文章编号:1673-9469(2024)01-0052-10 DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.01.008

基于水平旋喷桩处置优化的地铁隧道施工变形控制分析

王立新[1,2],高 洋[3],汪 珂[1,2],李储军[1],邱军领[3*]

(1.中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安 710043;2.西安理工大学 土木建筑工程学院,陕西 西安 710048;3.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为研究富水砂层隧道中水平旋喷桩+超前小导管组合预加固的效果,以青岛地铁某区间段隧道为依托,采用有限元数值模拟方法,对比分析了无预加固、单独使用水平旋喷桩及旋喷桩配合超前小导管组合预加固三种工况的加固效果。结果表明,与无预加固方案相比,单独使用水平旋喷桩预加固可使地表沉降、拱顶沉降、掌子面纵向位移分别相应减少约61%、59%、38%;而水平旋喷桩与超前小导管组合预加固方案可使地表沉降、拱顶沉降、掌子面纵向位移分别相应减少约66%、77.6%、38.9%,典型开挖断面处与拱脚处地下水渗流量分别减少93.4%、96.7%,预加固效果与止水效果显著。

关键词:水平旋喷桩;富水砂层;数值模拟;止水效果;预加固

中图分类号:U455.6 **文献标识码**:A

Analysis of Deformation Control During Subway Tunnel Construction Based on Optimization of Horizontal Rotary Jet Grouting Pile Disposal

WANG Lixin[1,2], GAO Yang[3], WANG Ke[1,2], LI Chujun[1], QIU Junling[3*]

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi´an, Shaanxi 710043, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi´an University of Technology, Xi´an, Shaanxi 710048, China;
3. School of Highway, Chang´an University, Xi´an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: In order to study the effect of horizontal rotary jet grouting pile plus advanced small pipe combination pre-reinforcement in the rich water sand layer tunnel, based on a section of the Qingdao Metro tunnel, the finite element numerical simulation method was used to compare and analyze the reinforcement effect of three working conditions: non-pre-reinforcement, using horizontal rotary jet grouting pile alone, and rotary jet grouting pile combined with advanced small pipe combination pre reinforcement. The results show that compared with the non-pre-reinforcement scheme, the use of horizontal rotary jet grouting pile pre -reinforcement alone can reduce surface settlement, arch settlement, and longitudinal displacement of the palm face by about 61%, 59%, and 38%, respectively. The combination of horizontal rotary jet grouting pile and advanced small conduit pre reinforcement scheme can reduce surface settlement, arch crown settlement, and longitudinal displacement of the palm face by about 66%, 77.6%, and 38.9%, respectively. The groundwater seepage flow at typical excavation sections and arch feet can be reduced by 93.4% and 96.7%, respectively. The pre-reinforcement effect and water stop effect are significant.

Key words: horizontal jet grouting pile; water-rich sand; numerical simulation; effect of water stop; pre-reinforcement

收稿日期:2023-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078421);陕西省"特支计划"青年拔尖人才项目(陕组通字〔2018〕33号);中铁一院科研项目(院科19-75-01)

作者简介:王立新(1983-),男,吉林德惠人,博士,正高级工程师,主要从事隧道与地下工程设计与研究工作。

*通信作者:邱军领(1989-),男,山东潍坊人,博士,讲师,主要从事隧道与地下工程的教学和研究工作。

近年来,随着我国城市轨道交通的高速发展[1],隧道施工穿越的地质环境愈发复杂[2-3],尤其是穿越富含地下水、围岩稳定性较差的地层[4],易产生涌水坍塌等地质灾害,施工风险更高。水平旋喷注浆技术[5-7]作为一种新的超前支护手段,具有可控性好、均匀性好、成本低、效率高的优点;浆液注入部位与范围可控,水泥用量仅为成桩体积的 30%~40%;旋喷桩桩体具有提高复合土体强度、抗滑、防渗止水的效果[8]。李又云等[9]以傅家窑隧道为基础,通过浸水模型试验研究分析旋喷桩在不同浸水情况下的预加固效果,结果表明水平旋喷桩能够有效约束隧道变形。翟志国等[10]通过现场监控量测,研究证明在富水软弱地层采用水平旋喷桩预加固效果显著,能够有效隔离地下水。贾锋[4]以青岛地铁万年泉路站—李村站区间隧道为基础,通过数值模拟,分析旋喷桩在富水砂层隧道中的预加固效果,结果表明,通过旋喷桩止水效果显著,地层性质得到改善。骆瑞萍等[11]通过现场监测与数值模拟分析,验证了旋喷桩注浆加固技术在富水淤泥地层隧道中的有效性。目前,针对水平旋喷桩预加固技术在隧道中的应用研究仅对单一的水平旋喷技术的预加固效果进行分析,而对水平旋喷技术与其他超前支护手段共同施作时对围岩预加固效果的分析研究鲜有报道。

鉴于此,以青岛地铁某区间段隧道为依托,采用有限元软件建立数值计算模型,模拟无预加固、单一水平旋喷桩预加固、水平旋喷桩与超前小导管注浆组合三种不同方案下的隧道施工过程,对比三种工况下的地表沉降、隧道拱顶沉降、涌水量及旋喷桩位移,研究水平旋喷组合预加固技术在隧道施工过程中的预加固与止水效果。

1　工程概况

青岛地铁某区间段隧道穿越 VI 级围岩富水砂层,隧道埋深 8.15~13.1 m,开挖高度与宽度分别为 6.64、6.34 m,进洞后以 27‰的坡度下坡。隧道洞身穿越粗砂-砾砂-碎石土层,最后进入中风化花岗岩地层,其所处地层围岩条件较差,地下水水位埋深 4.3~7 m,具有弱承压性,平均每米洞身最大涌水量为 20 m^3/d。地质剖面图如图 1 所示。此外,隧道采用短台阶法进行开挖,每 3 m 为一个循环进尺向前掘进,施工工序及隧道断面图如图 2 所示。

