

鉄筋挿入工法の信頼性設計

北京工業大学 陳 向東 矢作建設工業 竹岡由積
名古屋大学 大塚 悟 松尾 稔

1. はじめに

掘削深度が比較的浅い掘削工事とか切土工事とかにおいて、吹付コンクリートと鉄筋の挿入による補強により掘削面を安定させる新しい土留め工は工事費及び施工からも極めて有効な工法と考えられる。しかし、補強地盤の安全性はほかの土構造物と同じように土質係数のばらつきによって影響される。特に、補強材の周面摩擦抵抗のばらつきの補強地盤の安全性に及ぼす影響は無視することができない。本研究では補強材周面摩擦抵抗のばらつきの影響を考慮した鉄筋挿入補強土工法の信頼性設計法を提案する。事例解析を用いて鉄筋の配置位置と配置角度などの安全率と信頼度に及ぼす影響や土質係数の変化によって補強土の信頼度に及ぼす影響を検討する。

2. 解析方法

鉄筋挿入による補強土のすべり安定計算は、図-1に示すように円弧すべり極限つりあい法に補強材力を考慮した次式により行う。

$$F_s = \frac{\sum [c_i \cdot l_i + \{(W_i + Q_i) \cdot \cos \alpha_i + T_i \cdot \sin(\alpha_i + \theta)\} \cdot \tan \phi_i]}{\sum [(W_i + Q_i) \cdot \sin \alpha_i - T_i \cdot \cos(\alpha_i + \theta)]} \quad (1)$$

ここに、補強材力 T_i (tf) は鉄筋の引き抜き抵抗力である。挿入鉄筋の極限引抜き力は次のように定める。

図-2では、補強鉄筋が斜面のすべり線によって滑動する土にある部分と動かない土にある部分の二つの部分に分けられる。補強された斜面の壁面工が一体化し、壁面全体の剛性が高い場合に、斜面が滑動する時に、図-2の挿入鉄筋が L_1 部分だけ引き抜かれるが、普通の鉄筋挿入工法では、壁面の剛性がそれほど高いものではない。だから、補強鉄筋は上述の二つの部分の弱い部分から引抜かれると考えられる。補強材力は次式で表わされる。

$$T_i = \text{Min}[\pi \cdot D \cdot \tau_1 \cdot L_1, \pi \cdot D \cdot \tau_2 \cdot L_2] / d \quad (2)$$

ここで、 L_1 (m) と τ_1 (tf/m²) はすべり面下の動かない土中内での補強材の長さと同面摩擦抵抗で、 L_2 と τ_2 は滑動する土中内での補強材の長さと同面摩擦抵抗である。 D (m) は削孔径である。また、 d は鉄筋水平間隔であり、補強材力 T_i は単位幅当りの力を表している。

信頼度を定量的に求める方法として修正二次モーメント法を用いる¹⁾。 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ を性能関数とし、最も破壊しそうな点 X^*_i ($i = 1, 2, \dots$

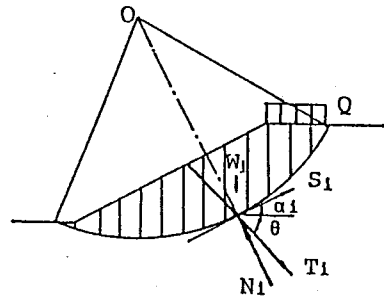


図-1 円弧すべり解法図

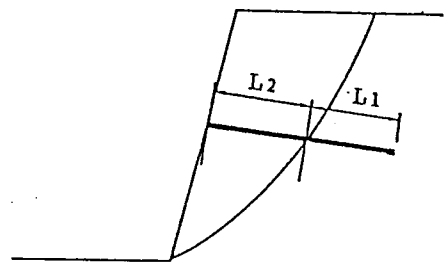


図-2 補強材力の解法図

Reliability-based design of Soil Reinforcement with Steel Bars.

Chen, X. D. (Beijing Polytechnic University), Takeoka, Y. (Yahagi Corporation)

Ohtsuka, S. and Matsuo, M. (Nagoya University)

・, n) の廻りにテーラー展開し、その一次項を用いると、次の信頼性指標 β が得られる。

$$\beta = \frac{\sum_i (\partial g / \partial x_i) \cdot (\mu_{x_i} - x_i^*)}{[\sum_i (\partial g / \partial x_i)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2]^{1/2}} \quad (3)$$

ここに $\partial g / \partial x_i$ は性能関数 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ の確率変数 x_i に対する偏微係数で、 μ_{x_i} と σ_{x_i} はそれぞれ確率変数 x_i の平均値と標準偏差である。 x_i^* は最も破壊しそうな点で、次式で表わされる。

$$x_i^* = \mu_{x_i} - \alpha_i^* \beta \sigma_{x_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

