

微型抗滑桩的应用发展研究现状

刘 凯, 刘小丽, 苏媛媛

(中国海洋大学 环境科学与工程学院, 青岛 266100)

摘 要: 微型抗滑桩作为一种新型支挡结构, 具有自身独特的优势, 已被广泛应用于岩土工程实践中。阐述了国内外微型抗滑桩的应用发展研究现状, 包括微型抗滑桩的工程应用现状、试验研究和设计计算研究进展, 并在此基础上指出了微型抗滑桩应用发展研究中存在的问题, 并提出了相关的建议。

关 键 词: 微型抗滑桩; 工程应用; 试验研究; 设计计算

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Research on application development of anti-slide micropiles

LIU Kai, LIU Xiao-li, SU Yuan-yuan

(College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract : As a new type support structure, anti-slide micropile has some distinctive advantages. It has been widely used in geotechnical engineering practice. The development of the anti-slide micropiles, including the engineering application, experimental and design calculation are described. According to the research on application development, some problems and suggestions are proposed.

Key words : anti-slide micropile; engineering application; experimental research; design calculation

1 引 言

微型桩(micropile), 又称树根桩(root piles)或迷你桩(minipile), 一般指桩径在70~300 mm, 长径比较大(一般大于30), 采用钻孔、强配筋和压力注浆工艺施工的灌注桩。微型桩是20世纪50年代初由意大利的Fondedile公司首先开发应用的^[1], 早期主要用于地基加固, 20世纪80年代以后迅速发展, 开始用于边坡治理、滑坡修复和深基坑支护等工程实践。1982年法国Soletanche公司来华, 介绍微型桩技术在法国的应用情况, 引起了国内学术界的广泛重视^[2]。在滑坡治理工程中, 特别是应急抢修工程中, 微型抗滑桩因施工方便迅速, 施工后桩体与岩土体形成复合土工材料, 可充分发挥岩土体自身的抗滑力等优点而得到广泛应用, 并取得了预期的治理效果^[3-18]。目前, 对于微型抗滑桩与周围岩土体的共同作用没有形成系统深入的理论认识。在工

程应用中, 一些重要参数的选取通常是通过试桩试验或参照其他工程的经验取值而确定^[3]。因此, 对目前微型抗滑桩的试验研究及计算理论加以分析总结, 对今后微型抗滑桩的深入研究和指导工程实践应用都具有重要意义。

2 微型抗滑桩的工程应用现状

在目前的抗滑工程实践中, 微型抗滑桩得到了广泛应用。在国外, 据Macklin等^[3]的文献, 美国科罗拉多州运输部在阿斯附近的临时支护工程中成功应用微型桩支护系统。Bruce等^[4]介绍了位于加拿大安大略省南部的一个铁路路堤的稳定修复工程, 采用非网状的微型桩结合表面盖梁的方案对铁路南面路坡加固。Helmut等^[5]介绍了在AG Weser港口工程中运用微型桩结合锚锭技术加固码头的成功案例。Kevin等^[6]介绍了美国北卡罗来纳州 Schnabel Foundation 公司采用锚锭微型桩挡墙成功修复

Pigeon River沿岸滑坡的案例。Dino等^[7]介绍了提图斯电厂的深基坑工程中应用的永久性微型桩支护挡墙。在国内,也有不少微型抗滑桩的工程应用实例,如邹越强等^[8]、谢晓华等^[9]、何小宏等^[10]、高永涛等^[11]、唐传政等^[12]、朱宝龙等^[13]亦对微型抗滑桩的应用进行了分析介绍。

随着工程经验的积累,理论研究的深入,微型抗滑桩在工程中的应用形式也得到了多元化发展,常与其他较为成熟的治理技术相结合。仅就目前已成功应用的新形式,主要可归纳为以下几种。

(1) 微型桩重力式挡墙^[14, 15]: 微型桩重力式挡墙是由微型桩群与挡墙结合构成,微型桩群竖向设置,上部与挡墙砌体联结,下部通过插入钢筋束(钢管)和浆液锚固在稳定的地层中。该种结构避免了一般抗滑挡墙截面较大、基础埋置较深、不便施工的缺点,又增强了挡墙的抗滑、抗倾覆能力及地基的承载能力,施工中对滑坡扰动小,所以对于中小型浅层滑坡和正在滑动中的滑坡的治理具有很强的适用性。

(2) 微型桩与普通抗滑桩结合: 该技术大体与微型桩重力式挡墙相似,通过在普通抗滑桩底部设置微型钢管桩锚固在稳定的岩土层中^[10],利用微型桩复合其周围的岩土体,增加抗滑桩的稳定性。由于采用了微型桩技术,克服了普通抗滑桩不便于施工的缺点。

