

## 杭を有する斜面の安定解析法について

仁田ソイロック(株) 正 山川 治  
 徳島大学工学部 正 山上 拓男  
 徳島大学大学院 学 斎藤 和

1.はじめに：杭を用いて斜面の安定性を高める工法は、災害対策のみならず多くの現場で採用されている。伊藤・松井<sup>1)</sup>はこれら杭を有する斜面の安定性を評価するため、列杭の効果を考慮した安定解析法を提案した。この方法は、列杭の反力を通常の分割法に基づく安全率算定式における抵抗力に加えて、斜面の安全率を算出するという方法である。本文では伊藤らの方法とは立場を異にする安定解析法を提案するものである。

2.基本概念：ここで提案する解析法は特徴的な2つの基本概念で構成されている。1つは『杭を打設することにより、その上流側と下流側で異なる安全率 $F_a$ 、 $F_b$ が出現する』と考えることである。第2の基本概念は、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。これら基本概念に従い杭を有する斜面の安定解析法を構築するため、斜面に列状に打設される杭に対して二つの力に注目した<sup>2)</sup>。すなわち、

①斜面の安全率を目標値( $F_s$ )まで高めるため、杭が負担しなければならない力。以後これを抑止力と呼ぶ。

②杭周辺の地山が杭に伝え得る力。

①の力は一般に必要抑止力と呼ばれ、ここでは $F_d$ なる記号で表す。②の力は杭周辺地山が発揮できる力であり、 $F_R$ と表現する。これらを言い替えると、 $F_d$ は杭が負担すべき力であり、 $F_R$ は杭が負担し得る力、すなわち杭の水平支持力である。

本文では、 $F_d$ の評価法として筆者らが提案してきた抑止力簡便評価法<sup>3)</sup>を用いる。一方、 $F_R$ の評価法としては、伊藤・松井の塑性変形理論<sup>4)</sup>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ために、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抵抗力 $F_R$ を評価することが可能となる。そして、 $F_R \geq F_d$ となるように杭径と杭打設間隔を決定するのである。このとき、杭を有する斜面は少なくとも安全率 $F_s$ が保障されることになる。

3.杭が負担すべき抑止力の評価：上述した基本概念に従い、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 $P_a$ 、 $P_b$ 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に作用していると仮定する。これより、計画安全率は既知であるので、上記の $P_a$ 、 $P_b$ が求まり、必要抑止力は、

$$\Delta P = P_a - P_b \quad (1)$$

$$\text{ただし, } P_a > 0, P_b \geq 0 \quad (2)$$

から算定される。また、杭1本当たりの抑止力は、

$$F_d = \Delta P \cdot D_1 \quad (3)$$

となる。ここに $D_1$ は杭の中心間隔である。

本文では理論式として円弧すべりを対象とするBishop簡便法を採用した。紙数の都合で詳細を述べることはできないが、提案法によればすべり面の形状を円形と仮定するとき、図-1に示すように、杭の上・下流側それぞれのすべり土塊において互いに異なる中心と半径を持つすべり円に基づいて相互作用力を評価できる。

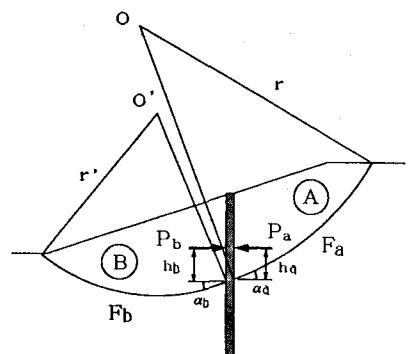


図-1 杭の上・下流側土塊の安全率

そこで、円弧の中心と半径を変化させて無数の試行すべり面の1つ1つについて抑止力を計算し、それら抑止力の中で最大値を与えるすべり面を探査した。

4. 杭の水平支持力の評価: 伊藤・松井理論では杭は剛体であると仮定され、すべり土層単位深さ当たり一本の杭に作用する極限状態の側方土圧が評価される。しかし、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抵抗力を評価しなければならない。そこで、次式に基づき安全率 $F_s$ を導入した:

$$\bar{c} = c/F_s, \quad \tan \bar{\phi} = \tan \phi / F_s \quad (4)$$

$\bar{c}$ 、 $\bar{\phi}$ を用いて伊藤・松井理論と同じ誘導過程を経れば次式が得られる:

$$\begin{aligned} \bar{P}(z) = & \bar{c} D_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^\alpha \left[ \frac{1}{\bar{N}_\phi \tan \bar{\phi}} \left\{ \exp \left( \frac{D_1 - D_2}{D_2} \bar{N}_\phi \tan \bar{\phi} \tan \left( \frac{\pi}{8} + \frac{\bar{\phi}}{4} \right) \right) - 2 \bar{N}_\phi^{1/2} \tan \bar{\phi} - 1 \right\} \right. \\ & \left. + \frac{2 \tan \bar{\phi} + 2 \bar{N}_\phi^{1/2} + \bar{N}_\phi^{-1/2}}{\alpha} \right] - \bar{c} \left\{ D_1 \frac{2 \tan \bar{\phi} + 2 \bar{N}_\phi^{1/2} + \bar{N}_\phi^{-1/2}}{\alpha} - 2 D_2 \bar{N}_\phi^{-1/2} \right\} \\ & + \frac{\gamma z}{\bar{N}_\phi} \left\{ D_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^\alpha \exp \left( \frac{D_1 - D_2}{D_2} \bar{N}_\phi \tan \bar{\phi} \tan \left( \frac{\pi}{8} + \frac{\bar{\phi}}{4} \right) \right) - D_2 \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $\bar{N}_\phi = \tan^2(\pi/4 + \bar{\phi}/2)$ 、 $\alpha = \bar{N}_\phi^{1/2} \tan \bar{\phi} + \bar{N}_\phi - 1$ 、 $D_2$ は杭の純間隔、 $Z$ は地表面からの任意深さである。

そして、次式により杭周辺地山が発揮し得る力 $F_R$ が得られる:

$$F_R = \int_0^L \bar{P}(z) dz \quad (6)$$

ここに、 $L$ は杭の有効長すなわち試行すべり面より直上の地表面までの高さである。式(6)により、与えられた安全率および杭径、打設間隔のもと、杭周辺地山が耐え得る力、つまり杭の水平支持力の評価が可能となつた。

5. 適用例: 図-2に示す均質な斜面を対象として、本手法を適用した結果を述べる。この斜面の最小安全率はBishop簡便法に基づくとき図中の破線で示される円弧に沿って $F_o=1.06$ であった。そこで、径0.5m、長さ8.0mの杭を図の位置に打設して、杭の上・下流側土塊の安全率をともに1.2(つまり $F_a=F_b=1.2$ )まで高めるという状況を想定した。

上述した抑止力簡便評価法に従うとき、抑止力の最大値は $\Delta P = 6.12 \text{tf/m}$ となる。また、これを与えるすべり面は図-2に実線で示されている。次いで、 $\Delta P$ に杭打設間隔を乗じて1本の杭が負担すべき力 $F_D$ を算定した。その結果を図-3に $F_D$ と $D_2/D_1$ の関係として示す。一方、伊藤・松井理論に基づき、杭が負担し得る力(杭の水平支持力) $F_R$ を評価して図-3に整理した。図-3より、 $F_D = F_R$ となる $D_2/D_1$ を読みとることで、杭の打設間隔を決定できる。本適用例では $D_2/D_1 = 0.87$ であり、 $D_1 = 3.8 \text{m}$ となる。したがって、杭がこの間隔で打設されると本斜面は少なくとも安全率1.2が保障されているのである。

参考文献: 1) 伊藤・松井: 土と基礎, Vol. 26, No. 6, (社) 土質工学会, pp. 31-36, 1978. 2) 山上・山川: 地すべりの機構と対策に関するシンポジウム論文集, (社) 土質工学会, PP. 143-148, 1993. 3) 山上・山川: 地質と斜面崩壊に関するシンポジウム発表論文集, (社) 土質工学会, PP. 57-68, 1990. 4) Ito, T and T. Matsui: Soil and Foundations, Vol. 15, No. 4, pp. 43-59, 1975.

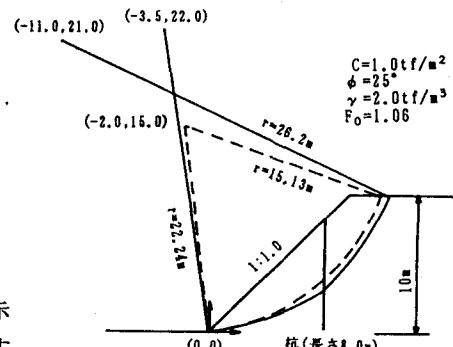


図-2 適用例

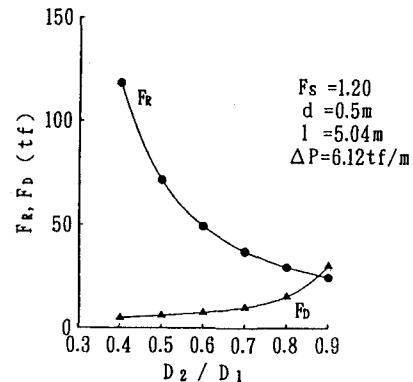


図-3  $F_D$ および $F_R$ と $D_2/D_1$ の関係