

DOI: 10.7511/jslx20221213001

陡倾滑面滑坡锯齿形抗滑桩力学性能研究

侯小强^{*1}, 刘杰瑞¹, 王新飞¹, 周重任¹, 万宝峰²

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃工程地质研究院, 兰州 730070)

摘要: 陡倾滑面滑坡推力竖向分力显著, 基于滑坡推力水平假定与普通抗滑桩相互作用不充分这一问题, 建立锯齿形抗滑桩结构。依据梯形分布滑坡推力的假设, 推导了受荷段内力计算公式, 采用 Winkler 弹性地基理论推导了锚固段内力计算公式, 并开展锯齿形抗滑桩的力学性能研究。分析表明, (1) 随着滑面倾角的增加, 锯齿形抗滑桩的受荷段、锚固段的弯矩、剪力以及侧应力均减小, 内力减小幅度随之增大; (2) 滑面倾角在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 时, 随着滑面倾角的增加, 锚固段的理论最小长度在逐渐增加, 40° 时锚固段的长度为 4.2 m 达到最大值, 且该长度仅占整个桩长 35%, 远小于按现行规范取得的锚固段长度最大值($1/2$ 总桩长), 桩侧摩阻力就可以完全满足竖向力学平衡; (3) 将锯齿形抗滑桩与普通抗滑桩内力对比, 受荷段和锚固段的弯矩减小 34%、剪力减小 36% 及桩侧应力减小幅度大于 30%, 力学性能良好。

关键词: 锯齿形抗滑桩; 陡倾滑面; 力学模型; 性能分析

中图分类号: U213.1+52.1; O302

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2023)05-0854-07

1 引言

在我国西南、西北和西藏地区, 地形高陡谷深, 地质构造复杂多样, 地表裸露且生态环境脆弱, 坡体松散, 滑坡滑面倾角多为 $25^\circ \sim 40^\circ$ 斜坡^[1], 受重力及其他竖向荷载力的作用效果显著, 滑面陡倾且具有极高的动势能转化作用, 表现为高速性和极强的破坏性, 因此抗滑桩成为常用的抗滑治理措施^[2]。受地形和工程条件的限制, 抗滑桩只能设置在斜坡上^[3-4]。由于陡倾滑面的倾角比较大, 竖向分力较为显著, 因此陡倾滑面滑坡推力的矢量问题需深入分析。

滑坡推力是研究抗滑桩内力的基本要素。滑坡推力矢量问题主要表现为大小、分布形式和作用位置, 并直接影响抗滑桩的内力和变形。目前多数学者重点关注滑坡推力的计算方法, 其中国际上滑坡推力主要采用稳定性分析来确定。Ito 等^[5] 在满足莫尔-库仑屈服准则条件下, 采用 Bishop 法假定为圆弧滑动面, 利用软件计算最不利的滑动面和稳定系数, 在此基础上拟设抗滑桩并反算抗滑桩承受的滑坡推力大小。国内学者认为许多滑坡滑面不一定呈圆弧状, 多为不规则形状, 结合工程实例提

出传递系数法的计算理论, 其中郑颖人等^[6] 认为传递系数法是一种工程实用的计算方法, 其隐式解如用得适当, 可以达到与严格解相近的效果。张京伍等^[7] 采用极限分析上限法, 构建坡顶含竖向裂缝的对数螺旋转动破坏机制, 推导边坡临界坡高的稳定系数计算公式。在滑坡推力分布方面, 戴自航^[8] 依据岩土性质以及工程经验将滑坡推力划分为三角形、矩形和梯形三种水平分布形式。陈鑫^[9] 提出小桩距二段式侧向力分布计算的方法, 认为其滑坡推力呈中间大和两头小抛物线分布规律。由此可以看出, 近年来国内外学者基于桩后推力水平为假定条件来研究各种抗滑桩设计推力大小的计算方法, 侧重于计算精度和水平支护力的计算方法, 而对于滑坡推力方向问题研究较少。陡倾滑面滑坡存在前后缘高差大, 坡面和滑面坡度大, 滑坡推力大等特点^[10], 目前国内对陡倾滑面滑坡研究甚少, 主要集中在对锚固深度的计算方法研究。

尽管国内采用了各种类型的抗滑桩来治理不同种类的滑坡(包括锚索抗滑桩^[11] 为代表的主动型抗滑桩和以普通抗滑桩、箱型竖向预应力抗滑桩^[12] 等结构形式为主的被动型抗滑桩), 但这些抗滑桩均以桩后承受水平方向滑坡推力作为假定条件, 通过这些假定条件构建的桩土相互作用计算模型会为陡倾滑面滑坡抗滑桩设计计算带来新的问题, 常规抗滑桩桩后的滑坡推力忽视了陡倾滑面滑

收稿日期: 2021-12-13; 修改稿收到日期: 2023-01-31。

基金项目: 中央引导地方科技发展资金(22ZY1QA005);

甘肃省交通运输科研基金(2022-028)资助项目。

作者简介: 侯小强*(1977-), 男, 教授

(E-mail: houxq@foxmail.com).

