

# 浅埋软弱地层隧道旋喷预衬砌支护技术的研究

李远宁,段玉刚,吴 胜

(中国地质科学院探矿工艺研究所 四川 成都 610081)

**摘 要** :论述了浅埋软弱地层隧道旋喷预衬砌支护的研究背景及国内外研究现状、室内试验、旋喷器具、施工工艺及应用情况,并与其它施工方法进行了对比,效益显著。

**关键词** 隧道 浅埋软弱地层 水平旋喷 预衬砌 支护

中图分类号 :U455.91 文献标识码 :A 文章编号 :1000-3746(2001)05-0058-04

**Study on the Initial Lining Technique by Jet-grouting Used in Thin Covered Tunnels in Weak Formation/** LI Yuan-ning, DUAN Yu-gang, WU Sheng (Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 610081, China)

**Abstract** :The background of study on the initial lining technique by jet-grouting used in thin covered tunnels in weak formation is introduced with the study status at home and abroad, lab testing, jet grouting equipment, construction process and uses. The comparison with other methods has shown it will provide significant benefits.

**Key words** :tunnel; thin cover weak ground; horizontal jet-grouting; initial lining; support

## 1 概况

“浅埋软弱地层隧道旋喷预衬砌支护”研究的任务是:通过水平钻孔旋喷形成类似地下连续墙的水泥土固结体支护拱壳,从而提高浅埋软弱围岩隧道施工的安全性,防止地表沉降,降低支护费用,加快施工进度。

### 1.1 项目研究背景

目前我国对于浅埋软弱地层,还缺乏一种行之有效而又快速经济的隧道施工技术方法。旋喷预衬砌支护是一种超前支护的先进技术,在我国尚属空白。隧道旋喷预衬砌中的旋喷方式即是将通常的垂直旋喷改成水平或小仰角方向工作,也可称之为“水平旋喷”,其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,是一种在地下未固结薄覆盖层

隧道中控制顶板稳定和周边围岩变位的卓有成效的加固支护方法。我们经过反复的理论研究与实践,解决了水平旋喷预衬砌的各个技术难点,并已应用于隧道施工之中。

### 1.2 国内外研究现状

预衬砌加固支护法于20世纪80年代初首先在日本开始研究试验,近年来在欧美国家也逐步得到应用。最近,我国铁路部门也已展开预衬砌技术的研究。根据我们的调查,目前已用于工程施工或试验的方法主要有机械切槽压注浆法、水平旋喷法2种。水平旋喷法施工实例见表1。

## 2 水平旋喷预衬砌有限元分析

进行旋喷预衬砌施工的地层多属于散体结构,这类围岩的变形与破坏,主要是在应力重分布的作

表1 水平旋喷预衬砌支护施工实例

国家及工程名称	地面交通及地层情况
美国华盛顿地铁海军工厂以东地段的下水道	地面交通繁忙 隧道与下水道间距仅有4 ft(1.22 m),地层为含砂和砾石的土壤,其中还有粒径为4 ft的漂石,含水丰富
德国波恩一座长497.5 m的地铁隧道	地面交通繁忙 地层为松散的莱茵河砾石地层和不规则的砂层,个别地段拱部为泥砂层;平均埋深3.5 m,最薄处为3.3 m
德国某穿越高速公路的双线铁路隧道	地面交通繁忙 地层未固结和薄覆盖
意大利米兰地铁3号线	地面交通繁忙 有多层古建筑物基础与地下管线 地下水位高 地层松散未固结和薄覆盖
意大利那不勒斯市快速交通系统	地面交通繁忙 有多层古建筑物基础与地下管线 地下水位高 地层松散未固结和薄覆盖
意大利奥斯塔谷隧道群	松散的冰碛层
意大利蒙特奥林比诺2号隧道	地层松散未固结

收稿日期 2000-09-11

基金项目 原地矿部“九五”重点地质科技项目(9505404-1)

作者简介 李远宁(1962-),男(汉族),浙江人,中国地质科学院探矿工艺研究所高级工程师,探矿工程专业,从事探矿工程科研工作,四川省成都市一环北路115号(028)8172115。

