も著者が示した“発散”現象は、弾性状態での剛性と塑性状態での剛性の間に大きな差があり対象内に両状態が混在する限り、弾塑性 FEM 解析で破壊領域が拡大する過程でいつかは必ず生じることである。その意味ではすべり線法（あるいは極限平衡法）で対象としているような大きな破壊領域が存在する状態、換言すれば全般破壊が生じる大変形状態までの解析は弾塑性 FEM では困難に近い。この意味で、弾塑性 FEM によって極限支持力や安全率を求めようとする自体、意味のないことではないかと考える。すなわち、極限支持力や安全率を求めたい場合には、すべり線法やその近似解法である極限平衡法、あるいは剛塑性 FEM^{11),12)}を用いるのが妥当であろう。逆にいえば弾塑性 FEM は塑性領域の初期拡大過程を調べることができることに意味がある。

なお、塑性問題の中で安全率を求める斜面問題は、安全率が 1 以外の場合には山口¹³⁾が指摘しているように物理的な意味の曖昧なすべり線などが求められるし、比較の対象となる他の理論による解も少ないから、新しい方

法の妥当性の検討は、小林⁹⁾や著者らの別の文献⁴⁾のように支持力問題で行うのがよいのではないかと。

参考文献

- 8) 山上拓男・植田康宏・小山正之 (1984): 動的計画法に基づく潜在滑り面の決定 (第 2 報), 「土木学会第 39 回年次学術講演会」, pp. 157~158.
- 9) 小林正樹 (1984): 有限要素法による地盤の安定触析, 「港湾技術研究所報告」, 第 23 巻, 第 1 号, pp. 83~101.
- 10) Enoki, M., Yagi, N., Yatabe, R. and Ichimoto, E.: "Generalized limit equilibrium method and its relation to slip line method," Soils and Foundations (投稿中).
- 11) Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi, T. (1987): "Rigid-plastic finite element method for frictional material," Soils and Foundations, Vol. 27, No. 3, pp. 1-12.
- 12) 榎 明潔 (1984): 剛塑性有限要素法による土構造物の支持力・安定解析, 「愛媛大学工学部紀要」, 第 10 巻第 3 号, pp. 457~466.
- 13) 山口柏樹 (1969): 「土質力学 (最上武雄編)」, 第 7 章土の塑性力学, 技報堂, pp. 881.

弾塑性 FEM による斜面の全体安全率の計算法¹⁾

著者回答: 鵜飼 恵 三¹¹⁾ (Keizo Ugai)

拙著論文に対して貴重なご討議を戴き、感謝致します。従来の FEM 計算が土構造物の局所安全率を求めるといって一面を有しているのに対し、本研究ノートでは従来の考えに基づいた FEM プログラム (筆者が独自に作成) に多少の工夫を加えることにより、全体安全率を求めうることを示した。そして本方法によりえられる安全率が従来の極限平衡法により得られる安全率と同じ意味 (全体安全率という意味で) をもち、単純な安定問題ではほぼ同一の安全率値を有することを示した。更に、本方法によれば、複雑に変化する地盤構造や間隙水圧分布を有する問題、地盤と構造物が連成する問題などの最小安全率を全く同じ手順で簡単に算出しうることを指摘した。これらの問題の解決は従来の極限平衡法では不可能に近い。また、従来の極限平衡法の多くは力とモーメントの平衡条件を一部しか満足していないため、得られる安全率の精度に不安がつきまとう。

本方法は斜面安定問題のみならず、土圧問題、地盤と構造物の連成問題および支持力問題に直接適用できる。前 2 者の例については文献 14) を参考されたい。

本方法を支持力問題に直接適用した場合、得られる安全率は強度に対する安全率であることに注意する必要がある。これは通常的支持力問題で定義される安全率 (荷重に関する安全率) とは異なる。後者の安全率を本研究で用いた FEM プログラムにより求めることは簡単であり、10 行以内のプログラムの変更で事足りる。その場合の考え方は次のようである。

材料のせん断強度 τ_f は安全率に無関係であるとすれば常に次式が成り立つ。

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

外荷重を p とし、仮想的な外荷重 p_f を次式で定義する。

$$p_f = F \cdot p \quad (7)$$

F を徐々に増加させて、計算が発散した時を地盤の破壊時と考え、そのときの F の値を地盤の支持力安全率とする。言うまでもなく、式 (7) で定義される安全率は従来の支持力問題で定義されている安全率に一致する。またこのとき用いられている (一部変更された) FEM プログラムは、従来の考えに基づいた (局所安全率が求められる) FEM プログラムと同じものである。

本方法により得られる安全率の精度は、本方法が基本的には従来の FEM 計算法に基づいている以上、これと同じレベルの精度をもつと考えて良い。取東判定基準を

i) 第 29 巻第 2 号, 1989 年 6 月, pp. 190~195. (討議者: 榎 明潔, 第 30 巻第 2 号, 1990 年 6 月, pp. 218~219.)

