

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2022.04.038

软土区低施工净空条件下明挖隧道设计探讨

王佳辰

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:中山市古镇快线(沙古公路)快速化改造工程在裕祥路节点设置一座明挖下沉隧道,隧址位于深厚软土区,隧道平面投影上方有500 kV高压线走廊小角度斜交隧道路线轴线,竖向施工空间受限。以该项目为例,针对常见的软土地层基坑墙底隆起验算难以通过的问题进行研究,并借鉴他人研究成果,给出一种解决方案。同时以该项目为例,提出可采用接杆搅拌桩实现净空受限条件下隧道基坑坑底加固。该工艺既能满足搅拌桩深层加固需求,其价格也比常规低净空下普遍采用的高压旋喷桩加固工艺低廉。目前,基于上述解决方案的施工图设计文件已取得批复,将为软土地区低施工净空条件下明挖隧道设计提供有益参考。

关键词:抗隆起稳定性;接杆搅拌桩;明挖隧道;岩土工程

中图分类号:U452.2

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2022)04-0138-03

0 引言

随着城市立体交通的快速发展,城市路口下穿通道建设项目越来越多。

中山市位于珠江三角洲冲积平原,软弱土深厚。在该区域项目建设过程中,要充分研究软弱土不良地质条件下,基坑开挖过程中的稳定性计算。针对基坑墙底隆起稳定性计算,现行《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)采用的计算方法是Prandtl法。而对于珠三角、长三角等软土深厚地区,在常规围护桩嵌固深度的条件下,采用此方法计算的安全系数经常不满足规范规定的坑底抗隆起稳定性要求,进一步加长围护桩的嵌固深度将难以满足工程经济性要求。对此,童磊等^[1]提出公式应计入墙底以上土体抗剪强度有利作用作为抗力。刘银芳^[2]认为,软土基坑被动区土加固的措施可以提高坑底抗隆起稳定性。本文基于前人研究,以中山沙古公路裕祥路节点隧道明挖基坑为例,对规范采用的Prandtl计算方法进行修正,且修正后的计算方法在项目设计过程中取得了良好效果。

中山沙古公路裕祥路节点隧道明挖基坑设计过程中,除了遇到软土基坑坑底抗隆起稳定性计算的问题,还遇到了受500 kV高压线控制,低净空条件下基坑坑底加固搅拌桩实施困难的问题。通常在诸如桥梁投影面下、高压线下需进行地基加固或基坑

坑底加固施工时,受竖向施工空间限制,常规价格低廉的搅拌桩因施工机械高度大而无法实施时,常见的解决办法为采用施工机械高度低的高压旋喷桩施工,但因高压旋喷桩延米造价远高于搅拌桩,必然会造成工程投资费用陡增。近年来,一种新的接杆搅拌桩工艺逐渐得到推广。其钻杆可由多节组成,在施工过程中,可先打入首节钻杆,接长组装第二节钻杆后再打入第二节钻杆,以此类推。这种施工工艺可大大减少搅拌桩施工需要的竖向高度,且成桩质量与常规搅拌桩差别不大,且比高压旋喷桩具有明显的价格优势。

1 工程概况

为实现中山市古镇快线(沙古公路)主线直行交通在裕祥路节点的快速通过,在项目裕祥路节点设置一座下沉式隧道。隧道长340 m,其中封闭段90 m,北敞开段106 m,南敞开段144 m。隧道采用矩形一箱两孔断面,开挖基坑明挖顺筑施工。隧道场地分布地层为2.5~6.4 m厚填筑土(Q_4^m),平均厚度16.6 m的淤泥质土(Q_4^e)及7 m的淤泥质粉质黏土(Q_4^{ec}),0.7~4.3 m厚粉质黏土(Q_4^s),平均厚度7.5 m的砂类土(Q_4^d)、平均厚度3.7 m的全、强风化泥质粉砂岩(J2-3bz),其下为中风化泥质粉砂岩(J2-3bz)。

隧道基坑开挖深度9.16 m,基坑采用钻孔灌注桩+内支撑体系支护,受软土基坑稳定性控制,需实施坑底加固。基坑安全等级按二级考虑,坑底隆起稳定性安全系数取1.4。

隧道基坑坑顶场平标高上方20.5 m有一条500 kV高压线走廊小角度斜交隧道轴线。根据《电力设施保

收稿日期:2021-06-18

作者简介:王佳辰(1996—),男,本科,助理工程师,从事隧道及岩土工程设计工作。

护条例》及其实施细则,高压线下、最外侧导线外8.5 m 范围内,施工机械高度不得侵入竖向 8.5m 范围内的悬线保护范围。基坑与高压线相对位置关系见图 1。

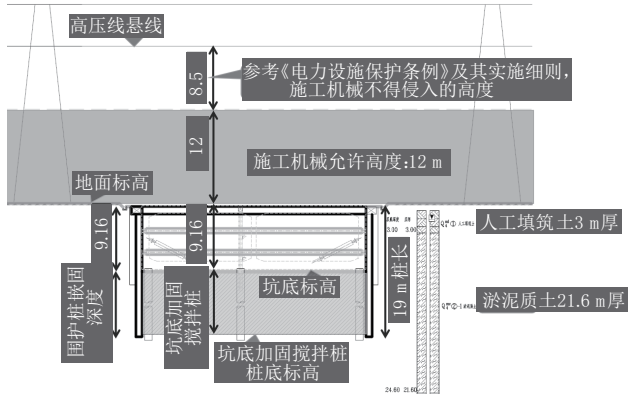


图 1 本项目隧道基坑横断面图(单位:m)