坡推力竖直方向的作用以及滑坡推力与桩悬臂端相互作用不充分的问题,这会直接影响到抗滑桩的力学性能。

因此基于国内外对滑坡推力大小、分布和作用方式的研究,本文构建了一种新型抗滑桩结构来研究滑坡推力与桩之间的相互作用关系,提出适合于陡倾滑面滑坡的锯齿形抗滑桩结构,并推导出锯齿形抗滑桩的计算公式,分析滑面倾角变化对其内力的影响,通过和常规抗滑桩的对比来证明锯齿形抗滑桩的优越性能,研究成果可为今后的工程实践提供理论基础。

2 锯齿形抗滑桩结构

2.1 基本假定

锯齿形抗滑桩内力受滑坡推力和锚固段岩土性能的影响,通常以滑动面为界按两部分分段计算。黄小桂等^[13]认为滑坡推力和滑面方向一致,戴自航^[8]将滑坡推力按照三角形、矩形和梯形分解成水平方向和竖直方向,赵尚毅等^[14]指出常规抗滑桩水平推力与滑面方向成法向关系,马显春等^[2]探究了陡倾滑坡锚固段桩土相互作用关系。因此假定条件具体如下。

(1) 滑坡的滑面倾角在 $25^\circ \sim 40^\circ$,滑坡推力和滑面方向一致。

(2) 锯齿形抗滑桩作用面与滑坡推力方向呈法向关系,其竖直夹角与滑坡推力倾角大小相等。

(3) 滑坡推力按照三角形、矩形和梯形分解成水平方向和竖直方向。

(4) 锚固段桩土相互作用关系采用线性 Winkler 弹性地基模型,并考虑桩体自重、竖向分力、桩侧摩阻力和桩底支撑力的竖直方向力学平衡。

2.2 锯齿形抗滑桩结构

抗滑桩受荷段受力形式决定了整体的力学性能,因此合理处理滑坡推力与受荷段结构的受力关系尤为重要,通过锯齿形抗滑桩受力面与滑坡推力

方向的法向关系,使得受力面竖直夹角与滑坡推力倾角大小相等,因此滑坡推力可完全作用于抗滑桩且无任何方向的剩余分力。抗滑桩受荷段结构形式如图 1 和图 2 所示,滑坡推力 E_n 与水平方向的夹角为 θ ,建立直角 $\triangle ABC$,其中直角边 AB 为锯齿形受力面,滑坡推力 E_n 与其呈法向关系,另一个直角边 BC 和滑坡推力 E_n 方向一致,以此类推可构建若干个直角三角形分力块构成锯齿形结构。

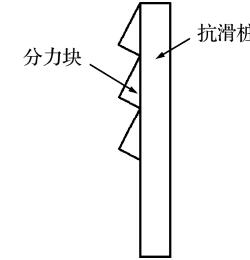


图 1 锯齿形抗滑桩结构模型
Fig. 1 Model of zigzag anti-slide pile

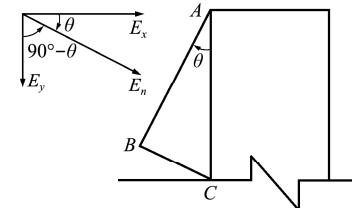


图 2 滑坡推力与桩后受力面模型
Fig. 2 Landslide thrust and stress surface model behind pile

3 构建锯齿形抗滑桩计算模型

3.1 受荷段锯齿形结构的力学模型

抗滑桩受荷段承受的滑坡推力常见分布形式有矩形、三角形和梯形。依据滑坡推力的分布特征和滑坡滑面倾角的关系,推导滑坡推力与锯齿形抗滑桩受荷段之间的定量关系。由于梯形的力学模型包括了三角形和四边形两种类型,因此选取滑坡推力为梯形分布形式来进行具体的研究更具有代表性,如图 3 所示。

