

Morgenstern-Price法に基づく地すべり抑止杭の簡易設計法

山上拓男¹・山川 治²

¹正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2丁目1番地)

²正会員 工修 仁田ソイロック(株) 技術部 (〒771-01 徳島市川内町鈴江西38-2)

本論文は、極限平衡法の立場から地すべり抑止杭の簡易設計法を提案するものである。本設計法は全体として3つの段階から成り立っている。すなわち、抑止力の評価、水平支持力の評価、そして杭体の設計である。本文では最初の2つの段階を取り扱う理論を検討した。その結果、抑止力と水平支持力の両概念を組み合わせることで、杭の打設位置、杭径、打設間隔および安全率を反映した地すべり抑止杭の設計が可能となった。

Key Words: landslide, slope stability, pile, deterrent force, lateral bearing capacity, limit equilibrium method

1. はじめに

抑止杭は地すべり対策工の一つとして広く利用されている。しかし、この工法の設計には少なからず未解決の問題点が残されている。例えば、杭に作用する荷重の算定法、杭の打設位置および打設間隔の決定法等である。本研究の目的は、これら未解決の問題点を極力解消し、論理的で、かつ平易な地すべり抑止杭の設計法を構築することにある。

はじめに我国で慣用的に採られている設計法の問題点を議論したい。従来法では、まず杭の負担すべき抑止力が、簡便分割法の安全率算定式に基づいて次式で評価される¹⁾ (Fig.1参照)：

$$F_0 + \Delta F = \frac{\sum ((W \cos \alpha - u l) \tan \phi' + c' l) + P}{\sum W \sin \alpha} \quad (1)$$

ここに、 F_0 ：すべり面に沿う現状安全率、 ΔF ：抑止杭により高められる安全率の増分、 W ：スライスの重量、 α ：すべり面が水平となす角度、 u ：スライス底面の間隙水圧、 l ：スライス底面の長さ、 ϕ' ：すべり面の内部摩擦角、 c' ：すべり面の粘着力、 P ：杭が負担しなければならない抑止力。式(1)より P は次のように算定される：

$$P = (F_0 + \Delta F) \sum W \sin \alpha - \sum ((W \cos \alpha - u l) \tan \phi' + c' l) \quad (2)$$

そして、この P を負担すべき杭の打設位置は、地すべり土塊の圧縮部の中に適当に決めるといった便法がとられている。

しかし、以上の慣用法には下記のような問題点が指摘

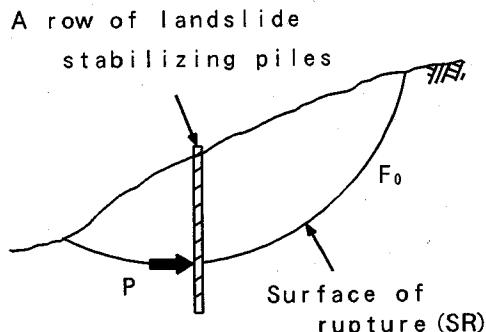


Fig.1 Conventional method

できる：

- 1) 式(1)の持つ物理的意味合いが曖昧である。すなわち、周辺地山と剛性の大幅に異なる抑止杭を設けたとき、その上・下流側の土塊を1本のすべり線で結んだ議論が妥当であろうか？いま、極端な例として、不安定な地すべり運動を生じつつある土塊中に、剛性が無限大で十分強い抑止杭列を施工したものとしよう。すると、抑止杭より上方のすべり土塊は完全に停止し、極めて安定な状態に至るのに対し、下方の土塊は依然として不安定なまますべり運動を続ける可能性が残るのである。いま1つ、式(1)においては抑止力が分子に現れているが、この理論的根拠が希薄である。 P が分子に正の値として現れていることは、この力がせん断抵抗力と同じ働きをすると解釈したことになる。少なくともこの解釈

は杭上流側の土塊に対しては正当化されようが、杭下流側の土塊に対してはまったく当てはまらない。別の言い方をすれば、式(1)に代わって抑止力が分母に負の値として現れてもよさそうである。無論この場合でも依然として曖昧さは解消されないのであるが、いずれにせよ式(1)の意味するところは曖昧の一語につきる。

- 2) 式(2)で与えられる抑止力は杭打設位置にかかわらずすべり面に沿って一定となる。元来、抑止力は打設位置の関数となるべきである。
- 3) 円形、非円形すべり面にかかわらず式(1)が適用されている。
- 4) 式(1)または式(2)は杭の列数に関して何ら言及していない。
- 5) 杭が式(2)で与えられる抑止力を現実に発揮し得るか否かの検討が行われていない。

本論文は、現行設計法にまつわる上記の如き問題点を解消し、論理的かつ簡便な抑止杭の設計法を提案せんとするものである。この方法によれば、2次元極限平衡法の枠組み内で杭列が負担すべき抑止力と、この抑止力を発揮し得る杭の径と打設間隔を決定することが可能となる。ただし、本文で対象とする杭の役割は、ある与えられた既存のすべり面に沿う安全率を、現状のそれから、一定の計画値(目標値)まで高めようとするものであつて、斜面全体の安全率を高めようとするものではない。

斜面に杭が打設された状況は純粹に3次元の様相を呈する。著者らは3次元の有限要素法あるいは境界要素法のみがこの問題に関する厳密な解を与えると考える。しかし、3次元数値解析を行うことは時期尚早であろう。なぜなら、この解析は大変複雑であることに加え、より決定的な問題点として、斜面を構成する地山の構成則がまだ十分には確立されていないためである。したがって現時点では、本文で議論するような2次元問題としての取扱いに頼らざるを得ない。よって、現行設計法の欠点を解消する、より論理的で簡便な、2次元極限平衡法としての設計手法を提案することは非常に有意義であると考える。