ここに

$$\alpha_i^* = \frac{(\partial g / \partial x_i) \cdot \sigma_{x_i}}{[\sum_i (\partial g / \partial x_i)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2]^{1/2}} \quad (5)$$

は軸 x_i に沿う方向余弦である。

確率変数が正規分布をしている場合に、破壊確率 P_f は次式で求められる。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (6)$$

ここで、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布の累積確率密度関数である。

鉄筋挿入による補強土では、円弧すべり面における全体破壊の性能関数は、滑動モーメントと抵抗モーメントとの差により以下のように定義することができる。

$$Z = \sum [c_i \cdot L_i + (W_i + Q_i)(\cos \alpha_i \cdot \tan \phi_i - \sin \alpha_i) + T_i \cdot \{\sin(\alpha_i + \theta) \cdot \tan \phi_i + \cos(\alpha_i + \theta)\}] \quad (7)$$

ここで、 c_i 、 ϕ_i 、 γ_i 、 τ_i を確率変数として取扱い、土の粘着力 c や内部摩擦角 ϕ の正接値 $\tan \phi$ や土の単位体積重量 γ は正規分布で近似できるものとする²⁾。さらに、土と補強材の周面摩擦抵抗 τ は正規分布と仮定し、確率変数はそれぞれ独立と設定した。地盤は M 層の多層地盤であれば、確率変数は $4M$ 個である。すべり線の存在する層における確率変数 c_k 、 f_k ($f = \tan \phi$ とする)、 γ_k および τ_k に対する偏微係数を求めると、次のようになる。

$$(\partial Z / \partial c_k) = \sum_i L_i \quad (8)$$

$$(\partial Z / \partial f_k) = \sum_i [(W_i + Q_i) \cdot \cos \alpha_i + T_i \cdot \sin(\alpha_i + \theta)] \quad (9)$$

$$(\partial Z / \partial \gamma_k) = \sum_i [(\cos \alpha_i \cdot f_k^* - \sin \alpha_i) \cdot \sum_k h_k] \quad (10)$$

$$(\partial Z / \partial \tau_k) = \sum_i [\sin(\alpha_i + \theta) \cdot f_k^* + \cos(\alpha_i + \theta)] \cdot \pi \cdot D \cdot \sum_k l_k \quad (11)$$

鉄筋挿入による補強土の極限状態方程式は次式で表わされる。

$$Z(c_k, f_k, \gamma_k, \tau_k) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

式(3)～(6)と式(8)～(11)および極限状態方程式(12)を用いると、信頼性指標 β と破壊確率 P_f を求めることができる。

表-1 解析に用いたパラメータ

地盤特性	平均値	変動係数 δ
粘着力 c	2.0 tf/m ²	0.20
$\tan \phi$	0.577	0.10
単位体積重量 γ	1.8 tf/m ³	0.05
周面摩擦抵抗 τ	8.0 tf/m ²	0.20

表-2 解析条件

掘削深さ H	10.0 m
B/H	0.1
鉄筋垂直間隔	1.4 m
鉄筋水平間隔	1.0 m
鉄筋の長さ	5.0 m
削孔径 D	0.1 m
載荷	1.0 tf/m ²

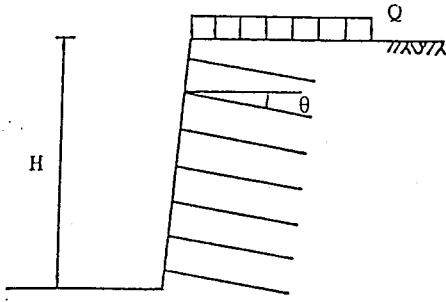


図-3 解析モデル

3・数値解析例

解析モデルである断面形状及び土質定数と解析条件をそれぞれ図-3及び表-1と表-2に示す。鉄筋挿入工法は急勾配の切土工事とか掘削山留めに用いられる。そこで、斜面の勾配は1:0.1と設定した。地盤は簡単のために均質な一層地盤とする。

鉄筋の挿入角度（水平より右まわりを正とする）の変化が補強土の安全率と破壊確率に与える影響を調べるために、鉄筋の挿入角度を変えて解析を行う。ただし図-3のように斜面全体に鉄筋を配置するものとする。その結果は図-4に示している。図では、挿入鉄筋の配置角度が $\theta = 0^\circ \sim 20^\circ$ の間に安全率および信頼性指標 β が最大となる。鉄筋挿入角度の変化によって信頼性指標 β が変化するが、鉄筋挿入角度が小さい場合にその変化が比較的小さいのに対して、鉄筋挿入角度 θ が大きい場合に θ の増加によって信頼性指標 β が急落し、安全率に比較して安定性の変化を敏感に反映している。

