

アルミ棒を用いた模擬斜面の動的安定性の検討

高松工業高等専門学校専攻科 学生会員 多田 達弥
高松工業高等専門学校 正会員 土居 正信

1. はじめに

我が国では 1995 年に発生した兵庫県南部地震により大きな被害を受けて以来、耐震設計の考え方が見直されてきた。しかしながら、当時に観測された最大加速度は 891gal であったが、近年では 2005 年の新潟県中越沖地震で 2515gal、2008 年の岩手・宮城内陸地震で 4022gal もの非常に大きな加速度が観測されている。

地震による二次災害も深刻なものがあり、例として斜面崩壊による家屋倒壊や道路の寸断、天然ダムの発生などがある。これらの災害に有効的に対処したいが、肝心の地震動による斜面崩壊のメカニズムに対する検討が進んでいない。

本研究では、地震時における斜面の動的安定性に対する基礎研究として、アルミ棒を用いた模擬斜面を用いて斜面崩壊のメカニズムの検討を行った。

2. 振動実験の概要

図-1 のようにアルミ棒を振動台の上に積み上げて模擬斜面を作る。使用したアルミ棒の寸法は直径 8mm、長さ 160mm、質量は 21.7g である。アルミ棒の断面には崩壊の様子を判別し易くするため、カラーシールを貼り付けて色分けしている。模擬斜面の傾斜角は 60°（アルミ棒約 1300 本）および 30°（アルミ棒約 2400 本）の 2 種類とする。模擬斜面は高さ約 24cm、天端幅 16cm で統一している。また、アルミ棒を整列させる方法として、木製板に一边 7mm の角柱を打ち付けて仕切りを作り、各傾斜角に対応する土台を作製した。

振動台中央には加速度計を設置し、試験中の加速度波形を測定した。崩壊様子はデジタルカメラ（撮影コマ数 300fps）を用いて記録した。この際、十分な光量を確保するため周囲に照明を設置した。

模擬斜面に与える荷重は正弦波の振動荷重とし、荷重条件は表-1 に示す。最大加速度が 980gal（兵庫県南部地震レベルを想定）および 1470gal（前者の 1.5 倍レベルを想定）となるように振幅と振動数を設定する。荷重は載荷直後に設定加速度を作用させ、完全に模擬斜面が崩れ落ちた瞬間を実験終了とする。なお、左側の斜面を観察の対象とし、図-1 の左方向を斜面前方と表現する。

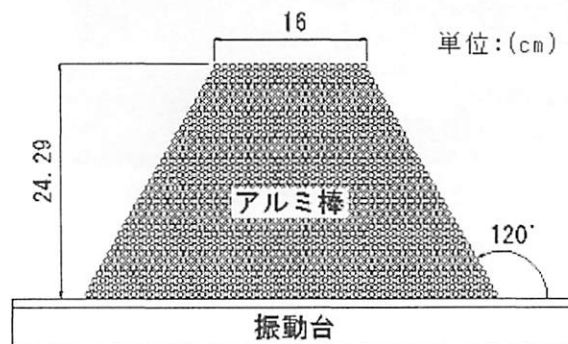


図-1 傾斜角 60° の模擬斜面

表-1 荷重条件

加速度 (gal)	980		1470	
振幅 (mm)	10	25	10	25
振動数 (Hz)	5	3	6	4

3. 数値解析

実験で観測された崩壊の様子を参考にし、あらゆる振幅および振動数で振動させた場合の模擬斜面の崩壊の様子を再現できるプログラムを作成する。

解析方法は、まず図-1 の配列よりわずかに要素（アルミ棒）を上方へ浮かせたデータを入力し、静的に落下させて積み上げる。設定した斜面形状でつり合い条件が満足された上で、振動荷重を加えて動的に解析をする。動的解析では斜面崩壊のような大変形に適する動的粒状要素法を用いる。この方法は個別要素法に類似し、個別要素法では省略していた剛性マトリックスが考慮される。すなわち、式(1)に示す運動方程式を解くことで解析する。運動方程式の解法にはニューマークの β 法を適用した。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f_{ex}\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[C]$ 減衰マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{u\}$ は変位ベクトル、 $\{f_{ex}\}$ は外力ベクトルを意味する。なお、計算に用いる要素の物性値はアルミニウムのものを用いる。

4. 実験結果

図-2に傾斜角 60°、振幅 25mm、振動数 4Hz で振動させた場合の模擬斜面の崩壊様子を示す。崩壊過程はまず斜面底部が斜面前方へ抜けるように崩れ、水平なすべり

面が生じる。このすべり面を第一すべり面と定義する。その後、斜面上部が崩落し斜面に平行なすべり面が生じる。このすべり面を第二すべり面と定義する。なお、同振幅で振動数 3Hz の試験体においても同様の崩れ方であった。

