

临河地铁隧道下穿干渠施工响应分析与控制措施^{*}

张基强¹ 李嘉诚¹ 吕显州^{2**} 孙捷城³ 王 丹³ 王渭明¹

(1. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 266590, 青岛; 2. 山东科技大学地球科学与工程学院, 266590, 青岛;

3. 济南轨道交通集团有限公司, 250101, 济南//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 针对矿山法施工的临河隧道受季节性水位变化影响的问题,以济南轨道交通 R3 线暗挖隧道下穿大辛河东支沟段为例,采用 FLAC3D 有限差分软件建立三维数值模型,分析水位变化条件下临河暗挖隧道下穿干渠的施工响应与互馈效应。研究表明:采用洞内超前管棚+全断面注浆+渠道两侧注浆加固时,衬砌最大压应力相对另外两种方案减少了约 55.7% 和 41.3%,衬砌最大拉应力相对另外两种方案减少了约 55.9% 和 33.7%;地层和渠道的受力变形均优于另外两种方案,在变形控制标准值允许范围内。工程实践证明,临河暗挖隧道丰水期下穿渠道施工采用洞内超前管棚+全断面注浆+渠道两侧注浆组合加固方案可以有效控制地层变形,确保隧道的施工安全。

关键词 地铁隧道; 下穿施工; 矿山法施工; 施工响应分析
中图分类号 U455.49; TU433

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.01.030

Construction Response Analysis and Control Measures of River-Adjacent Metro Tunnel Under-passing Main Channel

ZHANG Jiqiang, LI Jiacheng, LYU Xianzhou, SUN Jiecheng, WANG Dan, WANG Weiming

Abstract In view of the influence of seasonal water level change on the tunnel constructed by mining method adjacent to river, based on the section works where the underground tunnel of Ji'nan Rail Transit Line R3 under-passes the east branch ditch of Daxin River, a three-dimensional numerical model is established by using finite difference software FLAC3D to analyze the construction response and mutual feed effect of the underground-excavated tunnel under-passing main channel with the change of water level. Research shows that when adopting advance pipe-roof + full section grouting + channel both-side grouting reinforcement, the maximum compressive stress of the lining is reduced by 55.7% and 41.3% respectively compared with the other two schemes, and the maximum tensile stress of

the lining is reduced by 55.9% and 33.7% respectively. Moreover, the stress and deformation of stratum and channel are superior to those of the other two schemes, which are within the allowable range of deformation control standard value. Engineering practice has proven that for construction of river-adjacent underground-excavated tunnel under-passing channel in high-flow season, adopting combined reinforcement scheme of advance pipe-roof + full section grouting + channel both-side grouting can effectively control stratum deformation and ensure tunnel construction safety.

Key words metro tunnel; under-passing construction; mining method construction; construction response analysis

First-author's address College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, 266590, Qingdao, China

在城市地铁隧道修建过程中,不可避免地会遇到下穿河流、住宅、铁路等建(构)筑物,施工过程中,精度要求高、安全控制难度大,这给地下工程设计和施工带来了极大的挑战。针对城市复杂环境下,暗挖隧道下穿河流的安全控制问题,文献[1]研究了零距离下穿施工引起既有车站结构的沉降规律,据此提出了下穿施工期间既有地铁车站结构沉降控制方案。文献[2]以青岛地铁隧道下穿河道工程为例,提出了超前深孔注浆、地面复合锚杆桩及洞内小导管补偿注浆等复合加固方案,保证了地铁施工的安全。文献[3]以广珠铁路江门隧道下穿富水河道段为研究背景,采用水平旋喷与大管棚复合超前支护,结合三台阶法开挖方案,能够在保证隧道安全施工的同时加快施工进度、降低工程造价。在上述文献针对隧道下穿建(构)筑物提出合理的施工方案中,近距离下穿通常采用盾构法施工,而对暗挖隧道近距离下穿渠道研究甚少,尤其是富水状态下暗挖隧道穿越渗透性较大的

^{*} 山东省自然科学基金项目(ZR2021QE187、ZR2020ME258、ZR2020QE269)

