

# 水平高压旋喷注浆技术在城市浅埋隧道预支护中的应用

路德富

(河南省有色工程勘察有限公司,河南 郑州 450052)

**摘要:**阐述了水平高压旋喷注浆技术的原理、施工设计及在浅埋隧道预支护中的应用,并就该技术应用中存在的问题进行了探讨。

**关键词:**水平高压旋喷;浅埋隧道;预支护;应用

**中图分类号:**TU94<sup>+</sup>2 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2008)02-0072-03

**Application of Horizontal High-pressure Jet-grouting Technique for Pre-support in Urban Shallow Tunnels/LU De-fu** (Henan Engineering Investigation Co. Ltd. for Nonferrous Metals, Zhengzhou Henan 450052, China)

**Abstract:** This article describes the construction principle and design of the horizontal high-pressure jet-grouting technology and the application of preliminary support in shallow tunnels. And problems of the technology are being discussed.

**Key words:** horizontal high-pressure jet-grouting; shallow tunnel; pre-support; application

## 1 概述

浅埋暗挖法是在新奥法的基础上,针对城市地下工程的特点而发展起来的。城市地下工程的特点主要是:覆土薄、地质条件差(多数是未固结的土砂、粘性土、粉细砂等)、自稳能力差、承载力小、变形快,在暗挖过程中会出现地表下沉、开裂等变异,有时会出现掌子面不稳定等现象。对于未固结围岩,特别是城市条件下的浅埋隧道,在隧道埋深小时,由于没有形成承载拱,开挖引起的下沉会直接到达地表面,对此必须克服防止隧道变形和地表下沉以及确保大断面掌子面稳定的两大难题。控制好施工过程中引起的地表下沉和对周边环境及结构物的影响,是浅埋暗挖法成败的关键。而控制地表下沉的前提是控制围岩松弛,也就是控制掌子面的稳定性。影响隧道围岩稳定性的因素主要有岩性、岩体结构、地应力、岩土力学性质、地下水及地表水、时间、工程因素等。从隧道围岩变形动态分析看出,沿隧道轴线纵向的下沉和拱顶下沉往往发生在隧道上半部断面的开挖过程,实践证明在隧道拱顶或拱脚处,采用超前支护可以有效控制前期地表下沉,这些措施主要是通过改善地层的物理力学参数( $E$ 、 $c$ 、 $\varphi$ 、 $\mu$ ),提高地层自稳能力。而对于软弱地层的浅埋隧道,超前支护结构更需承受上覆土体的松散压力,因此要求支护的强度和刚度均较高。基于此,应正确选择隧道预支护施工方法。

水平高压旋喷注浆技术是在一般的初期导管注

浆的基础上发展起来的,是在水平钻孔内以高压旋喷的方式压注水泥浆,在隧道开挖外轮廓形成拱形预衬砌,以防护掌子面和地表下沉的超前支护施工方法。在浅理的情况下,地表有结构物存在,或隧道接近地表结构物、地下埋设物开挖时,由于水平旋喷桩具有梁效应和土体改良加强效应,上部压力在水泥桩体的支撑支持下,下沉由水泥桩体拱棚和围岩构成的棚架体系共同支撑,使隧道开挖的影响控制在最小限度内,尽量减少围岩松弛。因此对于散体结构地层来说,采用水平旋喷注浆法是有利的,实践证明,水平旋喷高压注浆技术是目前国内外行之有效而又快速经济的隧道超前支护先进技术。

## 2 水平高压旋喷注浆技术原理及施工设计

水平高压旋喷注浆技术的成功开发和应用,为提高浅埋软弱地层隧道围岩稳定性提供了一种有效的施工方法。该方法已与静态注浆、冻结法和机械预切槽等技术一并列为隧道围岩加固的基本方法。

### 2.1 水平高压旋喷注浆技术施工原理与特点

水平高压旋喷注浆技术是利用水平钻机,水平或略向上仰角成孔,并沿隧道拱部外缘进行高压旋喷注浆作业,形成水平旋喷水泥柱体,使之相互搭接形成拱棚,在它的保护下开挖上部断面。它具有以下特点:(1)在隧道开挖之前,于掌子面前方构筑拱形刚性体,减轻了传到掌子面和支护上的荷载,控制开挖引起的变形;(2)因旋喷土体形成了改良的强

收稿日期:2007-06-13

作者简介:路德富(1968-),男(汉族),河南邓州人,河南省有色工程勘察有限公司总经理、高级工程师,探矿工程专业,从事各类地基与基础工程施工和岩土工程勘察工作,河南省郑州市中原路107号,ludefu7687@163.com。

度高的改良体,支撑了上部荷载,控制了不良地层的坍塌等现象;(3)因采用专门的机械设备施工,可根据需要控制水泥桩体的直径,要求旋喷直径较大时,可采用复喷、定喷、摆喷等工艺相结合,或加大喷射压力,或适当放慢回提速度等,使之满足预定的设计要求;(4)水泥的用量及切削土体的方向可以控制,旋喷桩重叠比较规则,形成的衬砌体较固结注浆形成的衬砌体均匀,且强度也高;(5)因允许有较大的浆液溢流和回灌补浆,可以有效控制地面隆起和旋喷桩断桩或凹陷等现象的出现。

