

岩盤斜面の安定度評価に関する FEM 解析と遠心力模型実験の比較

Comparison between FEM analysis and centrifuge model test for stability evaluation of the rock slope

(独)土木研究所寒地土木研究所○正 員 日下部祐基(Yuki Kusakabe)
(独)土木研究所寒地土木研究所 正 員 伊東 佳彦(Yoshihiko Ito)
(独)土木研究所寒地土木研究所 阿南 修司(Shuji Anan)
豊橋技術科学大学 正 員 三浦 均也(Kinya Miura)

1. まえがき

数値解析により岩盤斜面の安定性を定量的に求める代表的な手法として、FEM 解析¹⁾が挙げられる。FEM 解析は、基本的に岩盤の応力や変形などの挙動を予測する手法であるが、解析の結果から斜面内の局所的な引張応力域あるいはせん断破壊領域の存在を確認することや、応力値をもとにした局所安全率の分布から崩落面を想定し、全体的な岩盤斜面の安定性を評価することにも用いられる。しかし、岩盤斜面については、この安定度評価法がどの程度の精度を有するかの検討が、あまりされていないのが現状である。

本研究では、背面亀裂やオーバーハングの深さ、岩体の引張強さを指標に岩盤斜面の安定性を簡便かつ定量的に評価する方法の検討として、岩盤模型に対する遠心力模型実験を実施している。これまでに、遠心力模型実験結果を用いて2次元および3次元極限平衡解析による簡易な安定度評価法²⁾³⁾を考案して報告した。ここでは、数値解析として多用されているFEM解析による岩盤斜面の安定度評価法の検証を、遠心力模型実験を用いて検討したので報告する。

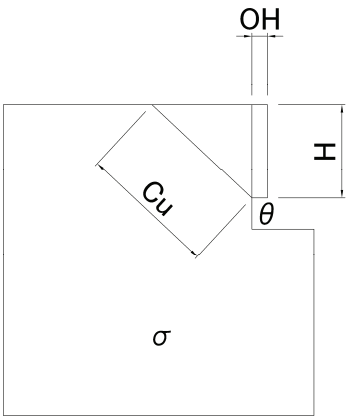
2. 解析モデルと実験条件

解析モデルは図-1に示すように、2次元岩盤崩落モデルとした。解析に用いた岩盤定数は、既存資料⁴⁾を参考に軟岩に分類される定数を用いた。表-1に解析に用いた岩盤定数を示す。FEM解析では、岩盤を弾塑性体として解析した。岩盤斜面の安全率 Fsa を求める方法は、過去の報告⁵⁾に詳細が示されているが、図-2に示すような局所安全率分布図を用いて安全率低下ラインを判読推定し、そのラインに沿って安全率算出用メッシュブロックを作成して、以下の式で加重平均することで求めた。

$$Fsa = \frac{\sum (\text{局所安全率 } F_s \times \text{メッシュブロック面積 } A)}{\sum (\text{メッシュブロック面積 } A)}$$

なお、解析法の違いによる比較を目的に、本研究で過去に提案した極限平衡解析を用いた安定度評価法でも安全率を求めた。

遠心力模型実験は、模型縮尺を1/70として図-3に示す形状寸法の模型供試体を作成した。(図は、遠心加速度方向を下向きにして、重力加速度方向と一致させて示している。) 供試体には、既存背面亀裂として所定長さ



σ : 岩体の強度 (表-1 参照)
 θ : 90°
 H : 突出部の高さ (垂直高さ) (m) = 30m
 Cu : 上部からの背面亀裂進展率 (%) = 50%
 OH : 突出量 (水平量) (m) = 10m

図-1 2次元岩盤崩落モデル

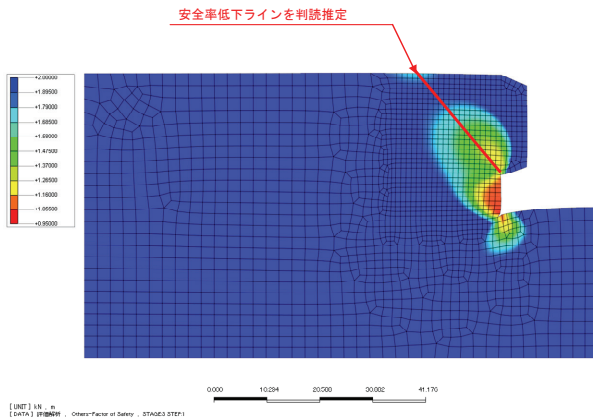
表-1 解析に用いた岩盤定数

ポアソン比 ν	ヤング率 $E(\text{MN/m}^2)$	単位体積重量 $\gamma_s(\text{MN/m}^3)$	粘着力 $c(\text{MN/m}^2)$
0.35	150	0.021	0.02