^{**} 通信作者

碎石土层更是鲜有研究。

针对以上问题,本文以济南轨道交通 R3 线隧道矿山法暗挖工程为研究背景,采用数值模拟与现场施工验证的研究方法,分析临河暗挖隧道下穿干渠施工的力学响应及其互馈效应,深入分析水位变化对暗挖隧道施工安全的影响,并在此基础上提出复杂条件下暗挖隧道的安全控制措施。本研究可为济南地铁隧道施工提供相关工程经验与技术指导。

1 工程概况

济南轨道交通 R3 出入线起始里程 TRSK 0+147,终点里程 TRSK 1+883,全长 1 736 m,采用矿山法和盾构法施工,其中盾构隧道已施工完毕且沉降稳定,因此本文仅考虑矿山法隧道施工产生的影响。隧道主要穿越碎石土层,西侧紧邻大辛河和凤凰湖,距大辛河最远距离为 117.7 m,距凤凰湖的最近距离为 48.6 m,隧道工程现场位置如图 1 所示。出入线暗挖隧道 TRSK 1+697—TRSK 1+2 727 与排水渠道东支沟(以下简称“渠道”)相交汇,最小净距为 1.2 m。隧道覆盖厚度为 5.0~10.5 m,隧道直径为 12.7 m,高度为 8.59 m。隧道围岩等级为 V 级。隧道地层为杂填土、黄土状粉质黏土、粉质黏土、碎石土、中风化石灰岩。暗挖隧道下穿渠道原设计方案在枯水期施工,丰水期封闭不施工。现因工期要求须在丰水期下穿满水状态渠道,在实际施工过程中隧道内出现渗水现象。

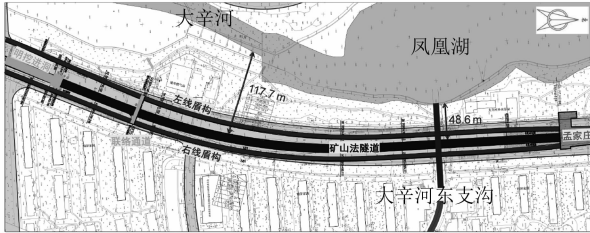


图 1 隧道工程现场位置图

Fig. 1 Diagram of tunnel project site location

2 水位变化下隧道施工响应分析

2.1 计算模型

选取济南轨道交通 R3 线下穿渠道段作为研究对象,建立数值模型,如图 2 所示。模型尺寸为 100 m(长)×45 m(宽)×47 m(高),模型顶部为自由边界,底部进行法向约束和切向约束,其余各侧面采用法向约束。隧道围岩土体破坏服从 Mohr-Coulomb 准则,初期支护、临时支撑、盾构管片采用实体弹性模型,注浆层、等代层采用提高其加固区的围

岩参数来模拟,超前管棚采用梁单元模拟,锚杆采用锚索单元模拟。

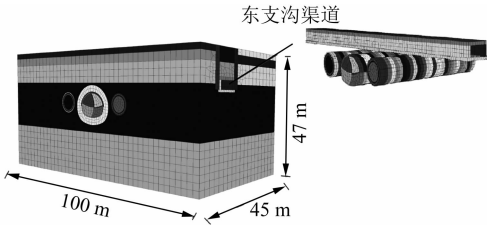


图 2 数值模型

Fig. 2 Numerical model

2.2 材料参数

计算过程中,将整个岩土层分为 5 层,从上至下分别为素填土(厚 2 m)、粉质黏土①(厚 3 m)、粉质黏土②(厚 7 m)、碎石土(厚 13 m)、中风化石灰岩(厚 20 m)。管棚采用梁单元进行模拟,材料参数按照钢管混凝土进行等效换算^[4-5],计算公式为:

$$E_p = \frac{[E_m I_m + (I_{s1} + I_{s2}) E_s]}{I_p} \quad (1)$$

$$\nu_p = \frac{[E_m I_m \nu_m + (I_{s1} + I_{s2}) E_s \nu_s]}{E_p I_p} \quad (2)$$

式中:

E_p, ν_p ——分别为管棚等效后的弹性模量和泊松比;

E_s, ν_s ——分别为钢材弹性模量和泊松比;

E_m, ν_m ——分别为砂浆的弹性模量和泊松比;

