

# 水平旋喷拱棚新工艺与载荷试验研究

柳建国<sup>1,2</sup>, 张慧东<sup>1,2</sup>, 张慧乐<sup>1,2</sup>, 赵琰飞<sup>1,2</sup>, 钟冬波<sup>1,2</sup>, 徐寒<sup>1,2</sup>, 刘钟<sup>1,2</sup>

(1. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088; 2. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

**摘要:** 基于国内水平旋喷技术存在成桩质量差、加固体周围岩土体变形大等问题, 以中国京冶工程技术有限公司开发的全方位高压喷射注浆新工艺及相应设备为依托, 进行了水平旋喷拱棚现场新工艺和载荷试验。新工艺现场施工过程中, 孔口止浆器止浆效果良好; 养护 28 d 后隧洞开挖显示, 旋喷桩搭接紧密, 开挖长度内无搭接裂缝, 施工效果良好; 清除上覆土层后, 可见旋喷桩质地均匀, 纵横向搭接良好, 桩-桩咬合尺寸约 0.2 m; 返浆试块的抗压强度约为取芯试块的 60%。拱棚结构载荷试验表明,  $Q-s$  曲线相对平稳; 拱棚结构的破坏主要是由于旋喷桩体搭接处产生裂缝并不断扩展, 最终贯通引起的剪切破坏。通过数值模拟与实测值的对比, 拱棚结构的竖向位移和水平位移均随荷载的增大而增加, 最大位移值均出现在拱顶位置处。

**关键词:** 水平旋喷; 拱棚; 载荷试验; 数值模拟

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)06-0921-07

**作者简介:** 柳建国 (1964-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程技术领域为基坑支护、桩基础和地基处理。

E-mail: [ljj2000@sina.com](mailto:ljj2000@sina.com)。

## New technology and loading tests of horizontal jet grouting arch

LIU Jian-guo<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui-dong<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui-le<sup>1,2</sup>, ZHAO Yan-fei<sup>1,2</sup>, ZHONG Dong-bo<sup>1,2</sup>, XU Han<sup>1,2</sup>, LIU Zhong<sup>1,2</sup>

(1. China Jingye Engineering Co., Ltd., Beijing 100088, China; 2. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Based on the equipment performance and construction problems of horizontal jet grouting technique in China, a new construction method for rotary high pressure horizontal jet grouting and new equipments are developed based on field technology and loading tests by China Jingye Engineering Corporation Limited. In field tests, the seal equipment achieves good results. The excavation shows that jet grouting piles lap joints are close and have no cracks after 28 days' maintenance; and the construction effect is good. After cleaning out the overlaying soil, it can be seen that the texture of the jet grouting piles is uniform, the lateral and vertical lap joints are good, and the occlusion size is about 0.2 m. The compressive strength of returning fluid sample blocks is about 60% of coring blocks. Based on the full scale tests, the  $Q-s$  curves are relatively stable. The cracks occur and are constantly extended, resulting in collapse of the jet grouting arch by cracks perforated. Numerical simulations and tests show that vertical and horizontal displacements of the jet grouting arch increase with the increase of load, and the maximum displacements occur at vault.

**Key words:** horizontal jet grouting; arch; loading test; numerical simulation

## 0 引言

隧道与地下工程的施工经常涉及松散、软弱或富水的不良地层, 开挖施工前必须采取有效的超前支护手段。国内采用的超前支护方法多为小导管注浆, 但常规的注浆方法由于加固体强度低、可控性差, 效果难以保证。水平旋喷超前支护技术 (Horizontal Jet Grouting) 是沿隧道拱部外缘用水平布置的水泥旋喷桩相互搭接形成拱棚, 在它的保护下进行隧道开挖, 还可根据需要在旋喷桩体中插入钢管或芯材。水平旋

喷技术的主要优点为: 加固体强度较高, 直径可控, 能形成可靠的预加固衬砌, 减少开挖对地面建(构)筑物的影响; 对地层适应性强, 对软弱土及地层也能形成良好的加固效果; 对富水地层隔水效果良好, 也可以避免隧洞水力破坏。