2. 提案法の概要

筆者らが提案する抑止杭の設計手順は次の3段階で成り立っている：

第1段階：

杭列によって安全率を目標値まで高める際、1本の杭が負担しなければならない抑止力 F_D の評価。 F_D は、言い換えると、目標安全率(or 計画安全率)のもとで、杭に作用する外力の大きさを意味する。 F_D と単位奥行き当たりの抑止力 \bar{P}_D との関係は次式より得られる：

$$F_D = \bar{P}_D \cdot D_1 \quad (3)$$

ここに、 D_1 は杭中心間隔。

第2段階：

杭が周囲地盤の破壊を引き起こすことなく発揮することができる限界の荷重 F_R の評価。荷重 F_R は言わば杭の水平極限支持力とでも呼ぶべき力である。 F_R も次式で単位奥行き当たりの荷重 \bar{P}_R に変換できる：

$$\bar{P}_R = F_R / D_1 \quad (4)$$

第3段階：

杭体の詳細設計。

いま、仮に $F_D > F_R$ なる状況を想定してみよう。このことは、杭列が、現実に発揮することのできる荷重よりも大きい荷重に耐えねばならないことを意味する。あるいは杭周辺地盤が、それが支持できる力よりも大きな力を杭に伝達しなければならないことを意味すると解釈してもよい。もちろん、実際にはこうしたことは不可能である。この状況下では、たとえ杭自体は安定であっても、杭周辺土塊は塑性崩壊をおこし杭間を流下するであろう。いわゆる中抜け現象である。したがって、実設計に際しては杭径と杭打設間隔が $F_R \geq F_D$ となるように設計しなければならない。もちろん $F_R = F_D$ とするのが最適である。次いで、この荷重に対して必要となる杭長、杭材質の強度等を決定するのである。このように、全体としての設計はこれら3段階を経て完成するのであるが、本文では第1および第2段階に注目して、 F_D と F_R の評価法を述べる。さらに、両段階における理論を組み合わせて、杭の打設位置に関する選定基準をも提案するものである。

本研究では、 F_D の評価法として著者らが提案してきた抑止力簡便評価法^{2),3)}を用いる。この方法では目標安全率に見合う抑止力が杭の列数、打設位置に応じて算定される。一方、 F_R の評価法として、伊藤・松井の塑性変形理論⁴⁾を採用する。伊藤・松井理論では、杭間の土塊は塑性平衡状態にあると仮定されている。そこで、 F_D の簡便評価法との整合性を図るべく、伊藤・松井理論に安全率を導入する。これにより、杭径、打設間隔および安全率に相応した F_R が評価される。そして $F_R \geq F_D$ を満たすことにより合理的な地すべり抑止杭の設計が可能となる。

3. Morgenstern-Price 法に基づく抑止力評価法

(1) 基本概念

ここでは筆者らが提案してきた抑止力簡便評価法の概要を述べる。この方法は極限平衡法の枠組みの中で抑止力を合理的に求める手法であり、特徴的な2つの基本概念で構成されている。1つはFig.2に示すように、『杭

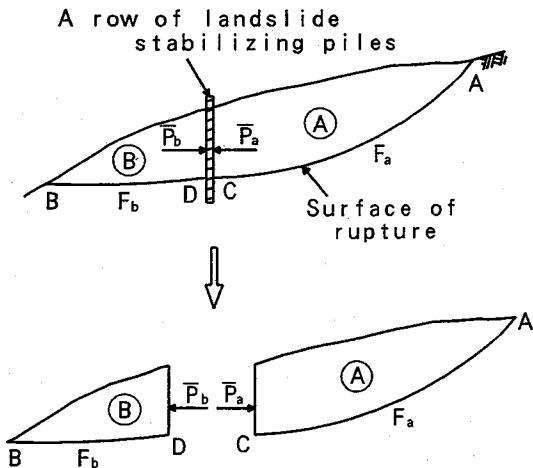


Fig.2 Basic principles of the proposed method for the landslide stabilizing piles

を境として、その上流側と下流側のすべり土塊はそれぞれ異なる安全率 F_a , F_b を持ち得ると考える』ことである。このとき、 F_a , F_b は当然のことながら未知量となる。そこで第2の基本概念は、これら未知量としての F_a , F_b を直接計算によって求めようとするのではなく、逆に『 F_a , F_b の値（計画安全率 or 目標安全率）をデザイナーが指定し、実際にこれら安全率の値が確保されるためには、杭はどれだけの強さ（規模）のものでなければならないか？』といった設計法を探ることである。そして、杭と上・下流側すべり土塊との相互作用力を外力とみて、それらの水平成分を \bar{P}_a , \bar{P}_b で表し、これらを F_a , F_b の算定式に導入する。ただし、この外力はすべり土塊の土被り高さの下三分の一地点に作用すると仮定する。これより、計画安全率は既知であるので、上記の \bar{P}_a , \bar{P}_b が求まり、必要抑止力は、

$$\bar{P}_d = \bar{P}_a - \bar{P}_b \quad (5)$$

ただし、

$$\bar{P}_a > 0, \bar{P}_b \geq 0 \quad (6)$$

として算定される。

本手法は杭の打設位置に応じた抑止力を明確に評価できる点に最大の特徴を有する。しかも、杭列が2列以上であってもなんら問題はなく、それぞれの位置に見合った必要抑止力を算出できる。なお、この方法では F_a , F_b の値をデザイナーが指定して、それに見合う抑止力を評価するのであるが、このとき $F_a = F_b$ とするのが最も好都合である。目標安全率を杭の上・下流側で等しくなるよう設定して抑止力を算定すると、この抑止力は上述したように打設位置の関数であるため、杭の打設位置の評価にもつながり得るからである。

本文で用いた理論式は非円形すべりを対象とした

Morgenstern-Price法である。以下、杭列が1列の場合と複数打設される場合の抑止力評価法を議論する。

(2) 抑止杭が1列の場合

Morgenstern-Price法ではスライス間の水平推力 E_i が次式で評価される^{5), 6)}：

$$E_i = \frac{1}{K_i \cdot b_i + L_i} \left(\frac{N_i b_i^2}{2} + P_i b_i + L_i E_{i-1} \right) \quad (7)$$

$$(i=1, 2, \dots, n)$$

ただし、

$$K_i = \lambda k_i \left(\frac{\tan \phi'}{F_s} + A_i \right) \quad (8)$$

$$L_i = \lambda m_i \left(\frac{\tan \phi'}{F_s} + A_i \right) + 1 - A_i \frac{\tan \phi'}{F_s} \quad (9)$$

$$N_i = p_i \left\{ \frac{\tan \phi'}{F_s} + A_i - r u_i (1 + A_i^2) \frac{\tan \phi'}{F_s} \right\} \quad (10)$$

$$P_i = \frac{c'}{F_s} (1 + A_i^2) + q_i \left\{ \frac{\tan \phi'}{F_s} + A_i - r u_i (1 + A_i^2) \frac{\tan \phi'}{F_s} \right\} \quad (11)$$

