

1. はじめに

斜面对策工の設計には極限平衡法に準拠した設計方法が用いられるが、簡便で現実的な解を与える一方、斜面崩壊の詳細なメカニズムや対策工と地盤の相互作用を十分に考慮できない問題点がある。そこで既往の研究において、斜面崩壊の詳細なメカニズムや、対策工と地盤の相互作用を適切に考慮可能となる剛塑性有限要素解析手法を構築した。本研究では、その妥当性を『中間土で構成した斜面模型による上載圧載荷実験』によって検証した。

2. 中間土で構成した斜面模型による上載圧載荷実験

2.1 実験概要, 実験ケース

本解析手法の妥当性を検証するため、模型実験を行った。図1に実験装置概要を示し、実験ケースを表1に示す。

高さ300 mm, 奥行き385 mm, 上底225 mm, 下底400 mmのモデルを締め度70%で作成した。実験材料には豊浦砂6号：藤森粘土 = 3:1を用いた。また、使用した対策工は、手に入り易く加工が容易であり、比較的剛性を有する中空アルミパイプを使用した。対策工の周面にはスプレー糊により、6号砂を塗布した。用いた対策工の径は5 mmと3 mmの2種類とし、対策工の位置は既往の研究から、補強効果が最も発揮されると考えられる底面から200 mmの位置に設置した。そしてモデル側面には、画像解析を行うため、50 mm間隔でメッシュを作製した。

実験方法として、模型地盤に対し、天端部の斜面側の法面前半分に、載荷装置で鉛直方向に載荷した。荷重はロードセルにより測定し、載荷板左右2点で接触式変位計により変位量を測定した。また今回実験方法を、地盤調査法<sup>2)</sup>の平板載荷試験を参考にした。すなわち、載荷速度については、スピードを変えての実験結果に変化はないと考えられるため、載荷速度を0.1 mm/secとし、ロードセルと載荷板の継ぎ目には球座軸を設け、地盤の変形に軸が追従できる様にしている。また実験中は、地盤の変形の様子を画像解析するため、観測窓からビデオカメラにより撮影を行った。

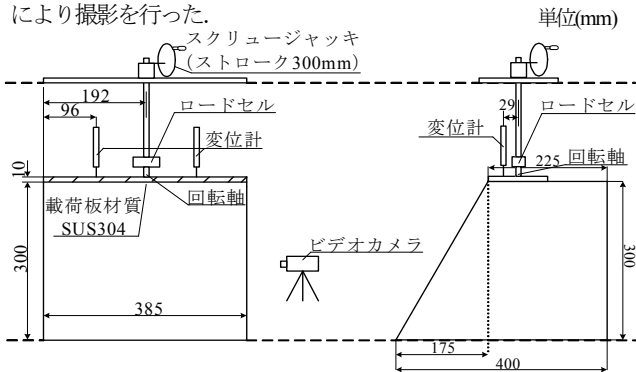


図1 実験装置概要

表1 実験ケース

Case	内容
1	無補強 (対策工なし)
2	補強斜面 ( $\phi = 5 \text{ mm}$ , $l = 235 \text{ mm}$ , 2本)
3	補強斜面 ( $\phi = 5 \text{ mm}$ , $l = 235 \text{ mm}$ , 4本)
4	補強斜面 ( $\phi = 5 \text{ mm}$ , $l = 150 \text{ mm}$ , 4本)
5	補強斜面 ( $\phi = 3 \text{ mm}$ , $l = 235 \text{ mm}$ , 2本)

2.2 極限支持力の推定

実験の結果、無補強斜面を除いて、明確な極限支持力が得られず、荷重が上昇し続ける結果となった。そこで地盤調査法における「地盤の平板載荷試験」を参考とし、極限支持力の推定を行った。図2に示す様に領域aの付近にてグラフの勾配が大幅に変化している。b領域における全ケースの破壊モードは天端部先端で小規模破壊が発生している。この小規模破壊が発生した原因は載荷装置が前後に移動しないことから起こるパンチ破壊の様なものだと考えられ、モデル全体における破壊とは考えにくい。そこで明確な斜面全体の極限支持力を推定するため、地盤調査法<sup>2)</sup>における「沈下量50 mm以内でlog p-s曲線で沈下軸とほぼ平行となる荷重を極限支持力とする」を参考とした。その結果、無補強斜面を除く全ケースにおいて左右両端の平均変位が25 mmの時点で、ほぼ平行となる結果となっており、その時点の荷重を極限支持力とした。また、無補強斜面では変位レベル約20 mmの地点において、ピーク荷重が得られたため、ピーク荷重を極限支持力とした。