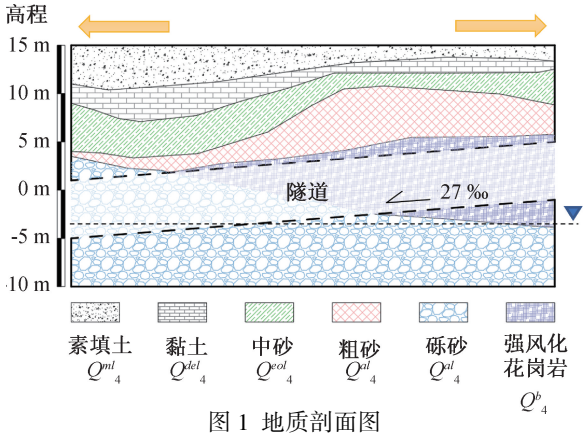


图 1　地质剖面图

Fig. 1　Geological profile map

2　加固方案设计

结合于忠波、刘涛等[12-13]在研究中获取的实测数据,发现在采用全断面水平旋喷桩预加固时,桩体强度普遍能够达到预期,但是成桩精度存在

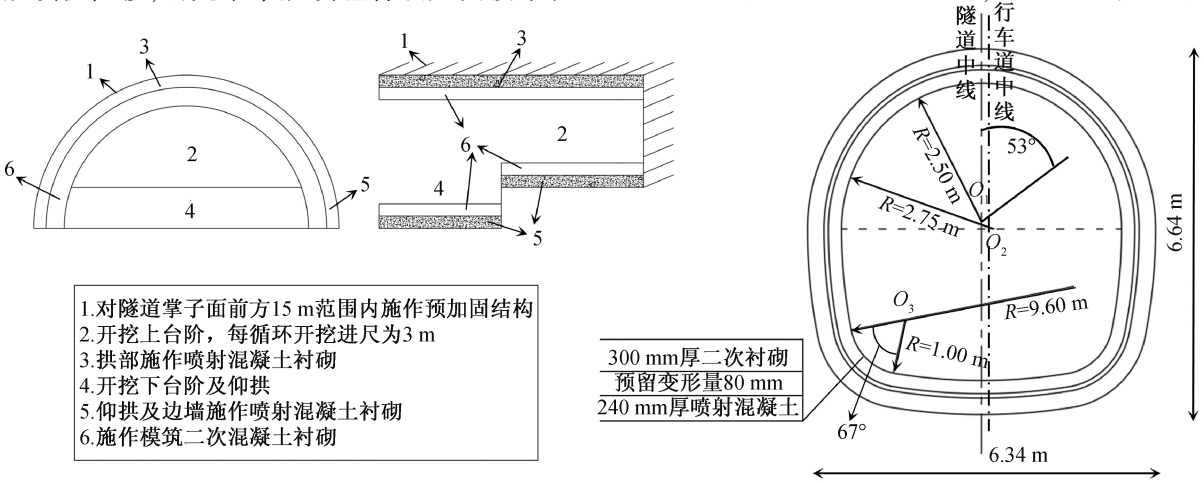


图 2　隧道断面及施工工序示意图

Fig. 2　Diagram of tunnel section and construction process

偏差,且拱脚处咬合度较差,不能形成止水帷幕。

为形成较好的超前支护作用,同时节约成本,在全断面旋喷桩预加固的基础上进行改进,采用水平旋喷桩配合超前小导管组合支护的方案[14]进行数值模拟,对比两方案在预加固方面的优势。

2.1 全断面水平旋喷桩预加固方案

首先沿隧道开挖轮廓线全断面环向布置水平旋喷桩53根,桩径700 mm,桩间距400 mm,长度15 m,环向搭接300 mm。随后在开挖掌子面以1 m×1 m梅花形、差别桩径(桩头端直径1 200 mm,长度3 m,其他深度处桩径为400 mm)布置32根断面旋喷桩。旋喷桩布设如图3、图4所示,预加固参数如表1所示。

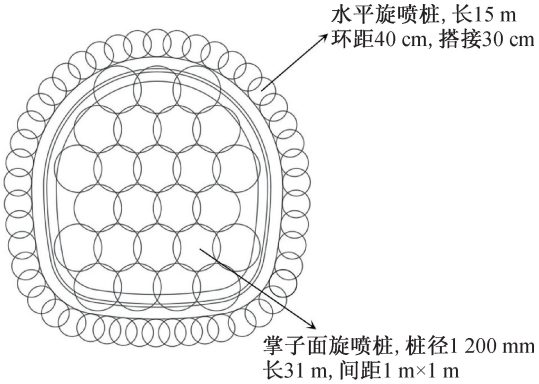


图3 水平旋喷桩桩端加固3 m段

Fig. 3 Horizontal rotary jet pile end reinforcement at 3 m section

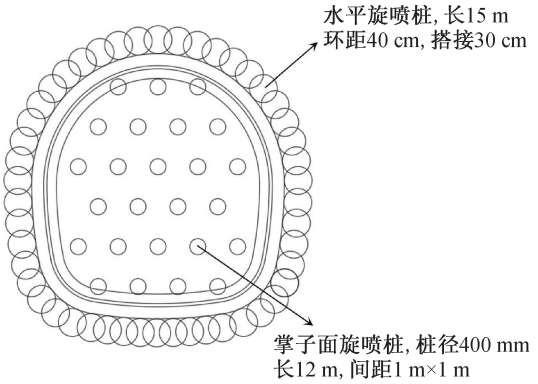


图4 水平旋喷桩桩尾加固12 m段

Fig. 4 Horizontal rotary jet pile end reinforcement at 12 m section

表1 旋喷加固参数

Tab. 1 Parameters for rotary spray reinforcement

旋喷桩径/mm	桩间距/cm	压力/MPa	转速/(r·min^{-1})	浆液配比	孔数/个
700	40	25~35	20	1∶1	85

2.2 水平旋喷桩+超前小导管注浆预加固方案

仅沿隧道拱部与边墙布设水平旋喷桩33根,并在拱脚外侧增设5根旋喷桩,局部形成双排咬合。在水平旋喷桩施工完成后,每一隧道开挖进尺配合使用超前小导管注浆(导管直径42 mm、长度3 m、环向间距400 mm、外插角20°),弥补水平旋喷桩咬合度较差的缺陷。

在预加固时,超前小导管支护需在旋喷桩施工完成后,每循环开挖配合使用。

3 数值模拟

采用不同预加固方案所建立的模型分别记为工况一、工况二、工况三,具体如下:工况一,未采取任何预加固措施;工况二,采用环向全断面水平旋喷桩预加固方案;工况三,采用水平旋喷桩配合超前小导管预加固方案。

