

微型桩体系加固顺层岩质边坡的内力计算模式

冯 君, 周德培, 江 南, 杨 涛

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 根据微型桩的结构布置形式, 将加固顺层岩质边坡的微型桩体系分为 3 种类型, 即独立微型桩体系、平面桁架微型桩体系和空间桁架微型桩体系。将微型桩体系和桩间岩土体视为桩-岩土体的复合型结构, 提出了桩-岩土体-桩的相互作用模式和作用力计算分析模型, 该模型考虑桩-岩土体-桩的相互作用, 可较好模拟滑坡推力在各排桩之间的传递机制。最后, 应用有限元理论建立计算微型桩体系内力和变形的力学模型, 并将该模型应用于渝怀铁路顺层岩质边坡加固计算中, 取得了良好的效果。

关键词: 岩石力学; 微型桩体系; 顺层岩质边坡; 桩-岩土体复合型结构; 力学模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2006)02-0284-05

A MODEL FOR CALCULATION OF INTERNAL FORCE OF MICROPILE SYSTEM TO REINFORCE BEDDING ROCK SLOPE

FENG Jun, ZHOU De-pei, JIANG Nan, YANG Tao

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

Abstract: According to the arrangement of micropiles, the micropile system used to reinforce bedding rock slope can be classified into three types: independent micropiles system, planar truss micropile system and spatial truss micropile system. On the basis of combining the micropiles and the rock mass among the micropiles as a whole structure, a new analytical model of micropile system is proposed. The interaction between the micropiles and rock mass can be simulated with this model. The mathematical and mechanical model for the internal force and deformation of the micropile system is established by finite element method.

Key words: rock mechanics; micropile system; bedding rock slope; composite structure of piles and rock mass; mechanical model

1 引 言

顺层岩质边坡是边坡工程中常见的一类边坡, 该类边坡一旦失稳, 极易形成顺层滑坡, 危害大, 治理困难, 目前铁路上较为常用的工程措施是采用大截面的抗滑桩或预应力锚索抗滑桩进行加固。近年来, 特别是“国际减灾十年活动”开展以来, 国际上研究和防治滑坡灾害空前活跃, 各项研究进一步扩展和深入, 防治工程措施也在完善已有措施的

基础上向轻型化、小型化方向发展^[1]。因此, 本文结合顺层岩质边坡的特点, 提出了用于加固顺层岩质边坡的轻型加固体系, 即微型桩体系, 并就微型桩体系的加固机制以及相关设计计算理论进行了探讨。

2 微型桩体系的分类

微型桩一般指桩径小于 300 mm, 长细比较大的桩(一般大于 30 mm), 采用钻孔、压力注浆工艺

收稿日期: 2005-08-22; **修回日期:** 2005-09-30

作者简介: 冯 君(1977-), 男, 博士, 2000年毕业于西南交通大学土木工程学院, 现任讲师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: fengjun4316@163.com.

施工的小直径灌注桩或者插入桩^[2]。这种桩型具有施工方便、布置形式灵活的特点。其应用始于 20 世纪 50 年代的意大利^[3], 20 a 后传入美国和其他国家。早期主要用于房屋地基加固。20 世纪 80 年代以后迅速发展, 在深基坑开挖支护、地面沉陷修复、铁路路堤及路基加固以及边坡加固等方面都得到成功应用^[4~8]。根据具体工程的特点, 微型桩体系可以采用不同的结构布置形式, 就加固顺层岩质边坡而言, 根据其结构布置形式可将微型桩体系分为以下 3 种类型, 即独立微型桩体系、平面桁架微型桩体系和空间桁架微型桩体系。

(1) 独立微型桩体系

独立微型桩体系就是在边坡的开挖坡面或自然坡面上按照一定的间排距在一定范围内布置多根微型桩, 各根桩相互独立, 当微型桩工作时, 桩与桩的相互作用仅通过桩间岩土体进行传递(图 1)。该种结构形式比较适合于滑体完整性较好且强度较高的顺层岩质边坡, 例如硬质岩顺层岩质边坡。

