

文章编号: 1674—8247(2018)04—0025—05

# 小直径水泥土桩在软土既有铁路顶桥中的应用研究

张 军

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

**摘 要:**为解决软土地区既有铁路顶桥过程中的掌子面坍塌问题,研究采用小直径水泥土桩的形式对掌子面进行加固,从设计方法、施工工艺和现场试验的角度开展研究。研究结论:(1)提出了小直径水泥土桩应用于软土地区顶桥过程中掌子面加固的设计方法;(2)上排小直径水泥土桩以承受剪力为主,下排小直径水泥土桩以承受拉力为主。因此,小直径水泥土桩桩身宜较为粗糙,以便增强与周围土体的整体性;(3)研制了适用于软土地区的小直径水泥土桩施工机具。试验结果表明,施工过程中对地面的最大扰动值为 3.6 mm;成桩强度与水泥的掺量有关,单轴抗压强度为 4.08 ~ 10.24 MPa,劈裂抗拉强度为 1.64 ~ 2.40 MPa,黏聚力为 8.6 ~ 10.9 MPa,内摩擦角为 19 ~ 24°;(4)现场开展了压载试验,试验结果表明,采用小直径水泥土桩提高了掌子面的稳定性,与理论分析较为吻合。

**关键词:**小直径水泥土桩;软土;既有铁路;顶桥;掌子面;加固

中图分类号:U442.5 文献标志码:A

## The Applied Research of Micro-pile in the Existing Railway Jacking Frame in Soft Soil Area

ZHANG Jun

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China)

**Abstract:** To solve the tunnel face collapse problem during the existing railway jacking bridge in soft soil area, micro-pile is adopted in the study to reinforce the tunnel face. Researches are conducted from aspects of design method, construction process and field test. Researches conclusions: (1) the design method for the reinforcement of tunnel face with micro-pile during jacking bridge process in soft soil area is put forward. (2) The upper micro-piles mainly bear shearing force, while the lower micro-piles mainly bear tensile force, so the body of the micro-pile should be relatively rough to improve the integrity with surrounding soil. (3) The small diameter cement pile construction equipment is developed for soft soil area. The test results show that the maximum disturbed value against the ground is 3.6 mm; the pile forming strength is related to cement content, the uniaxial compressive strength is 4.08 ~ 10.24 MPa, splitting tensile strength is 1.64 ~ 2.40 MPa, cohesion intercept is 8.6 ~ 10.9 MPa, internal friction angle is 19 ~ 24°. (4) Field loading test is conducted and the test results show that the stability of the tunnel surface is improved by using micro-pile, which is consistent with the theoretical analysis.

**Key words:** micro-pile; soft soil; existing railway; jacking frame; tunnel face; reinforcement

收稿日期: 2018-02-27

作者简介: 张军(1973-),男,高级工程师。

基金项目: 北京铁路局科技研究开发计划课题(2015AG05)

引文格式: 张军. 小直径水泥土桩在软土地区既有铁路顶桥中的应用研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(4): 25-29.

ZHANG Jun. The Applied Research of Micro-pile in the Existing Railway Jacking Frame in Soft Soil Area[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(4): 25-29.

随着我国基础设施建设的不断发展,出现越来越多在沿海沿江等软土地区新建道路采用顶桥形式下穿既有铁路的工程。由于沿海沿江地区多分布淤泥、淤泥质土等软土不良地质,孔隙比大,压缩性高,抗剪强度低,且含水量极为丰富,在顶桥过程中,极易发生掌子面溜塌的事故,影响铁路的运营安全。为了避免此类事故发生,从设计方法、施工工艺及现场试验的角度研究小直径水泥土桩在顶桥过程中前掌子面加固中的应用。

小直径水泥土桩一般指桩径为 70 ~ 300 mm 的小直径桩,具有可控性高,均匀性好,且具有提高复合土体强度、抗滑及预支撑等多重效果,目前在边坡加固、基坑防护及隧道施工中得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。但目前尚未见小直径水泥土桩应用在顶桥工程掌子面加固工程。