3.1 模型概况

3.1.1 模型尺寸

采用有限元软件建立隧道三维数值模型。根据圣维南原理[15-16],地下洞室开挖仅对距隧道开挖中心3~5倍围岩产生影响,沿隧道施工方向取60 m作为模型长度,隧道模型宽度(X方向)取为隧道开挖洞室中心的3倍洞径,高度(Z方向)取为隧道开挖洞室中心的5倍洞径,因此模型尺寸取为长×高×宽=60 m×30 m×80 m,采用混合网格生成器划分网格,无预加固方案共划分22 746个节点,28 006个单元;全断面旋喷桩预加固方案共划分24 816个节点,32 815个单元;水平旋喷桩配合超前小导管支护预加固方案共划分25 890个节点,34 192个单元。两种预加固方案下的隧道整体模型分别如图5、图6所示。

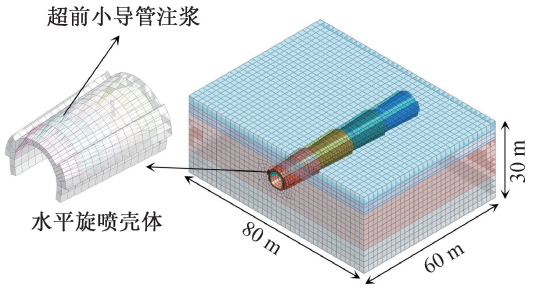


图5 组合预加固有限元模型图

Fig. 5 Diagram of combined pre-reinforced finite element model

3.1.2 模型属性

围岩采用摩尔-库伦本构模型,使用混合实体

单元进行模拟。初期支护(厚度 240 mm)视为弹性体,采用 2D 板单元进行模拟。二次衬砌(厚度 300 mm)视为弹性体,采用 3D 实体单元进行模拟。超前小导管可视为弹性体,采用植入式桁架进行模拟。水平旋喷桩简化为旋喷壳体(厚度 700 mm),采用摩尔-库伦本构模型,使用混合实体单元进行模拟,掌子面水平旋喷桩采用复合地基模拟。地层及两种预加固方案的具体网格划分模型如图 5、图 6 所示。

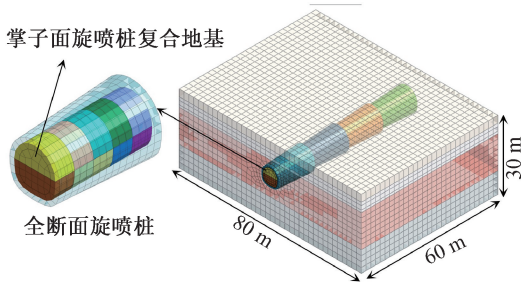


图 6　全断面水平旋喷桩预加固有限元模型图

Fig. 6　Finite element model for pre-reinforcement of full-section horizontal rotary piles

3.1.3　监测点布置

三种工况在进行计算分析时所采用的监测点位置如图 7 所示,具体如下:

(1)选取 Y 轴正向、隧道正上方地表 20 m、40 m 处点为地表沉降监测点,记编号为 DB1、DB2。

(2)工况一拱顶沉降监测点分别选取拱顶 Y=0、15、30、45 m 处节点,记编号为 GD1—4;工况二、工况三拱顶沉降监测点选取各水平旋喷桩中点处节点,记编号为 GD5—8。

(3)对于工况二、工况三,取 Y=0 m 处的水平旋喷桩内轮廓线节点为旋喷桩 Z 方向位移监测点,记编号为 XPZ-Z,取第一组旋喷桩(Y=0~15 m)右拱脚处各节点为 X 方向拱脚位移监测点,记编号为 GJ-X。

(4)对于工况二、工况三,结合现场监测值,选择隧道每一循环开挖断面以及隧道两侧拱脚处节点为渗流量监测点,记编号为 SL1、SL2。

3.2　模型参数

水平旋喷桩与掌子面注浆模量的选取采用均一化原理(任一物理量对任一体积的积分等于该物理量对各体积的积分之和)。由于隧道所处地层为松散岩层,条件较差,围岩参数按照 VI 级围岩选取,所得模型参数见表 2。

水平旋喷桩变形模量的换算:复合土体的压缩模量可根据式(1)至式(3)计算:

$$E_{sp} = mE_p + (1 - m)E_s \tag{1}$$

$$m = \frac{d^2}{d_e^2} \tag{2}$$

$$E_0 = (1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu})E_{sp} \tag{3}$$

式中:E_{sp} 为复合土体压缩模量,MPa;m 为面积置换率,%;E_p 为旋喷桩压缩模量,MPa;E_s 为桩间土的压缩模量,MPa;E_0 为复合地基变形模量,MPa。

3.3　施工过程模拟

如图 8 所示,隧道开挖模拟分为 4 个阶段。第一阶段:隧道掌子面前方进行旋喷桩预加固支护施作,每一循环 15 m;第二阶段:待旋喷桩硬化后,进行隧道上台阶与下台阶的开挖,每循环为 3 m;第三阶段:隧道上部与边墙、仰拱分别施作初期支护;第四阶段:隧道整体施作二次衬砌。

