

文章编号:1672-6561(2013)01-0090-07

计算锚索抗滑桩变形及内力的一种新方法

门玉明¹, 韩冬冬¹, 王海英²

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 天津城市建设学院 能源与安全工程学院, 天津 300384)

摘要:结合结构力学和弹性地基梁理论, 考虑锚索的弹性变形, 建立了一种计算锚索抗滑桩变形及内力的新方法。在建立公式时, 将抗滑桩从滑面处分为上、下两部分; 对嵌固段的桩按弹性地基梁计算, 滑面以上的桩用力法计算; 利用滑面处的变形协调条件, 建立了锚索抗滑桩的计算公式, 所得公式可以方便地用于求解锚索的设计拉力、抗滑桩的内力及变形。最后, 以某滑坡治理工程为例, 计算了锚索拉力及抗滑桩的内力, 验证了计算方法的可靠性, 并与普通抗滑桩的计算结果进行了对比分析。

关键词:滑坡; 锚索抗滑桩; 弹性地基梁; 结构力学; 锚索拉力; 变形; 内力; 计算方法

中图分类号: TU348; P642. 22

文献标志码: A

New Method for Calculating Deformation and Internal Force of Anchor Anti-slide Pile

MEN Yu-ming¹, HAN Dong-dong¹, WANG Hai-ying²

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: Combined with structural mechanics and elastic foundation beam theory, a new mechanics calculation model of anchor anti-slide pile was established considering the elastic deformation of anchor cable. In deducing the formula, the anti-slide pile was divided into top and bottom segments from the sliding surface. The bottom segment, which was embedded in the slip bed, was calculated as a elastic foundation beam, and the top section was calculated by force method. Using the deformation compatibility condition of pile section on the sliding surface, the calculation formula of anchor pile was established, and the formula was very convenient to solve anchor cable tension force, anti-slide pile internal force and deformation of the body. Finally, taking a landslide control project as an example, the anchor cable tension and pile internal force were calculated, the reliability of the method was verified, and the result was compared with that of ordinary anti-slide pile.

Key words: landslide; anchor anti-slide pile; elastic foundation beam; structural mechanics; anchor cable tension force; deformation; internal force; calculation method

0 引言

锚索抗滑桩是一种在普通抗滑桩及锚固技术基础上发展起来的新型支挡结构, 自 20 世纪 80 年代

问世以来, 在大、中型滑坡治理工程中得到了应用^[1-3]。由于在桩顶施加了锚索, 使得抗滑桩由原来不合理的悬臂式^[4]受力状态变为上端铰支、下端近似弹性固接的简支梁结构形式, 桩身的最大弯矩与

收稿日期: 2012-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40272116); 中国地质调查局地质大调查项目(1212010914021)

作者简介: 门玉明(1957-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: dcmnym@chd.edu.cn。

剪力比普通抗滑桩明显减少,桩身受力状态和分布更为合理,而且由于锚固力的施加,使整个桩体具有主动加固滑坡体的作用和功能。由于其结构受力得到优化,并使部分地下工程(开挖桩井、浇筑混凝土等)转为地面工程(锚固工程),节省了工程投资,降低了施工中的不安全因素,因而成为大、中型滑坡治理工程中的一种重要技术,已受到广泛重视。然而,由于锚索抗滑桩是由 2 种不同结构组合而成,对其组合后如何进行设计计算,一直处于探讨之中。现有的方法可以归纳为:金布格和依申柯提出的控制桩顶位移^[5]的方法;以滑面处桩的弯矩为 0 的条件设计锚索拉力的方法^[6];根据桩的正负弯矩基本相等的条件计算锚索拉力,再根据锚索与桩的变形协调条件求解锚索预应力的方法^[7];将锚索张拉预应力按锚索设计拉力的一定比例考虑,再根据桩顶位移的控制标准进行校核的方法^[8];基于锚索和抗滑桩的变形协调条件,将锚索和抗滑桩作为整体进行计算的方法^[9-10];此外,还有其他一些改进的计算方法^[11-12]。尽管在锚索抗滑桩的计算方法和破坏模式研究方面近年来已取得一些进展^[13-15],但在国家标准或相关的设计规范中至今还没有对其具体设计计算原则和方法给出相应的说明和规定,各滑坡治理部门和设计单位一般采用各自的计算方法并根据工程经验进行设计和计算,由于各自采用的计算方法差别较大,治理效果各异^[16-25]。鉴于此,加强锚索抗滑桩的设计理论研究,对于推广锚索抗滑桩技术具有重要作用。笔者考虑锚索的弹性变形,在弹性地基梁理论^[26]的基础上,建立一种计算锚索抗滑桩变形及内力的新方法,以期更方便地计算锚索设计拉力和抗滑桩的变形及内力。

