

I—22 すべり面形状を任意形に仮定した時の斜面の安定解析

室蘭工業大学 学生員 相田 俊次
 室蘭工業大学 正員 松岡 健一
 北海道大学 正員 能町 純雄
 苫小牧工業高等専門学校 正員 澤田 知之

1. はじめに

土質斜面の安定解析を行う場合、滑り面形状を仮定することが問題となる。この点についての塑性論的に厳密な考察は、土質斜面の崩壊の原因が主に自重であることなどにより非常に難しい。そこで実用的には滑り面を、直線・円弧・対数螺旋、あるいはこれらの複合として仮定し、安全率を最小とするような滑り面を求めることが行われている²⁾。

本報告は滑り面を特定の形とせず、最小の安全率を与える滑り面はどのようなものであるのかを簡単な力の釣合によって計算したものである。

解析に当っては、平面歪問題とし、土はモール・クーロンの破壊基準に従う剛塑性体とした。

計算は斜面に一定な水平加速度が作用する場合、斜面が軟弱な層をはさむ場合等についても行った。また一部、摩擦円法と対数螺旋との比較、対数螺旋と任意形状滑り面との比較も行っている。

最小の安全率を求めるために、非線形最適化問題³⁾としてあつかい、ここではSUMT変換、BFGS法、囲い込み後の多項式近似によっている。

2. 解析手法

2.1 滑り面形状を任意とする場合 (図-2.1)

斜面を水平ないくつかの層に分割しているので層ごとに土質が異なる場合の計算が可能である。

分割片についての力の釣合を図-2.2に示す。分割片の側面に作用する力を無視すると、滑り面上の剪断力 $W_i \cdot \sin \lambda_i$ と剪断抵抗 τ_i が等しいとおくことにより全体としては次のようになる。

$$\sum W_i \cdot \sin \lambda_i = \sum \tau_i$$

$$= \sum \frac{(c \cdot l_i + W_i \cdot \cos \lambda_i \cdot \tan \phi)}{F} \quad (1)$$

これにより安全率 F は

$$F = \frac{\sum (c \cdot l_i + W_i \cdot \cos \lambda_i \cdot \tan \phi)}{\sum W_i \cdot \sin \lambda_i} \quad (2)$$

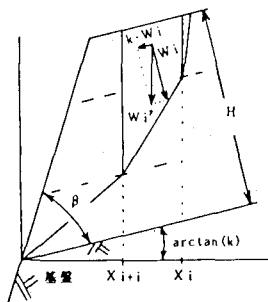


図-2.1 任意形状滑り面による斜面先破壊

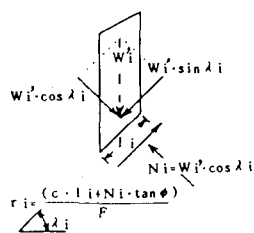


図-2.2 分割片に作用する力

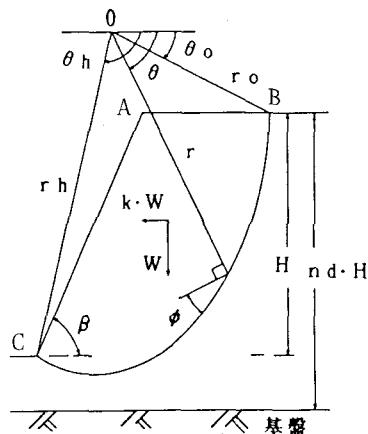


図-2.3 対数螺旋滑り面による斜面先破壊

この F を $X_1, \dots, X_i, \dots, X_n$ の関数として最小化する。

水平加速度がある場合は、計算上、斜面全体を傾け、合加速度が鉛直下向きに作用するものとしている。

2.2 対数螺旋滑り面を仮定する場合⁴⁾ (図-2.3)

対数螺旋 BC は O を原点として極座標で表すと

$$r = r_o \cdot \exp\{(\theta - \theta_o) \tan \phi\} \quad (3)$$

となる。

土塊の自重 W と水平力 $k \cdot W$ による O 点廻りのモーメントを M_1 、滑り面上の剪断抵抗によるモーメントを M_2 、とすると安全率 F は両モーメントの

比として表される。土質定数 c, ϕ, τ および斜面形状 H, β, nd が与えられると F は θ_o, θ_h の関数となり、

$$F(\theta_o, \theta_h) = \frac{M2(\theta_o, \theta_h)}{M1(\theta_o, \theta_h)} \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 $M1$ は滑り土塊の重心に W と $k \cdot W$ が作用したときの O 点に関するモーメントとして計算され、 $M2$ は滑り面上の剪断抵抗によるモーメントを積分することにより得られる。