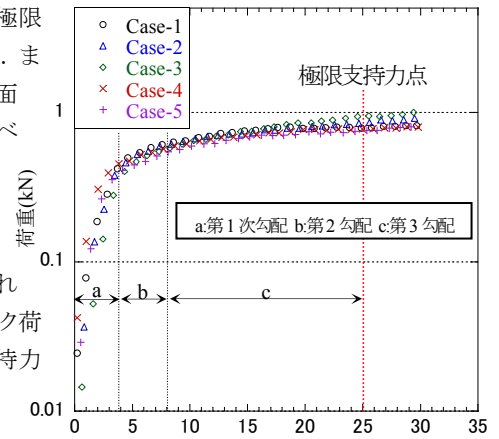


図2 荷重変位関係

2.3 実験結果

表2に実験結果を示す。計5ケースの実験を行った。実験の結果、Case1, 2, 3で対策工の本数増加による補強効果が確認された。次にCase1, 3, 4で対策工の長さの変化による補強効果を確認すると、Case4に比べCase3において強度が増加していることから、対策工の長さによる強度が確認されたが、Case4では補強効果が確認されないといった結果となった。これはCase4において対策工の長さが、すべり破壊を起こしたとされる位置よりも短かったため、補強効果が出なかったと考えられる。また、Case1, 2, 5において、対策工の径の変化による補強効果の検討を行った。Case2では補強効果が確認されるのに対し、Case5ではCase1と比較しても、殆ど補強効果が出ない結果となった。これは対策工の径が小さかったために、対策工周辺地盤との付着力がとれず、補強効果が確認されなかったためだと考えられる。詳細は3.3にて述べる。

表2 実験結果

Case	内容	鉛直変位 (mm)	極限支持力 (kN)
1	無補強 (対策工なし)	19.95	0.81
2	補強斜面 ( $\phi = 5 \text{ mm}$ , $l = 235 \text{ mm}$ , 2本)	25.01	0.86
3	補強斜面 ( $\phi = 5 \text{ mm}$ , $l = 235 \text{ mm}$ , 4本)	24.99	0.94
4	補強斜面 ( $\phi = 5 \text{ mm}$ , $l = 150 \text{ mm}$ , 4本)	25.04	0.77
5	補強斜面 ( $\phi = 3 \text{ mm}$ , $l = 235 \text{ mm}$ , 2本)	24.97	0.78

### 3. 剛塑性有限要素解析 (RPFEM)

#### 3.1 解析メッシュ

解析メッシュを図3に示す。形状寸法は2.1で行った実験モデルと同形状のものを作成した。また、地盤と載荷板の継ぎ目において、ひずみ集中を避けるための特異点を設け、解析ケースは表1に示すように、実験と同様な条件で全5ケース行っている。

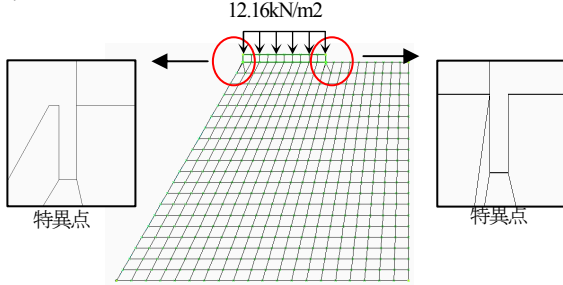


図3 解析メッシュ

#### 3.2 解析条件

解析条件を表3に示す。模型地盤の粘着力は無補強斜面に対する極限支持力に一致するように逆算して求めた。載荷板は模型地盤に対し十分に剛であるため、せん断抵抗角 $\phi = 0.1^\circ$ 、粘着力 $c = 5000 \text{ kPa}$ と仮定した。荷重は、前章の実験で得られた無補強斜面の極限支持力を載荷板面積で除した値、 $12.16 \text{ kNm}^2$ を用いた。また、対策工は径 $3 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm}$ において軸降伏応力 $N$ 、降伏曲げモーメント $M_y$ を求めた。

表3 解析条件

模型地盤	せん断抵抗角 $\phi$	$34.0^\circ$
	粘着力 $c$	$0.8 \text{ kPa}$
	単位体積重量 $\gamma t$	$15.0 \text{ kN/m}^3$
載荷板	せん断抵抗角 $\phi$	$0.1^\circ$
	粘着力 $c$	$5000 \text{ kPa}$
荷重	無補強斜面の極限荷重	$12.16 \text{ kN/m}^2$
対策工 (径 $5 \text{ mm}$ )	長さ	$150 \text{ mm}$ or $235 \text{ mm}$
	弾性係数	$6.67\text{E}+07 \text{ N/mm}^2$
	降伏応力 (0.2%耐力) $\sigma_y$	$4.00\text{E}+04 \text{ kNm}$
	軸降伏応力 $N$	$0.51 \text{ kN}$
対策工 (径 $3 \text{ mm}$ )	長さ	$235 \text{ mm}$
	弾性係数	$6.67\text{E}+07 \text{ N/mm}^2$
	降伏応力 (0.2%耐力) $\sigma_y$	$4.00\text{E}+04 \text{ kNm}$
	軸降伏応力 $N$	$0.16 \text{ kN}$
対策工 (径 $3 \text{ mm}$ )	降伏曲げモーメント $M_y$	$4.27\text{E}+04 \text{ kNm}$
	降伏曲げモーメント $M_y$	$8.52\text{E}-05 \text{ kNm}$