I_{s1}, I_{s2}, I_m, I_p ——分别为钢管、加劲钢筋、砂浆、管棚的惯性矩。

当施工中采用止水措施时,可以简化为不排水分析^[3],通过对地层摩擦角折减来考虑隧道施工时地下水的影响。根据地质报告和设计规范选择模型所涉及的地层及支护参数,如表 1 所示。

表 1 地层及支护参数

Tab. 1 Parameters of stratum and support

名称	重度/ (kN/m ³)	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	弹性模量/ MPa	泊松比
素填土	18.9	15.0	20.0	47.5	0.40
粉质黏土①	19.7	12.4	20.8	45.9	0.32
粉质黏土②	18.9	13.1	20.3	45.5	0.29
碎石土	21.0	34.2	10.0	73.6	0.20
石灰岩	26.9	35.1	700.0	32.3×10 ³	0.18
管棚钢管	23.0			10.3×10 ⁴	0.26
盾构管片	25.0			34.5×10 ³	0.20
盾壳	78.0			25.0×10 ⁴	0.20
初期支护	26.5			34.7×10 ³	0.25
临时支护	27.6			30.6×10 ³	0.25
注浆加固	21.0	38.0	100.0	100.0	0.22

2.3 原设计加固方案风险分析

施工原计划暗挖隧道在枯水期下穿渠道,隧道加固方案为超前管棚支护,地面沉降曲线及渠道位移云图如图 3 所示。由图 3 可知,开挖完成后最大地面沉降为 8.88 mm,满足要求。枯水期下穿渠道时,超前管棚支护可以保证隧道的稳定。但实际施工时,因工期紧张,下穿渠道须在丰水期施工,模型水位设置为 36 m(渠道顶板标高),届时渠道内将处于满水状态。若原设计方案不变,隧道开挖产生的最大地面沉降为 33.33 mm(见图 3),超过控制标准值 30.00 mm,渠道最大沉降为 23.60 mm(见图 3),超过设计允许值 10.00 mm,极大可能导致渠道内河水倒灌入隧道中,引起隧道塌方或突水。究其原因主要为:区间隧道范围内碎石层较厚,渗透系数较大,且隧道主要处于碎石土层中;本区域周边存在河流、水库、山体等地质,可快速接受及传导自然降水和河流水体,进而引起碎石土强度降低,承载力达不到隧道的持力要求。

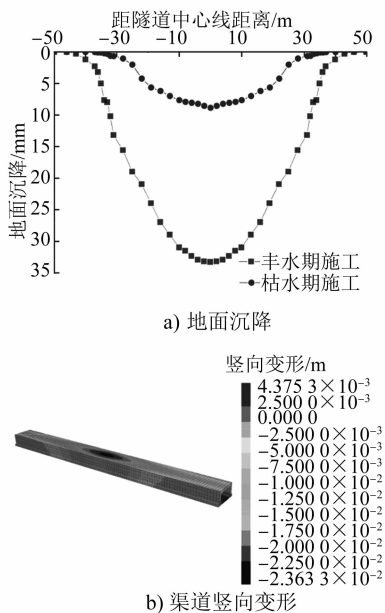


图 3 地面沉降曲线及渠道竖向变形云图

Fig. 3 Nephogram of land subsidence curve and channel displacement

2.4 组合加固方案优选

针对本工程在丰水期施工,区间隧道近距离下穿满水状态大辛河渠道的情况,为满足洞内外止水要求及隧道施工的安全性,拟定 3 种加固方案进行分析。方案 1 为超前管棚+渠道两侧注浆;方案 2 为

超前管棚+全断面注浆;方案 3 为超前管棚+全断面注浆+渠道两侧注浆。隧道开挖采用 CRD(交叉中隔壁)法施工。计算模型地下水位设置为 36 m(渠道顶板标高),渠道两侧注浆等效成深度为 11 m,厚度为 2 m,沿河道两侧布置的实体单元,全断面注浆等效成与隧道掌子面形状相似,厚度为 3 m 的实体单元。