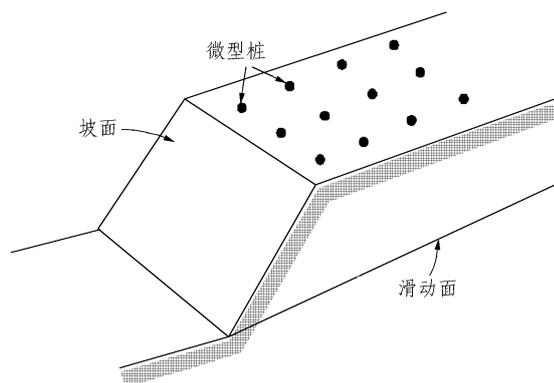


图 1 独立微型桩体系

Fig.1 Independent micropile system

(2) 平面桁架微型桩体系

将坡面上布置的多排微型桩通过使用连系梁将其顶端横向连接在一起而形成的结构体系称为平面桁架微型桩体系(图 2)。该种结构形式适合于坡体发育有两组结构面(除层面外, 还发育一组平行于边坡走向的陡倾结构面)、完整性较差的顺层岩质边坡。

(3) 空间桁架微型桩体系

空间桁架微型桩体系是在平面桁架微型桩体系的基础上, 用连系梁将沿着边坡走向分布的多排微型桩连接在一起而形成的结构体系(图 3)。对于坡体发育有两组以上结构面、岩体软弱破碎、完整性很差的顺层岩质边坡则可采用该种结构形式。

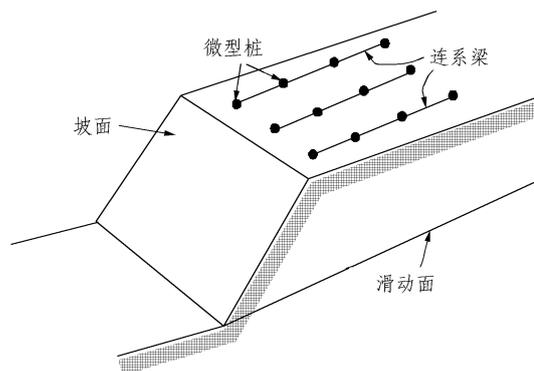


图 2 平面桁架微型桩体系

Fig.2 Planar truss micropile system

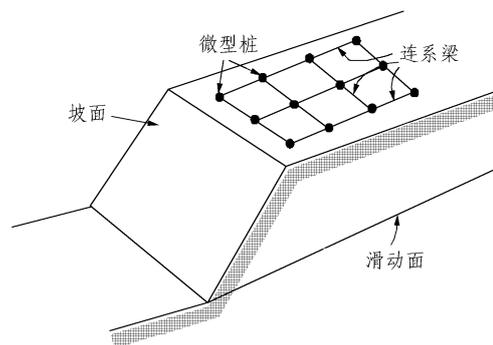


图 3 空间桁架微型桩体系

Fig.3 Spatial truss micropile system

3 微型桩体系的加固机制

对于顺层岩质边坡而言, 通常使用微型桩预加固技术, 即在边坡开挖之前, 预先针对潜在的滑体使用微型桩进行加固, 然后再开挖。根据边坡的具体工程地质条件, 可选用独立微型桩体系、平面桁架微型桩体系或者空间桁架微型桩体系。无论哪种结构形式, 其加固边坡的基本原理是一致的。微型桩的存在, 尤其是在微型桩顶采用连系梁形成桁架体系后, 桩与桩间岩土体形成了桩-岩土体复合结构, 滑坡推力由桩和桩间岩土体共同承担, 从而起到稳定边坡的作用。

微型桩加固顺层岩质边坡有以下几个特点:

(1) 微型桩通常嵌入边坡潜在滑面足够深度, 采用了较多的锚筋, 而且各根微型桩相互联系, 因此不仅仅是单根微型桩独立工作, 而是整个微型桩体系和桩间岩土体作为一个整体结构进行工作^[2], 具有类似抗滑桩的作用, 可承受较大弯矩和剪力。

(2) 桩-岩土体复合结构刚度较大, 可以有效地控制边坡的变形。

(3) 使用了桩顶连系梁后, 使各根微型桩和桩间岩土体更加紧密地联系在一起, 能够有效控制坡面上加固区域拉裂缝的形成、开展, 对于减小拉裂缝中充填水对边坡稳定性的不利影响有积极作用。