次に、打設鉄筋長の補強効果への影響を検討する。解析モデルは図-3と同じであるが、掘削深さは7.2m、8.6m、10mとし、挿入鉄筋の配置はそれぞれ5、6、7段と設定した。鉄筋挿入角度は 10° とする。他の解析条件は前例と同じである。挿入する鉄筋の長さを変化して解析を行なった。解析から得られる鉄筋挿入の長さ T_L と安全率 F_s の関係を図-5に示す。図では鉄筋打設長の増加によって安全率が増加するが、ある程度の打設長を越えると、安全率は増加しない様子が明らかである。今回の場合、鉄筋挿入の長さは掘削深さの70パーセントぐらいを越えると、安全率はほぼ一定となった。

次に、一本の補強鉄筋を配置する補強土について配置の位置と角度を変化して、その安全率を考察する。解析モデルと解析結果を図-6に示す。ここで h は配置する補強材の頭部から地表面までの距離である。斜面の勾配は1分とする。補強材の配置位置を変化させて、その各に対して最適な配置角度を求めた。この結果から補強材の配置位置によって、その最適配置角度は異なる。斜面の上部に補強材を配置する場合は下部に配置する場合より最適角度は大きく、安全率は斜面の中央付近に補強材を配置すると大きいことが分かる。このことから斜面全体に鉄筋を配置する場合に、斜面の中央付近における補強鉄筋は、比較的有効であるこ

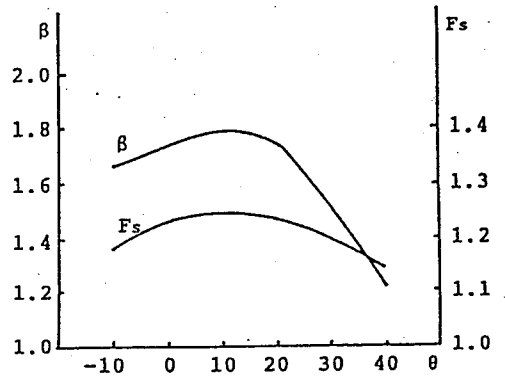


図-4 配置角度変化の安全率 F_s と信頼性指標 β

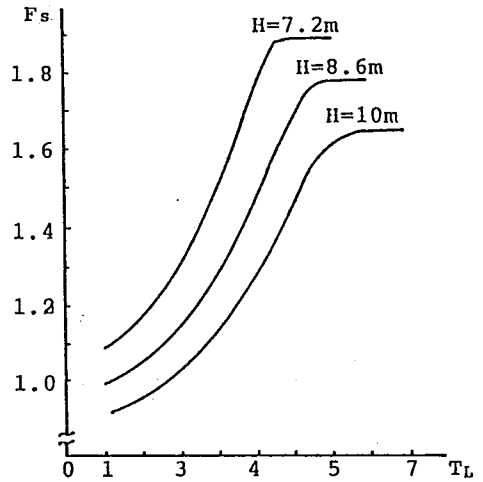


図-5 鉄筋打設長 T_L ~ 安全率 F_s 関係

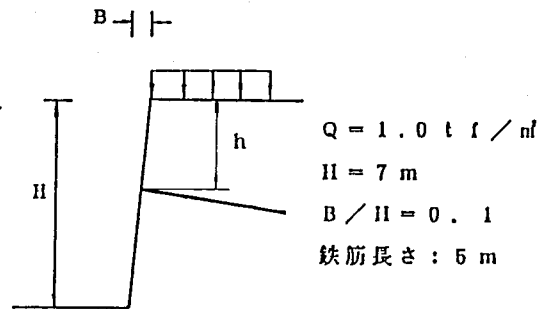


図-6 (a) 問題の境界条件

とが分かる。補強材の最適配置角度は配置の位置に影響される外に、斜面の勾配にも影響される。図-7は補強材の配置する最適角度と斜面の勾配の関係を示す。解析モデルは図-6と同じで、 $h = 4\text{ m}$ を設定した。最適配置角度は斜面の勾配の変化によって変化する。図では急勾配の場合に鉄筋の最適挿入角度は小さいことが分かる。この結果と模型実験との比較考察を行なう。龍岡らは、斜面の角度は 30° の比較的緩い斜面について模型実験³⁾を実施している。実験の結果は鉄筋の挿入角度が 45° の場合に補強効果が最大となる。他方、長尾らは $1:0.3$ の勾配の斜面に対して実験⁴⁾を行ない、補強鉄筋と水平なす角度は $0^\circ \sim 30^\circ$ の範囲に補強率が最大となる結果を得ている。図-7の解析結果は以上の実験と同様の傾向を示している。