2.4.1 衬砌受力分析

渠道与隧道交叉区衬砌应力云图如图 4 所示。由图 4 a)和图 4 b)可知:方案 1 隧道和渠道交叉区域衬砌最大压应力为 6.25 MPa,低于 C25 混凝土抗压强度设计值 11.90 MPa;最大拉应力值为 1.52 MPa,已超过 C25 混凝土抗拉强度设计值 1.27 MPa。由图 4 c)和图 4 d)可知:方案 2 隧道与渠道交叉区域衬砌应力分布较为均匀,最大压应力为 4.72 MPa,远低于 C25 混凝土抗压强度设计值 11.90 MPa;最大拉应力为 1.01 MPa,未超过 C25 混凝土抗拉强度设计值 1.27 MPa。由图 4 e)和图 4 f)可知:方案 3 隧道与渠道交叉区域衬砌应力分布较为均匀,最大压应力为 2.77 MPa,远低于 C25 混凝土抗压强度设计值 11.90 MPa;最大拉应力为 0.67 MPa,未超过 C25 混凝土抗拉强度设计值 1.27 MPa。

对比 3 种加固方案,方案 1 的衬砌最大拉应力分别是方案 2 和方案 3 的 1.50 倍和 2.27 倍,衬砌最大压应力分别是方案 2 和方案 3 的 1.32 倍和 2.26 倍,方案 2 和方案 3 的衬砌受力均在控制标准值内。究其原因主要为隧道富水状态近距离下穿河道,采用方案 1 加固的衬砌强度不够,伴随拱底隆起情况,进而导致衬砌发生破坏。同时采用超前管棚和全断面注浆加固可以有效加固地层,降低隧道的施工风险。

2.4.2 地面沉降及渠道受力变形分析

采用 3 种加固方案开挖隧道引起的地面沉降如图 5 所示。由图 5 可知:3 种加固方案下,最大地面沉降发生在隧道和渠道交叉区域正上方;方案 1 的地面最大沉降为 20.52 mm,方案 2 的地面最大沉降为 13.98 mm,方案 3 的地面最大沉降为 12.79 mm。为了更为清晰地对比 3 种加固方案对渠道的保护作用,在暗挖隧道拱顶正上方所对应的渠道横断面上下边界中点设立研究点,其布置图如图 6 所示。

