、Newmark（1965）により示された残留変位予測手法（いわゆるNewmark法）が有名であり、本研究でも当手法を検討した。Newmark法は振動する台の上に置いた剛体の摩擦を考慮した運動から導かれた解析手法である。具

*¹ Asano, S.: Estimate method of the landslide movement on a hill slope by earthquake motion.*² 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res. Center, For. & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860-0862

体的には斜面上の土塊の震度法斜面安定計算において安全率が1となる震度を限界震度としたときに、斜面に加わる地震動が限界震度を越えた場合に変位が始まり、地震動と限界震度の差に当たる加速度成分が土塊の移動に作用すると考える。鶴飼 (1989) に従うと対象とする地震加速度 $a(t)$ 、限界震度に対応する加速度を ac とすると時刻 t における変位 $u(t)$ は次式で示される。

$$u(t) = \int \left\{ \int_0^t (a(t) - ac) dt \right\} dt$$

限界震度の求め方にはいくつかの手法があるが、いずれも移動土塊のすべり面が予め決まっており、移動土塊は変形を伴わない剛体であることが必要条件である。このためすべり面は円弧すべりか楔状の直線すべりを仮定する。本研究では後述の通り、移動土塊が直線状のすべり面を形成したため鶴飼 (1987) による直線すべりの式を適用して次式により限界震度を求めた。

$$kc = \frac{\cos(\beta)}{\cos(\alpha - \theta - \phi)} \left(\frac{2 \sin(\beta)}{Ns \cos(\beta - \alpha)} + \frac{\sin(\phi - \alpha)}{\cos(\phi)} \right)$$

ここで kc : 限界震度, β : 斜面勾配, α : すべり面勾配, θ : 地震加速度の鉛直方向への傾き, ϕ : 内部摩擦角, Ns : $\gamma H/c$, γ : 単位体積重量, H : 移動土塊の高さ, c : 粘着力である。ここで土質試験による γ : 16kN/m³, ϕ : 35度, c : 9 kN/m² を用いて求めた kc は0.255であった。変位量を求める際の地震加速度は、斜面上部のすべり面近傍にある不動地内の加速度 $m5$ のデータを用いた。

IV. 結果と考察

実験の結果、崩壊は図-1に示される様に表層20cmの深さをすべり面として斜面の上方で発生した。降雨による崩壊では斜面脚部で発生することが多くそれと対照的な結果であった。入力加

