

h 型斜横梁支座式抗滑桩计算模型及力学性能研究

侯小强^{1,3†}, 郑佳乐¹, 王新飞¹, 杨芮¹, 郭富赞^{2,3}, 侯宝胜⁴

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050;

3. 自然资源部兰州城市地质灾害野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730050;

4. 甘肃有色工程地质勘察设计院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要:针对传统 h 型抗滑桩横梁刚性连接处易脆性破坏的问题, 本文提出结构优化方案, 将空间多次超静定结构简化为倾斜“简支”结构, 提出 h 型斜横梁支座式抗滑桩。基于 Winkler 弹性地基梁理论和结构力学位移法建立解析模型, 采用算例分析和数值模拟方法, 研究表明: 解析解理论计算与数值模拟结果吻合良好, 证明了该计算模型的合理性; 与传统 h 型桩相比, 该优化结构具有显著优势, 即大幅降低后桩-横梁连接处的弯矩, 完全释放前桩桩顶弯矩(减小为 0), 显著减小横梁剪力, 避免连接处出现应力集中现象; 从关键几何参数分析可知, 随斜横梁角度增大, 斜横梁及后桩内力、变形减小, 随前后桩间距增加, 前桩内力、变形减小, 系统受力性能更优。

关键词:脆性破坏; h 型斜横梁支座式抗滑桩; 斜横梁角度; 桩间距

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Study on calculation model and mechanical properties of h-shaped inclined beam bearing anti-slide pile

HOU Xiaoqiang^{1,3†}, ZHENG Jiale¹, WANG Xinfei¹, YANG Rui¹, GUO Fuyun^{2,3}, HOU Baosheng⁴

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. The Second Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou 730050, China;

3. Lanzhou Urban Geological Hazard Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Lanzhou 730050, China;

4. Gansu Nonferrous Engineering Survey and Design Research Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: To solve the problem of brittle failure at the rigid connection of the traditional h-shaped anti-slide pile beam, a structural optimization scheme was proposed, which simplified the multi-time super-static structure into an inclined “simply supported” structure and proposed the h-shaped inclined beam bearing anti-slide pile. Based on the Winkler elastic foundation beam theory and the structural force degree shift method, the analytical

* 收稿日期: 2024-11-19

基金项目: 甘肃省联合科研基金重大项目(24JRRA800, 24JRRA799), Gansu Provincial Joint Scientific Research Fund Major Project (24JRRA800, 24JRRA799); 甘肃省自然资源厅科研基金项目(202406), Gansu Provincial Department of Natural Resources Scientific Research Fund Project(202406)

作者简介: 侯小强(1977—), 男, 甘肃正宁人, 兰州交通大学教授, 正高级工程师

† 通信联系人, E-mail: houxq@foxmail.com

model was established by using the numerical analysis and numerical simulation methods. The results show that the theoretical calculation of the analytical solution is in good agreement with numerical simulation results, which proves the rationality of the calculation model. Compared with the traditional h-shaped pile, the optimized structure has significant advantages, that is, the bending moment at the connection between the rear pile and the beam is greatly reduced, the bending moment at the top of the pile of the front pile is completely released (the reduction is 0), the shear force of the beam is significantly reduced, and the stress concentration phenomenon at the connection is avoided. From the analysis of key geometric parameters, it can be seen that with the increase of the angle of the oblique beam, the internal force and deformation of the oblique beam and the rear pile decrease, and with the increase of the distance between the front and rear piles, the internal force and deformation of the front pile decrease, and the mechanical performance of the system is better.

Key words: brittle failure; h-shaped inclined beam bearing anti-slide pile; oblique beam angle; pile distance

抗滑桩作为一种常见的抗滑支挡结构,在滑坡治理中广泛应用^[1-2],然而,面对大中型高陡滑坡边坡支护问题,传统抗滑桩承载能力有限,无法满足边坡工程的变形和稳定性要求^[3-4]. h型抗滑桩具有侧向刚度大、抵抗侧向变形能力强以及受力和变形更为合理等特点^[5],但由于该结构的特殊形式,其空间状态为多次超静定,其计算方法、受力形式以及滑坡推力分布尚不明确,且容易导致h型抗滑桩横梁刚性连接处发生脆性破坏等工程风险.针对上述问题,侯小强等^[6]对h型抗滑桩的结构形式进行改进,研发出一种新型h型斜横梁支座式抗滑桩结构,并开展了振动台力学性能研究.为尽早将其应用于滑坡治理工程,有必要对其力学计算模型及力学性能展开深入研究,从而为工程设计提供技术支撑.

目前,国内外关于h型抗滑桩的研究主要从理论研究和数值模拟两个方面考虑.在理论研究方面,学者们致力于建立更精确、实用的计算模型.肖世国^[7]依据抗滑桩受力特点,以滑面为界将h型抗滑桩受荷段简化为横向弹性地基约束的平面刚架模型,将锚固段按弹性地基梁计算,并通过边坡治理工程验证其理论的正确性.张永杰等^[8]提出采用平面刚架模型计算受荷段,用单桩设计理论计算锚固段,为预应力锚索h型抗滑桩提供了设计参数的取值原则和计算方法. Yang等^[9]基于Winkler地基梁理论,以后桩变形作为约束条件,建立了满足桩土变形协调的超静定结构计算模型,运用迭代法求解受荷段和锚固段的内力和变形,并通过对比分析验证了该方法的正确性.何刚等^[10]将桩前、桩后土体分布形式简

化为矩形分布,并将桩间土体按土弹簧考虑,锚固段采用“m”法计算,研究了h型抗滑桩的内力及变形规律,揭示了其内力分布特征.王羽^[11]将前后桩及连梁视为刚体连接,基于桩土相互作用和超静定图乘法,推导了受荷段内力和位移计算公式,并利用 $P-y$ 曲线法求得锚固段内力数值.在数值模拟方面,研究者广泛利用有限元软件深入探究h型抗滑桩工作机理与优化设计.张泽坤^[12]利用Ansys软件模拟分析了h型抗滑桩加固膨胀土边坡的支护效果,结果表明:不同尺寸参数对沉埋式h型抗滑桩的内力变形影响显著,据此提出了滑坡治理中h型抗滑桩的参数优化原则.欧明喜^[13]开展了h型抗滑桩桩土相互作用机理数值模拟研究,分析了桩周和桩间岩土体抵抗滑坡推力的力学机制,并通过参数化建模探究了桩身参数对抗滑性能的影响规律. Zhang等^[14]以龙家岩特大滑坡为研究对象建立数值计算模型,研究不同桩身参数对支护效果的影响,确定了最优取值参数. Liu等^[15]建立h型抗滑桩有限元数值模拟模型,探究了锚固深度对桩体受力分布的影响规律.赵海玲^[16]通过对h形抗滑桩进行有限元数值分析,发现h形抗滑桩后桩起主要抗滑作用,并通过锚固深度对比分析得到了最佳锚固深度.马青力^[17]、李洋等^[18]利用有限元数值模拟软件对静力条件下h型抗滑桩的结构参数进行数值模拟分析,并对h型抗滑桩结构进行优化设计以提升其支护能力.罗忠行等^[19]依托永州市某基坑工程建立h型抗滑桩数值计算力学模型,探讨了h型抗滑桩桩间距等参数对支护结构的变形影响规律,优化了结构设计.欧孝夺等^[20]利用

Abaqus 有限元软件建立 h 型抗滑桩桩土作用模型,研究了桩间距、锚固深度等参数对支挡效果的影响规律,优化了设计参数.卞林林^[21]将理论计算和数值模拟相结合,推导了 h 型抗滑桩内力计算公式,分析了不同桩身参数对滑坡支护效果的影响.

上述诸多学者主要通过理论分析和数值模拟对传统 h 型抗滑桩进行了研究,由于超静定次数过高且存在大量的模型简化假定,导致其计算理论方法不统一;此外,通过数值模拟分析几何尺度效应对 h 型抗滑桩内力及变形的影响规律,研究表明:内力和变形最大值多出现于前后桩连接处,因此该部位成为工程设计的关键难点.

