

【摘要】随着我国城市地下空间开发建设和轨道交通建设的快速发展,水平旋喷加固技术在我国将得到越来越广泛的应用。从水平旋喷加固工法和设备、水平旋喷加固的计算方法及水平旋喷加固效果等方面分析了我国水平旋喷加固技术研究的现状,并提出了需要进一步研究的问题。

【关键词】水平旋喷加固现状问题

0 引言

目前,竖直旋喷加固技术已经得到了广泛的应用。但在一些需要采用旋喷加固的工程中,如果地面上不能给土体加固设备提供场地或场地太小设备不好安放,或由于管线、交通、垂直加固深度太深等原因以至很难或无法在地面进行垂直加固时,就需要采用水平旋喷加固方法加固土体。由于水平旋喷加固能防止隧道渗漏和坍塌、能有效控制地面沉降,水平旋喷加固技术已受到相关行业的重视和广泛关注,并在我国得到了一定的应用。特别是随着我国城市地下空间开发建设和轨道交通建设的快速发展,21世纪初中叶将是我国大规模建设地铁的年代,在建造地铁隧道、地下通道等时,常会碰到需要采用水平旋喷法进行土体加固,为此,本文分析了我国水平旋喷加固技术研究的现状,并提出了需要进一步研究的问题。

1 水平旋喷加固工法和设备

1.1 加固工法

日本和欧美等国是研究开发水平旋喷加固技术较早的国家。日本在单管旋喷的基础上相继开发出了 CCP-H 工法、RJFP 工法、MJS 工法等。意大利 RODIO 公司于 1983 年首次将水平旋喷加固技术应用于隧道预支护,并逐渐把水平旋喷注浆列为加固和保护隧道围岩的基本方法之一。水平旋喷加固技术在欧美各国已得到了广泛的应用,如德国波恩地铁、美国华盛顿地铁、挪威蒙特奥利姆比诺浅埋铁路隧道、瑞士苏黎世地铁和楚格瓦尔德隧道等。

在我国,水平旋喷加固技术作为一种新型的施工工艺,在岩土工程中的研究和应用起步较晚,大多数还处于试验、摸索阶段。我国铁道科学研究院于 1987 年在内蒙古乌兰浩特附近轻亚粘土层进行了首次水平旋喷试验,随后各施工单位、高校、研究院也开始了这方面的研究,并将水平旋喷加固技术应用于各种工程建设中,如神延铁路沙哈拉崩隧道、北京长安街热力隧道复线、广州地铁 2 号线新一磨区间隧道、深圳地铁一期大剧院~科学馆区间隧道等。同时,中铁二十局集团根据神延铁路沙哈拉崩隧道的施工实际,开发了“隧道水平旋喷预支护施工工法”。

1.2 加固设备

水平旋喷加固设备与垂直旋喷基本相同,主要差别在钻机上。国外的水平旋喷机一般都是将钻喷机构安装在多功能钻车上,既能钻水平孔又能钻竖直孔。这样的多功能钻车可以进行多种作业,较受用户欢迎。这些钻车具有以下特点:①注重一机多能,采用积木式组合设计,可以根据不同工程不同作业的需要方便地调换部件,组成不同施工方法的机种;②采用全液压传动和集中控制,操纵、控制均集中于操纵控制室内;③采用履带式专用底盘,稳定性提高,能适应不同地基;④采用电力驱动。

国内以往的水平旋喷施工多采用对传统的旋喷装置加以改造或采用国外的设备。目前,国内有关单位已经进行了一些开发研制,并在一些工程中使用,取得了一定的应用。如石家庄铁道学院与徐州工程机械厂在上世纪 90 年代联合设计制造了 TGD-50 型水平及倾斜钻孔旋喷机,该机可作竖直~上仰 15°的钻孔并旋喷,并分别在神延铁路沙哈拉崩隧道和宋家坪隧道使用。三一重工集团北京桩机公司研制出了 SJ180 型水平高压旋喷钻机,该钻机的关键零部件采用国际知名品牌配套,已于 2008 年 4 月下线,并已在某现场试验中使用(图 1)。