用下发生的,表现为塑性挤出、膨胀内鼓、剪切破坏和重力坍塌等不同类型。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。

## 2.1 隧道优化设计的剖面有限元分析

为了评价采用旋喷预衬砌施工技术支护隧道围岩的稳定性,指导类似工程的设计与施工,我们对隧道围岩的应力场、位移、破坏区分布等特征以及隧道埋深、结构和岩土力学性质等因素之间的相互影响情况进行了研究。

### 2.1.1 介质力学参数

水平旋喷预衬砌所处理的软弱松散地层可视为同一种材料,取相同的物理力学参数,且将衬砌体作为一种岩石。计算模型中共采用2种材料,根据取样试验结果及其它有关资料采用工程类比法确定介质力学参数。

### 2.1.2 有限元计算模型及边界条件

有限元计算模型的建立主要是确定计算模型的范围、结构、介质力学参数和确定模型的边界条件。根据资料、分析计算和现场地质情况,我们采用双线性四节点四边形单元和常应变三节点三角形单元。

由于我们采用水平旋喷预衬砌的工程区应力场地层以自重为主,无构造应力,故采用纯剖面土体重力场计算方案,计算模型除地表外的其余3边均采用光滑面约束。

## 2.2 有限元分析结论

据分析,开挖后破坏区集中在拱脚下部、底板附近及拱顶上部地面处。为了保证安全施工、降低成本,我们通过多次改变衬砌厚度分别进行了有限元计算。把应力场、位移场、破坏区分布特征进行分析比较,优化出了衬砌厚度的最佳范围。

## 2.3 因素敏感性分析

尽管用于隧道围岩稳定性分析的各种参数不可避免地存在着误差,但不同参数对围岩的稳定性影响程度不同。非敏感因素的取值误差对分析结果影响很小,而敏感因素在其可能误差范围内一个小的变化就会导致计算结果有很大误差。由分析可知,内摩擦角、内聚力、泊松比的变化可引起围岩破坏面积的突变,是敏感因素。而变形模量、容重、衬砌材料的抗拉强度在本计算方案中则属于非敏感因素。

## 3 室内试验

水平旋喷施工的地层多为软弱松散地层(部分含水),万方数据所用水泥为普通硅酸盐水泥,为了在保证施

工安全的前提下缩短工期,在室内进行了一系列水泥与添加剂的配比试验。从经济、实用角度出发,选定了 $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{Mz}-1$ 、 $\text{NNO}$ 、水玻璃等水泥添加剂进行凝结时间、抗压强度试验。结果表明(1)三乙醇胺的加量最小,但其价格较其它添加剂高出很多,且作为一种水剂不利运输和储存,综合性能、价格、可操作性等方面考虑,决定选用 $\text{CaCl}_2$ (2)随土的含量增大,混合物的强度降低,由于旋喷桩水泥的含量由中心到边缘逐渐减小,即旋喷桩中心的强度最大,自中心至边缘混合物的强度逐渐降低(由于存在离心力的挤压作用,强度降低应是非线性的),因而,每根旋喷桩相交时应考虑其交接处强度,一般采用2个旋喷孔之间距离1.5倍为旋喷桩直径。

## 4 旋喷器具

水平旋喷预衬砌施工成败的关键之一,是成桩质量问题。对一般垂直旋喷而言,孔口采用开放式,置换的物质及水泥浆大量溢出污染环境,同时损耗约30%的水泥浆。在水平状态和有仰角的情况下,如果孔口不采取措施,孔内的水泥浆将流出,引起的后果有几种情况:一是成桩质量差,只有孔口段有成型的旋喷桩,深处的桩不饱满或没有桩;二是由于置换出了一部分岩土,另一部分岩土因高压射流切割破碎影响其原有的结构,当水泥浆流出后,岩土失稳坍塌,波及范围较大;三是孔口水泥浆四处流出,污染环境,造成施工不便。如果孔口完全密封,注入的水泥浆和置换的岩土无处释放,将会引起地表隆起(埋深浅时)及将工作面向外推垮。上述情况都将影响工程的质量并危及建筑物和人身的安全,因此,为了防止类似情况发生,对钻头、钻杆及孔口封隔器进行了研制,解决了水泥浆无序外泄引起的问题。