针对上述问题,本研究通过对传统 h 型抗滑桩进行优化,提出了将传统 h 型抗滑桩的空间多次超静定结构优化为倾斜“简支”结构的方法,减少了结构超静定次数,使受力关系更加明确,可直接利用结构力学等理论方法建立 h 型斜横梁支座式抗滑桩计算模型,并推导其内力及变形计算方法.结合工程算例和有限元数值模拟结果,验证该计算方法的合理性;通过尺度效应分析,揭示了 h 型斜横梁支座式抗滑桩桩身内力与变形的变化规律,为 h 型斜横梁支座式抗滑桩的推广应用提供技术方法与理论支撑.

1 h 型斜横梁支座式抗滑桩结构模型

h 型斜横梁支座式抗滑桩将传统 h 型抗滑桩横梁改为斜横梁,且斜横梁与前桩连接处变为“简支”结构,使得斜横梁推力传递至前桩时可分解为水平分力和竖向分力,减小了前桩所受到的水平推力,同时减小前桩变形,结构模型如图 1 所示.

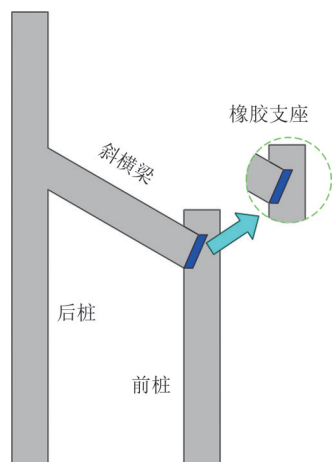


图1 h型斜横梁支座式抗滑桩

Fig.1 H-shaped inclined beam bearing anti-slide pile

2 h 型斜横梁支座式抗滑桩结构计算模型

2.1 基本假定

h 型斜横梁支座式抗滑桩和传统 h 型抗滑桩支挡原理基本相同,剩余下滑力作用于后桩受荷段,通过横梁传递给前桩;滑面以下锚固段依靠桩周土体的土压力和侧向摩阻力共同提供锚固力,以保持整体组合结构的稳定性.依据 h 型斜横梁支座式抗滑桩受力特点,可将其力学模型拆解为滑面以上的受荷段和滑面以下的锚固段两部分,分别建立计算模型,如图 2 所示.

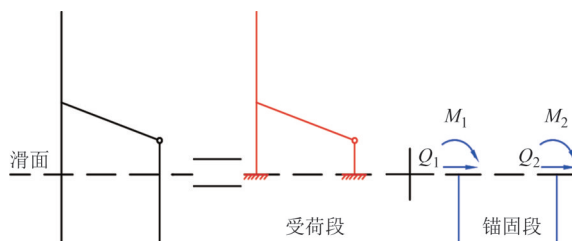


图2 h型斜横梁支座式抗滑桩计算模型

Fig.2 Calculation model of h-shaped inclined beam bearing anti-slide pile

抗滑桩滑面以上受荷段可视为平面刚架模型,基于结构力学位移法求解出受荷段桩身内力;根据锚固段地层深度和地基比例系数,按照“m”法求得其锚固段桩身受力状态,分别求出受荷段和锚固段桩身受力状态,即可得到全桩内力分布^[22-25].基本假定条件如下:

1) h 型斜横梁支座式抗滑桩滑面以上受荷段部分采用平面刚架假定,斜横梁与前桩桩顶处支座考虑为铰支座连接.

2) h 型斜横梁支座式抗滑桩受荷段前后桩底部考虑为固定支座连接.

3) 受荷段滑坡推力一般按照矩形、抛物线形、三角形等^[12]分布形式考虑,在能够正确反映桩身受力规律的前提下简化计算过程,将受荷段滑坡推力均考虑为矩形分布.

4) h 型斜横梁支座式抗滑桩滑面以下锚固段采用 Winkler 弹性地基模型.

2.2 受荷段力学模型

将 h 型斜横梁支座式抗滑桩看作由前桩、后桩、斜横梁与铰支座共同组成的刚性整体组合抗滑结

构,并建立位移法方程.现将h型斜横梁支座式抗滑桩简化成两端固定的刚架,分析受荷段结构形式,得到其受力状态,计算示意图如图3所示.

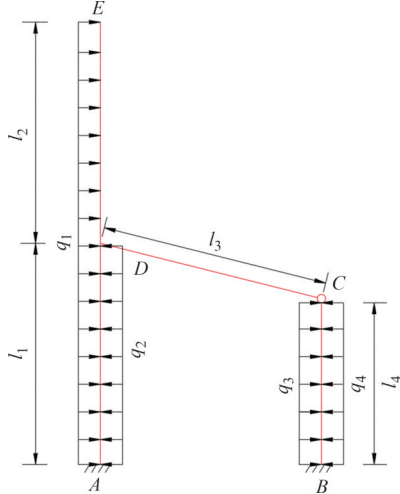


图3 抗滑桩受荷段计算示意图

Fig.3 Schematic diagram of the calculation of the load bearing section of the anti-slide pile

由图3可知,此结构在平面内为二次超静定结构,杆件AD、BC有侧向位移,其具有一个独立的结点角位移 Z_1 和一个独立的结点线位移 Z_2 ,共有两个基本未知量.在结点D处施加一刚臂,结点C处施加一水平支承链杆,得到的基本体系如图4所示.

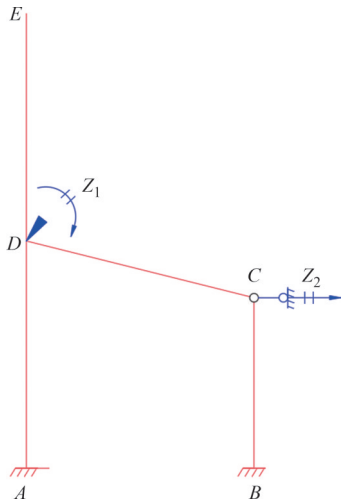


图4 基本体系示意图

Fig.4 Schematic diagram of the basic system

假设以 r_{11} 、 r_{12} 分别表示单位位移 $\bar{z}_1 = 1$ 和 $\bar{z}_2 = 1$ 所引起的刚臂上的反力矩;以 r_{21} 、 r_{22} 分别表示单位位移 $\bar{z}_1 = 1$ 和 $\bar{z}_2 = 1$ 所引起的链杆上的反力;以 R_{1p} 、 R_{2p} 分别表示滑坡推力 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 (分布荷载)作用下,在刚臂上引起的反力矩和在链杆上引起的反力,则位

移法典型方程见式(1)和式(2).

$$r_{11}Z_1 + r_{12}Z_2 + R_{1p} = 0 \quad (1)$$

$$r_{21}Z_1 + r_{22}Z_2 + R_{2p} = 0 \quad (2)$$

式中:系数和自由项分可为两类,一类是附加刚臂上的反力矩 r_{11} 、 r_{12} 、 R_{1p} ;另一类是附加链杆上的反力 r_{21} 、 r_{22} 、 R_{2p} .

