

文章编号: 1000-7598 (2013) 12-3403-08

弧形间隔排桩-桩顶拱梁空间抗滑结构理论研究

张志伟, 邓荣贵

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 为充分利用地形、地质结构和混凝土的材料特性, 优化直线排桩的不利受力状态和提高其整体稳定性, 提出了弧形间隔排桩-桩顶拱梁新型空间抗滑结构, 即根据滑坡地形及地质条件弧形布设抗滑桩, 桩顶设置连系梁, 连系梁两端设置抗力桩, 形成空间结构以抵抗滑坡推力。以抗滑桩与连系梁之间的作用力为冗力, 分别建立了连系梁和抗滑桩的计算模型, 并对连系梁的内力和抗滑桩的位移进行了理论分析, 根据连系梁与抗滑桩连接处的位移协调条件, 建立了力法典型方程求解冗力。最终得出了连系梁的弯矩、剪力和轴力以及抗滑桩的位移、内力理论计算公式。通过算例分析并与悬臂桩及直线排桩-桩顶连系梁抗滑结构比较, 结果表明: 空间抗滑结构中弧形连系梁的内力分布更加合理, 弧形连系梁对抗滑桩的位移约束效果明显。

关键词: 弧形间隔排桩; 连系梁; 新型空间结构; 内力分布; 位移约束

中图分类号: TU 753.3

文献标识码: A

Theoretical study of spatial anti-slide structure of arc interval row piles with coupling beam on pile top

ZHANG Zhi-wei, DENG Rong-gui

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to make full use of terrain, geological structure and material characteristics of concrete, and optimize unfavorable forced state of linear interval cantilever row piles and improve the global stability, a new spatial anti-slide structure of arc interval row piles with arc beam on the top of piles is proposed; that is according to the terrain and geological conditions of slope, to set piles in arc shaped with coupling beam on the top of piles and set resistance piles at the two ends of coupling beam, namely compose a new spatial anti-slide structure to resist landslide thrust. According to force method, the restraint force between the piles and the coupling beam can be regarded as the redundant force, then the calculation model of the anti-slide pile and the coupling beam are built, respectively; and to analyze theoretically the internal force of the coupling beam and the displacement of the anti-slide pile. Then according to the displacement coordination condition between anti-slide pile and coupling beam, to establish the typical equation to solve the redundant force. Finally, the theoretical calculation formula of the bending moment, shear and axial force of the coupling beam and the displacement and internal force of the anti-slide pile are obtained. By analyzing the calculation example and comparing with the cantilever row piles and the linear interval row piles with beam on the top of piles, the results show that the internal force distribution of arc coupling beams of spatial anti-slide structure is more reasonable; and the arc coupling beam can constrain displacement of piles and the effect is obvious.

Key words: arc interval row piles; coupling beam; new spatial structure; internal force distribution; displacement constraint

1 引言

抗滑桩作为加固边坡或治理滑坡的一种有效措施已被广泛应用^[1-2], 其加固机制为平衡滑坡推力^[3]。受荷段的计算方法通常为悬臂桩法, 为保证桩身位移在滑动面处的连续性, 戴自航等^[4]将受荷段视为弹性定向铰支的悬臂梁; Hassiotis 等^[5]提出了单桩

受力与排桩受力模式的区别, 并阐述了排桩悬臂段的受荷机制; 谭捍华等^[6]从功能平衡原理探讨了岩土边坡抗滑桩加固位置、桩长和多抗滑桩共同加固边坡的分析方法; Ito 等^[7]提出了一种系统考虑桩间距、桩顶约束条件、滑面以上桩长、桩径及刚度影响因素的计算方法; Kourkoulis 等^[8]分析了滑体深度及桩间距等因素对桩顶位移及最大弯矩的影响。