(3) 微型桩与土钉支护技术结合^[16]: 土钉支护对土体的位移控制差,土体的位移往往较大,为控制土体位移可在土钉墙坡面设微型钢管桩,以增强面层整体性,增加基坑支护整体刚度,减小基坑变形,提高基坑安全度^[17],微型桩拓宽了土钉支护的使用范围。

(4) 微型桩与预应力锚索结合: 当滑面较深时,微型抗滑桩群穿过滑动面,下部固定于稳定岩土层中,滑面以上部分受到的水平荷载较大,可在其表面连系梁上使用锚索结构平衡其所受土压力。微型桩结合预应力锚索技术,不但拥有微型抗滑桩的全部优点,而且克服了普通微型抗滑桩的一些缺陷,取得了更好的加固效果,在环境和工作条件较差的情况下,具有明显的优势,也是一种抗滑的有效措施^[18]。

(5) 微型桩与压力注浆技术的结合^[13]: 该技术一般多采用微型钢管桩,两排或多排钻孔,下入钢管管进行压力注浆,用以加固钢管周围的滑坡岩土体,使密排的钢花管微型桩及其间的岩土体形成一个坚固的连续整体。该方法便于施工,是一种有

效、值得推广的滑坡治理方法。

3 试验与设计计算研究进展

3.1 微型抗滑桩的试验研究进展

微型抗滑桩的试验研究一般分为模型试验和数值模型试验。目前,在水平荷载作用下,对影响微型桩工作性状的因素的研究,主要集中于桩间距、荷载特性、桩的倾斜角度等。

3.1.1 模型试验

Awad^[19]通过现场试验初步研究了作用在单根微型桩上的横向荷载与所需桩长的关系。Richards等^[20]研究了微型桩的横向受载工作性状,证实了微型桩及微型桩群能够抵挡横向荷载,分析表明微型桩的横向受载性状与土体类型及距桩顶深度为2~5 m的周围土体抗剪强度极其相关,但对于具体的土体类型对微型桩的影响则没有进一步的阐述。Konagai等^[21]通过模型试验对具有坚硬承台的横向受载微型桩群的工作性状进行了详细的分析,指出当桩间距较大时,桩群的工作性状可以单桩的形式进行研究;当桩群的间距较密,由于强烈的群桩效应,桩群整体则可以视为一根等效竖梁,但作者并没指出划分群桩工作性状的具体桩间距。龚健等^[22]在软土地基中对微型单桩及群桩进行了水平荷载试验,结果表明,微型桩有较好的抵抗水平荷载的能力。Rollins等^[23, 24]研究了微型桩群在抗震加固方面的工作性状,通过试验研究得出了不同条件下桩体平均侧向抗力与桩间距的关系,以及群桩效应对桩体抗侧力的影响。以上是把微型桩作为桩基来研究的,其横向荷载试验对于研究微型抗滑桩而言也就存在着一定的局限性。

Thompson等^[25, 26]利用剪切盒模型,研究了微型抗滑桩在土体侧向运动时的荷载传递特性,但是仅对微型单桩及双桩进行了试验研究,试验结论也就不能用于目前普遍采用的微型桩群的工况;由于试验中采用剪切盒推动土体侧向运动,使得试验过程易于控制。Andrew^[27]通过大型模型试验研究了边坡稳定中微型桩的荷载传递特性,分析指出采用具有表面连系梁的微型桩可以较大程度地提高坡体的稳定性;对于无表面连系梁的微型桩应用 p - y 曲线法,预测的弯矩分布与实测较为符合,对于有表面连系梁的微型桩而言, p - y 法的误差较大。

3.1.2 数值模型试验

Brown等^[28]通过有限元模型对横向荷载下桩群的群桩效应进行了数值试验,研究表明,桩间距对于单排桩的影响要比成排的群桩影响小;当群桩的

桩间距为3倍的桩径时,群桩效应十分显著,当桩距为5倍桩径时,群桩效应则微不足道;这些观点与Rollins等^[23, 24]所做的原型试验结论相一致。Sadek等^[29]则通过数值模型试验研究了倾角对墙形网状微型桩性能的影响,微型桩群模型是由两排向相反方向倾斜(八字形)的微型桩组成的,结果表明,在横向荷载作用下倾斜桩能够发挥微型桩的轴向刚度,增加群桩的横向刚度并减小微型桩的剪力及弯矩。姜春林等^[30]利用大型通用有限元软件ABAQUS对不同倾斜角度的复合锚固桩承载力进行了数值模拟计算,复合锚固桩本质为一种改进型的微型桩,研究认为倾斜复合锚固桩可以提供良好的水平承载力。随着桩体倾斜角度的增加,其承载力基本呈线性变化,这些观点与Sadek等^[29]所得的结论相一致。关于倾角对微型桩的影响,目前还没有进行过系统的模型试验研究。