内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	一軸圧縮強度 $qu(\text{MN/m}^2)$	引張強度 $\sigma_s(\text{MN/m}^2)$
30.0	2.5	0.25

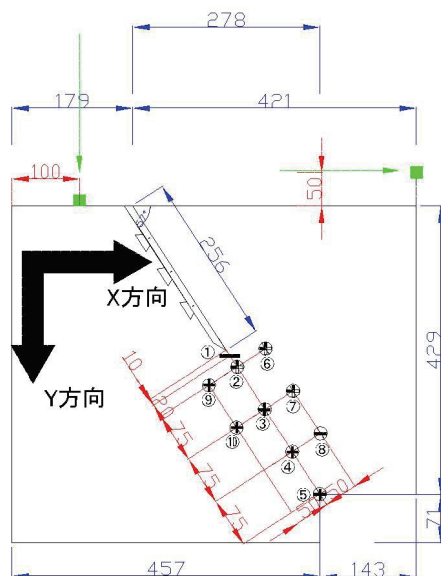
の塩ビ板を片面に剥離剤を塗布して埋め込み、その先端より発生することが予想される新たな進展亀裂の挙動を観測するためにひずみゲージ10点 (単軸ゲージ1枚、二軸ゲージ9枚) を貼付した。

模型供試体の材料は、予め配合決定したモルタルを用いた。モルタル配合に用いた目標強度は、遠心力载荷装置の最大遠心加速度100G以下で模型供試体が崩落する強度を想定して一軸圧縮強度 $qu=1.80\text{MN/m}^2$ とし、配合試験の結果から材料配合比をセメントC : 砂S : カオリン粘土N=1:4:1、水セメント比W/C=2.5とした。なお、セメントには実験工程を考慮して早強セメントを用いた。



図－２ FEM 解析による安全率算出法概念図

- ┃ 単軸ゲージ(30mm)
- ⊕ 二軸ゲージ(10mm)
- ① 単軸ゲージ(10mm)
- レーザー変位計
- ← レーザー変位計照射方向



図－３ 模型供試体の形状寸法

実験では、遠心载荷の過程で供試体に生じるひずみをひずみゲージで計測するほかに、CCD カメラにより亀裂の進展性状を確認した。遠心力の载荷方法は、想定崩落加速度の 70%までは 10G ステップ、それ以後は 5G ステップを基本として段階的に増加させ、クリープの影響を考慮して 1 ステップ 5 分間以上維持した。

また、ひずみの発生量が急増した場合には、遠心力を一定に保ってひずみがクリープ的に増加しないことを確認したのち、次の加速度段階に移行することとした。

実験後、岩盤模型の供試体からコア試料を採取して一軸圧縮試験、および圧裂引張試験を実施して力学特性を求めた。

表－２ 解析結果表

FEM解析安全率	極限平衡解析安全率
Fsa	Fsb
0.94	0.42

表－３ 遠心力模型実験結果表

崩落加速度 $n_f(G)$	岩盤模型の 引張強度 $\sigma_t (MN/m^2)$	岩盤模型の単位 体積重量 $\gamma_t (MN/m^3)$
45.0	0.20	0.018

岩盤模型の一軸 圧縮強度 $qu (MN/m^2)$	岩盤模型の 変形係数 $E_{50}(MN/m^2)$
1.64	1756

表－４ 換算崩落加速度表

模型縮尺 $1/n$	強度比 α	重量比 β	加速度計測 半径 $R_1 (m)$	模型重心 半径 $R_2 (m)$
1/70	0.80	0.86	3.50	3.11

FEM解析換算崩 落加速度 $n_{fa}(G)$	極限平衡解析換算 崩落加速度 $n_{fb}(G)$	遠心力模型実験実測 崩落加速度 $n_f(G)$
68.9	30.7	45.0

３．解析と実験結果の比較

３．１ 解析および実験結果

各解析による 2 次元岩盤崩落モデルの安全率は、FEM 解析の安全率 $Fsa=0.94$ 、極限平衡解析の安全率 $Fsb=0.42$ が得られた。(表－２)