λ ：未知定数、 k_i 、 m_i ：スライス間力関数 $f(x)$ がスライス内では直線的に変化すると仮定したときの定数で、 $f(x) = k_i x + m_i$ である。 F_s ：すべり面に沿う安全率であり、ここでは抑止力算定期にデザイナーが目標値として与えるものである。 A_i ：すべり面の傾きで、 $A_i = \tan \alpha_i$ である。 dw ：スライスの重量、 p_i 、 q_i ： dw/dx がスライス内で直線的に変化すると仮定したときの定数で、 $dw/dx = p_i x + q_i$ である。 $r u_i$ ：隙間水圧比、 b_i ：スライスの幅、 n ：スライス分割数。

さて、Fig.2に示す杭と下流側土塊との相互作用力 \bar{P}_b を評価するため、以下の反復計算を行う。

①まず、既知の値 E_0 （通常 $E_0 = 0$ ）と、仮定された未知定数 λ_0 を用いて、式(7)により順次スライス間水平推力 E_i を算定し、杭打設位置における E_i を \bar{P}_b の第1近似値 \bar{P}_{b0} とする。

②同時に、スライス底面中央点に関するモーメントの釣合式、式(12)，に基づいて M_i の値を $M_0 = 0$ から出発して順次算定する：

$$M_i = M_{i-1} + \frac{b_i}{2} [(\lambda (k_i b_i + m_i) - A_i) E_i + (\lambda m_i - A_i) E_{i-1}] \quad (12)$$

そして、杭打設位置における M_i の値、 M_b 、と上記 \bar{P}_b の第1近似値 \bar{P}_{b0} に基づくモーメントの大小関係を比較する：

$$M_b : \bar{P}_{b0} \cdot h_b / 3 \quad (13)$$

ここに、 h_b ：杭打設位置における土被り高さ。もし、両辺の値が許容値内で一致していないければ新たに λ を仮定し直し、最初のステップ（上記①）に戻る。そして、この過程を両者が等しくなるまで繰り返す。上流側土塊に対しても同様に、スライス間水平推力と

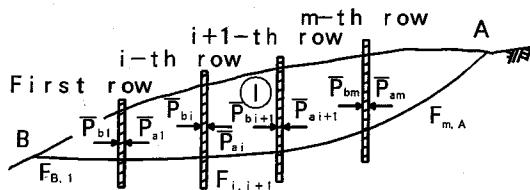


Fig.3 Multiple rows of piles

スライス底面中央点に関するモーメントの釣合を満足するよう反復計算を行う。

③まず、仮定された値 \bar{P}_{a0} と λ_0 (\bar{P}_a と λ の第一近似値) を用いて式(7)により順次 E_i を算定し、土塊右端における E_{n0} を求める。ここに、杭打設位置における E_i は \bar{P}_a の第一近似値 \bar{P}_{a0} を用いる。土塊右端においては E_n は既知（通常 $E_n=0$ ）であるので、次式によりスライス間水平推力に関する誤差の判定を行う：

$$E_{n0} : E_n \quad (14)$$

④もし、両辺の値が許容誤差内で一致していなければ λ_0 の値は変化させず、 \bar{P}_a のみを仮定し直し (\bar{P}'_{a0} とおく)，最初のステップ③に戻る。そして、式(14)が満たされるまでこの過程を繰り返す。

⑤式(14)が満たされると、次に、

$$M_{i0} = \bar{P}'_{a0} \cdot h_a / 3 \quad (15)$$

から出発して、式(12)により順次 M_i を算定し、土塊右端におけるモーメント M_{n0} を求める。ここに、 h_a ：杭打設位置における土被り高さ、右端においては M_n は既知（テンションクラック内の水圧等がなければ通常 $M_n=0$ ）であるので、次式によりモーメントに関する誤差判定を行う：

$$M_{n0} : M_n \quad (16)$$

両辺の値が許容誤差内で等しくなければ、新たに λ_0 の値を仮定し直し、最初のステップ③、つまり式(14)を満たすための反復過程、に戻る。このとき、 \bar{P}_a の値として \bar{P}'_{a0} を用いる。

こうして、以上の過程を式(16)に関する誤差が許容値内に収まるまで継続すればよい。反復過程の結果、最終的に得られる \bar{P}_a 、 \bar{P}_b を式(5)に代入することで杭が負担すべき抑止力 \bar{P}_D を評価することができる。なお、これらの反復手順は Morgenstern—Price 法で安全率を算定する際のそれと基本的に同じものである。

(3) 杭列が複数の場合

Fig.3 に示す第 i 列の杭が負担すべき抑止力は次式で示される：

$$\bar{P}_{Di} = \bar{P}_{ai} - \bar{P}_{bi} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (17)$$

ただし、

$$\bar{P}_{ai} > 0, \bar{P}_{bi} \geq 0 \quad (18)$$

ここに、 m は杭の列数であり、斜面下方から順次番号付けがなされているものとする。いま、問題を静定化するため、各杭列が負担すべき抑止力について次式の比例関係を仮定する：

$$\bar{P}_{Di+1}/\bar{P}_{Di} = \beta_i \quad (i=1, 2, \dots, m-1) \quad (19)$$

ここに、 β_i は比例定数であり、抑止力算定時には前もって与えられるものとする。もし、各杭列の抑止力が相等しくなるような設計を行おうとする場合にはすべての i について $\beta_i=1$ とすればよい。いずれにせよ各杭列の相互作用力には次の関係が成立立つ：

$$\beta_i (\bar{P}_{ai} - \bar{P}_{bi}) = \bar{P}_{ai+1} - \bar{P}_{bi+1} \quad (i=1, 2, \dots, m-1) \quad (20)$$

まず、第 1 杭列より下流側のすべり土塊および第 m 杭列より上流側のすべり土塊については、1 杭列の場合と全く同じ手順で相互作用力 \bar{P}_{bi} 、 \bar{P}_{am} を算定すればよい。