收稿日期: 2012-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41272321)。

第一作者简介: 张志伟, 男, 1979年生, 博士研究生, 主要从事边坡治理方面的研究工作。E-mail: zwzhangswjtu@163.com

以上所述计算方法,滑面以上抗滑桩受力状态为悬臂桩。桩身弯矩、剪力较大,受力状态不尽合理。为改善普通抗滑桩的受力状态,在桩顶或桩身设置预应力锚索,构成预应力锚索桩^[9-10]。借助于锚索所提供的锚固力和抗滑桩所提供的阻滑力组成的桩-锚支挡体系共同阻挡滑坡的下滑,周德培等^[11]提出将桩、锚固段桩周岩土及锚索作为一个整体,视为超静定结构,根据位移协调原理,按横向变形约束弹性地基梁法计算锚索及桩身内力。考虑到查表系数截断误差影响内力计算结果,杨佑发等^[12]提出了有限差分“ $K-K$ ”法计算预应力锚索桩。如滑体较厚,滑床工程性质较差,锚索设计长度将会大大增加。可在桩顶设置连系梁与锚索协同作用约束桩顶位移,同时可约束桩顶转角并将抗滑桩连接在一起,其整体稳定性优于普通抗滑桩。申永江等^[13]通过对比分析锚索双排桩和刚架双排桩,得出锚索双排桩的前后两排桩的内力分布差距明显,刚架双排桩的前后两排桩的内力分布差距较小。舒文超^[14]利用势能驻值原理,得出了压顶梁的变形表达式,并分析了影响压顶梁变形的因素。何建明等^[15]考虑了桩顶与连系梁之间的弯矩,根据排桩与圈梁的变形协调条件,推导了排桩的位移及内力计算公式,计算结果表明,桩顶弯矩很小可忽略不计。高印立^[16]没有考虑桩顶与连系梁之间的弯矩及扭矩,采用弹性地基梁模型,提出了考虑圈梁效应的支护桩的简化计算方法,计算的桩顶连系梁位移值大于实测值。文献^[15-16]均分析了抗滑桩的位移及内力,但对桩顶直线连系梁的内力并未分析。

拱在竖向荷载作用下会产生推力,而使拱的弯矩比梁的小,并主要承受压力。基于拱的受力特点,提出了弧形间隔排桩-桩顶拱形系梁空间抗滑结构,桩顶弧形水平连系梁具有拱的受力特点,同样可约束桩顶位移,与直线连系梁相比,弯矩减小,且处于受压状态,降低了连系梁的抗弯要求,并可发挥混凝土的高抗压性能,结构受力状态更为合理。

2 弧形间隔排桩-桩顶拱形系梁空间抗滑结构构造及其工作原理

弧形间隔排桩-桩顶拱形系梁空间抗滑结构由抗滑桩、桩顶水平连系梁及连系梁两端的抗力桩 3 部分组成,具体构造如图 1 所示。图中抗滑桩及桩顶水平拱形系梁形成拱形桩梁,将部分滑坡推力传递到两侧抗力桩上,从而形成空间拱形抗滑结构。为约束连系梁两端位移,可提高两端抗力桩的强度和刚度,作为拱脚以提供水平抗力,使连系梁发挥

拱的作用。如应用于滑体窄而长,两侧地质条件较好的“深槽型”滑坡治理,可直接利用滑坡两侧岩体作为拱脚,降低了端部抗力桩的强度和刚度要求,空间抗滑结构的优越性可进一步充分体现。

根据文献^[15-16]的研究结果,为简化计算并使计算结果偏于安全,连系梁与桩顶之间的作用力仅考虑桩顶与连系梁之间的水平集中力,并以此作为冗力。在冗力作用下,分别推导连系梁的内力和抗滑桩的位移计算公式。根据桩顶与连系梁的位移协调条件建立典型方程求解冗力,并计算连系梁的内力和抗滑桩的内力及位移,计算流程如图 2 所示。

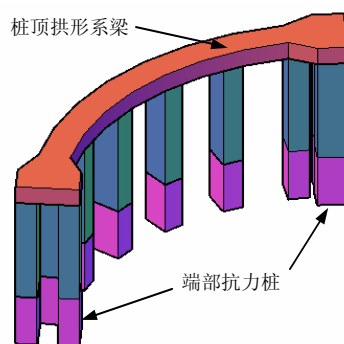


图 1 弧形间隔排桩-桩顶拱形系梁空间抗滑结构图
Fig.1 Diagram of spatial anti-slide structure of arc interval row piles with arc coupling beam on pile top

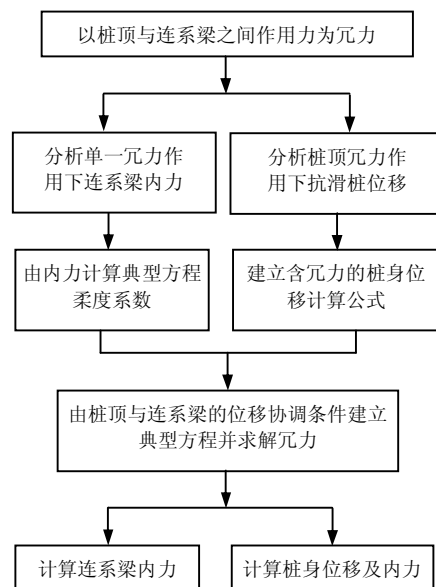


图 2 弧形间隔排桩-桩顶拱形系梁计算流程图
Fig.2 Calculation flow chart of arc interval row piles with arc coupling beam on pile top

