

## 富水砂卵石地层隧道盾构下穿地铁线注浆方案优化\*

刘启明<sup>1</sup>, 柳卓<sup>1</sup>, 刘学武<sup>1</sup>, 傅鹤林<sup>2</sup>

(1.长沙市工务局, 湖南长沙 410013; 2.中南大学, 湖南长沙 410004)

**摘要:** 湖南省长沙市万家丽路 220 kV 电力隧道盾构下穿长沙地铁 3 号线施工中, 为确保盾构安全下穿既有地铁线路, 提出袖阀管竖向注浆加固、袖阀管竖向十斜向注浆加固、袖阀管竖向十斜向注浆加固十四周帷幕注浆加固 3 种加固方案, 并采用 MIDAS GTS 三维数值模拟软件进行数值模拟, 分析注浆加固效果。结果表明, 优化后注浆方案可保证盾构安全下穿长沙地铁 3 号线。

**关键词:** 隧道; 富水砂卵石地层; 下穿地铁线; 注浆加固

中图分类号: U457

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)02-0143-04

富水砂卵石地层在中国分布广泛, 是具有地层岩体松散、无胶结、自稳能力差、单个石块强度高、颗粒间空隙大、黏聚力小、渗透系数大等特点的典型力学不稳定地层。采用盾构法在富水砂卵石地层掘进时, 由于盾构推力、扭矩大且变化异常等原因, 刀盘、刀具及螺旋输送机磨损严重, 盾构掘进效率低下且时常发生开挖面失稳、地表塌陷等事故。该文结合湖南省长沙市万家丽路 220 kV 电力隧道盾构下穿长沙地铁 3 号线工程, 采用 MIDAS GTS 三维数值模拟软件对盾构下穿地铁线进行数值模拟, 优化注浆加固方案。

## 1 工程概况

万家丽路 220 kV 电力隧道全长 6 609.007 m。其中: 马栏山 220 kV 变电站出口—特立西路口采用明开挖施工, 长度为 644.489 m, 规划出线 4 回 220 kV 电缆和 14 回 110 kV 电缆, 隧道外侧截面宽 6.3 m、高 3.4 m, 与规划道路合建; 特立西路口—火炬路口长 5 964.518 m, 规划出线 4 回 220 kV 电缆和 8 回 110 kV 电缆, 隧道内径 3.6 m、外径 4.1 m, 采用盾构法施工。

该隧道在洪山路口与长沙地铁 3 号线空间相交(见图 1), 电力隧道下穿, 电力隧道下穿时地铁 3 号线已具备轨通条件。地铁隧道外径为 6.0 m, 底板距离电缆隧道顶板 4.36 m; 电力隧道外径为 4.1 m, 内径为 3.6 m, 顶板距离地面 21.86 m。

该下穿段电力隧道围岩级别为 V 级, 隧道在富水砂卵石层中穿越。土层分布如下: 素填土, 穿越段

层厚 6.2 m; 粉质黏土, 穿越段层厚 3.3 m; 富水砂卵石层, 穿越段层厚 28.4~36.6 m, 透水性极好; 全风化砾岩层, 穿越段层厚 13.9~22.1 m, 透水性好。



图 1 万家丽路 220 kV 电力隧道路径平面图

## 2 数值模拟模型构建

采用 MIDAS GTS 三维数值模拟软件对电力隧道盾构下穿地铁 3 号线的扰动效应进行分析。根据隧道地质条件及分析目标计算精度要求, 建立电力隧道盾构下穿既有地铁 3 号线数值分析模型, 围岩模型采用四面体单元, 服从 Mohr-Coulomb 弹塑性模型屈服准则; 地铁隧道管片、电力隧道管片、等代层采用弹性模型, 通过三维实体单元析取板单元获得(见图 2、见 3)。

