

DOI: 10.11779/CJGE2015S2021

# 富水软弱地层隧道水平旋喷与大管棚预支护研究及应用

石钰锋<sup>1</sup>, 蔡理平<sup>2</sup>, 阳军生<sup>3</sup>, 胡文韬<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 广州铁路(集团)公司, 广东 广州 510010; 3. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 水平旋喷桩有良好的地层加固及止水功能, 然而地层条件、材料特性及工艺所限, 难以形成均匀封闭的理想壳体, 不能在掌子面前上方组合成有利的预支护壳体结构。为此, 笔者提出水平旋喷桩与大管棚复合预支护方案, 并采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件, 建立考虑流固耦合的三维模型, 对该方案加固机理进行研究。结果表明, 在水平旋喷桩下方增设大管棚, 可减小桩体的塑性区范围、拉应力, 改善旋喷桩的受力; 复合结构能充分发挥各自力学优点, 即横向可发挥水平旋喷桩的“拱效应”, 纵向上利用管棚的“梁效应”; 同等条件下, 降低水平旋喷桩所受拉应力, 从而提高水平旋喷桩自身稳定及加固效果。该方案在广珠铁路江门隧道下穿富水河道段获得了成功应用, 可为类似工程设计提供参考。

**关键词:** 富水软弱地层; 水平旋喷; 大管棚; 数值分析

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0101-06

作者简介: 石钰锋(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要从事隧道与地下工程方面的研究工作。E-mail: s074811156@126.com。

## Combination reinforcement mechanism of sub-horizontal jet-grouting and pipe roof in water-rich soft stratum

SHI Yu-feng<sup>1</sup>, CAI Li-ping<sup>2</sup>, YANG Jun-sheng<sup>3</sup>, HU Wen-tao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Guangzhou

Railway(Group) Corporation, Guangzhou 510010, China; 3. Central South University, Civil Engineering School, Changsha 410075 China)

**Abstract:** The horizontal jet-grouting pile, which is applicable in soil reinforcement and water isolation, is hard to assemble an ideal homogeneous sealed pre-reinforced shell accounting for the restriction of geological condition, material characters and construction technology. For improvement, a composite pre-reinforcement technique utilizing horizontal jet-grouting piles and large pipe shed is proposed. The corresponding 3-D numerical model considering fluid-solid coupling effects is established using FLAC<sup>3D</sup> for further analysis. The results show that the range of the plastic zone decreases by adding extra pipe shed beneath the piles. The “arch support effect” of piles in horizontal direction and “beam support effect” of shed in vertical direction can be fulfilled. With this technique, the value of the stretch stress of the horizontal rotary jet-grouting piles will be reduced, which results in better stability and reinforcement effect of piles. This technique is successful applied in the water-rich section of Jiangmen tunnel in Guangzhou-Zhuhai Railway, which may provide suggestions for similar projects.

**Key words:** water-rich soft stratum tunnel; sub-horizontal jet-grouting; pipe roof; numerical analysis

## 0 引言

水平旋喷桩较土层而言是大刚度脆性材料, 具有良好的地层加固效果, 当其桩间咬合、搭接良好时, 止水功能佳, 是富水软弱地层暗挖隧道预支护首选方案之一。然而, 受其材料特性及工艺影响, 存在以下问题: ①因其刚度较大, 隧道开挖时承担大部分上覆土压, 在富水地层中, 还需承担一定水压, 存在破坏可能; ②当遇软岩大跨隧道掌子面失稳、大进尺、支护不及时等特殊情况时, 水平旋喷桩极可能失稳, 且其失稳常表现为大范围的突发, 增大预防及处理工作的难度; ③受工艺所限, 常面临“空桩”、咬合不均、桩径变化等缺陷<sup>[1-2]</sup>, 桩体抗拉性极差, Flora 甚至认

为设计中可不考虑桩体抗拉强度<sup>[2]</sup>。因此, 在特殊工程中需要考虑对水平旋喷桩进行改进。

为克服水平旋喷桩上述缺陷, 提高加固效果, 笔者提出水平旋喷桩与大管棚复合预支护手段<sup>[3]</sup>。目前, 水平旋喷桩及大管棚单独作为地层预支护手段应用较多, 且有较深研究。Babak 等通过一系列实验对旋喷桩的物理力学性质进行研究<sup>[4]</sup>, Coulter 等结合监测及数值手段, 研究旋喷桩材料属性及安装顺序对地层变形的影响, 并采用试验手段研究旋喷桩在 24 h 内强度