从目前的试验研究来看,专门针对微型抗滑桩的试验研究较少,而对微型桩侧向抗力的研究也局限于单桩或成排的微型桩群,对于在工程上已经应用的其他排列组合形式,如矩形、圆形截面的不成排微型抗滑桩群却少有研究。由于研究的侧重点不一样,大部分学者对微型桩(群)侧向抗力的研究是将其视为桩基而进行的,在试验研究中对微型桩采用的受载方式与微型抗滑桩的实际受载方式存在一定的差异。虽然如此,上述试验研究的思路及一些结论还是为微型抗滑桩的深入研究提供了有益的借鉴。

3.2 微型抗滑桩的设计计算研究进展

目前,对于微型抗滑桩的设计计算大多借用普通抗滑桩的计算模式,再结合微型桩的实际工况加以改进,从而应用于实际工程,以下简要介绍独立微型抗滑桩及组合微型抗滑桩群内力变形计算的研究进展。

3.2.1 独立微型桩内力变形计算研究进展

目前,独立微型抗滑桩内力计算方法主要有两类:压力法和数值计算方法。

压力法主要根据试验资料、工程经验设定无桩时的土体自由侧向荷载的大小和分布,然后将侧向荷载施加于桩上,从而计算桩身内力和位移,如地基系数法,将抗滑桩自由段所承受的滑坡推力作为已知的设计荷载,然后根据滑动面上、下地层的地基系数,把整根桩当作弹性地基梁来计算,在用地基系数法迭代计算时可借助 p - y 曲线来判断所取的地基系数的合理性^[31]。高永涛等^[11]、沈龙运等^[32]均采用了压力法对微型抗滑桩的内力进行了分析计

算。在国外,常用非线性弹塑性地基反力法(p - y 曲线法)进行桩体的内力计算,如Brown等^[28]、Richards等^[20]、Andrew^[27]的文献中均提到 p - y 曲线法的应用。

数值计算方法主要包括有限差分法、有限单元法等。高永涛等^[11]、姜春林等^[30]对微型抗滑桩治理坡体进行了有限差分的计算。Bruce等^[4]在加拿大安大略省南部的铁路路堤的修复工程中使用FLAC软件采用拉格朗日有限差分法对微型桩挡墙及堤坡进行稳定性分析,优化微型桩的深度及间距,确保了修复工程的安全。沈龙运等^[32]利用大型通用有限元软件ANSYS对独立微型桩的内力进行了计算,但其基本原理仍是采用了地基系数法。

压力法简单,并且能快捷地估算出桩的最大弯矩和桩身位移,所以工程设计一般以该法为主,但是该法最大的缺点是作用于桩上的滑坡推力大小和分布难以准确估计,而且在计算过程中,滑坡推力的大小和分布不能随着结构和岩土体的变形而作出相应的调整,所以计算结果偏差较大,一般偏于保守。数值分析能够模拟实际的工况,理论上是最严密的解答,也是最有发展潜力的设计计算方法^[34];但是由于实际情况复杂,模型参数选取不当就会对最终的计算结果产生较大的影响。

3.2.2 组合微型抗滑桩群内力计算研究进展

目前,有关组合微型抗滑桩群的内力计算的文献很少见。Cantoni等^[35]提出了一种基于将支挡结构假设为复合体的网状微型桩的设计计算方法。邹越强等^[8]通过土拱原理来设计排微型抗滑桩的间距。丁光文等^[18, 36]假设微型桩结构作为一个整体共同发挥作用,把整体结构作为一个柔性挡墙来考虑。陈喜昌等^[37]指出可采用等效截面方法进行组合桩的承载力计算及结构设计。Macklin等^[3]在设计微型桩锚锭挡墙时将其简化为重力式挡墙。冯君等^[38]提出了平面微型桩体系的桩-岩土体-桩的相互作用计算分析模型,最后通过有限元方法建立了计算微型桩体系内力和变形的力学模型。孙厚超^[39]运用有限元数值分析软件ANSYS对微型组合桩结构的抗滑机制进行了研究,分析了桩-土作用的一般规律及影响因素,最后提出了按等效截面设计微型组合桩的方法。