锯齿形受荷段内力计算,首先计算每个三角形分力块的剪力和弯矩,然后对所有锯齿结构的剪力

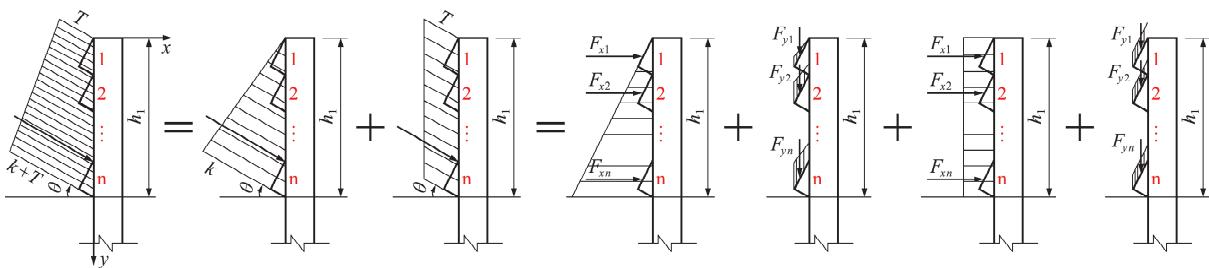


图 3 滑坡推力梯形分解模式
Fig. 3 Trapezoidal decomposition model of landslide thrust

和弯矩求和进行公式推导。具体如下,滑坡推力分布形式假定为梯形,其力的集度随着抗滑桩长度呈一次函数变化,关系表达式为

$$q = ky + T \quad (1)$$

通过对集度式(1)积分,滑坡推力表达式为

$$F = \int_0^{h_1} q dy = \frac{1}{2} kh_1^2 + Th_1 \quad (2)$$

每个三角形分力块水平方向的分力表达式为

$$F_{xn} = \int_{(n-1)h_1/i}^{nh_1/i} q \cdot \cos\theta dy = \frac{(2n-1)kh_1^2 \cos\theta}{2i^2} + \frac{Th_1 \cos\theta}{i} \quad (3)$$

同理, F_{yn} 为第 n 个三角形受力块的竖向分力

$$F_{yn} = \int_{(n-1)h_1/i}^{nh_1/i} q \cdot \sin\theta dy = \frac{(2n-1)kh_1^2 \sin\theta}{2i^2} + \frac{Th_1 \sin\theta}{i} \quad (4)$$

式中 θ 为滑面水平夹角, F 为滑坡推力, k 和 T 为常数, q 为集度, h_1 为受荷段长度, i 为分力块总个数, n 为序数, 表示第 n 个分立块, F_{xn} 为第 n 个分力块水平分力, F_{yn} 为竖直方向分力。

通过计算每个分力块重心的位置,求得第 n 个分力块的水平合力 F_{xn} 到计算截面的距离为

$$Y_n = \frac{h_1}{i} - \frac{2h_1}{3i} \cos^2\theta \quad (5)$$

同理可得,第 n 个分力块的竖向合力 F_{yn} 到计算截面的距离为

$$X_n = \frac{h_1}{3i} \sin 2\theta + \frac{a}{2} \quad (6)$$

式中 a 为桩截面宽度, Y_n 为由第 n 个三角形滑坡推力合力作用点至桩顶距离, F_{xn} 为第 n 个水平方向分力。

由第 n 个三角形滑坡推力合力作用点至桩顶距离为 Y_n , 其水平方向合力为 F_{xn} , 可得第 n 个三角形分力块产生的水平分力弯矩为

$$M_{xn} = \left(\frac{(2n-1)kh_1^2 \cos\theta}{2i^2} + \frac{Th_1 \cos\theta}{i} \right) \times \left(\frac{1}{i} \cdot h_1 - \frac{2h_1}{3i} \cos^2\theta \right) \quad (7)$$

同理可得,第 n 个三角形分力块产生的竖向分力弯矩为

$$M_{yn} = \left(\frac{(2n-1)kh_1^2 \sin\theta}{2i^2} + \frac{Th_1 \sin\theta}{i} \right) \times \left(\frac{h}{3i} \sin 2\theta + \frac{a}{2} \right) \quad (8)$$

由于 M_x 和 M_y 方向相反,因此锯齿形抗滑桩总弯矩 M_n 等于两者之差,即

$$\begin{aligned} M_n = & M_{xn} - M_{yn} = \\ & \left(\frac{(2n-1)kh_1^2 \cos\theta}{2i^2} + \frac{Th_1 \cos\theta}{i} \right) \times \\ & \left(\frac{1}{i} \cdot h_1 - \frac{2h_1}{3i} \cos^2\theta \right) - \\ & \left(\frac{(2n-1)kh_1^2 \sin\theta}{2i^2} + \frac{Th_1 \sin\theta}{i} \right) \times \\ & \left(\frac{h}{3i} \sin 2\theta + \frac{a}{2} \right) \end{aligned} \quad (9a)$$

