

81 アンカー工による斜面安定の動的計画法による検討

愛知県豊田土木事務所 近 藤 観 慈

1 はじめに

斜面安定におけるアンカー工の設計は、Fellenius法を基本にしてアンカー工とすべり面との交角を考慮した方法により実施している¹⁾。また、アンカー力は地表面に作用するため、極限平衡法によるスライス法においてアンカー力をスライス上面に与えて解析する方法が提案されている^{2) 3)}。いずれにしても、このような解析は地すべりのように既にすべり面が形成されその位置が明かになっている場合に適した方法で、崩壊対策としてアンカー工法を用いる場合には、予めすべり面となる位置を想定する必要がある。これまでの設計事例では、アンカー工施工前の臨界すべり面を計算し、このすべり面を対象にアンカー工を設計していることが多いが、著者は、斜面の安定度はアンカー工が施工されて、地盤に応力が導入された状態で評価する必要があると考えた。

そこで、今回、アンカー工施工後の斜面の最小安全率と臨界すべり面の位置を、動的計画法により検討したので、その概要を述べる。なお、安定解析の基本的な考え方にSpencer法(1973)⁴⁾を採用した。Spencer法は最も精度が高いとされているMorgenstern-Price法⁵⁾と解析理論が基本的に同じで、同値の全体安全率を与え、数値計算上の取扱いがMorgenstern-Price法に比べ簡便である。

2 解析方法

動的計画法を用いて臨界すべり面を求め
る方法は、Baker(1980)⁶⁾によって提案された。Bakerは斜面安定解析法にSpencer法を用いて実施している。その後、簡易Janbu法への適用が報告されている^{7) 8)}。Bakerが用いたSpencer法は、円弧すべりを対象にしたSpencerの方法(1967)⁹⁾であるが、モーメントの平衡計算時に、各スライス毎にモーメントの中心に対する半径を変化させて非円弧すべりに適用できるようにしている。今回、アンカー力を考慮するにあたり、非円弧すべりを対象にしたSpencerの方法(1973)⁴⁾を基本に考えた。したがって、Bakerの方法で任意に定めているモーメントの中心位置を定める必要がない。なお、Spencer法にアンカー力を考慮する方法は文献3)の方法に地下水の浸透流の影響

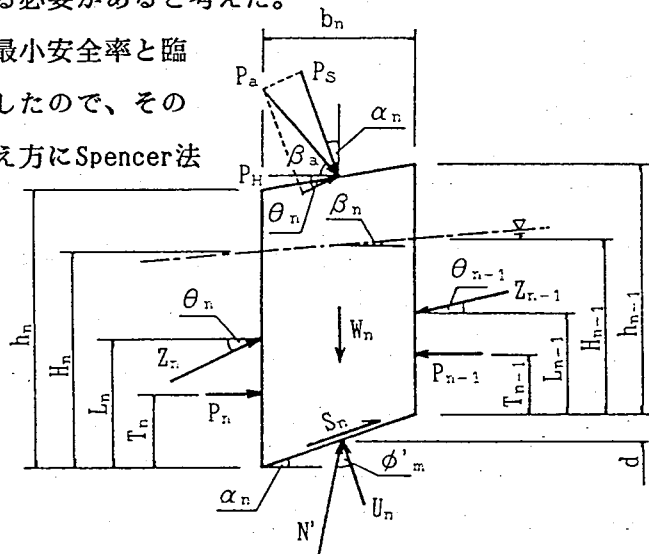


図-1 スライス

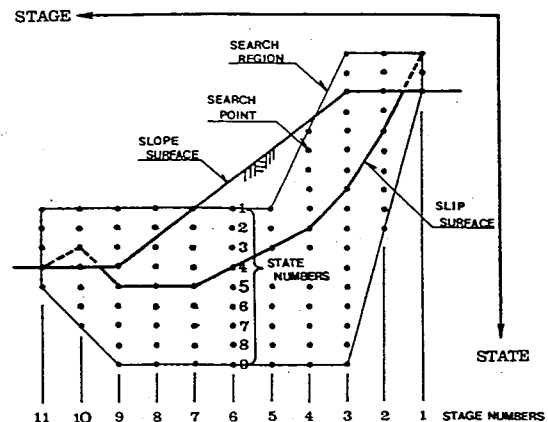


図-2 斜面模式図⁸⁾

を考慮して用いた。また、斜面上部の内力にしばしば発生する引張力はそのまま保持するとした。

斜面を鉛直分割した時のスライスに作用する力を図-1に示す。ここに作用する力の平衡からスライス下方側(左側)の内力(Z_n)が式(1)で得られる。変数の説明は文末を参照されたい。

$$Z_n = \frac{1}{\xi_n} \left(\frac{E_n}{F_s} + Q_n + Z_{n-1} \cdot \xi_n' \right) - P_H \quad \text{-----}(1)$$