意大利 RODIO 公司于 1983 年首次水平旋喷超前支护技术成功应用于意大利 Moggio Udinese 铁路隧

道建设工程<sup>[1]</sup>。日本在单管旋喷的基础上开发出 CCP-H 工法,并逐渐发展出 RJFP 工法和 MJS 工法。美国 20 世纪 80 年代初期使用此项技术用于华盛顿地铁在海军工厂以东区间隧道的修建。德国修建波恩地铁,瑞士修建苏黎世地铁时也开始应用水平旋喷技术<sup>[2-4]</sup>。中国铁道部科学研究院于 1985 年开展了水平旋喷的试验研究,石家庄铁道学院于 1994 年也开始了水平旋喷机械的研制和水平旋喷技术的研究工作,并和徐州工程机械厂联合设计制造出 TGD-50 型水平钻孔旋喷机<sup>[5-7]</sup>。

水平旋喷超前支护技术在我国仅应用于为数不多的铁路隧道、城市地铁和市政管线工程,除了设备性能的欠缺、工艺方面的不足,主要是存在成桩质量差、加固体周围岩土体变形大以及废浆液无序排放等问题。

针对以上问题,中国京冶工程技术有限公司开发出了一种带孔口止浆器的全方位高压喷射注浆拱棚超前支护新技术,在 2007 年和三一重机联合成功研制了 SJ-180 全方位高压喷射注浆钻机大型设备,并于 2007 年 6 月在北京大兴试验基地进行了水平旋喷新技术工艺试验,2008 年 4 月进行了拱棚结构现场载荷试验。

# 1 水平旋喷新技术工艺试验

为检验水平旋喷新技术以及设备的性能,进行工艺试验。

## 1.1 场地条件

试验场地为第四系冲洪积地层,由素填土、粉砂层和粉质黏土组成,试验地层范围内未见地下水。各层土的组成及主要物理力学指标见表 1。水平旋喷拱棚试验基坑尺寸为:长 15 m×宽 15 m×深 5.5 m,试验段边坡坡度 1:0.3,采用喷浆护坡。

表 1 场区主要土层组成及其指标

Table 1 Composition and parameters of soil strata					
土层	厚度 /m	深度 /m	$\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	$c$ /kPa	$\varphi$ /(°)
素填土	1.5	1.5	1.89	0	10
粉砂层	5.8	7.3	1.81	15	20
粉质黏土	3.8	11.1	2.02	32	17

## 1.2 全方位高压旋喷工法施工设备

### (1) 孔口止浆装置

孔口止浆装置包括止浆器壳体和溢浆管。止浆器壳体内部通过隔板依次分为板阀腔、密封腔和密闭腔,各隔板均设有相同轴线的中心孔,溢浆管与板阀腔相通。板阀腔中设有板阀,止浆器壳体上还设有加压管,加压管与密封腔相通,在密封腔内设有两端开口的圆

柱形密封筒,密封筒由软质密封材料制成,其两端分别密封地安装在所述密封腔两端的第二隔板和第三隔板上,密封腔的内壁上设有与中心孔相同轴线的环状密封件。

### (2) SJ-180 型全方位高压旋喷钻机

SJ-180 型钻机主要技术参数列于表 2。

表 2 SJ-180 型钻机主要技术参数

Table 2 Main technical data of SJ-180 drilling rig	
型号	SJ-180
动力头最大行程/mm	12000
动力头最大扭矩/(N·m)	12000
动力头转速	0~50 rpm(无级可调,可显示)
桅杆回转角/速度	240°/0~1.5 rpm(无级可调,可显示)
桅杆上倾角/(°)	0~15(可调整,可显示)
给进力/提拔力/kN	60
钻孔加压速度/(m·min <sup>-1</sup> )	0~10(无级可调,可显示)
旋喷提升速度/(m·min <sup>-1</sup> )	0~2(无级可调,可显示)
装机功率	80HP 柴油机+90kW 电动机
运输尺寸	9800 mm×2500 mm×3300 mm
质量/kg	18000
施工高度范围/m	3000~5640
施工宽度范围/m	3700~7200
旋喷桩直径/mm	单重管 600,双重管 800~1000

### (3) 全方位高压旋喷配套设备

根据全方位高压喷射注浆工法的工艺流程,后台配套设备主要包括水泥存贮装置、水泥搅拌装置和压力注浆装置。

## 1.3 水平旋喷试验拱棚设计及施工参数

本次试验拱棚由 7 根扇形分布的旋喷桩组成,桩间距 0.54 m,最终成桩桩长 10.0 m,桩径 0.6~0.8 m,桩成拱仰角 5°,设计桩体强度为 6 MPa。拱棚横剖面如图 1 所示。