为了求出抗滑桩剪力,根据式(9b)弯矩与剪力之间的微分关系即可求得抗滑桩剪力为

$$Q(y) = dM(y)/dy \quad (9b)$$

3.2 锯齿形抗滑桩锚固段力学模型

陡倾滑面倾角角度较大,滑坡推力作用在锯齿结构受力面的竖向分力较为突出,因此抗滑桩需要满足竖直方向力学平衡,使得抗滑桩受力后不产生竖向位移,其次锚固段能提供足够的抗滑力,使得滑坡处于稳定状态。本文锯齿形抗滑桩的锚固段使用桩底无接触的类型,如图 4~图 6 所示。

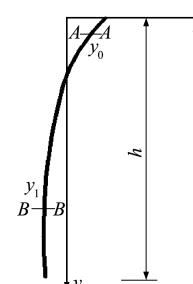


图 4 锚固段变形

Fig. 4 Deformation of anchorage section

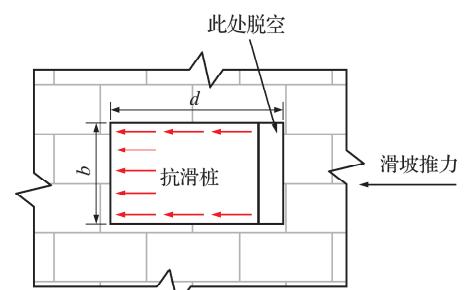


图 5 A-A 截面桩周岩体受力

Fig. 5 Strain diagram of rock mass around A-A section pile

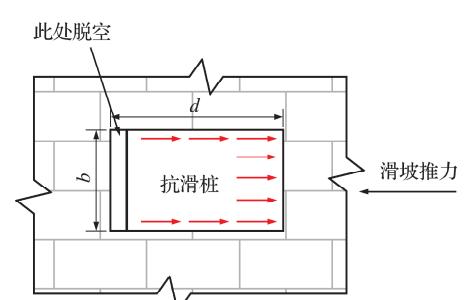


图 6 B-B 截面桩周岩体受力

Fig. 6 Strain diagram of rock mass around B-B section pile

抗滑桩锚固段变形时,总有一个面脱空使其三个面承受摩阻力^[15],由竖向力学平衡可得

$$FL \sin\theta + (h_1 + h)db\gamma \leq P_{sr} \\ P_{sr} = U \cdot h \cdot f_0 = (2d + b)hf_0 \quad (10)$$

式中 F 为剩余下滑力, L 为桩距, h 为锚固段长度, γ 为混凝土容重, U 为桩身脱空后周长, b 和 d 为横截面尺寸, f_0 为桩侧摩阻力系数, P_{sr} 为桩竖向侧摩阻力。

根据弹性地基梁理论,按照抗滑桩变形前后有无接触和侧摩阻力方向来建立桩顶受荷载作用的挠曲线微分方程为

$$EI \frac{d^4x}{dy^4} + xKB_p + (2d + b)f = 0 \quad (11)$$

式中 E 为桩的弹性模量, I 为截面惯性量, B_p 为桩的计算宽度,一般按 $B_p = b + 1$ 计算, β 为桩的变形系数, K 为地基系数。 β 可计算为

$$\beta = \left(\frac{KB_p}{4EI} \right)^{1/4} \quad (12)$$

4 实例分析

如图 7 所示,某折线型滑面滑坡的滑体为较为松散的第四系块石质土,滑面坡度 $40^\circ \sim 55^\circ$,滑床为二叠系石灰岩,滑床坡度 30° ,滑体的天然重度和饱和重度均采用室内试验资料,天然重度为 17.4 kN/m^3 ,内摩擦角和粘聚力分别为 27° 和 17 kPa ,抗滑桩的位置设置在坡体前缘,设桩处滑体厚度 6 m ,桩体采用 C30 混凝土浇筑,桩身截面尺寸 $1.8 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,桩中间距为 5 m 。

