

文章编号: 1674—8247(2023)01—0001—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.01.001

土质边(滑)坡束筋型微型桩简化设计方法

肖世国¹ 蒋楚生²

(1. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031;
2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:束筋型微型桩是工程边坡治理或滑坡应急抢险工程中常用的轻型支挡结构。本文针对现行规范中基于抗弯模式的设计方法的复杂性与不确定性,提出了基于锚固模式的以加固边坡稳定性为控制目标的束筋型微型桩的简化设计方法。将微型桩轴力与剪力引入加固边坡的稳定性分析中,二者共同提供微型桩对坡体的抗滑力,通过传递系数法将其呈现于剩余推力计算表达式中。提出的方法可反映微型桩的竖向倾角、桩间距等要素对其内力的影响。实例分析表明,对于3排束筋型微型桩组成的单元抗滑结构,其后排桩承受轴向拉力,前排桩可能承受轴向压力,后排桩轴力绝对值最大,对微型桩结构设计起控制作用。

关键词:土质边坡; 微型桩; 锚固作用; 传递系数法; 稳定性分析

中图分类号: U416.1⁺ 文献标识码: A

A Simplified Design of Micropile with Bundled Rebars for Soil Slopes or Landslides

XIAO Shiguo¹ JIANG Chusheng²

(1. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Micropile with bundled rebars is a light retaining structure commonly used to treat slopes or control landslides emergencies. In view of the complexity and uncertainty of the design based on the bending mode in the current specifications, a simplified design of micropile with bundled rebars based on the anchoring mode and aimed at strengthening the slope stability is proposed in this paper. The axial force and shear force of the micropile were introduced into the stability analysis of the reinforced slope to provide the anti-sliding force of the micropile against the slope, which was then presented in the residual thrust computation expression by the transfer coefficient method. The proposed method can reflect the effect of vertical dip angle, pile spacing, and other factors of micropile on its internal force. The results of a case study show that for the unit anti-slide structure composed of 3 rows of micropiles with bundled rebars, the rear row of piles bears axial tension, the front row of piles may bear axial compression, and the rear row of piles has the largest absolute value of axial force, which plays a control role in the design of micropile structure.

Key words: soil slope; micropile; anchoring action; transfer coefficient method; stability analysis

收稿日期: 2021-08-24

作者简介: 肖世国(1973-),男,教授。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278430); 中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(KSNQ201018); 四川省交通运输科技项目(2020-A-01)

引文格式: 肖世国, 蒋楚生. 土质边(滑)坡束筋型微型桩简化设计方法[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(1): 1-6.

XIAO Shiguo, JIANG Chusheng. A Simplified Design of Micropile with Bundled Rebars for Soil Slopes or Landslides[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 1-6.

1 微型抗滑桩简介

微型抗滑桩因其施工快捷、安全高效等优点在实践中被广泛应用^[1-3]。束筋型微型桩抗滑桩结构一般采用 3 根钢筋组成束筋,将其置入微型钻孔(孔径通常 130~150 mm)后,在其周边灌注水泥砂浆予以保护,并采用顶板或顶梁连接若干根(如 4 根、6 根或 9 根)微型桩顶部,形成 1 个抗滑结构单元。近年来,束筋型微型桩抗滑桩结构在工程边坡治理和滑坡灾害应急抢险中应用十分普遍^[4],如何合理设计此类微型桩结构一直是工程实践的焦点问题。

对于微型抗滑桩结构的分析,以往多按受弯构件模式计算。周德培等^[5]将滑床对微型抗滑桩结构的约束作用视为固定约束,分析对象主要为微型桩在滑床以上的部分,采用平面刚架模型,基于横向约束的 Winkler 弹性地基梁理论分析微型抗滑桩结构内力与位移;肖世国等^[6]将微型抗滑桩结构以滑面为界等效拆分为上下两个部分,上部分基于平面刚架模型按弹性地基梁采用 m 法分析,下部分各桩按弹性地基梁采用 k 法分析;孙书伟等^[7-8]基于地基系数 p - y 曲线法,确定微型桩加固边坡的水平抗力,给出了微型桩截面极限弯矩及剪力的分析方法,采用有限差分模式导出了微型桩内力与位移的计算公式;Deng 等^[9]从坡体稳定性角度讨论了加固土坡的微型桩所提供有效剪力的计算方法,其中,在滑面上下将坡体对微型桩的反力分段视为随深度呈线性增大模式,且假定其可通过极限状态或静止土压力系数确定;Zeng 与 Xiao^[10]采用桩位前后两段滑面的极限分析方法,在确定微型桩需提供剪力和弯矩(在滑面处)的基础上,基于平面刚架和弹性地基梁模型建立了微型抗滑桩结构内力及位移计算方法。