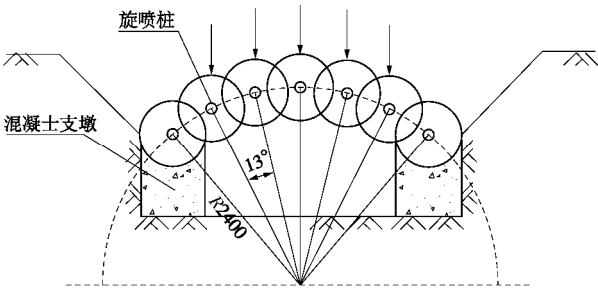


图 1 试验拱棚横剖面图

Fig. 1 Cross section of test arch

拱棚施工材料采用 PO42.5 普通硅酸盐水泥,水灰比为 1.0。试验拱棚施工参数见表 3。

表 3 试验拱棚施工参数

Table 3 Construction parameters						
桩号	高压泵 压力 /MPa	中压泵 压力 /MPa	钻杆提 升速度 /(cm·min <sup>-1</sup> )	钻杆旋转 速度 /(r·min <sup>-1</sup> )	桩身 长度 /m	复喷 长度 /m
#1	40	2	15	15	10	6.5
#2	40	2	15	15	10	无
#3	40	2	15	15	10	无
#4	40	2	15	15	10	无
#5	40	2	14~16	13.5~15	10	无
#6	40	2	14~16	13.5~15	10	无
#7	40	2	14~16	13.5~15	10	无

1.4 水平旋喷新技术工艺试验结果

在整个拱棚施工中,全方位钻机位置固定不动,7根旋喷桩通过钻机主钻架在水平面内的转动来定位、定向,施工采用隔桩跳打工艺。施工过程中,孔口止浆装置作用良好。

为更好观察拱棚施工效果,在试验拱棚施工结束,养护期满 28 d 后进行开挖检验,隧洞开挖长 6 m,宽 3.2 m,高 2.2 m。开挖表明隧道拱棚施工效果良好,从图 2 (a) 可见旋喷桩搭接紧密,开挖长度内无任何搭接裂缝。为了更好地观察拱棚施工效果,挖除了拱棚顶部覆盖土体。从图 2 (b) 可见,所开挖的 5 根旋喷桩质地均匀,全部旋喷桩纵横向搭接良好,桩-桩咬合尺寸约为 0.2 m,施工效果优于原有设计方案。

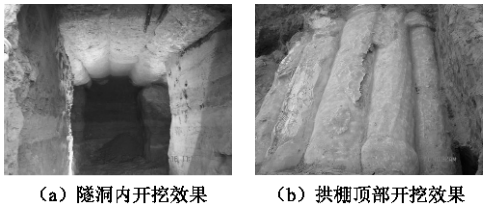


图 2 试验拱棚开挖效果

Fig. 2 Excavation effect of test arch

1.5 水平旋喷拱棚桩体无侧限抗压强度试验

为了检验旋喷桩体的强度性能,在施工过程中和施工后分别对返浆取样试块和旋喷拱棚桩体取芯试块(70 mm×70 mm×70 mm 立方体)进行抗压强度测试,试验结果汇总见表 4。

表 4 试验拱棚抗压强度

Table 4 Compressive strengths of test arch							
桩号	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
返浆强度/MPa	15.1	11.8	10.8	8.3	9.8	8.4	9.6
取芯强度/MPa	24.2	21.2	18.3	14.7	16.5	13.9	13.6

通过表 4,比较后发现拱棚试验返浆试块的强度约为取芯桩体试块强度的 60%。在实际施工中可据此。并参考场地的地层条件,对现场返浆取样试块进行强度检验后,建立拱棚桩体的返浆试块强度与旋喷桩体强度的关系,从而有效地指导施工。

2 水平旋喷拱棚结构载荷试验设计

通过现场足尺试验,研究采用高压喷射注浆工法所成拱棚结构的荷载-变形特性,确定拱棚结构的破坏模式。

2.1 试验设计

拱棚旋喷桩体水平向长 10 m,将其按平面应变问题考虑。从距基坑边缘 3.2 m 处开始对旋喷桩体进行切割,切割体宽 1 m,以此作为试验对象。为方便布置测量元件,切割面尽量保持为平面;为模拟实际拱棚受力,分别在#2, #3, #4, #5, #6 桩上部布置混凝土传力支墩和液压千斤顶;受试验场地和设备的限制,水平向平面应变面为自由面。