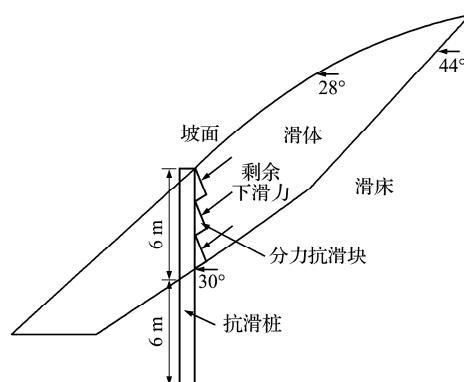


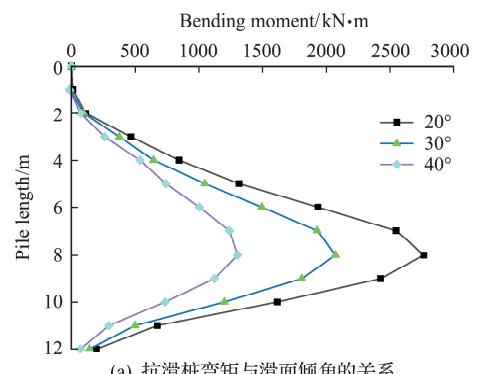
图 7 抗滑桩加固某滑坡实例

Fig. 7 Schematic diagram of a landslide reinforced by anti-slide pile

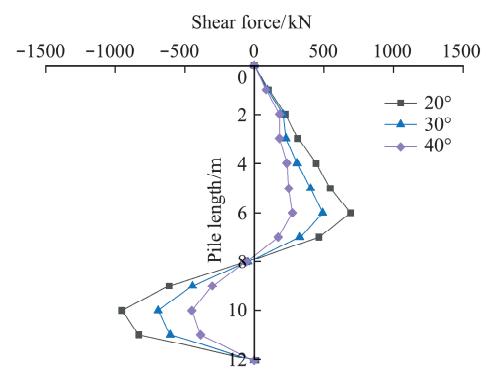
根据地层岩性,滑床顶面侧向地基系数取为 $K_a = 18000 \text{ kN/m}^3$,滑床的地基系数比例系数取为 $m = 40000 \text{ kN/m}^4$,侧摩阻力 $f_0 = 160 \text{ kPa}$ 。滑坡前缘设置悬臂桩,桩间距 4 m ,桩后滑坡推力 $F = 1000 \text{ kN/m}$ 。

4.1 滑面倾角对内力的影响

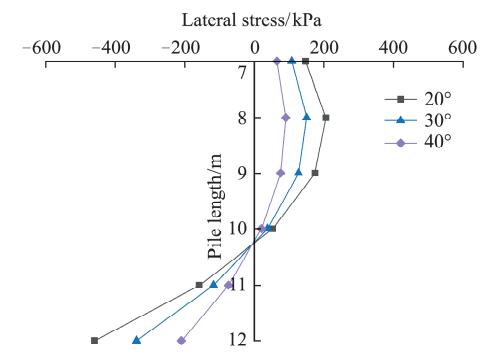
滑坡倾角对滑坡下滑力竖向分力的影响较为明显,滑面倾角越大,竖向分力越大,水平分力越小,为进一步探明滑坡倾角对锯齿形抗滑桩弯矩、剪力以及锚固段桩侧应力的影响程度,选取 $20^\circ \sim 40^\circ$ 常见滑面倾角展开讨论。如图 8 所示,滑面倾角在 $20^\circ \sim 30^\circ$,随着滑面倾角增加,受荷段和锚固段弯矩和剪力以及侧应力减小幅度较小;滑面倾角 $30^\circ \sim 40^\circ$,随着滑面倾角增大,其减小幅度也随之增大。这是由于随着滑面倾角的增大,竖向分力逐



(a) 抗滑桩弯矩与滑面倾角的关系
(a) Relationship between bending moment of anti-slide pile and inclination angle of sliding surface



(b) 抗滑桩剪力与滑面倾角的关系
(b) Relationship between shear force of anti-slide pile and inclination angle of sliding surface



(c) 锚固段侧应力与滑面倾角的关系
(c) Relationship between lateral stress of anchorage section and dip angle of sliding surface

图 8 抗滑桩弯矩、抗滑桩剪力和锚固段侧应力与滑面倾角的关系

Fig. 8 Relationship between bending moment of anti-slide pile, shear force of anti-slide pile, lateral stress of anchorage section and inclination angle of sliding surface

渐增大,水平方向分力逐渐减小,这导致 M_y 逐渐增大同时 M_x 逐渐减小,因此总弯矩减小,剪力的变化规律也是随着滑面倾角增加而减小,锚固段的侧应力亦是如此。因此进一步表明滑面倾角越大,锯齿形抗滑桩良好的力学性能体现得越明显。