(4) 式の F を θ_o, θ_h の関数として最小化する。

3. 数値計算および考察

3.1 対数螺旋滑り面と摩擦円法との比較。

図-3.1 は斜面先破壊に対する摩擦円法による Terzaghi の静的な安定解析図表であるが、その上に対数螺旋による計算値(●印)をのせたものである。この図は内部摩擦角 ϕ 、斜面角 β から、安全率を 1 とする安定係数 N_s の値を求めるためのものである。

摩擦円法による値と対数螺旋による値とは概ね一致していることがわかる。ただ、 N_s が大きくなるところでは対数螺旋による値の方が大きくなっているが、これは斜面先破壊のみを考えているためであると思われる。

このように両者がよく一致することはよく知られていることであるが、本報告では摩擦円法による解析を行っていないので、滑り面形状がどのように異なっているのかは不明である。

3.2 対数螺旋滑り面と任意形状滑り面との比較

以下、任意形状滑り面による方法を手法 1、対数螺旋滑り面による方法を手法 2 と呼称する。

解析モデルを図-3.2 に示す。これは図-2.3 において $nd = 1$ とした場合であるが、水平力は考えていない。また、手法 1 に対しては 1m ごとに層分割し、さらに基盤から 0.25m, 0.5m, 0.75m にも層境界があるとし、合計 11 層に分割したが、ここでは、各層の土質定数は同一としている。

前項の図-3.1 と同様 ϕ, β と N_s の関係を図-3.3 に示す。ただしこの図では実線が手法 2 による値であり、(●印) が手法 1 によるものである。また滑り面形状の違いを図-3.4 に示した。

図-3.3 を見ると、手法 1 による N_s は手法 2 による値に比べほぼ等しいか又は、小さくなっているこ

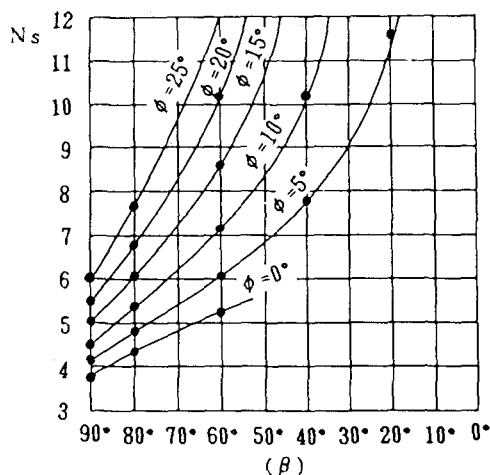


図-3.1 Terzaghiの安定解析図表

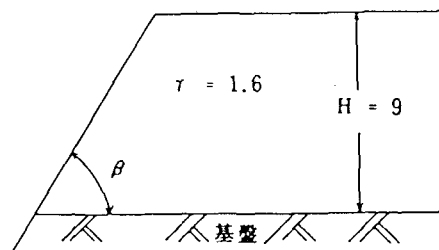


図-3.2 解析モデル

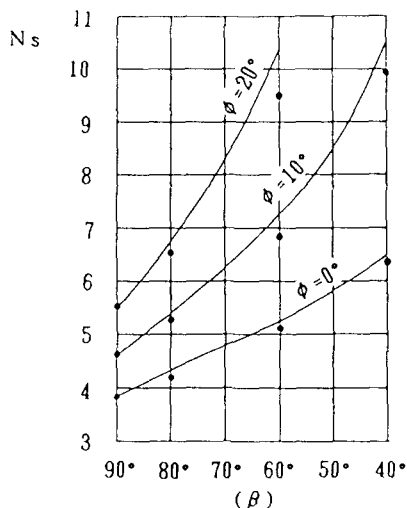


図-3.3 本解析による安定解析図表

とがわかる。この差は ϕ が大きいほど、 β が小さいほど広がっている。すなわち、手法 1 による方が、安全率の小さな滑り面が得られることになる。

図-3.4 に $\phi = 10^\circ$ で β を変化させた場合の滑り面形状を示す。この図では手法 1 による滑り面を破線、手法 2 による滑り面を実線で示した。

