

せん断強度低減法におけるメッシュサイズ の違いと安全率

解析技術部 岩崎 幹央

1. はじめに

せん断強度低減法は、FEMを用いて斜面安定問題や支持力問題の全体安全率を評価する手法である。しかし、それにより求められる全体安全率は、FEMのメッシュの切り方に依存すると言われている。

本研究では、FEM解析におけるメッシュサイズにより全体安全率がどのように異なるかを調べた。

1.1 せん断強度低減法による安全率の算出

まず、斜面安全率 F_s は式(1)により求められ、式(2)のように項を入れ替えてできる $1/F_s$ を低減率と呼ぶ。

$$F_s = \frac{R}{S} \quad (1) \quad \rightarrow \quad S = \frac{1}{F_s} R \quad (2)$$

ここに、 F_s : 斜面安全率、 $1/F_s$: 低減率
 S : 滑動力、 R : 抵抗力

式(2)において $F_s=0.10$ のように小さな F_s を与えることで本来の R の10倍のせん断強度を地盤に見込んだこととなり、実質的に地盤は破壊しない。ここから段階的に F_s の値を増加させる（地盤のせん断強度を徐々に低下させる）ことで、斜面の潜在的に弱い部分から塑性化が始まる。地盤内の塑性域が斜面上部から末端までつながるすべり面が完成し、すべりが生じたと判断すれば、そのときの値が斜面安全率 F_s となる。