为求出位移典型方程中的系数与自由项,需要绘制出基本结构在 $\bar{z}_1 = 1$ 、 $\bar{z}_2 = 1$ 以及荷载作用下的弯矩图 $\bar{M}_1$ 、 $\bar{M}_2$ 、 $\bar{M}_p$,最终的弯矩图可由叠加法得到,如图5所示.

$$M = \bar{M}_1Z_1 + \bar{M}_2Z_2 + M_p \quad (3)$$

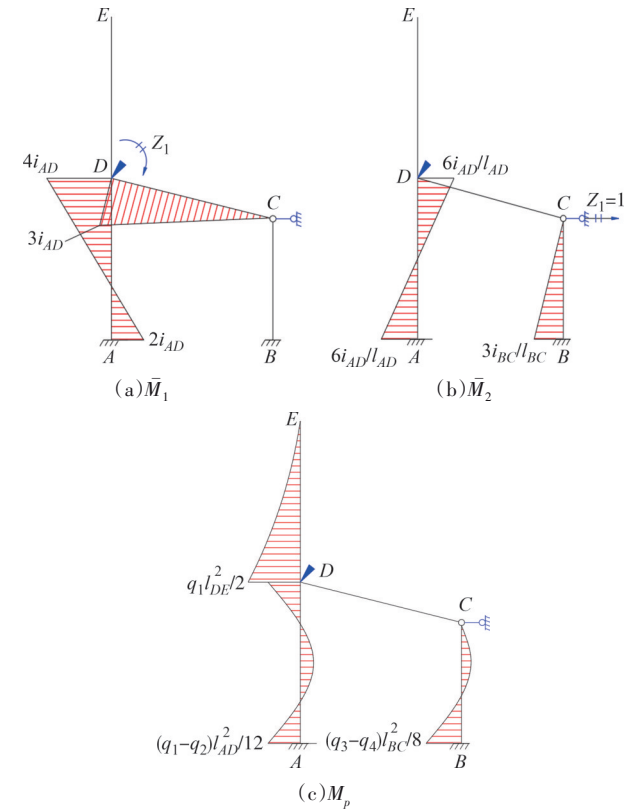


图5 $\bar{M}_1$ 、 $\bar{M}_2$ 、 $\bar{M}_p$ 弯矩图

Fig.5 The bending moment diagram of $\bar{M}_1$ 、 $\bar{M}_2$ 、 $\bar{M}_p$

2.3 锚固段力学模型

为建立h型斜横梁支座式抗滑桩滑面以下锚固段部分计算模型,可将前后桩分别视为两根独立单桩.由于前桩受到斜横梁作用后产生水平分力和竖直分力,利用Winkler弹性地基梁理论分别计算出前后桩内力和变形,同时前桩桩侧竖向摩阻力需满足竖向力学平衡.

在大中型滑坡治理中h型抗滑桩桩身锚固段一般埋设较深,所以锚固段常为弹性桩,本次主要采用“m”法求解弹性桩的内力状态,弹性桩计算示意图如图6所示.

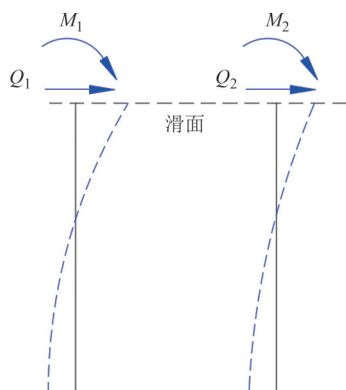


图6 弹性桩计算示意图

Fig.6 Schematic diagram of elastic pile calculation

常规“m”法计算弹性桩内力状态是通过“查表”的形式逐步计算,过程较为繁杂,本文利用 MATLAB 自动计算影响函数值,在节省计算量的同时能够提高准确性^[26]。满载阶段抗滑桩锚固段内力变形计算矩阵为:

$$\begin{bmatrix} x_y \\ \varphi_y \\ \alpha \\ \frac{M_y}{\alpha^2 EI} \\ \frac{Q_y}{\alpha^3 EI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ \varphi_0 \\ \alpha \\ \frac{M_0}{\alpha^2 EI} \\ \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $A_1 \sim A_4$ 、 $B_1 \sim B_4$ 、 $C_1 \sim C_4$ 、 $D_1 \sim D_4$ 为影响函数数值; α 为桩的变形系数; x_0 、 φ_0 、 M_0 、 Q_0 分别为滑面处桩身受荷段底部的位移、转角、弯矩、剪力; x_y 、 φ_y 、 M_y 、 Q_y 分别为锚固段桩身的位移、转角、弯矩、剪力;其余字母含义同上。

抗滑桩前桩需满足竖直方向力学平衡,以抗滑桩受力后不产生竖向位移为原则,同时锚固段能提

供足够的抗滑力,使得滑坡处于稳定状态,由竖向力学平衡可得^[27]:

$$F_0 D + L d b \gamma \leq (2d + b) h f_0 \quad (5)$$

式中: F_0 为前桩每延米所受压力; D 为桩间距; L 为前桩长度; h 为锚固段长度; b 和 d 为抗滑桩截面尺寸; γ 为混凝土重度; f_0 为桩侧摩阻力系数; $(2d + b) h f_0$ 表示桩体所受到的横向摩阻力。

2.4 算例验证

假定一滑坡竖向单位线荷载为 $400 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,拟采用 C30 混凝土 h 型斜横梁支座式抗滑桩结构,其中混凝土容重为 $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,滑面以上抗滑桩后桩高 8 m,前桩高 3 m,前后桩间距 4 m,桩截面尺寸为 $1.6 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$ 。h 型斜横梁支座式抗滑桩结构尺寸如图 7 所示,滑坡体相关参数见表 1。

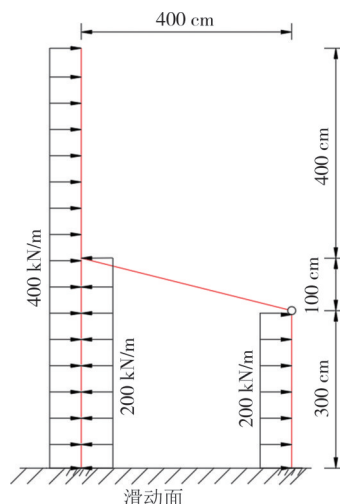


图7 h型斜横梁支座式抗滑桩受荷段计算图示

Fig.7 Diagram of the calculation of the load section of the h-shaped inclined beam bearing anti-slide pile

表 1 滑坡体相关参数

Tab.1 Landslide body-related parameters

材料	弹性模量 E/MPa	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	泊松比 μ	桩侧摩阻力/ kPa
滑体	10	20	26	20	0.3	80
滑床	220	22	1 500	37	0.2	180

为验证 h 型斜横梁支座式抗滑桩计算理论的正确性,利用 Abaqus 软件建立 h 型斜横梁支座式抗滑桩边坡支护模型,同时根据 h 型斜横梁支座式抗滑桩受力情况,利用位移法分别计算出 h 型斜横梁支座式抗滑桩受荷段的剪力和弯矩,并与理论值进行对比验证,计算结果如图 8 所示。

由图 8 可知:h 型斜横梁支座式抗滑桩将横梁与前桩连接处变为斜横梁支座式连接,释放了前桩桩

顶弯矩,减小应力集中效应,此处弯矩降低为 0。h 型斜横梁支座式抗滑桩受荷段前后桩桩底弯矩均产生一定幅度的增大现象,尤其是前桩桩底弯矩增大。同时斜横梁能够更好地传递滑坡推力,h 型斜横梁支座式抗滑桩前桩桩顶承受较大水平推力,导致其桩底弯矩增大,此时柱底滑面处剪力和弯矩达到最大值。通过将理论计算值与数值模拟结果进行对比,发现两者吻合性较好,验证了 h 型斜横梁支座式抗滑桩

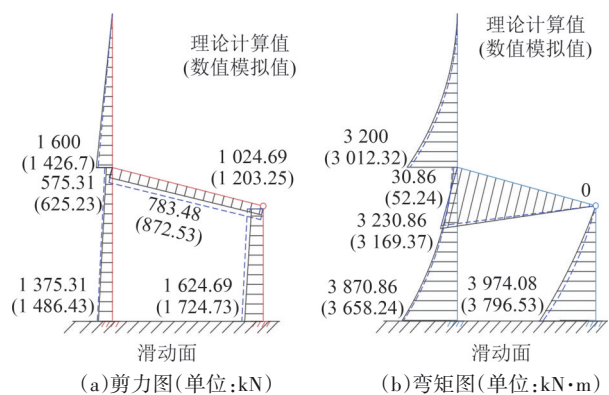


图8 抗滑桩受荷段剪力、弯矩图

Fig.8 Shear force and bending moment diagram of the load section of the anti-slide pile

理论的准确性。

为验证竖向力对前桩的影响,根据式(5)和滑坡体参数对斜横梁竖向分力进行计算,可得:

$$1\,081.25\times 5+15\times 2.4\times 1.6\times 25\leq 6.4\times h\times 180$$

结果表明:锚固段长度为5.9 m时恰好平衡其竖向力,且该长度仅占整个桩长(15 m)的39.3%,小于现行规范中锚固长度的最大值(1/2总桩长)^[28],表明h型斜横梁支座式抗滑桩桩侧摩阻力完全能满足设计要求,无须考虑桩底反力和前桩竖向位移的影响。