一方、第 i 杭列と第 $i+1$ 杭列間のすべり土塊①に対する相互作用力 \bar{P}_{ai} 、 \bar{P}_{bi+1} は次の手順で評価される。

①まず、仮定された未知定数 λ および \bar{P}_{ai} を用い、式(7)によりスライス間水平推力 E_i を順次算定する。そして、土塊①右端における E_i を \bar{P}_{bi+1} の第一近似値とみなす。この場合、第 1 杭列と第 m 杭列の間で \bar{P}_{ai} と \bar{P}_{bi+1} の組みが $m-1$ 組得られる。

②次に、こうして求められた \bar{P}_{bi+1} および仮定値 \bar{P}_{ai} が式(20)の関係を満たしているか否かの判定を行う。もし、式(20)が満たされていなければ、ステップ①に戻り、 λ の値は変化させず、 \bar{P}_{ai} のみ仮定し直し \bar{P}_{bi+1} を再度評価する。この過程を式(20)の関係が許容値内で満たされるまで繰り返す。

③さらに、こうして定められた \bar{P}_{ai} を出発点として、スライス底面中央点に関するモーメントを、式(12)により順次計算し、土塊①右端におけるモーメント M_k を算定する。そして、次式によりモーメントに関する誤差判定を行う：

$$M_k : \bar{P}_{bi+1} \cdot h_k / 3 \quad (21)$$

ここに、 h_k ：土塊①右端における土被り高さ。もし、両辺の値が許容誤差内で一致しなければ新たに入を仮定し直し、最初のステップ①に戻る。そして、この過程を式(21)が満たされるまで順次繰り返すのである。

こうして算出された相互作用力 \bar{P}_{ai} 、 \bar{P}_{bi} を式(17)に代入することで各杭列が負担すべき抑止力を決定することができる。

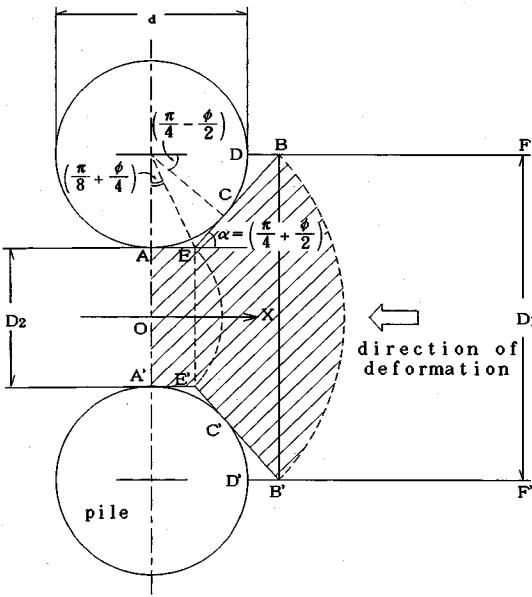


Fig.4 State of plastic deformation in the ground just around piles (after Ito and Matsui, 1975)

4. 杭の水平支持力の評価

伊藤・松井理論では杭は剛体と仮定され、地すべり土層単位深さ当たり一本の杭に作用する側方土圧 $P(z)$ が次式で求められる：

$$\begin{aligned}
 P(z) = & c D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right) (N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1) \\
 & \times \left[\frac{1}{N_\phi \tan \phi} \left\{ \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. - 2N_\phi^{1/2} \tan \phi - 1 \right\} + \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} \right] \\
 & - c \left\{ D_1 \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} - 2D_2 N_\phi^{-1/2} \right\} \\
 & + \frac{\gamma z}{N_\phi} \left\{ D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right) (N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1) \right. \\
 & \left. \times \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - D_2 \right\} \quad (22)
 \end{aligned}$$

ここに、 $N_\phi = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$ 、 D_2 は杭の純間隔 (Fig.4 参照)、 c や ϕ は地すべり土の粘着力および内部摩擦角、 γ は地すべり土の単位重量、 z は地表面からの深度である。式 (22) は杭間の土塊は塑性平衡状態にあるとの仮定のもとに導かれたものである。これに対して、本文では、極限状態ではなく、抑止力評価の場合と同様、安全率が見込まれた水平支持力を評価しなければならない。この場合、式 (22) で得られる側方土圧の値を安全率で除することが考えられる。しかし、抑止力評価はせん断強さに関する安全率に基づくため、これとの整合性

を図るには次式により安全率 F_s を導入する方法が望ましい：

$$\bar{c} = \frac{c}{F_s}, \tan \bar{\phi} = \frac{\tan \phi}{F_s} \quad (23)$$

\bar{c} 、 $\bar{\phi}$ を用いて式 (22) と同じ誘導過程を経れば次式が得られる：

$$\begin{aligned}
 \bar{P}(z) = & \bar{c} D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right) (\bar{N}_\phi^{1/2} \tan \bar{\phi} + \bar{N}_\phi - 1) \\
 & \times \left[\frac{1}{\bar{N}_\phi \tan \bar{\phi}} \left\{ \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} \bar{N}_\phi \tan \bar{\phi} \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\bar{\phi}}{4} \right) \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. - 2\bar{N}_\phi^{1/2} \tan \bar{\phi} - 1 \right\} + \frac{2 \tan \bar{\phi} + 2\bar{N}_\phi^{1/2} + \bar{N}_\phi^{-1/2}}{\bar{N}_\phi^{1/2} \tan \bar{\phi} + \bar{N}_\phi - 1} \right] \\
 & - \bar{c} \left\{ D_1 \frac{2 \tan \bar{\phi} + 2\bar{N}_\phi^{1/2} + \bar{N}_\phi^{-1/2}}{\bar{N}_\phi^{1/2} \tan \bar{\phi} + \bar{N}_\phi - 1} - 2D_2 \bar{N}_\phi^{-1/2} \right\} \\
 & + \frac{\gamma z}{\bar{N}_\phi} \left\{ D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right) (\bar{N}_\phi^{1/2} \tan \bar{\phi} + \bar{N}_\phi - 1) \right. \\
 & \left. \times \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} \bar{N}_\phi \tan \bar{\phi} \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\bar{\phi}}{4} \right) \right) - D_2 \right\} \quad (24)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\bar{N}_\phi = \tan^2(\pi/4 + \bar{\phi}/2)$ である。

