

線形・非線形強度式が斜面安定解析に及ぼす影響について

徳島大学大学院先端技術科学教育部 非会員 ○竹田 竜樹
徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 国際会員 蔣 景彩
同 上 国際会員 山上 拓男

1、まえがき

通常、実務設計における斜面安定性評価は次のような手順で行われる。①土質力学試験（一面せん断試験や三軸圧縮試験）を行い、破壊面上における垂直応力とせん断応力を直接・間接的に測定する。②測定したデータに基づき適切な破壊基準を決定し、対応する強度定数を得る。③ ①、②で得られた強度定数のもと、斜面安定解析を行い、臨界すべり面を探索し最小安全率の値を算出する。通常は斜面安定性を評価する際、せん断応力と垂直応力の間に直線関係を仮定したクーロンの破壊規準を用いて土質力学試験の結果を表現している。しかし、土の破壊規準は、特に低応力レベルでは直線ではなく原点を通る曲線（非線形）になることが多くの研究者により指摘されている¹⁾。そこで、本研究では、非線形強度式を用いた安全率算定式を誘導し、それに基づく三次元臨界すべり面の探索を行い、強度式の非線形性が斜面安定性評価にどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的としている。

2、非線形せん断強度式を用いた三次元臨界すべり面の探索

非線形破壊基準は式(1)のような指数関数で表される¹⁾。

$$\tau_f = A(\sigma')^b \quad (1)$$

ここで、 σ' は破壊面上の垂直有効応力、 A, b は非線形せん断強度パラメータである（図1参照）。

式(1)を鶴飼ら²⁾の三次元簡易 Janbu 法に導入すると、安全率算定式は次のように誘導される。

$$\sigma'_{ij} = \frac{W_{ij}}{\Delta x \Delta y} - u - \frac{A J (\sigma'_{ij})^b}{F} \sin \alpha_{xz} \quad (2)$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A \Delta x \Delta y (\sigma'_{ij})^b J / \cos \alpha_{xz}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} \tan \alpha_{xz}} \quad (3)$$

ここで、 $J = (1 + \tan^2 \alpha_{xz} + \tan^2 \alpha_{yz})^{1/2}$ 、 $\sigma'_{ij} = N_{ij} / (J \Delta x \Delta y) - u$ (u はコラム底面に作用する間隙水圧)である。式中の記号は図2を参照。

著者³⁾らは、すでに動的計画法と乱数発生法を援用した三次元臨界すべり面探索法を開発しており、この探索法は非線形強度式による三次元安全率算定式、つまり式(2)と(3)を用いた場合でも適用できる⁴⁾。

3、強度式の非線形性が斜面安定解析に与える影響

上述した探索法を高さ12mの均質な尾根状斜面（斜面勾配1:1, 1:2, 1:3の3パターン）に適用した。一例として勾配1:1の場合を図3と図4に示した。土の強度定数は、イスラエル工科大学のBaker教授によるもの⁴⁾を採用した。図5の点線・実線はイスラエル粘土の圧密非排

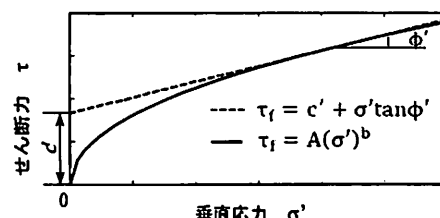


図1 線形(Mohr-Coulomb)及び非線形破壊基準

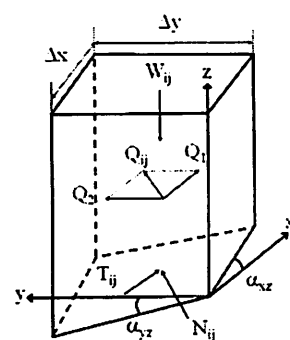


図2 コラムに作用する力

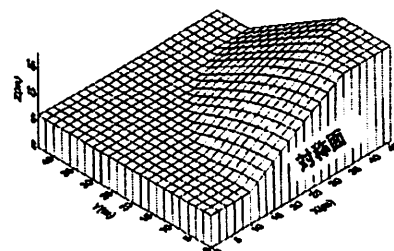


図3 尾根状斜面（斜面勾配1:1）

水三軸圧縮試験データに対して、それぞれ Mohr-Coulomb 強度式と非線形強度式 (2) によりフィッティングした結果である。図 5 に見られるように、両者の差異は低い応力領域においてのみ顕著に表われている。

非線形強度定数 $A = 1.105$ 、 $b = 0.86$ により探索された三次元臨界すべり面と最小安全率を図 6 に示す。図 6 の結果を線形強度式を用いた場合のそれらと比較すべく、Mohr-Coulomb 強度式に基づく従来の簡易 Janbu 法による探索も行った。用いられた強度定数は図 5 に示す値、つまり $c = 11.7\text{kPa}$ 、 $\phi = 24.7^\circ$ である。その結果、図 7 に示すような臨界すべり面と最小安全率が得られた。

