

長大斜面の三次元すべり破壊特性に関する遠心模型実験

Centrifuge Tests on Three-dimensional Sliding Failures of High Earthfill with Long Slopes

成田国朝* 奥村哲夫*

Kunitomo Narita and Tetsuo Okumura

ABSTRACT: Centrifuge model tests were performed in this study in order to investigate how three-dimensional sliding failures take place in high earthfills with long slopes. The spherical sliding planes were measured by using noodle-type reference strings embedded in the model, and the length, the width and the depth of the sliding bodies were compared by varying the width of valley in which earthfills are constructed. By using the measured sliding body, the difference between the three- and two-dimensional factors of safety was examined by using the conventional slice method.

1. はじめに

土質が均一で比較的単純な斜面の二次元的なすべり面形状は円弧と見なせることが多い。しかし、実際には山地の傾斜した基礎地盤の上に盛土をしたり、側方が拘束されている谷に盛土をするような三次元性の強い人工斜面がほとんどである。山地に造成される高盛土などにおいて、斜面部分が著しく長いものを長大斜面と呼ぶ。実際の斜面の破壊形状を調べると、例えばロックフィルダムや宅造高盛土においては、明らかに側方が拘束された、二次元とは異なる曲面状の崩壊が見られることが多い。

本研究では、遠心載荷実験装置を用いて、谷形状の基礎地盤上に構築される盛土斜面の崩壊実験を行い、三次元的なすべり面形状の観察を試みるとともに、谷形状の寸法がすべり領域の幅や深さに及ぼす影響を調べる。また、測定されたすべり面形状を用いて二次元及び三次元の斜面安定解析を行い、長大斜面の安定性評価について補足議論を行う。

なお、本研究は文部省科学研究費補助金（一般研究C、課題番号06650551）の援助を受けた研究であることを付記し、ここに謝意を表する。

2. 実験概要

本学に設置されているビーム型遠心載荷実験装置の諸元を表1に整理した。

表1 遠心載荷実験装置

項目	性能
有効半径	1360 mm
最大遠心加速度	200 G (75kg搭載時)
最大搭載質量	200 kg (75G加速時)
容量	15 G-ton
載荷スペース	W660×D500×H770

模型地盤の作製には、図1に示すような厚さ15mmのアルミ板で組立られた土槽を使用した。(b)の正面図における谷勾配 α と谷幅B、及び(c)の側面図における基礎地盤勾配 i は可変としている。(c)に示したように、底面が傾斜した谷形状の基礎地盤上に傾斜角 β の盛土を作製した後、前面に設置した壁を左方に移動させて強制的に斜面崩壊を起こし、標点計測によりすべり面形状を観測する。具体的な実験手順・内容を以下に整理する。

* 愛知工業大学土木工学科（豊田市）

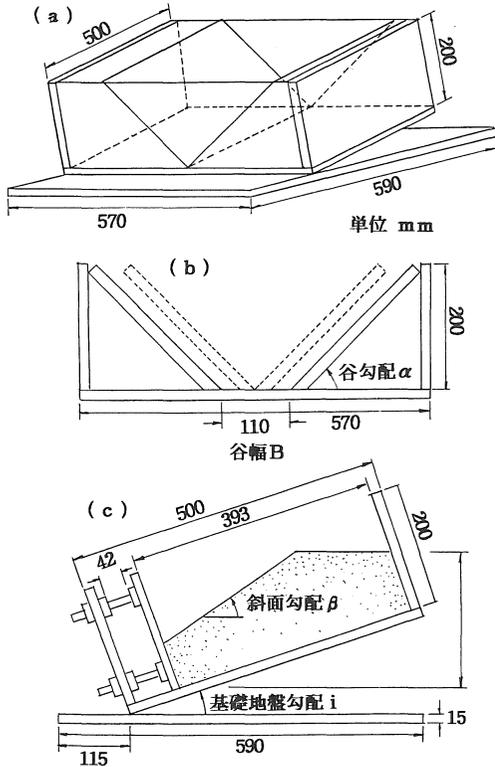


図1 模型土槽

●試料：今回実験に使用した試料は、シルト質砂に属し、その物理的性質は表2の通りである。

表2 試料の物理的性質

最大粒径 d_{max}	4.75 mm
平均粒径 d_{50}	0.32 mm
土粒子密度 ρ_s	2.67 g/cm ³
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	1.87 g/cm ³
最適含水比 w_{opt}	13.8 %

●模型盛土の作製：実験土槽を所定の形状に組み立てたのち、約3cm厚の水平土層を下から順次積み上げて合計7層の盛土を作製する。土槽組立に際し、谷部の傾斜した基礎地盤の表面にはサンドペーパーを貼り、盛土との接触条件を粗にする。各層では所定の密度 ($\rho_d=1.25\text{g/cm}^3$, 締め固めD値約67%)を満足するように試料を突き棒で一様に締め固め、表面を水平に均してすべり面観測用の素麺を2cm間隔