そして、次式により杭の水平支持力 F_R が得られる：

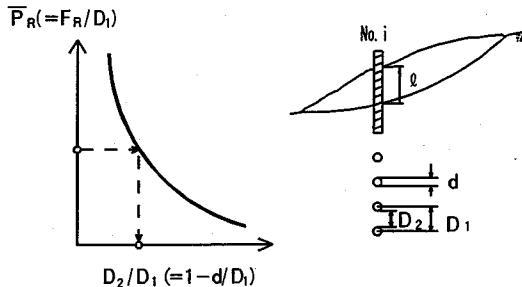
$$F_R = \int_0^l \bar{P}(z) dz \quad (25)$$

ここに、 l は杭の有効長すなわちすべり面より直上の地表面までの高さである。式 (25) により、与えられた安全率および杭径、打設間隔のもと、杭周辺地山が破壊することなく杭に伝える荷重、つまり杭の水平支持力の評価が可能となった。

5. 杭打設位置の選定

本章では、杭の打設位置の選定基準について述べる。もし、杭の打設位置にかかわらず同じ計画安全率が得られるならば、最も好ましい杭の打設位置とは最も経済的な打設位置を意味する。すなわち、杭径、杭長および打設間隔等を考慮して、最も経済的な位置が最適な打設位置となるはずである。しかし、最も経済的な打設位置を選定し得る普遍的な基準を設けることは極めて困難か、あるいはほとんど不可能に近い。なぜなら、個々の地すべり地ごとにそれ特有の経済的な環境を支配する種々の要因が存在するからである。例えば、仮設費や削孔費などは全体の工事費を左右する重要な要因であるが、これらは地すべり地ごとに異なる値をとり得るものである。そこで、ここでは議論を一般化するために、個々の地すべり地に特有な要因は除外して考察を進めることとする。

そうすると、杭の打設位置にかかわらず同じ計画安全率が達成されるならば、杭打設位置の選定に関して次の4つの事項を認めることができる：



(a) Relationship between the lateral bearing capacity and the ratio D_2/D_1 at an arbitrary piling location No. i for a given, objective factor of safety
 (b) A row of piles placed at location No. i

Fig.5 Schematic explanation of how to determine the ratio d/D_1

- 1) 必要抑止力 \bar{P}_D は小さければ小さい程好ましい。
- 2) 必要杭長 l は短ければ短い程好ましい。
- 3) 必要杭中心間隔 D_1 は大きければ大きい程好ましい。
- 4) 必要杭径 d は小さければ小さい程好ましい。

いま、上記 3) と 4) を結び付けるため、新しいパラメータ d/D_1 を導入する。すると、伊藤・松井理論を介して、このパラメータは事項 1) の必要抑止力 \bar{P}_D と密接に関係していることが知られる。したがって、上記 4 つのパラメータの内 l と d/D_1 のみが独立変数として残る。そこで、杭打設位置の選定基準を与える新しいパラメータ \overline{OP} を

$$\overline{OP} = l \cdot \frac{d}{D_1} \quad (26)$$

と定義する。明らかに、最適な打設位置は \overline{OP} が最小となる地点である。

伊藤・松井理論に基づき式 (26) における d/D_1 を決定する過程を Fig.5 に示す模式図を用いて説明しよう。

Fig.5 (a) に示す曲線は、ある与えられた計画安全率に対する任意の杭打設位置 No. i における水平支持力 \bar{P}_R と $D_2/D_1 (= 1 - d/D_1)$ の関係を示している。 \bar{P}_R は式 (25) より得られる F_R を D_1 で除することで求められるが、この値が D_1 あるいは D_2 の絶対値に関係なく、 D_2/D_1 のみの関数として決定される事実は興味深い。縦軸上の○印で示された点は打設位置 No. i における杭が目下の計画安全率を確保する上で必要となる抑止力 \bar{P}_D を表す。この曲線より横軸上の○印で示される点の座標を読み取ることで $d/D_1 (= 1 - D_2/D_1)$ が容易に決定される。このように、1列杭に対する d/D_1 があらゆる打設位置で定められ、直ちに \overline{OP} を算定することができる。

杭列が複数の場合、 \overline{OP} の定義は式 (26) に代わり、次式とすべきである：

$$\overline{OP} = \sum_{i=1}^m l_i \left(\frac{d}{D_1} \right) \quad (27)$$

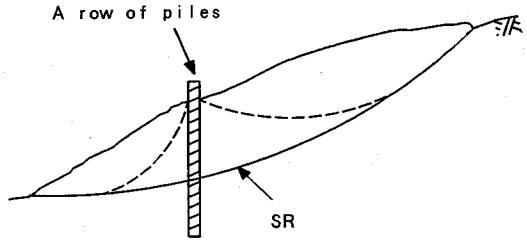


Fig.6 Confirming the stability of each soil mass above and below the pile row

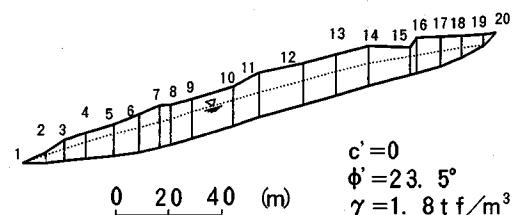


Fig.7 Example problem : the Shimojizoji landslide in Japan

ここに、 m は杭の列数である。

なお、実設計に際しては、杭の上・下流側において、それぞれの土塊の安定性を評価しておかねばならない (Fig.6 参照)。つまり、杭列の両側で各々安定解析を行い、それらの最小安全率がある許容値を越えていることを確認する必要がある。もし、パラメータ \overline{OP} の見地から最適な打設位置であったとしても、杭列の上・下流側斜面における安定解析が不満足な結果をもたらすならば、杭をその位置に打設すべきでないことは自明であろう。