3 力学性能对比

为探究h型斜横梁支座式抗滑桩的力学性能,利用Abaqus有限元软件分别建立传统和改进h型抗滑桩边坡加固模型,通过位移、剪力和弯矩对比分析其力学性能,揭示尺度效应对其力学性能的影响规律。

3.1 边坡模型设计

采用三维单位厚度边坡模型进行数值模拟,边坡长70 m,后侧高45 m,前侧高15.3 m,厚度1 m,桩截面尺寸为1.6 m×1 m。传统h型抗滑桩后桩高20 m;h型斜横梁支座式抗滑桩后桩高20 m,前桩长度随斜横梁角度变化略有不同(本文在保证前桩最低锚固深度的前提下,忽略前桩长度的变化);本次数值模拟采用C3D8线性完全单元,坡体和抗滑桩单元网格尺寸为1 m×1 m,橡胶支座单元网格尺寸为0.1 m×0.1 m。三维模型左、右边界和前、后边界施加水平约束,底面施加竖向约束和水平约束,顶面为自由边界,对整体模型施加重力作用。本次数值模型尺寸如图9所示,相关材料参数见表2。

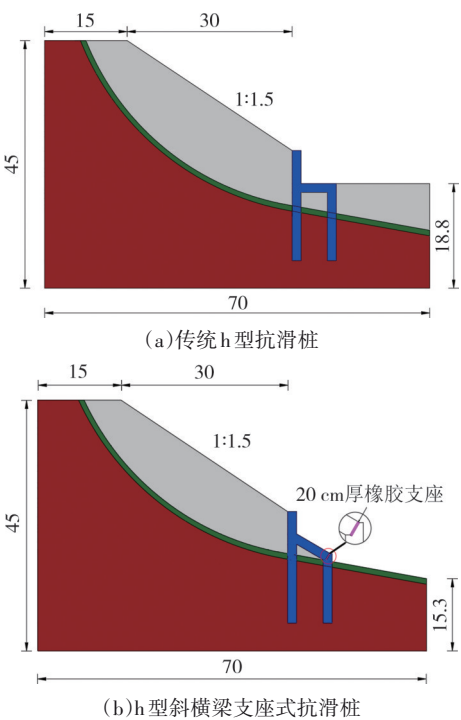


图9 数值模型尺寸示意图(单位:m)

Fig.9 Schematic diagram of the numerical model dimensions (unit: m)

表2 数值模拟材料参数表

Tab.2 Material parameters of numerical simulation					
材料	弹性模量 E/MPa	重度γ/ (kN·m ⁻³)	黏聚力c/ kPa	内摩擦角 φ/(°)	泊松比μ
滑体	10	20	26	20	0.3
滑动带	10	20	16	18	0.3
滑床	220	22	1 500	37	0.2
抗滑桩	30 000	25	—	—	0.2

3.2 两种h型抗滑桩性能对比

3.2.1 位移对比分析

传统h型抗滑桩和h型斜横梁支座式抗滑桩支护同一边坡时坡体位移和桩身位移分别如图10、图11所示。

由图10、图11可知,传统h型抗滑桩支护边坡时的坡体最大位移为8.08 dm,h型斜横梁支座式抗滑桩的坡体最大位移为6.20 dm,相较于传统h型抗滑桩减小了23.27%。由于h型抗滑桩的特殊结构形式,其悬臂段主要承受滑坡推力,因此,两种抗滑桩的桩身最大位移处均位于后桩桩顶位置,其中传统h型抗滑桩最大桩顶位移为6.71 cm,h型斜横梁支座式抗滑桩最大桩顶位移为4.95 cm,相较于传统h型抗滑桩减小了26.23%。由坡体和抗滑桩变形分析表明,h型斜横梁支座式抗滑桩的边坡支护效果明显优于传统h型抗滑桩。

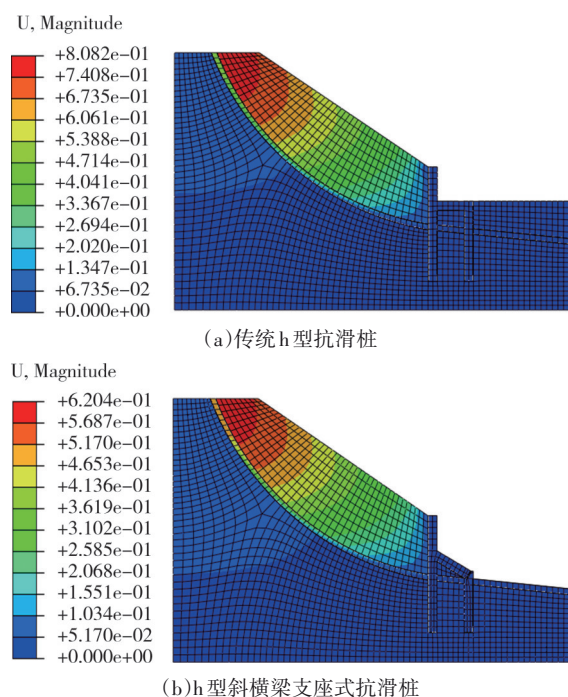


图 10 坡体位移对比图(单位:m)

Fig.10 Comparison chart of slope displacement (unit: m)

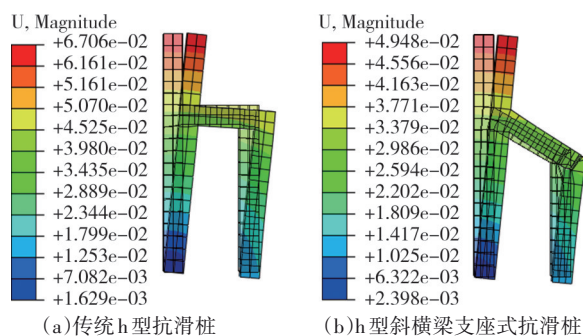


图 11 桩身位移对比图(单位:m)

Fig.11 Comparison chart of pile displacement (unit: m)

3.2.2 应力对比分析

传统h型抗滑桩和h型斜横梁支座式抗滑桩支护同一边坡时桩身应力结果如图12所示。

由图12可知,由于传统h型抗滑桩横梁与前桩刚性连接,当后桩悬臂段承受较大滑坡推力时,横梁同样将较大水平轴向力传递至前桩,导致横梁与前桩直角连接处内侧混凝土应力集中现象显著,最大应力为8 694 kPa;h型斜横梁支座式抗滑桩将原本的横梁改为斜横梁连接,将滑坡推力分解为水平轴向力和竖直下压力传递至前桩,有效避免了水平力过大导致的前桩应力集中现象。由于斜横梁与后桩斜向连接,h型斜横梁支座式抗滑桩的应力集中部位转移至斜横梁与后桩连接处,同时斜横梁传递竖向分力至前桩,使前桩产生被迫下压趋势,导致h型斜横梁支座式抗滑桩前桩应力较传统h型抗滑桩减小,h型斜横

梁支座式抗滑桩最大应力为7 563 kPa,相较于传统h型抗滑桩减小了13.01%。由对比分析结果可知,h型斜横梁支座式抗滑桩的特殊结构形式克服了传统h型抗滑桩前桩受较大水平轴向力的弊端,其结构受力更加符合力学传递规律。

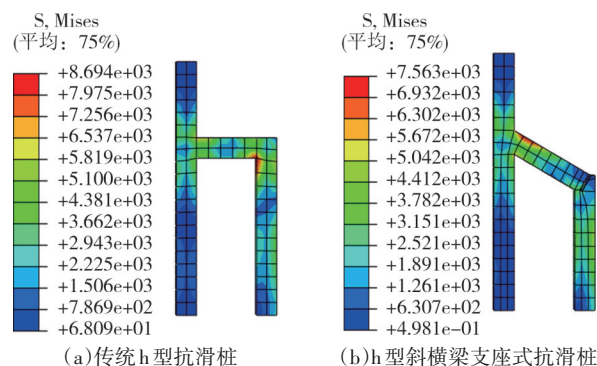


图 12 桩身应力对比图(单位:kPa)