で埋設する。以上の水平盛土が完成した後、へらや真空ポンプを使用して余分な砂を削り取って斜面部を作製し、整形した斜面部と天端の水平部に変形観測用の標点を4cm間隔で設置する。最後に、模型の寸法と重量を計測し、密度確認を行う。

●実験手順：模型盛土を作製したら、土槽を遠心載荷装置のテーブルに固定し、遠心加速度を加える。所定の加速度に達したら、土槽前面に設置した壁を一定速度 (1.5mm/分) で移動して盛土を強制的にすべらせ、約20mm移動した時点で停止して終了とする。実験終了後、盛土の斜面・水平部の標点位置を計測し、表面の沈下とすべり領域の観測を行う。また、盛土を天端表面から順次切り出し、すべり面で切断された素麺の位置を測定して、内部の破壊形状を観測する。

●実験内容：本文では、下記の条件は固定として、谷の幅Bを $B=0, 5.5, 11.0\text{cm}$ に変えて行った3ケースの実験結果を報告する。

谷勾配 $\alpha = 45^\circ$

基礎地盤勾配 $i = 18.4^\circ (1 : 3.0)$

盛土斜面勾配 $\beta = 33.7^\circ (1 : 1.5)$

遠心加速度 $n = 40 (\times G)$

なお、模型盛土の密度は $\rho_d=1.25\sim 1.28\text{g/cm}^3$ の範囲であり、均質性は保たれたと考えている。

3. 実験結果

今回実験を行った盛土は、谷の最下端から天端までの鉛直高H (盛土高) が、模型寸法で約22.5cmであるから、 $n=40$ の遠心加速度場では約9mの実物盛土を対象としていることになる。

図2(a)~(c)は、 $B=0, 5.5, 11.0\text{cm}$ のそれぞれの実験で測定された標点及び素麺位置データを用いて、すべり面形状を上から平面的に見た図を描いたものである。また図3は、谷の中心断面で側面から観察されるすべり面形状を3つケースに対して重ねて描き、比較したものである。全体的な傾向として、谷幅Bが狭いと盛土底部で基礎地盤との接触部まで含めて相対的に幅広くすべる様子が見られる。また、谷幅が広くなるに従って斜面表面に現れる亀裂の位置が高くなり、かつ内部すべり面が深く現れることが知れる。すなわち、谷幅が広くなるほど側方からの拘束効果が薄れるので、すべり破壊の規模が大きくなる傾向が示唆される。

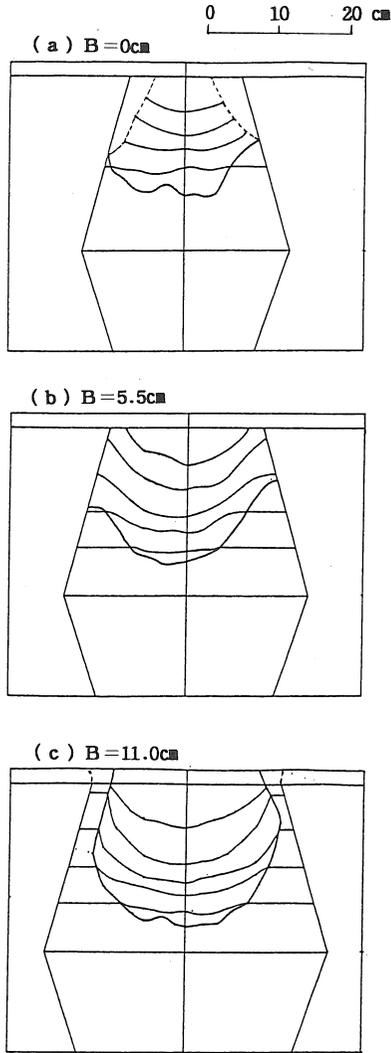


図2 すべり面形状 (平面図)

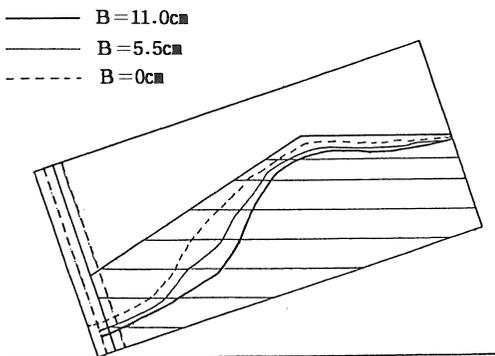


図3 すべり面 (側面図)

以上の特性を数値的に確認するために、斜面表面からすべり面に至る最大深さ d と、移動壁から亀裂が観察された位置までの水平長さ s を図4のように定義し、斜面高さ $H=22.5\text{cm}$ で正規化した値を整理すると表3を得る。谷幅の増大に伴って僅かながらすべりの規模が大きくなる傾向が読みとれる。