4.2 抗滑桩锚固段长度

抗滑桩桩底接触形式与抗滑桩锚固深度有直接的关系,根据本算例中的锚固段长度验证桩底无接触时的可行性,将其参数代入式(10)计算得

$$1000 \times 4 \times \sin\theta + (6 + h) \times 1.8 \times 1.2 \times 25 \leqslant 4.8 \cdot h \times 160 \quad (13)$$

如图9所示,当倾角为30°、锚固段的长度为3.2 m时恰好平衡其竖向力,且该长度仅占整个桩长26.8%,远小于设计为6 m的抗滑桩锚固段长度。

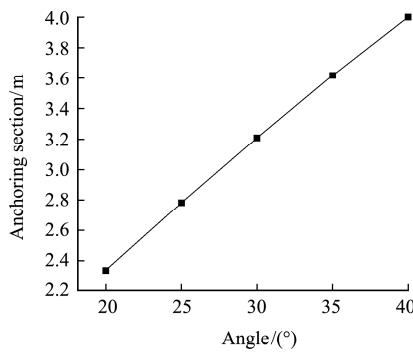


图9 滑面倾角和锚固段最小长度的关系

Fig. 9 Relationship between dip angle of sliding surface and minimum length of anchorage section

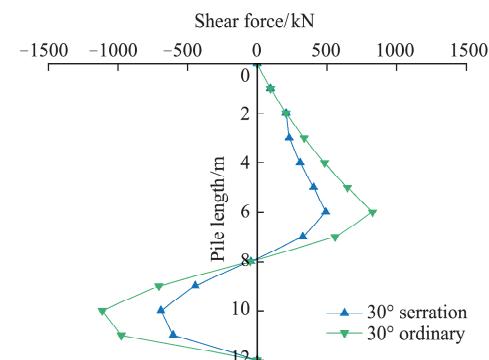
本文进一步论证 $20^\circ \sim 40^\circ$ 时,随着滑面倾角的增加,锚固段的理论最小长度在逐渐增加,40°时所需锚固段的长度为4.2 m达到最大值,且该长度仅占整个桩长35%,远小于按现行规范取得的锚固段长度最大值(1/2总桩长),这表明抗滑桩模型为桩底自由端类型,设计时仅考虑其桩侧摩阻力即可。

4.3 普通抗滑桩和锯齿形抗滑桩内力对比分析

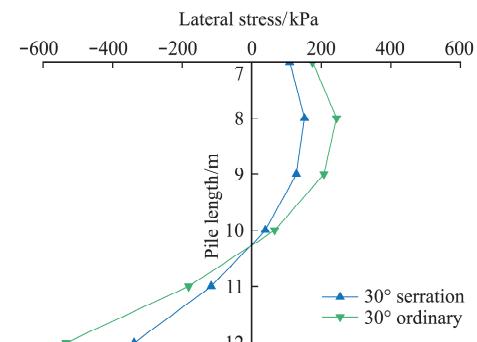
抗滑桩内力对比,主要从弯矩、剪力及锚固段桩侧应力三方面进行比较,计算结果表明普通抗滑桩和锯齿形抗滑桩的内力分布形式基本相同,但大小明显不同。

如图10(a)所示,在滑面倾角30°时,锯齿形抗滑桩弯矩最大值为1927.27 kN·m,普通抗滑桩为2910.35 kN·m,减小了约34%;如图10(b)所示,锯齿形抗滑桩剪力最大值为711.15 kN,普通抗滑桩为1112.18 kN,减小了约36%,从图10(c)可以看出,锯齿形抗滑桩锚固段的侧应力比普通抗滑桩有明显减小,滑面处和桩底端分别减小30%和46%。因此,锯齿形抗滑桩抗滑性能明显好于普通

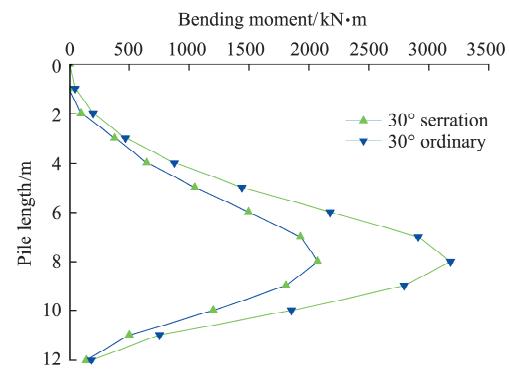
抗滑桩。



(a) 两种抗滑桩弯矩对比
(a) Comparison of bending moments of two kinds of anti-slide pile



(b) 两种抗滑桩剪力对比
(b) Shear force comparison of two kinds of anti-slide piles



(c) 两种抗滑桩锚固段侧应力对比
(c) Comparison of lateral stress in anchorage section of two kinds of anti-slide piles