Fig.12 Comparison chart of pile stress (unit: kPa)

3.3 h型斜横梁支座式抗滑桩尺度效应

为了探究h型斜横梁支座式抗滑桩尺度效应对力学性能的影响,利用Abaqus建立多个仿真模型,揭示不同尺度对h型斜横梁支座式抗滑桩结构内力和变形的影响规律。由于h型抗滑桩悬臂端按照滑面深度确定^[10],本次研究主要通过斜横梁角度、前后桩间距两个关键尺度因子,揭示h型斜横梁支座式抗滑桩力学性能的影响规律,选定如下具体尺寸参数:

1)结合工程施工可行性,抗滑桩其他因素保持不变,改变斜横梁角度 θ (斜横梁与后桩夹角), θ 分别取 50° 、 60° 、 70° 。

2)抗滑桩其他因素保持不变,改变前后桩间距 D (后桩中心至前桩中心距离), D 分别取 $3b$ 、 $4b$ 、 $5b$ (b 为抗滑桩截面的长边长度)。

3.3.1 斜横梁角度对桩身内力的影响

考虑到h型斜横梁支座式抗滑桩的斜横梁角度 θ 对结构内力的影响,选定抗滑桩模型后桩长 $l=20$ m,桩截面尺寸 $a \times b=1$ m $\times$ 1.6 m,前后桩间距 $D=4b=6.4$ m、悬臂段长度 $l_1=6$ m不变,仅改变斜横梁角度 θ (分别取 50° 、 60° 、 70°),抗滑桩具体结构尺寸如图13所示。

为系统评估不同斜横梁角度对该抗滑桩支护性能的影响,基于上述参数化模型,从桩身位移和桩身内力两方面开展对比分析,探究斜横梁角度变化对边坡支护效果及结构受力特性的影响规律,分析结果如下:

1)桩身位移对比分析:通过建立3种不同斜横

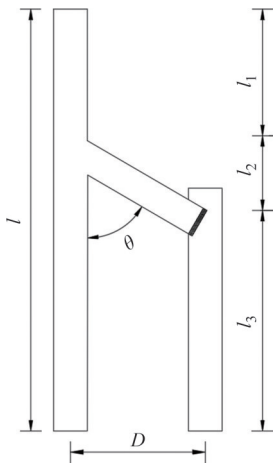


图 13 抗滑桩结构对比示意图
Fig.13 Schematic diagram of the size of the anti-slide pile structure

梁角度的 h 型斜横梁支座式抗滑桩边坡支护模型, 对比分析边坡支护效果, 揭示支护作用机理, 该抗滑桩桩身位移云图如图 14 所示. 由图 14 可知, 抗滑桩桩身位移主要集中于后桩悬臂段阻滑部分, 50°斜横梁抗滑桩支护效果最差, 桩身最大位移为 5.86 cm; 70°斜横梁抗滑桩次之, 桩身最大位移为 4.97 cm; 60°斜横梁抗滑桩支护效果最优, 桩身最大位移为 4.95 cm. 整体来看, 抗滑桩的桩身最大位移均呈现先减小后增大的变化趋势.

2) 桩身内力对比分析: 抗滑桩桩身内力的大小

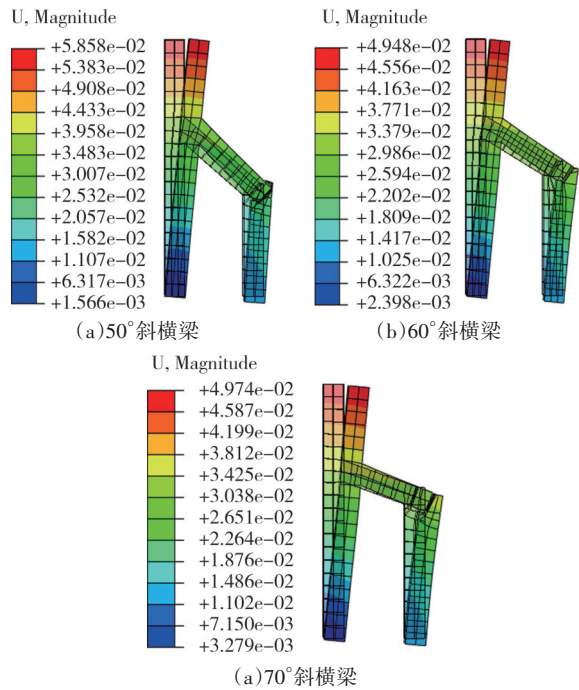


图 14 不同斜横梁角度下抗滑桩桩身位移云图(单位:m)
Fig.14 Displacement nephogram of anti-slide pile at different inclined-beam angles(unit: m)

直接决定了抗滑桩的支护效果, 通过改变 h 型斜横梁角度, 对比分析 3 种不同斜横梁角度下 h 型斜横梁支座式抗滑桩在边坡支护中的桩身剪力和弯矩分布特征, 结果如图 15~图 17 所示.

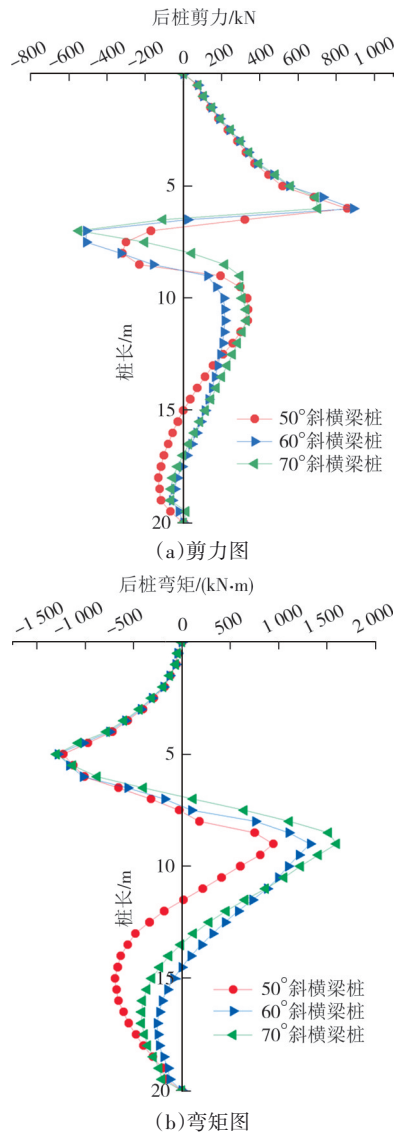


图 15 后桩剪力、弯矩图
Fig.15 Diagrams of shear force and bending moment of the rear pile

由图 15(a)后桩剪力图可知, 在悬臂端底部, 不同角度的 h 型斜横梁支座式抗滑桩达到最大正剪力, 剪力大小基本一致. 随着斜横梁角度的增大, 在斜横梁以下桩段的最大负剪力逐渐增大; 在滑面处附近正剪力再次达到最大值, 随后沿桩身向桩底逐渐减小为 0.

由图 15(b)后桩弯矩图可知, 在斜横梁之上的悬臂端, 不同抗滑桩的弯矩与剪力分布形式基本一致; 而在斜横梁之下至滑面以上(滑面深度 11 m)的区间

内, 70° 斜横梁支座式抗滑桩正弯矩最大, 并且最大正弯矩随着斜横梁角度的减小而减小; 在滑面以下桩段, 70° 斜横梁支座式抗滑桩负弯矩最小, 正弯矩最大. 50° 斜横梁支座式抗滑桩负弯矩增大, 正弯矩减小, 且正负弯矩数值接近, 此时后桩受力状态更趋合理.

通过对比分析 3 种不同角度的斜横梁抗滑桩内力分布图可以发现, 角度的改变对于斜横梁以上悬臂端的内力形式影响甚微, 斜横梁的设置主要对斜横梁以下桩身内力分布特征产生较大差异.