図-3 に傾斜角 60° 、振幅 10mm、振動数 6Hz で振動させた場合の模擬斜面の崩壊の様子を示す。この場合もまず斜面底部が大きく水平方向にずれ、その後、上部が崩落した。模擬斜面には斜面に平行な複数のすべり面が確認でき、全体的に流れるように崩れている。同振幅で振動数 5Hz の場合も同様の崩れ方であった。

傾斜角 30° の模擬斜面はまだ十分な実験が行えていないが、傾斜角 60° の場合と同様の傾向が伺える。すなわち、破壊形式は先に斜面底部が崩れることで上部も崩落してくるという形式である。この結果より、斜面崩壊のメカニズムを以下のように仮定した。

1. 揺れ戻しの際に斜面全体に慣性力が作用する。
2. 斜面表層部が自身および内部の慣性力を負担する。
3. せん断力が最大となる斜面底部が荷重に耐えられなくなり、斜面前方へ変位する。
4. 安定性を欠いた斜面上部が続いて崩落する。

なお、すべり面が生じる深さは斜面に作用する慣性力に影響する。すなわち加速度の大きさに密接な関係があるように伺える。また、振幅が大きい場合は斜面底部の方が前方へ飛ばされ易く、振幅が小さい場合は斜面上部の方が前方へ飛ばされ易い。これに関しては振動数も関係しており、斜面の固有振動数が問題になってくると考えられる。

5. 解析結果

図-4 に傾斜角 60° 、振幅 25mm、振動数 4Hz での振動実験を数値解析により再現した変位ベクトルを示す（図-2 の再現）。なお、変位が生じた間の経過時間は $\Delta t = 0.016$ 秒であるが、今回はすべり面の出方にのみ着目し図-2 と図-4 を比較する。斜面底部から崩れ出す形式は一致したが、第二すべり面の位置が明らかに異なる。図-2 の実験様子では、水平深さ 16cm あったのに対し図-4 の解析では 3cm 程度しか出ていない。これは要素間に伝わる力の減衰が大きすぎるためと考えられるため、減衰マトリックスを調整する必要がある。

なお、傾斜角 30° の場合は、数値計算に成功していない状態である。要素数に問題があると考えられるため、要素数を減らして再度検討している。

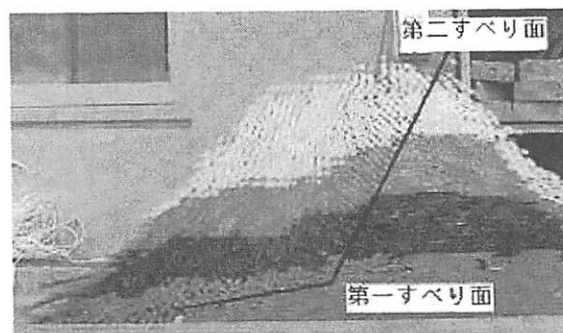


図-2 傾斜角 60° 振幅 25mm での崩壊様子

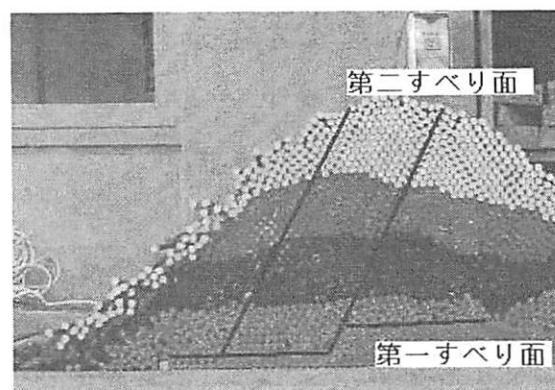


図-3 傾斜角 60° 振幅 10mm での崩壊様子

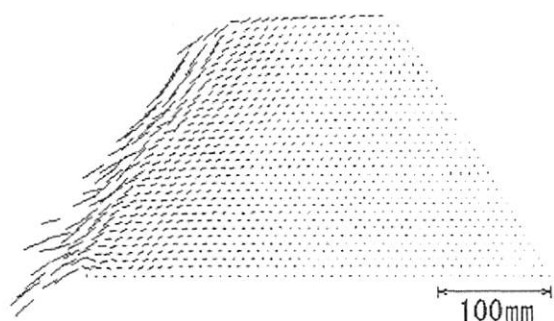


図-4 傾斜角 60° 振幅 25mm での変位ベクトル

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- ①斜面崩壊は斜面全体の慣性力を表層部が負担することにより、背面からの押し出しによって生じる。
- ②最大せん断力が生じる斜面底部で水平な第一すべり面が現れる。その直後に斜面上部が崩落し、斜面に平行な第二すべり面が現れる。
- ③振幅(振動数)の違いにより、斜面崩壊部の流れ出し方が異なる。

今後、次の項目について検討を行う。

- ①第二すべり面の深さと加速度の関係を検討する。
- ②振幅または振動数と斜面崩壊部の流れ出し方について検討する。
- ③解析プログラムの改良を行う。