4 微型桩体系计算模型

坡面上共布置 n 排微型桩, 按照从滑体前部到后部的顺序依次编号为第 1, 2, \dots , i , \dots , n 排, 如图 4 所示。作用在最后一排桩(第 n 排桩)上的力有桩后滑体的剩余下滑力(占总滑坡推力的绝大部分)和桩前滑体的抗力, 作用在第 i 排桩上的力包括三部分: 一是经第 i 排桩和第 $i+1$ 排桩间滑体传递而来的第 $i+1$ 排桩的桩前滑体抗力的反作用力(第 $i+1$ 排桩变形引起); 二是第 i 排桩和第 $i+1$ 排桩间滑体的剩余下滑力^[9]; 三是第 i 排桩前滑体的抗力。若将各排微型桩以及桩间岩土体看作桩 - 岩土体复合型结构, 则第 1 排桩的桩前滑体抗力和第 n 排桩的桩后滑体剩余下滑力成为外力, 桩与桩之间的相互作用力可看作内力, 另外各排桩之间的桩间滑体的剩余下滑力可视为外力作用于前排桩上。

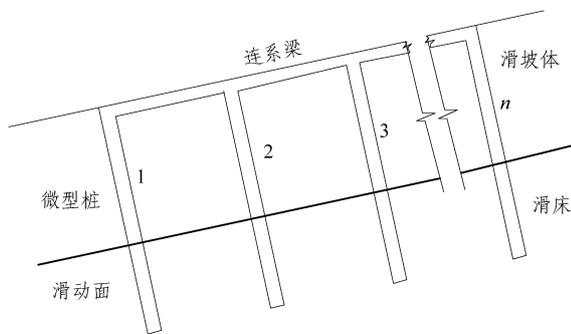


图 4 微型桩布置示意图

Fig.4 Schematic diagram of micropile arrangement

基于以上分析, 可将微型桩的力学边界条件和位移边界条件等效为以下形式: 即滑面以上桩与桩之间用弹性连接相连, 用于模拟桩 - 岩土 - 桩之间的相互作用, 根据桩间岩土体的力学性质按“K”法或“m”法计算出地基弹性抗力系数 k , 各弹性连接的刚度系数根据 k 值选取, 考虑到岩土体的抗拉强度较低, 将滑面以上弹性连接设为仅受压弹性连接(受拉时弹性连接失效); 滑面以下为稳定基岩, 因此滑面以下各桩分别施加弹性支承, 模拟滑床对

桩 - 岩土体复合型结构的弹性支承作用, 地基弹性抗力系数根据滑床岩体的力学性质按“K”法或“m”法计算; 第 1 排桩前作用桩前滑体抗力, 第 2~ $n-1$ 排桩后作用桩间滑体剩余下滑力, 第 n 排桩后作用桩后滑体剩余下滑力。

以上的计算模型可以利用有限元方法实现, 即建立有限元计算模型。首先建立整体坐标系 xoy , 然后将各排微型桩和连系梁划分为多个梁单元, 并尽可能在岩性分界面和滑动面等位置布置单元节点以及尽可能保证各根桩在同一桩深位置均分布有节点。将滑面以上相邻两根桩同一桩深处的节点用仅受压弹簧单元连接。第 n 排桩后滑体剩余下滑力、第 1 排桩前滑体抗力和各排桩间滑体剩余下滑力作为荷载作用在各排桩的单元上。滑体剩余下滑力可采用传递系数法进行计算^[10]。推力分布图式可根据滑体性质等因素确定。当滑体刚度较大(如较为完整的硬质岩)时, 可采用矩形分布; 当滑体刚度较小、岩体破碎时, 可采用三角形分布; 对于介于二者之间的情况可假定为梯形分布。微型桩计算模型如图 5 所示。

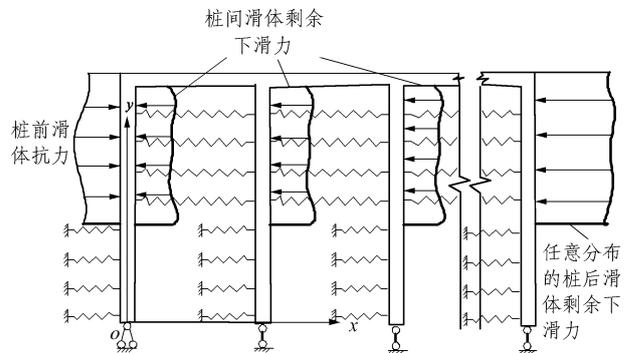


图 5 微型桩计算模型

Fig.5 Analytical model of micropile system

5 实例分析

渝怀铁路工点边坡岩体为强至中等风化砂质板岩, 层状结构, 岩层倾向线路, 走向与线路基本平行, 岩层倾角为 29° ; 距坡面约 3 m 深度含有碳质泥岩夹层, 层厚 0.2~0.5 m, 遇水容易膨胀, 层面光滑, 质地软弱。由于边坡开挖会切断岩层且泥岩夹层抗剪强度较低, 开挖可能会引起顺层滑坡, 因此该路堑边坡采用微型桩预加固, 即上部坡面按设计位置顺岩层面清方后设 4 排微型桩, 桩长均为 6 m,