1 锚索抗滑桩计算新方法

1.1 锚索抗滑桩计算简图

锚索抗滑桩的计算一般包括锚索锚拉力计算及抗滑桩的桩身内力计算。计算时,滑面以上受荷段一般按梁结构计算,滑面以下的锚固段按弹性地基梁计算。锚索抗滑桩所承受的荷载为抗滑桩所在位置剩余的推力,该推力就是作用于锚索抗滑桩上的设计荷载,滑坡推力可依据滑体情况简化为三角形、矩形或梯形分布荷载。

图 1 为锚索抗滑桩的计算简图,设作用于锚索抗滑桩上的外力总和为 E_x ,其作用点距滑面距离为 h_0 ,锚索设计拉力 T_{Ai} 在水平方向上的分力为 x_i ,锚索作用点 i 距滑面距离为 L_i ,锚索作用点 i 的弹性

刚度为 k_i ,抗滑桩抗弯刚度为 EI (其中, E 为桩身钢筋混凝土的弹性模量, I 为桩的截面惯性矩),桩在滑面以上长度为 H_1 ,锚固段长度为 h_1 。在进行公式推导时,假想将抗滑桩从滑面处分为上、下两段,并设滑面处(图 2 中固定支座处)的桩身转角为 β_0 ,水平位移为 u_0 ,由此得到上部桩身的计算简图(图 2),采用力法进行求解。嵌固段桩身按弹性地基梁计算(图 3),其过程与普通抗滑桩计算相同。根据地基系数随深度的变化情况,其计算方法可以采用 K 法或 m 法。当地层为较完整的岩层时,地基系数可认为是常数,不随深度变化而变化,此时采用 K 法进行计算;若地基为密实土层或强风化破碎岩层时,相应的采用 m 法进行计算。笔者以 m 法为例,给出嵌固段桩身变位及内力的计算公式。

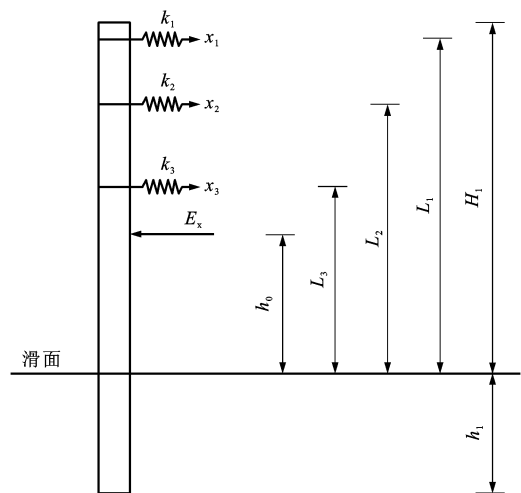


图 1 锚索抗滑桩计算简图

Fig. 1 Calculation Model of Anchor Anti-slide Pile

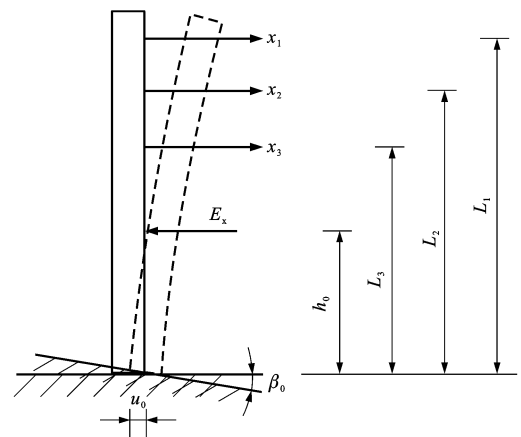


图 2 滑面以上桩的计算简图

Fig. 2 Calculation Model of Pile Above Sliding Surface

1.2 嵌固段内力与变形计算

当桩周围岩的变形在弹性范围内,围岩对桩身

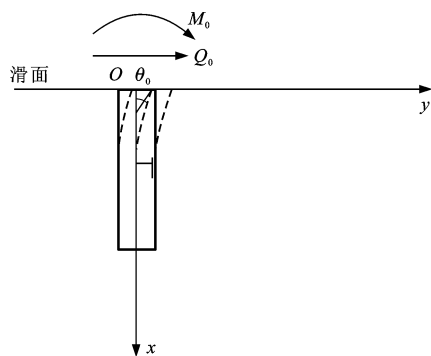


图3 嵌固段桩的计算简图

Fig. 3 Calculation Model of Pile Embed Solid Segment

的地基反力认为是桩身变位与地基反力系数 K 的乘积。在 m 法中,假定地基反力系数 K 随深度的变化规律为

$$K = A + mx^B \quad (1)$$

式中: A 为滑面处的地基抗力系数; m 为地基系数随深度变化的比例系数; x 为自滑面沿桩轴线向下的距离; B 为线性指数。

在同一地层中,沿桩轴线的 K 值图形常因岩性、结构状态和成岩程度等有所差别,当 $B=0, 0.5, 1.0, 2.0$ 时, K 值图形分别为矩形、抛物线型、三角形和反抛物线型。

