

破壊確率にもとづく段階盛土の設計例

名古屋大学工学部 正 員 松 尾 稔  
興亜開発株式会社 正 員 野 沢 秀 男  
" 正 員 ○ 藤 川 和 之

1. まえがき

筆者らは、地盤が本来的に有するばらつきをそのまま設計に導入しようとする立場から、破壊確率 (Pr) を用いた盛土の安定解析法を研究してきた。そしてこのような確率統計論的手法による安定解析法の実務への適用について、過去に若干の報告も行なった。<sup>1) 2)</sup>

今回の報告は、この手法を用いて過去に設計施工された例を解析し直し、従来の安全率にもとづく設計法との対比検討を行なったものである。

2. 破壊確率の計算

筆者らの過去の報告では、対象とする粘土地盤の  $C_u$  はすべり円弧の全領域にわたって一様 (一定の平均値と一定の分散を有するもの) である場合を取扱ってきた。このように一様な粘土層として解析できる場合も多いが、一方円弧が平均値、分散とも異なる数ブロックの粘土層を横切る場合もしばしばみられる。特にサンドドレーンなどで地盤改良したような場合には、このように数ブロックからなる地盤として解析せねばならないのが普通である。そこで本報告では、 $C_u$  が例えば図1に示すようにすべり円弧が平均値・分散とも異なる数ブロック ( $C_{ui}$ ,  $i = 1, 2, 3 \dots n$ ) を横切る場合の破壊確率を検討する。

図1の記号を用いると、すべり円弧の全長にわたって発揮される抵抗モーメントの平均値  $\mu$  と分散  $\sigma^2$  は以下のようにして求められる。なお各ブロックに関して次の仮定をおく。

1) 各ブロック内での  $C_u$  は次式で表わされるものとする。

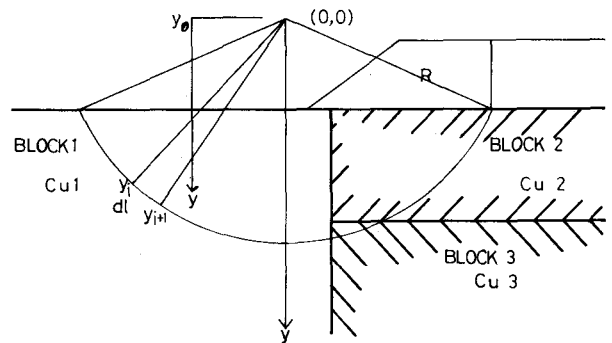
$$C_u = \alpha + \beta y + \sigma u \quad (1)$$

ただし、 $y$  ; すべり円弧の中心 ( $y_0$ ) からの深さ、 $\alpha$  ;  $y = y_0$  における  $C_u$ 、 $\beta$  ;  $C_u$  の深さ方向への勾配  $\sigma$  ; 偏差  $u$  ;  $N(0, 1^2)$  型の正規変数

2) 式(1)で  $\beta = 0$  の場合には粘土層は深さにかかわらず一様であり、その  $C_u$  は正規分布するものとする。この仮定は過去の研究により妥当なものであることが確認されている。(図-2(a))

3) 式(1)で  $\beta \neq 0$  の場合には、 $C_u$  はある一定の深さごとに正規分布するものとする。(図2(b)) この仮定の実証的証明は未だなされていないが、今後の調査・研究により遠からず証明されるものと

図1  $C_u$  の異なる区域を通過する円弧



予想される。

ここで設計係数  $Fs^*$  を次のように定義する。

$$Fs^* = \left( \frac{Mr}{Ms} \right)_{\min}$$

ただし  $Mr$  は抵抗モーメント

$Ms$  は転倒モーメント

$Fs^*$  を与える円弧の中心を座標原点とすると、 $Mr$  は

$$Mr = \sum_{i=1}^n R \left\{ \frac{y_{i+1}}{y_i} Cui \cdot d\theta \right\} \quad (2)$$

一般に深さ方向に勾配をもつ強度分布を示す地盤にお

いても  $Cu$  の偏差  $\sigma_c$  が深さ方向に一定であるとするよりも、深さ方向に  $\sigma_c$  が増大する、すなわち変動係数  $Vc$  が一定であるとする方が実情に近いようである。<sup>2)</sup> このように  $Vc$  が深さ方向に一定であるとする  $\sigma_c$  は、 $\sigma_c = Vc (a + \beta y)$  で表わされる。

さて  $Cu - z$  相関が任意の形状の場合の  $Mr$  の平均値  $\mu$  と分散  $\sigma^2$  は、次式で表わされる。

$$\mu = \sum_{i=1}^n R \int_{y_i}^{y_{i+1}} (a + \beta y) \frac{R}{\sqrt{R^2 - y^2}} dy = \sum_{i=1}^n R^2 \left[ a i (\cos^{-1} \frac{y}{R}) \frac{y_i}{y_{i+1}} + \beta i (\sqrt{R^2 - y^2}) \frac{y_i}{y_{i+1}} \right] \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \left[ R^2 \left\{ a i (\cos^{-1} \frac{y}{R}) \frac{y_i}{y_{i+1}} + \beta i (\sqrt{R^2 - y^2}) \frac{y_i}{y_{i+1}} \right\}^2 \right] \quad (4)$$