### 4.1 钻头、钻杆及喷嘴

采用水平旋喷施工的地层皆是软弱松散地层,孔壁不稳定,成孔后应立即喷浆。所以,钻头在完成钻进后回提时应具有旋喷工作的功能。钻头体采用45号钢加工,形状为平底全面钻进式,加工成本低。钻头底部分有水眼及无水眼2种。由于要在孔口安装导流装置,要求钻杆为外平。

喷嘴是将高压泵输送来的液体压能最大限度地转换成射流动能的装置,安置在喷头(钻头或钻具)侧面,其中心轴线与钻杆轴线垂直,数量为1~2个。

### 4.2 导流器

为了解决孔口开放方式进行旋喷施工所带来的问题及降低成本、提高注浆质量,我们在孔口采用了

导流器。其作用首先是密封钻杆(喷杆)与孔口的环状空间,阻止水泥浆自由流出导致旋喷成桩失败;其次是将孔内多余的浆液(包括置换的岩土)排走,防止地表隆起破坏施工地层上部的构筑物,减少环境污染。我们研制的导流器有顶压式和预埋式2种。

## 5 水平旋喷预衬砌施工工艺

旋喷注浆技术,依其工艺流程和输送介质的管道不同,分为单管、双重管、三重管3种方法。考虑到双重管、三重管法施工时置换量较大,不利于地层的稳定,在水平旋喷施工中一般采用单管旋喷注浆技术。

### 5.1 施工工序

水平旋喷预衬砌的施工工序为:①测量确定孔位→②预置孔口导流器→③钻孔→④旋喷回提钻杆→⑤重复③、④步骤到旋喷拱完成→⑥开挖至距旋喷拱末端1m左右→⑦重复①~⑥。

### 5.2 钻孔成孔及旋喷

钻孔采用 $\varnothing 42$  mm外平钻杆、 $\varnothing 46 \sim 48$  mm钻头或 $\varnothing 60$  mm外平钻杆、 $\varnothing 64 \sim 66$  mm钻头,在隧道轮廓外侧进行钻进。成孔后,由于钻头上带有喷嘴,无须更换钻杆,可以边回提、边转动钻杆旋喷施工。

### 5.3 流量

目前水平旋喷施工所采用的高压泵,其泵量输出的大小主要有定挡变量、无级变量2种。高压旋喷所需流量一般为 $50 \sim 100$  L/min,具体的数值与压力、地层情况和钻杆(喷杆)的转速及提升速度等因素有关,应通过现场旋喷试验来确定。每根旋喷桩水泥浆总用量可分别按体积法、喷量法进行计算。

### 5.4 压力

与其它旋喷方法一样,水平旋喷施工中的喷射压力无疑是最重要的参数。对同一类地层,压力越大,切削越深。如果压力不够,射流就不足以切割土体,就会导致旋喷桩施工失败。

在实际的旋喷工程施工前,首先应进行成桩试验,确定施工参数。理想的注浆压力都是根据以往的经验 and 原位试验确定的,它受高压泵能力和土层性质的影响。浆液的注入压力愈高,旋喷的能量也愈大,所处理岩土层的桩体直径愈大。

### 5.5 速度

水平旋喷的速度包括钻杆(喷杆)的转动和提升(回提)速度2个方面。根据施工经验,水平旋喷施工中采用的转动速度为 $15 \sim 25$  r/min,提升速度为 $15 \sim 25$  cm/min。

提升(回提)速度可根据单位时间喷射水泥浆量、旋喷长度及体积法公式计算出的水泥浆用量来计算,转动速度必须保证每一孔段钻杆转动不少于1圈。旋喷桩直径很大程度上是喷射时间的函数,在一固定的孔段上喷射时间愈长,成桩直径就愈大。