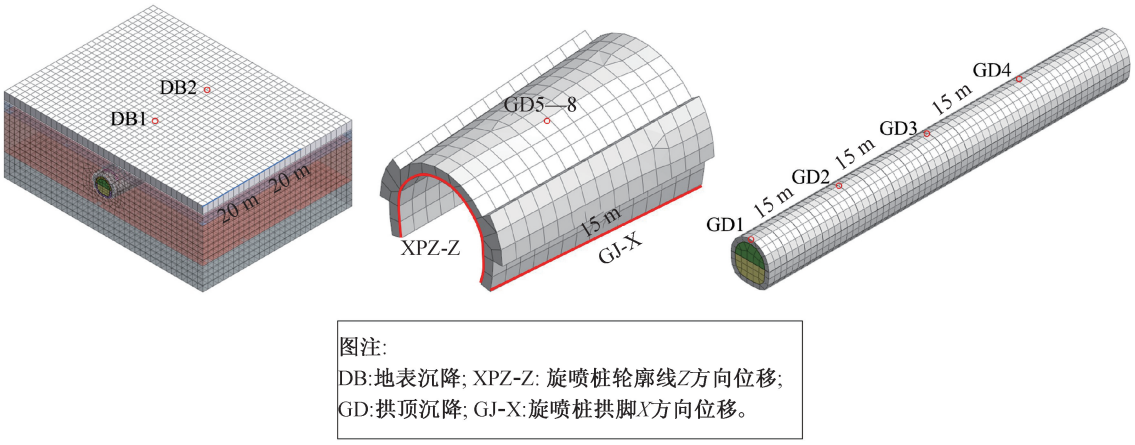


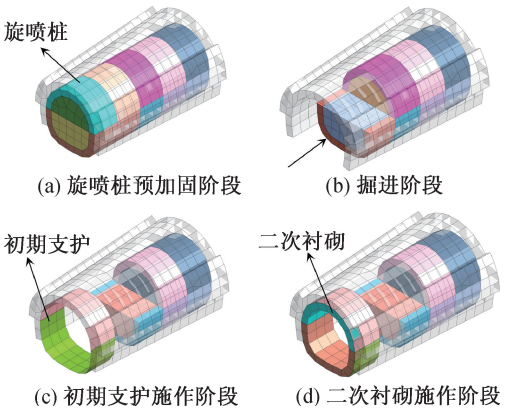
图 7　各监测点位置图

Fig. 7　Location map of each monitoring site

表 2 计算模型参数

Tab. 2 Parameters of calculation model

材料类别	弹性模量/MPa	泊松比μ	容重/(kN·m^{-3})	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
粗砂	40.00	0.43	16.50	2.00	25.00
碎石土	15.00	0.15	18.00	8.00	29.00
砾砂	100.00	0.32	19.10	300.00	30.00
中风化花岗岩	150.00	0.30	20.40	60.00	20.70
旋喷桩	6 300.00	0.31	22.00	27 000.00	38.00
掌子面复合地基	550.00	0.35	20.00	500.00	36.00
超前小导管	21 200.00	0.30	78.40	—	—
初期支护	15 000.00	0.25	22.00	—	—
二次衬砌	32 500.00	0.20	25.00	—	—



(a) 旋喷桩预加固阶段 (b) 掘进阶段

(c) 初期支护施作阶段 (d) 二次衬砌施作阶段

图 8 隧道施工模拟示意图

Fig. 8 Simulation diagram of tunnel construction

4 计算结果分析

4.1 沉降分析

4.1.1 地表沉降分析

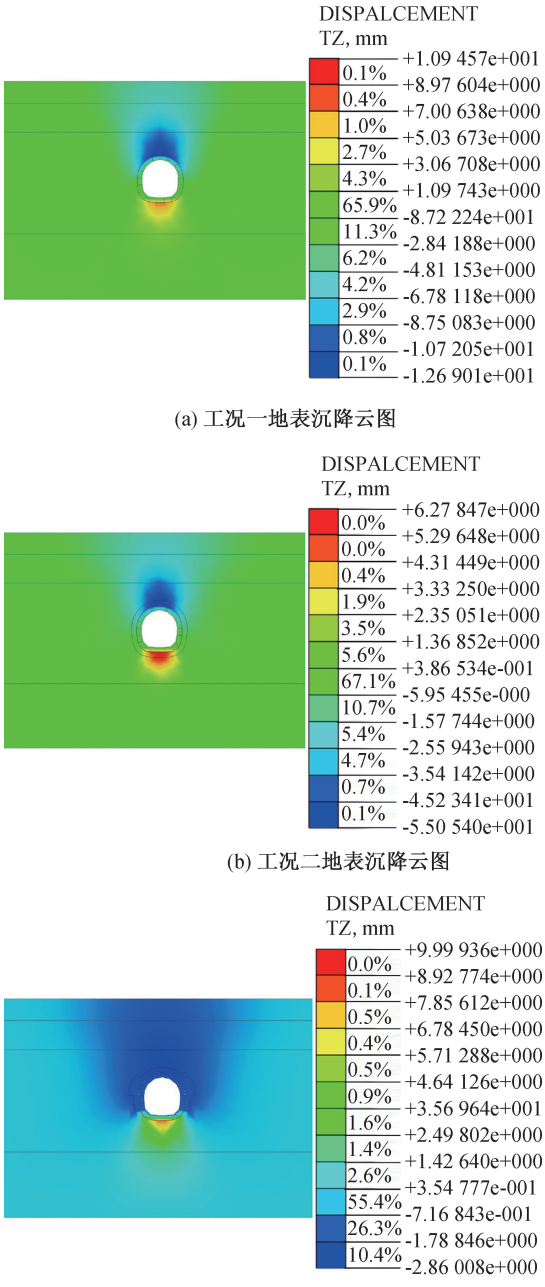
表 3、图 9 为不同预加固方案下的地表沉降值及云图,从中可以得出:工况二可使地表沉降减少约 60%~62%,工况三可使地表沉降减少约 66%~67%,控制效果较为显著,但工况三中的预加固方法对于地表沉降的影响范围大于工况二,根据云图结果,这与隧道拱脚处增设的两排水平旋喷桩有关。