1 小直径水泥土桩加固设计方法

采用试算法进行小直径水泥土桩的掌子面加固设计,设计流程如图 1 所示。首先初步拟定小直径水泥土桩的强度和桩径,然后确定合理桩间距,根据强度、桩径及桩间距对加固后的边坡稳定性进行分析。不断调整桩基强度和直径直边坡稳定满足要求。由于小直径水泥土桩为加固的临时措施,需要在后续的顶进过程中逐步拆除,为了降低顶进过程中的破桩难度,桩体强度不宜过高,桩径不宜过大。

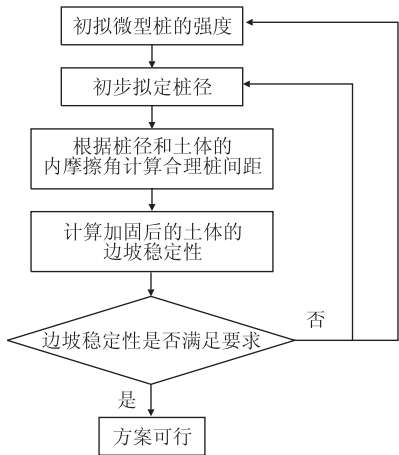


图1 小直径水泥土桩加固边坡设计流程

1.1 合理桩间距的计算

滑动土体中有桩存在时,桩将对边坡的滑动体产生阻力,若桩间距过大,桩间土体存在绕桩滑动的可能,从而使桩失去预期的加固功能。避免产生桩间土体绕流现象的最大桩间距即为合理桩间距。目前针对合理桩间距的分析确定主要有两种思路,一种是基于土拱效应,以桩间静力平衡条件、跨中强度条件以及拱

脚处强度截面条件共同控制来确定桩间距<sup>[6-9]</sup>,适用于大桩径抗滑桩的计算;另一种是基于极限平衡理论,按照桩间绕流控制计算临界桩间距<sup>[10]</sup>,适用于小桩径抗滑桩的计算。从小直径水泥土桩的实际情况出发,采用第二种思路确定小直径水泥土桩的合理桩间距,公式如下:

$$Lc = (1 + \frac{1}{2} \tan \mu e^{\frac{\pi}{2} \tan \varphi}) A + 2(e^{\mu \tan \varphi} \sin \mu) B \quad (1)$$

其中:  $\mu = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ ,  $A$ 、 $B$  为桩的宽度和高度。对于圆桩,可按照  $A = 0.8D$  的方桩进行计算。

由式(1)可知,小直径水泥土桩加固的临界桩间距主要由桩径及土体的摩擦角确定。

1.2 采用小直径水泥土桩加固时的路基土稳定性分析方法

由于小直径水泥土桩与周围土体的强度差别极大,其极限状态下的失稳模式较为复杂,因此传统的基于极限平衡法的边坡分析方法不再适用。本文采用强度折减法进行小直径水泥土桩加固掌子面的稳定性分析。强度折减法是进行边坡稳定性有限元分析的常用方法,直接通过有限元分析获得一个安全系数,不仅保持了有限元在模拟复杂问题上的优点,而且概念明确,结果直观,在工程中得到越来越多的应用。

在外载荷保持不变的情况下,边坡内土体所能提供的最大抗剪强度与外载荷在边坡内所产生的实际剪应力之比称为抗剪强度折减系数,又称强度储备系数,与极限平衡法中所给出的稳定安全系数在概念上是一致的。在有限元分析中,可以通过假定不同的强度折减系数  $F_r$ ,根据折减后的强度参数进行有限元分析,观察计算是否收敛,在整个计算过程中不断地增加  $F_r$ ,当达到临界破坏时的强度折减系数  $F_r$  就是边坡稳定安全系数  $F_r$ 。折减后的土体强度可以分别表达式为

$$c_m = c/F_r \quad (2)$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan \varphi / F_r) \quad (3)$$