## 2.2 水平旋喷施工设计

根据旋喷作业的施工特点,水平旋喷注浆的技术关键主要有旋喷成拱的设计厚度、旋喷工艺、旋喷桩的成桩质量、地表沉降和隆起控制等几个方面的难题。在设计施工旋喷水平拱棚时,应充分考虑地质、周边环境、隧道开挖断面、埋深以及开挖方法等。

(1)根据防护对象的长度和因开挖而造成掌子面松弛范围的长度,决定旋喷固结体的施工范围,即沿隧道轴向设置到多长范围。同时根据不同地层状况形成的不同桩体直径以及旋喷桩间相交咬合要求,确定旋喷固结体布置间距,特别是要求拱棚强度较高时,应考虑旋喷桩交接处的强度。不同地层旋喷加固有效直径可用标准贯入值  $N$  来考虑,根据经验常采用2个旋喷孔之间距离1.5倍为旋喷桩直径进行旋喷桩孔的布置。

(2)为确保旋喷桩的成桩质量,设计旋喷桩长度不宜太长,在旋喷工艺设计上,如果设计要求桩体长度较大,应在旋喷桩的末端适当增加旋喷时间和旋喷注浆压力。

(3)为防止旋喷桩柱体下倾,给隧道外扩掘进增加工作量,根据地层条件合理确定拱棚仰角,一般设计仰角在 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。

(4)高压旋喷注浆施工工艺参数的选择与设计,是控制旋喷桩体质量的保证。目前用于水平旋喷注浆主要是以单管高压旋喷施工法,它与垂直旋喷注浆法施工工艺大致相同,压力、泵量、提升速度、转动速度、喷嘴类型与直径、土层情况和喷浆材料等,是影响和决定旋喷桩质量的主要施工参数。

(5)相邻旋喷段水泥桩体搭接长度的设计。经现场取样测试水泥土的抗压强度一般在 $12 \sim 20$  MPa,为确保旋喷水平拱棚的承载强度,应尽可能增大相邻拱棚的搭接长度,特别当旋喷桩长度较长时。通常前后拱棚的搭接长度为 $2 \sim 3$  m。

## 3 工程实践

高压水平旋喷注浆技术已成为浅埋较弱地层隧道预衬砌支护技术中一种超前支护的先进技术,正得到越来越广泛的应用。我公司成功地将水平高压旋喷注浆技术应用于北京长安热力复线隧道围岩加固施工中。

### 3.1 工程概况

北京长安热力复线管线工程位于主干道绿化带内,沿途有多处要穿越重要建筑的地段,隧道上方覆土厚度为 $5 \sim 14$  m不等,隧道轴线相距楼房为 $7.0$  m左右。根据所提供的地质资料,隧道穿越地层以粉砂、细砂、中砂、圆砾及卵石层为主,土质松散,自稳能力差,属VI级围岩。为防止因隧道暗挖造成周边土体失稳和地面变形下沉,确保邻近建筑物安全,经过研究论证决定,在局部有重要建筑物和上覆土较薄的地段,隧道采取拱部水平旋喷桩支护+侧墙超前小导管注浆的措施,对隧道上方与靠近建筑物一侧的土体进行加固处理。

根据本工程隧道断面、地层、埋深与开挖情况,设计水平旋喷桩长度为 $15$  m/根,中心距 $300$  mm,每一断面布置 $25$ 根旋喷桩,旋喷桩向外倾斜仰角为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ,相邻旋喷段搭接长度为 $2$  m。

### 3.2 施工工艺与设备

此工程采用了边高压旋喷边钻进成孔的施工工艺,钻进成孔和成孔段正常旋喷注浆作业泵压均为 $20$  MPa左右,并采用水灰比为1的水泥浆作为旋喷注浆材料。整个旋喷施工主要工序为:旋喷钻进一个给进行程回次( $1$  m/回次)→慢速回转并回提旋喷(泵压 $20$  MPa)→旋喷给进结束该回次→旋喷钻进下一行程回次→如此循环完成每一行程回次至旋喷桩预定深度→完成一根旋喷桩的施工。旋喷速度控制在一行程 $1.0$  m/8 min左右,每一行程回次内保持重复旋喷 $3$ 次,并根据地层情况在完成整孔旋喷施工后,回提钻杆退出钻孔时再整孔旋喷一次,以确保旋喷水泥柱体的直径和相互间的有效搭接。

本工程采用的高压注浆设备与机具主要有: $\varnothing 50$  mm 镶硬质合金钻头,外壁上镶一直径为 $1.5$  mm的硬质合金喷嘴;钻杆规格为 $\varnothing 42$  mm  $\times$   $2000$  mm;BWT80/40型高压泵;日本FS-20A型水平钻机,它通过回转器、夹持结构(液压卡盘和夹持器)、给进装置的相互动作配合,实施回转钻进、起下钻时夹持钻杆及液压夹持拧卸钻杆等动作,这种结构可以根据隧道空间条件,一次性将钻杆连接在一起,进行旋喷作业,减少了旋喷过程中中途接卸钻杆时间,