2. 基準モデルによる比較

2.1 モデルの設定と円弧すべり法の結果

斜面形状（図-1）と物性値（表-1）を設定し、そのモデルにおける円弧すべり法による計算を行い、その際の最小安全率と円弧を求めた（図-2）。

表-1 地盤物性値

単位体積重量 γ (kN/m ³)	内部摩擦角 φ (度)	粘着力 C (kN/m ²)
16	25	6

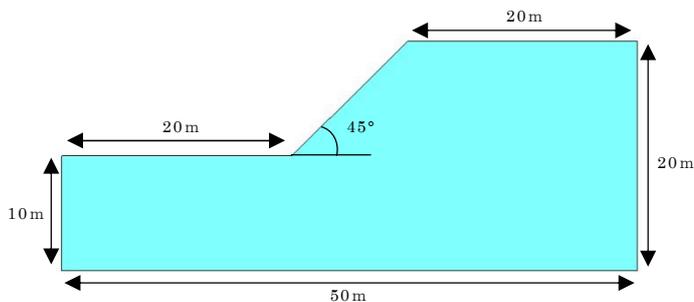


図-1 モデル図

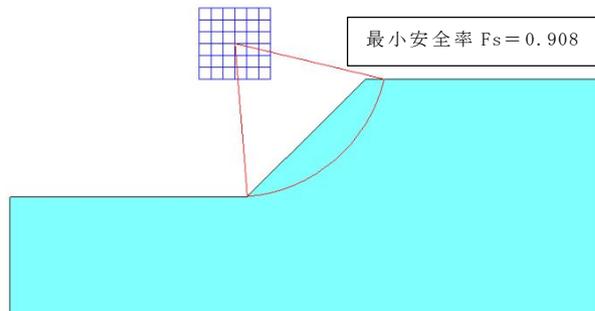


図-2 円弧すべり計算の結果

2.2 メッシュサイズ

メッシュサイズは下記の3ケースとした。メッシュ図を図-3~5に示す。

- ① 1.0m × 1.0m
- ② 0.5m × 0.5m
- ③ 0.1m × 0.1m

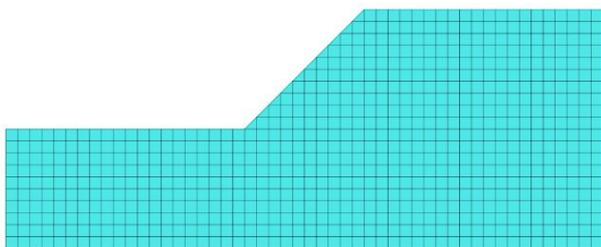


図-3 ①1.0m × 1.0m のメッシュ

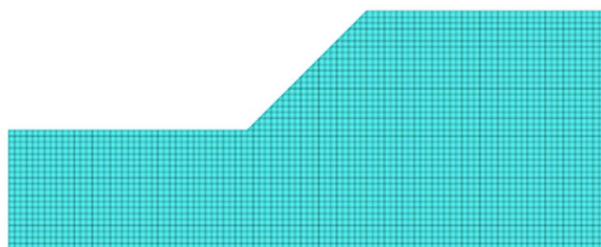


図-4 ②0.5m × 0.5m のメッシュ

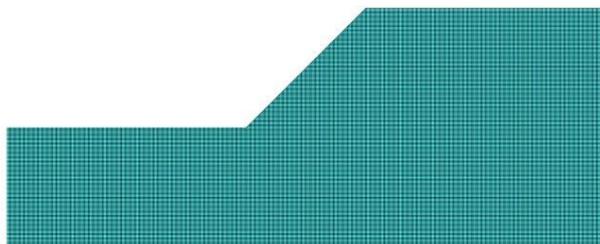


図-5 ③0.1m × 0.1m のメッシュ

2.3 せん断強度低減法の結果

せん断強度低減法の結果における各ケースの安全率を表-2に、最大せん断ひずみ分布を図-6~8に示す。

表-2よりメッシュサイズを小さくするほど円弧すべり法の結果に近づくことがわかる。また、最大せん断ひずみの領域もメッシュサイズを小さくするほど円弧すべり法の円弧に近づき、メッシュサイズを大きくするほど領域が大きくなり、どの位置で円弧すべりが発生しているかがわかりにくい結果となった。

表-2 各ケースの安全率 F_s

解析ケース	F_s
①1.0m × 1.0m	1.125
②0.5m × 0.5m	1.064
③0.1m × 0.1m	1.006
円弧すべり法	0.908

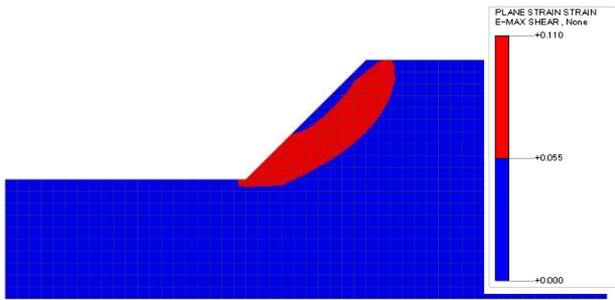


図-6 ①1.0m×1.0mの最大せん断ひずみ図 (Fs=1.125)

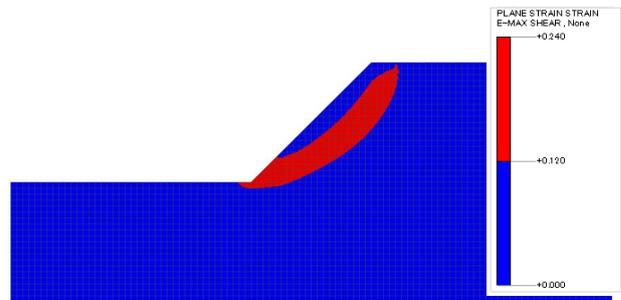


図-7 ②0.5m×0.5mの最大せん断ひずみ図 (Fs=1.064)

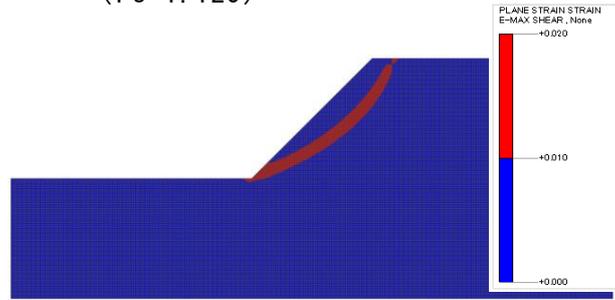


図-8 ③0.1m×0.1mの最大せん断ひずみ図 (Fs=1.006)

3. 切土補強土工法による比較

切土補強土工法とは、地山を削孔し、棒状補強材を多数挿入することにより、地山と補強材の相互作用によって切土法面全体の安定性を高める工法である。

基準モデルと同様のモデル形状に対して補強材を設置することで全体安全率がどのように異なるかを調べた。

3.1 モデルの設定と円弧すべり法の結果

設置する補強材の物性値（表-3）と基準モデルと同様の斜面形状と地盤物性値を設定し、そのモデルにおける円弧すべり法による計算を行い、その際の最小安全率と円弧を求めた（図-10）。