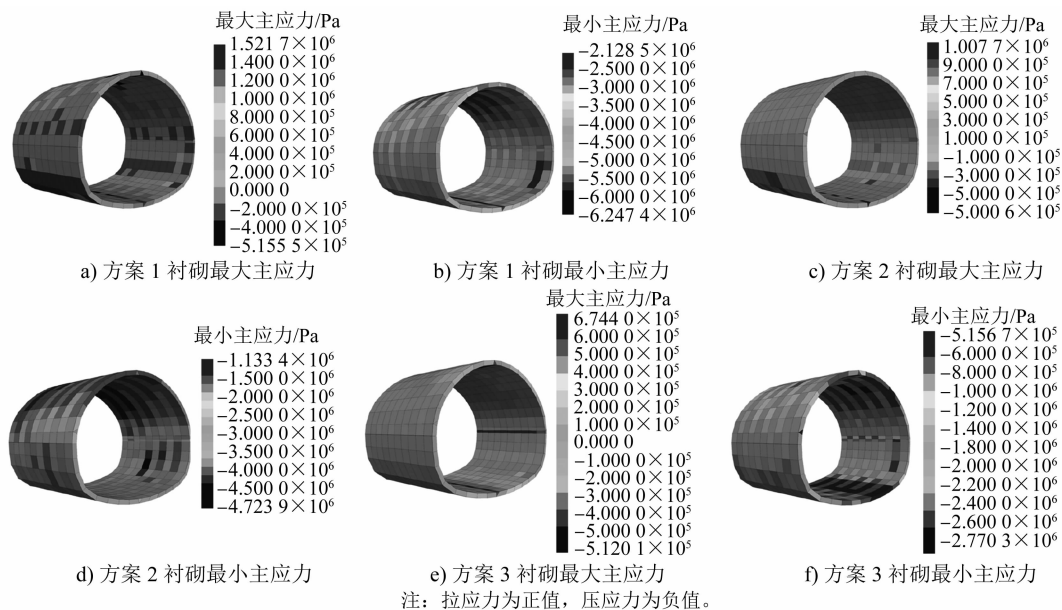


图 4 渠道与隧道交叉区衬砌应力云图

Fig. 4 Nephogram of lining stress in channel and tunnel intersection area

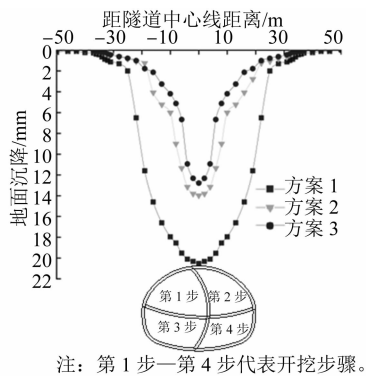


图 5 3 种加固方案的地面沉降图

Fig. 5 Land subsidence diagram of three reinforcement schemes

最大沉降为 25.70 mm,在隧道与渠道交叉处拱顶沉降为 14.89 mm,方案 1 产生的沉降均超过设计允许值。由图 7 b)可知,选择方案 2 加固时,拱顶出现的最大沉降为 14.03 mm,在隧道与渠道交叉区域处拱顶沉降为 7.58 mm,方案 2 产生的沉降均在设计允许范围内。由图 7 c)可知,选择方案 3 加固时,拱顶出现的最大沉降为 13.98 mm,在隧道与渠道交叉区域处拱顶沉降为 6.23 mm,方案 3 产生的沉降均在设计允许范围内。

为了进一步研究隧道施工与丰水期河道的互馈效应,列出了渠道研究点处的受力与变形峰值,如表 2 所示。由表 2 可知:方案 1 的渠道底板拉应力为 1.55 MPa,大于 C30 混凝土抗拉强度设计值 1.43 MPa,渠道底板、顶板竖向位移分别为 16.88 mm 和 16.04 mm,远大于渠道沉降控制值 10.00 mm,采用方案 1 加固渠道处于失稳状态;方案 2 的渠道底板拉应力为 0.93 MPa,小于 C30 混凝土抗拉强度设计值 1.43 MPa,渠道底板、顶板竖向位移分别为 10.07 mm 和 9.37 mm,采用方案 2 加固时的底板最大竖向位移超过设计允许值 10.00 mm,因此当采用方案 2 加固时,需对渠道底板提出合理的加固方案;方案 3 的渠道底板拉应力为 0.87 MPa,低于 C30 混凝土抗拉强度设计值 1.43 MPa,渠道底板、顶板竖向位移分别为 9.10 mm 和 8.64 mm,均小于渠道底板沉降控制值 10.00 mm。

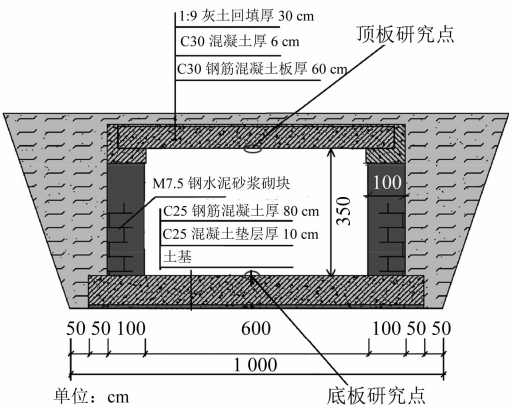


图 6 渠道研究点布置图

Fig. 6 Layout diagram of channel research points

3 种加固方案隧道剖面竖直位移云图如图 7 所示。由图 7 a)可知,选择方案 1 加固时,拱顶出现的

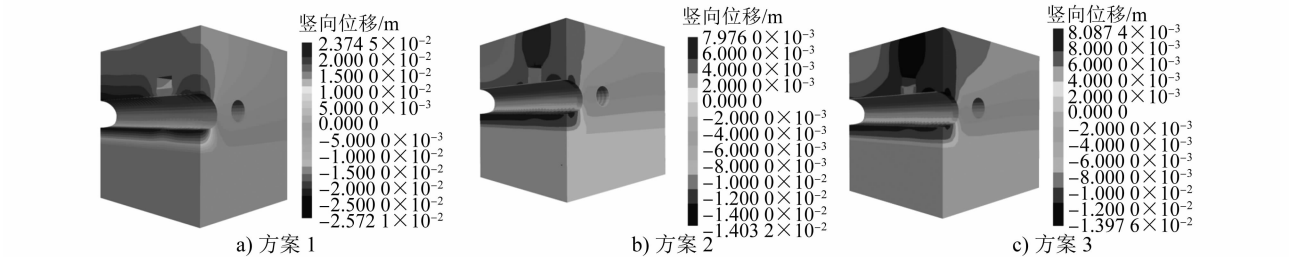


图 7 3 种加固方案隧道剖面竖直位移云图

Fig. 7 Nephogram of vertical displacement of tunnel section in three reinforcement schemes