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208198); 江西省交通厅科研项目(2011H0019)

收稿日期: 2015-03-26

及刚度的增长规律<sup>[5]</sup>。Christia 提出考虑旋喷浆液强度、刚度增长规律(化学硬化及弹性老化), 化学收缩(水化过程、微裂隙、徐变)、等因素的复杂材料模型, 并采用该模型对不同旋喷方案的加固效果展开了研究<sup>[6]</sup>。国内各大铁路院校、企业单位采用模型试验、室内试验、数值等手段对水平旋喷桩展开了相关研究, 石家庄铁道学院及中国京冶工程技术有限公司, 各自进行了水平旋喷桩的现场足尺试验<sup>[7-10]</sup>; 管棚相关研究更多, 不赘述。

然而, 水平旋喷桩与大管棚复合加固的应用在江门隧道尚属首例, 对其深入研究更未见报道, 而这对方案设计意义重大。本文针对水平旋喷桩与大管棚的各自特点, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件, 建立考虑流固耦合的三维模型, 对该复合方案进行研究。

## 1 工程概况

广珠铁路江门隧道 DK111+115—210 段所处为丘区沟谷地, DK111+140—195 段为山谷谷底, 有一泄洪道, 宽约 20 m, 基于征地难度大及环境保护考虑, 隧道采用暗挖法下穿该泄洪道。隧道洞身上部位于全风化花岗岩中, 下部位于强—微风化花岗岩中, 围岩等级为 VI 级, 隧道最浅埋深仅 3 m, 见图 1。隧道开挖宽 11.86 m, 高 11.6 m, 面积约 120 m<sup>2</sup>, 初支采用 27 cm 厚 C25 喷射混凝土, I22 工字钢, 0.5 m/榀; 二衬采用 C35 钢筋混凝土, 拱墙厚 50 cm, 仰拱 60 cm, 见图 2。

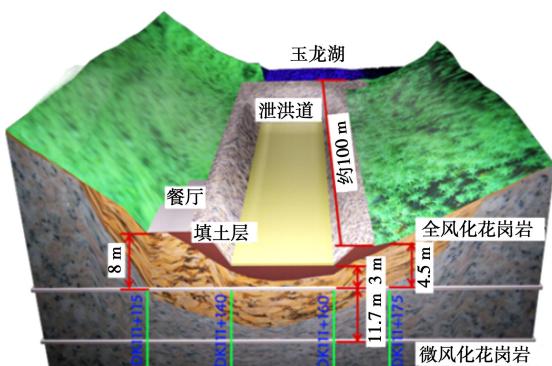


图 1 江门隧道下穿河道三维剖视图<sup>[11]</sup>

Fig.1 3D view of geological profile beneath Jiangmen tunnel

试验获得该段全风化花岗岩物理力学参数, 密度=1.75 g/cm<sup>3</sup>, 含水率=21.8%, 黏聚力=12.99 kPa, 内摩擦角=29.8°, 渗透系数=9.674×10<sup>-4</sup> cm/s。可见, 围岩的黏聚力小, 渗透系数较大, 不利于隧道稳定。

该隧道特点为超浅覆、地层富水、上软下硬、大断面, 施工难度大、风险高, 必须进行预支护。

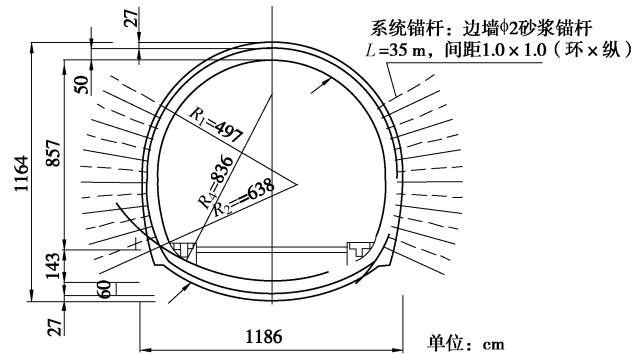


图 2 VI 级围岩断面支护图

Fig. 2 Section of tunneling support system

施工阶段根据初步计算提出水平旋喷与大管棚复合预支护方案: 水平旋喷桩加固范围为上部软岩区隧道轮廓线外, 桩径为 50 cm, 桩长 50 m, 环向间距为 0.35 m, 相邻加固体咬合厚度大于 10 cm。大管棚预支护范围为拱部 120° 范围内, 长 50 m, 环向间距 40 cm, 如图 3 所示。