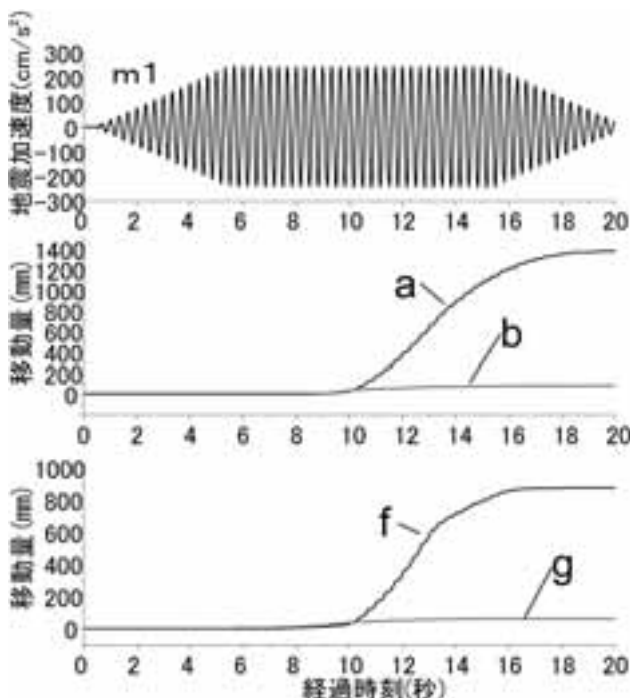


図-2. 入力加速度と各地点の土砂移動量

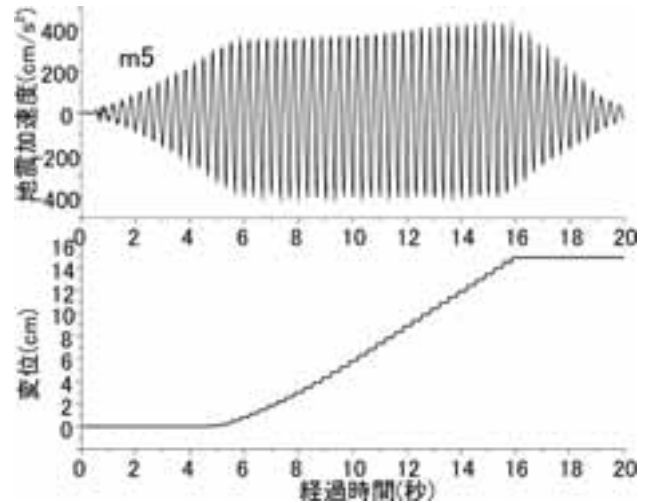


図-3. Newmark法による土砂移動解析結果

速度と各地点の地中変位量の時間変化を図-2に示す。斜面下向き水平方向の加速度をグラフでは正の値で表す。変位は深度10cmのaとfにおいて9秒付近に始まり時間と共に増大し、aでは1400mm、fでは800mmまで変位した。fでは13秒付近の約600mmで累積変位の傾きが緩くなりその後停止したが、これは崩壊土砂が斜面下の水平面に到達したためである。このため変位開始から13秒付近までが土砂が自由崩落したの時間と見なして主に検討の対象とした。変位を詳細に見ると時間と共にステップ状に増加した。入力加速度と比較すると、斜面下向き水平方向に加速度が大きくなると地中変位が始まり、逆向きの加速度が大きくなると変位の増加が小さい関係にあった。このことは地震時の土砂変位が振動に強く影響を受けることを示している。

次にNewmark法による土砂移動の解析結果を図-3に示す。対象とする加速度はすべり面付近の $m5$ の観測値とした。 $m5$ の加速度は $m1$ で250cm/s²の振幅であるのに対して、1.4倍の約350cm/s²の加速度が作用した。一般的に斜面上部では地形効果により斜面下部より大きな加速度が生じると指摘されているが、本実験でも同様の結果が得られた。 $m5$ 加速度を用いてNewmark法で解析すると解析変位は時間と共に増加した。累積変位は実験結果同様に加速度の変化に連動してステップ状に増加

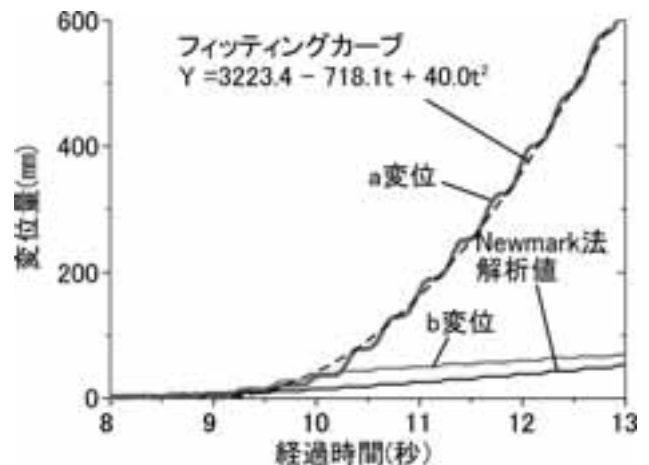


図-4. 解析値と実験値の比較結果

して実験結果と整合する結果を得た。しかし変位は6秒付近から始まっており、実験より早い変位開始時刻となった。これは加速度が早い時期から限界震度を超過して発生したためである。実験では一定の入力加速度を与えて続けて9秒時点で崩壊が発生しており、加振後より崩壊に至るまでの期間の振動による力は、地中内のすべり面の形成などに使われたことが考えられる。

そのためすべり面形成後に振動の力が変位に繋がったと考えられる。実験時の変位開始時刻以後の地震加速度を用いて変位解析をし、実験変位と比較した結果を図-4に示す。実験値は表層aと深層bを示した。解析によりステップ状の変位の特徴はよく表されている。実験結果を詳細に見ると、aが急激に増加する前には深層のbにおいても微小な変位が発生しており、この時期は変位の増加は直線状であり、この時期は解析でよく再現ができた。その後、表層のaが急激に増加する時期では、Newmark法では変位増加量が小さくなりよく再現することができなかった。Newmark法では限界震度と加速度から変位を算出するため、一定の加速度振幅と一定の限界震度で与えた場合には、変位の増加率が一定となり大きな変位を推定すること難しいことが分かる。

図にはaのフィッティングカーブの式も合わせて示した。カーブは時間項の二次方程式で示されており2階微分すると加速度項が得られるため重力などの加速度項を加えることで変位の推定ができると考えられる。また土はせん断ひずみの増加に伴う強度低下(ひずみ軟化)を起こす場合があることが知られている。これらのことから小変位の期間中はNewmark法で土砂移動を推定可能だが、大変位では重力項を考慮した運動方程式やひずみ軟化など土の強度の変化を考慮して移動量を推定する必要があると考えられる。

引用文献

- 浅野志穂ほか(2003)日本地すべり学会誌 40:134-137.
 秦吉弥ほか(2006)広島大学院工学研究科研報 55(1):27-34.
 香川崇章(1978)土木学会論文報告集 275:69-77.
 Newmark, N. M. (1965) Geotechnique 15:139-160.
 鵜飼恵三(1987)土質工学論文報告集 27:136-146.
 (2008年12月6日受付;2009年1月14日受理)