なお、補強材の周面摩擦抵抗力はせん断強度低減法の FEM 解析モデルと合わせるため補強材が引抜けないうような大きな値とした。

表-3 補強材の物性値

補強材傾角 α (度)	補強材径 d (m)	補強材長 L (m)	打設間隔 SH (m)
45	0.025	4.24	1.0

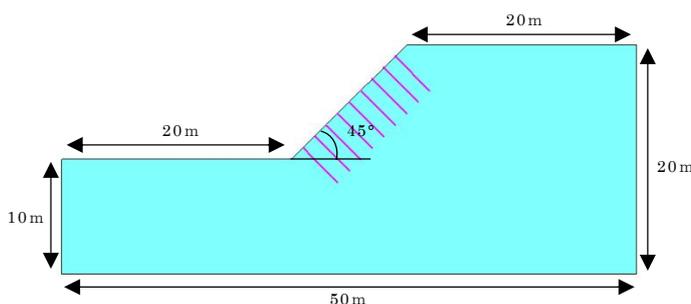


図-9 モデル図

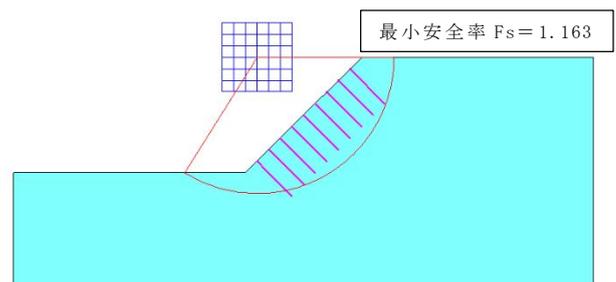


図-10 円弧すべり計算の結果

3.2 メッシュサイズと補強材物性値

メッシュサイズは基準モデルと同様とした。補強材を設置したメッシュ図を図-11～13 に示す。また、せん断強度低減法の FEM 解析に用いる補強材の物性値¹⁾²⁾を表-4 に示す。

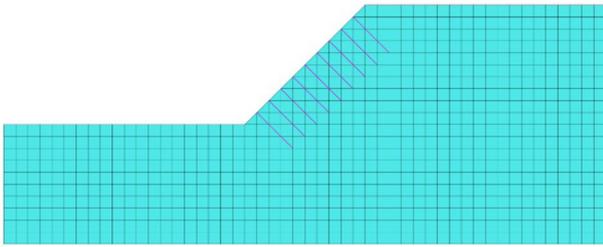


図-11 ①1.0m×1.0mのメッシュ

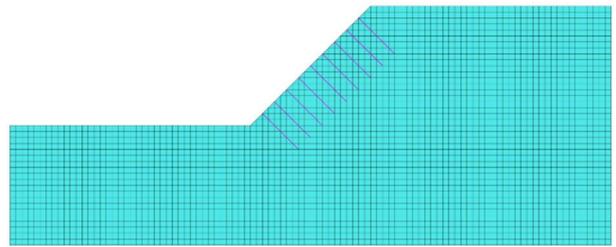


図-12 ②0.5m×0.5mのメッシュ

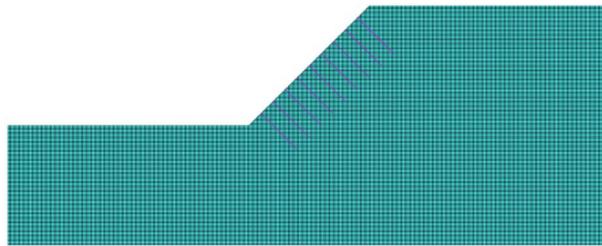


図-13 ③0.1m×0.1mのメッシュ

表-4 せん断強度低減法に用いる補強材の物性値¹⁾²⁾

単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 μ	弾性係数 E (kN/m ²)	補強材径 d (m)
77	0.3	200000000	0.025

3.3 せん断強度低減法の結果

せん断強度低減法の結果における各ケースの安全率を表-5 に、最大せん断ひずみ分布を図-14～16 に示す。

表-5 よりメッシュサイズを小さくするほど円弧すべり法の結果に近づくことがわかる。また、図-14, 15 より最大せん断ひずみの領域もメッシュサイズを小さくするほど円弧すべり法の円弧に近づき、メッシュサイズを大きくするほど領域が大きくなりどの位置で円弧すべりが発生しているかがわかりにくい結果となった。