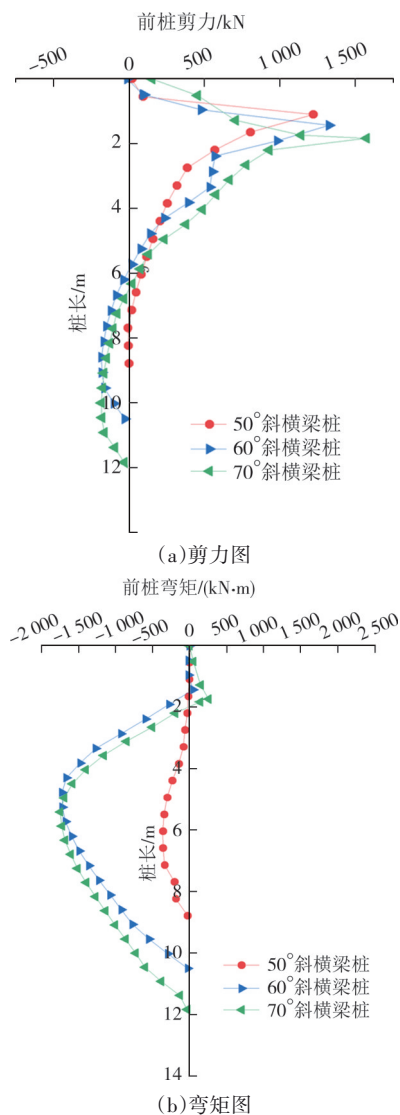


图 16 前桩剪力、弯矩图

Fig.16 Diagrams of shear force and bending moment of the front pile

由图 16(a) 前桩剪力图可知, 随着斜横梁角度的增大, 前桩长度也随之增加, 即角度增大引起滑面以上受荷段长度增加, 剪力增大引起锚固段长度增加. 其中 h 型斜横梁支座式抗滑桩前桩桩顶同样存在斜

横梁传递的剪力作用, 由于 50° 、 60° 斜横梁抗滑桩的斜横梁角度较小, 水平分力被弱化, 前桩桩顶剪力极小, 可以忽略不计. 当斜横梁角度 θ 增至 70° 时, 前桩受荷段长度随之增加, 且桩顶剪力较为明显, 其值为 154 kN. 从剪力变化趋势分析, 斜横梁角度增大使得前桩剪力呈正向增大趋势, 最大正剪力出现在前桩滑面位置, 因剪力增大需要更长的桩身以平衡剪力, 以致反向剪力也逐渐显现.

由图 16(b) 前桩弯矩图可知, 作为自由端的桩顶, 三种斜横梁角度的弯矩均为 0. 滑面以上弯矩沿桩身正向增大, 并在滑面处达到峰值. 因前桩较短且主要位于锚固地层, 其整体呈负弯矩分布, 且负弯矩数值明显大于正弯矩. 其中, 50° 斜横梁对应的负弯矩最小; 当 θ 增至 60° 和 70° 时, 负弯矩显著增加, θ 在 $50^\circ \sim 60^\circ$ 区间内弯矩变化最显著.

由图 17 斜横梁剪力图和弯矩图可知, h 型斜横梁支座式抗滑桩的斜横梁与前桩连接处弯矩趋近于 0, 与后桩连接处的弯矩绝对值最大. 斜横梁角度越大, 其长度越小, 因此, 随着斜横梁角度的增大, 斜横梁弯矩 (绝对值) 逐渐减小, 剪力逐渐减小.

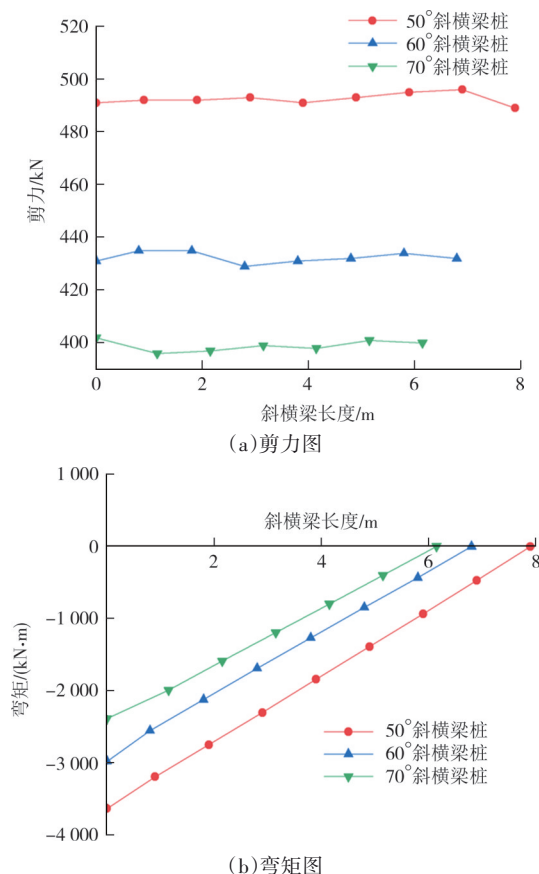


图 17 斜横梁剪力、弯矩图

Fig.17 Diagrams of shear force and bending moment of diagonal beam

3.3.2 前后桩间距对桩身内力的影响

前后桩间距是h型斜横梁支座式抗滑桩边坡支护过程中的重要影响因素,为探究前后桩间距对h型斜横梁支座式抗滑桩受力特征和结构内力的影响,选定前后桩间距 D 分别为 $3b$ 、 $4b$ 、 $5b$ 三种h型斜横梁支座式抗滑桩,通过数值模拟揭示h型斜横梁支座式抗滑桩承载能力与前后桩间距的影响关系.抗滑桩模型后桩长 $l=20$ m,桩截面尺寸 $1.6\text{ m}\times 2.4\text{ m}$,控制斜横梁角度 θ 、悬臂段长度 l_1 不变,其中 $\theta=60^\circ$, $l_1=6$ m.

1) 抗滑桩位移对比分析

通过对3种前后桩间距的h型斜横梁支座式抗滑桩边坡支护进行数值模拟分析,揭示前后桩间距对抗滑桩支护效果的影响规律,抗滑桩桩身位移云图如图18所示.

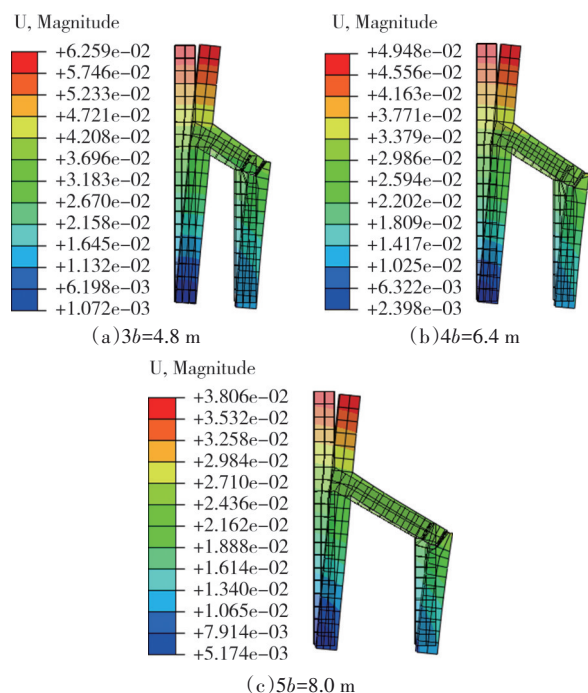


图18 不同前后桩间距下抗滑桩桩身位移云图(单位:cm)

Fig.18 Displacement nephogram of anti-slide pile at different front-to-rear pile spacings(unit: cm)

由图18可知,随着h型斜横梁支座式抗滑桩前后桩间距的增大,抗滑桩桩身最大位移逐渐减小.此现象说明,增大h型斜横梁支座式抗滑桩间距,可以有效提高前后桩的整体性能和锚固能力,从而增强h型斜横梁支座式抗滑桩的抗滑能力.

2) 桩身内力对比分析

桩身内力分布是抗滑桩支护性能的重要表现形式.本文通过改变抗滑桩前、后桩的桩间距,探究桩间距对抗滑桩内力的影响规律,并绘制剪力与弯矩分布图如图19~图21所示.