在组合微型抗滑桩群的计算中,Cantoni等^[35]、丁光文等^[18, 36]、陈喜昌等^[37]、Macklin等^[3]都将桩与桩间土视为复合整体,再把复合整体简化为已熟知的挡土结构进行计算。邹越强等^[8]按普通抗滑桩的设计方法确定微型抗滑桩的间距,同时指出,除非

第 1 排桩被破坏或变形过大,第 2 排桩才会承受一定的下滑推力。冯君等^[38]则是把微型桩体系与桩间土视为复合结构,滑面以上的桩间土作用视为压弹性连接,通过结构力学的相关知识进行计算。孙厚超^[39]在建立模型时仅考虑了三根微型桩组成的组合桩单元。经分析可知,以上的计算模式一般均是针对成排的微型抗滑桩群,对未形成桩排的不同截面组合形式下的微型抗滑桩群的研究较少;目前的计算中一般将组合微型抗滑桩群进行截面等效后,再将其视为常规抗滑结构进行内力计算分析,但究竟如何对组合微型抗滑桩群进行截面等效又是一个有待于深入探讨的问题;这些问题的解决均需要对微型抗滑桩的抗滑作用机制及其破坏模式进行系统的研究。

4 存在的问题及建议

微型抗滑桩作为一种新型支挡结构,在边坡治理、滑坡修复及深基坑支护工程中都已经得到广泛的应用,其应用发展中存在的一些问题迫切需要广大科研工作者的深入研究和探讨,主要包括以下方面。

(1) 微型抗滑桩的试验研究不全面,需开展专门针对微型抗滑桩的模型试验研究,系统全面地分析了影响微型抗滑桩工作性状的因素。

(2) 微型抗滑桩的工作性状,如组合结构的整体力学性能、荷载传递效应及破坏模式需深入研究,特别是在不同组合形式下的工作性状需进一步研究并加以对比,寻找特定工况下的最佳组合形式。

(3) 微型抗滑桩的数值模拟试验还需优化模型参数的选取,充分考虑桩-土的相互作用,使计算结果更加符合工程实际。

(4) 微型抗滑桩的工程设计目前通常仍采用普通抗滑结构的计算方法,迫切需要建立适合微型抗滑桩的计算模式,特别是对于具有不同截面组合形式的微型抗滑桩群,需要提出明确合理的计算方法。

微型抗滑桩的工作原理、受力模式、设计计算理论的探讨还很不完善,需要进一步的研究,只有充分了解微型抗滑桩的作用机制,才能在保证安全的前提下,在工程实践中设计更加经济合理的微型抗滑桩结构,最大限度地发挥其效能,更好地服务于生产。

参考文献

- [1] BRUCE D A, DIMILLO A F, JURAN I. Introduction to Micropiles: An International Perspective[C]//Foundation Upgrading and Repair for Infrastructure Improvement, New York: Geotechnical Special Publication, ASCE, 1995.
- [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.
- [3] MACKLIN PAUL R, BERGER DONALD, ZIETLOW WILLIAM, et al. Case history: Micropile use for temporary excavation support[C]//Proceedings of Sessions of the Geosupport Conference: Innovation and Cooperation in Geo. Reston: Geotechnical Special Publication, ASCE, 2004.
- [4] JIM BRUCE, MARIO RUEL, NADIR ANSARI. Design and construction of a micropile wall to stabilize a railway embankment[C]//Deep Foundations Institute Annual Conference on Deep Foundations: Emerging Technologies. Vancouver: [s. n.], 2004.
- [5] SCHWARZ HELMUT, DIETZ KLAUS, KOSTER HORST, et al. Special use of micropiles and permanent anchors[C]//Proceedings of Sessions of the Geosupport Conference: Innovation and Cooperation in Geo. Reston: Geotechnical Special Publication, ASCE, 2004.
- [6] KEVIN W CARGILL, STEPHEN L DIMINO, NILESH SURTI, et al. Tied-back micropile walls in landslide repair[C]// Deep Foundations Institute Annual Conference on Deep Foundations, Washington DC: [s. n.], 2006.
- [7] DINO KARTOFILIS, BRIAN O'GARA, FRED TARQUINIO, et al. Titus power plant micropile retaining wall[J]. **Foundation Drilling**, 2006, 32: 10—13.
- [8] 邹越强, 李彬. 树根桩防治滑坡的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1994, 17(1): 120—124.
- [9] 谢晓华, 刘吉福, 庞奇思. 微型桩在某滑坡处治工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2001, 3(2): 110—111.
- [10] 何小宏, 罗志强. 公路边坡抗滑桩的设计与施工研究[J]. 广东工业大学学报, 2003, 20(3): 81—87.
- [11] 高永涛, 张友葩, 吴顺川. 土质边坡抗滑桩机理分析[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(2): 117—123.
- [12] 唐传政, 舒武堂. 微型钢管群桩在基坑工程事故处理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 2(增刊): 5 459—5 462.
- [13] 朱宝龙, 胡厚田, 张玉芳, 等. 钢管压力注浆型抗滑挡墙在京珠高速公路K108滑坡治理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 399—406.
- [14] 黄晓华. 公路边坡病害治理的轻型支挡结构[J]. 重庆