将嵌固段桩身作为弹性地基梁。由弹性地基梁理论可知,桩的变位及内力(位移 y 、转角 θ 、弯矩 M 和剪力 Q)可用下列方程表示

$$y = y_0 A_1 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_1 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_1 \quad (2)$$

$$\theta = \alpha(y_0 A_2 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_2 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_2 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_2) \quad (3)$$

$$M = \alpha^2 EI(y_0 A_3 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_3) \quad (4)$$

$$Q = \alpha^3 EI(y_0 A_4 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_4) \quad (5)$$

$$\sigma_x = mxy \quad (6)$$

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb_p}{EI}} \quad (7)$$

式中: y_0, θ_0, M_0, Q_0 分别为桩在滑面处的位移、转角、弯矩和剪力; $A_1 \sim A_4, B_1 \sim B_4, C_1 \sim C_4$ 和 $D_1 \sim D_4$ 分别为随桩的换算深度(αy)变化系数,可由 m 法的系数表中查得; α 为桩的变形系数; m 为水平方向弹性系数随深度变化的比例系数; b_p 为桩的正面计算宽度。

为求桩身任一点的位移、转角、弯矩、剪力和岩土体对该点的侧向应力,必须先求出滑面处的

y_0, θ_0 ,而这 2 个值需根据桩底的边界条件来确定。这些条件包括桩底位移 y_{h_1} 、转角 θ_{h_1} 、弯矩 M_{h_1} 和剪力 Q_{h_1} 。

当桩底为固定端时, $y_{h_1} = \theta_{h_1} = 0$, 但 $M_{h_1} \neq 0$, $Q_{h_1} \neq 0$ 。将 $y_{h_1} = 0$ 代入式(2), $\theta_{h_1} = 0$ 代入式(3)中,联立求解得

$$y_0 = \frac{M_0 B_1 C_2 - C_1 B_2}{\alpha^2 EI A_1 B_2 - B_1 A_2} + \frac{Q_0 B_1 D_2 - D_1 B_2}{\alpha^3 EI A_1 B_2 - B_1 A_2} \quad (8)$$

$$\theta_0 = \frac{M_0 C_1 A_2 - A_1 C_2}{\alpha EI A_1 B_2 - B_1 A_2} + \frac{Q_0 D_1 A_2 - A_1 D_2}{\alpha^2 EI A_1 B_2 - B_1 A_2} \quad (9)$$

当桩底为铰接端时, $y_{h_1} = 0, M_{h_1} = 0$, 但 $\theta_{h_1} \neq 0$, $Q_{h_1} \neq 0$ 。将 $y_{h_1} = 0$ 代入式(2), $M_{h_1} = 0$ 代入式(4)中,联立求解得

$$y_0 = \frac{M_0 C_1 B_3 - B_1 C_3}{\alpha^2 EI B_1 A_3 - A_1 B_3} + \frac{Q_0 D_1 B_3 - B_1 D_3}{\alpha^3 EI B_1 A_3 - A_1 B_3} \quad (10)$$

$$\theta_0 = \frac{M_0 A_1 C_3 - C_1 A_3}{\alpha EI B_1 A_3 - A_1 B_3} + \frac{Q_0 A_1 D_3 - D_1 A_3}{\alpha^2 EI B_1 A_3 - A_1 B_3} \quad (11)$$

当桩底为自由端时, $M_{h_1} = Q_{h_1} = 0, y_{h_1} \neq 0, \theta_{h_1} \neq 0$ 。将 $M_{h_1} = Q_{h_1} = 0$ 代入式(4)、(5)中,联立求解得

$$y_0 = \frac{M_0 B_3 C_4 - C_3 B_4}{\alpha^2 EI A_3 B_4 - B_3 A_4} + \frac{Q_0 B_3 D_4 - B_4 D_3}{\alpha^3 EI A_3 B_4 - B_3 A_4} \quad (12)$$

$$\theta_0 = \frac{M_0 C_3 A_4 - A_3 C_4}{\alpha EI A_3 B_4 - B_3 A_4} + \frac{Q_0 D_3 A_4 - A_3 D_4}{\alpha^2 EI A_3 B_4 - B_3 A_4} \quad (13)$$

根据桩上的剩余下滑力求得滑面处的弯矩 M_0 和剪力 Q_0 后,将上述 3 种条件下计算得到的 y_0, θ_0 以及 M_0, Q_0 代入式(2)~(5)中,可分别求得嵌固段桩身任一深度的内力和变位。