在水平旋喷预衬砌施工中,压力、泵量、提升速度、转动速度、喷嘴类型及直径、土层情况和喷浆材料有着密切联系,它们相互影响和制约,直接决定了旋喷桩的质量。在实际施工中,应根据隧道具体情况确定旋喷参数。根据施工经验,采用单管旋喷法预衬砌施工的有关参数为:浆液喷射压力 $20 \sim 60$  MPa,浆液流量 $40 \sim 120$  L/min,喷嘴直径 $1.5 \sim 3$  mm,转速 $10 \sim 25$  r/min,回提速度 $10 \sim 50$  cm/min。

## 6 野外生产试验和使用

为了验证已研制的用于旋喷预衬砌的器具、设计计算方法及配套施工工艺的实用性,我们先后与中国水电基础工程局技术处和四川地勘局405地质队合作进行了隧道旋喷预衬砌生产试验,均获成功。

### 6.1 天津市塘沽区北塘镇隧道

地层为粘性素填土,无机离子含量较高,含水,密实度差,承载力低。采用单管旋喷法、预埋式导流器施工。

主要设备: $\varnothing 42$  mm全面钻进旋喷钻具,XPB-90型高压泵,DK-75型全液压钻机。

旋喷参数:转速 $20 \sim 25$  r/min,回提速度 $15$  cm/min,泵压 $20$  MPa,水灰比 $1$ 。

施工结果:15根长 $5$  m的旋喷桩在2天内完成喷钻施工,2天后即进行了全断面开挖,15根旋喷桩较为规则地连在一起形成了完整的水泥土拱。经现场取样送检,水泥土的抗压强度平均为 $17$  MPa,地表沉降最大为 $11$  mm,旋喷拱沉降最大为 $4$  mm。

### 6.2 四川崇州市鞍子河电站梁家山隧道

岩石为粉砂质泥质岩类,极其破碎,掌子面有水流出,开挖后岩石松散解体呈砂状,不能自稳。采用单管旋喷法、预埋式导流器施工。经有限元分析计算,单层旋喷桩成拱即能达到掘进要求。

主要设备: $\varnothing 42$  mm全面钻进钻具,ZJB-30型高压泵,XY-2型钻机。

旋喷参数:转速 $15 \sim 20$  r/min,回提速度 $15$  cm/min,泵压 $20$  MPa,水灰比 $1$ ,氯化钙 $1\%$ 。

施工结果:由于设备出现故障,影响了施工进度。10根 $10$  m长的旋喷桩用了10余天才完成。经现场取样测试抗压强度平均为 $17.2$  MPa,抗剪强度

平均为 2.1 MPa。旋喷成拱后,隧道掘进顺利地通过了垮塌段。因隧道埋深较大,垮塌时地表未引起沉降。在隧道内进行了拱顶沉降监测,沉降量为 32 mm,满足合同要求。

## 7 对比分析

采用水平旋喷预衬砌支护,与通常采用的管棚、管棚注浆及大面积固结注浆等方法相比,具有一些特点,而且经济效益较好。

### 7.1 特点

(1)可在地层中形成一个完整的水泥土拱壳,受力情况较管棚有明显的改善。

(2)水泥浆的用量及切削土体的方向可以控制,各旋喷桩重叠比较规则。

(3)水平旋喷预衬砌只在地层中形成一个完整的水泥土拱壳,同等条件下,其耗用的水泥量少于固结注浆。

(4)因组成预衬砌的旋喷桩的直径、方向可以控制,形成的衬砌体较固结注浆开挖后形成的衬砌体均匀,且强度也更高。

### 7.2 经济效益(见表 2)

由表 2 看出,当采用管棚支护施工时,因钻孔数增量多,施工时间相对增加,其工班效率并不明显高于水平旋喷预衬砌施工,且由于单一的管棚支护松散地层效果较差,常在施工管棚后采用注浆处理。如此一来,人员、时间及材料费用将增加,工班效率