图1 SJ180 水平高压旋喷钻机

2 水平旋喷加固的计算方法

对水平旋喷加固的机理和计算方法的研究，目前基本上是借鉴管棚理论（如图2所示），将水平旋喷固结体在横向上视为拱，按等效原则将水平旋喷固结体等效为一定厚度的拱壳，按照有限元理论进行分析；在纵向上视为具有一定跨度和刚度的超静定混凝土或钢筋混凝土曲梁，按梁理论分析水平旋喷固结体。

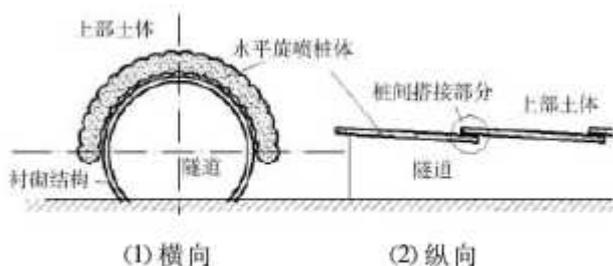


图2 隧道水平旋喷超前支护示意图

1990年在成都召开的国际隧协16届年会上，奥地利学者提交了“数值模型对新的隧道开挖方法发展的影响”的论文，文中用三维数值模型分析论证了各种新的施工方法的力学机理，对旋喷注浆与新奥法的结合，作者认为是“先进的奥地利施工方法”。三维数值模型分析表明，开挖期间的应力重分布只发生在开挖面前方非常有限的区域内，而且发生坍塌的危险区也是在开挖面处的这个很窄的区域内。这就意味着这一区域内早期支护措施特别重要，应采用先进的奥地利施工方法。旋喷注浆是用来在开挖面前方形成一个预支护拱棚。文中还认为旋喷拱棚虽未加钢筋，但其纵向支护效果是次要的，主要是粘结力大小的松散土和喷混凝土相连接。用三维有限元分析结果表明，在旋喷拱保护下，内层的喷混凝土和二次衬砌应力和变形都很小。

西南交通大学吴波等采用三维弹塑性有限元模型分析了深圳地铁大剧院—科学馆区间隧道水平旋喷预加固工程。该加固段洞身主要穿越风化花岗岩，为了保护隧道上方的煤气管线，在该段采用了水平旋喷超前加固。计算中，对于旋喷桩、锚杆和钢拱架的作用均按等效原则处理，钢筋网的作用作为安全储备考虑。由于旋喷桩施工中辅以小导管补充注浆，认为在地层中形成了坚固、连续的拱壳结构，因此，将旋喷桩简化为一定厚度的预支护结构。计算结果表明，施工旋喷桩后，地表沉降和洞周塑性区面积都将减小。北京交通大学罗红杰等采用弹塑性有限元模型对北京长安街热力隧道复线工程中的水平旋喷加固效果进行了分析，计算时仍将水平旋喷加固体作为土层考虑，但由于水平旋喷注浆加固施工后改变了地层的力学性质，在隧道外围形成了一圈与地层力学性质不同的固结体，稳定了地层，所以在计算时将水平旋喷加固体等效为一定厚度的弹性模量 E 和泊松比 μ 等力学参数与周围土体不同的土体。对于计算中是将水平旋喷固结体简化



为拱壳结构还是将水平旋喷固结体简化为与地层力学性质不同的土体，笔者认为这要根据施工中的具体情况而定，如果施工水平旋喷固结体的成拱性好，则可以简化为拱壳结构，如果成拱性不好，则可将水平旋喷固结体简化为与地层力学性质不同的土体。

北京交通大学张彦斌根据 Winkler 地基上的无限长梁理论，采用杆系有限元方法来模拟施工开挖过程中水平旋喷超前支护的内力和位移。由于 Winkler 地基模型是用一系列具有固定刚度且相互独立的弹簧来模拟地基，不能反映土的连续性，会带来很大的误差，所以目前在管棚的弹性地基梁模型中，采用较多的是介于 Winkler 地基模型和弹性半空间模型之间的双参数地基模型，既从理论上改进 Winkler 模型中地基不连续的缺陷，又避免了弹性半空间理论数学处理上的困难。当然，由于管棚是在钻孔内打入钢管，通过钢管上的注浆孔向地层内注浆，然后在钢管内压入水泥砂浆或混凝土，从而在地层中建立一个承载棚，而水平旋喷加固则是在钻孔内旋喷浆液，水平旋喷加固体在纵向上的刚度和连续性与管棚是有区别的，因此，在借鉴管棚理论分析水平旋喷固结体纵向上的变形规律时，应根据实测资料对模型进行修正。

