

斜面の2次元FEM静的解析における境界の半無限性が地盤応力に与える影響検討(その2)

地震工学研究所 正会員 ○細尾 敦
 地震工学研究所 正会員 大島 快仁
 地震工学研究所 正会員 宇高 竹和

1. はじめに

従来、斜面地盤などを対象とした静的解析には有限要素法（FEM）が多く用いられ、地震時の重要構造物周辺斜面の安定性評価の対象断面やすべり面の絞り込み検討などには水平 $K_h=0.3$ 、鉛直 $K_v=0.15$ などの静的震度が利用されることが多い¹⁾。

その際、一般的な境界条件として、底面には剛体基盤、側方には水平または鉛直ローラー境界などが使用されてきた。側方条件にローラーを使用した場合、モデルの斜面が境界に対して対称（境界条件による対称性）になるため実質的に背後斜面は有限の幅となる。この場合、モデルの領域設定が地盤の応力に影響を与える²⁾が、その妥当性の判断は非常に難しい場合が多い。その一つの解決策として、工学的な判断として半無限性を考慮することが考えられ、エネルギー伝達境界^{2,3)}を使用することにより側方背後斜面は半無限性を表現することが可能となる。

しかしながら、底面境界においては、半無限性を表現できる有効な境界条件はなく、固定条件を用いざるを得ない。その際、底面固定条件を用いる場合の設置深さは、技術者の経験に頼らざるを得ないのが現状である。

本研究では、静的な水平外力検討時にエネルギー伝達境界を用いた場合に、底面境界の影響を把握するために、モデルの底面深さや層構造の違いによる解析的な検討を実施した。

2. 解析モデル

図1に典型的なFEMによるモデルを示し、モデル化を説明する。

2.1 有限要素法によるモデル化

図1のモデルは、不規則領域（FEM部）と左右の側方に存在する自由地盤とから成り立つ。自由地盤はFEMモデルの側方から左右に半無限に続く水平成層地盤を意味する。

2.2 側方エネルギー伝達境界

側方のエネルギー伝達境界についてはこれまで数多くの論文^{2,3)}で紹介され、その精度についても様々なところで検証されてきている。本研究では、エネルギー伝達境界を静的解析³⁾に応用し、図1のモデル不規則領域（FEM部）と左右の側方に存在する自由地盤との間に使用した。ローラー境界の場合はモデルの斜面が境界に対して対称になるため有限の幅になるが、エネルギー伝達境界を使用すると側方の背後斜面の半無限性を表現することが可能である。この場合、前報で報告したように、均一物性モデルの底面境界に半無限性を適用すると、水平荷重による地盤内応力 σ_x は発散することが確認されている。

2.3 底面の剛体境界

底面の境界条件が応答に与える影響も小さくなく、剛体基盤と判断できる地盤が存在しない場合、底面の境界条件が問題となる。このため、本研究では、剛体基盤の設置深さをパラメータとして、局所安全率の算定を行った。

3. 解析ケースと外力

外力として、常時応力荷重と水平 $K_h=0.3$ (←) が右から左に、鉛直 $K_v=0.15$ (↑) が上向きに作用すると仮定した。表1に示す均一物性で、図1のモデル領域を基本モデルとして、比較検討用モデルは、剛体基盤の位置を基本モデルから徐々に深くし、最終的にはモデルの底面を延長して0~50kmまで合計8ケースを考えた。さらに、層構造の変化についてその影響を把握するために、2層構造モデルと3層構造モデルについても検討を実施した。表2と表3に2~3層構造モデルの物性諸元を示す。