试验采用慢速维持荷载法,利用钢梁锚杆作为试验加载的反力机构,通过液压加载系统对拱棚进行加载试验。因拱棚为对称结构,选取#1, #2, #3, #4 桩为研究对象,现场检测情况如图 3。试验装置如图 4 所示,在#1, #7 桩体下部各做一长宽高为 800×1000×800 mm 的混凝土支墩作为整个拱棚结构的支撑点。待支撑点施工完毕后,对洞室进行回填,回填厚度为 0.80 m。加载试验采用 5 个并联液压千斤顶,通过支墩调整千斤顶的高度,以期使得各管棚承载体均匀受力。



图 3 现场加载检测图

Fig. 3 Draft check of field loading

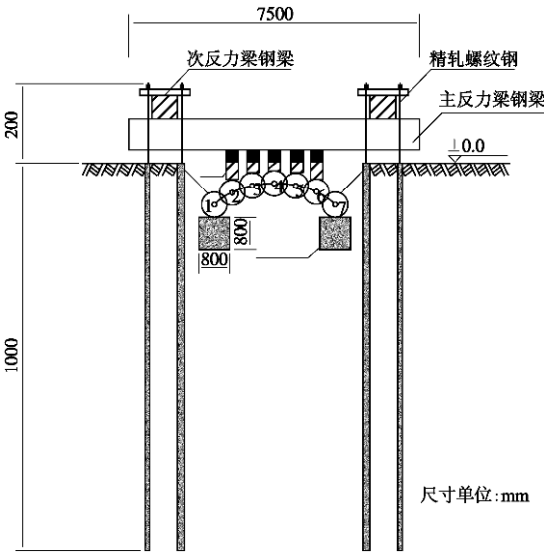


图 4 试验反力装置布置图

Fig. 4 Layout of test reaction installations

采用百分表与数码相机固定摄像相结合的手段对各桩体位移进行监测。

## 2.2 加载控制

按照计算总荷载要求, 预计拱棚破坏荷载为 1200 kN, 将荷载分为 24 级, 每级 50 kN。每级加载后, 按照第 5, 10, 15 min 时各测读一次桩体沉降。以后每隔 15 min 测读 1 次, 累计 1 h 后 0.5 h 测读 1 次。在每级荷载作用下, 桩体沉降量连续两次在 1 h 内小于 0.1 mm 时可视为稳定, 即可加载下一级。

当出现以下几种情况中的一条时可停止加载: ①沉降量大于 100 mm; ②加至最后一级荷载; ③拱棚坍塌; ④旋喷桩体搭接处裂开并贯通。

## 3 水平旋喷拱棚试验结果

### 3.1 加载过程观测

(1) 第一级荷载作用下, 由于操作失误, 开始仅将荷载施加在#5 桩上, 随即改正并施加荷载于其它桩顶, 旋喷拱棚发生变形, 拱棚中部#4 与#5 桩结合部位、拱脚#6 与#7 桩结合部位发生开裂。

(2) 第二级荷载后, 拱结构完成受力调整, 可持续稳定地承担荷载, 裂缝并未继续发展, 呈拱顶变形较大, 拱脚变形较小的变形形态, 其中拱顶主要为垂直变形, 拱脚则呈向下的垂直变形及向外侧的水平变形。

(3) 随荷载增大至 700 kN, 拱棚#4 与#5 桩结合部位、拱脚#6 与#7 桩结合部位裂缝开始变大, 拱顶与拱脚变形趋势不变。

(4) 荷载增大至 1000 kN 时, #4 与#5 桩结合部位裂缝贯通, #6 与#7 桩结合部位裂缝发展明显, 拱棚结构破坏, 如图 5 所示。



图 5 旋喷拱棚结构破坏照片

Fig. 5 Photo of disruptive jet grouting arch

(5) 加载过程中发现, 拱顶中心点垂直位移最大, 拱棚结构未发生突然坍塌破坏。

### 3.2 拱棚竖向位移

拱棚竖向位移实测曲线如图 6 所示。在加载初期,

各桩的竖向变形曲线基本呈线性变化, 当荷载大于 700 kN 时, 除#1 桩外, #2, #3, #4 桩位移曲线增大较明显, 而当荷载大于 750 kN 时, 曲线又恢复原来的变化趋势, 而在整个加载过程中#1 桩位移曲线始终较为平缓。