以往基于微型桩抗弯模式的计算方法对工程设计提供了借鉴与参考。然而,微型抗滑桩设计的关键环节在于桩身弯矩计算的合理性。以 3 根钢筋组成的束筋型微型桩为例,不同钢筋类型的单桩设计极限弯矩如表 1 所示。由表 1 可知,对于实践中常用的 $\phi 32$ mm 的 HRB400 型钢筋,其设计极限弯矩仅有 5.91 kN·m,而部分分析方法计算得到的桩身设计最大弯矩均超过该极限值。这说明采用抗弯模式分析束筋型微型桩的方法未必合理,其主要原因在于各桩桩前抗力难以合理确定(多以假定处理,保守式弱化了桩前抗力效应)。同时,现行相关规范^[13]中基于微型桩抗弯模式给出的计算方法涉及 19 个公式与 42 个计算参数,公式复杂且许多参数无法准确确定,

不便于工程技术人员操作。

表 1 束筋型微型桩设计极限弯矩及典型实例最大设计弯矩表

钢筋类型	设计强度 /MPa	钢筋直径 /mm	极限弯矩 /($\text{kN}\cdot\text{m}$)	桩身最大设计弯矩 /($\text{kN}\cdot\text{m}$)		
				周德培等 ^[5]	张益锋 ^[11]	曾锦秀 ^[12]
HRB400	360	32	5.91	16.9	8.1	12.55
HRB400	360	40	11.55			
HRB500	435	32	7.14			
HRB500	435	40	13.95			

实际上,微型桩结构的桩径较小,桩体两侧的坡体压力作用效果相当,其抗弯效应通常并不显著,抗剪及抗拉或抗压效应则相对更为重要。因此,考虑到束筋型微型桩结构的作用特点,可将其视为锚固角等于或接近于 90° 的锚杆结构,按类似于锚杆^[14]的锚固结构模式分析此类微型桩结构。本文以加固边坡的稳定性为着眼点,将微型桩的锚拉与抗剪作用引入坡体稳定性分析中,建立桩体轴力与剪力计算公式,形成微型抗滑桩结构简化设计方法。这样既可避免按受弯模式分析中桩前抗力不确定性的问题,也无需涉及诸多计算公式与参数,可大为简化相关工程设计计算。

2 设计计算方法

对于微型抗滑桩结构加固边坡,确保边坡稳定性达到设计目标是根本目标。因此,微型抗滑桩结构的主要设计计算步骤包括:

- (1) 确定加固边坡的稳定性设计安全系数。
- (2) 确定微型桩布设角度。
- (3) 确定微型桩设计抗剪与抗拔、抗压作用力。
- (4) 微型桩桩身抗剪与轴向拉、压强度验算。

(5) 桩体锚固段抗拔验算,确定桩体锚固段长度及桩体全长。

(6) 根据计算分析,兼顾构造要求与施工方便,拟定结构的基本几何尺寸,包括:单元间距、单元中微型桩个数及间距、桩体孔径及其中钢筋数量与类型、顶板或顶梁平面尺寸。

(7) 按混凝土结构构造要求确定顶板或顶梁配筋,顶板或顶梁厚度可按施工方便确定,一般可取 40~50 cm。

- (8) 绘制施工设计图。

微型桩设计抗剪与抗拔、抗压作用力计算是关键环节。对于微型桩加固边坡(如图 1 所示),可根据加固后坡体稳定性的设计要求,采用式(1)的传递系数法^[15]计算公式,在设计安全系数为 K 时,潜在滑体出口条块(第 n 块)推力为零,以此计算需微型桩提供的

剪力和轴力。为简化分析,可近似认为同一顶板或顶梁组合桩群结构下各桩的剪力相同。

$$E_i = KT_i - R_i + E_{i-1}\psi_{i-1} - \Delta E_i \quad (1)$$

式中: E_i ——第 i 条块向前传递的剩余下滑力;