6. 適用例

本手法を Fig.7 に示す下地蔵寺地すべり地⁷⁾へ適用した。図中、地表面の数字は安定解析におけるスライス分割線番号を表すが、それらはまた後に杭の打設位置を示す番号としても用いられる。地山の土質定数は図中に示す。また、地下水位を破線で表すが、その上下における土塊の単位重量は区別することなくいずれも 1.8 tf/m^3 としている。すべり面に沿う現状安全率 F_0 は Morgenstern-Price 法で 1.03 であった。そこで、計画安全率を 1.05 から 1.25 までいくつか設定し、それらの値まで安全率を高める際必要となる抑止力を評価した。杭列は 1 列および 2 列である。ただし、 $F_a = F_b$ あるいは $F_{B,1} = F_{1,2} = F_{2,A}$ を仮定した。

(1) 1列杭に対する検討結果

まず、杭が負担すべき抑止力の算定結果について述べ

Table 1 Results obtained from the proposed method based on the M.-P. method
(Single row of piles; $F_a = F_b = 1.2$)

L	\bar{P}_a (tf/m)	\bar{P}_b (tf/m)	\bar{P}_d (tf/m)	ℓ (m)	d/D_1	$\bar{O}P$
2	151.86	7.38	144.48	4.10	0.72	2.95
3	160.90	17.43	143.47	8.00	0.55	4.38
4	177.24	34.62	142.62	10.00	0.47	4.67
5	204.80	62.92	141.88	12.20	0.39	4.76
6	223.24	81.44	141.80	14.70	0.32	4.68
7	222.65	80.36	142.29	16.40	0.28	4.54
8	218.10	75.17	142.93	15.42	0.30	4.65
9	201.39	57.88	143.51	15.30	0.31	4.67
10	158.37	13.67	144.70	15.10	0.31	4.71
11	130.11	—	14.00			
12	110.37	—	34.01			
13	93.78	—	50.68			
14	72.39	—	72.26			
15	59.43	—	85.41			
16	57.18	—	87.99			
17	51.78	—	93.54			
18	29.27	—	115.17			
19	8.46	—	135.20			

L : Location of the row of piles
 \bar{P}_a : Deterrent force
 ℓ : Thickness of soil layer above the SR
 d : Diameter of piles
 D_1 : Center-to-center distance of piles
 $\bar{O}P = \ell \cdot d / D_1$

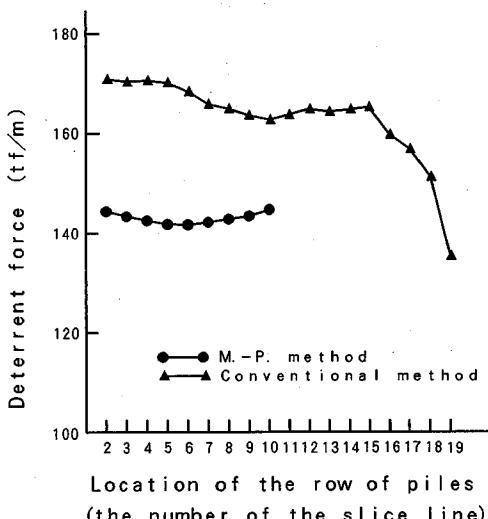


Fig.8 Variations of the deterrent force according to the location of the single row of piles

る。本適用例では目標安全率をいくつか設定して検討を行ったが、ここでは紙面の都合上、一例として $F_a = F_b = 1.2$ の場合の抑止力算定結果のみを **Table 1** および **Fig.8** に整理した。これらの結果は、本適用例では杭の打設位置による抑止力の絶対値の変化は小さいが、提案法が抑止力を杭打設位置の関数として明確に評価し得ることを示している。また、**Table 1**において、 \bar{P}_b の値が打設位置 No. 11 より上流側で全て負値であることに注目されたい。これは実際問題として抑止杭をこれらの範

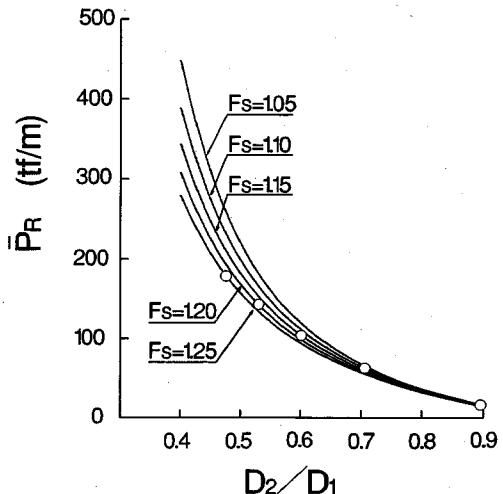


Fig.9 Relationship between the lateral bearing capacity and D_2/D_1 for each objective factor of safety at the pile location No.4

間に打設してはならないことを意味するものである。

Fig.8 には慣用法に基づく抑止力も示されている。慣用法では式(2)において $F_0 + \Delta F$ を 1.2 とおくことにより、 P が 171.5 tf/m と求まる。この力はすべり面に平行に働くと仮定されているが、**Fig.8** に示した値はそれの水平成分である。慣用法に基づく抑止力は、地すべり頭部近くの一部を除いて、提案法で得られた抑止力よりもかなり大きいが、この傾向は本適用例以外にも著者らが手掛けた問題すべてにおいて認められている。もっとも、この事実から直ちに慣用法が常に過大で不経済な設計につながると断定されるものではない。第2章でも述べたように、ここでは杭体の詳細設計法については何ら言及しないが、慣用法が不経済な設計になるか、あるいは危険側の設計になるかはひとえに杭体自身の設計法に強く依存するものである。

次に、杭の打設位置の選定について述べる。**Table 1**において、 $\bar{O}P$ の最小値は No. 2 の位置に現れている。したがって、杭の上・下流側において新たなすべりの可能性が無ければ、この位置が最も好ましい打設位置となる。もし、何らかの制約でこの位置 ($L=2$) に杭が打設できなければ、 $\bar{O}P$ が次に小さい位置、No. 3 ($L=3$) を選ぶべきである。このように、パラメータ $\bar{O}P$ は杭の打設位置の選定に際して明確な基準を与えるものである。

Fig.9 に示す曲線は、一例として杭が No. 4 ($L=4$) の位置に打設された場合の、各々の計画安全率のもとでの、伊藤・松井理論に基づく水平支持力と D_2/D_1 ($= 1 - d/D_1$) の関係を示している。先に **Fig.5** と関連して少し触れたように、単位奥行き当たりの水平支持力 \bar{P}_k