表3 谷幅とすべり土塊寸法

B (cm)	d/H	s/H
0	0.28	0.68
5.5	0.33	0.75
11.0	0.37	0.80

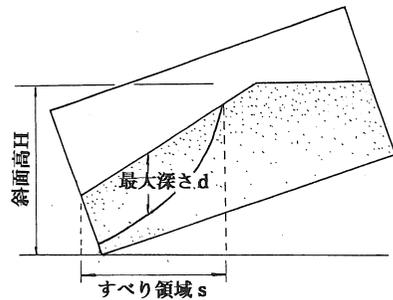


図4 すべり面形状

4. 安定解析に基づく検討

模型実験で観測されたすべり面を回転体と仮定し、すべりの回転軸方向に x 軸、これと直交するすべり方向に y 軸、深さ方向に z 軸を設定し、曲面状のすべり土塊を図5のように地表面で $(\Delta x \times \Delta y)$ の

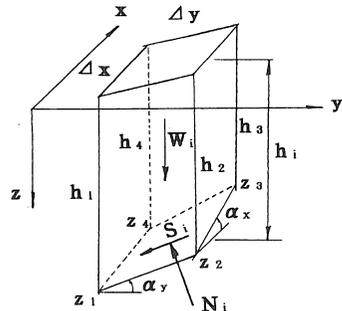


図5 分割土柱

辺長を有する微小な角柱体の土柱に分割する。土柱底面(すべり面)の測量から4辺長 $h_1 \sim h_4$ と4点の z 座標 $z_1 \sim z_4$ が決まり、すべり面の幾何学的条件を規定する各諸量が以下のように定まる。

①土柱重量: $W_i = \gamma h_i \Delta x \Delta y$

$$h_i = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4}$$

②すべり面の傾き (α_x, α_y)

$$\tan \alpha_x = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z_4 + z_3 - z_2 - z_1}{2 \Delta x}$$

$$\tan \alpha_y = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{z_4 + z_2 - z_3 - z_1}{2 \Delta y}$$

③すべり面の法線の方向余弦 (l, m, n)

$$l = -\frac{\tan \alpha_x}{\lambda_i}, \quad m = -\frac{\tan \alpha_y}{\lambda_i}, \quad n = \frac{1}{\lambda_i}$$

$$\text{ただし, } \lambda_i = \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_x + \tan^2 \alpha_y}$$

④土柱の底面積: $\Delta A_i = \lambda_i \Delta x \Delta y$

さて、三次元安定解析における簡便分割法の誘導より¹⁾、すべり面上に働く垂直力 N_i は

$$N_i = W_i / \lambda_i$$

で与えられるから、同面上で発揮されるせん断抵抗力 S_i は、砂斜面($c=0$)に対して

$$S_i = N_i \tan \phi = W_i \tan \phi / \lambda_i$$

となる。観測された曲面状のすべり面を1つの回転軸に対する(x 方向の)同心円の集合として近似し、これを更に y 方向に分割して各土柱の諸量を計算し、土塊のモーメントつり合いから(回転軸から各土柱底面に至る半径を r_i 、水平距離を y_i として)

$$F_3 = \frac{\sum r_i S_i}{\sum W_i y_i} = \frac{\tan \phi \sum r_i W_i / \lambda_i}{\sum W_i y_i}$$

より三次元の安全率 F_3 が定まる。

一方、谷の中心断面において観測されたすべり面を円弧と仮定し、これを鉛直帯片に分割して簡便分割法を適用すると、二次元の安全率 F_2 は(帯片重量を W_i 、すべり面の傾角を θ_i として)

$$F_2 = \frac{\tan \phi \sum W_i \cos \theta_i}{\sum W_i \sin \theta_i}$$

で与えられる。

表4 安全率比較

B (cm)	F_3	F_2	F_3/F_2
0	2.72	1.21	2.25
5.5	2.24	1.17	1.91
11.0	1.58	1.10	1.44

表4は3ケースの実験結果について、試料砂の摩擦角を $\phi = 35^\circ$ と仮定して、上記の F_3 と F_2 を計算比較したものである。側方からの拘束効果を考慮した F_3 の方が F_2 より大きくなる一般的な傾向が見られると同時に、谷幅の拡大に伴って拘束効果が相対的に薄れるため F_3 が F_2 に漸近する特性が認められる。

5. おわりに

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 遠心実験においては、谷幅が広がるほど側方からの拘束効果が薄れるので、すべり破壊の規模(深さや長さ)が大きくなる傾向が見られた。
- (2) 実験で観測されたすべり面を用いた斜面安定解析でも上記の傾向が確認され、谷幅の拡大に伴って拘束効果が相対的に薄れて F_3 が F_2 に漸近する特性が認められた。

本文は長大斜面の三次元安定性に関する一連の実験研究の一部を速報的に報告したものであり、今後は実験ケース数を増やして種々の要因の影響を系統的に調べると同時に、計測精度の向上を図って収斂したいと考えている。

【参考文献】

- 1) K. Narita & H. Yamaguchi, Three-dimensional Bearing Capacity Analysis of Foundations by use of a Method of Slices, Soils & Foundations, Vol. 32, No. 4, pp.143-155, 1992.

(受理 平成8年3月19日)