间距×排距为 1 m×1 m，桩顶设置网格型钢筋混凝土连系梁，连系梁钢筋同微型桩钢筋焊接，待微型桩体系施工完毕后，再开挖路堑。微型桩中的配筋由 3 根直径为 $\phi 32(16MnQ)$ 钢筋加工而成，其钻孔直径为 150 mm，孔内灌入 C30 水泥砂浆；连系梁采用相同的配筋，截面尺寸为 0.15 m×0.15 m。边坡岩体重度 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ；滑移面摩擦角 $\varphi = 15^\circ$ 、黏聚力 $c = 10 \text{ kPa}$ 。

由于岩层走向与边坡走向基本平行，该问题可简化为平面问题计算，简化后的平面结构如图 6 所示，下滑推力按矩形分布荷载分别作用在各排桩上，最后一排桩的桩后滑体单宽剩余下滑力为 216 kN，各排桩桩间滑体单宽剩余下滑力为 10 kN，第 1 排桩桩前滑体抗力不考虑。滑动面上下桩周岩体地基系数均取为 $K = 120\,000 \text{ kPa/m}$ 。微型桩体系内力计算结果见表 1，剪力图、轴力图 and 弯矩图见图 7~9。

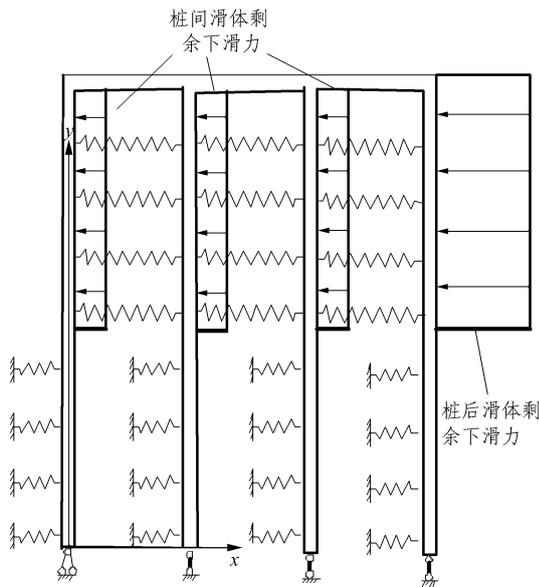


图 6 微型桩体系计算模型示意图
Fig.6 Mechanical model of micropile system

表 1 微型桩体系内力计算结果
Table 1 Internal forces of micropile system

微型桩 编号	最大剪力 /kN	最大轴力 /kN	最大弯矩 /(kN·m)	桩顶最大位移 /cm
第 1 排	63.2	56.6(压)	73.5	1.97
第 2 排	66.2	9.0(压)	74.1	1.96
第 3 排	72.7	14.8(拉)	75.2	1.96
第 4 排	97.9	50.8(拉)	78.0	1.96

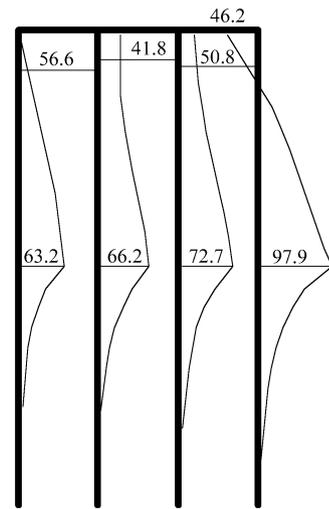


图 7 微型桩体系剪力图(单位: kN)
Fig.7 Shear force of micropile system(unit: kN)

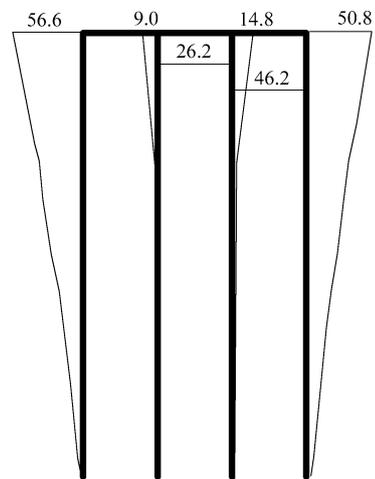


图 8 微型桩体系轴力图(单位: kN)
Fig.8 Axial forces of micropile system (unit: kN)