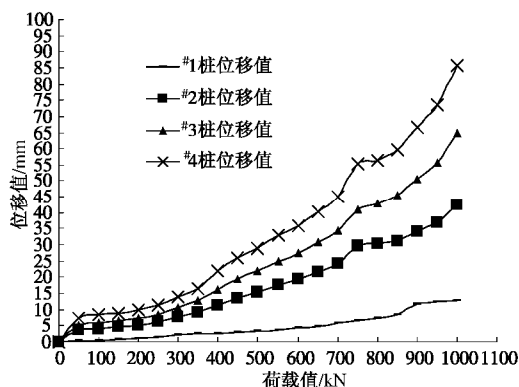


图 6 竖向位移实测曲线

Fig. 6 Curves of measured settlement

### 3.3 荷载拱棚水平位移

与拱棚竖向位移实测值相似, 水平位移实测曲线如图 7 所示。在加载初期, 各桩的水平向变形曲线基本呈线性变化, 随着荷载的增加, 桩体  $Q-s$  曲线随荷载增大而逐渐增加。

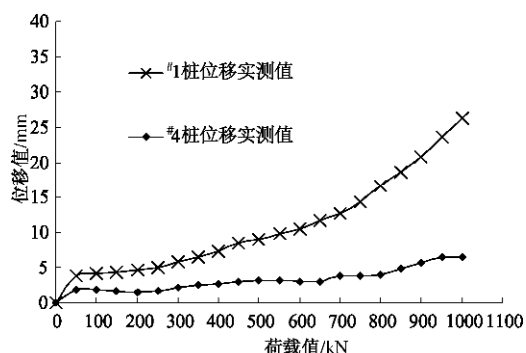


图 7 水平位移实测曲线

Fig. 7 Curves of measured horizontal displacement

### 3.4 试验分析

结合旋喷拱棚竖向位移实测曲线, 当荷载小于 700 kN 时, 外载由整体拱棚承担, 初期失误造成的裂缝并未扩展和影响拱棚结构的整体性能, 此时桩体搭接处尚未发生剪切破坏。当荷载加至 700 kN 时, 桩体搭接处裂缝开始扩展, 呈现剪切破坏。当荷载继续增大时, 外载一部分由拱棚结构承担, 另一部分由桩间裂缝处的咬合作用承担。以#4 旋喷桩为例, 由图 5 可以看出, 当荷载由 850 kN 加载至 1000 kN, 桩体竖向位移增大明显, 其位移增量占整个位移的 30.2%, 最大值为 85.83 mm, 此后#4 桩体位移无限增大, 桩间裂缝急剧增大, 此时拱棚宣告破坏。

结合旋喷拱棚水平位移实测曲线, 同样当荷载大于 700 kN 时, #1、#4 桩水平位移明显增大, 此时拱棚中间部位裂缝明显扩展, 拱脚处水平位移明显增大, 如曲线图 6 拱棚#1 桩水平位移曲线所示, 当荷载由 850 kN 加载至 1000 kN, 其水平位移增量占整个位移的 28.9%, 最大值为 26.4 mm, 此时外观检查发现拱脚处桩体出现挤压裂缝, 桩体处于破坏状态。

通过试验加载过程观测以及对变形曲线的分析, 可以发现旋喷拱棚结构受力变形特征与光滑拱结构相似, 可简化为光滑拱结构对其承载力进行估算; 拱棚结构旋喷桩体搭接处产生裂缝后, 自身能够进行力的重分配, 且拱棚结构并未发生突然的坍塌破坏, 受荷后变形趋势相对平稳; 拱棚结构的破坏, 主要是旋喷桩体搭接处裂缝的产生并不断扩展, 最终贯通引起的剪切破坏, 可以将裂缝的产生作为预警, 指导拱棚结构正常使用。