しかし、図-16 のようにメッシュサイズをあまりにも小さくしてしまうと、意図するような最大せん断ひずみ領域は出力されなかった。

表-5 各ケースの安全率 F_s

解析ケース	F_s
①1.0m×1.0m	1.667
②0.5m×0.5m	1.531
③0.1m×0.1m	1.356
円弧すべり法	1.163

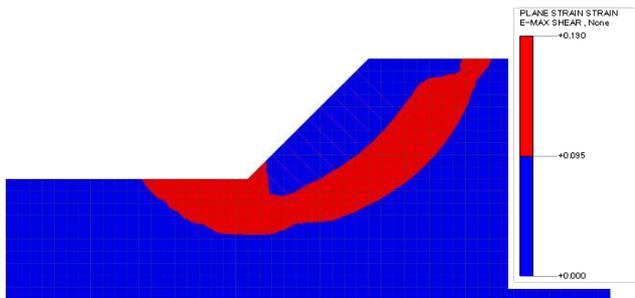


図-14 ①1.0m×1.0mの最大せん断ひずみ図
(Fs=1.667)

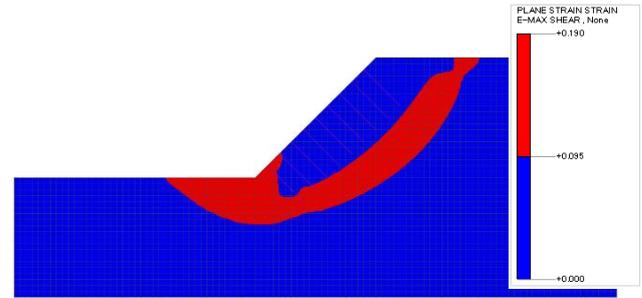


図-15 ②0.5m×0.5mの最大せん断ひずみ図
(Fs=1.531)

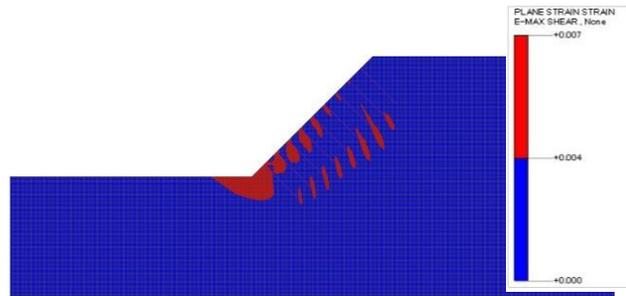


図-16 ③0.1m×0.1mの最大せん断ひずみ図 (Fs=1.356)

4. 切土補強土工法の補強材範囲の弾性化による比較

図-16のような意図しない最大せん断ひずみ領域が出力される場合の対処法として、補強材のある範囲の地盤を弾性に変更または $c-\phi$ を大きくすることで斜面全体で滑るよう設定することが挙げられる。本研究では弾性に変更し、結果の比較を行う。