K ——加固边坡稳定性的设计安全系数;

T_i ——第 i 条块滑体重力下滑力 $T_i = W_i \sin \alpha_i$;

R_i ——滑面土体抗滑力 $R_i = F_i \tan \phi_i + c_i l_i = W_i \cos \alpha_i \times \tan \phi_i + c_i l_i$, 其中, W_i 、 α_i 、 ϕ_i 、 c_i 、 l_i 分别为第 i 条块的自重、滑面倾角、滑面内摩擦角、黏聚力和滑面长度;

ψ_{i-1} ——第 $i-1$ 条块对第 i 条块的剩余下滑力的传递系数, 计算表达式为:

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i \quad (2)$$

ΔE_i 为微型桩提供的沿滑面的抗滑力, 包括桩体沿滑面向剪力 Q 与轴力 N_i 作用两部分, 其表达式为:

$$\Delta E_i = N_i [\cos(\theta_i - \alpha_i) \tan \varphi_i + \sin(\theta_i - \alpha_i)] + Q \quad (3)$$

$$N_i = Q [\cos(\theta_i - \alpha_i) f + \sin(\theta_i - \alpha_i)] \quad (4)$$

式中: f ——桩侧面与滑体之间的摩擦系数^[16-17]。

N_i 可由桩体 AB 段轴向静力平衡确定, 不计 AB 段挠曲变形(一般相对较小)对其影响, 以简化分析。

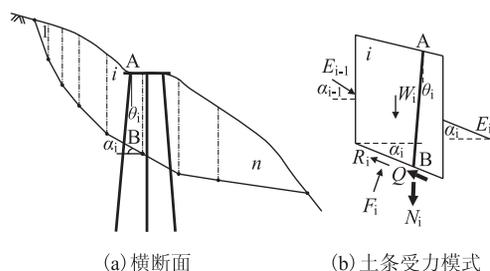


图 1 微型桩加固边坡稳定性分析模型图

由以上分析, 微型桩的设计内力计算就转变为先根据式(1)计算桩身剪力 Q (kN/m), 再由式(4)计算桩身轴力 N_i (kN/m)。若横断面外微型桩群的间距为 S , 相应的微型桩列数为 n , 则单孔微型桩设计剪力 Q_d 与轴力 N_{di} 应满足如下条件(3 根钢筋套筒连接成 1 束):

$$Q_d = \frac{QS}{n} \leq \frac{3\pi d^2 \sigma_s}{4\sqrt{3} \cos(\theta_i - \alpha_i)} \quad (5)$$

$$N_{di} = \frac{N_i S}{n} \leq \frac{3\pi d^2 \sigma_s}{4} \quad (6)$$

式中: σ_s ——钢筋的设计强度。

根据桩身剪力与轴力, 可设计确定每个钻孔中的钢筋直径及钢筋数(一般不超过 3 根)。此外, 根据桩身轴向拉力, 按下式计算其锚固段设计长度 L_m :

$$L_m = \frac{K_m N_i S}{\pi D [\tau] n} \quad (7)$$

式中: K_m ——锚固段长度设计安全系数, 可取 1.6~2.0

D ——钻孔直径;

$[\tau]$ ——包裹钢筋的水泥砂浆体与岩土体间的容许抗剪强度。

实际上, 根据规范^[18], 锚固段应同时满足杆体、杆体与砂浆、砂浆与土层的强度检算要求, 但由于这里所述的微型桩桩体通常为螺纹钢束筋型结构, 而钢筋抗拉断强度、钢筋与砂浆之间的握裹抗剪强度一般均远大于砂浆与岩土体界面抗剪强度, 故后者常为控制设计因素。在必要情况下, 其余两者可按相关规范方法验算, 这里不再赘述。

需要注意的是, 由于桩前土体抗力对微型桩结构稳定性(特别是抗弯)影响很大, 在设计和施工中应特别注意桩前土体的稳定性, 确保其能为微型桩结构提供必要的抗力, 如采用框架锚杆或土钉墙防护桩前局部坡体。