表 3 各方案地表沉降值

Tab. 3 Surface settlement values for each scenario

施作方案	地表沉降最大值/mm	对比工况一地表沉降减小幅度/%
工况一	5.43	—
工况二	2.07	61.82
工况三	1.82	66.48

为更直观地比较两种预加固工法对于地表沉降的影响,绘制了不同施工阶段下监测点处的地表沉降曲线,如图 10 所示。



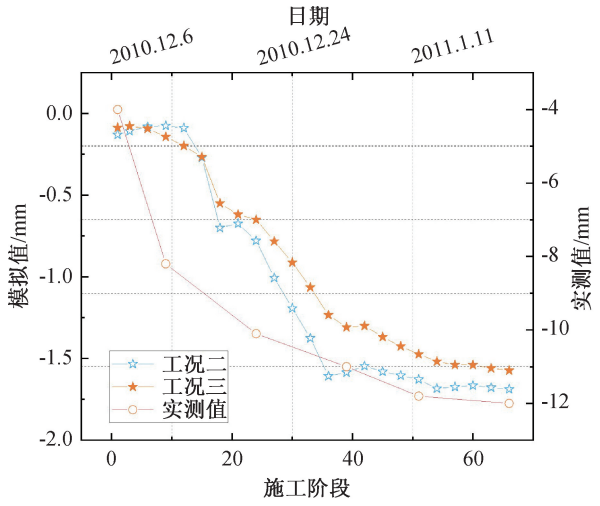
(a) 工况一地表沉降云图

(b) 工况二地表沉降云图

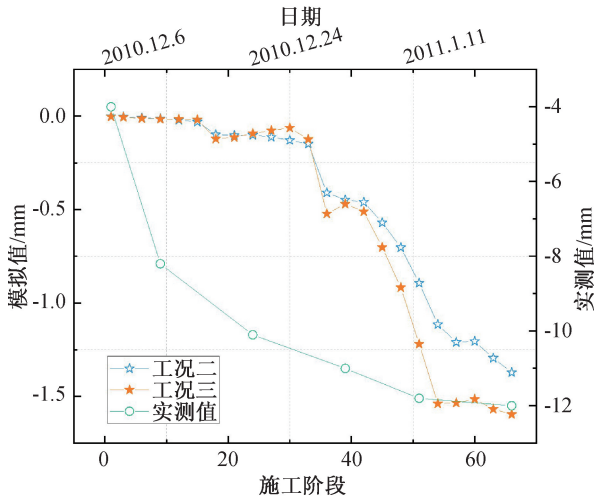
(c) 工况三地表沉降云图

图 9 各工况地表沉降云图

Fig. 9 Surface settlement clouds for each working condition



(a) DB1地表沉降对比



(b) DB2地表沉降对比

图 10　两工况不同测点处沉降曲线对比图

Fig. 10　Comparison of settlement curves at different measurement points for two working conditions

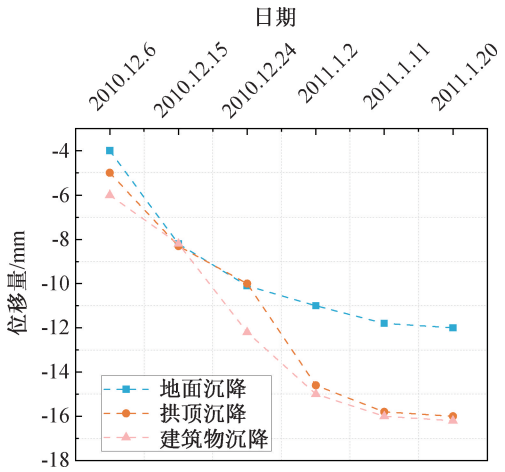


图 11　试验段各监测项目历时变形实测曲线图

Fig. 11　Measured deformation curves for each monitoring project in the test section over time

结合图 10、图 11 可以看出:工况二、三中 DB1 与 DB2 的曲线斜率分别在施工阶段 24—40 与施工阶段 42—54 增大,随后斜率逐渐减小,即表示两监测点的地表沉降均在其所在的水平旋喷桩开挖段出现大幅增长,随后逐渐减小。但是在工况二中,DB2 的地表沉降在施工结束后并未趋于平稳,且 DB1 和 DB2 的曲线斜率在施工阶段 18 及 36 附近由负变正,曲线出现上升翘曲,即工况二在每循环旋喷桩预加固时会造成地表隆起。同时,两种工况的地表沉降模拟值与实测值相比偏差较大,产生这种情况的原因可能是实际施工时旋喷桩咬合度较差、喷浆压力过大等因素。

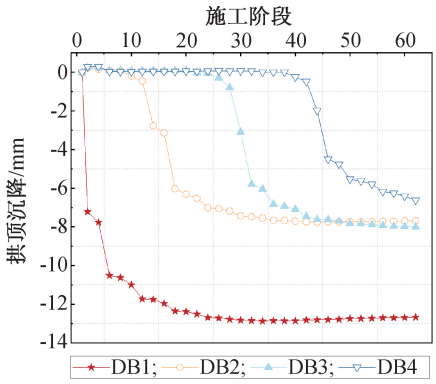
4.1.2　拱顶沉降分析

各工况监测点的拱顶沉降图如图 12 所示。可以看到:(1)采用不同的预加固方案后,拱顶沉降变形也相应减小。施工完毕后,相较工况一、工况二可使最大拱顶沉降减少约 58.99%,工况三可使最大拱顶沉降减少约 77.59%,能够有效控制隧道拱顶沉降。由于不能完全模拟隧道所处地质环境,同时采用的超前支护方案与实际现场存在差异,以及旋喷桩的注浆、咬合理想化,使得数值模拟计算的拱顶沉降值与实测值存在一定偏差。(2)工况二与工况三 GD5—GD8 的拱顶沉降曲线斜率分别在施工阶段 1—8、11—16、33—36、45—52 陡增,曲线接近线性分布,即各自旋喷桩提取点的拱顶沉降在隧道开挖施作中大幅增长,在施工阶段结束后,曲线近似水平分布,拱顶沉降趋于平稳。工况二 GD5—8 的拱顶沉降曲线斜率分别在施工阶段 3—10、17—26、33—42 由负变正,图形向上翘曲,说明水平旋喷桩在成桩阶段会使周围土体挤出,造成拱顶隆起;而工况三由于在隧道开挖时每循环配合使用超前小导管预加固,因此其曲线在该阶段大致呈水平直线状,并未出现向上翘曲的现象;同时,在拱顶沉降大幅增长的阶段,由于每循环配合超前小导管施工,其增长呈阶梯式发展。

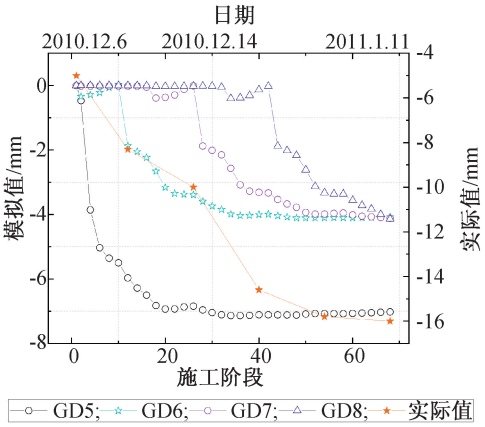
4.2　旋喷桩位移分析

水平旋喷桩不同施工工序的 Z 方向位移云图如图 13、图 14 所示,旋喷桩监测点的内轮廓线 Z 方向位移与桩脚 X 方向位移图如图 15、图 16 所示。

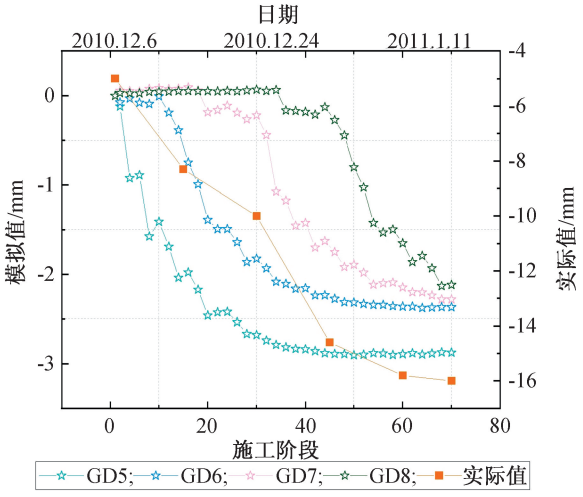
结合图 13、图 14 中数据可以看到,在 $Y=0\sim15$ m 施工阶段中,工况二的旋喷壳体 Z 方向位移峰值出现在壳体底部,工况三中则出现在壳体顶