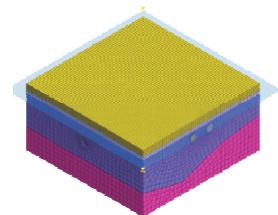


图 2 隧道盾构下穿地铁线数值分析模型

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助课题(51538009); 长沙科技局课题(SZ201525-ZX11)

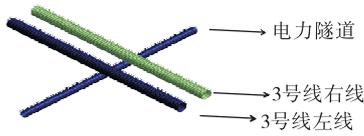


图3 地铁、电力隧道位置及管片示意图

模型 X 向取 120 m, Z 向取 60 m, 考虑到穿越段地铁 3 号线左右线间距为 17 m, 3 号线方向(Y 向)左右两边各取约 3 倍宽度, 即 120 m, 模型尺寸为  $X \times Y \times Z = \text{长} \times \text{宽} \times \text{高} = 120 \text{ m} \times 120 \text{ m} \times 60$

m。模型共划分为 68 142 个单元、98 146 个节点。

模型计算时, 选取如下边界条件: 平面  $X = -60 \text{ m}$  和  $X = 60 \text{ m}$  限制其 X 方向位移; 平面  $Y = -60 \text{ m}$  和  $Y = 60 \text{ m}$  限制其 Y 方向位移; 平面  $Z = -60 \text{ m}$  限制其 Z 方向位移; 顶部为自由面。荷载选用自重荷载、水压力荷载及施工荷载, 其中水压力根据实际水位(选用常年正常水位 25.26 m)确定, 施工过程中衬砌同步注浆压力、盾构掘进压力及管片顶推力按照实际施工情况模拟。数值模拟地层参数见表 1。

表 1 土层物理力学参数

岩土名称	厚度/ m	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙比	黏聚力/ kPa	摩擦角 / $(^\circ)$	压缩模量/变形 模量/MPa	泊松比	渗透系数/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
素填土	6.20	18.7	0.92	15.0	10	5.0	0.38	$2.49 \times 10^{-4}$
粉质黏土	3.30	19.1	0.78	27.5	12	6.5	0.32	$3.30 \times 10^{-6}$
富水砂卵石	28.40~36.60	22.3	0.68	6.0	36	36.0	0.28	$3.00 \times 10^{-2}$
全风化砾岩	13.90~22.10	20.5	0.84	18.0	30	8.0	0.25	$3.00 \times 10^{-4}$
地铁管片	0.30	25.0	—	—	—	30 000.0	0.20	—
电力管片	0.25	25.0	—	—	—	30 000.0	0.20	—
等代层	0.14	20.0	—	—	—	50.0	0.14	—

### 3 未注浆加固对地铁 3 号线的扰动

对电力隧道掘进时未注浆加固下长沙地铁 3 号线左右线管片位移进行分析, 图 4、图 5 为电力隧道掘进 60、120 m 时地铁管片的竖向位移云图, 图 6、图 7 为电力隧道掘进 20、40、60、80、100、120 m 时地

铁隧道管片的竖向位移曲线。

由图 4、图 5 可知: 电力隧道施工过程中, 既有地铁 3 号线竖向位移出现在隧道掘进方向的正上方, 掘进正上方位置对应管片竖向位移最大, 远离电

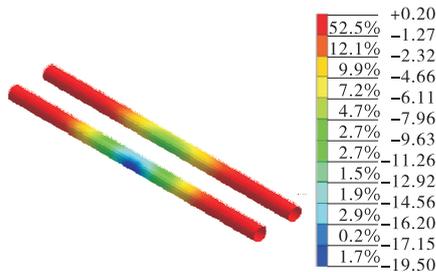


图 4 电力隧道掘进 60 m 时地铁管片竖向变形云图  
(未注浆加固, 单位: mm)

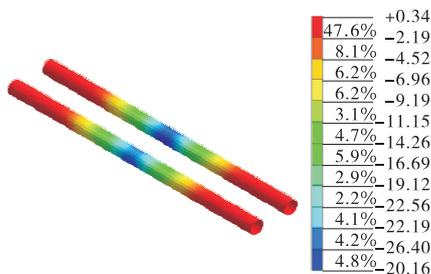


图 5 电力隧道掘进 120 m 时地铁管片竖向变形云图  
(未注浆加固, 单位: mm)