一方  $Ms$  は、次式で表わされる。

$$Ms = f(R) \cdot g(r_b) \quad r_b; \text{盛土の湿潤密度}$$

したがって破壊確率  $PF$  は

$$PF = Pr(Mr - Ms \leq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_K^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (5)$$

$$K = \frac{Fs^* - 1}{\sqrt{Vs^2 + Fs^{*2} \frac{\sigma^2}{\mu^2}}} \quad \text{ただし } Vs \text{ は転倒モーメントに関する変動係数}$$

### 3. 解析例について

3.1 地盤の調査結果；今回対象としている解析例は、サンドレーンで改良した海成粘土上に段階的に盛土を行なった護岸工事である。盛土は3段階に分けて実施され、現在実用に供されている。

図1における  $Cu$  の各ブロックにおける調査結果を示すと図3、図4のようである。図3はブロック(1)、すなわち非改良区域におけるもので、全盛土段階を通じて強度増加は認められなかった。

図4は、ブロック(2)、および(3)に関するもので、盛土段階の進捗とともに強度が増加している。

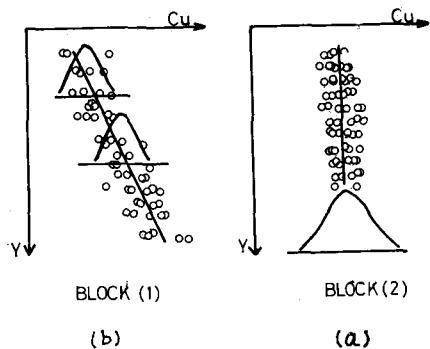


図2  $Cu - y$  のパターン

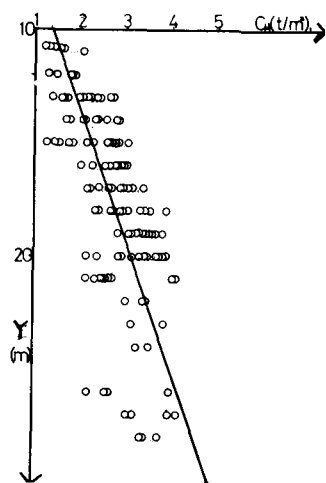


図3 ブロック(1)の  $Cu$   
(非改良区域)

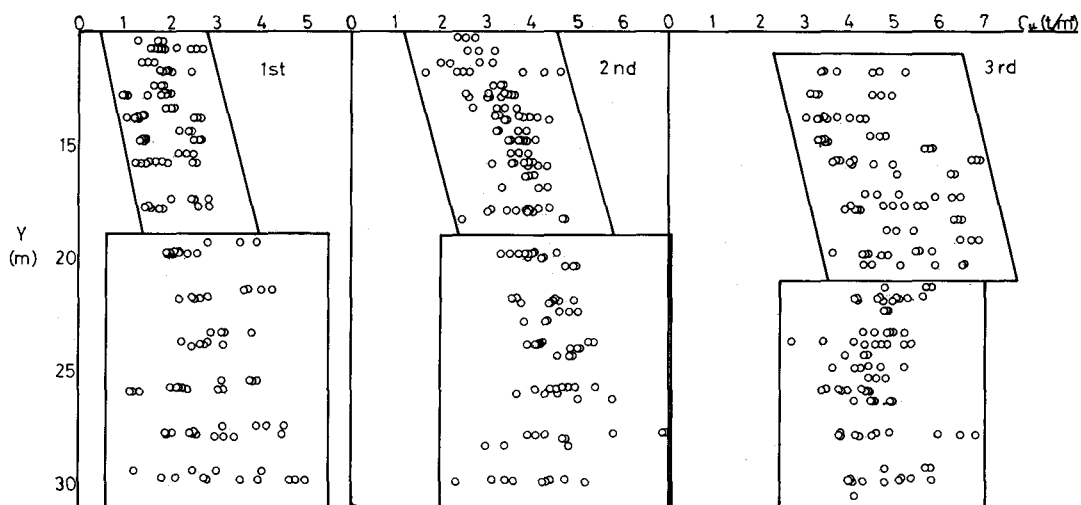


図4 ブロック(2)および(3)の $C_u$  (改良区域)