2 软土区基坑坑底隆起稳定性计算

2.1 修正前公式计算结果

引言中已提出:软土深厚地区,在常规围护桩嵌固深度的条件下,采用现行《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)Prandtl 法计算坑底隆起,所得安全系数常常不能满足规范第 4.2.4 条的要求。以本项目隧道主体(不含泵房段)最深基坑剖面计算为例,岩土参数取值见表 1,抗隆起稳定性计算简图见图 2,计算如下:

表 1 岩土层物理力学参数取值

编号	土层	厚度 /m	压缩模量 /MPa	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	C/kPa	$\phi(^{\circ})$
1	填筑土	4.4	4.7	18.6	21.4	20.1
2	淤泥质黏性土	17.4	2.3	17.0	5.6	5.3
3	淤泥质粉质黏土	7.2	2.3	17.7	9.7	13.7
4	粗砂	3.1	4.0	19.5	—	40.0
5	全风化泥质粉砂岩	20.0	5.0	20.3	14.6	12.7

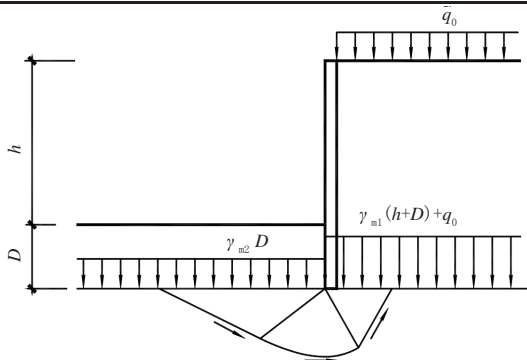


图 2 坑底隆起稳定性计算简图

$$K_{he} = \frac{\gamma_{m2}DN_q + cN_c}{\gamma_{m1}(h+D) + q_0}$$

$$N_q = \tan^2(45^{\circ} + \frac{\phi}{2}) e^{\pi \tan \phi}$$

$$N_c = (N_q - 1) / \tan \phi$$

式中: K_{he} 为隆起安全系数; γ_{m1} 为基坑外桩底以上土的重度, kN/m^3 ; γ_{m2} 为基坑内桩底以上土的重度, kN/m^3 ; D 支护桩嵌固深度,m; h 为基坑深度,m; q_0 坑顶 20 kPa 均布荷载; N_c 、 N_q 为承载力系数; c 为支护桩底以下土的黏聚力,kPa; ϕ 为支护桩底以下土的内摩擦角, $^{\circ}$ 。

代入本项目参数,得 $K_{he}=0.87 < 1.4$, 不满足《建筑基坑支护技术规程》第 4.2.4 条的要求。

2.2 公式修正及修正后计算结果

在本工程案例中,基坑开挖深度 9.16 m,支护桩嵌固深度插入比为 0.93 : 1。根据软土地区基坑设计施工经验,当前方案是能够满足基坑稳定性要求的,故分析公式计算不能通过的原因并对其进行修正。

分析修正前,公式计算不通过原因主要是:坑底隆起破坏面必须穿过桩底至坑底的土层才会发生坑底隆起破坏,但规范采用的安全系数公式抗力值(即 K_{he} 计算公式分子项)未考虑桩底至坑底间土体的剪切强度贡献,导致计算结果过于保守。

因此,应对计算公式进行适当修正:假设被动区桩底以上土体受到隆起土体传来的荷载,沿着 90° 竖直面破坏,如图 3 所示,称作直剪破坏模式。按此模型考虑桩底至坑底间土体剪切强度的贡献,即其直剪强度黏聚力 $c_{底}$,若设计考虑坑底地基加固,则 $c_{底}$ 应采用加固后复合地基和坑底未加固土关于厚度加权平均值的黏聚力。

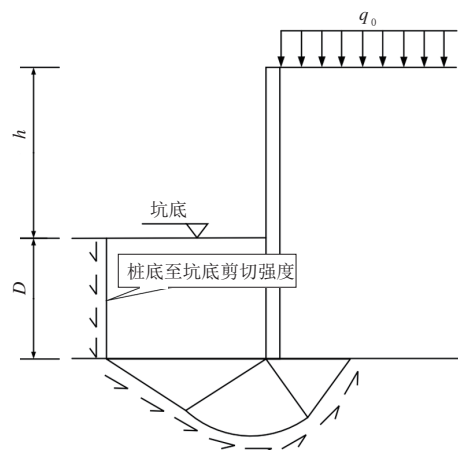


图 3 被动区桩底以上土体破坏面示意

修正后计算公式如下:

$$K_{he} = \frac{\gamma_{m2}DN_q + cN_c + c_{底}}{\gamma_{m1}(h+D) + q_0}$$

“坑底加固土”及“加固土底部至桩底土”关于厚度的加权平均值 $c_{底}$ 取 191 kPa(加固土复合地基黏聚力按经验取坑底加固土 28 d 侧限抗压强度 1.2 MPa