ここで、

$$\begin{cases} E_n = -s_n + \tan \phi_n (U_n - W_n \cdot \cos \alpha_n + \Delta P_n \cdot \sin \alpha_n - P_s), & Q_n = W_n \cdot \sin \alpha_n + \Delta P_n \cdot \cos \alpha_n \\ P_H = P_s \cdot \cos(\alpha_n + \beta_s) \cdot \sec(\theta_n - \alpha_n), & P_s = P_n \cdot \{ \cos(\alpha_n + \beta_s) \cdot \tan(\theta_n - \alpha_n) + \sin(\alpha_n + \beta_s) \} \\ \xi_n = \cos(\theta_n - \alpha_n) \cdot \{ 1 - \tan(\theta_n - \alpha_n) \cdot \frac{\tan \phi_n'}{F_s} \}, & s_n = c_n' \cdot b_n \cdot \sec \alpha_n \\ \xi_n' = \cos(\theta_{n-1} - \alpha_n) \cdot \{ 1 - \tan(\theta_{n-1} - \alpha_n) \cdot \frac{\tan \phi_n'}{F_s} \}, & \Delta P_n = P_{n-1} - P_n \end{cases}$$

(1)式を変形すると式(2)が得られる。

$$Z_n - Z_{n-1} = \frac{1}{\xi_n} \left(\frac{E_n}{F_s} + Q_n \right) - Z_{n-1} \cdot \left(1 - \frac{\xi_n}{\xi_n'} \right) - P_H \quad \text{-----}(2)$$

ところで、斜面全体の力の平衡条件から、式(3)の関係が得られる。

$$\sum_{n=1}^m (Z_n - Z_{n-1}) = 0 \quad \text{-----}(3) \quad m \text{はスライスの数}$$

式(2)、式(3)から全体安全率(F_s)が式(4)で得られる。

$$F_s = \frac{\sum A_n}{\sum B_n} \quad \text{-----}(4) \quad \text{ここで、} \left[A_n = \frac{E_n}{\xi_n}, B_n = -\frac{Q_n}{\xi_n} + P_H + Z_{n-1} \left(1 - \frac{\xi_n}{\xi_n'} \right) \right]$$

ここでは、各スライスの内力の方向を平行($\theta_n = \theta$)と仮定し、 $\xi_n = \xi_n'$ とした。

一方、モーメントの平衡から、スライス下方側の内力の作用位置(L_n)が得られる。

(1)式から各スライスの力の平衡を満足する F_s と内力を求め、次にこの値を用いて各スライスのモーメントの平衡条件を満足する θ を求める。以上の計算を繰り返し、 F_s を収束させて解を求める⁴⁾。

動的計画法は加法的関数のみに応用できるものであるため、安全率関数の最小化に代えて、動的計画法の理論に従って、式(5)に示す補助汎関数 G を最小化する⁵⁾。

$$G_{i+1}(j) = \min_{K \in K_i} \{ G_i(K) + D G_i(K, j) \} \quad \text{-----}(5) \quad D G_i(K, j) = A_i - F_s \cdot B_i$$

ここに、 G : 補助汎関数, i : stage番号, j : state番号,

K : あるstage i から次のstage上の点へ到達し得る全ての交点,

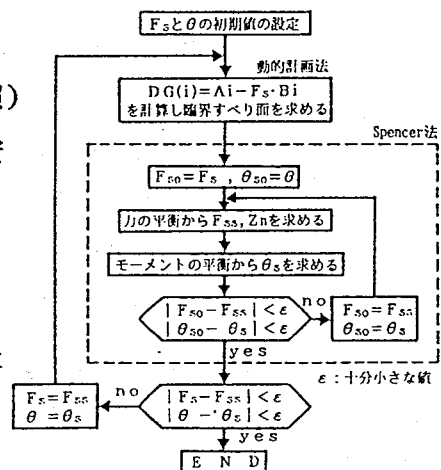
KK_i : stage i における交点数, $D G_i$: 利得値 (図-2参照)

Baker⁶⁾は、モーメントの平衡と力の平衡から得られる全体安全率を各々に定義し、臨界すべり面を求める際には、どちらの安全率を用いても同じ結果が得られるとした上で、モーメントの平衡からの全体安全率から臨界すべり面を求めている。今回用いた方法は、Spencer法(1973)であるため、モーメントの平衡による全体安全率を定義することが難しい。このため、力の平衡から得られる全体安全率に基づき、臨界すべり面を求めた。