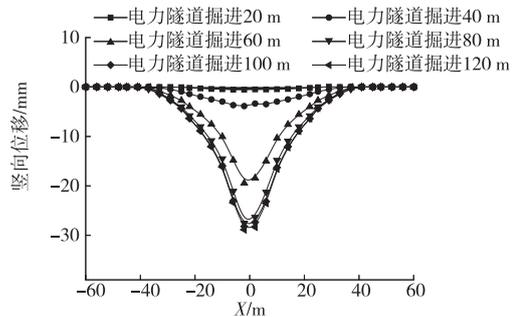


图 6 电力隧道掘进时地铁 3 号线左线竖向位移  
(未注浆加固)

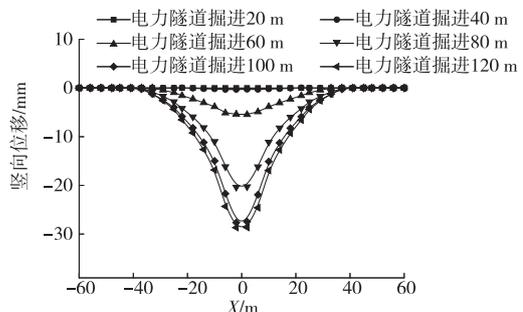


图 7 电力隧道掘进时地铁 3 号线右线竖向位移  
(未注浆加固)

力隧道两侧管片竖向位移逐渐减小。

由图6、图7可知:随着电力隧道盾构掘进,长沙地铁3号线左右线最大竖向位移都出现在电力隧道掘进方向正上方,掘进完成后左线最大竖向位移为28.86 mm,右线最大竖向位移为28.64 mm。远离电力隧道中心线左右两侧,地铁3号线竖向位移减小显著。电力隧道掘进40~60 m时正好在地铁左线下方,此时左线管片竖向位移增大明显;电力隧道掘进60~80 m时正好在地铁右线下方,此时右线管片竖向位移增大明显;随着电力隧道继续掘进100~120 m,左右线竖向位移趋于稳定。

根据CJJ/T 202-2013《城市轨道交通结构安全保护技术规范》、GB 50911-2013《城市轨道交通工程监测技术规范》,参考其他城市对轨道交通规划、运营等方面的规定,下穿既有地铁区间隧道的地下工程建设应保证既有已铺轨的隧道变形曲线的曲率半径 $>15\ 000\text{ m}$ 、隧道变形相对曲率 $<1/2\ 500$ 、隧道结构竖向位移累计值为 $-5\sim 5\text{ mm}$ 、隧道结构水平位移为 $-4\sim 4\text{ mm}$ 、隧道结构变形缝差异位移累计值为 $2\sim 4\text{ mm}$ 、竖向和水平位移变化速率不大于 $1\text{ mm/d}$ 。该工程电力隧道直接下穿既有地铁3号线,地铁隧道结构最大竖向位移为28.86 mm,远大于规范中不超过5 mm的控制要求,会破坏既有地铁3号线隧道结构,必须采取加固措施。

#### 4 优化注浆加固方案

在电力隧道盾构下穿地铁3号线时,对穿越段富水砂卵石地层进行注浆加固。根据CJJ/T 202-2013《城市轨道交通结构安全保护技术规范》、GB 50911-2013《城市轨道交通工程监测技术规范》,对地铁隧道地层进行加固时,隧道加固区范围两侧向外延伸加固隧道直径宽度,加固区底端注浆到电力隧道底板下3 m。该工程加固区范围为长 $\times$ 宽 $=16\text{ m}\times 35\text{ m}$ ,竖直注浆加固范围从富水砂卵石地层顶部到电力隧道底板下3 m处。分别采取袖阀管竖向注浆加固、袖阀管竖向+斜向注浆加固、袖阀管竖向+斜向注浆加固+四周帷幕注浆加固3种方案,对地铁3号线微扰动控制效应进行分析,确定最有效、合理的加固控制措施。