上記と同様な検討を勾配 1:2 および 1:3 の均質尾根状斜面に対しても行った。得られた最小安全率を勾配 1:1 の結果と併せて表 1 に示す。さらに三次元解析と比較するため尾根状斜面の中央断面(図 4 の対称面)について、従来の二次元簡易 Janbu 法を式(1)の非線形強度式と結びつけた手法⁴⁾により二次元臨界すべり面の探索を行った。得られる最小安全率の値を表 1 に併記している。

4、あとがき

非線形強度式を用いた場合の二・三次元臨界すべり面の探索を行い、線形強度式を用いた場合のそれらと比較した。その結果、二・三次元のいずれにおいても非線形強度式による臨界すべり面は比較的浅く探索され、最小安全率は線形強度式によるそれより遙かに小さい値となった。また、両者の相異は勾配が大きな斜面においてより顕著に現れる。著者らは各すべり面上の垂直応力分布に基づき両者の相異について考察を行っているが、紙面の制約上、これらの検討結果については当日発表する。

表 1 各ケースの最小安全率の値

(a) 尾根状斜面(三次元)				(b) 二次元断面			
最小安全率	斜面勾配			最小安全率	斜面勾配		
	1 : 1	1 : 2	1 : 3		1 : 1	1 : 2	1 : 3
$F_{3,linear}$	1.086	1.665	2.259	$F_{2,linear}$	1.005	1.532	2.048
$F_{3,nonlinear}$	0.821	1.449	2.074	$F_{2,nonlinear}$	0.787	1.386	1.948
ΔF_3	0.265	0.216	0.185	ΔF_2	0.218	0.146	0.100

$$\Delta F_3 = F_{3,linear} - F_{3,nonlinear}$$

$$\Delta F_2 = F_{2,linear} - F_{2,nonlinear}$$

参考文献

- 1) Perry J. (1994): Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.27, No.2.
- 2) 鶴飼・細掘(1998)：土木学会論文集、第 394 号/Ⅲ-9.
- 3) Yamagami T. & Jiang J.-C.(1997): Soils & Foundations, Vol.37, No.3.
- 4) Jiang J.-C., Baker R. & Yamagami T. (2003): Canadian Geotechnical Journal, Vol.40, No.2.

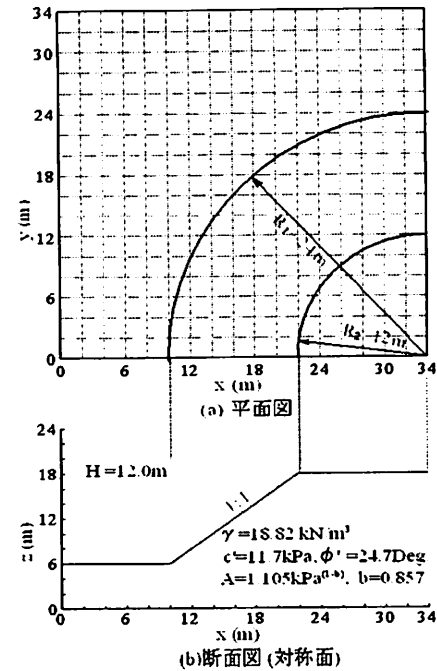


図 4 尾根状斜面 (斜面勾配 1:1)

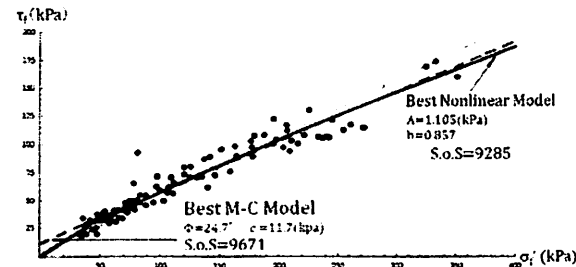


図 5 Baker による線形・非線形強度定数⁴⁾

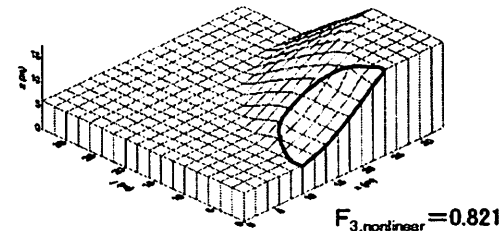


図 6 非線形強度式による
三次元臨界すべり面と最小安全率

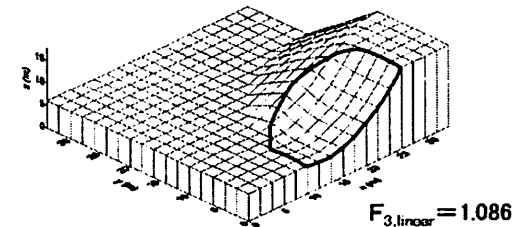


図 7 線形強度式による
三次元臨界すべり面と最小安全率