図-3に解析の概略流れ図を示す。

3 モデル解析

図-3 解析流れ図



3.1 解析断面、物性値及び解析手順

モデル解析には図-4に示す2つの断面を用いた。断面Ⅰでは一様な地盤構造、断面Ⅱでは地下水を持ち下部に上部に比べ土質強度の大きい地盤を想定した。解析に用いた土質強度を表-1に示す。第1層の粘着力は、現況の断面で、内部摩擦角を表に示す値に固定し安全率が1.0となるよう動的計画法の逆解析で定めた。また、今回の解析では、所定のアンカー力の100%の初期緊張力が導入された状態を想定した。なお、断面Ⅱのアンカー力導入後の臨界すべり面を求める時には、上に凸なすべり面を排除した。

表-1 解析に用いた土塊の単位体積重量と土質強度 単位: tf, m

断面	第1層	第2層
	単位重量	単位重量
断面Ⅰ	1.80	1.50
断面Ⅱ	1.80	1.50
	c'	c'
断面Ⅰ	1.019	—
断面Ⅱ	0.846	1.50
	ϕ'	ϕ'
断面Ⅰ	25°	—
断面Ⅱ	30°	35°

解析は、まず現況断面で臨界すべり面を求め、次に計画安全率を断面Ⅰでは1.50、断面Ⅱでは1.20となるアンカー力を先に計算した臨界すべり面に対して求める。なお、この際、断面Ⅰでは、斜面の下部に5段のアンカーを各々同荷重で打設し、断面Ⅱでは、最下部の6mの斜面に3段の同荷重のアンカー工を打設するとした。また、打設角度は両断面ともに斜面に垂直方向とした。アンカー力が求められた段階で、この荷重を斜面に加えて、アンカー力を考慮した臨界すべり面と全体安全率を求めた。さらに、所定の計画安全率を得るに必要なアンカー力とこの時の臨界すべり面を動的計画法の逆解析により求めた。

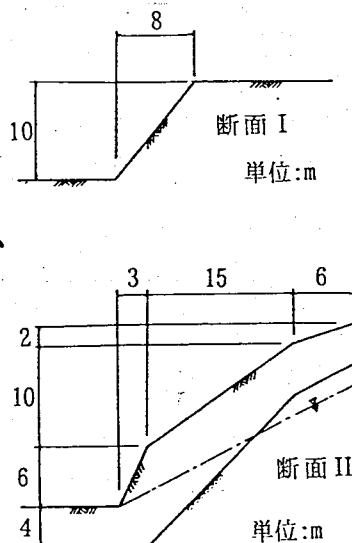


図-4 解析断面

3.2 解析結果

解析結果を図-5及び表-2に示す。断面Ⅰにおいて、アンカー工施工前の臨界すべり面に対する計画安全率が1.50となるアンカー力は、3.59tf/段・mとなったが、同じアンカー力を斜面に与えた時の臨界すべり面はアンカー施工前より0.5~2.5m深い位置に発生し、全体安全率も計画安全率1.50に満たない1.421となった。また、アンカー位置と方向を先の解析と同一とした時の計画安全率1.50が得られるアンカー力は4.44tf/段・mとなって、当初のアンカー力に対して1.24倍が必要となった。また、この時の臨界すべり面は、アンカー施工前より1.0~3.5m深い位置に発生した。

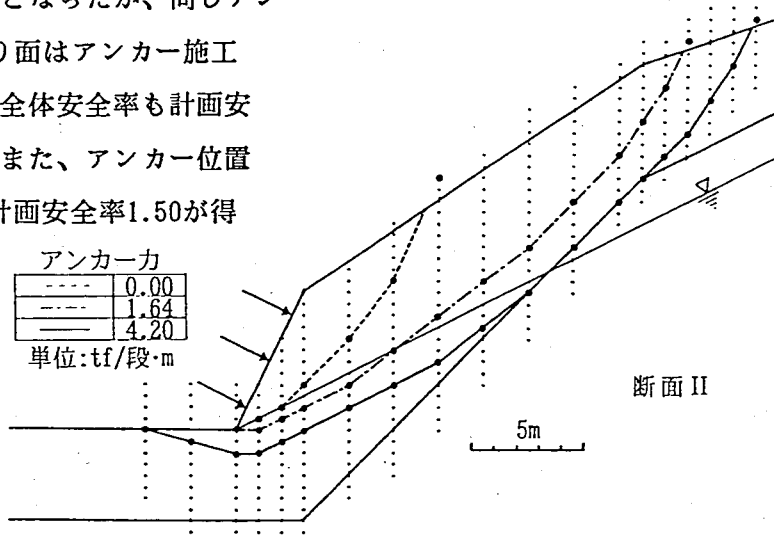
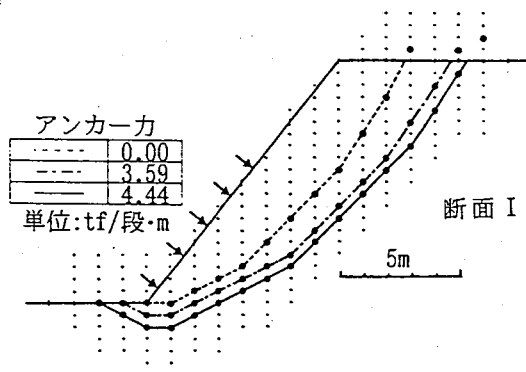