在电力隧道盾构掘进之前采取袖阀管竖向注浆加固。袖阀管注浆加固采用弹性模型,通过线单元析取获得。袖阀管注浆加固参数如下:横截面积取 $0.78\text{ m}^2$ ,泊松比取0.3,弹性模量取 $0.8\text{ GPa}$ ,重度取

$23\text{ kN/m}^3$ 。不加固和3种加固方式下电力隧道掘进60、120 m时地铁隧道管片竖向位移见图8、图9。

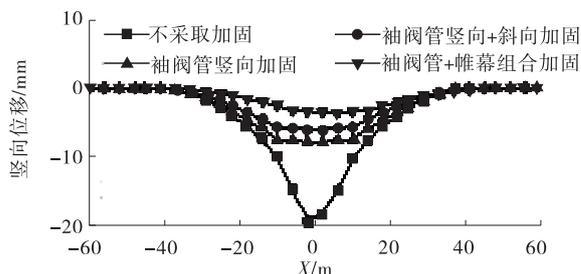


图8 不同加固方式下电力隧道掘进60时地铁管片竖向位移

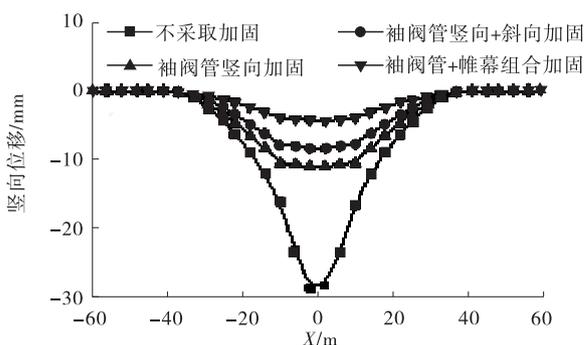


图9 不同加固方式下电力隧道掘进120时地铁管片竖向位移

由图8、图9可知:4种情况下,电力隧道盾构施工过程中既有地铁3号线竖向位移都出现在隧道掘进方向的正上方,掘进正上方位置对应管片竖向位移最大,远离电力隧道两侧管片竖向位移逐渐减小。采取加固措施时加固区管片竖向位移比未加固下穿时减小显著,未加固时地铁管片最大竖向位移为28.86 mm,袖阀管竖向注浆加固时地铁管片最大竖向位移为12.13 mm,袖阀管竖向+斜向注浆加固时地铁管片最大竖向位移为8.06 mm,袖阀管竖向、斜向注浆+四周帷幕注浆组合加固时地铁管片最大竖向位移为4.37 mm。穿越区富水砂卵石地层采取袖阀管竖向注浆加固或袖阀管竖向+斜向注浆加固的效果不错,可推广运用到下穿其他敏感建(构)筑物、基坑开挖等工程项目。但对于该工程,电力隧道顶板距离地铁隧道底板只有4.36 m且都在富水砂卵石地层中,隧道结构最终竖向位移累计值超过5 mm的控制要求,采取这两种加固方式会破坏地铁3号线隧道结构。采取袖阀管竖向、斜向注浆+四周帷幕注浆加固后,电力隧道盾构下穿对地铁3号线的扰动效应更小,最终稳定后竖向位移为4.37 mm,达到规范要求的微扰动控制指标要求。

综上,该工程电力隧道下穿长沙地铁3号线合理的加固措施为穿越区地铁左右线两侧和中间富水砂卵石地层加固区采取袖阀管竖向注浆加固方式,正对地铁3号线左右线正下方富水砂卵石地层采取斜向袖阀管注浆加固,穿越段加固区四周采用帷幕注浆加固。