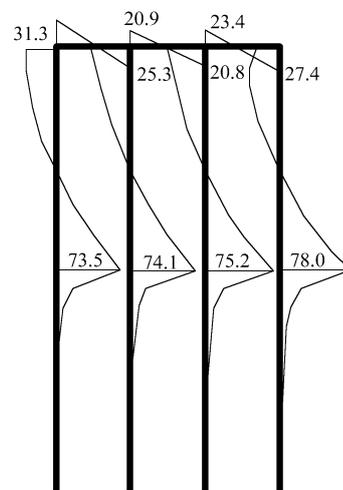


图 9 微型桩体系弯矩图(单位: kN·m)
Fig.9 Moment diagram of micropile system(unit: kN·m)

6 结 论

根据顺层岩质边坡的变形破坏特征,提出了用于加固顺层岩质边坡的轻型加固体系,该轻型支护体系是指区别于顺层岩质边坡加固中常用的大截面抗滑桩、预应力锚索抗滑桩等强支挡结构的一种新型加固体系、即微型桩体系。根据微型桩的结构布置形式,将微型桩体系分为3种类型,即独立微型桩体系、平面桁架微型桩体系和空间桁架微型桩体系,并对其适用范围和加固机制进行了研究。研究表明:微型桩体系和桩间岩土体可视为桩-岩土体的复合型结构,滑坡推力由桩和桩间岩土体共同承担,从而起到稳定边坡的作用。基于以上认识,提出了桩-岩土体-桩的相互作用模式和作用力计算分析模型,该模型考虑了桩-岩土体-桩的相互作用,较好模拟了滑坡推力在各排桩之间的传递机制。最后,应用有限元理论建立了计算微型桩体系内力和变形的力学模型,并将该模型应用于渝怀铁路顺层岩质边坡加固计算中,取得了良好的效果。

参考文献(References):

- [1] 王恭先. 滑坡防治工程措施的国内外现状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(1): 1 - 9.(Wang Gongxian. Present situation of engineering measures for preventing and controlling landslide in China and abroad[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(1): 1 - 9.(in Chinese))
- [2] 吕凡任, 陈云敏, 梅英宝. 小桩研究现状和展望[J]. 工业建筑, 2003, 33(4): 56 - 59.(Lu Fanren, Chen Yunmin, Mei Yingbao. Recent study and forecast of research on micropile[J]. Industrial Construction, 2003, 33(4): 56 - 59.(in Chinese))
- [3] Bruce D A, Dimillio A F, Juran I. Introduction to micropiles: an international perspective[A]. In: William F K ed. Foundation Upgrading and Repair for Infrastructure Improvement[C]. New York: Geotechnical Special Publication, ASCE, 1995. 1 - 26.
- [4] Vemon R S. Ground Improvement/Reinforcement/Treatment[M]. New York: Geotechnical Special Publication, ASCE, 1997. 151 - 175.
- [5] Richard J F, Catalina O P, Michele C. Compaction-grouted micropiles at the Northwestern University NGES[A]. In: Jean B ed. National Geotechnical Experimental Sites[C]. New York: Geotechnical Special Publication, ASCE, 2000. 235 - 249.
- [6] Bruce D A, Juran I, Dimillio A F. High capacity grouted micropiles: the state of practice in the United States[A]. In: Publications Committee of the XV CIMSG ed. Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 851 - 854.
- [7] 龚健, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 微型桩原型水平荷载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 541 - 3 546.(Gong Jian, Chen Renpeng, Chen Yunmin, et al. Prototype testing study on micropiles under lateral loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 541 - 3 546.(in Chinese))
- [8] 陈喜昌, 石胜伟. 小口径钻孔组合桩的理论研究与应用前景[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(3): 82 - 85.(Chen Xichang, Shi Shengwei. Theoretical research and application prospect of composite pile with small caliber bore-hole[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(3): 82 - 85.(in Chinese))
- [9] 熊治文, 马辉, 朱海东. 全埋式双排抗滑桩的受力分布[J]. 路基工程, 2002, (3): 5 - 11.(Xiong Zhiwen, Ma Hui, Zhu Haidong. Stress distributing of portal double row anti-sliding piles[J]. Subgrade engineering, 2002, (3): 5 - 11.(in Chinese))
- [10] 李海光, 周德培, 李安洪, 等. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. 48 - 50.(Li Haiguang, Zhou Depei, Li Anhong, et al. Design and Examples of New Support Structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. 48 - 50.(in Chinese))