相对降低。水平旋喷预衬砌施工的工班效率主要受水泥凝结时间的影响,但其良好的支护效果是显而易见的。

表 2 不同施工方法经济效益对比

施工方法	天津北塘镇隧道		四川梁家山隧道	
	工班效率	成本效益 (元·m <sup>-1</sup> )	工班效率	成本效益 (元·m <sup>-1</sup> )
管棚支护	0.25	4130	0.037	2975
管棚注浆支护	0.14	4814	0.028	3350
水平旋喷预衬砌	0.21	2236	0.042	1770

## 8 结语

随着工程施工的市场化,要在竞争中立于不败之地,必须成功引用新材料、新技术、新工艺、新方法。发展我国高效、低成本的掘进方法,水平旋喷预衬砌施工工艺便是其中之一,它解决了在软弱松散地层实施隧道掘进的施工难题。

## 参考文献:

- [1] 朱宗培等.地质勘探用水泥[M].北京:地质出版社,1984.
- [2] 彭振斌等.注浆工程设计计算与施工[M].武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [3] TBJ 204—96.铁路隧道施工规范[S].
- [4] 张泽业.工程施工技术[M].成都:成都科技大学出版社,1993.
- [5] 尚岳全等.工程地质研究中的数字分析方法[M].成都:成都科技大学出版社,1991.
- [6] 关宝树.隧道力学概论[M].成都:西南交通大学出版社,1984.
- [7] 纪午生等.常用建筑材料试验手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1986.
- [8] 武汉地质学院.勘探掘进学[M].北京:地质出版社,1981.

根据水泥屑与岩屑的比例判断侧钻的成功与否,如果岩屑所占的比例随着侧钻井加深而增加,说明新井在逐步形成,直至完全钻出新井。

## 5 几点认识

(1)官 2 井侧钻实际情况表明,此次侧钻工艺方案、步骤都是合理的,总结出了一套较成功的经验。

(2)利用侧钻,能及时避开严重的井内事故,减少处理井内事故时发生的不良后果,与继续处理井内事故和移井位相比,减少了人、财、物力的消耗,争取了时间,保证了工期,具有良好的经济效益和社会效益。

(3)侧钻钻具的组合弯曲度,应在井内达到最大弯曲。

(4)使用螺杆钻具侧钻需要对井场的主要机械设备进行检修,以免在侧钻时发生故障而导致提钻。侧钻时钻机转盘要定向锁定,需提动钻具时,方钻杆不能提高方补心,以免造成错位,使已形成的台阶或新井报废。

(5)侧钻成功后,应及时提钻更换钻具,以免造成局部井段弯曲过大,井斜超差严重,形成“狗腿”现象。应用钻铤扶正器或专用接头进行扩井,避免给继续钻井和下套管带来不利。

(上接第 44 页)

返出的砂样岩屑含量约占 15%,钻进 6 m 后砂样中岩屑的含量无明显的增加。现场分析:由于井径大,螺杆钻具、弯接头直径小,2°弯接头所配的钻具弯曲度还不够,形成的台阶小,又因水泥塞与地层的可钻性不同,钻头、钻具结构、性能等因素影响,钻头在克取少量岩石的情况下,主要还是在原井中钻进,还达不到偏离原井的条件。

### 4.2.4 第四次侧钻

我们对钻具的组合进行了调整,增加了一个 1°30'的弯接头。钻具组合:Ø215.9 mm 牙轮钻头 + Ø101.6 mm 1°30'弯接头 + Ø101.6 mm 螺杆钻具总成 + Ø101.6 mm 2°弯接头 + Ø89 mm 钻杆。钻进参数与第三次相同。钻进 2 m,从井内返出的砂样、岩屑约占 20%,钻进 5 m 岩屑约占 60%,钻进 7 m 岩屑约占 80%,钻进 9 m 后岩屑占到 95% 以上,基本上确认侧钻成功,新井已形成。逐步增加了钻压和钻速,钻进 15 m 后,提钻换成普通回转钻具,逐步增加钻铤,转入正常钻井,钻井中每 1 m 采砂样一次进行对比观测,防止新老井联通,直到新井超出老井井深后,侧钻结束。

### 4.3 新井判断

侧钻过程中,每 0.5~1 m 采集一次砂样,进行对比观测,