以上各式中, y_0, θ_0, M_0 和 Q_0 与锚索拉力有关,在锚索拉力求出之前,它们仍然是未知数,所以必须先求出锚索拉力,才能最终求得桩身内力及变位值。

由于 m 法的公式是按滑面处抗力为 0 的情况导出的,在实际工程中,滑动面以上往往有滑体存在,在滑面处岩土体的抗力不为 0,而是某一数值 A ,即滑面以下的地基系数为梯形变化,此时已有的表格不能直接使用,可通过将地基系数变化图形向上延伸至虚点 a ,再自虚点 a 向下计算便可以直接使用已有公式的办法进行处理,但这时必须重新确定 a 点处的初参数 y_a, φ_a, M_a, Q_a 。

1.3 锚索锚拉力及上部桩身内力计算

设滑面处(图 2 中固定支座处)的桩身转角为 β_0 ,水平位移矩阵为 u_0 ,列出其力法方程为

$$\delta x + \Delta_P + L\beta_0 + u_0 = -F \quad (14)$$

其中

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \cdots & \delta_{nn} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_P = \begin{bmatrix} \Delta_{1P} \\ \Delta_{2P} \\ \vdots \\ \Delta_{nP} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} x_1/k_1 \\ x_2/k_2 \\ \vdots \\ x_3/k_3 \end{bmatrix}$$

式中: δ 为 $m \times m$ 阶单位变位矩阵, n 为锚索根数; \mathbf{x} 为 $m \times 1$ 阶未知力列矩阵; \mathbf{A}_P 为 $m \times 1$ 阶载变位列矩阵; \mathbf{L} 为 $m \times 1$ 阶锚索距离列阵; \mathbf{F} 为 $m \times 1$ 阶未知力与锚索弹性刚度比值的列矩阵。

β_0 和 \mathbf{u}_0 可根据滑面以上桩的荷载计算得到

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= \left(\sum_{i=1}^n L_i x_i + M_P^0 \right) \bar{\beta}_1 \\ \mathbf{u}_0 &= \left(\sum_{i=1}^n x_i + Q_P^0 \right) \bar{\mathbf{u}}_1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: δ_{ij} 、 Δ_{iP} 分别为桩的单位变位和载变位; M_P^0 为剩余下滑力在嵌固段桩顶产生的力矩; Q_P^0 为剩余下滑力在嵌固段桩顶产生的剪力; $\bar{\beta}_1$ 为嵌固段桩顶作用单位力矩 $M_0 = 1$ 时引起该段桩顶的角变位; $\bar{\mathbf{u}}_1$ 为嵌固段桩顶作用单位力 $Q_0 = 1$ 时引起该段桩顶的水平位移矩阵; P 为载荷; i 和 j 都为 $1, 2, \dots, n$; n 为作用点个数。

$\bar{\beta}_1$ 和 $\bar{\mathbf{u}}_1$ 可根据桩底的边界条件分别由式(8)~(13)求得。桩的单位变位 δ_{ij} 和载变位 Δ_{iP} 可分别由式(16)、(17)求得

$$\delta_{ij} = \int \frac{\bar{M}_i \bar{M}_j}{EI} ds = \frac{L_j^2}{6EI} (3L_i - L_j) \quad (16)$$

$$\Delta_{iP} = \int \frac{\bar{M}_i M_P}{EI} ds = -\frac{E_s h_0^2}{6EI} (3L_i - h_0) \quad (17)$$

$$k_i = \frac{E_{Si} A_{Si}}{L_{Si}} \quad (18)$$

式中: \bar{M}_i 和 \bar{M}_j 分别为锚索作用点 i 和 j 的单位未知力在抗滑桩中产生的弯矩; M_P 为载荷 P 在抗滑桩中产生的弯矩; L_j 为锚索作用点 j 到滑面的距离; E_{Si} 为锚杆的弹性模量; A_{Si} 为锚杆的截面面积; L_{Si} 为第 i 根锚杆自由段的长度。

将式(15)代入式(14)中,得到

$$\delta \mathbf{x} + \mathbf{A}_P + \mathbf{L} \left(\sum_{i=1}^n L_i x_i + M_P^0 \right) \bar{\beta}_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i + Q_P^0 \right) \bar{\mathbf{u}}_1 = -\mathbf{F} \quad (19)$$

$$\text{令} \quad A_{ii} = \delta_{ii} + L_i^2 \bar{\beta}_1 + \bar{\mathbf{u}}_1 + 1/k_i \quad (20)$$

$$A_{ij} = \delta_{ij} + L_i L_j \bar{\beta}_1 + \bar{\mathbf{u}}_1 \quad i \neq j \quad (21)$$

$$A_{iP} = \Delta_{iP} + L_i M_P^0 \bar{\beta}_1 + Q_P^0 \bar{\mathbf{u}}_1 \quad (22)$$