的 1/5,即 240 kPa),代入公式得到 $K_{ne}=1.46 > 1.4$,满足规范要求,计算通过。

2.3 修正计算结果验证

截至撰稿时,本项目基坑工程已完成基坑开挖施工,经现场监控量测数据反馈,基坑位移变形等各项数据均满足规范要求,验证了修正计算的正确性。

3 低净空条件下搅拌桩施工方案

如前所述,本项目有一处 500 kV 高压悬线小角度斜穿隧道基坑上方,无法采用常规深层搅拌桩施工坑底加固。设计及施工过程中,经过大量调研,最终选择接杆搅拌桩工艺实现了坑底加固施工。

3.1 接杆搅拌桩工艺原理

接杆搅拌桩与常规搅拌桩的水泥掺量、水灰比技术参数相同,区别仅在于接杆搅拌桩的钻杆可以分节接长安装,使得其桩机高度大幅降低,通常可以控制在 6 m 以下。其工艺如下^[1]:

(1)接杆搅拌桩就位,开始喷浆,钻入第一节钻杆,并在第一节钻杆深度范围内的地层上下反复喷浆搅拌。

(2)停止喷浆,从第一节钻杆接杆接头处接入第二节钻杆。

(3)开始喷浆,钻入接长后的钻杆,并在已钻深度以下至组合钻杆深度范围内的地层上下反复喷浆搅拌。

(4)按以上步骤依次接长钻杆,喷浆搅拌,直至达到搅拌桩设计桩底高程。

(5)停止喷浆,提升钻杆并分节拆除钻杆,直至钻杆完全提升出地面,从而完成单根搅拌桩施工(根据设计要求,钻杆提升过程中也可继续喷浆搅拌)。

需要注意的是,为了保证搅拌桩成桩质量的均匀性,每次停止喷浆接长钻杆至下一次反复喷浆搅拌的时间间隔必须确保在上一次喷浆水泥初凝时间以内,具体时间根据现场水泥配合比、缓凝剂掺量、外界温度的不同而确定。大面积施工前,务必做好试桩试验。

3.2 接杆搅拌桩技术经济优势

(1)接杆搅拌桩机由于钻杆可分节安装下放,故桩机高度可较常规搅拌桩机大幅压缩,适用于高压线下、桥梁投影下等低净空施工条件下搅拌桩的施作。

(2)接杆搅拌桩较高压旋喷桩、MJS 工法桩等其他低净空施工工艺廉价。以本项目中山沙古公路裕

祥路节点隧道基坑为例,采用 D850 mm 高压旋喷桩坑底加固时,桩延米单价为 362 元/m;采用 D850 mm 接杆搅拌桩时,桩延米单价为 232 元/m。上述单价已通过财政局审核批复。由此可见,接杆搅拌桩具有极好的经济性优势。

(3)接杆搅拌桩的成桩不产生过大的地层压力,故在桥下低净空条件下施工时,相对高压旋喷桩而言,接杆搅拌桩对桥梁承台桩基位移变形的控制效果好。

3.3 应用成果案例

中山市古镇快线(沙古公路)快速化改造工程裕祥路节点隧道已成功适用接杆搅拌桩工艺完成主线隧道基坑坑底加固处理。根据试桩试验及成桩的抽芯检测,其与相同地质条件、相同直径、相同水泥掺量的常规搅拌桩在 28 d 无侧限抗压强度(1.2 MPa)等技术参数无异,取得了良好的运用效果。相关工程造价也已取得财政局批复,具有良好的技术经济优势,为在其他类似工程的运用提供了技术经验与可靠案例。

4 结语

本文根据中山市古镇快线(沙古公路)快速化改造工程项目裕祥路节点隧道的设计施工经验,总结复盘了以下设计关键点及解决方案。

(1)在深厚软土区采用符合设计经验的较强支护措施后,采用现行《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)Prandtl 公式计算仍不满足基坑坑底隆起安全系数时,可修正公式,考虑坑底至桩底土层的剪切强度对抗隆起抗力的贡献。

(2)当在低净空条件下需施作复合地基或基坑坑底加固时,可考虑采用具有良好技术经济优势的接杆搅拌桩工艺。

(3)上述两点问题的解决方案已在中山沙古公路裕祥路节点隧道明挖基坑设计施工中成功应用,取得了技术方案及投资预算批复,为类似工程问题的解决提供了有力参考。

参考文献:

- [1] 童磊,刘兴旺,袁静,等.深厚软弱土基坑墙底抗隆起稳定性验算的探讨[J].岩土工程学报,2013(S2):707-711.
- [2] 刘银芳.软土层基坑隆起稳定性分析与处理措施[J].工程技术研究,2019,4(15):1-3.
- [3] 富志根,时洪斌,毛忠良.接杆搅拌桩在低净空条件下铁路软土地基加固中的应用研究[J].路基工程,2020(2):114-118.