3 弧形间隔排桩-桩顶拱形系梁空间抗滑结构理论分析

根据两端抗力桩对连系梁的约束条件,计算模

型可分为两铰拱和无铰拱, 连系梁与除端部以外抗滑桩桩顶的相互作用为集中力、弯矩和扭矩。本文讨论计算模型为两铰拱, 桩顶与连系梁的相互作用仅考虑径向水平集中力, 理论计算模型如图 3 所示, 以拱脚的水平推力和径向水平集中力为冗力。图中 $\bar{X}_{ji}$ 为桩顶对连系梁的径向水平集中力, x_{ji} 及 φ_{ji} 分别为 $\bar{X}_{ji}$ 作用点的横坐标和切线方位角。

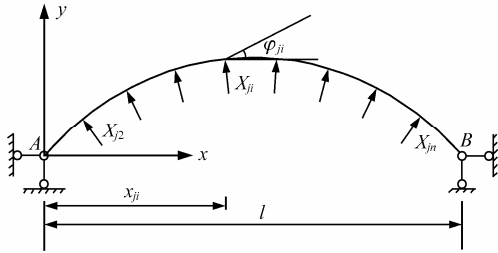


图 3 连系梁计算模型平面图

Fig.3 Planar graph of calculation model of coupling beam

3.1 计算基本假定

(1) 除两端抗力桩外, 其余抗滑桩桩顶沿弧形连系梁径向发生位移, 忽略切向位移。

(2) 不考虑桩顶与连系梁之间的弯矩及扭矩。

(3) 在抗滑桩设置处, 将主滑方向的下滑力沿弧形连系梁径向和切向进行分解, 抗滑桩所受滑坡推力为下滑力的径向分量。

(4) 滑动面在整个工作过程中维持不变, 而且沿滑坡走向滑坡推力保持不变。

(5) 滑坡推力按三角形分布荷载考虑, 抗滑桩所承受的滑坡推力按“桩心-桩心”的下滑力进行计算, 同时不考虑抗滑桩与桩侧岩土体的摩擦力。

3.2 冗力作用下连系梁内力计算理论公式推导

(1) 对两铰拱计算模型, 取以拱脚水平推力为多余约束的基本体系, 如图 4 所示, 图中 φ_p 为点 p 的切线方位角。

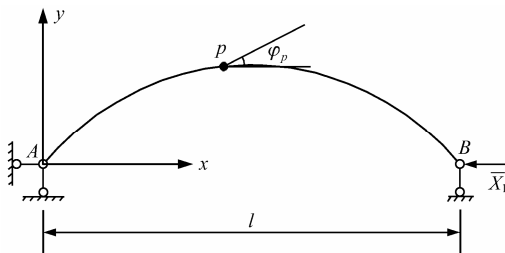


图 4 两铰拱结构基本体系

Fig.4 Basic system of two-hinged arch

在 $\bar{X}_1 = 1$ 作用下, 简支曲梁任一点 p 的弯矩 $\bar{M}_{p1}$ 、剪力 $\bar{Q}_{p1}$ 和轴力 $\bar{N}_{p1}$ 为

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_{p1} &= -y_p \\ \bar{Q}_{p1} &= -\sin \varphi_p \\ \bar{N}_{p1} &= \cos \varphi_p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: y_p 为点 p 的 y 坐标。

(2) 任一单位径向水平力 $\bar{X}_{ji} = 1$ 单独作用于跨度为 l 的简支曲梁时, 任一点 p 的弯矩 $\bar{M}_{pji}$ 、剪力 $\bar{Q}_{pji}$ 和轴力 $\bar{N}_{pji}$ 可根据如图 5、6 所示径向水平力作用位置, 即左半跨或右半跨分别计算, 图中 $\alpha_{A-\bar{X}_{ji}}$ 为左支座至径向水平力作用点的坐标方位角。