補強鉄筋の配置や、土質定数の平均値が定められると、斜面の安全率が計算できるが、土質定数の変動係数の違いによって、斜面の平均値は等しいものの、安全率に関する信頼性指標 β あるいは破壊確率が違う。したがって、斜面の安全率が同じであっても、土質係数のばらつきによって、その土構造物の安全性は異なっている。図-8には図-3の解析モデルで鉄筋の挿入角度 θ が 10° の場合について、土質定数の変動係数 δ の変化と信頼性指標 β の関係を示した。信頼性指標 β は変動係数 δ の増加によって全般的に小さくなる。 c と $\tan \phi$ の変動係数 δ_c 、 $\delta_{\tan \phi}$ の変化による β の変動は比較的大きいに対して、周面摩擦抵抗 τ の変動係数 δ_τ の変化による β の変動は比較的小さい。 γ の変動係数 δ_γ による β の変動も比較的に小さいが、通常、 δ_γ は本来的にそれほど大きくなく、もともとこの影響は小さい。

4.まとめ

鉄筋挿入工法を用いた斜面の安定解析をについて、信頼性に基づく設計法を提案した。本手法による数値実験により、①鉄筋挿入の長さとともに斜面の安定性は増すものの、ある打設長を越えると、安全率は一定となる。最適打設長のあることが明らかとなった。②鉄筋挿入の最適角度は配置位置と斜面勾配の大きさによって異なり、境界条件および鉄筋配置位置に応じて最適な挿入角度を選択する必要がある。③変動係数の変化による補強土の信頼度に及ぼす影響は、周辺摩擦抵抗の変動係数 δ_τ より粘着力の変動係数 δ_c と $\tan \phi$ の変動係数 $\delta_{\tan \phi}$ の影響のほうが大きい。

参考文献 1) 土質工学会：土質基礎の信頼性設計，土質基礎工学ライブラリー-28，1985. 2) 松尾・黒田：不飽和土の土質諸係数と破壊確率に関する一考察，土木学会論文報告集，第208号，1972. 3) 土質工学会：補強土工法，土質基礎工学ライブラリー-29，1986. 4) 長尾哲・上原清治・太田元明：鉄筋の打設角度による補強斜面の補強効果について，第40回土木学会年講，第三部，1985.

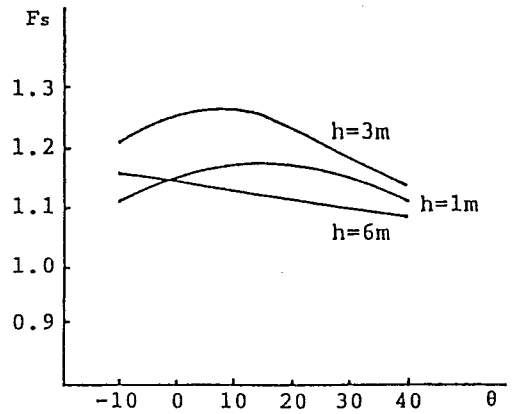


図-6 (b) 挿入位置による最適挿入角度の差異

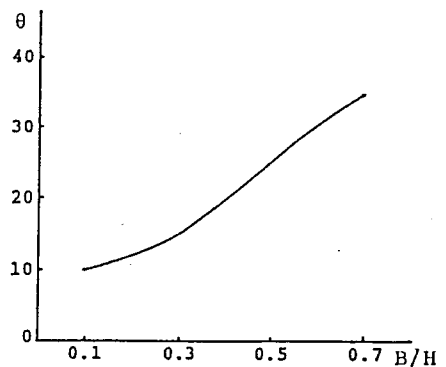


図-7 斜面勾配と補強材の最適挿入角度の関係

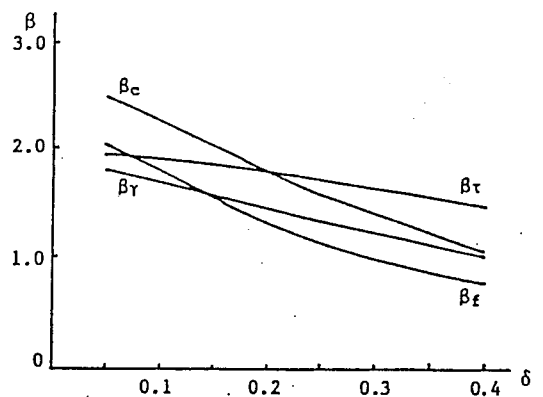


図-8 信頼性指標 β ～変動係数 δ 関係