

名古屋大学 正会員 鈴木 壽
名古屋大学 正会員 松尾 総

1 はじめに

軟弱地盤上の盛土に関して、これまでに信頼性設計の手法を提示してきた。また、いくつかの数値計算例から従来の設計法（安全率法）と比較して、より合理的な設計法であることも検証してきた。しかし、単に最適盛土勾配を決定するような場合だけでなく、奥務設計で通常問題とされる押え盛土、地盤改良（サンドドレーン、サンドコンパクション）などの対策工法も考慮した信頼性設計の一般的な適用法については、まだ系統的に説明していない。その理由としては、①破壊確率の一般的定式化がされていないこと、②現場で想定される設計代替案が数多くあり、それら個々についての安全性を評価するにはかなりの労力を要すること、③奥務設計者が安全率に代わって破壊確率と安全性の評価指標とするには抵抗があること、などが考えられる。しかし、ここで上記の向題点をすべて網羅できないので、押え盛土と対策工法として採択した場合を例にとって具体的な適用法を記述する。

2. 破壊確率 P_F の定式化

非排水強度 C_u の統計的性質については、図-1のようにⅠ、Ⅱ、Ⅲ型の3種類の分布特性がある。最も一般的なⅢ型の場合を式で表示すると次のようになる。

$$C_u(z) = (C_0 + kz) + (\sigma_0 + kz)u(z) \quad (1)$$

ここに、 z ：深さ、 u ： $N(0, 1)$ 型の正規化された正規変数

C_0 ：地表面での粘着カ k ：粘着カ強度勾配 σ_0 ：標準偏差の初期値 k ：標準偏差の増加勾配である。また、モデル地盤は、現実にもっと近いVフックモデルを用いることにする。盛土のすべり破壊に対しては、図-2に示すようなテンションクラックを考慮すると、すべり面上の任意の2点 Z 、 Z' と (R, θ) には次の関係がある。

$$\begin{aligned} Z &= R \{ \cos(\bar{z} d\theta_i) - \cos\theta \} \\ Z' &= R \{ \cos(\bar{z}' d\theta_j) - \cos\theta \} \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)、(2)を用いて、確率変数である非排水強度の平均と分散は

$$\begin{aligned} E \left[\int_L C_u(z) dL \right] &= 2 \left(C_0 R \theta + k R^2 \sin\theta \right) \\ E \left[\left\{ \int_L C_u(z) dL - \mu L \right\} \left\{ \int_L C_u(z') dL - \mu L' \right\} \right] &= R^2 \int_0^\theta \int_0^\theta (\sigma_0 + kz)(\sigma_0 + kz') r(\tau) d\theta d\theta' \end{aligned} \quad (3)$$

となり、実際の土質データを整理すると自己相関関数は指数関数 $(r(\tau) = \exp(-A|\tau - \tau'|))$ でよく近似できることが知られている。上記の式と、中央安全率（確率変数としての安全率の平均値）を用いると次式が成立する。

$$\sigma_z^2 = (\bar{\sigma})^2 / \lambda \quad \lambda = 4 (C_0 \theta + k R \sin\theta)^2 / \int_0^\theta \int_0^\theta (\sigma_0 + kz)(\sigma_0 + kz') r(\tau) d\theta d\theta' \quad (4)$$

また、 $k=0$ からⅡ型、 $k=0$ かつ $k=0$ からⅠ型の σ_z^2 を求めることができる。 C_u 強度のばらつきだけでなく、設計法そのものの誤差（解析誤差 ϵ ）も考慮すると破壊確率 P_F は次式となる。

$$P_F = \int_{-0.1}^{0.1} \frac{1}{(0.1) - (-0.1)} \int_{-\infty}^{1-\bar{\sigma}-\epsilon} \frac{1}{2\pi\sigma_z} \exp\left(-\frac{\epsilon}{2\sigma_z^2}\right) d\epsilon d\epsilon \quad (5)$$

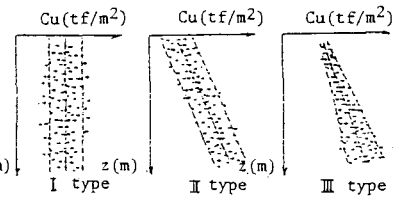


図-1 非排水強度 C_u の分布特性

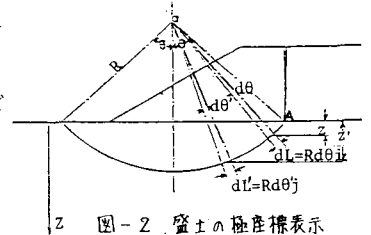


図-2 盛土の極座標表示

式(4)と(5)から、Ⅱ型の場合の P_F を求めることができる。Ⅰ型、Ⅱ型についても同様な式から算定できる。

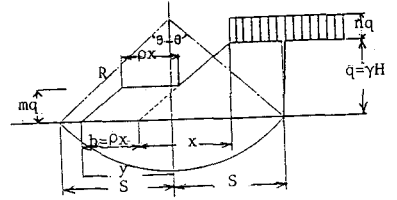


図-3 押え盛土の幾何学的関係

3 安定図表の作成

軟弱地盤上の盛工に關しては、中瀬の安定図表が著名であるが、上述のように対策工法を考慮した代替案の安全性を容易に評価する必要がある。そこで、図-3に示す押え盛工の幾何学的な関係からより一般的な安定図表を作成した。