図-5 解析結果 (臨界すべり面)

一方、断面Ⅱにおいて、アンカ

一工施工前の臨界すべり面に対する計画安全率が1.20となるアンカー力は、1.64tf/段・mとなったが、同じアンカー力を斜面に与えた時の臨界すべり面はアンカー施工前の臨界すべり面より0.0～5.0m深い位置に発生し、全体安全率も計画安全率1.20に満たない1.119となった。また、アンカー位置と方向を先の解析と同一とした時の計画安全率1.20が得られるアンカー力は4.20tf/段・mとなって、当初のアンカー力に対して2.56倍が必要となった。また、この時の臨界すべり面は、アンカー施工前より1.0～7.0m深い位置に発生した。

表-2 解析結果

断面	計画安全率	現況臨界面における計画安全率のアンカー力	左のアンカー力による臨界面の安全率	アンカー工打設後の計画安全率のアンカー力
断面Ⅰ	1.50	3.59 tf/段・m * 5段	1.421	4.44 tf/段・m * 5段
断面Ⅱ	1.20	1.64 tf/段・m * 3段	1.119	4.20 tf/段・m * 3段

以上の解析結果を要約すると以下のとおりとなる。①アンカー施工前と施工後とでは臨界すべり面の位置が異なり、後者の方が深い。②アンカー施工前の臨界すべり面を対象にした設計アンカー力とアンカー施工後のそれとは異なり、後者の方が大きい。

4 おわりに

数値解析による検討であるが、今回の結果から「すべり面が形成されていない斜面の安定にアンカー工を計画する場合には、アンカー力を斜面に導入した状態で全体安全率、アンカー定着位置等を検討する必要がある」ことが分る。

また、今回は、100%の所定のアンカー力が初期緊張力として導入された状態を想定したが、一般に初期緊張力は、設計に考慮した機能（引き止め機能、締め付け機能）や構造物の許容変位量等を考慮して定めている。初期緊張力を設計アンカー力より低減して施工した場合の臨界すべり面は、この緊張力に見合うものであるが、土塊の変位のためアンカーに作用する荷重が増加した場合には、変位したすべり面の塑性軟化の程度とも関連し、別な臨界すべり面の発生も考えられる。また、地すべり等の既にすべり面が形成されている斜面において、すべり面の土質強度（残留強度）とすべり面以外の土質強度によっては、アンカー力を斜面に導入することによって、現在のすべり面以外の臨界すべり面の存在が想定される。

<変数の説明>

F ：全体安全率、 θ_n ：n番目のスライスの方側側の内力作用方向、 W_n ：スライス重量、 α_n ：n番目のスライスのすべり面勾配、 U_n ：n番目のスライスに作用する間隙水圧、 P_n ：n番目のスライスの方側側の間隙水圧、 P_{Hn} ：アンカー力の Z_n 方向の分力、 P_{Vn} ：アンカー力のすべり面直角方向の分力、 ϕ'_n ：n番目のスライスのすべり面の内部摩擦角、 c'_n ：n番目のスライスのすべり面の粘着力、 b_n ：n番目のスライスの幅、 P_n ：スライスに作用するアンカー力、 β_n ：スライスに作用するアンカー力の水平方向となす角度、(nは、スライス番号)

<参考文献>

1) 社団法人日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針—pp.213, 1994 2) 山上拓男、山川治：斜面安定工におけるアンカー力の新しい算定法、土と基礎、38-5、pp.51-56 1990 3) 近藤観慈、吉松弘行、植野利康、吉田克美：Spencer法によるアンカー工の設計、第31回地すべり学会研究発表講演集pp.315-318, 1992 4) Spencer, E: Thrust line criterion in embankment stability analysis, Geotechnique, 23, No.1, pp.985-1001, 1973 5) Morgenstern-Price, N.R., Price, E.V.: The analysis of the stability of general slip surface, Geotechnique, Vol.15, No.1, pp.79-93, 1965 6) R.Baker: Determination of the critical slip surface in slope stability computations, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol.4, pp.333-359, 1980 7) Takuo Yamagami, Yasuhiro Ueta: Noncircular slip surface Analysis of the stability of slopes, Journal of Japan Landslide Society Vol.22, No.4, pp.8-16 1986 8) 久保田哲也、中村浩之：臨界すべり面解析と信頼性解析を応用した地すべり・崩壊危険度の判定法、地すべり、Vol.27, No.4, pp.18-25, 1991 9) Spencer, E: A method of analysis of the stability of embankment assuming parallel inter-slice forces, Geotechnique, 17, pp.11-26, 1967