(a) 工况一拱顶沉降



(b) 工况二拱顶沉降

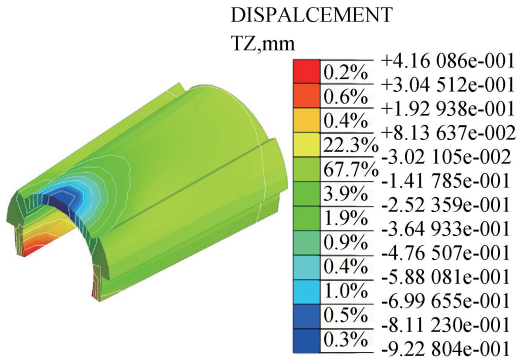


(c)工况三拱顶沉降

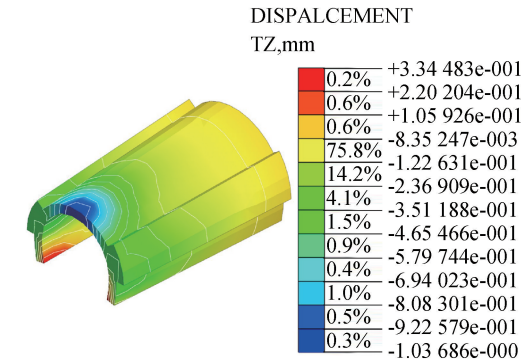
图 12 不同方案拱顶沉降图

Fig. 12 Arch settlement diagram for different schemes

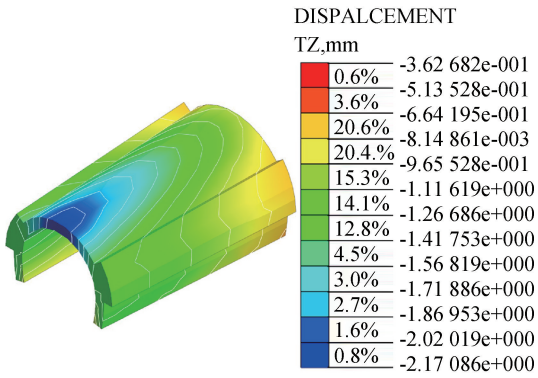
部;工况二壳体顶部周围产生沉降,壳体底部周围则产生隆起。相比于工况二,工况三旋喷壳体沉降减少约 43.32%,在 $X=-3.2\sim3.2$ m 范围内接近线性分布,具体表现为在桩脚处周围产生隆起,桩其他部位表现为下沉;当 $Y=0\sim15$ m 隧道段开挖完成后,相较于 $Y=0\sim3$ m 上台阶与下台阶施工阶段,旋喷桩整体位移出现较明显的增长。



(a) 隧道第一循环上台阶开挖后



(b) 隧道第一循环下台阶开挖后

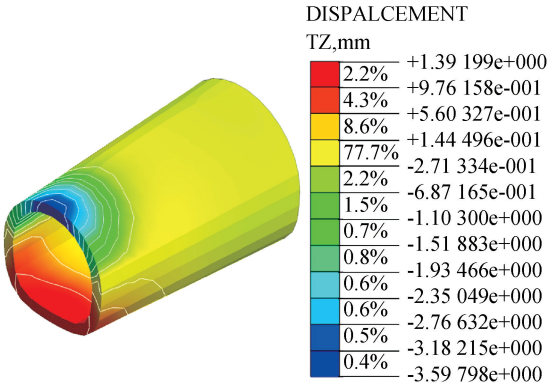


(c) Y=0~15 m隧道段开挖完成后

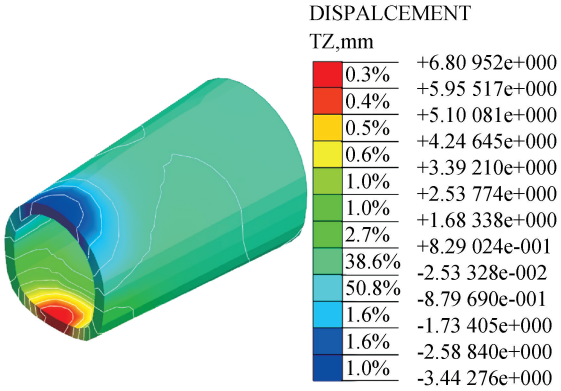
图 13 工况三旋喷桩不同施工工序位移云图

Fig. 13 Displacement clouds of the different construction processes of rotary jet piles under working condition 3

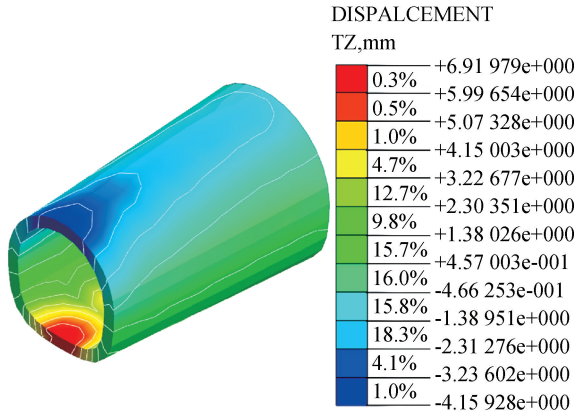
在上台阶与下台阶开挖阶段,工况三右拱脚位移图形变化趋势基本一致,即在 $Y=0\sim3$ m 位移明显,在 3~15 m 范围内变化不大,呈非线性分布;而工况二由于水平旋喷桩沿整个隧道环向分布,因此旋喷桩右拱脚 0~3 m 段位移在上台阶施工时变化不大,而在下台阶施工时曲线斜率出现突增,位移增长明显。在 $Y=0\sim15$ m 隧道施工完毕后,两工况右拱脚位移在 $Y=3\sim15$ m 段变化明显,但工况三由于在开挖时每循环配合超前小导管支护,因此整体位移较为平滑,而工况二右拱脚位移呈阶梯式分布。