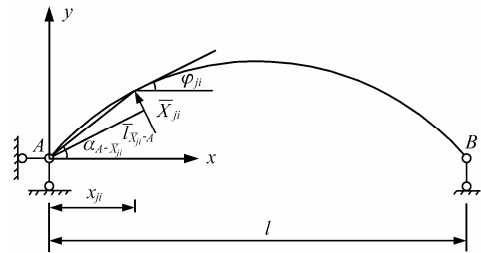


图 5 径向水平力作用于简支曲梁左半跨

Fig.5 Radial horizontal force imposing on left half span

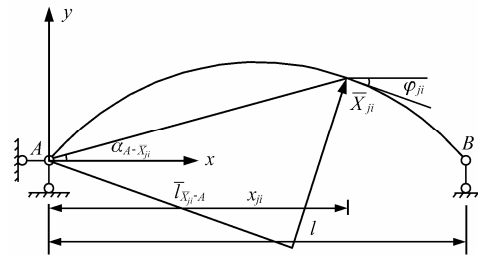


图 6 径向水平力作用于简支曲梁右半跨

Fig.6 Radial horizontal force imposing on right half span

首先, 分析 $\bar{X}_{ji}$ 作用于左半跨的情况, 由图 5 所示的几何关系, $\bar{X}_{ji}$ 对左支座的力臂 $\bar{l}_{\bar{X}_{ji}-A}$ 的计算公式为

$$\bar{l}_{\bar{X}_{ji}-A} = \frac{x_{ji} \cdot \cos(\alpha_{A-\bar{X}_{ji}} - \varphi_{ji})}{\cos \alpha_{A-\bar{X}_{ji}}} \quad (2)$$

支座反力为

$$\left. \begin{aligned} \bar{Y}_A &= -\bar{Y}_B - \bar{X}_{ji} \cos \varphi_{ji} \\ \bar{X}_A &= \sin \varphi_{ji} \\ \bar{Y}_B &= -\frac{\bar{X}_{ji} \bar{l}_{\bar{X}_{ji}-A}}{l} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

不计支座水平力影响时, $0 \leq x \leq x_{ji}$ 段简支曲梁任一点 p 的弯矩 $\bar{M}_{pji}^0$ 和剪力 $\bar{Q}_{pji}^0$ 为

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_{pji}^0 &= \bar{Y}_A x_p \\ \bar{Q}_{pji}^0 &= \bar{Y}_A \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: x_p 为简支曲梁任一点 p 的 x 坐标。

$0 \leq x \leq x_{ji}$ 段简支曲梁任一点 p 的弯矩 $\bar{M}_{pji}$ 、剪力 $\bar{Q}_{pji}$ 和轴力 $\bar{N}_{pji}$ 为

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_{pji} &= \bar{M}_{pji}^0 - \bar{X}_A y_p \\ \bar{Q}_{pji} &= \bar{Q}_{pji}^0 \cos \varphi_p - \bar{X}_{ji}^0 \sin \varphi_p \\ \bar{N}_{pji} &= \bar{Q}_{pji}^0 \sin \varphi_p + \bar{X}_{ji}^0 \cos \varphi_p \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $\bar{X}_{ji}^0$ 为简支曲梁任一点 p 的 x 方向水平内力, 且 $\bar{X}_{ji}^0 = \bar{X}_A$ 。

不计支座水平力影响时, $x_{ji} \leq x \leq l$ 段简支曲梁任一点 p 的弯矩和剪力为

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_{pji}^0 &= \bar{Y}_A x_p + \bar{X}_{ji} \bar{l}_{ji-p} \\ \bar{Q}_{pji}^0 &= -\bar{Y}_B \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\bar{l}_{ji-p}$ 为 $\bar{X}_{ji}$ 对简支曲梁任一点 p 的力臂, $\bar{l}_{ji-p}$ 的计算分为两种情况, 即 $y_p \geq y_{ji}$ 和 $y_p < y_{ji}$ 两种情况, 分别如图 7、8 所示, 图中 α_{ji-p} 为 $\bar{X}_{ji}$ 作用点至 p 点的坐标方位角; y_{ji} 为 x_{ji} 作用点纵坐标。

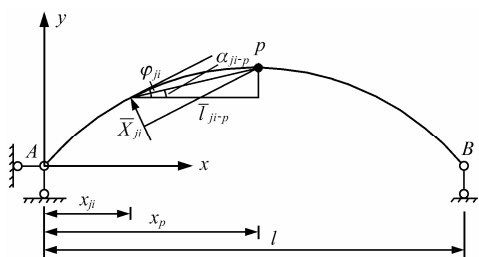


图 7 左半跨 $y_p \geq y_{ji}$ 即 $\alpha_{ji-p} \geq 0$

Fig.7 $y_p \geq y_{ji}$ that $\alpha_{ji-p} \geq 0$

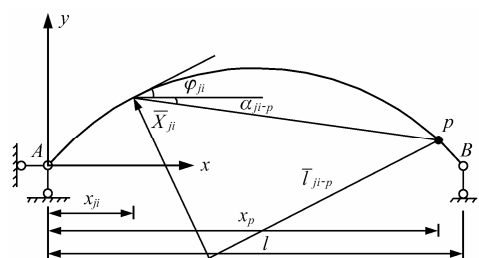


图 8 左半跨 $y_p < y_{ji}$ 即 $\alpha_{ji-p} < 0$

Fig.8 $y_p < y_{ji}$ that $\alpha_{ji-p} < 0$

两种情况下, $\bar{l}_{ji-p}$ 均可表示为

$$\bar{l}_{ji-p} = \frac{(x_p - x_{ji}) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{ji} + \alpha_{ji-p}\right)}{\cos \alpha_{ji-p}} \quad (7)$$