式中: $\bar{\mathbf{u}}_1$ 为嵌固段桩顶作用单位力 $Q_0 = 1$ 时引起该段桩顶的水平位移。

将式(20)、(21)代入公式(19)中,得到新的力法方程

$$\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{A}_P = 0 \quad (23)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_P = \begin{bmatrix} A_{1P} \\ A_{2P} \\ \vdots \\ A_{nP} \end{bmatrix}$$

式中: \mathbf{A} 为 $m \times m$ 阶地基抗力系数矩阵; \mathbf{A}_P 为 $m \times 1$ 阶 A_{iP} 列矩阵。

解式(23)得到 x_i 。于是,嵌固段抗滑桩在滑面处的 M_0 和 Q_0 可由叠加法得到

$$M_0 = \sum_{i=1}^n L_i x_i + M_P^0 \quad (24)$$

$$Q_0 = \sum_{i=1}^n x_i + Q_P^0 \quad (25)$$

y_0 、 θ_0 可依据其桩底的边界条件,分别由式(9)~(13)求得。根据以上得到的参数 y_0 、 θ_0 、 M_0 和 Q_0 , 就可以由式(2)~(5)求出滑面以下嵌固段桩身的变形及内力,而滑面以上桩的变形及内力可以根据结构力学方法求得,这时的滑坡剩余下滑力应根据滑体的岩土体类型,采用分布力进行计算。而锚索的设计拉力 T_{Ai} 为

$$T_{Ai} = x_i / \cos \alpha_i \quad (26)$$

式中: α_i 为锚索与水平面的夹角。

根据式(26)计算的数值,就可以进行锚索设计。

2 算 例

2.1 计算资料

某滑坡的滑体为强风化的砂砾岩、泥岩,呈土状,表层为黄土覆盖^[27],已知滑体的平均重度 $\gamma_1 = 19 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,内摩擦角 $\varphi_1 = 30^\circ$ 。滑床为强风化的砂砾岩、页岩和泥岩,可当作较密实的土层考虑,平均重度 $\gamma_2 = 21 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,内摩擦角 $\varphi_2 = 30^\circ$ 。滑面处的地基抗力系数 $A = 80\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。滑床土的地基系数随深度变化的比例系数 $m = 40\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-4}$ 。设桩位置处的滑体厚度为 10 m ,桩处的滑坡推力 $E_x = 1\,200 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,桩前剩余下滑力 $E'_x = 200 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。抗滑桩采用 C20 级钢筋混凝土,其弹性模量 $E_c = 27 \times 10^6 \text{ kPa}$ 。桩断面为矩形,长边宽度 $a = 3 \text{ m}$,短边宽度 $b = 2 \text{ m}$,截面对桩中心惯性矩 $I = \frac{1}{12} b a^3 = 4.5 \text{ m}^4$ 。桩的相对刚度系数 $EI = 0.8 E_c I = 97.2 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ (按规范

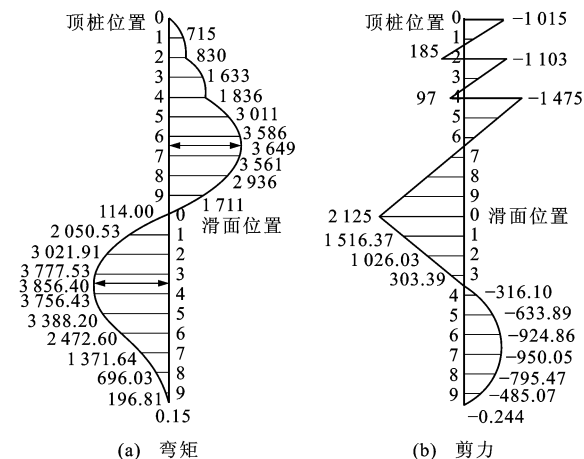
规定)。桩的间距(中至中) $l=6\text{ m}$ 。桩的长度为 19.5 m ,其中滑面以上桩的长度为 10 m ,滑面以下桩的嵌固段长度 $h_1=9.5\text{ m}$ 。在桩上布置3排锚索,上锚位于桩顶,3个锚之间的竖向间距为 2 m ,锚索倾角均为 15° ,锚索自由段长度分别为 $20、18、16\text{ m}$,锚索材料采用Ⅲ级钢筋,为便于比较,将各锚索的杆体钢筋均取为 $3\Phi 32$, $A_s=2\,257\text{ mm}^2$,钢材的弹性模量为 $E_s=180\text{ GN}\cdot\text{m}^{-2}$,锚索倾角均为 15° 。