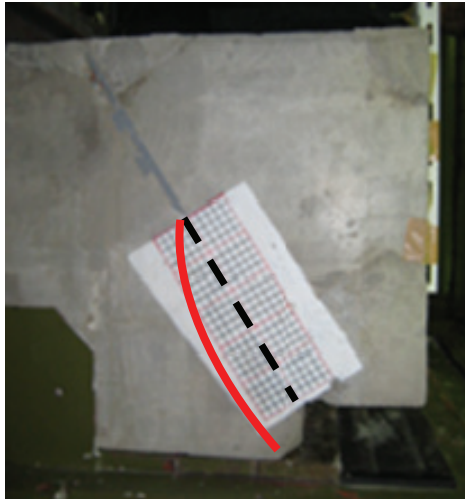
また、表－３には、遠心力模型実験結果による実測崩落加速度と模型供試体の実験後の強度試験結果を示した。

これらの結果を比較するために、各解析により求められた安全率 Fs を、以下の式を用いて遠心力模型実験で得られる模型供試体の崩落加速度に換算した。下式では、解析と実験の差異として、引張強度と単位体積重量および測定する遠心加速度の半径位置を補正している。

$$n_{fa,b} = \frac{\alpha}{\beta} n \cdot Fs \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

ここに、 $n_{fa,b}$ ：換算崩落加速度

α ：供試体の実測引張強度 σ_t と解析で用いた引張強度 σ_s の比 ($=\sigma_t/\sigma_s$)



実験前供試体



実験後供試体

図－４ 遠心力模型実験の模型供試体崩落状況

β : 供試体の単位体積重量 γ_t と解析に用いた岩盤斜面の単位体積重量 γ_s の比 ($=\gamma_t/\gamma_s$)

n : 模型縮尺の分母

R_1 : 遠心力模型実験で遠心加速度が計測されている半径 (m)

R_2 : 模型供試体の重心の遠心力装置中心からの半径 (m)

F_s : 解析で求められた安全率

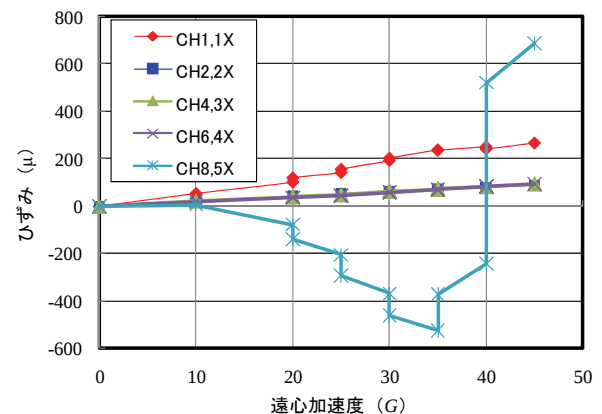
表－４には、計算に用いた各値と得られた換算崩落加速度を示した。なお、同表には比較のために遠心力模型実験による実測崩落加速度を再度示した。

3. 2 結果の比較と考察

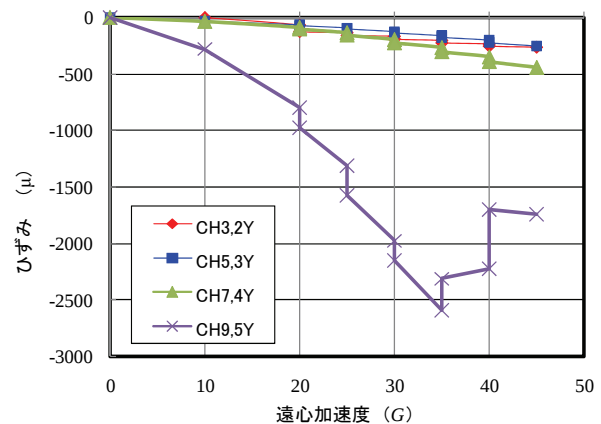
模型実験で得られた実測崩落加速度と各解析による換算崩落加速度を比較すると、FEM 解析では 1.5 倍の値、極限平衡解析では 0.7 倍の値を示している。また、実測崩落加速度との誤差を加速度比で示すと、FEM 解析では 53% になり、極限平衡解析では -32% となる。これらの値は安全率の倍率や誤差と等価である。これらの結果から、FEM 解析による評価法は危険側の安全率となり、極限平衡解析に比べて誤差が大きい結果になった。

FEM 解析による評価が危険側になった原因には、解析で用いている破壊強度の違いが考えられる。FEM 解析では c , ϕ を局所安全率の計算に用いてせん断強度を採用しているのに対して、実験で観察された形態は崩落部位が剥がれる引張破壊が観察されたことから、引張強度が対象になると推察される。また、今回用いた FEM 解析では、岩盤を弾塑性体としたことから、応力が破壊強度を超えるとそれ以上の応力を分散させて、局所安全率が 1.0 を大きく下回り難くなることの影響も考えられる。