2 小直径水泥土桩施工工艺

2.1 小直径水泥土桩的成桩机理

由于既有线顶桥施工工期紧,施工场地狭小,且要求在小直径水泥土桩施工过程中不能对周围土体造成扰动,对小直径水泥土桩施工机具的灵活性、可控性、精密性要求较高,传统的旋喷施工工艺不能满足要求。本文对传统的成桩工艺进行了改进,发明了小直径水泥土桩新型成孔工艺。

小直径水泥土桩新型成孔工艺是采用水平定向钻

机先打设精度高于 0.5% 的预导孔,预导孔打设到设计长度后旋转回撤钻杆,在回撤钻杆的同时,用不大于 5 MPa 的压力,将配制好的水泥浆液通过钻杆前端喷嘴喷射到土体中。喷射流的冲击力切削土体的同时,钻杆前端的搅拌翼二次强制土体颗粒与水泥浆液搅拌混合,在胶结硬化后,形成水平圆柱状水泥土固结体,即形成小直径水泥土桩,同时在喷射过程中能有效地将土体进行置换,解决加固区域地面隆起、冒浆等影响周边环境及施工质量的问题。

小直径水泥土桩不仅具有梁效应和土体改良效应,在水平开挖中能够起到防坍塌、抗滑移,保证水平掘进安全的作用,同时小直径水泥土桩在喷射过程中,水泥浆液能沿着地层的缝隙渗透扩散,尤其在松软的地层中,水泥浆液扩散填充缝隙后,可使整个掌子面的稳定有显著提高,在特殊要求下可在水泥浆液中加入适当的微膨胀剂。

2.2 样机研制

针对小直径水泥土桩研制的样机施工如图 2 所示,该设备施工时桩位中心离地面及基坑工作井侧壁仅需 500 mm;可在离地面 500 ~ 3 000 mm 加固,当超过 3 000 mm 时需搭设工作平台作业。可根据设计要求的浆液配合比全自动制浆,避免浆液的不均匀性;可根据小直径旋喷桩所需的浆液用量、喷浆压力调节喷浆速度,根据显示的压力表、流量计显示的数据控制喷浆量及喷浆压力,确保小直径旋喷桩的土体与浆液掺量比的均匀性。



图2 采用小直径水泥土桩施工

2.3 现场成桩效果及对周围土体的影响

在某地区进行小直径水泥土桩的试验,试验桩长 30 m,直径要求 300 mm,桩身埋深约 1.2 m。桩身位于杂填土与浜填土及褐黄色粉质黏土之间,地表有 0.8 ~ 1 m 的杂填土,本次试验基坑开挖约 4 m,基坑为 8 m × 8 m,旋喷桩设置南北方向各 7 根。其中南 4 号桩水泥总用量为 2.5 t,水泥掺量为 70%;南 6 号桩水

泥总用量为 3 t,水泥掺量为 84%;北 7 号桩水泥总用量为 1.5 t,水泥掺量为 42%。

试验过程中对北 7 号、2 号桩,南 4 号、6 号桩,在北 7 号桩施工区域布设 5 个监测点;北 2 号、南 6 号、南 4 号桩施工区域各布设 6 个地表竖向位移监测点,测点布置如图 3 所示。在钻孔前观察原始数据、钻孔后监测、喷浆后监测及水泥土(12 h)终凝后监测;限于篇幅,本文以南 6 号桩为例,介绍小直径水泥土桩施工过程中对既有地面沉降的影响,如表 1 所示。

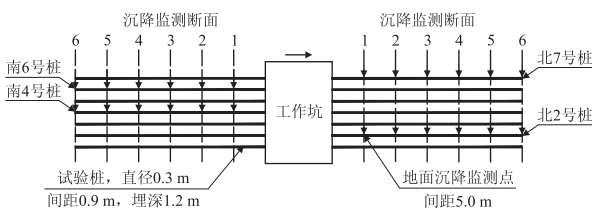


图3 监测点布置图

表 1 南 6 号桩施工期间地表竖向位移数值汇总 (mm)