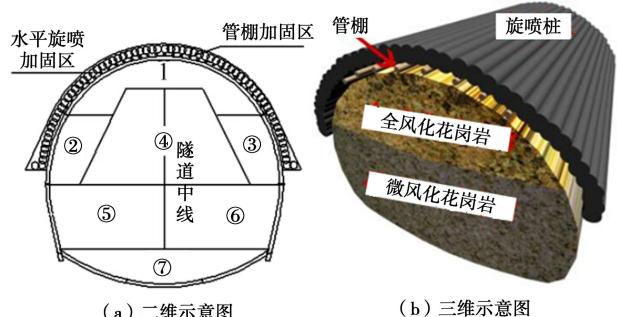


图 3 水平旋喷及管棚方案

Fig. 3 Schematic view of horizontal jet-grouting and pipe-roof grouting

## 2 复合预支护方案数值研究

### 2.1 模型建立

选取 DK111+125—175 段共 50 m 范围建立三维模型。为克服边界影响, 模型横向单侧取 50 m(约 4D); 竖向自地表(谷底标高)往下取 30 m, 并考虑山谷地形特点, 泄洪道岸边高出其 8m, 故模型竖向高 38 m。根据对称原理, 建立 1/2 模型, 整体模型大小为 50 m×50 m×38 m (X-Y-Z), 其中, X 为横向, Y 为纵向, Z 为竖向, 见图 4。

边界条件: 模型底面为固定边界, 侧面为水平约束, 顶面为自由面, 考虑泄洪道汛期 6 m 的平均水位。对下穿泄洪道段分析, 从图 4 所示初始状态开始, 分析各部开挖对地层扰动及隧道稳定性。图中上台开挖 10 m, 预留核心土 4 m, 中台滞后核心土 4 m, 中台靠近边墙处滞后核心土 6 m, 下台阶及仰拱暂未开挖。

开挖步骤为, 上台阶每步进尺 1 m, 中台每步进尺 2 m, 预留核心土, 下台阶和仰拱视为一体, 每步进尺 4 m, 3 个台阶支护均滞后相应台阶一个进尺, 每次开挖计算平衡后, 施做上一进尺支护再次计算平衡, 如此循环直至隧道贯通且计算平衡。

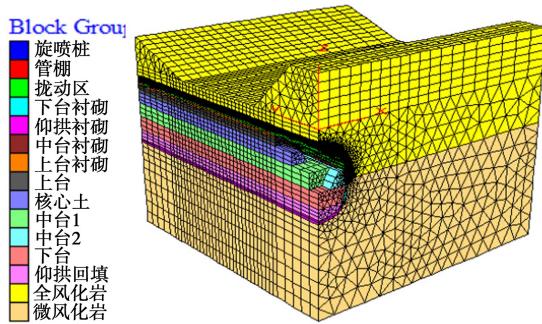


图 4 模拟初始开挖状态

Fig. 4 Simulation view of initial excavation state

## 2.2 模型及参数选取

围岩、水平旋喷桩及管棚采用实体单元模拟(局部网格图 5), 初支采用壳(shell) 单元模拟。因桩体及管棚尺寸较模型尺寸相差很大, 模拟旋喷桩和管棚时, 需对其及周边地层加密, 因此 1/2 模型单元数达 18 万。