#### 3.3 解析結果と解析手法の妥当性の検証

剛塑性解析結果と模型実験結果を、①破壊形態、②極限支持力の視点から比較し、解析手法の妥当性の検証を行う。

##### ①破壊形態における比較

各ケースにおける解析結果を実験結果と合わせて図4に示す。左図がせん断ひずみ分布 (実験結果)、右図が塑性ひずみ速度分布 (解析結果) である。また、解析結果は極限支持力時の塑性ひずみ速度分布図を示し、実験結果のひずみ分布は、変位レベル $25 \text{ mm}$ の極限支持力時のひずみ分布を示している。その結果、実験結果、解析結果共に全ケースにおいて天端部先端と法尻部にひずみが集中する結果となった。また、実験結果については各ケースの破壊域に差があったものの、解析結果にはそのような傾向はみられなかった。しかし、Case1, 2, 3において、対策工の本数が増加するにつれ、斜面中腹部の塑性ひずみが減少しているのが確認される。よって解析結果において、対策工

の本数増加における補強効果は確認されるものの、実験のような破壊形態の変化 (滑り面の変化) は確認されない結果となった。また、Case4, 5においては、無補強状態のCase1に比べ、塑性ひずみ分布が減少する結果となり補強効果が確認された。ここではスペースの関係上、コンター図を省略する。

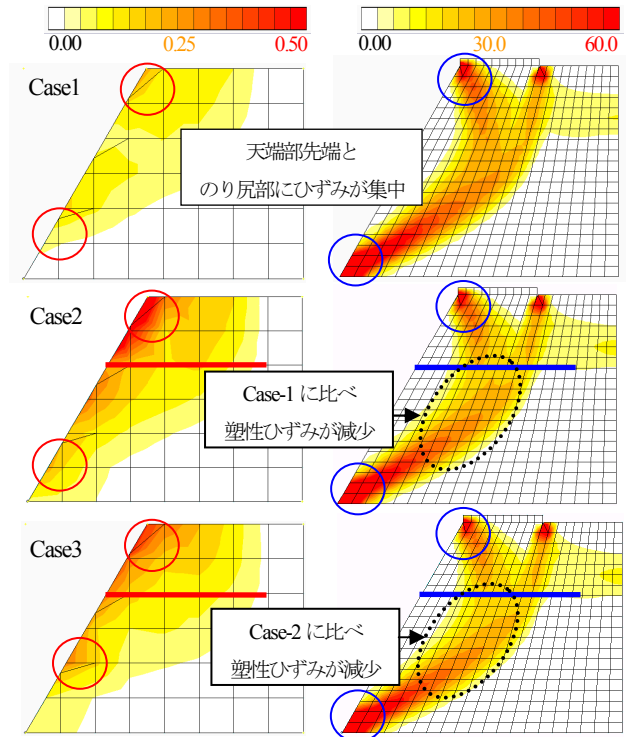


図4 左図：せん断ひずみ分布 右図：塑性ひずみ速度分布

##### ②極限支持力における比較

次に極限支持力の視点での比較を行う。表4に解析結果、実験結果の極限支持力を示す。まず、解析結果、実験結果共にCase2, 3で対策工の本数増加に伴う補強効果が確認される。しかし、Case4, 5においては解析結果ではCase1 (無補強) と比べ、若干ながら対策工の本数増加に伴う補強効果が確認されるが、実験結果では強度が減少する結果となった。これは主に実験方法に原因があると考えられ、対策工の形状や設置方法により補強効果が得られなかったと考えられる。特に対策工の周面摩擦効果による補強効果への影響は大きいと考えられ、今後、主に実験方法を改善することで、対策を講じる必要がある。

表4 極限支持力についての実験結果と解析結果の比較

Case	内容	実験結果 (kN)	解析結果 (kN)
1	無補強 (対策工なし)	0.81	0.81
2	補強斜面 ( $\phi = 5 \text{ mm}$ , $l = 235 \text{ mm}$ , 2本)	0.86	0.93
3	補強斜面 ( $\phi = 5 \text{ mm}$ , $l = 235 \text{ mm}$ , 4本)	0.94	1.00
4	補強斜面 ( $\phi = 5 \text{ mm}$ , $l = 150 \text{ mm}$ , 4本)	0.77	0.93
5	補強斜面 ( $\phi = 3 \text{ mm}$ , $l = 235 \text{ mm}$ , 2本)	0.78	0.83

### 4. まとめ

補強土工法を対象に剛塑性有限要素法による解析と模型実験を行い、本解析手法の妥当性を検証した。以下に得た知見を示す。

- ①実験結果、解析結果共に天端部先端、法尻部にひずみが集中。
- ②実験結果、解析結果共に対策工の本数増加に伴う補強効果有り。
- ③今後の課題として、実験結果の数ケース (Case4, Case5) において、主に実験計画を見直す必要がある。

参考文献 :1) 田中ら：第43回地盤工学研究発表会, pp.1527-1528, 2008.

2) 地盤工学会：地盤調査法, 1995.