最后, 将式 (6) 计算结果代入式 (5) 即可求得 $x_{ji} \leq x \leq l$ 段结构内力, 其中 $\bar{X}_{ji}^0 = 0$ 。

其次, 分析 $\bar{X}_{ji}$ 作用于右半跨的情况, 如图 9 所示。径向水平力 $\bar{X}_{ji}$ 对左支座的力臂 $\bar{l}_{\bar{X}_{ji}-A}$ 可用式 (2) 计算, 支座反力利用式 (3) 计算。

不计支座水平力影响时, $0 \leq x \leq x_{ji}$ 段简支曲梁任一点 p 的弯矩和剪力可用式 (4) 表示, 代入式 (5) 即可求得结构内力, 其中 $\bar{X}_{ji}^0 = \bar{X}_A$ 。

$x_{ji} \leq x \leq l$ 段简支曲梁任一点 p 的弯矩和剪力可用式 (6) 计算。就 $\bar{X}_{ji}$ 作用点与任一点 p 的位置关系而言, 只有如图 9 所示一种情况。

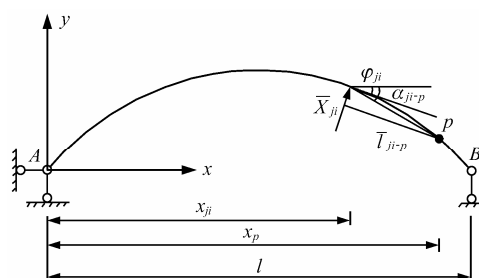


图 9 右半跨 $y_p < y_{ji}$ 即 $\alpha_{ji-p} < 0$

Fig.9 $y_p < y_{ji}$ that $\alpha_{ji-p} < 0$

在图 9 中, $\bar{X}_{ji}$ 对任一点 p 的力臂 $\bar{l}_{ji-p}$ 可利用式 (7) 计算得出, 最后将式 (6) 计算结果代入式 (5) 可求得 $x_{ji} \leq x \leq l$ 段结构内力。

3.3 抗滑桩内力及位移计算

抗滑桩计算模型为如图 10 所示的弹性地基梁, x' 轴方向为桩顶连系梁径向即抗滑桩桩顶位移方向, 应用文献[3]方法计算抗滑桩内力及位移。抗滑桩在滑动面上、下均按弹性地基梁设计, 计算模型为 m - K 法。

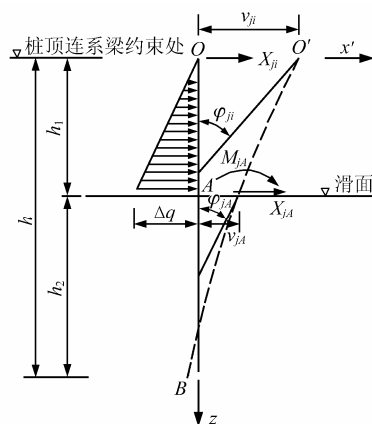


图 10 抗滑桩计算模型

Fig.10 Calculation model of anti-slide pile

根据桩底的约束条件, 可得桩顶位移 v_{ji} 的具体表达式。以桩底为自由端为例, 解得如式 (8) 所示

的桩顶位移。

$$\left. \begin{aligned} v_{ji} &= AX_{ji} + B\Delta q \\ A &= \frac{1}{\alpha^3 EI} \frac{B_8 D_7 - D_8 B_7}{A_8 B_7 - B_8 A_7} \\ B &= \frac{b}{\alpha^5 EI h_1} \frac{B_8 F_7 - F_8 B_7}{A_8 B_7 - B_8 A_7} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: v_{ji} 、 X_{ji} 为沿连系梁径向桩顶位移及冗力; Δq 为抗滑桩所受的三角形滑坡推力最大值; A_i 、 B_i 、 D_i 、 F_i 为 m 法影响函数值和 K 法影响函数值的组合系数。