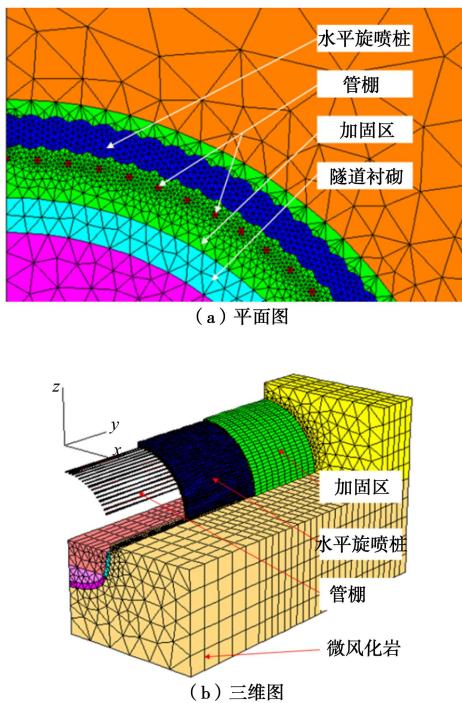


图 5 模拟初始开挖状态

Fig. 5 Simulation view of initial excavation state

围岩及旋喷桩服从 M-C 准则, 管棚及初支取弹性本构。参数依据勘察报告<sup>[11]</sup>、试验以及相关文献<sup>[5]</sup>选取。试验得旋喷桩力学参数: 抗拉强度=1.74 MPa,

压强度=26.55 MPa, 弹性模量=4.07 GPa, 泊松比=0.2。管棚参数按钢管混凝土等效换算, 取值见表 1。

表 1 各地层主要物理参数

Table 1 Main physical parameters of various strata

材料	$\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )	E/MPa	$\nu$	c/kPa	$\varphi$ (°)
全风化花岗岩	1800	30	0.30	12.99	29.8
岩					
花岗岩	2200	$50 \times 10^3$	0.22	$55 \times 10^3$	51.0
旋喷加固区	2150	$4.07 \times 10^3$	0.20	900	38.0
岩体					
管棚	2150	$112 \times 10^3$	0.20	—	—
初期支护	2400	$2.68 \times 10^4$	0.20	—	—

注:  $\rho$  为密度,  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $c$  为黏聚力,  $\varphi$  为内摩擦角。

上部软岩(全风化花岗岩)扩散特征时间为 6.8 s, 工程中实际时间远大于扩散特征时间, 流固耦合时必须考虑排水稳定状态分析。为此, 选择 FLAC<sup>3D</sup> 的流固耦合模块进行模拟。围岩及加固区的渗透参数见表 2, 根据文献[13]选取。

表 2 地层渗透参数<sup>[12]</sup>

Table 2 Parameters for seepage of ground

材料	渗透系数 $k$ /(cm·s <sup>-1</sup> )	孔隙率 $n$
全—强风化花岗岩	$6 \times 10^{-4}$	0.20
加固区	$3 \times 10^{-5}$	0.10
微风化花岗岩	$10^{-13}$	0.01

## 2.3 工况拟定

Flora 在现场试验统计分析基础上, 认为设计中可不考虑旋喷桩的抗拉强度(下文用  $\sigma_t$  表示)<sup>[2]</sup>。本文取  $\sigma_t=0$ , 分别计算水平旋喷及其与大管棚复合预支护方案, 水平旋喷加固范围为上部软岩区隧道轮廓线外, 桩径为 50 cm, 桩长 50 m, 环向间距为 0.35 m, 相邻加固体咬合厚度大于 10 cm。大管棚预支护范围为拱部 120° 范围内, 长 50 m, 环向间距 40 cm。