2.2 计算结果及分析

按上述公式,计算得出锚索水平方向分力 $x_1=1\,015\text{ kN}$, $x_2=1\,288\text{ kN}$, $x_3=1\,572\text{ kN}$ 。由式(26)计算得到各锚索的拉力分别为 $T_{A1}=1\,030.81\text{ kN}$, $T_{A2}=1\,333.44\text{ kN}$, $T_{A3}=1\,627.45\text{ kN}$ 。

桩身的弯矩图和剪力图见图4。为了和普通抗滑桩的计算结果进行对比,图5给出了在同等条件下按照普通悬臂式抗滑桩计算得出的弯矩图和剪力图^[10]。比较两者的内力图,可以看出锚索抗滑桩具

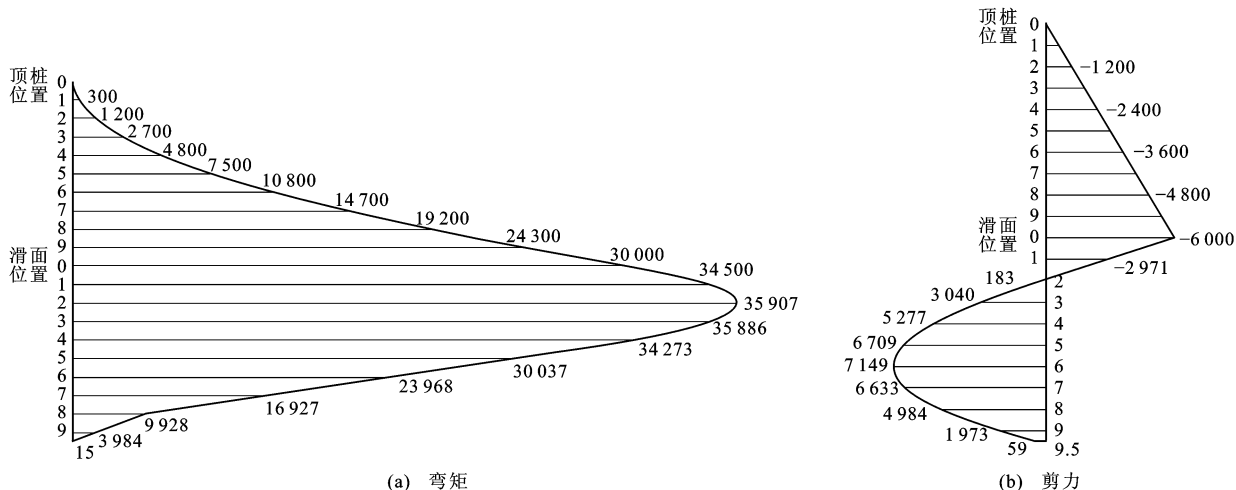
有以下特点。



滑面位置以上的0~9为截面位置距桩顶的距离,滑面位置以下的0~9为截面位置距滑面的距离,单位为m;曲线上数据分别为弯矩和剪力,弯矩单位为 $\text{kN}\cdot\text{m}$,剪力单位为 kN

图4 锚索抗滑桩内力

Fig. 4 Internal Forces of Anchor Anti-slide Pile



滑面位置以上的0~9为截面位置距桩顶的距离,滑面位置以下的0~9为截面位置距滑面的距离,单位为m;曲线上数据分别为弯矩和剪力,弯矩单位为 $\text{kN}\cdot\text{m}$,剪力单位为 kN

图5 普通抗滑桩内力

Fig. 5 Internal Forces of Anti-slide Pile

(1)锚索抗滑桩具有2个最大弯矩点,在3根锚索的情况下,其中一个最大弯矩点大约位于滑面以上桩长的 $1/3$ 处,另一个最大弯矩点在桩后滑面以下桩长的 $1/3$ 处。这与门玉明等进行的锚索抗滑桩大型物理模型试验的结果一致^[14]。

(2)由于施加了锚索,其桩身内力明显减小,表1为2种抗滑桩的内力计算结果,通过与普通抗滑桩计算结果对比分析,可以看出在相同截面和相同长度条件下,锚索抗滑桩的最大正剪力比普通抗滑桩减小 70.27% ,最大负剪力比普通抗滑桩减小 75.41% ,最大弯矩减小 89.26% ,这样就可以减

表1 桩身内力计算结果对比

Tab. 1 Comparison of Calculation Results of Pile's Internal Forces

桩型	最大正剪力/ kN	最大负剪力/ kN	最大弯矩/ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)
普通抗滑桩	7 149	-6 000	35 907.00
锚索抗滑桩	2 125	-1 475	3 856.40