## 4 有限元模拟分析

### 4.1 有限元模型

计算模型几何尺寸与现场试验基本一致。土体用长、宽、高、分别为 20, 20, 10 m 的立方体来模拟, 为简化计算, 拱棚结构用光滑连续的拱体进行模拟, 如图 8 所示。脚拱与土体之间设接触面, 土体的约束条件为: 土层底部约束 3 个方向位移, 土体 4 个侧面约束水平方向的位移。

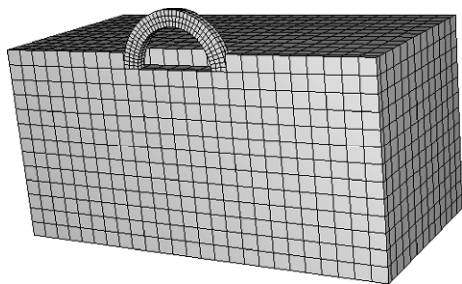


图 8 有限元计算模型剖面

Fig. 8 FEM model of jet grout arch

由于现场试验的旋喷拱棚结构所在土层均匀, 计算时将地基土体设为单一的材料, 杨氏模量  $E=20.6$  MPa, 泊松比  $\nu=0.3$ , 材料屈服服从 D-P 模型, 黏聚力  $c=0.069$  MPa, 摩擦角  $\phi=20^\circ$ ; 拱棚结构为各向同性线弹性材料, 密度为  $2000 \text{ kg/m}^3$ , 杨氏模量  $E=80$  MPa, 泊松比  $\nu=0.35$ 。

数值计算结果如图 9 所示, 由图 9 可以看出, 在整个加荷过程中, 拱棚的  $Q-s$  曲线基本呈线性发展, 其变化趋势及曲线形式与实测曲线较为相似, 位移计算最大值同样出现在#4 桩位置上, 其最大值为 63.87 mm。

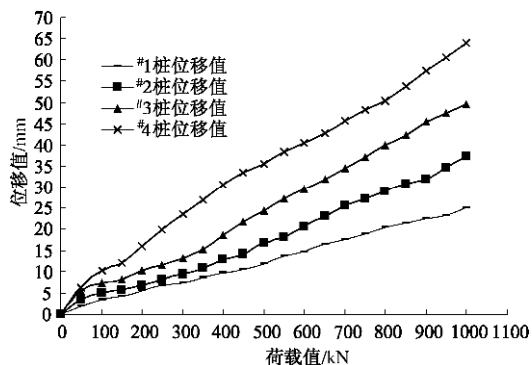


图 9 桩位移计算值

Fig. 9 Calculated values of pile settlement

### 4.2 模拟结果与实测值的对比

#### (1) 竖向位移对比

拱棚竖向位移计算值与实测值的曲线变化趋势基本相似如图 10 所示。由图 10 可知, #1 桩的位移计算值明显大于实测值, 最大位移计算值为 25.02 mm, 实测值仅为 12.77 mm; #4 桩体最大位移实测值为 85.83 mm, 最大计算值为 63.87 mm。

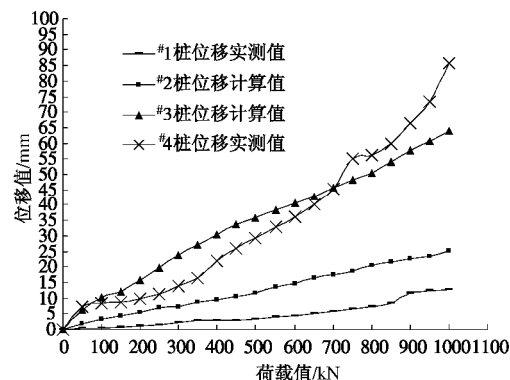


图 10 竖向位移实测值-计算值对比曲线

Fig. 10 Comparison between FEM and test results of vertical displacement

#### (2) 水平向位移情况对比

与竖向位移对比曲线相似, 两者水平位移  $Q-s$  曲线基本呈线性变化如图 11 所示。由图 11 可知, #1 桩的位移计算值与实测值较为接近, 最大位移计算值为 26.4 mm, 实测值为 23.9 mm。

由图 10, 11 可以看出, 位移实测值与计算值存在一定的偏差, 主要是在进行旋喷桩体施工过程中, 由于土体本身的不均匀性以及旋喷工艺存在的某些不确定性因素, 使得桩体成桩质量不可控, 加之桩与桩之间的搭接质量不可控等因素的存在, 使得两者之间存在一定的偏差。另外, 进行拱棚桩体的模拟计算过程中, 使用一些简化手段, 模拟计算值较为理想化, 使得桩体位移实测值与理论值有所差异。尽管存在偏差, 但是从位移整体的变化趋势上看, 两种位移结果变化较为相似, 理论计算值可以为今后的工程应用提供一