同时假设  $\sigma_t=0.5$  MPa, 对两种加固方案进行计算, 以便对其进行深入分析, 工况见表 3 所示。

表 3 工况拟定表

Table 3 Test cases

加固方案	水平旋喷	水平旋喷+大管棚
$\sigma_t=0$	工况一	工况二
$\sigma_t=0.5$ MPa	工况三	工况四

## 2.4 结果分析

### (1) 旋喷桩 $\sigma_t=0$

图 6 为隧道开挖至泄洪道正中间 ( $y=25$  m) 时, 加固区的塑性区分布图。

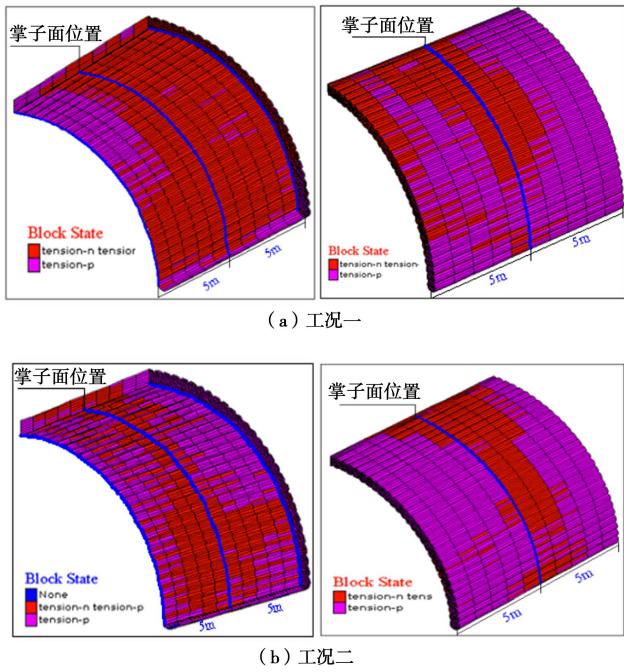


图 6 两种工况下旋喷桩塑性区分布

Fig. 6 Distribution of plastic zone of sub-horizontal jet-grouting columns

工况一掌子面里程附近出现大面积的塑性区，靠近隧道内侧塑性区较靠近围岩侧范围大，拱部增设大管棚后塑性区范围大大减小。旋喷桩（局部）进入受拉塑性后，应力进行重分布，进入受压状态，但压应力较小，工况一、二压应力最大值分别为 0.13, 0.28 MPa。工况二下管棚受到较大拉应力，受拉区域主要位于掌子面前方 5 m 的拱部，最大拉应力达 0.53 MPa（图 7）。可见，其与旋喷桩形成了下侧（管棚）受拉，上侧受压（旋喷桩体）的组合结构，充分发挥了各自的力学优点。

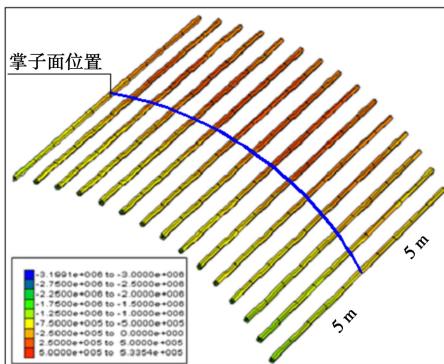
图 7 管棚最大主应力云图( $y=20-30$ )

Fig. 7 Maximum primary stress of pipe roof

水平旋喷加固区自身面临局部失稳可能，增设管棚后可有效减小水平旋喷桩体的塑性区，与此同时，其与旋喷桩形成下部耐拉上部耐压的组合结构，提高组合体的稳定。

## (2) 旋喷桩 $\sigma_t=0.5$ MPa

考虑桩体抗拉强度后，旋喷桩自身未进入塑性，说明加固区处于稳定状态，但在掌子面里程附近纵向出现较大拉应力区，图 8 为隧道开挖至模型中部时，拱顶正上方旋喷桩沿隧道轴向水平应力纵向分布图。

工况三下，掌子面附近旋喷桩纵向水平应力  $\sigma_y$  为拉应力，纵向呈凸槽分布，凸槽最高点位于掌子面(附近)，高达 0.36 MPa。掌子面后方 4 m 之外  $\sigma_y$  为压应力，13 m 处达最大拉应力，12 m 之后压应力开始减小；掌子面前方 5 m 之外拉应力开始减小。增设大管棚后，桩体受拉范围增大，应力值减小，说明增设大管棚后，可使旋喷桩内力分布趋于均匀，从而减小桩体的拉应力，改善旋喷桩的受力。

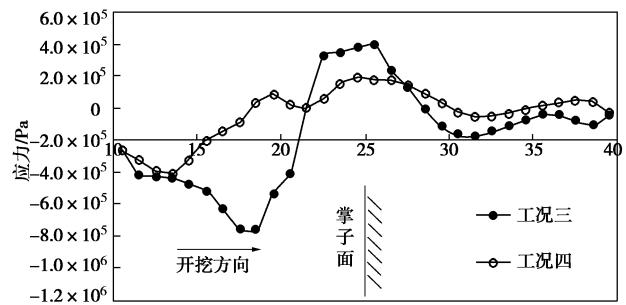


图 8 旋喷桩沿隧道轴向水平应力纵向分布

Fig. 8 Stress of jet-grouted columns in longitudinal direction

旋喷桩  $y=25$  m 处  $\sigma_y$  横向分布表现为，工况三下，按应力状态不同可分为受拉区(上部)、受压区(下部)，拉应力最大值达 0.37 MPa，最大压应力约为 1.32 MPa；增设大管棚后，旋喷桩横向总体受力规律不变，但最大应力值分别减小为 0.18, 0.71 MPa。