工况	1 号点	2 号点	3 号点	4 号点	5 号点	6 号点
开钻前	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
钻孔后	0.2	1.2	2.9	1.4	1.9	1.1
喷浆后	2.1	2.3	3.6	3.5	2.2	2.0
12 h 终凝后	1.3	-1.4	2.7	2.7	1.5	1.2

由表 1 可知,小直径水泥土桩施工过程中对地面的扰动较小,最大扰动为 3.6 mm。

对成桩后的强度进行了取芯检测,检测结果如表 2 所示。

表 2 小直径水泥土桩的成桩强度

桩号	桩的水泥掺量	单轴抗压强度 /MPa	劈裂抗拉强度 /MPa	抗剪强度	
				粘聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
南 4	70%	10.24	2.40	8.6	24
南 6	84%	11.95	2.73	6.3	29
北 7	42%	4.08	1.64	10.9	19

由表 2 可知,小直径水泥土桩的成桩强度与水泥的掺量有关,单轴抗压强度为 4.08 ~ 10.24 MPa,劈裂抗拉强度为 1.64 ~ 2.40 MPa,黏聚力为 8.6 ~ 10.9 MPa,内摩擦角为 19° ~ 24°。

3 边坡加载试验

3.1 试验设计

为了综合验证小直径水泥土桩设计方法及工艺,进行了现场的大型压载试验。试验边坡高度为 4.5 m,坡比 1:0.75,坡脚距离最下排桩距离 1.5 m。压载试验立面布置图,如图 4 所示。

通过在坡顶设置压重来模拟顶桥过程中由线路加

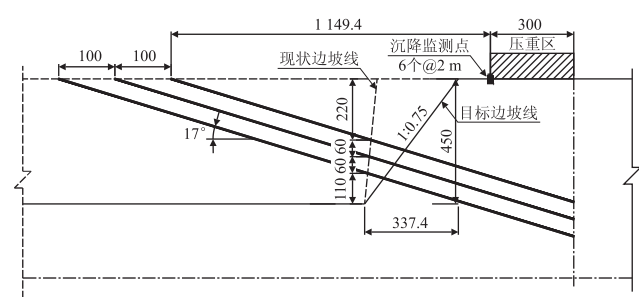


图4 压载试验立面布置图( cm)

固体系统传至坡顶的荷载,压载试验采用五级加载,每级12 kPa,分别为12 kPa、24 kPa、36 kPa、48 kPa、60 kPa,每级加载持荷2 h,在坡顶设置6个沉降观测点,观测点间距为2 m,每0.5 h进行1次沉降观测,如图5所示。