3.4 弧形间隔排桩-桩顶拱形系梁空间抗滑结构柔度方程

根据桩顶冗力及滑坡推力, 可计算桩顶位移, 利用连系梁与桩顶连接处的位移协调条件, 建立如式 (9) 所示的弧形间隔排桩-桩顶拱形系梁空间抗滑结构的柔度方程。

$$\left. \begin{aligned} \delta_{i1} X_1 + \delta_{i2} X_2 + \cdots + \delta_{in} X_n &= 0 \\ \vdots & \\ \delta_{i1} X_1 + \delta_{i2} X_2 + \cdots + \delta_{in} X_n &= v_{ji} \\ \vdots & \\ \delta_{n1} X_1 + \delta_{n2} X_2 + \cdots + \delta_{nn} X_n &= v_{jn} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

4 算例分析

4.1 模型与参数选取

某滑坡滑动面以上为硬塑性砂黏土, 地基系数的比例系数 $m = 4\,000 \text{ kN/m}^4$, 内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$, 黏聚力 $c = 3 \text{ kPa}$, 滑动面以下为炭质页岩, 地基系数 $K = 300\,000 \text{ kN/m}^3$ 。弧形间隔排列桩-桩顶连系梁空间抗滑结构布置如图 11 所示。

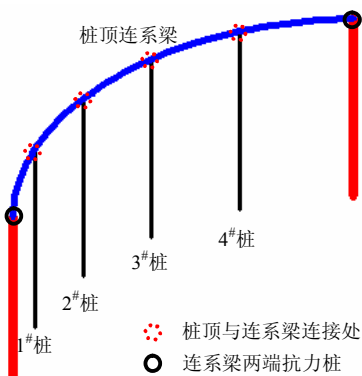


图 11 空间抗滑结构算例示意图

Fig.11 Schematic of spatial anti-slide structure of example

弧形间隔排桩按抛物线 $y = \frac{4f}{l^2} x(l-x)$ 排列,

桩长为 18 m, 其中受荷段 $h_1 = 12 \text{ m}$, 锚固段 $h_2 = 6 \text{ m}$, 桩间距沿跨度方向为 8 m, 桩顶连系梁跨度 $l = 5 \times 8 \text{ m}$, 设桩处滑坡推力 $E_n = 1\,200 \text{ kN/m}$, 滑坡推力按三角形分布, 在滑动面处的强度 $\Delta q = 800 \text{ kPa}$ 。桩截面尺寸为 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 长边方向为桩顶连系梁的径向, 桩身所受推力为滑坡推力沿径向的分量。桩与桩顶连系梁的弹性模量均为 $E = 26 \text{ GPa}$, 桩底边界条件按自由端考虑。

4.2 内力及位移分布特征

4.2.1 桩顶连系梁内力

采用本文的计算方法, 编制计算程序, 分别计算拱高 f 为 5、8、10、12 m 的桩顶拱梁的内力, 并与直线连系梁进行对比, 计算结果如图 12~14 所示。

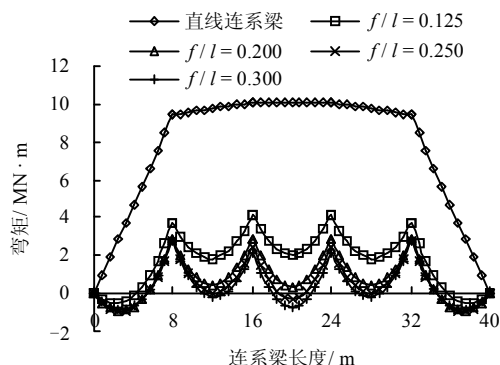


图 12 连系梁弯矩图

Fig.12 Bending moment diagram of coupling beam

从图 12 可知, 直线连系梁的最大弯矩约为拱梁的 3 倍, 且随矢跨比的增加, 拱梁的正弯矩减小, 负弯矩增加。

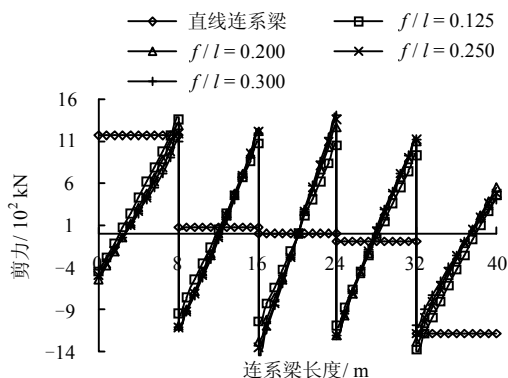


图 13 连系梁剪力图

Fig.13 Shear diagram of coupling beam

从图 13 可知,在桩顶处,直线连系梁和拱梁的剪力均发生突变,拱梁的剪力由正变负,但数值基本相同。在抗滑桩之间,直线连系梁的剪力为定值,而拱系梁的剪力为渐变值,矢跨比对拱梁剪力的变化影响不大。