3 工程实例分析

3.1 实例一

以某项目路堑边坡为例, 边坡横断面示意如图 2 所示。其坡体所在场地出露地层主要为: 崩积层和坡洪积层($Q_4^{col+dl+pl}$), 侏罗系中统沙溪庙组地层(J_{2s})。前者以含角砾低液限粘土、块石土质土与块石夹土为主, 其中的土颗粒主要为泥岩全风化产物形成的低液限粘土, 土体承载力低, 自身的稳定性差; 后者则以粉砂质泥岩为主, 根据风化程度不同分为强风化粉砂质泥岩(极软, 呈碎块状)与弱风化粉砂质泥岩(属软质岩类, 岩石呈碎块~大块状, 承载力较高, 稳定性良好)。

开挖边坡由上覆的覆盖层(含角砾低液限粘土)及下伏基岩(弱风化砂泥岩互层)组成。边坡采用两级放坡, 上级地层为含角砾低液限粘土, 边坡坡高 8 m, 坡率为 1:1; 下级地层主要为弱风化砂泥岩互层, 坡率为 1:1.5。考虑到开挖很可能引起覆盖层沿着基岩-覆盖层界面(潜在滑面)发生滑动破坏, 在上下级平台(宽约 4.5 m)位置布设 3×3 型(单元)板连式微型抗滑桩结构加固, 覆盖层厚度约为 4.5 m。单元抗滑结构横断面外间距为 3.0 m, 微型单桩孔径 130 mm, 由 3 根 $\phi 32$ mm 的 HRB400 级螺纹钢组成。微型桩结构平面布置如图 3 所示, 排间距和列间距分别为 0.6 m 和 0.5 m, 顶板边缘距边桩 0.2 m。中排桩直立, 前、后排桩与竖向倾角 15°, 前排桩、中排桩与后排桩的受荷

段长度分别约为 4.72 m、4.56 m 与 4.72 m。顶板采用 C30 混凝土浇筑的钢筋混凝土结构。边坡岩土体物理力学参数如表 2 所示。

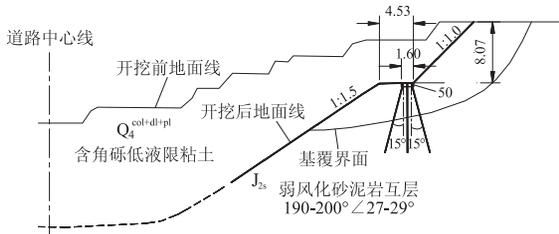


图 2 实例一某路堑边坡横断面示意图(cm)

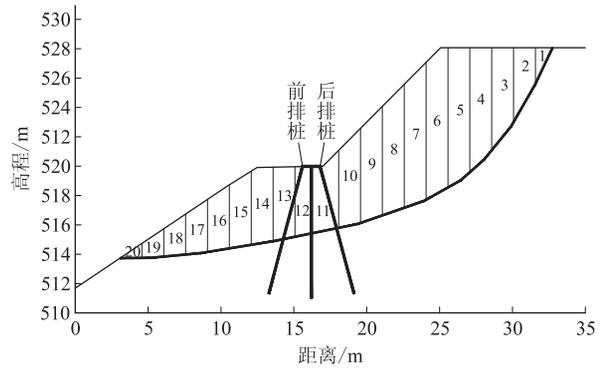


图 4 实例一边坡滑体分条图

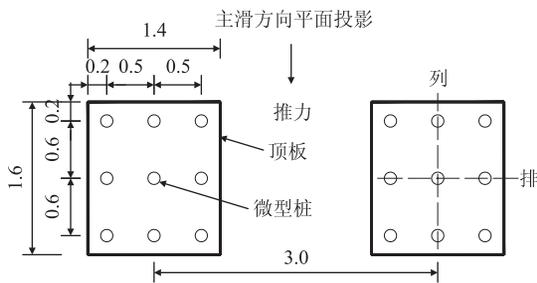


图 3 微型抗滑桩结构平面布置示意图(m)

表 2 实例一边坡岩土体主要物理力学参数表

名称	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
含角砾低液限粘土	20	15	13.2
弱风化砂泥岩互层	23	100	40

3.1.1 桩身抗剪与抗拉压验算

根据相关规范^[19], 边坡设计安全系数取 1.30, 对边坡潜在滑体进行条分, 条块及其编号如图 4 所示。

由地层条件, 桩土间摩擦系数取为 0.4, 按式(1)可计算得沿滑面方向桩身剪力为 103.61 kN/m (相应各条块剩余推力值如表 3 所示), 由式(5)可得单孔微型桩设计剪力为 103.61 kN, 后排、中排、前排的设计轴力分别为 45.1 kN、19.0 kN 和 -8.2 kN (负表示压力)。