少桩的截面尺寸及配筋,节省抗滑桩的桩井开挖及配筋工程量,降低桩的工程造价。

(3)根据力的平衡原理,普通抗滑桩嵌固段桩身所承担的作用力为 $7\,200\text{ kN}$,而锚索抗滑桩嵌固段上

所分担的外力只有 3 607 kN,因此,如果单从桩周围岩承载力来看,桩的嵌固段长度可以减小 50%。

3 结 语

(1)提出的新计算公式可以方便地用于计算锚索设计拉力和抗滑桩的变形及内力。

(2)计算结果表明,锚索抗滑桩具有 2 个最大弯矩点,在 3 根锚索的情况下,其中一个最大弯矩点大约位于滑面以上桩长的 1/3 处,另一个最大弯矩点在桩后滑面以下桩长的 1/3 处。

(3)在滑坡治理工程中采用锚索抗滑桩,可以明显减少桩的截面尺寸及配筋,减小桩的嵌固段长度,节省抗滑桩的桩井开挖及配筋工程量,降低桩的工程造价,在滑坡治理工程中值得进一步推广应用。

参考文献:

References:

- [1] 门玉明,邓军涛,李金湘. 锚索抗滑桩设计中的几个问题探讨[J]. 公路交通科技,2005,22(6):52-54.
MEN Yu-ming, DENG Jun-tao, LI Jin-xiang. Study on the Anchor Anti-slide Pile[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(6):52-54.
- [2] 许英姿,韦万正,卢玉南. 竖向预应力锚索抗滑桩的优化研究[J]. 工程地质学报,2011,19(1):83-87.
XU Ying-zi, WEI Wan-zheng, LU Yu-nan. Optimal Design Study of Anti-slide Pile with Vertical Prestressed Anchor[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(1):83-87.
- [3] 冯玉国,王渭明,刘军熙. 预应力锚索抗滑桩结构稳健优化设计[J]. 岩土工程学报,2009,31(4):515-520.
FENG Yu-guo, WANG Wei-ming, LIU Jun-xi. Robust Optimization Design of Anti-slide Piles with Prestressed Anchor Cables[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4):515-520.
- [4] 张永兴,董捷,文海家,等. 考虑自重应力的悬臂式抗滑桩三维土拱效应及合理间距研究[J]. 中国公路学报,2009,22(2):18-25.
ZHANG Yong-xing, DONG Jie, WEN Hai-jia, et al. Research on Three-dimensional Soil Arching Effect and Appropriate Spacing of Cantilever Anti-slide Piles with Consideration of Geostatic Stress[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2):18-25.
- [5] 李功伯,谢建清. 滑坡稳定性分析与工程治理[M]. 北京:地震出版社,1997.
LI Gong-bo, XIE Jian-qing. Stability Analysis and Restriction Engineering for Landslide[M]. Beijing: Earthquake Press, 1997.
- [6] 刘小丽,周德培,杨涛. 预应力锚索抗滑桩设计中确定锚索预应力值的一种方法[J]. 工程地质学报,2002,10(3):317-320.
LIU Xiao-li, ZHOU De-pei, YANG Tao. A Method for Computing the Prestressing Force of the Anti-slide Pile with Prestressed Cable[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(3):317-320.
- [7] 刘焕斌,晏鄂川,吴益平,等. 桩锚结构预应力的变形协调确定方法[J]. 岩土力学,2007,28(增):891-894.
LIU Huan-bin, YAN E-chuan, WU Yi-ping, et al. A Compatible Distortion Method of Cable in Structure of Pile-anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S):891-894.
- [8] 桂树强. 预应力锚索抗滑桩结构计算方法[J]. 地球科学,2005,30(2):233-240.
GUI Shu-qiang. Design Method for Using Stabilizing Piles with Pre-stressed Anchored Cables in Landslide Remediation Works[J]. Earth Science, 2005, 30(2):233-240.
- [9] 周德培,王建松. 预应力锚索桩内力的一种计算方法[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(2):247-250.
ZHOU De-pei, WANG Jian-song. Design Method of Retaining Pile with Prestressed Cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2):247-250.
- [10] 李凯玲,门玉明. 锚索抗滑桩系统内力变形研究[J]. 地球科学与环境学报,2007,29(4):400-403.
LI Kai-ling, MEN Yu-ming. Research on Internal Force and Deformation of Anchor Anti-slide Piles System[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(4):400-403.
- [11] 刘小丽,张占民,周德培. 预应力锚索抗滑桩的改进计算方法[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(15):2568-2572.
LIU Xiao-li, ZHANG Zhan-min, ZHOU De-pei. Improved Method for Computing Anti-sliding Pile with Prestressed Anchoring Cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15):2568-2572.
- [12] 魏焕卫,贾强,陈建峰,等. 基于 MINDLIN 解的边坡变形计算方法[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(1):49-54.
WEI Huan-wei, JIA Qiang, CHEN Jian-feng, et al. Calculation Method of Slope Deformation Based on MINDLIN Solution[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(1):49-54.
- [13] 孙勇,梁永松. 单排单锚抗滑桩的一种新的计算方法[J]. 矿业研究与开发,2010,30(6):19-23.