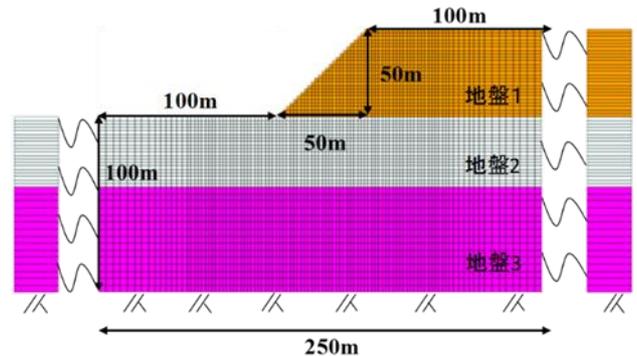


図1 典型的な検討用モデル（基本モデル）

表1 均一地盤の物性諸元

材料番号	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断係数 (kN/m ²)	C粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)
地盤1~3	0.35	23	1,500,000	150	30

表3 3層構造の物性諸元

材料番号	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断係数 (kN/m ²)	C粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)
地盤1	0.4	20	330,000	150	30
地盤2	0.38	22	1,400,000	150	30
地盤3	0.35	24	3,500,000	150	30

表2 2層構造の物性諸元

材料番号	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断係数 (kN/m ²)	C粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)
地盤1~2	0.4	20	330,000	150	30
地盤3	0.35	24	3,500,000	150	30

キーワード 静的解析, エネルギー伝達境界, ローラー境界, 半無限地盤, 自由地盤, 有限要素法

連絡先 〒160-0004 東京都新宿区四谷4丁目27番2号 新宿Yビル3階 (株)地震工学研究所 TEL03-3226-8733

4. 解析結果

均一地盤での常時応力荷重+水平震度 $K_h=0.3$ 及び鉛直震度 $K_v=0.15$ の応答結果から求められた局所安全率の比較を図 2 に示した。図中、安全率 1.0 以下の濃い灰色部分はせん断破壊を示す。傾向としては、モデル底面が浅い場合、モデル底面近辺にせん断破壊が認められ、モデル底面が深くなるに従って、斜面のせん断破壊領域が拡大していく傾向が顕著に認められた。

この傾向は水平方向の荷重による σ_x の大きさが、モデル底面深さが増加するにしたがって、増大していき、最終的には半無限地盤では理論上無限大に発散するためである。因みに、水平方向の荷重が有限の範囲内の場合には収束する。

図 3、図 4 に 2 層構造および 3 層構造の地盤において、深さを 0~5km まで 4 ケースの解析結果を示した。

図 3、図 4 より、均一地盤に比べ、表層斜面付近の破壊領域は、深さを深くしてもあまり広がっていないことが確認できる。このことは、地盤の底面部分に剛性比の高い地盤が存在することにより、斜面の周辺部分に関しては、一定の安全率に収束する傾向を示している。

ただし、2 層構造および 3 層構造の地盤において、剛性比の高い地盤の自身(下層岩盤内)の応力については、底面の深さにより、その応力状態に差異が見られる結果となっている。したがって、下層岩盤の安全率が問題となるような場合には、より深い層までモデル化する必要があると考えられる。

5. まとめ

斜面の 2 次元静的 FEM 解析において、水平外力作用時に、側方の半無限境界が地盤応力に与える影響について、検討を実施した。

解析結果より以下の傾向が得られた。

- 1) 底面の剛体基盤の設置深さの違いにより、局所安全率に相違が認められた。特に、地盤剛性に差異がない均一地盤の場合、側方の半無限性を考慮することにより、静的な水平外力による応力変化が大きくなり、底面境界の設置深さが非常に重要なパラメータとなる。
- 2) 地層構造を考慮することにより、底面位置に剛性比の高い地盤が存在する場合は、斜面部分に与える影響は、比較的小さくなることが確認された。

以上の結果より、2 次元静的 FEM 解析において、斜面などの左右の自由地盤の層構造に差があるようなモデルを対象として、静的な水平外力検討を実施する場合、モデル化する領域が地盤の応力に与える影響は小さくないが、その領域の判断は難しいため、側方の半無限性を考慮することが可能なエネルギー伝達境界を用いることは、非常に有効な手法の一つであると考えられる。

その際、底面の境界に関しては、下層に比較的剛性の大きい地盤(工学的な基盤)が存在することにより、表層部分の応力状態に与える影響を小さくすることが出来ることから、底面の境界深さについても十分に考慮したうえで、モデル化する領域を決定することが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601-2008, (社)日本電気協会と原子規格木委員会, pp185, 平成 20 年.
- 2) Lysmer, J. and Drake, L.A.: A Finite Element Method for Seismology, Method of Computational Physics, Volume II, Academic Press, 1972.
- 3) 宇高竹和, 大島快仁: 2次元 FEM を使用した静的解析の境界条件について -エネルギー伝達境界の静的解析への応用-, 地盤工学ジャーナル, No.12, No.3, pp.363-374, 2017.