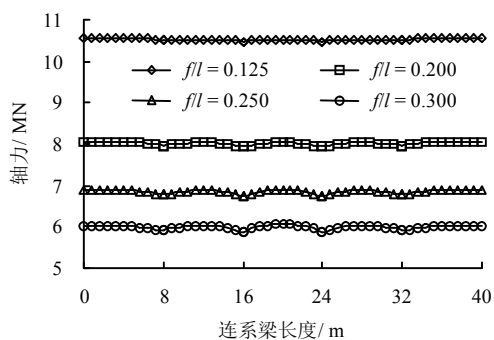


图 14 连系梁轴力图

Fig.14 Axial force diagram of coupling beam

从图 14 可知,拱梁的轴力沿跨度方向变化不大,随矢跨比的增加,拱梁的轴力减小。

4.2.2 抗滑桩内力及位移

如图 11 所示,1[#]、2[#]桩分别与 3[#]、4[#]桩对称布置,故只需计算分析 1[#]和 2[#]桩,计算的桩顶水平力及位移如表 1 所示。

表 1 桩顶水平力及位移

Table 1 Horizontal forces and displacements of piles top

桩顶约束形式	桩号	桩顶水平力 X_{ji} / kN	桩顶位移 v_{ji} / mm
桩顶自由		0.000	15.925
直线连系梁	1 [#]	-1 098.407	10.012
	2 [#]	-81.556	15.486
弧形连系梁 ($f/l=0.125$)	1 [#]	-2 309.485	2.821
	2 [#]	-2 127.658	4.392
弧形连系梁 ($f/l=0.200$)	1 [#]	-2 379.094	1.550
	2 [#]	-2 482.370	2.362
弧形连系梁 ($f/l=0.250$)	1 [#]	-2 312.292	1.208
	2 [#]	-2 573.392	1.763
弧形连系梁 ($f/l=0.300$)	1 [#]	-2 209.180	1.031
	2 [#]	-2 617.010	1.397

由表 1 可知,直线连系梁及拱梁均可限制桩顶位移,拱梁对位移的限制优于直线连系梁,且随矢跨比的增加,位移约束效果愈加明显;直线排桩 1[#]和 2[#]桩桩顶水平力相差近 13 倍,而弧形排列桩 1[#]和 2[#]桩桩顶水平力比较接近。