3.2  $V_c$ の決定について ; 2において述べたような手法を用いて破壊確率を計算する場合に、まず問題となるのは $C_u$ の変動係数 $V_c$ の決定法である。式(1)で $\beta = 0$ の場合には全資料を用いて $V_c$ を計算すればよいので全く問題はない。これに対して、 $\beta \neq 0$ の場合には、2の仮説で述べたように現在のところ実証的な方法は未解決であるが、1本のボーリング結果から $V_c$ を決定する方法としては次のようなものが考えられる。まず $C_u - Y$ 関係から最小自乗法で回帰曲線を決定する。次にこの回帰曲線を平均値として、各深さにおける $V_{cj}$ を求め、あるブロックの粘土層の $V_c$ としてはこの $V_{cj}$ を深さ方向に算術平均するのである。この方法における問題点は、1本のボーリング結果では同一深さにおける $q_u$ 値が数個しかないのが普通であり、これにもとづいて $V_{cj}$ を計算するには統計上試料が少なすぎることである。そこで $C_u$ が深さ方向に勾配を持つ場合でも、粘土層を深さ方向に分割して、その分割された層内では一様な粘土と考える近似的な方法がこれまで研究されており、回帰曲線による場合に比較しても勾配が小さいうちはそれほど大きな差はないと報告されている。<sup>3)</sup> しかしながら設計者としてはより厳密に、回帰曲線を用いる解析を望むと考えられる。したがってここでは統計的問題を扱う方法としては多少問題はあるが、今後資料が集積されるまでの当分の間の近似法として数個の試料で $V_{cj}$ を計算し、それらを平均して全体の $V_c$ とする方法で解析を進めることにした。

### 3.3 解析例について

各盛土段階に先立つチェックボーリングは盛土の中央線上で3本づつ実施した。

(図4はこれらの結果を全て含んでいる。) 試験個数の大小が解析結果に及ぼす影響を調べるために本解析においては1本のボーリング結果で解析した場合と、全ボーリング結果を用いる場合の両者を比較した。便宜上前者をA法、後者をB法と呼ぶことに

表1 各盛土段階における $V_c$

| 盛土段階 | ブロック<br>(1) | (2)  |      | (3)  |      |
|------|-------------|------|------|------|------|
|      |             | A    | B    | A    | B    |
| 第1段階 | 0.36        | 0.15 | 0.25 | 0.15 | 0.36 |
|      |             | 0.22 |      | 0.22 |      |
|      |             | 0.27 |      | 0.27 |      |
| 第2段階 | 0.36        | 0.07 | 0.14 | 0.12 | 0.22 |
|      |             | 0.11 |      | 0.36 |      |
|      |             | 0.08 |      | 0.08 |      |
| 第3段階 | 0.36        | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.19 |
|      |             | 0.07 |      | 0.42 |      |
|      |             | 0.08 |      | 0.11 |      |

する。3.2において述べた方法によって計算した $V_0$ を表1に示す。さてA法とB法のそれぞれについて $P_F-Fs^*$ 関係を示すと図5のようである。

この結果は次のことを示している。すなわち、 $Fs^*$ が大略1.2以上（この解析例では $P_F$ が5%前後）の比較的安定な地盤に対してはA・B両法の差はあまりなく、比較的少ない調査結果、例えば1本のボーリング結果によって解析を行なってもあまり問題がないことがわかる。これに対し、 $Fs^*$ が1.1前後の安全性の低い地盤に関しては、両者の差が著るしく大きく、かつB法の結果が最大の $P_F$ を与えることに注意する必要がある。すなわち、技術者にとって特に重要な安定性の低い地盤に対して少ない調査結果から結論を得ようとするとは極めて危険側の推論を余義なくされることを認識する必要がある。

図5 解析例における $P_F-Fs^*$ の関係

さて、段階盛土の設計に際しては、盛土段階の進捗とともに、破壊した場合の期待損失費は飛躍的に増大すると考えられるから破壊確率は次第に減少させる方がより適正な設計であると考えられる。このような観点からすれば、今回の解析で対象にした実施例のように、盛土段階の終期に急激に破壊確率の増大するような設計は避けるべきであろうと考えられる。しかし、この解析結果でわかったように、実際には载荷の工程や工期上の理由などで、このように载荷の後半に破壊確率の増大していくような設計も多いと思われる。今後は破壊確率を用いたこのような解析を数多く実施して、工程や工期をも含めた最適設計を系統的に追究していく努力が必要であると考えられる。

#### 4. おわりに

盛土の実施例を対象にして破壊確率の観点から、その設計の中味を検討し直したのが本報告の結果である。なお今回対象とした盛土が安全に立上ったからといって、例えば第3段階での破壊確率が30%程度になるのが妥当であるといっているわけではない。すなわち各盛土段階における適正な破壊確率は、盛土建設に際する全期待費用の観点から別途に決定されるべき問題であり、筆者らも現在この点の解明を急いでいる。

#### 参考文献

- 1) 松尾稔，藤川和之：地盤強度決定についての一考察、土木学会中部支部昭和48年度研究発表会
- 2) 松尾稔，藤川和之：段階的施工における非排水強度の管理について、土質工学会第9会研究発表
- 3) 松尾稔，黒田勝彦：土質調査の規模決定に関する研究、土木学会論文報告集第223号