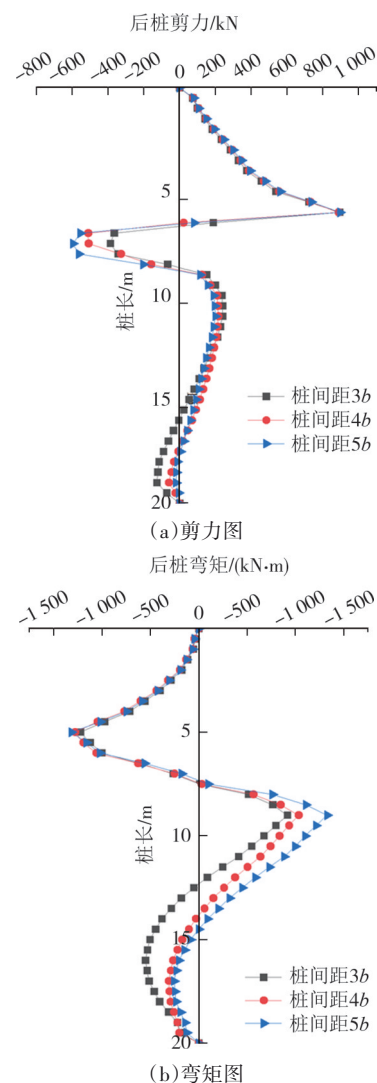


图19 后桩剪力图与弯矩图

Fig.19 Diagrams of shear force and bending moment of the rear pile

由图19(a)后桩剪力图可知,斜横梁以上的悬臂段正剪力不变,在悬臂段底部达到最大值;横梁至桩身滑面处由最大正剪力向最大负剪力变化,且最大负剪力出现在横梁至滑面中心位置,在滑面处剪力重新达到最大正剪力.在滑面以下桩身部分,随着桩间距的增大,剪力逐渐减小.

由图19(b)后桩弯矩图可知,3种桩间距下,h型斜横梁支座式抗滑桩后桩弯矩在横梁以上的悬臂端变化规律基本一致,均沿桩身逐渐增大,并在后桩与斜横梁连接处达到最大负弯矩,且3种桩间距的h型斜横梁支座式抗滑桩在斜横梁处弯矩值相差不大;在后桩与斜横梁连接处至滑面桩身部分,弯矩呈现由最大负弯矩向最大正弯矩过渡的趋势,直至滑面处达到最大正弯矩,其中桩间距为8.0 m时正弯矩最大,为 $1\,328.47\text{ kN}\cdot\text{m}$;桩间距为6.4 m时次之,为 $1\,033.33\text{ kN}\cdot\text{m}$;桩间距为

4.8 m时最小,为916.32 kN·m;在滑面至桩底部分,正弯矩开始逐渐减小,在锚固段桩中附近降至0.由后桩弯矩分析可知:滑面及滑面以上部分,桩间距越大,桩身最大弯矩越大;滑面以下部分,桩间距越小,桩身最大弯矩越大.

由图20(a)前桩剪力图可知,3种桩间距下,前桩桩顶剪力均极小,可以忽略不计;在滑面以上桩身的剪力先正向增大至最大剪力,随后在桩中位置降至0;随着桩间距的增大,前桩剪力逐渐减小.

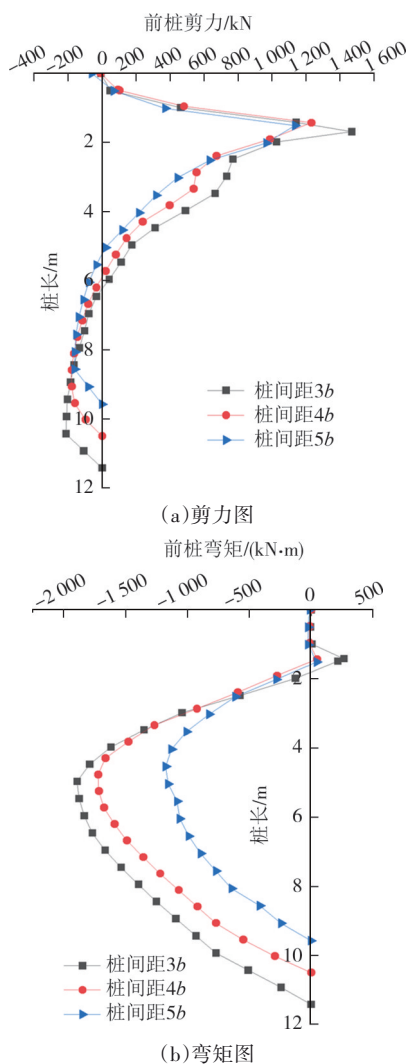


图20 前桩剪力图与弯矩图

Fig.20 Diagrams of shear force and bending moment of the front pile

由图20(b)前桩弯矩图可知,前桩桩顶弯矩为0;桩顶至滑面的桩身部分,弯矩呈正向增大趋势,但由于前桩桩身较短且绝大部分位于滑面以下锚固地层内,前桩正弯矩偏小;在滑面以下桩身部分为负弯矩,弯矩先增后减,在前桩桩中位置达到最大负弯矩.随着桩间距的增大,负弯矩逐渐减小.桩间距为

3b、4b、5b时,对应的最大负弯矩分别为-1 892.15、-1 722.65、-1 175.78 kN·m.

由图21可知,斜横梁的剪力随桩间距增大而减小.随着h型斜横梁支座式抗滑桩桩间距的增大,斜横梁的长度也增大,弯矩与斜横梁长度成正比,因此,斜横梁的弯矩随桩间距的增大而增大.

通过对斜横梁角度和前后桩间距这两个关键因素的分析,可知:随斜横梁角度的增大,斜横梁弯矩和剪力减小.后桩的正弯矩和正剪力也减小,负弯矩和负剪力增加;随前后桩间距的增大,前桩的弯矩和剪力减小.结果表明:斜横梁角度增大时,后桩和斜横梁内力和变形减小;前后桩间距增大时,前桩内力和变形减小.

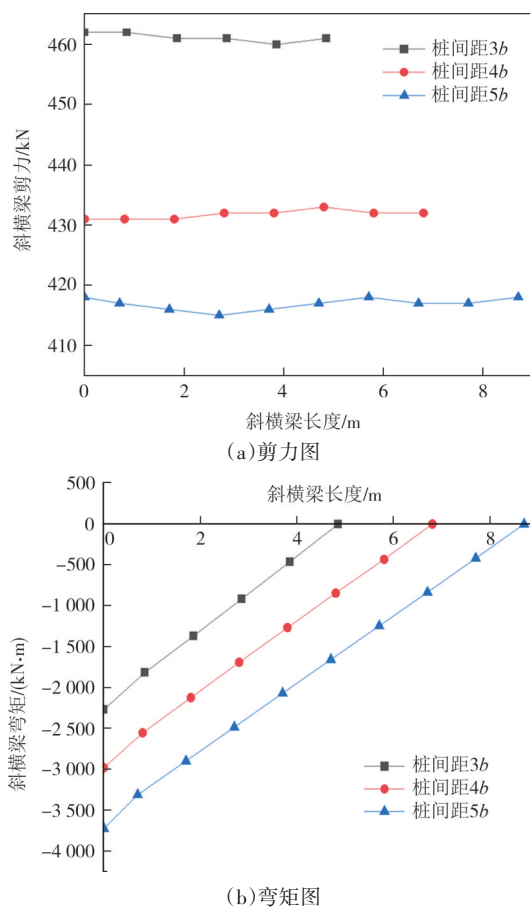


图21 斜横梁剪力图与弯矩图

Fig.21 Diagrams of shear force and bending moment of diagonal beam

4 结论

本研究通过对传统h型抗滑桩进行优化,提出了h型斜横梁支座式抗滑桩结构,依据h型斜横梁支

座式抗滑桩结构和桩土协同变形机制,分别按照受荷段和锚固段建立了力学计算模型,推导出其内力及变形计算公式,并与传统h型抗滑桩力学性能进行对比,通过关键尺度因素深入分析了h型斜横梁支座式抗滑桩力学特征,主要研究结论如下:

1)通过对传统h型抗滑桩进行优化,超静定次数减少至可直接建立h型斜横梁支座式抗滑桩受荷段和锚固段静力学模型,推导了解析解计算公式,并通过理论计算值与数值模拟结果对比,发现两者结果吻合较好,充分表明了优化后的h型斜横梁支座式抗滑桩计算模型的合理性.