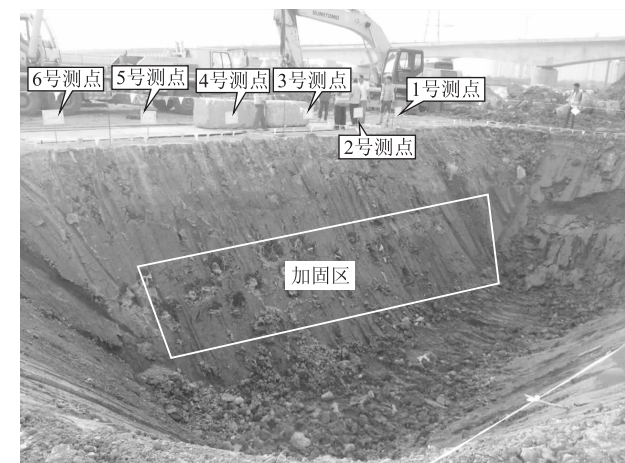


图5 荷载加载形式及监测点位置

3.2 理论分析

采用1.2节所介绍的方法对压载后的边坡稳定性进行分析,边坡的极限失稳形态如图6所示。不同压载下的边坡稳定系数如表3所示。

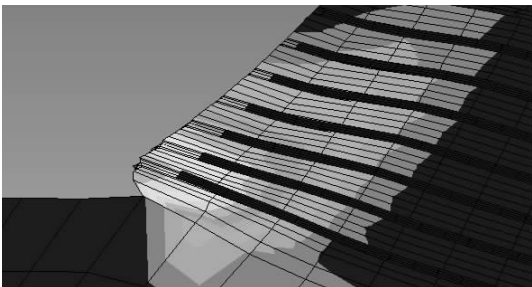


图6 边坡失稳形态

由图6可知,坡脚处的土体与桩之间存在相对滑移的情况。因此,桩周宜较为粗糙,以增加小直径水泥土桩与土体之间的整体性。小直径水泥土桩表现为上

排桩以受剪为主,下排桩以承受拉拔力为主。

表3 不同坡顶荷载下的边坡稳定系数

荷载/kPa	加固前安全系数	加固后安全系数
12	1.01	1.39
24	0.87	1.25
36	0.74	1.11
48	0.61	1.01
60	0.52	0.91

由表3可知,采用小直径水泥土桩加固后,其边坡安全系数得到提高。当坡顶荷载为48 kPa时,其加固后的安全系数为1.01,因此可以判断其坡顶理论极限荷载为48 kPa。

3.3 试验结果

加载过程中的监测点沉降断面曲线及时程曲线如图7、图8所示。

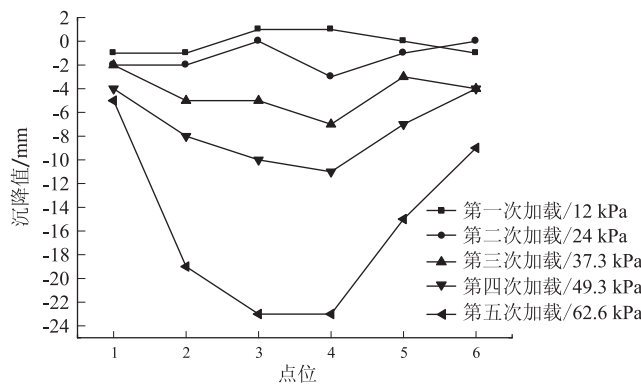


图7 边坡顶部加载沉降断面曲线

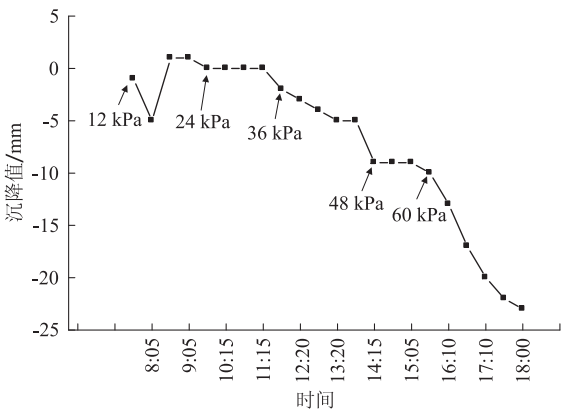


图8 监测点3 沉降时程曲线

由图7、图8可知,随着边坡坡顶荷载的逐步增加,坡顶位移逐渐增大。当坡顶荷载加载至60 kPa时,坡顶位移开始发散,可以判断此时的坡顶荷载为边坡极限荷载。与理论计算值较为吻合,略高于理论计算值。



## 4 结论

针对软土地区既有线顶桥工程中掌子面易溜塌,加固困难的问题,研究了小直径水泥土桩在掌子面加固中的应用。从设计方法、施工工艺和试验角度开展研究,得出结论如下:

(1)提出了小直径水泥土桩应用于软土地区顶桥过程中掌子面加固的设计方法。

(2)上排小直径水泥土桩以承受剪力为主,下排小直径水泥土桩以承受拉力为主。因此,小直径水泥土桩桩身宜较为粗糙,以便增强与周围土体的整体性。

(3)研制了适用于软土地区的小直径水泥土桩施工机具,试验结果表明,施工过程中对地面的最大扰动值为 3.6 mm;成桩强度与水泥的掺量有关,单轴抗压强度为 4.08 ~ 10.24 MPa,劈裂抗拉强度为 1.64 ~ 2.40 MPa,黏聚力为 8.6 ~ 10.9 MPa,内摩擦角为  $19^{\circ} \sim 24^{\circ}$ 。