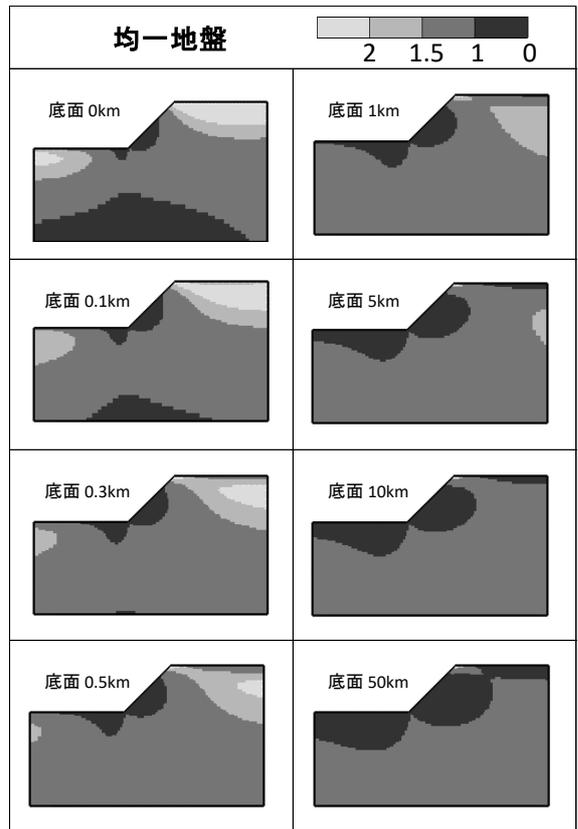


図 2 均一地盤の底面の深さによる局所安全率

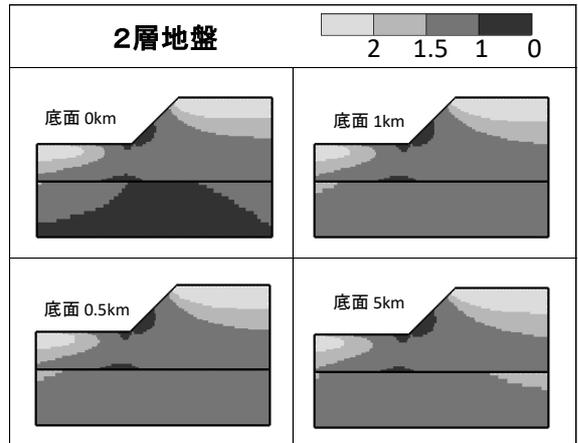


図 3 2層構造の底面の深さによる局所安全率

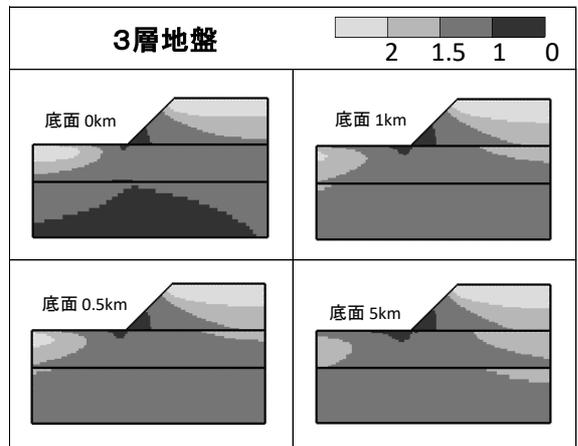


図 4 3層構造の底面の深さによる局所安全率