于是, 按式(5)进行桩身抗剪验算为:

$$Q_d = 103.61 \text{ kN} \leq \frac{3\pi d^2 \sigma_s}{4\sqrt{3} \cos(\theta_i - \alpha_i)} = \begin{cases} 292.7 \text{ kN (后排)} \\ 299.1 \text{ kN (中排)} \\ 293.2 \text{ kN (前排)} \end{cases}$$

按式(4)、式(6)进行桩身抗拉或抗压验算为:

$$N_{di} = \begin{cases} 45.1 \text{ kN (后排)} \\ 19.0 \text{ kN (中排)} \\ -8.2 \text{ kN (前排)} \end{cases} \leq \frac{3\pi d^2 \sigma_s}{4} = 506.7 \text{ kN}$$

表 3 实例一各条块剩余推力计算结果表

分条号 <i>i</i>	滑面长度 <i>l_i</i> /m	滑面倾角 α_i /(°)	滑体重力 <i>W_i</i> /kN	剩余推力 <i>E_i</i> /kN	备注
1	2.558	64	25.46	-11.25	
2	3.397	61	128.40	80.44	
3	2.517	52	195.00	210.35	
4	2.140	47	235.72	359.56	
5	2.070	34	321.20	471.37	
6	1.754	29	308.56	564.80	
7	1.649	21	286.20	586.80	
8	1.603	18	253.58	600.05	
9	1.751	16	241.78	600.64	
10	1.608	14	191.50	587.89	
11	1.961	13	188.96	452.32	后排桩
12	1.220	12	117.05	332.85	中排桩
13	1.554	11	156.95	205.45	前排桩
14	1.554	11	164.00	185.06	
15	1.583	10	151.94	159.74	
16	1.678	7	136.15	122.27	
17	1.508	6	96.56	89.73	
18	1.575	5	74.03	56.81	
19	1.624	4	47.65	25.38	
20	1.492	2	14.72	0.00	出口

3.1.2 桩体锚固段长度设计

由地层条件, 取砂浆与锚固段地层间的容许抗剪强度为 50 kPa, 锚固段长度设计安全系数取为 1.8, 按式(7)算得锚固段长度为:

$$L_m = \frac{K_m N_i S}{\pi D [\tau] n} = \frac{1.8 \times 45.1 \times 3}{3.14 \times 0.13 \times 50 \times 3} = 3.98 \text{ m}$$

因此, 桩体设计全长为 4.72 + 3.98 = 8.70 m, 取 9 m。

考虑施工操作方便, 顶板厚度取 0.5 m, 按一般混凝土板构造要求行配筋设计。

(3) 现场监测与工程应用效果

现场待微型桩顶板达到 28 d 强度后, 发现桩身轴

向应力最大值位于滑面附近,其值约为 17.5 MPa,小于设计值 32 MPa,其原因在于实际监测坡体未达到极限状态,而设计按坡体处于极限状态考虑。这说明所设计的微型抗滑桩结构处于安全工作状态,与实际所显示的加固边坡稳定性状态良好的效果相一致。

3.2 实例二

云南广通至大理铁路 DK 63 + 160 断面路堑边坡示意如图 5 所示,坡体由上覆的含角砾低液限粘土、强风化砂泥岩及下伏基岩(弱风化砂岩)组成。边坡采用三级放坡,上级、中级、下级坡高分别为 7.3 m、8 m、8 m,坡率分别为 1:1.5、1:1.25、1:0.75,中、下级坡面采用框架锚杆防护。根据现场钻孔监测及综合分析,确定开挖边坡潜在滑面位于强风化砂岩中,为 4 段折线型滑面,如图 8 所示。为此,在下级坡顶平台(宽约 3 m)位置布设 3×3 型(单元)板连式微型抗滑桩结构加固,设桩处滑体厚度约为 8 m。单元抗滑结构横断面外间距为 4.0 m。顶板构造、单元抗滑结构中桩体布置及微型单桩构造均同实例一。边坡岩土体物理力学参数如表 4 所示。