些有益的参考。

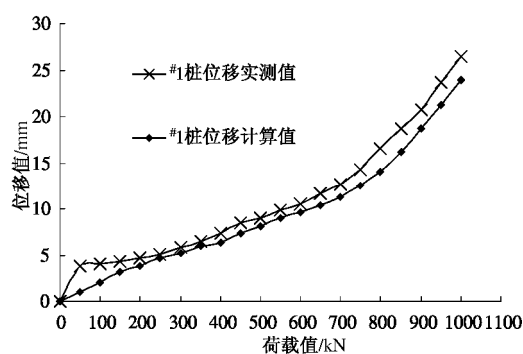


图 11 桩水平位移实测值 - 计算值比较曲线

Fig. 11 Comparison between FEM and test results of horizontal displacement

## 5 结 论

(1) 试验结果表明, 旋喷桩体搭接紧密且无裂缝, 施工效果良好, 验证了新工法和配套设备对确保加固体质量、有效控制加固体周围岩土体变形的可行性和可靠性。

(2) 水平旋喷拱棚结构的载荷试验表明, 拱棚结构在受荷后变形相对稳定, 自身能够进行内力重分配, 且并未发生突然的坍塌破坏; 拱棚结构的破坏主要是旋喷桩体搭接处产生裂缝并不断扩展, 最终贯通引起的剪切破坏; 可以将裂缝的产生作为拱棚结构破坏的预警提示。

(3) 实测值及模拟计算值对比表明, 拱棚竖向位移和水平位移均随荷载的增大而增加, 最大位移值均出现在拱顶位置处。

## 参考文献:

- [1] TORNAGHI R, PERELLI CIPPO A. Soil improvement by jet grouting for the solution of tunneling problems[C]// Proceedings of the 4th international symposium Tunnelling'85, England, 1985.
- [2] ESTERS K. HDI-horizontal als sicherungsschirm im Tunnelbau[C]// Vortraege zur Veranstaltung am 5.9.1991 an der Universitaet GH Essen: "Tunnelbau im Rhein-Ruhr-Gebiet", 1991.
- [3] 连载讲座小委员会. 高压喷射式フォアパイリング(2)—MJS(メトロジェットシステム)工法—[J]. トンネルと地下, 1995, 26(7): 77 - 84. (Serial lecture subcommittee. Jet grouting forepiling (2)-MJS method[J]. Tunnels and underground, 1995, 26(7): 77 - 84. (in Japanese))
- [4] LIU Zhong, ZHANG Hui-le. An experimental research on full scale tunnel jet grouting arch[C]// New development in rock mechanics and engineering, Sanya, China, 2009: 477 - 484.
- [5] 徐至均. 高压喷射注浆法处理地基[M]. 机械工业出版社, 2004. (XU Zhi-jun. High pressure jet grouting to deal with the foundation[M]. Machinery Industry Press, 2004. (in Chinese))
- [6] 曾国熙, 卢肇钧, 蒋国澄. 地基处理手册[M]. 中国建筑工业出版社, 1988. (ZENG Guo-xi, LU Zhao-jun, JIANG Guo-cheng. Ground handling manual[M]. China Building Industry Press, 1988. (in Chinese))
- [7] 朱庆林. 水平旋喷[C]// 第二届全国地基处理学术讨论会论文集. 中国建筑工业出版社, 1989: 435 - 443. (ZHU Qing-lin. Horizontal jet grouting[C]// The second session dealt with the National Foundation Symposium Proceedings. Beijing: China Building Industry Press, 1989: 435 - 443. (in Chinese))
- [8] 张 晓, 杨建国, 王运周, 等. 水平旋喷桩预支护在软弱黄土隧道中的试验研究[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(1): 36 - 40. (ZHANG Xiao, YANG Jian-guo, WANG Yun-zhou, et al. Application of pre-supporting with horizontal jet grouting piles for a weak loess tunnel[J]. Modern Tunnel Technology, 2010, 47(1): 36 - 40. (in Chinese))
- [9] 杨宏射. 水平旋喷技术在兴旺岭隧道砂层加固施工中的应用[J]. 隧道建设, 2010, 30(1): 100 - 105. (YANG Hong-she. Application of horizontal jet grouting technology in consolidation of sand strata during construction of Xingwangmao tunnel[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(1): 100 - 105. (in Chinese))
- [10] 于家宝. 水平旋喷桩预支护施工技术[J]. 铁道建筑, 2003(9): 40 - 42. (YU Jia-bao. Jet grouting level of pre-support construction technology[J]. Railway Construction, 2003(9): 40 - 42. (in Chinese))
- [11] 刘 勇, 孙星亮, 朱永全, 等. 水平旋喷预支护技术在铁路隧道中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 905 - 909. (LIU Yong, SUN Xin-liang, ZUN Yong-quan, et al. Jet advance the level of support technology in the railway tunnel[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 905 - 909. (in Chinese))
- [12] 孟凤朝. 深圳地铁大 - 科区间隧道水平旋喷桩施工技术[J]. 铁道工程学报, 2003(2). (MENG Feng-chao. Shenzhen Metro-Section level jet tunnel pile[J]. Journal of Railway Engineering, 2003(2). (in Chinese))
- [13] 刘 钟, 柳建国, 张 义, 等. 隧道全方位高压喷射注浆拱棚超前支护新技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,