计算表明，当取旋喷桩  $\sigma_t=0$  时，桩体本身面临局部塑性破坏可能，增设大管棚可减小其塑性区范围，同时形成下部受拉上部受压的组合结构；当取旋喷桩  $\sigma_t=0.5$  MPa 时，桩体处于弹性状态，但拱部承受一定纵向拉应力，增设大管棚后，桩体受拉范围增大，但量值减小 50%以上。

## 3 预支护力学机制探讨

当隧道开挖至模型中间位置时，对图 9 所示各点进行横向应力分析，计算其平面内的主应力，如表 4 所示。

计算显示，横向平面上主应力均为压应力，水平旋喷在横向呈受压拱效应。

对水平旋喷桩应力分析可知，拱部旋喷桩第一主应力为正（受拉），方向近似平行于桩体纵轴。工况三下，拱部测点（A、B 系列）位置出现较大拉应力，第一主应力达 0.42 MPa，拱腰以下测点（C、D 系列）

均受压; 工况四下, 拱部测点主应力显著减小, 减小比例达 50%以上, 其余测点受力基本不变 (表 5)。

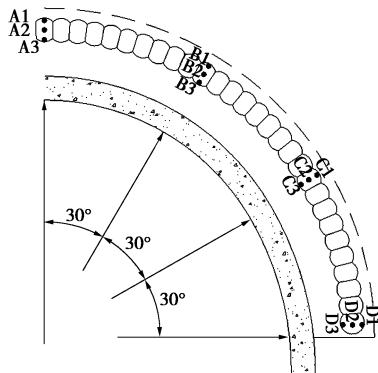


图 9 旋喷桩应力分析测点布置图

Fig. 9 Arrangement of measuring points for pile stress analysis

表 4 工况三旋喷桩各测点平面主应力

Table 4 Transverse principal stress at measuring points in case 3

(MPa)

工况	$\sigma_1$	$\sigma_2$
A1	-0.02	-0.12
B1	-0.02	-0.65
C1	-0.1	-0.69
D1	-0.02	-0.80
A2	-0.02	-0.05
B2	-0.05	-0.71
C2	-0.06	-1.00
D2	-0.09	-0.90
A3	-0.02	-0.08
B3	-0.05	-0.39
C3	-0.08	-0.84
D3	-0.07	-0.74

注: 负值表示受压。

表 5 工况三、四旋喷桩各测点第一主应力列表

Table 5 First principal stress at measuring points in cases 3 & 4

(MPa)

A1	0.42(0.18)	A2	0.37(0.13)	A3	0.28(0.05)
B1	0.26(0.11)	B2	0.19(0.07)	B3	0.05(0.01)
C1	-0.1(-0.07)	C2	-0.06(-0.05)	C3	-0.07(-0.03)
D1	-0.12(-0.12)	D2	-0.80(-0.80)	D3	-0.07(-0.08)

注: 应力值拉正压负, 括号内为工况四旋喷桩最大主应力。

水平旋喷桩横向表现为拱效应, 而在纵向上则表现为梁效应, 在隧道卸荷作用下, 出现一定范围的受拉区。而管棚加固机理为纵向梁效应, 两者复合可组成具有三维梁拱效应的组合结构。该结构在同等条件下, 可降低单层水平旋喷桩的拉裂可能, 提高加固区自身的稳定性, 从而可提高水平旋喷桩的加固效果, 尤其是其在富水地层中的阻水效果。

#### 4 复合预支护方案效果

施工中对地表沉降及洞内衬砌变形进行监测, 垂

直于隧道中线的横向每隔 10 m 布置一个监测断面, 以 DK111+140 断面地表沉降为例, 进行沉降实测值与模拟值对比, 该断面地表沉降现场实测最大值为 44.8 mm, 稍大于模拟计算值。因为计算中理想化了水平旋喷桩的止水及加固效果 (图 10)。