以 1[#]桩为例,计算桩身位移及内力,并与单桩和直线排桩-桩顶连系梁平面抗滑结构进行对比,计算结果见图 15~17。

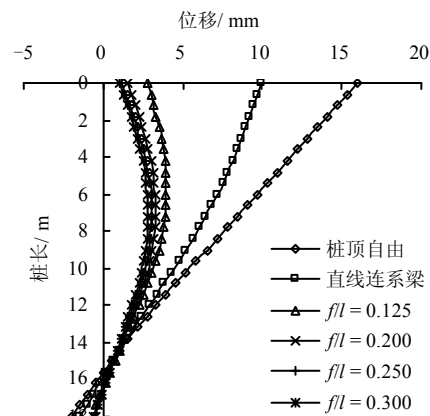


图 15 1#桩桩身位移图

Fig.15 Displacement diagram of #1 pile body

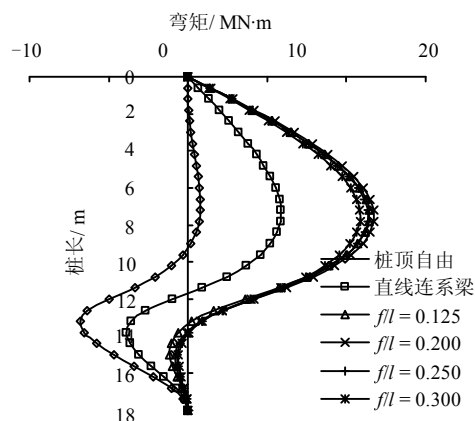


图 16 1#桩桩身弯矩图

Fig.16 Bending moment diagram of #1 pile body

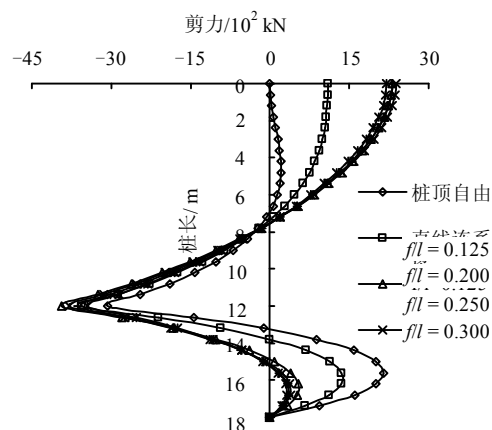


图 17 1#桩桩身剪力图

Fig.17 Shear diagram of #1 pile body

从图 15 可知,桩顶自由的抗滑桩桩身位移最大,直线排桩在连系梁的约束下桩身位移次之,弧形排列桩在连系梁的约束下,桩身位移最小,且随矢跨比的增加,桩身位移减小,位移减小可降低抗滑桩对土体的压力,对边坡稳定有利。

桩顶连系梁能够改变抗滑桩的受力状态,从图

16 可知, 与桩顶自由抗滑桩相比, 滑面以上受荷段弯矩增大, 滑面以下锚固段弯矩减小, 弧形排列桩的变化幅度大于直线排列桩, 连系梁矢跨比对弯矩变化影响不大; 从图 17 可知, 桩身受荷段剪力增大, 锚固段剪力减小, 弧形排列桩的变化幅度较直线排列桩大, 矢跨比对剪力变化幅度的影响不大。

5 结 论

(1) 推导了新型结构中连系梁及抗滑桩的内力计算公式, 通过算例分析并与传统抗滑结构比较, 验证了其内力分布的合理性。

(2) 桩顶拱梁的弯矩最大值约为直线连系梁的 1/3, 随矢跨比的增加拱梁的正弯矩减小, 负弯矩增加。

(3) 直线连系梁和拱梁的剪力均在抗滑桩处发生突变, 在突变处直线连系梁的剪力数值变化较大, 拱梁的剪力由正变负, 但数值基本一致。

(4) 拱梁的轴力大小沿梁长基本无变化, 随矢跨比的增加轴力减小。

(5) 拱梁及直线连系梁均能约束桩顶位移, 拱梁的约束效果优于直线连系梁, 且随矢跨比的增加, 对桩身位移的约束效果愈加明显。

(6) 因连系梁的约束作用, 桩身受荷段弯矩及剪力有所增加, 锚固段弯矩及剪力减小, 弧形排桩的变化幅度较直线排桩大, 矢跨比对弧形排桩内力的变化影响不大。

本文所提计算理论并未考虑桩顶的弯矩及扭矩, 这将在后续研究中加以考虑, 研究成果将另外撰文报导。

参 考 文 献

- [1] 张友良, 冯夏庭, 范建海, 等. 抗滑桩与滑坡体相互作用的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 839—842.
ZHANG You-liang, FENG Xia-ting, FAN Jian-hai, et al. Study on the interaction between landslide and passive piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(6): 839—842.
- [2] 戴自航, 沈蒲生, 彭振斌. 弹性抗滑桩内力计算新模式及其有限差分法[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 99—103.
DAI Zi-hang, SHEN Pu-sheng, PENG Zhen-bin. A new mode for calculating internal forces of stabilizing pile[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(4): 99—103.
- [3] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [4] 戴自航, 沈蒲生. 抗滑桩内力计算悬臂桩法的改进[J]. 湖南大学学报, 2003, 30(3): 81—85.
DAI Zi-hang, SHEN Pu-sheng. Improvements on calculation of internal forces of cantilever anti-sliding piles[J]. *Journal of Hunan University*, 2003, 30(3): 81—85.
- [5] HASSIOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design method for stabilization of slopes with piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(4): 314—323.
- [6] 谭捍华, 赵炼恒, 李亮, 等. 抗滑桩预加固边坡的能量分析方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 190—197.
TAN Han-hua, ZHAO Lian-heng, LI Liang, et al. Energy analysis method for pre-reinforcing slopes with anti-slide piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Supp.2): 190—197.
- [7] ITO T, MATSUI T, HONG P W. Design method for stabilizing piles against landslide-one row of piles[J]. *Soils and Foundations*, 1981, 21(1): 21—37.
- [8] KOURKOULIS R, GELAGOTI F, ANASTASOPOULOS I, et al. Slope stabilizing piles and pile-groups: parametric study and design insights[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(7): 663—677.
- [9] 桂树强, 殷坤龙, 罗平. 预应力锚索抗滑桩治理滑坡应用研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 239—248.
GUI Shu-qiang, YIN Kun-long, LUO Ping. A study on applications of stabilizing piles with pre-stressed anchor cables in landslides remediation works[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(Supp.): 239—248.
- [10] 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.
- [11] 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.