誤差が大きくなった原因には、模型供試体の形状と拘束条件の違いが考えられる。FEM 解析では、固定された



図－５ X 軸方向ひずみ測定結果図



図－６ Y 軸方向ひずみ測定結果図

大きなブロックにノッチを形成しており、周辺が十分に固定された条件になっている。遠心力模型実験の供試体は、X、Y 軸方向とも完全に固定された条件になっていない。また、既存背面亀裂の強度が、解析数値と異なっていることも影響していると考えられる。

次に、模型供試体の崩落時に発生した進展亀裂面について考察する。

図—4 は、模型供試体の実験前後の崩落状況を示したものである。（写真は 90° 回転させて、遠心加速度方向を下向きにして重力加速度方向と一致させて示している。）各解析で想定した崩落時に発生する進展亀裂面は、実験前の供試体写真に破線で示したように既存背面亀裂の先端とオーバーハング深部の点を結んだ直線とした。しかし、実験で発生した進展亀裂面は実線で示したように解析の想定面より内側に生じている。

図—5、6 は、解析で想定した亀裂面に沿って遠心力模型実験で計測されたひずみの値を、X 軸方向と Y 軸方向に分けて示したものである。ここで注目されるひずみは、測点 No.5 の X,Y 方向ひずみ（図—5 CH8 と図—6 CH9）で、ひずみの変化傾向が遠心加速度 35G までは両ひずみとも圧縮(-)側に増加しているが、それ以降は圧縮ひずみが減少して 40G では X 方向ひずみが引張(+)側になっている。

これは、模型供試体に作用する応力が 35G までは、解析で想定した進展亀裂面に亀裂先端で引張応力が、オーバーハング深部の点で圧縮応力が発生して曲げモーメントが作用していることが推察される。しかし、35G 以降では、進展亀裂先端にも引張側に応力が作用するようになっていることから、応力分布が変化して崩落時に発生する進展亀裂面が供試体の内側に移動したことが推測される。この原因には、模型供試体の不均一性から解析で予想した進展亀裂面より内側に、強度の低い箇所が存在していたことなどが考えられる。

4. まとめ

- 1) FEM 解析による評価法は、遠心力模型実験の結果に対して危険側の安全率となり、極限平衡解析による評価法に比べて誤差が大きい結果になった。これらの原因には、解析で用いている破壊強度の違いや岩盤を弾塑性体とした影響、模型供試体の形状と拘束条件の違いなどが考えられた。
- 2) 模型供試体の崩落時に発生した進展亀裂面について考察した結果、崩落時に発生する進展亀裂面が応力分布の変化により、供試体の内側に移動したことが推測された。この原因には、模型供試体の不均一性から解析で予想した進展亀裂面より内側に、強度の低い箇所が存在していたことなどが考えられた。

5. あとがき

ここでは、FEM 解析による岩盤斜面の安定度評価について遠心力模型実験により適用性の検証を試みた。今回対象とした実験は1ケースのみであり、予備的な実験について考察したものであることから、得られた成果についてはさらに検討が必要と考える。FEM 解析は、進展亀裂

の進行に伴う応力分布の変化を解析することができることから、岩盤斜面が崩壊に至るまでの過程を再現できる可能性がある。今後、実験条件を変えた遠心力模型実験を行って、詳細な検討を加えたいと考えている。

なお、本論をまとめるにあたり、遠心力模型実験に関連して（株）ケイジーエンジニアリング 只野 暁氏に、およびFEM解析に関連しては（株）ダイヤコンサルタン ト北海道支社 吉田 力氏にご協力いただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測，pp.131-166，1994.
- 2) 日下部祐基，三浦均也，伊東佳彦，表真也：遠心力模型実験と2次元極限平衡解析を用いた岩盤斜面の簡易安定度評価法，平成 21 年度土木学会北海道支部論文報告集 第 66 号，C-2，2010.
- 3) 日下部祐基，伊東佳彦，表真也，三浦均也：オーバーハングを有する岩盤斜面の安定度評価のための3次元極限平衡解析ソフトの開発，寒地土木研究所月報，No.681，pp21-32，2010.
- 4) 日本道路公団試験研究所：トンネルの標準設計に関する研究報告書—数値解析と施工実績の分析—，1986.
- 5) 日外勝仁，日下部祐基，伊東佳彦：火山岩地域における岩盤斜面の安定性評価に関する一考察（その3），第 45 回地盤工学会研究発表会平成 22 年度講演集 pp1795-1796，2010.