(a) 隧道第一循环上台阶开挖后



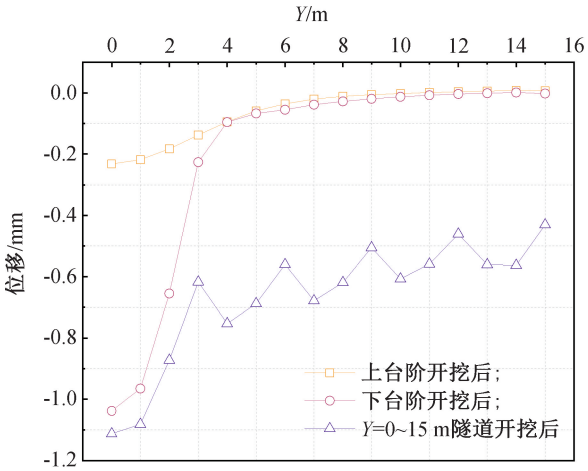
(b) 隧道第一循环下台阶开挖后



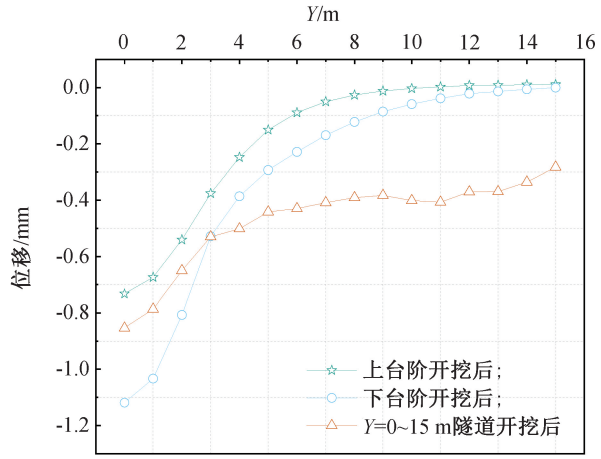
(c) Y=0~15 m隧道段开挖完成后

图 14　工况二旋喷桩不同施工工序位移云图

Fig. 14　isplacement clouds of the different construction processes of rotary jet piles under working condition 2



(a) 工况二



(b) 工况三

图 15　旋喷桩右拱脚 X 方向位移

Fig. 15　Displacement in the X-direction of the right arch foot of the rotary jet grouting pile

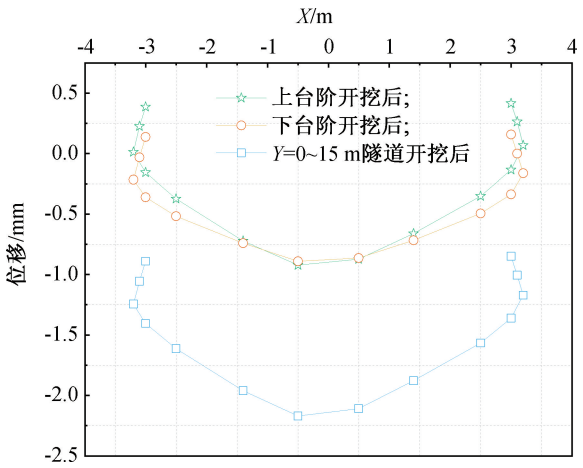


图 16　工况二不同施工工序内轮廓线 Z 方向位移

Fig. 16　Z-directional displacement of the contour line within the different construction processes under working condition 2

4.3　旋喷桩防渗止水效果分析

预加固工况监测点的渗流图如图 17 所示。

根据图 17 中数据,工况二可使开挖断面渗流量、拱脚处渗流量分别减小 87.16%、92.23%,其渗流结果与于忠波等的实测数据[12]接近;工况三可使开挖断面渗流量、拱脚处渗流量分别减小 93.47% 、96.78%。同时,工况二在每循环水平旋喷桩施作处的渗流量会出现突增,并未起到止水帷幕的效果;而工况三在拱脚处增设了两排水平旋喷桩,同时每循环施工配合超前小导管支护,拱

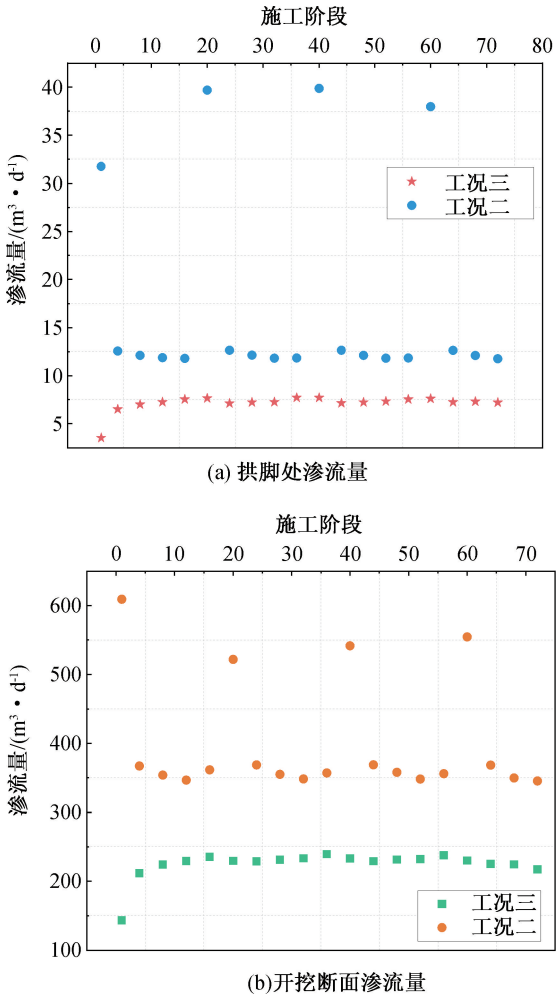


图 17 预加固方案隧道开挖渗流量

Fig. 17 Pre-reinforcement plan for tunnel excavation seepage flow rate

脚处与开挖断面处的渗流量大幅降低,起到了很好的止水效果。

5 施工指导

通过分析不同水平旋喷桩施工工法,发现不同的旋喷桩参数对富水砂层隧道超前支护的施工影响不同,其结果能够对现场实际施工提供如下施工指导:

在遇到复杂地质条件时,可采用组合超前支护的预加固工法,如水平旋喷桩配合超前小导管,即在水平旋喷桩预加固后,每循环配合超前小导管开挖隧道,这样可以减少旋喷桩桩体的数量,缩短施工时间,从而节约成本。