表 2 渠道研究点处的受力与变形峰值

Tab. 2 Stress and deformation peak values at channel re-search point

支护方案	渠道底板拉应力/MPa	渠道底板最大竖向位移/mm	渠道顶板最大竖向位移/mm
方案 1	1.55	16.88	16.04
方案 2	0.93	10.07	9.37
方案 3	0.87	9.10	8.64

对比方案 1 和方案 3 可知,采用方案 3 加固后,渠道底板拉应力减小了约 43.9%,渠道底板和顶板竖向位移减小了约 46.1%和 46.14%,采用方案 3 能够最大限度地保证隧道的施工安全;方案 2 和方案 3 的渠道受力变形相差不大,但方案 2 的渠道最大竖向位移超过限值。综上所述,超前管棚+渠道两侧注浆加固不能有效控制地层和渠道变形,难以保证塌方风险的可控性。为了保证施工时的渠道安全性,选择方案 3 加固隧道,既能避免隧道塌方,也可以保证渠道变形在可控范围内,充分发挥注浆止水作用和管棚刚度大的优势,有效控制地层和渠道变形,降低隧道施工的风险。

3 工程应用

为防止渠道和地面沉降较大,加固方案采用洞内为主,洞外为辅的施工原则。

3.1 洞内加固措施

- 1) 在隧道与渠道交叉区域布设超前管棚支护,其中隧道断面拱部 150°范围内搭设 $\phi 108\text{ mm}$ 超前管棚,壁厚为 6 mm,大管棚长度以沟为中心,前后各 10 m,环向间距为 400 mm,钢管轴线与衬砌外缘线夹角为 $1^\circ\sim 3^\circ$,管棚内注水灰比为 1:1 的水泥浆。
- 2) 隧道开挖前,在掌子面进行全断面超前注浆止水加固地层,浆液采用水泥-水玻璃双液浆,注浆孔应在开挖后初喷的掌子面上呈梅花形布置,初始注浆孔间距为 0.60~0.97 m,同时应保证孔的末端

间距控制在 1.20 m 范围内,并呈伞形辐射状布置,每一循环注浆长度为 15 m,止浆墙厚度为 6 m;注浆范围为掌子面及初支外扩 3.0 m 范围内。

3.2 洞外止水措施

施工过程中为减少隧道施工对渠道的影响,洞外渠道两侧采取地面袖阀管注浆。综上所述,隧道施工采用超前管棚+全断面注浆+渠道两侧注浆组合加固方案,结合 CRD 法施工。隧道加固方案如图 8 所示。