図-4から中央安全率 ρ が、図-5から臨界円を決定するパラメータ t (中心角 θ を求める図は省略) が求められる。ただし、右図は上敷荷重がなく ($n=0.0$)、押え盛土の高さが本体盛土の $\frac{1}{2}$ の場合 ($m=0.5$) である。

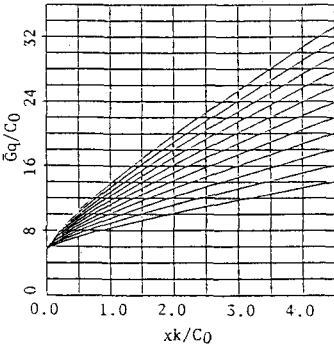


図-4 中央安全率 ρ を求める図

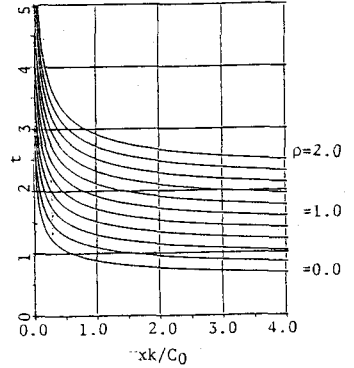


図-5 t を求める図

4 図表による最適確率 P_F の算定

図-4、5から ρ と t の形状が決定されるので式(3)、(4)から P_F の計算はできる。しかし、東務設計では図-6、7のように図化した方が便利である。つまり、図-6で (t, θ) から $\lambda k=0$ (Ⅱ型 $k=0$ の場合)、図-7で ($\rho, \lambda k=0$) から P_F を容易に求めることができる。これらの図は ρ の一例で一般にはかなりの枚数と必要とするが、例えば土質分類と図-6の各パラメータの対応がつけば汎用性が増すと考えられる。

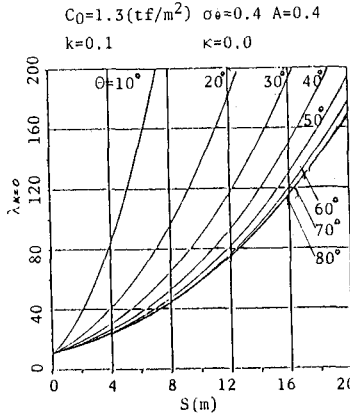


図-6 λ を求める図

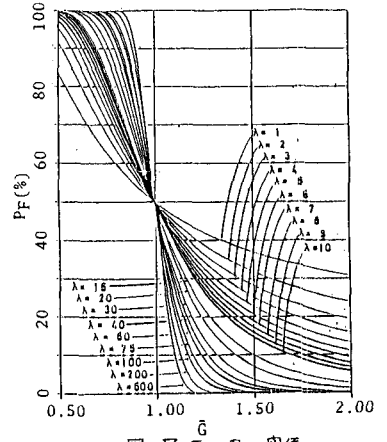


図-7 G と P_F の関係

5 数値計算例

最適案の選出の際の評価基準を次式とした。

$$C_T = C_c + P_F \cdot C_F \quad (6)$$

ここに、 C_T : 期待総費用、 C_c : 初期建設費、 C_F : 破壊損失費 (千円) で式(6)で C_{Tmin} となる代替案が最適設計案である。また、押え盛土の費用関数は

$$C_F = ZB'(a_{cp} + b_{cp}H') \quad (7)$$

$$C_c = C'_c + C_{cp}$$

す、 H' は押え盛土の幅と高さ、 b_{cp} は押え盛土の材料費と施工費、 a_{cp} は単位面積当りの用地費で、 C'_c は押え盛土以外に要する初期建設費である。表-2から $\rho = 1.0$ のときが最適案である。

表-1 安全率(中央安全率)と臨界円の決定

ρ	t	$s=tx$	C_0/sk	θ	G_0/C_0	G
0.2	1.20	10.28	1.265	51.8	8.2	0.987
0.4	1.42	12.17	1.068	52.4	8.5	1.023
0.6	1.65	14.14	0.919	53.0	9.0	1.083
0.8	1.85	15.85	0.820	53.7	9.4	1.131
1.0	2.07	17.74	0.733	54.5	9.8	1.180
1.2	2.27	19.45	0.668	55.3	10.2	1.228
1.4	2.48	21.25	0.612	56.2	10.6	1.276

表-2 最適押え盛土幅の決定

ρ	λ	P_F	C_c (千円)	C_F (千円)	C_T (千円)
0.2	64.6	53.5	411.9	823.8	852.6
0.4	83.1	44.5	466.8	933.6	882.3
0.6	103.6	24.3	521.6	1043.2	775.1
0.8	123.6	12.5	576.5	1153.0	720.6
1.0	150.8	6.0	631.3	1262.6	707.1
1.2	180.8	3.6	686.2	1372.4	735.6
1.4	201.5	0.4	741.0	1482.0	746.9