Table 2 The positions for piling at which the value of \bar{OP} becomes smallest

Objective factor of safety	L
1.05	7
1.10	7
1.15	2
1.20	2
1.25	2

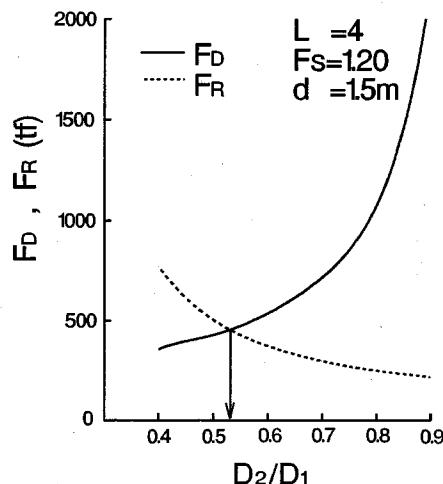
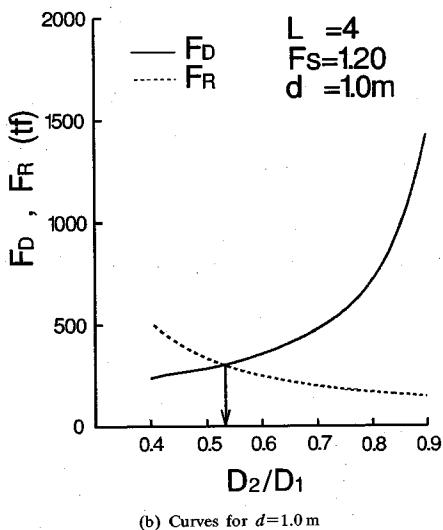


Fig.10 Examples of F_D or F_R vs. D_2/D_1 relationship for $F_s = F_a = F_b = 1.2$

と D_2/D_1 の関係は、すべり土塊の強度定数、単位重量および杭の有効長が等しければ杭径によらず同一となる。各々の曲線上の○印が与える縦軸の値は同じ位置 (L)

Table 3 Results obtained from the proposed method based on the M.-P. method
(Two rows of piles; $F_{B,1} = F_{1,2} = F_{2,A} = 1.2$)

L_1	L_u	$\bar{P}_{o,1}$ (tf/m)	$\bar{P}_{o,1}$ (tf/m)	$\bar{P}_{o,1}$ (tf/m)	$\bar{P}_{o,2}$ (tf/m)	$\bar{P}_{o,2}$ (tf/m)
2	11	79.52	7.38	72.14	130.11	57.80
3	11	89.16	17.43	71.73	130.11	58.41
4	11	105.92	34.62	71.30	130.11	58.77
5	11	133.86	62.92	70.94	130.11	59.15
6	11	152.34	81.44	70.90	130.11	59.37
7	11	151.31	80.36	70.95	130.11	59.01
8	11	146.45	75.17	71.28	130.11	58.65
9	11	129.47	57.88	71.59	130.11	58.33
10	11	86.02	13.67	72.35	130.11	57.82
11	11					72.29
12	18					

$(\bar{P}_{o,1} < 0.0)$

L_1 : Location of the lower row of piles
 L_u : Location of the corresponding upper row of piles
at which the parameter \bar{OP} becomes smallest
 $\bar{P}_{o,1}, \bar{P}_{o,2}$: Deterrent force

=4) における杭が負担すべき抑止力を表している。例えば、計画安全率が 1.2 (すなわち, $F_o = F_b = 1.2$) の場合、 $D_2/D_1 = 1 - d/D_1 = 0.53$ であり、したがって $d/D_1 = 0.47$ となる。この値が Table 1 において、 $L=4$ の対応する欄に示されている。

Table 2 には本解析において採用されたすべての目標安全率に対して \bar{OP} が最小となる杭の打設位置を一括して示した。

Fig.10 は前述の議論を別の形で表現したものである。縦軸は杭 1 本当たりの抑止力 F_D あるいは水平支持力 F_R 、横軸は D_2/D_1 である。これらの関係を表す曲線は杭の直径ごとに異なることに注意されたい。同図より、ある与えられた目標安全率のもとで、2つの曲線、すなわち F_D と D_2/D_1 、及び F_R と D_2/D_1 関係曲線が交わる点の横座標は杭径 d に関係なく一定となる興味深い事実が読み取れる。この場合、それぞれの交点の左側 ($F_R \geq F_D$) が設計上許される範囲であるが、第 2 章でも述べたように交点 ($F_R = F_D$) に対する設計が、安全性と経済性の観点から最も好ましいものとなる。

(2) 2列杭に対する検討結果

次に、抑止杭が 2 列打設される場合を検討した。このとき、 $F_{B,1} = F_{1,2} = F_{2,A}$ という条件のもと、いくつかの目標安全率に対して解析を行ったが、ここでもまた目標安全率が 1.2 の場合のみ、その結果を示す。解析に際しては静定化の条件として、式 (19) におけるすべての i について $\beta_i = 1$ とした。すなわち各々の杭列が負担すべき抑止力は相等しいと仮定した。解析の手順を以下に述べる：

まず、Fig.7において、下流側の杭をスライス分割線 No. 2 に打設する。このとき上流側の杭は No. 3 から No. 19 まで打設可能なので、それぞれの位置に打設した場合の必要抑止力を評価し、さらに式 (26) で定義さ

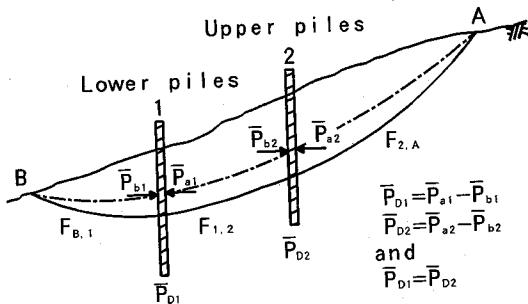


Fig.11 Schematic explanation of the notations in Table 3

Table 4 The most desirable locations of piles in two rows

Lower row of piles		Upper row of piles		Index for desirable position of piling
L_i	\bar{OP}_i	L_u	\bar{OP}_u	$\bar{OP} = \bar{OP}_i + \bar{OP}_u$
2	2.63	11	2.67	5.30
3	3.39	11	2.65	6.04
4	3.34	11	2.64	5.98
5	3.15	11	2.63	5.78
6	2.90	11	2.62	5.52
7	2.69	11	2.63	5.32
8	2.82	11	2.64	5.46
9	2.84	11	2.65	5.49
10	2.89	11	2.67	5.56
11				
12				$(\bar{P}_{b1} < 0.0)$
13				
14				
15				
16				
17				
18				