- 交通学院学报, 1990, 18(3): 90—94.
- [15] 刘卫民, 赵冬, 蔡庆娥, 等. 微型桩挡墙在滑坡治理工程中的应用[J]. 岩土工程界, 2007, 10(2): 54—56.
- [16] 郝卫国. 树根桩配合土钉墙在边坡加固中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2003, 23(6): 252—253.
- [17] 葛燕锋, 王志伟. 微型钢管桩复合土钉支护工作性能现场测试研究[J]. 建筑科学, 2008, 18(1): 57—60.
- [18] 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.
- [19] DR MOHAMMED AWAD. Lateral load tests on mini-piles[J]. **Islamic Univerisy Journal**, 1999, 7(1): 15—33.
- [20] RICHARDS J R, THOMAS D, ROTHBAUER MARK J. Lateral loads on pin piles (micropiles)[C]//Proceedings of Sessions of the Geosupport Conference: Innovation and Cooperation in Geo. Reston: Geotechnical Special Publication, ASCE, 2004.
- [21] KAZUO KONAGAIA, YUANBIAO YINA, YOSHITAKA MURONOB. Single beam analogy for describing soil-pile group interaction[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2003, 23(3): 213—221.
- [22] 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.
- [23] ROLLINS KYLE M, JOHNSON STEVEN R, PETERSEN KRIS T, et al. Static and dynamic lateral load behavior of pile groups based on full-scale testing[C]//Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Honolulu: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003.
- [24] ROLLINS KYLE M, OLSEN RYAN J, EGBERT JEFFREY J, et al. Pile spacing effects on lateral pile group behavior: Load tests[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(10): 1 262—1 271.
- [25] THOMPSON M J. Experimental load transfer of piles subject to lateral soil movement[C]//2004 Transportation Scholars Conference. Iowa: Iowa State University, 2004.
- [26] THOMPSON M J, WHITE D J. Design of slope reinforcement with small-diameter piles[C]// Proceedings of the Geo Shanghai Conference. Reston: Geotechnical Special Publication, ASCE, 2006.
- [27] ANDREW Z BOECKMANN. Load transfer in micropiles for slope stabilization from test of large-scale physical models[D]. Columbia: University of Missouri-Columbia, 2006.
- [28] BROWN DAN A, SHIE CHINE-FENG. Numerical experiments into group effects on the response of piles to lateral loading[J]. **Computers and Geotechnics**, 1990, 10(3): 211—230.
- [29] SADEK M, SHAHROUR I, MROUEH H. Influence of micropile inclination on the performance of a micropile network[J]. **Ground Improvement**, 2006, 10(4): 165—172.
- [30] 姜春林, 高永涛. 倾角对复合锚固桩水平承载力影响浅析[J]. 交通科技, 2007, (6): 37—40.
- [31] 杨汉臣. 微型钢管桩在边坡治理中的应用及其机理分析[硕士学位论文D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [32] 沈龙运, 余云燕. 独立微型桩加固边坡的内力计算[J]. 兰州交通大学学报, 2007, 26(4): 81—83.
- [33] 姜春林, 吴顺川, 吴承霞, 等. 复活古滑坡治理及微型抗滑桩承载机理[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(10): 975—979.
- [34] 李荣峰. 抗滑桩设计计算方法研究[硕士学位论文 D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [35] CANTONI R, COLLOTTA T, GHIONNA V N, et al. A design method for reticulated micropiles structure in sliding slopes[J]. **Ground Engineering**, 1989, 22(1): 41—47.
- [36] 丁光文. 微型桩处理滑坡的设计方法[J]. 西部探矿工程, 2001, 13(4): 15—17.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 孙厚超. 微型组合桩结构抗滑机理分析及设计方法[硕士学位论文 D]. 成都: 成都理工大学, 2007.