- SUN Yong, LIANG Yong-song. A New Calculation Method of Single-row Anti-slide Pile with Single-row Anchor[J]. Mining Research and Development, 2010, 30(6):19-23.
- [14] 门玉明,李寻昌,张涛,等. 锚索抗滑桩破坏模式探讨[J]. 工程地质学报, 2011, 19(增):438-443.
MEN Yu-ming, LI Xun-chang, ZHANG Tao, et al. Discussed on the Failure Modes of Anti-slide Pile with Anchor Cable[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(S):438-443.
- [15] 姚海波,干昆蓉,伍冬,等. 压力分散型锚索与拉力集中型锚索抗振性能研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12):3598-3603.
YAO Hai-bo, GAN Kun-rong, WU Dong, et al. Research on Anti-vibration Ability of Pressure Dispersed Anchor Cable and Tension Concentrated Anchor Cable[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12):3598-3603.
- [16] 胡庆安,夏永旭,赵子胜. 抗滑桩滑坡治理工程数值模拟研究[J]. 长安大学学报:建筑与环境科学版, 2003, 20(4):8-12.
HU Qing-an, XIA Yong-xu, ZHAO Zi-sheng. Finite Element Numerical Simulation of Slipping Slope Treatment by Anti-slipping Piles [J]. Journal of Chang'an University: Architecture and Environment Science Edition, 2003, 20(4):8-12.
- [17] 张友葩,高永涛,吴顺川,等. 失稳挡土墙加固数值分析[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4):17-21.
ZHANG You-pa, GAO Yong-tao, WU Shun-chuan, et al. Numerical Analysis of Reinforcement for Unstable Retaining Wall[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4):17-21.
- [18] 罗强,李亮. 锚索失效对边坡稳定性影响的模拟试验[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(1):69-73.
LUO Qiang, LI Liang. Model Test on Influence of Anchorage Failure to Slope Stability[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(1):69-73.
- [19] 冯忠居,张永清. 预应力锚索技术加固处理滑坡上桥墩偏移[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(3):39-41.
FENG Zhong-ju, ZHANG Yong-qing. The Inclination Prevention of Pier on the Landslide by Prestress Anchor Cable Technique[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21(3):39-41.
- [20] 唐树名,曾祥勇,邓安福. 预应力锚索群锚固边坡均质岩体的室内模型试验研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3):23-27.
TANG Shu-ming, ZENG Xiang-yong, DENG An-fu. Laboratory Model Test Investigation of Prestressed Anchor Cable Group Strengthened Slope Intact Rock [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3):23-27.
- [21] 钱同辉,徐华,夏文才,等. 框架式抗滑桩受力特性对比分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6):56-59.
QIAN Tong-hui, XU Hua, XIA Wen-cai, et al. Force Analysis of Framed Anti-slide Piles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6):56-59.
- [22] 刘鸣,黄华,韩冰,等. 延安地区某边坡双排抗滑桩支护分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(2):63-67.
LIU Ming, HUANG Hua, HAN Bing, et al. Analysis on Double-row Anti-slide Piles of Slope in Yan'an[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2):63-67.
- [23] 邵勇,覃仁辉. 预应力锚索框架梁边坡支护数值模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(3):307-310.
SHAO Yong, QIN Ren-hui. Numerical Simulation of Slope Supporting for Prestressed Anchor with Frame Beam[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010, 32(3):307-310.
- [24] 张发明,刘汉龙,赵维炳. 某高等级公路路堑边坡预应力锚索加固设计[J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(2):38-40.
ZHANG Fa-ming, LIU Han-long, ZHAO Wei-bing. Anchoring Designing for Cut Rock Slope of Expressway [J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2000, 22(2):38-40.
- [25] 史良,张哲,李寻昌,等. 316 国道 K25+040~+140 段滑坡治理中的抗滑桩结构设计[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3):44-47.
SHI Liang, ZHANG Zhe, LI Xun-chang, et al. Design of Anti-sliding Piles on Landslide Control [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(3):44-47.
- [26] 史振兴,巨能攀,邓琼. 弹性地基梁理论在锚索抗滑桩计算中的应用[J]. 工程地质学报, 2010, 18(2):229-234.
SHI Zhen-xing, JU Neng-pan, DENG Qiong. Application of Elastic Foundation Beam Theory to Calculation of Anchor Cable Anti-slide Pile [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(2):229-234.
- [27] 铁道部工务局. 铁路工务技术手册:路基[M]. 北京:中国铁道出版社, 1995.
Works Bureau of Ministry of Railways. Technical Manuals of Railway Works: Subgrade [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1995.