4.1 補強材範囲の弾性化

図-17～19の赤点で示した要素を弾性化する。このとき弾性化させる範囲は、最大メッシュサイズの①1.0m×1.0mのメッシュに合わせる。

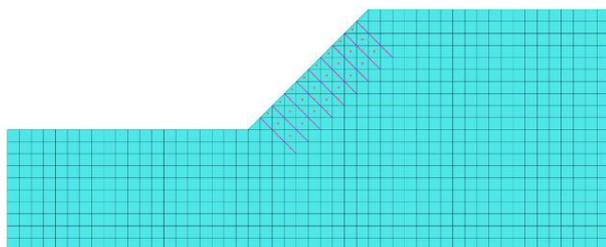


図-17 ①1.0m×1.0mのメッシュ

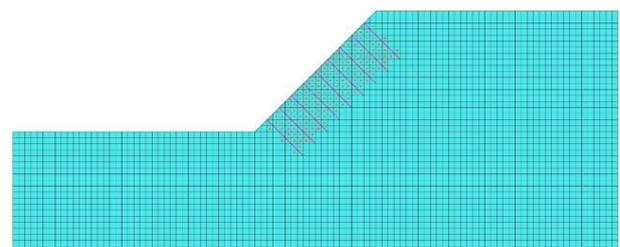


図-18 ②0.5m×0.5mのメッシュ

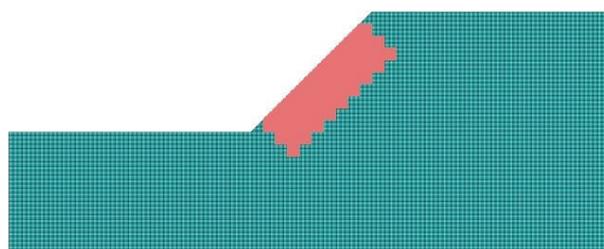


図-19 ③0.1m×0.1mのメッシュ

4.2 せん断強度低減法の結果

せん断強度低減法の結果における各ケースの安全率を表-6に、最大せん断ひずみ分布を図-20～22に示す。

図-20, 21より補強材範囲の地盤を弾性化しても安全率にほとんど差はなかった。これは弾性化前から補強材範囲が丸ごと滑っているため、あまり影響が出なかったことが考えられる。

図-22より補強材範囲の地盤を弾性化することで、安全率は円弧すべり法の結果から遠くなった。しかし、円弧すべり面が確認できたことから切土補強土工法の結果としては弾性化した結果の方が妥当であると考えられる。

表-6 各ケースの安全率 F_s

解析ケース	F_s
①1.0m×1.0m	1.661
②0.5m×0.5m	1.530
③0.1m×0.1m	1.500

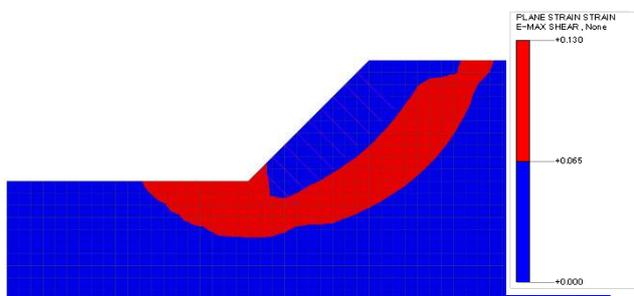


図-20 ①1.0m×1.0mの最大せん断ひずみ図
($F_s=1.661$)

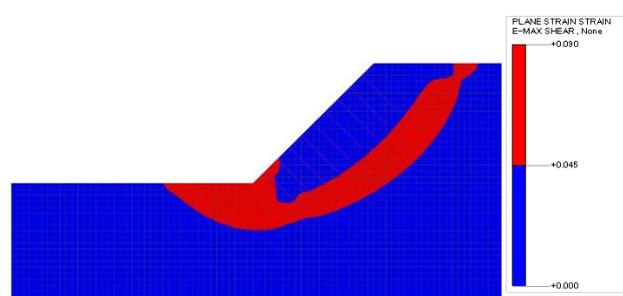


図-21 ②0.5m×0.5mの最大せん断ひずみ図
($F_s=1.530$)

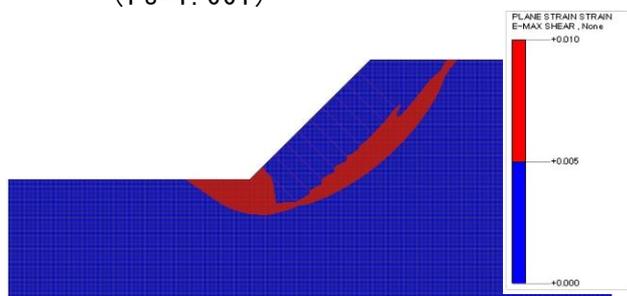


図-22 ③0.1m×0.1mの最大せん断ひずみ図 ($F_s=1.500$)

5. まとめ

せん断強度低減法で安全率を計算をする場合は、メッシュサイズを小さくするほど円弧すべり法の結果に近く、より厳しい値となる。しかし、切土補強土工法を適用した場合、意図した結果にならないことがあるため、その場合においては補強材範囲の地盤を弾性に変更または $c-\phi$ を大きくする必要があると考えられる。

参考資料

- 1) 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 日本道路協会, 平成 29 年 11 月
- 2) 道路橋示方書・同解説 II コンクリート橋・コンクリート部材編, 日本道路協会, 平成 29 年 11 月