- 28(1): 59 - 65. (LIU Zhong, LIU Jian-guo, ZHANG Yi, et al. New technique of rotary horizontal jet grouting for arched tunnel pre-support[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 59 - 65. (in Chinese))
- [14] 李远宁, 段玉刚, 吴 胜. 浅埋软弱地层隧道旋喷预衬砌支护技术的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2001, 5: 58 - 61. (LI Yuan-ning, DUAN Yu-gang, WU Sheng. Study on the initial lining technique by jet-grouting used in thin covered tunnels in weak formation[J]. Exploration Engineering (Drilling & Tunneling), 2001(5): 58 - 61. (in Chinese))
- [15] 李相然, 贺可强. 高压旋喷注浆技术与应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007. (LI Xiang-ran, HE Ke-qiang. Technique of high pressure jet grouting[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [16] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004. (WANG Meng-shu. Technology of shallow tunnel excavation[M]. Hefei: Anhui Education Press, 2004. (in Chinese))
- [17] 柳建国, 刘 钟, 刘 波, 等. 隧道超前支护与水平旋喷技术开发[J]. 现代隧道技术, 2008(增刊): 398 - 403. (LIU Jian-guo, LIU Zhong, LIU Bo, et al. Exploitation for tunnel advance support and horizontal jet grouting technology[J]. Modern Tunnel Construction, 2008(S0): 398 - 403. (in Chinese))
- [18] 张云星, 崔江余. 水平旋喷桩在长安街复线热力管道中的应用[J]. 西部探矿工程, 2004, 101(10): 4 - 5. (ZHANG Yun-xing, CUI Jiang-yu. Application of horizontal rotating-jet grout pile in Chang anjie doubleheat pipe engineering[J]. West-China Exploration Engineering, 2004, 101(10): 4 - 5. (in Chinese))
- [19] 全学让, 薛模美. 水平旋喷桩在地铁暗挖隧道施工中的应用[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(3): 51 - 54. (TONG Xue-rang, XUE Mo-mei. Application of horizontal rotary jet grouting piles to metro built bymining method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(3): 51 - 54. (in Chinese))
- [20] PETROS P X, LEE W A, DONALD A B. Ground control andimprovement[M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1994.
- [21] GIORGIO G, PAOLO M, AKIRA K, et al. Application of jet grouting to tunnel portals and top headings in N. A. T. M. tunneling: Brazilian experience[C]// BELL A L ed. Grouting in the Ground. London: Thomas Telford, 1992: 455 - 467.

### 请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 4 版确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中排列首位; 本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊), 并被评为“百种中国杰出学术期刊”; 本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录, 并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》以及本刊网站全文检索; 本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, 大 16 开, 双栏排版, 160 页, 每月中旬出版, 2009 年起每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000 - 4548, 国内统一刊号 CN32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: (210024) 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 联系电话: (025) 85829534, 85829553; 传真: (025) 85829555; E-mail: [ge@nhri.cn](mailto:ge@nhri.cn)。

(本刊编辑部)