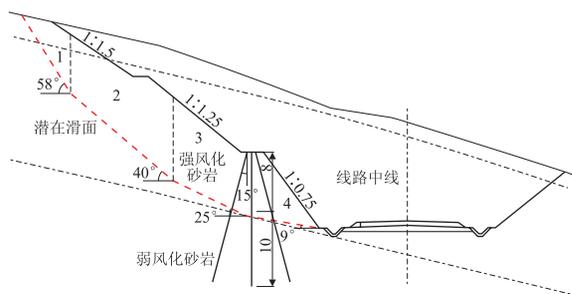


图 5 实例二某路堑边坡横断面示意图(m)

表 4 实例二边坡岩土体主要物理力学参数表

名称	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
强风化砂岩	20	0	30
弱风化砂岩	24	100	40

3.2.1 桩身抗剪与抗拉压验算

根据相关规范^[20],边坡设计安全系数取 1.25。由地层条件,桩土间摩擦系数取为 0.57。按式(1)可计算得沿滑面方向桩身剪力为 134.98 kN/m(相应各滑块剩余推力值如表 5 所示。由式(5)可得单孔微型桩设计剪力为 179.97 kN,后排、中排、前排的轴力分别为 120.8 kN、73.2 kN、20.5 kN。

按式(5)进行桩身抗剪验算:

$$Q_{di} = 134.98 \text{ kN} \leq \frac{3\pi d^2 \sigma_s}{4\sqrt{3} \cos(\theta_i - \alpha_i)} = \begin{cases} 294.1 \text{ kN (后排)} \\ 296.2 \text{ kN (中排)} \\ 294.1 \text{ kN (前排)} \end{cases}$$

按式(4)、式(6)进行桩身抗拉或抗压验算:

$$N_{di} = \begin{cases} 120.8 \text{ kN (后排)} \\ 73.2 \text{ kN (中排)} \\ 20.5 \text{ kN (前排)} \end{cases} \leq \frac{3\pi d^2 \sigma_s}{4} = 506.7 \text{ kN}$$

表 5 实例二各条块剩余推力计算结果表

分条号 <i>i</i>	滑面长度 <i>l_i</i> /m	滑面倾角 α_i / (°)	滑体重力 W_i /kN	剩余推力 E_i /kN
1	12.39	58	569.34	429.35
2	18.03	40	2 598.07	1 270.18
3	10.96	25	1 904.76	850.16
4	9.83	9	1 033.90	0.00

3.2.2 桩体锚固段长度设计

由地层条件,取砂浆与锚固段地层间的容许抗剪强度为 75 kPa,锚固段长度设计安全系数取为 1.8,按式(7)算得锚固段长度:

$$L_m = \frac{K_m N_i S}{\pi D [\tau] n} = \frac{1.8 \times 120.8 \times 4}{3.14 \times 0.13 \times 75 \times 3} = 9.47 \text{ m}$$

因此,桩体设计全长为 8 m + 9.47 m = 17.47 m,取 18 m。

4 结论

本文采用锚固作用模式分析束筋型微型桩加固边坡问题,将微型桩轴力与剪力引入加固边坡的稳定性分析中,基于传递系数法建立束筋型微型桩设计计算的简化方法,得到主要结论如下:

(1) 微型抗滑桩对坡体所提供的沿滑面的抗滑力,包括桩体沿滑面向剪力与桩身轴力作用两部分,在通过传递系数法分析加固边坡稳定性时,二者共同以阻抗作用方式呈现于剩余推力计算表达式中。根据加固边坡稳定性设计安全系数要求,可计算确定微型桩设计剪力与轴力。其间,可反映微型桩的竖向倾角、桩间距等要素对桩体内力的影响。

(2) 实例分析表明,对于 3 排束筋型微型桩组成的单元抗滑结构,其后排桩承受轴向拉力、前排桩可能承受轴向压力、中排桩通常承受轴向拉力;对于 3 排微型桩的轴力绝对值,后排桩最大,起控制设计作用。

参考文献

- [1] BRUCE DA, DIMILLIO AF, JURAN I. A Primer on Micropiles [J]. Civil Engineering, 1995, 65(12): 51-54.
- [2] 丁光文,王新. 微型桩复合结构在滑坡整治中的应用[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(1): 47-50.
DING Guangwen, WANG Xin. Application of Micropiling Compound Structure in a Landslide Treatment Engineering [J]. Geotechnical