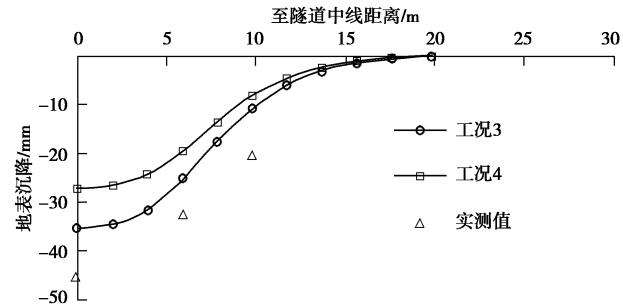


图 10 地表沉降实测与模拟对比图

Fig. 10 Comparison between measured and simulated values of ground surface settlement (DK111+140)

同时, 施工中对初支钢架内力测试, 结果显示: 初支受力较小, 最大弯矩 3.9 kN·m, 轴力 356.2 kN, 位于隧道拱顶, 最小安全系数可达 3.7<sup>[3]</sup>。

采用水平旋喷与大管棚复合预支护方案, 地层变形可控, 隧道结构受力减小。该方案有效规避了风险, 保证了隧道安全、快速下穿泄洪道。

## 5 结 论

(1) 在浅埋富水软弱地层进行大跨暗挖隧道施工, 采用水平旋喷桩进行加固, 桩体本身承受一定拉应力, 易产生塑性区, 存在失稳可能。

(2) 在水平旋喷桩拱部下方增设大管棚, 可减小桩体的塑性区范围、拉应力, 改善旋喷桩受力, 两者形成能充分发挥各自力学优点的组合结构, 分担支护结构的上覆荷载。

(3) 组合结构在横向可发挥旋喷桩的“拱效应”, 纵向上利用管棚的“梁效应”, 空间上形成“梁拱效应”。同等条件下, 可减小水平旋喷桩的拉裂可能, 从而提高水平旋喷桩的加固效果。

## 参考文献:

- [1] TONON F. ADECO full-face tunnel excavation of two 260 m<sup>2</sup> tubes in clays with sub-horizontal jet-grouting under minimal urban cover[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(2): 253 - 266.
- [2] FIORA A, LIGNOLA G P, MANFREDI G A semi-probabilistic approach to the design of jet grouted umbrellas in tunneling[J]. Ground Improvement, 2007, 11(4): 207 - 217.

- [3] 石钰峰, 阳军生, 邵华平, 等. 超浅覆大断面暗挖隧道下穿富水河道施工风险分析及控制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 229 - 234. (SHI Yu-feng, YANG Jun-sheng, SHAO Hua-ping, et al. Risk analysis and control study of super-shallow tunnel with largecross-section under water-rich channel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 229 - 234. (in Chinese))
- [4] NIKBAKHTAN B, OSANLOO M. Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46: 498 - 505.
- [5] COULTER S, MARTIN C D. Effect of jet-grout on surface settlements above the Aescher tunnel, Switzerland[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21: 542 - 553.
- [6] PICHLER C, LACKNER R, MARTAK L, et al. Optimization of jet-grouted support in NATM tunneling[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28: 781 - 796.
- [7] 孙星亮, 王海珍. 水平旋喷固结体力学性能试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 1695 - 1698. (SUN Xing-liang, WANG Hai-zhen. Testing on physical and mechanical properties of horizontal jet-grouted soilcrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 1695 - 1698. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 柳建国, 张慧乐, 张慧东, 等. 水平旋喷拱棚新工艺与载荷试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 921 - 927. (LIU Jian-guo, ZHANG Hui-dong, ZHANG Hui-le, et al. New technology and loading tests of horizontal jet grouting arch [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 921 - 927. (in Chinese))
- [10] 张慧乐, 张慧东, 王述红, 等. 水平旋喷拱棚结构的承载特性及机理研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(8): 131 - 139. (ZHANG Hui-le, ZHANG Hui-dong, WANG Shu-hong, et al. Study on the bearing characteristics and mechanism of horizontal jet grouting arch structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(8): 131 - 139. (in Chinese))
- [11] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 江门隧道暗挖段勘察设计报告[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2008. (China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., LTD. Survey and design report of Jiangmen tunnel excavation[R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., LTD. 2008. (in Chinese))
- [12] Itasca Consulting Group, Inc..FLAC3D Fluid-mechanical interaction(Version 2.1)[R]. Itasca Consulting Group, Inc., 2003.
- [13] YOO C. Interaction between tunneling and groundwater-numerical investigation using three dimensional stress-pore pressure coupled analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 240 - 250.

(本文责编 胡海霞)