2)对比分析了传统h型抗滑桩和h型斜横梁支座式抗滑桩受荷段内力分布形式,研究表明:h型斜横梁支座式抗滑桩能够有效降低后桩与横梁连接处弯矩,释放前桩桩顶弯矩,使前桩桩顶弯矩降至0,表明优化后的h型斜横梁支座式抗滑桩具有较强的协同抗滑能力,结构受力更明确,可解决前后桩横梁刚性连接拐点处易发生脆性破坏这一工程风险问题,进一步表明其结构优化的科学合理性.

3)通过h型斜横梁支座式抗滑桩尺度效应分析,表明:斜横梁角度的增大,有利于减小斜横梁和后桩的内力及变形;前后桩间距增大,有利于减小前桩的内力和变形.

4)本文通过对h型斜横梁支座式抗滑桩静力学计算模型及力学性能进行研究,为进一步开展地震作用下h型斜横梁支座式抗滑桩动力学计算模型研究奠定基础,也为大推力滑坡的治理提供新的技术与理论支撑.

参考文献

- [1] 王文沛,殷跃平,王立朝,等. 排水抗滑桩技术研究现状及展望[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2):73-83.
WANG W P, YIN Y P, WANG L C, et al. Studies on status and prospects of anti-slide shaft technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 73-83. (in Chinese)
- [2] 罗伟,徐长节,荣耀,等. 非线性强度准则下抗滑桩加固边坡稳定性极限平衡分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2950-2958.
LUO W, XU C J, RONG Y, et al. Limit equilibrium analysis on stability of slope reinforced by antislides piles with the nonlinear strength criterion[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2950-2958. (in Chinese)
- [3] 李兵,赵如雄,马洪生,等. 圆截面h型抗滑桩受力与变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊2):1023-1027.
LI B, ZHAO R X, MA H S, et al. Analysis on the stress and deformation of circular section h-type anti-slide piles [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(Sup.2): 1023-1027.
- [4] 周永强,盛谦. 库水位变化和降雨作用下付家坪子高陡滑坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2):57-61.
ZHOU Y Q, SHENG Q. Stability of fujiapingzi high and steep landslide under the action of reservoir water level fluctuation and rainfall [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(2): 57-61. (in Chinese)
- [5] 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 X Q, LIU J R, WANG X F, 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. (in Chinese)
- [6] 侯小强,任继贤,郑佳乐,等. h型抗滑桩结构优化抗震性能对比振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(12): 2892-2907.
HOU X Q, REN J X, ZHENG J L, et al. Comparative vibrating table test study on optimized seismic performance of h-type anti-sliding pile structures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(12):2892-2907. (in Chinese)
- [7] 肖世国. 边(滑)坡治理中h型组合抗滑桩的分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2146-2152.
XIAO S G. Analytical method for h-type combined anti-sliding pile retaining landslide or excavated slope and its application to practical projects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2146-2152. (in Chinese)
- [8] 张永杰,李侑军,曹文贵,等. 大型滑坡预应力锚索h型抗滑桩处置方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5):57-63.
ZHANG Y J, LI Y J, CAO W G, et al. A study of the landslide treating methods with anti-sliding pile of h-type and pre-stressed anchor cable [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5):57-63. (in Chinese)
- [9] YANG C W, TONG X H, WU D S, et al. A new model for mechanical calculation of h-type anti-slide piles [J]. Structures, 2023, 56:104891.
- [10] 何刚,郑琦七,杨松,等. h型抗滑桩和悬臂式双排抗滑桩的力学特性分析[J]. 工业建筑, 2024, 54(5):192-197.
HE G, ZHENG Q Q, YANG S, et al. Analysis on mechanical characteristics of h-type anti-slide piles and cantilevered double-row anti-slide piles [J]. Industrial Construction, 2024, 54(5): 192-197. (in Chinese)
- [11] 王羽. h型抗滑桩设计计算方法研究[D]. 成都:成都理工大学, 2011.
WANG Y. Calculation theory and design method research on h-type of anti-sliding pile [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] 张泽坤. h型抗滑桩的有限元分析[D]. 成都:西南交通大学, 2008.
ZHANG Z K. Finite element Analysis of h-type slide-resistant

- pile [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [13] 欧明喜. h型抗滑桩力学机理及其工程应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- OU M X. The study on mechanical mechanism of h-type anti-slide piles and its engineering application [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [14] ZHANG H, XING H F, LIU L L, et al. Field test and numerical analysis on deformation response of H-type antislides pile: case study of longjiayan landslide, China[J]. Natural Hazards Review, 2021, 22(4): 05021015.
- [15] LIU X R, KOU M M, FENG H, et al. Experimental and numerical studies on the deformation response and retaining mechanism of h-type anti-sliding piles in clay landslide[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(5): 163.
- [16] 赵海玲. h形抗滑桩变形性状的研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- ZHAO H L. A study on the deformation performance of h-type sliding-resistant pile [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. (in Chinese)
- [17] 马青力. h型桩板墙桩土相互作用数值分析——以雅泸高速公路K14斜坡路堤治理为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- MA Q L. The numerical analysis of pile-soil interaction in h-type sheet-pile wall [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [18] 李洋, 李元松, 王亚军. h型抗滑桩的受力特性及优化设计[J]. 武汉工程大学学报, 2016, 38(2): 173-177.
- LI Y, LI Y S, WANG Y J. Mechanical characteristics and optimization design of h-type antisliding pile [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2016, 38(2): 173-177. (in Chinese)
- [19] 罗忠行, 牛建东, 李泽玮, 等. 深基坑h型双排桩的变形计算及优化分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(7): 1720-1727.
- LUO Z X, NIU J D, LI Z W, et al. Deformation calculation and optimization analysis of h-type double-row piles in deep foundation pit [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(7): 1720-1727. (in Chinese)
- [20] 欧孝夺, 唐迎春, 崔伟, 等. h型抗滑桩模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1936-1943.
- OU X D, TANG Y C, CUI W, et al. Model test and numerical simulation of h-shaped anti-sliding pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1936-1943. (in Chinese)
- [21] 卞林林. 复合多层滑床条件下h型抗滑桩受力特征研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- BIAN L L. Study on mechanical characteristics of h-type anti slide pile under the condition of composite multi-layer sliding bed [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [22] 毛坚强, 徐骏, 杨磊. 滑体段采用m法模型的抗滑桩计算方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1197-1202.
- MAO J Q, XU J, YANG L. An improved method for stabilising pile by using m-method model to the whole pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1197-1202. (in Chinese)
- [23] 刘陕南, 侯胜男, 蔡忠祥. m法计算单桩水平承载力在上海地区的适用性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 721-724.
- LIU S N, HOU S N, CAI Z X. Applicability of m-method for horizontal bearing capacity of single pile in Shanghai area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup.2): 721-724. (in Chinese)
- [24] 焦世杰, 苏爱军, 何啸. 弹性抗滑桩桩底支承条件对其内力和位移的影响分析[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(1): 39-44.
- JIAO S J, SU A J, HE X. Impact of pile bottom bearing conditions on internal force and displacement of elastic anti-slide pile [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(1): 39-44. (in Chinese)
- [25] 随春娥, 张天宇, 杨文军, 等. 基于m法的横向受荷长桩三参数模型参数反演方法[J]. 公路交通科技, 2024, 41(5): 54-60.
- SUI C E, ZHANG T Y, YANG W J, et al. Parameter inversion method for three-parameter model of laterally loaded long pile using m method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(5): 54-60. (in Chinese)
- [26] 侯小强, 王新飞, 贾洪璐, 等. 渐进式滑坡锚索抗滑桩预应力张拉值计算[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(1): 138-147.
- HOU X Q, WANG X F, JIA H L, et al. Calculation of the prestressed tension value of the progressive landslide anchor cable [J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(1): 138-147. (in Chinese)
- [27] 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 G P, TANG H M, LI C D, 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)
- [28] 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.
- Second Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Design and calculation of anti-slide piles [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983. (in Chinese)