3 水平旋喷加固效果

为了研究水平旋喷加固技术，分析水平旋喷加固对地层的加固效果，国内一些单位进行了水平旋喷加固的现场试验。

铁道科学研究院于 1987 年在内蒙古乌兰浩特附近轻亚粘土层进行水平旋喷试验。先进行工艺试验确定旋喷参数，用 7 根水平旋喷柱组成拱棚。试验结果表明，在 12 MPa 压力下平均柱径 387 mm，压力 20 MPa，柱径可达 580 mm，固结体强度为 2.8 MPa，拱棚厚度在 200~250 mm 之间。

石家庄铁道学院从 1994 起开始了水平旋喷机研制和水平旋喷技术的研究工作，先后在硬砂质粘土和松散细砂地层进行了 4 次水平及倾斜旋喷工艺试验及一系列测试，试验时采用了单液浆和双液浆，测试内容包括固结体的抗压强度、强度软化系数、抗拉强度、直径、弹模、变形模量等。

中国地质大学（北京）李永东等在砂质粉土地层进行了水平旋喷现场试验，试验采用了 1.8 mm 和 2.2 mm 两种喷嘴，对水平旋喷桩桩径、固结体强度、咬合及加固效果进行了测试。

根据国内工程和上述这些试验结果，统计得到了如表 1 所示的水平旋喷固结体直径和强度。

表 1 水平旋喷固结体直径统计表

序号	旋喷压力 (MPa)	固结体直径 (cm)	固结体抗压强度平均值 (MPa)	施工地层	工程或试验名称	备注
1	12	38.7	2.8	轻亚粘土	铁道科学研究院试验	
2	20	58				
3	20	60		风积砂	神延铁路沙哈拉梯隧道	
4	18~22	31	8.36	硬砂质粘土	石家庄铁道学院试验	
5		45	13.74	松散细砂		
6	15~20	30	15	粉土、中粗砂	北京长安街地下热力管线隧道	
7	15~20	30	9.8	粉砂~细砂层	北京草桥热力外线隧道	
8	20~25	40	15	粉细砂层	北京地铁 5 号线崇文门~东单区间隧道	
9	20~25	40~70	10	流塑软粘性土	深圳地铁大-科区间隧道	
10	30	61.3	12.5	砂质粉土	中国地质大学 (北京) 试验	喷嘴 φ 1.8mm
11	30	83.8	14.2			喷嘴 φ 2.2mm
12	40	72	15.3			喷嘴 φ 1.8mm

4 结语

随着我国城市地下空间开发建设和轨道交通建设的快速发展，水平旋喷加固技术在我国将得到越来越广泛的应用。本文从水平旋喷加固工法和设备、水平旋喷加固的计算方法及水平旋喷加固效果等方面分析了我国水平旋喷加固技术研究的现状，并提出需进一步研究的问题。



(1) 我国水平旋喷施工技术的研究和应用起步较晚，大多数还处于试验、摸索阶段。国内有关单位已进行了一些研究和试验，并在一些工程中使用。

(2) 目前，在国内工程中使用的水平旋喷机要么是由普通成孔设备改造而成，在施工效率、质量、精度上无法保证，要么是采用国外的设备，价格昂贵，或是采用由国外知名品牌零部件组装的设备，因此，应开发适于我国国情的水平旋喷施工设备以提高施工效率、降低施工成本，更好的适应国内建设的需要。

(3) 国内对于水平旋喷加固效果的认识大多数还处于试验定性描述阶段，定量分析还较少，现有的计算模型也都是根据管棚模型演变而来，需要在深入研究水平旋喷加固机理的基础上，根据现场实测数据和模型试验研究结果来不断完善水平旋喷加固效果的计算模型。

(4) 国内现有的水平旋喷加固工法、计算模型都是针对以矿山法修建的隧道，已开展的水平旋喷试验也是以我国北方的土质为主，针对软土地区土质研究的很少，而随着长三角地区轨道交通建设和地下空间开发的快速发展，进行软土地区水平旋喷加固技术应用研究是相当必要和迫切的。

(5) 在今后的实践中，需要通过实地测试以检验加固效果，进一步总结规律，为水平旋喷技术积累资料，以更好地促进水平旋喷注浆加固技术的发展。