- Engineering Technique, 2004, 18(1): 47 - 50.
- [3] 张红,秦文达,张海凤,等. 联络线施工对邻近线路基扰动影响[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(1): 35 - 40.
ZHANG Hong, QIN Wenda, ZHANG Haifeng, et al. Disturbance of Construction of Connecting Line to Earthworks of Adjacent Lines [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1): 35 - 40.
- [4] 王恭先. 滑坡防治中的关键技术及其处理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3818 - 3827.
WANG Gongxian. Key Technique in Landslide Control and Its Handling Measures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3818 - 3827.
- [5] 周德培,王唤龙,孙宏伟. 微型桩组合抗滑结构及其设计理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1353 - 1362.
ZHOU Depei, WANG Huanlong, SUN Hongwei. Micro-Pile Composite Structure and Its Design Theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1353 - 1362.
- [6] 肖世国,鲜飞,王唤龙. 一种微型桩组合抗滑结构内力分析方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2553 - 2559, 2564.
XIAO Shiguo, XIAN Fei, WANG Huanlong. Analytical Method of Internal Forces of a Combining Micropiles Structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2553 - 2559, 2564.
- [7] SUN Shuwei. Design Method for Stabilization of Earth Slopes with Micropiles [J]. Soils and Foundations, 2013, 53(4): 487 - 497.
- [8] 孙书伟,朱本珍,郑静. 基于极限抗力分析的微型桩群加固土质边坡设计方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1671 - 1677.
SUN Shuwei, ZHU Benzhen, ZHENG Jing. Design Method of Micropile Group for Soil Slope Stabilization Based on Ultimate Resistance of Analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1671 - 1677.
- [9] DENG Dongping, LI Liang, ZHAO Lianheng. Limit-Equilibrium Method for Reinforced Slope Stability and Optimum Design of Antislid Micropile Parameters [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(2): 06016019.
- [10] ZENG Jinxiu, XIAO Shiguo. A Simplified Analytical Method for Stabilizing Micropile Groups in Slope Engineering [J]. International Journal of Civil Engineering, 2020, 18(2): 199 - 214.
- [11] 张益锋. 微型桩抗滑组合结构受力分析: 基于低承台桩基理论的改进方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
ZHANG Yifeng. Mechanical Analysis of Micro-pile Anti-slide Composite Structure—an Improved Method Based on the Theory of Low-cap Pile Foundation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [12] 曾锦秀. 板连式束筋微型抗滑桩群加固边坡机制与计算理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
ZENG Jinxiu. Study on Mechanism and Computational Theory of Group of Combined Stabilizing Micropiles Used to Reinforce Slopes [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [13] GB/T 38509 - 2020 滑坡防治设计规范[S].
GB/T 38509 - 2020 Code for the Design of Landslide Stabilization[S].
- [14] 冯君,周德培,江南,等. 微型桩体系加固顺层岩质边坡的内力计算模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 284 - 288.
FENG Jun, ZHOU Depei, JIANG Nan, et al. A Model for Calculation of Internal Force of Micropile System to Reinforce Bedding Rock Slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 284 - 288.
- [15] GB 50330 - 2013 建筑边坡工程技术规范[S].
GB 50330 - 2013 Technical Code for Building Slope Engineering[S].
- [16] XIAO Shiguo. Improved Limit Analysis Method of Piled Slopes Considering the Pile Axial Forces [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineer, 2021, 174(1):
- [17] 肖世国. 考虑桩间土体抗滑作用的单排抗滑桩受力计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 89 - 94.
XIAO Shiguo. A Calculation Method for One Row Stabilizing Piles Considering Resistance of Soil between Adjacent Piles [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(1): 89 - 94.
- [18] TB 10025 - 2019 铁路路基支挡结构设计规范:[S].
TB 10025 - 2019 Code for Design of Retaining Structures of Railway Earthworks[S].
- [19] JTGD 30 - 2015 公路路基设计规范[S].
JTGD 30 - 2015 Specifications for Design of Highway Subgrades[S].
- [20] TB 10001 - 2016 铁路路基设计规范[S].
TB 10001 - 2016 Code for Design of Railway Earth Structure[S].