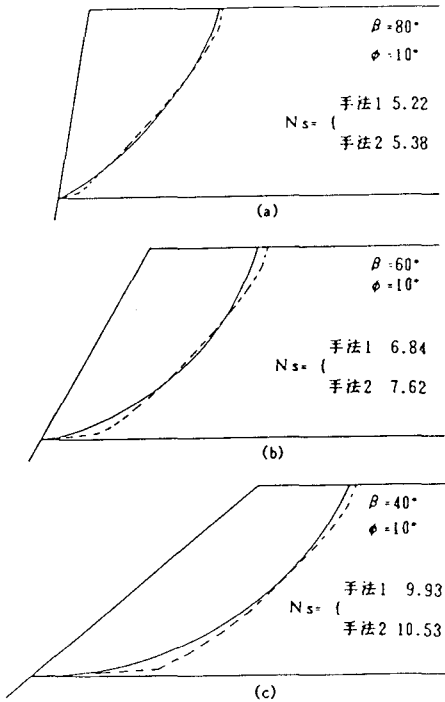


図-3.4 手法1, 2による滑り面形状

図(c)を除いては手法1による滑り面と手法2によるものが交錯しており概ね次のようなことが言える。

- ①. 滑り面上端は、手法1によるものが手法2によるものより、斜面後方にある。
- ②. 斜面の中ほどでは β が大きい場合は手法1による滑り面の方が斜面前方にあり、 β が小さくなるとこの関係が逆転する。
- ③. 滑り面の下端付近では、常に手法1によるものの方が斜面後方にある。

①に関しては、ここには示していないが $\phi = 0^\circ$ の場合にはこの関係が逆になることもあるが、②、③については他の場合も同様の傾向があり、 β が小さくなるにつれて著しくなっている。

3.3 水平加速度が作用する場合

前項における計算は、安全率が1となるような N_s を決めたのであるが、ここでは土質、斜面形状を同一にして手法1と2の比較を、水平加速度も含めて考えてみる。

図-3.5(a), 3.6(a) はそれぞれ $\phi = 0^\circ, 10^\circ$ で水平加

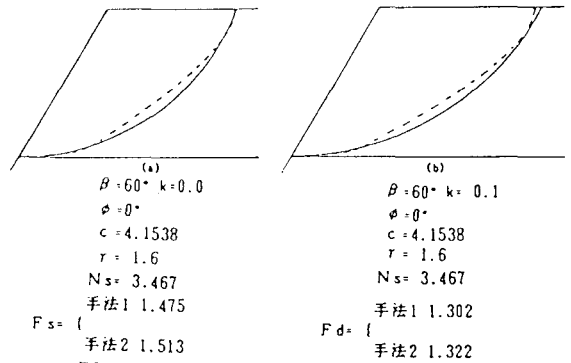


図-3.5 手法1, 2による滑り面形状

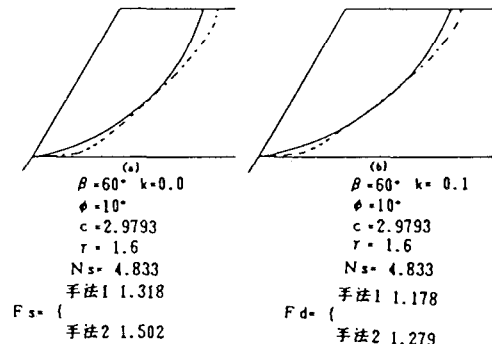


図-3.6 手法1, 2による滑り面形状

速度が作用しない場合であり、図-3.5(b), 3.6(b)は水平加速度が重力の10%すなわち加速度係数 $k = 0.1$ とした場合である。いずれも斜面角 $\beta = 60^\circ$ 、斜面高さ $H = 9m$ としている。また、破線が手法1、実線が手法2による滑り面である。 F_s は水平加速度が作用しないときの安全率、 F_d は水平加速度が作用する場合のものである。

図-3.5(a)では手法2による F_s が1.513、手法1では1.475と、2.5%ほど小さくなっている。

図-3.5(b)では手法2による F_d が1.322、手法1では1.302と、1.5%ほど小さくなっている。

滑り面形状は、前項にも述べたように、 ϕ が0でない場合とは異なり、斜面上部では手法1によるものの方が斜面前方側にある。

図-3.6(a)では手法1による F_s は1.318で、手法2による1.502より12.3%小さい。図-3.6(b)では手法1による F_d 、1.178、手法2による1.279に比べ7.9%小さい。滑り面形状はいずれも前項の①、②、③の傾向がみられる。