れる \bar{OP} を算定する。そして、これら各点の \bar{OP} の内でその値が最小となる杭の位置を下流側の杭 (No. 2) に対する上流側の杭の位置とする。以下同様に、下流側杭を No. 3 の位置から No. 18 まで順次移動させて、それぞれの位置に対して \bar{OP} の最小値を与える上流側杭の打設位置を求めた。それらの結果を Table 3 に整理した。左から 2 番目のコラムが \bar{OP} が最小となる上流側杭打設位置 (今の場合たまたますべて No. 11) を表している。Table 3 における他の記号の意味は Fig.11 に模式的に説明されているので参照されたい。Table 3 から、本手法では杭列が 2 列であっても 1 列杭の場合と同様杭の打設位置に応じた抑止力が評価できていること、あるいは杭の打設可能な範囲を限定できることなどが分かる。

Table 4 は杭が 2 列打設されるとき、最も好ましい打設位置を特定するために示したものである。 L_i と L_u はそれぞれ下流側杭と上流側杭の打設位置を、また、 \bar{OP}_i と \bar{OP}_u はそれぞれの位置での式 (26) で与えられる \bar{OP} の値を表している。最適な打設位置は式 (27) で得られる $\bar{OP} = \bar{OP}_i + \bar{OP}_u$ が最小となる位置である。したがって、本適用例ではそれらは $L_i = 2$ と $L_u = 11$ になる。もしなにかの理由でこれらの位置に打設できなければ、次は $L_i = 7$ と $L_u = 11$ を選べばよい。

7. 結論

本論文は、極限平衡法の立場から地すべり抑止杭の簡易設計法を提案したものである。本設計法は全体として 3 つの段階から成り立っている。すなわち、抑止力の評価、水平支持力の評価、そして杭体の詳細設計である。本文では最初の 2 つの段階を取り扱う理論を検討した。この理論に従えば、計画安全率を確保するため必要となる抑止力が杭の打設位置に応じて評価でき、さらにこの抑止力を負担し得る杭の径と打設間隔を決定することができる。

抑止力評価の中心となる概念は、杭の両側におけるすべり土塊においてそれぞれ異なる安全率が出現すると考えることである。この考えに従うと、極限平衡法の枠組み内で抑止力算定式を導くことが可能となる。本文では非円形すべり面場を想定し Morgenstern-Price 法の援用のもと、抑止力算定過程を展開した。

次に、受働杭の水平支持力を与える伊藤・松井の塑性変形理論を用いて、与えられた目標安全率のもとに、杭の配置を決定する一方法を提案した。さらに、抑止力と水平支持力の両概念を組み合わせることで、杭の打設位置に関する選定基準も定義した。

適用例をとおして得られた結論は次のようである：

- 1) 提案法は打設位置の明確な関数として抑止力を与える。さらに、杭を打設してはならない位置をも明らかにする。
- 2) 慣用法はいくつかの重大な問題点を含んでいる。また提案法に比べ過大な抑止力を与える。これらの事実は、杭体自身の設計法に依っては慣用法が不経済な設計にも、あるいはまた、危険な設計にもつながり得ることを意味する。
- 3) 前述の杭の打設位置選定基準に従うと、個々の地すべり地に特有な経済的要因を考慮することで、安全性と経済性両面から杭の最も好ましい打設位置を選定することができる。
- 4) 上で選定された打設位置において、必要な杭の直径 d と杭の中心間隔 D_1 の比 d/D_1 を特定することができる。したがって d と D_1 のいずれか一方を仮定すれば他方は自動的に定まる。

参考文献

- 1) 中村浩之：地すべり防止工の設計上の問題点、シンポジウム地すべり防止工の諸問題論文集、地すべり学会、pp. 8-25, 1987.
- 2) Yamagami, T., Yamakawa, O. and Suzuki, H. : A simplified estimation of stabilizing effect of piles in a landslide slope —Applying the Janbu Method—, Proc. of the 6th Int. Sympo. on Landslides, Vol.1, pp.613-618, 1992.

- 3) 山上拓男, 山川治: 地すべり抑止杭が負担すべき抑止力の簡便評価法—非円形すべり面理論に基づく場合一, 地質と斜面崩壊に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会四国支部, pp.57-68, 1990.
- 4) Ito, T. and Matsui, T. : Method to estimate lateral force acting on stabilizing piles, *Soils and Foundations*, Vol.15, No.4, pp.43-59, 1975.
- 5) Morgenstern, N.R. and Price, V.E. : The analysis of the stability of general slip surfaces, *Geotechnique*, Vol.15, pp.79-93, 1965.
- 6) Morgenstern, N.R. and Price, V.E. : A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces, *Computer Journal*, Vol.9, pp.388-393, 1967.
- 7) 砂防・地すべり対策工事設計実例編集委員会: 最新の技術基準に基づく砂防・地すべり設計実例, (財)砂防・地すべり技術センター, pp.118-122, 1987.

(1994.4.18 受付)

A SIMPLIFIED DESIGN METHOD FOR THE LANDSLIDE STABILIZING PILES BASED ON THE MORGESTERN-PRICE METHOD

Takuo YAMAGAMI and Osamu YAMAKAWA

A simplified method has been developed to design landslide stabilizing piles in multiple rows as well as in a single row in terms of the limit equilibrium approach. The entire design procedure of the landslide stabilizing piles consists of three stages, i.e. evaluating the deterrent force, calculating the lateral bearing capacity, and designing the piles themselves. In this paper, theories relating to the first two stages have been discussed. Combining the concepts on the deterrent force and lateral bearing capacity yields a criterion for the selection of the desirable pile location. As a result, it has turned out that we can determine the optimal value for the ratio d/D_1 at any place under a prescribed, objective factor of safety, where d is the pile diameter and D_1 is the center-to-center distance of the piles.