图10 两种抗滑桩弯矩、抗滑桩剪力和抗滑桩锚固段侧应力对比
Fig. 10 Comparison of bending moments, shear force and lateral stress in anchorage section of two kinds of anti-slide piles

5 结 论

(1) 通过对陡倾滑面滑坡推力空间分布特征的深入分析,提出了锯齿形抗滑桩结构。基于梯形滑坡推力假设,利用滑坡推力方向与受力面的法向关系,建立了锯齿形抗滑桩的结构解析模型,推导了锯齿形抗滑桩内力计算公式。

(2) 对锯齿形抗滑桩开展受力性能分析,随着滑面倾角的增加,锯齿形抗滑桩受荷段、锚固段的弯矩、剪力以及侧应力均减小,且抗滑桩内力减小

幅度也随之增大;滑面倾角在 $20^{\circ}\sim40^{\circ}$ 时,随着滑面倾角的增加,锚固段的理论最小长度在逐渐增加, 40° 时锚固段的长度为4.2 m达到最大值,且该长度仅占整个桩长35%,远小于按现行规范取得的锚固段长度最大值(1/2总桩长),桩侧摩阻力就可以完全满足竖向力学平衡。

(3)通过锯齿形抗滑桩与普通抗滑桩内力对比,发现受荷段和锚固段的弯矩减小34%、剪力减小36%及桩侧应力减小幅度大于30%,验证了锯齿形抗滑桩力学性能更加优越。

参考文献(References):

- [1] 戴自航.抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4):517-521.(DAI Zi-hang. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on antislide piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, **21**(4): 517-521. (in Chinese))
- [2] 马显春,上官力,肖洋.陡倾滑面滑坡半坡桩锚固深度模型试验研究[J].现代隧道技术,2019,56(S1):221-230.(MA Xian-chun, SHANGGUAN Li, XIAO Yang. Model test for determining anchorage depth of anti-slide pile in steeply slipping landslides[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2019, **56**(S1): 221-230. (in Chinese))
- [3] 闫玉平,肖世国.考虑滑带强度分区的基覆式滑坡抗滑桩设计推力算法[J].高速铁路技术,2019,10(6):30-34,53.(YAN Yu-ping, XIAO Shi-guo. Calculation method for design thrust force on anti-slide pile for bedrock-covered landslide considering strength partition of landslide zone [J]. *High-Speed Railway Technology*, 2019, **10**(6): 30-34, 53. (in Chinese))
- [4] 韦秀东,卢继忠,李泽江,等.抗滑桩滑坡推力及桩前抗力设计计算[J].水利水电技术,2020,51(1):23-31.(WEI Xiu-dong, LU Ji-zhong, LI Ze-jiang, et al. Design calculation of landslide thrust and front resistance of anti-slide pile[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, **51**(1): 23-31. (in Chinese))
- [5] Ito T, Matsui T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles[J]. *Soils and Foundations*, 1975, **15**(4):43-59.
- [6] 郑颖人,时卫民,刘文平,等.三峡库区滑坡稳定分析中几个问题的研究[J].重庆建筑,2005,4(6):6-17.(ZHENG Ying-ren, SHI Wei-ming, LIU Wen-ping, et al. Study on some engineering problems of slope stability analysis in Three Gorges reservoir zone[J]. *Chongqing Architecture*, 2005, **4**(6): 6-17. (in Chinese))
- [7] 张京伍,张海洋,李明东,等.基于上限理论的孔隙水压力作用下隧道洞口段含裂缝仰坡稳定性分析[J].应用数学和力学,2021,42(12):1287-1295.(ZHANG Jing-wu, ZHANG Hai-yang, LI Ming-dong, et al. Upper bound analysis on the stability of cracked slopes at tunnel entrance subjected to pore water pressure[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2021, **42**(12): 1287-1295. (in Chinese))
- [8] 戴自航.抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4):517-521.(DAI Zi-hang. Study on the distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on antislide piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, **21**(4): 517-521. (in Chinese))
- [9] 陈鑫.倾倒变形体发育演化影响因素及失稳模式研究[D].成都理工大学,2016.(CHEN Xin. Research on Influence factors of Development & Evolution and Instability Mode of Toppling Deformation[D]. Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [10] 肖世国.似土质边(滑)坡抗滑桩后滑坡推力分布模式的近似理论解析[J].岩土工程学报,2010,32(1):120-123.(XIAO Shi-guo. Approximate theoretical solution of distribution modes of landslide thrust on anti-sliding piles in soil-like slopes or landslides[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(1): 120-123. (in Chinese))
- [11] 门玉明,韩冬冬,王海英.计算锚索抗滑桩变形及内力的一种新方法[J].地球科学与环境学报,2013,35(1):90-96.(MEN Yu-ming, HAN Dong-dong, WANG Hai-ying. New method for calculating deformation and internal force of anchor anti-slide pile [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2013, **35**(1): 90-96. (in Chinese))
- [12] 侯小强,曹建宇,钱普舟,等.箱型竖向预应力抗滑桩的机理研究[J].城市道桥与防洪,2014(10):178-181,16.(HOU Xiao-qiang, CAO Jian-yu, QIAN Pu-zhou, et al. Study on the mechanism of box vertical pre-stressed anti-slip pile[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2014(10): 178-181, 16. (in Chinese))
- [13] 黄小桂,骆俊晖,黄成岑,等.陡倾顺层边坡倾倒变形处治技术[J].公路,2022,67(2):58-62.(HUANG Xiao-gui, LUO Jun-hui, HUANG Cheng-cen, et al. Treatment technology of toppling deformation of steep bedding slope[J]. *Highway*, 2022, **67**(2): 58-62. (in Chinese))