また、図-3.5, 3.6 いずれについても、水平加速度が作用する場合は、作用しない場合に比べ滑り面

が斜面後方に位置している。

3.4 不均質斜面

斜面が異なる土質から成っている場合、滑り面を単一の曲線や直線によって表すと、不均質性がはなはだしい場合には、大きな誤差を生ずることが予想される。したがって従来から複合滑り面による計算が行われているが、ここでも同様の視点に立って手法1を用いて滑り面を決定することを試みる。

解析モデルは図-3.2と同じであるが、 $\beta = 60^\circ$ とし、基盤から3~5mの間に ϕ または c の異なる層があるとしているが r は1.6で一定にした。この層の上下では $\phi=10^\circ, c=2.9793$ としており、斜面が均質な場合は図-3.6(a)と同じである。図-3.7では均質な場合の滑り面を実線で、不均質な場合を破線で示している。

図-3.7(a)は異質な層の c が他の部分に比べて小さい場合である。異質な層より上では均質な場合に比べ、滑り面が斜面後方にあり下では逆になっている。すなわち、軟弱な層を通る部分が長くなっていることになる。

図-3.7(b)は ϕ が小さい層をはさんでいる場合であるが、このときも上記と同様のことがいえる。

図-3.7(c), (d)は硬い層をはさむ場合である。図(d)では図(a), (b)と反対の傾向を示しているが図(c)では滑り面全体が後方にずれている。しかし滑り面が硬い層を通る部分が短くなる傾向にあることは図(c)の場合と同様である。

以上のように滑り面は、弱い部分をできるだけ長く、強い部分をできるだけ短く通ろうとする傾向のあることがわかる。

4. おわりに

手法1による安定解析は、ここで計算した限り常に手法2によるよりも小さな安全率を与える。しかし手法1で考えている力が、土の重量と剪断抵抗のみであり、分割片の側面に作用する力を考慮していないため、底部破壊などのように滑り土塊に受動部分が生じる場合の計算ができない。また、滑り面を折れ線で表しているため連続性を欠く部分が生ずるなどの問題がある。今後はこれらの点について解決を図ると共に、土質が異方性をもつような場合についても解析を行う予定である。

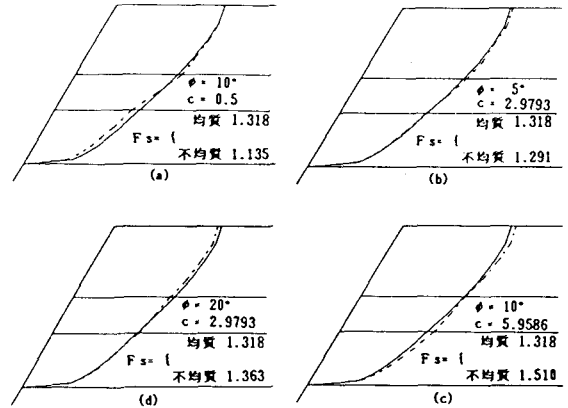


図-3.7 不均質斜面に於ける滑り面形状

なお、数値計算には室蘭工業大学のFACOM-M170Fを用いた。最適化のプログラムは文献8)を参考にした。計算時間は手法1でおよそ1分と、手法2の10倍程度かった。

付録

A. 記号

c : 土の粘着力 t/m^2	nd : 深さ係数
ϕ : 土の内部摩擦角	Fs : 安全率 ($k=0$)
r : 土の単位体積重量 t/m^3	Fd : 安全率 ($k \neq 0$)
W : 土塊の重量 t	k : 水平加速度係数
β : 斜面角	Ns : 安定係数
H : 斜面高さ m	$(= rH/c)$
τ : 土の剪断抵抗	

B. 参考文献

- 1) 最上武雄：土質力学，技報堂，1973
- 2) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，技報堂，1973
- 3) 今野・山下：非線形計画法，日科技連，1978
- 4) 相田・澤田・松岡・能町：斜面の安定解析における地震時加速度係数の評価について，土木学会北海道支部論文報告集，第40号，1984
- 5) 河上房義：土質力学，森北出版，1980
- 6) 赤井浩一：土質力学特論，森北出版，1976
- 7) 山田・大久保 監訳：最適構造設計，丸善，1983
- 8) 渡部・名取・小国：第3版数値解析とFORTRAN，丸善，1983, pp. 656~677