ii) 群馬大学工学部建設工学科 助教授 (桐生市天神町 1)

小さくし、メッシュ分割を細かくすれば、支持力問題においても関連流れ則を前提とした厳密解に近い値が得られる。筆者の限られた経験と知識によれば、すべり線法や極限解析法が FEM 計算法より精度的に優れた結果を得るのは、摩擦角が大きい砂地盤の支持力問題が関連する問題のみではないかと思われる。しかし、これとても、本質的にはメッシュ分割の大きさの問題であり分割をきめ細かく工夫することにより解決される問題であろう。弾塑性 FEM に基づいて地盤の最終破壊に極めて近い状態を精度よく把えることは、現在では困難な問題ではない。

弾塑性 FEM, すべり線法, 極限平衡法, 極限解析法(上・下界法)あるいは剛塑性 FEM を比較する場合, 変形に関する議論を忘れてはならない。ここでは, 地盤の最終破壊状態に及ぼすダイレイタンシー角 ν (簡単のため一定と仮定)の影響について論じよう。単純な斜面の安定問題では, すべり面が($\nu=0$)円形であれ, 対数螺旋($0<\nu\leq\phi$)であれ, 得られる最小安全率の値やすべり領域の大きさが大きく変わらないことが指摘されている。このことはダイレイタンシー角の影響が小さいことを物語っている。一方, 土圧問題と支持力問題では, ν が変化すると破壊領域の大きさが変化することが, 弾塑性 FEM 計算より知られている。例えば, 砂の支持力問題では, ν を大きくすると破壊領域が拡大し, 支持力が増大する²⁾。このような破壊のダイレイタンシー角依存性は, すべり線法, 極限平衡法および極限解析法では把えることができない。剛塑性 FEM¹¹⁾はこれを把える

ことができるが, 地盤内のすべての点が破壊状態にあると仮定しており, 応力状態が現実と異なる可能性がある。弾塑性 FEM は, 変形状態を考慮できるし, 破壊領域と非破壊領域の併存も容易であり, 実際の地盤の応力・変形状態を最もよく表現しうる手法であると考えられる。もっとも, このような弾塑性 FEM の優位性は限られた観点からのものであり, 異なった観点からはほかの手法の優位性が指摘されよう。

最後に, 「計算の“発散”と物理的な破壊の関係」について付言したい。本研究で対象としている問題は, 塑性変形を伴う非線形問題であるため, 与えられた境界条件に対してこの非線形問題を直接解くことはできない。このため通常は許容誤差内に収まるまで繰返し計算を行い, その解を求めるのが普通である。繰返し計算の方法として多くの方法が提案されているが, 本研究ではよく用いられている修正 Newton-Raphson 法を使用した。この方法は常に一定の(普通は弾性の)合成マトリクスを用いて計算を行うため, 塑性変形が大きくなると多量の繰返し計算回数が必要になる。塑性変形が大きくなることは, 物理的には破壊に近づくことを意味するので, この繰返し回数が大きな値(本研究では 500)を越えたときを地盤の破壊状態と想定した。この時点で斜面の内部に大きなせん断ひずみを伴ったすべり層が形成されていることを確認している¹⁴⁾。

参考文献

- 14) 鶴飼恵三(1990):安定解析におけるせん断強度低減法の有用性,「土と基礎」, Vol.38, No.1, pp.67~72.

電子レンジを利用した土の物理試験方法に関する二, 三の研究¹⁾

著者回答: 藤田 龍之ⁱⁱ⁾ (Tatsushi Fujita)
古河 幸雄ⁱⁱⁱ⁾ (Yukio Furukawa)

筆者らの論文に対し, ご討議をいただきまして感謝致します。

さて, 討議内容の重要な論点は, 電子レンジによる含水量試験を基準化するための問題点について提起しているものと解釈されます。これを念頭に置いて, 嘉門, 渡辺両討議者が指摘されました事項について内容を整理し, 回答内容が展開しやすいように次のような項目に分類してみました。

i) 第 28 巻第 4 号, 1988 年 12 月, pp.197~207. (討議者: 嘉門雅史, 第 29 巻第 3 号, 1989 年 9 月, pp.205~206; 渡辺 進, 第 29 巻第 4 号, 1989 年 12 月, pp.165~166.)

ii) 日本大学工学部土木教室 助教授 (郡山市田村町徳定字中河原 1)

iii) 日本大学工学部土木教室 専任講師

1. 現在使用している電波の将来の展望
将来, 電子レンジの出力や周波数が変化する可能性はないか。
2. 電子レンジによる含水比測定上の問題点
 - (1) 電子レンジ出力を大きくすると過熱してしまい, 200 W 程度の低い出力に抑えるべきではないか。
 - (2) 含水比測定の際, マイクロ波の照射と同時にオープン機能を使用すると測定の迅速化に有利ではないか。
 - (3) 礫を含んだ試料, 泥岩などの岩片を含んだ試料, しらすのようなガラス質試料などの場合, その対処方法の対策について。