(4)现场开展了压载试验,试验结果表明,采用小直径水泥土桩提高了掌子面的稳定性,与理论分析较为吻合。试验极限荷载略高于理论极限荷载。

## 参考文献:

- [1] 肖广志,游旭. 高压水平旋喷桩超前支护技术在铁路隧道工程中的应用[J]. 现代隧道技术,2014,51(2):108-114.  
XIAO Guangzhi, YOU Xu. Application of High-Pressure Horizontal Jet Grouting Pile Advanced Support Technology in Railway Tunnel Engineering[J]. Modern Tunneling Technology, 2014, 51(2): 108-114.
- [2] 张建华,梁杰忠. 水平旋喷桩工艺在广州地铁2号线工程施工中的应用[J]. 水运工程,2002,30(8):72-75.  
ZHANG Jianhua, LIANG Jiezhong. Application of Horizontal Jet Grouting Technology in Guangzhou Line 2 Subway Engineering Construction[J]. Port & Waterway Engineering, 2002, 30(8): 72-75.
- [3] 郭伟. 水平旋喷桩施工工艺在深圳地铁施工中的应用[J]. 现代隧道技术,2012,43(2):114-118.  
GUO Wei. Application of Horizontal Rotary Jet Pile in Shenzhen

Metro Construction[J]. Modern Tunneling Technology, 2012, 43(2): 114-118.

- [4] 王圣涛,邓敦毅. 水平旋喷桩在地铁暗挖隧道流塑状粘性土中的应用[J]. 现代隧道技术,2003,40(5):26-29.  
WANG Shengtao, DENG Dunyi. The Application of Horizontal Rotary Injection Pile in Underground Tunnel Flow Plastic Clay Soil[J]. Modern Tunneling Technology, 2003, 40(5): 26-29.
- [5] 黄俊文,仇玉良,史宝童,等. 水平旋喷桩超前预支护在风积沙隧道中的应用[J]. 公路,2011,56(9):246-250.  
HUANG Junwen, QIU Yuliang, SHI Baotong, et al. Application of Horizontal Rotary Jet Pre-support in Aeolian Sand Tunnel[J]. Highway, 2011, 56(9): 246-250.
- [6] 郑磊,殷坤龙,简文星,等. 抗滑桩设计中关于确定桩间距问题的分析[J]. 水文地质工程地质,2005,20(6):71-74.  
ZHENG Lei, YIN Kunlong, JIAN Wenxing, et al. Analysis on Spacing between Piles in the Design of Anti Slide Pile[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 20(6): 71-74.
- [7] 肖淑君,陈昌富. 基于统一强度理论抗滑桩桩间距的计算[J]. 工程地质学报,2011,20(2):199-204.  
XIAO Shujun, CHEN Changfu. Calculation of Pile Spacing of Anti Slide Pile based on Unified Strength Theory[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 20(2): 199-204.
- [8] 周德培,肖世国,夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报,2004,26(1):132-135.  
ZHOU Depei, XIAO Shiguo, XIA Xiong. Discussion on Rational Spacing between Adjacent Anti-slide Piles in Some Cutting Slope Projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 132-135.
- [9] 蒋良滩,黄润秋,蒋忠信. 黏性土桩间土拱效应计算与桩间距分析[J]. 岩土力学,2006,27(3):445-449.  
JIANG Liangwei, HUANG Runqiu, JIANG Zhongxin. Analysis of Soil Arching Effect between Adjacent Piles and Their Spacing in Cohesive Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 445-449.
- [10] 沈珠江. 桩的抗滑阻力和抗滑桩的极限设计[J]. 岩土工程学报,1992,14(1):51-56.  
SHEN Zhujiang. Anti Slide Resistance of Pile and Ultimate Design of Anti Slide Pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(1): 51-56.

(编辑:赵立红 白雪)