- [14] 赵尚毅, 郑颖人, 敖贵勇. 考虑桩反作用力和设计安全系数的滑坡推力计算方法—传递系数隐式解法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1668-1676. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, AO Gui-yong. Calculation method of landslide thrust considering the reaction force of piles and factor of safety—Implicit solution using transfer coefficient [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(8): 1668-1676. (in Chinese))
- [15] 雷国平, 唐辉明, 李长冬, 等. 抗滑桩嵌固段设计修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 605-614. (LEI Guo-ping, TANG Hui-ming, LI Chang-dong, et al. Study of improved design method of anti-slide pile socketed segment [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(3): 605-614. (in Chinese))

Study on the mechanical performance of zigzag anti-slide pile on steep inclined slip surface landslide

HOU Xiao-qiang^{*1}, LIU Jie-rui¹, WANG Xin-fei¹, ZHOU Chong-ren¹, WAN Bao-feng²
 (1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
 2. Gansu Institute of Engineering Geology, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The vertical component of thrust of landslide on a steep inclined sliding surface is significant. Aiming at insufficient interaction between the thrust level of a landslide and an ordinary anti-slide pile, a zigzag anti-slide pile structure is established. Based on the assumption of trapezoidal distribution of landslide thrust, the internal force calculation formula of loaded section is derived, the internal force calculation formula of anchoring section is derived by Winkler elastic foundation theory, and the mechanical properties of the zigzag anti-slide pile are studied. The analysis shows that; (1) with the increase of the inclination of the sliding surface, the bending moment, shear force and lateral stress of the loading section and anchorage section of the zigzag anti-sliding pile decrease, and the reduction range of the internal force increases; (2) when the inclination angle of the sliding surface is between 20 and 40 degrees, with the increase of the inclination angle of the sliding surface, the theoretical minimum length of the anchoring section gradually increases, at 40 degrees, the length of the anchoring section reaches the maximum value of 4.2m, which only accounts for 35% of the total length of the pile and is much smaller than the maximum length of the anchoring section (1/2 of the total pile length) obtained according to current specifications, and the friction resistance of the pile side can fully meet the vertical mechanical balance; (3) by comparing the internal forces of the zigzag anti-slide pile with an ordinary anti-slide pile, the bending moment of the loading section and anchoring section is reduced by 34%, the shear force by 36% and the pile side stress by more than 30%.

Key words: zigzag anti-slide pile; steep sliding surface; mechanical model; performance analysis

引用本文/Cite this paper:

侯小强, 刘杰瑞, 王新飞, 等. 陡倾滑面滑坡锯齿形抗滑桩力学性能研究[J]. 计算力学学报, 2023, 40(5): 854-860.

HOU Xiao-qiang, LIU Jie-rui, WANG Xin-fei, et al. Study on the mechanical performance of zigzag anti-slide pile on steep inclined slip surface landslide[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, 40(5): 854-860.