提高旋喷施工效率。

### 3.3 监控量测与效果评价

鉴于该地区地层土质松散、土体自稳能力差、建筑物较多、地理位置比较重要,为保证工程施工安全,在旋喷作业地段加大了监控量测力度。进行了地表沉降量测、拱顶下沉量测、洞周收敛位移量测、房屋基础附近地层水平位移监测和环境监测等监控量测。

正常情况下,完成一个旋喷段施工后2天可以进行全断面开挖掘进。开挖结果表明,25根桩基本上较为规则地连在一起形成了完整的水泥土拱。但在不同地层条件下的旋喷桩体,所形成的桩体直径相差较大,在砂土地层中形成的旋喷桩体直径在500~600 mm,而在粉质粘土中形成的桩体直径一般在300~400 mm。

通过对隧道变形与稳定的监控量测,旋喷后对地表下沉得到了较好控制,大大减少了对沿线建筑物的影响,安全地通过了建筑物密集地段。

## 4 几点思考

水平高压旋喷注浆技术虽然解决了软弱地层实施隧道开挖的施工难题,但从现场施工情况来看,作为一项新技术用于隧道预支护上,在施工工艺和设备选择等方面有待进一步完善和发展。

(1)水泥浆浪费问题。垂直与水平旋喷施工对高压注浆泵的要求是一样的,但在水平或仰角情况下,旋喷作业更易溢浆。尽管在施工中对泵的流量控制较严,但溢到施工工地的浆液仍然很多,这不仅使浆液耗损太大,而且也污染环境。在施工中,虽然我们在旋喷作业前用混凝土对掌子面进行了封闭,但钻进成孔后混凝土表面遭到了破坏,孔内的浆液流出严重。这样可能引起的后果有:一是成桩质量差,可能因浆液外泄,造成旋喷桩只有孔口段有,或深处的桩不饱满;二是由于置换了一部分岩土,另一部分岩土因高压射流切割破碎影响其原有结构,水泥浆流出后,岩土失稳坍塌,反而造成较大的波及范围。但是如果将孔口完全密封,注入的水泥浆和置换的岩土无处释放,将会引起地表隆起及将工作面向外推跨。因此解决水泥浆无序外泄问题显得十分重要,对此我们在孔口预置了封堵器,限制了钻杆与孔口的环状间隙大小,使孔内多余的浆液和置换的岩土排出,同时完成旋喷作业后及时将孔口封堵,减

少浆液外泄。

(2)提高钻孔精度和旋喷固结体之间有效搭接的措施。为保证旋喷柱体能较好地相互咬合,形成受力状态良好的水泥土拱棚,首先必须提高钻孔仰角的精度,保证每一根桩体的方位保持一致。同时为保障各水泥柱体间的相互咬合,在旋喷施工工艺方面应采取定喷、摆喷、旋喷等多工艺相结合的方法,特别是对于一些土体条件较好的粉质粘土,采用单一旋喷施工手段所形成的旋喷体直径小,很难形成闭合良好的水泥体拱棚,若在钻孔的水平向左右进行适当角度的摆喷,将扩大水平向两侧的桩体尺寸,保证旋喷桩体间的相互咬合。

(3)为提高旋喷水泥桩体的强度和承载能力,可根据需要在水泥土桩里插入钢筋,以确保隧道土体的稳定,提高固结体拱棚的横向抗压能力和纵向抗弯能力。插筋通常在旋喷桩未凝固之前进行。

(4)通过对桩体开挖发现,在旋喷桩末端(长度大于10.0 m时),水泥桩体的直径与强度较靠近孔口处要差,这种现象可能与旋喷桩长度太长有关。由于在深孔段所置换的泥土排出困难,约束了桩径的扩大,形成含土量较多强度较低的桩体。因此在旋喷工艺设计上,如果设计要求桩体长度较大,应在旋喷桩的末端适当增加旋喷时间和旋喷注浆压力。

(5)水平注浆机械的选择与应用。旋喷注浆设备主要有水平旋喷钻机和高压注浆泵,我国用于垂直旋喷注浆的设备已得到了广泛应用,但用于水平旋喷注浆的设备目前尚刚刚起步。国外用于隧道支护的水平旋喷钻机发展已相当成熟,特别是日本及欧美一些国家水平旋喷注浆加固技术开发较早,设备亦比较完善,但其价格昂贵,不利于在国内大范围的推广应用。对此国内一些企业开始研究和开发该类钻机,如石家庄铁道学院和徐州工程机械厂联合设计制造的TGD-50型水平钻机,已成功地应用到软弱围岩隧道预支护中。另外我国煤炭部门制造的全液压坑道钻机也可适用于隧道支护水平旋喷桩施工。从现场施工情况看,笔者认为用于隧道水平旋喷的钻机应具有体积小、质量轻、解体性好、移动方便、液压化程度高等特点。在结构上,钻机回转器、夹持机构(液压卡盘与夹持器)、给进装置等应具有起下钻灵活方便、钻进效率高等特点,同时在加固深度范围内尽可能减少中途接卸钻杆的次数。