在旋喷桩施作时应当配合智能监测技术[17],如三维激光扫描技术,通过激光测距,快速获取三维坐标,并对采集的数据进行处理,进而获得旋喷桩变形值,及时对钻进角度进行纠偏,保证钻进精度,同时有针对性地对水泥浆液使用外加剂,增强成桩支护效果,提高旋喷桩咬合度;对渗流量较大的部位,可以考虑施作双排水平旋喷桩,保证止水效果。

结合王志丰等[12,18-19]在研究中获取的数据及上文模拟结果,在富水砂层条件下进行水平旋喷桩施工时,可参考图 18 流程图与表 4 中的数据。

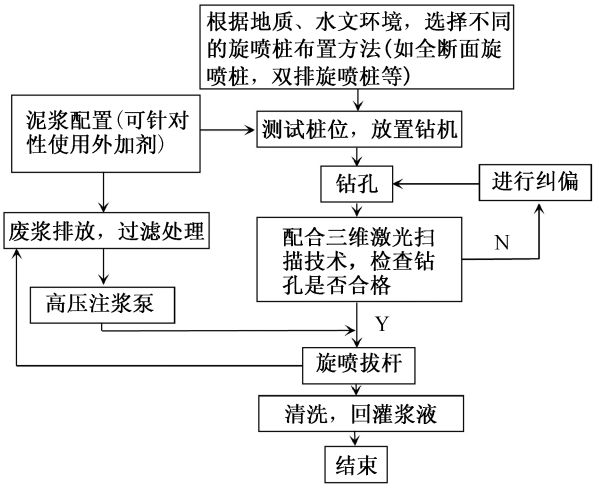


图 18 旋喷桩施工流程图

Fig. 18 Flow chart of rotary pile construction process

表 4 旋喷桩各参数选取

Tab. 4 Selection of various parameters for rotary spray piles

参数	参考数值	参数	参考数值
桩径/mm	600~700	注浆流量/(L·min^{-1})	50~70
桩心间距/mm	400	旋转速率/(r·min^{-1})	20~24
桩长/m	15~20	环向搭接/mm	300
浆液压力/MPa	25~35	水灰比	1∶1
提升速度/(cm·min^{-1})	15~30	浆液比重	1∶49~1∶52

6 结论

1)相比无预加固方案,在采用水平旋喷桩配合超前小导管注浆进行预加固后,地表沉降与拱顶沉降分别减少 66%、67.6%,说明该方法是富水砂层地区隧道开挖预加固的有效方法。

2)施加水平旋喷桩预加固后,所形成的壳体能够提高围岩的整体性;但隧道拱脚处的地下水渗流量仍旧会对隧道安全产生一定的影响,因此在实际施工中应当对拱脚处的渗流量进行实时监测,对达到阈值的渗流点进行施工补救。

3)工况三中,由于拱脚处增设旋喷桩,使得局部形成双排咬合,且每个循环配合使用超前小导

管注浆,使得相邻旋喷桩之间的咬合度大幅提高,保证了成桩效果,水平旋喷桩起到了止水帷幕的作用。相比无预加固情况,拱脚处与开挖断面处的渗流量分别减少了 96.78%、93.47%,有效控制了隧道渗漏水。

参考文献:

[1] 魏新江,张默爆,丁 智,等. 盾构穿越对既有地铁隧道影响研究现状与展望[J]. 岩土力学,2020(S2):1-20.

[2] 司景钊,曾云川,刘建兵. 复杂地质铁路隧道敞开式 TBM 施工挑战及思考[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(03):433-440.

[3] 吴华州,李兴高,蔡志勇. 复杂地质环境下异形交叉暗挖通道开挖数值模拟[J]. 现代隧道技术,2021,58(S1):303-312.

[4] 贾 锋. 富水半砂半岩隧道下穿建筑物注浆技术数值模拟研究[J]. 铁道勘察,2019,45(01):90-95+101.

[5] 文 妮,赵春彦. 基于高压水平旋喷桩超前支护技术的隧道施工技术研究[J]. 公路工程,2019,44(01):135-139.

[6] WANG Y, LI L, LI J, et al. Jet-grouting in ground improvement and rotary grouting pile installation: Theoretical analysis[J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 21(3): 279-288.

[7] 王志丰,沈水龙. 单根水平旋喷桩施工引起周围土体变形的实用计算方法研究[J]. 工程力学,2017,34(05):78-83+104.

[8] 郑 昊,李兆平,李子超. 具有随机几何缺陷的超高压旋喷桩止水效果研究[J]. 铁道标准设计,2022,66(9):129-135.

[9] 李又云,谢 柯,孙永梅,等. 大截面旋喷桩加固黄土隧道及其浸水模型实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(S2):3334-3343.

[10] 翟志国,花 楠,刘 柳. MJS 水平旋喷桩在京沈高铁盾构隧道联络通道中的应用[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(S2):512-519.

[11] 骆瑞萍,陈保国,闫腾飞,等. 淤泥地层中盾构上穿近接地铁线施工稳定性研究[J]. 铁道标准设计,2020,64(10):88-93.

[12] 于忠波,李世君,施龙焱. 水平旋喷技术在软岩富水地铁隧道中的应用及优化[J]. 隧道建设,2012,32(03):377-382.

[13] 刘 涛,郑煜茜,张 瑾. 富水砂层新意法隧道稳定性分析与控制对策[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(S2):825-832.

[14] 陈志广. 隧道内超前小导管长度确定探讨[J]. 铁道勘察,2018,44(05):62-66.

[15] MARIN M, CHSNER A, CRACIUN E M. A generalization of the Saint-Venant's principle for an elastic body with dipolar structure[J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2020, 32(1): 269-278.

[16] WU H N, SHEN S L, CHEN R P, et al. Three-dimensional numerical modelling on localised leakage in segmental lining of shield tunnels[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 122(9):103549.

[17] 张俊儒,燕 波,龚彦峰,等. 隧道工程智能监测及信息管理系统的研究现状与展望[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(02):567-579.

[18] 王志丰,王亚琼,谢永利. 单根水平旋喷桩施工引起地表隆起变形规律研究[J]. 中国公路学报,2016,29(07):117-123.

[19] 朱德良,王文军,谢新宇,等. 深厚建筑垃圾杂填土地基高压旋喷桩加固实例[J]. 建筑结构,2020,50(17):116-120+125.

(责任编辑 王利君)