### 5 结论

(1) 电力隧道直接下穿长沙地铁3号线时,地铁竖向位移主要出现在电力隧道掘进方向的正上方,掘进正上方位置对应管片竖向位移最大,远离电力隧道两侧管片竖向位移逐渐减小。地铁3号线隧道结构最大竖向位移为28.86 mm,远大于规范中不超过5 mm的控制要求,会破坏地铁3号线隧道结构,电力隧道不能直接下穿地铁3号线,对穿越段富水砂卵石地层必须采取加固措施。

(2) 隧道盾构下穿敏感建(构)筑物时,穿越段富水砂卵石地层可采取袖阀管注浆加固或袖阀管注浆加固和帷幕注浆加固相结合的措施。对于富水砂卵石地层,这两种加固措施都会减小隧道盾构对地表的扰动效应,可推广运用到其他敏感建(构)筑物基础等加固。

(3) 该工程电力隧道盾构下穿长沙地铁3号线合理的加固控制措施为穿越区地铁左右线两侧和中间富水砂卵石地层加固区采取袖阀管竖向注浆方式,正对地铁3号线左右线正下方富水砂卵石地层采取斜向袖阀管注浆加固,穿越段加固区四周采用帷幕注浆加固。

### 参考文献:

[1] 杨书江.富水砂卵石地层盾构法施工地表坍塌原因及对策[J].都市轨道交通,2011(1):77-79.  
 [2] 朱忠隆.软土隧道纵向地表沉降的随机预测方法[J].岩土力学,2001,22(1):56-59.  
 [3] 邢雪生.大直径盾构江底掘进对土体的扰动及穿越岩溶区风险控制[D].长沙:中南大学,2017.  
 [4] 施成华,彭立敏.浅埋隧道施工引起的纵向地层移动与

变形[J].中国铁道科学,2003,24(4):87-91.  
 [5] PECK R B.Deep excavation and tunneling in soft ground[C].Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 1969:225-325.  
 [6] CLOUGH G W,SCHMIDT B.Design and performance of excavations and tunnels in soft clay[J].Developments in Geotechnical Engineering,1981:569-634.  
 [7] 张会刚,姜志玲,章玉伟.深圳地铁隧道邻接施工沉降数值模拟研究[J].铁道工程学报,2009(10):55-58+63.  
 [8] 王非,缪林昌,黎春林.考虑施工过程的盾构隧道沉降数值分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊1):2907-2914.  
 [9] 姚海波,王梦恕,张顶立,等.盾构隧道下穿地面建筑物的安全评价与对策[J].岩土力学,2006,27(1):112-116.  
 [10] 施成华,彭立敏,刘宝琛.浅埋隧道开挖对地表建筑物的影响[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3310-3316.  
 [11] DING Zhi, WEI Xiang, ZHANG Tao, et al. Analysis and discussion on surface settlement induced by shield tuimel comtruction of adjacent sructure[J].Disaster Advances,2012,5(4):1656-1660.  
 [12] 姜忻良,赵志民,李园.天津地铁盾构施工对邻近工程设施影响的动态模拟[J].天津大学学报,2006,39(2):188-193.  
 [13] 贺美德,刘军,乐贵平.盾构隧道近距离侧穿高层建筑的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3):603-608.  
 [14] 丁祖德,彭立敏,施成华.地铁隧道穿越角度对地表建筑物的影响分析[J].岩土力学,2011,32(11):3387-3392.  
 [15] 黄启舒,孟庆生.公路隧道下穿既有桥梁的施工影响及工程措施研究[J].公路与汽运,2019(5):144-146.

收稿日期:2020-03-16

\*\*\*\*\*

(上接第142页)

江大学,2014.  
 [35] 宫全美,周俊宏,周顺华,等.透明土强度特性及模拟黏性土的可行性试验[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(6):853-860.

[36] 孔纲强,周杨,刘汉龙,等.新型透明黏土制配及其物理力学特性研究[J].岩土工程学报,2018,40(12):2208-2214.

收稿日期:2020-07-23