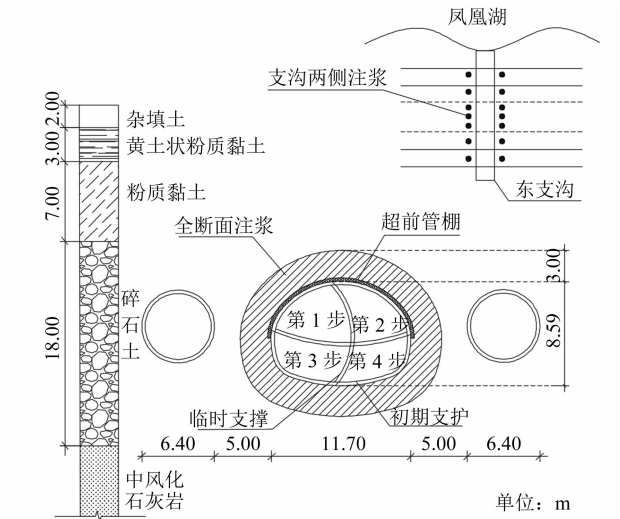


图 8 隧道加固方案

Fig. 8 Tunnel reinforcement scheme

3.3 现场监测分析

本文主要研究下穿渠道隧道的受力变形,仅选取隧道下穿渠道时的数据进行分析。矿山法现场监测点布置如图 9 所示。

隧道下穿渠道地面沉降监测值和模拟值如图 10 所示。由图 10 可知,采用方案 3 组合加固后,现场监测到的地面最大沉降为 15.27 mm,地面最大沉降模拟值为 12.79 mm,误差为 2.48 mm。采用方案 3 组合加固后拱顶的沉降监测值如图 11 所示。由图 11 可知,拱顶的最大沉降出现在 B 洞,最大值为

8.10 mm,小于控制标准值 10.00 mm,拱顶最大沉降模拟值为 6.23 mm,误差为 1.87 mm。

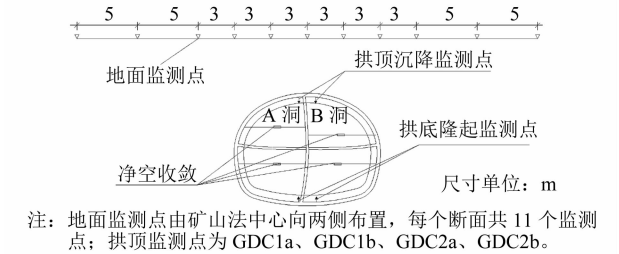


图 9 矿山法隧道监测点布置图

Fig. 9 Layout diagram of tunnel monitoring points by mining method

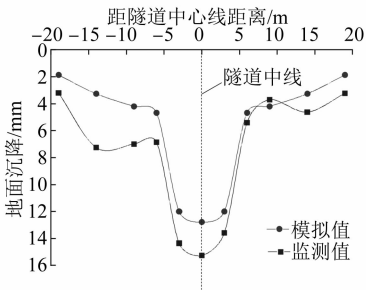


图 10 地面沉降模拟值与监测值对比

Fig. 10 Comparison between simulated and monitored land subsidence values

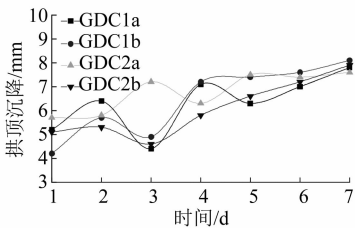


图 11 拱顶沉降监测值

Fig. 11 Monitoring value of vault subsidence

数值模拟与现场监测结果间有一定的误差,究其原因主要为现场采用注浆加固地层时,会出现注浆盲区、堵水效果不够理想等情况,这会导致地面沉降和拱顶沉降实测值略大于模拟值,但两者的误差在可接受范围内。因此,采用超前管棚+全断面注浆+渠道两侧注浆方案可以有效加固地层,保证隧道的施工安全。

4 结论

1) 采用超前管棚+全断面注浆+渠道两侧注浆的方案加固时,衬砌最大压应力相对另外 2 个方

案分别减少了约 55.7%和 41.3%,衬砌最大拉应力相对另外 2 个方案分别减少了约 55.9%和 33.7%。

2) 采用方案 3 加固时,地面沉降相对另外 2 个方案分别减少了约 37.67%和 8.50%,拱顶沉降相对另外 2 个方案分别减少了约 58.16%和 17.81%。

3) 在富水条件下,采用矿山法下穿渠道应从隧洞变形、支护结构受力、渠道受力及变形等多种因素综合考虑,从而保证隧道的施工安全。本文采用所提超前管棚+全断面注浆+渠道两侧注浆复合加固方案,结合 CRD 法,可有效加固地层并达到止水效果,降低了隧道的施工风险。

参考文献

[1] 张旭,张成平,韩凯航,等. 隧道下穿既有地铁车站施工结构沉降控制案例研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(4):759.
ZHANG Xu, ZHANG Chengping, HAN Kaihang, et al. Case study of control technology of structural settlements due to tunnelling beneath a subway station [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 759.

[2] 闫莉,张智慧,朱兴. 地铁隧道下穿河流施工遇富水软弱地层的控制技术[J]. 城市轨道交通研究,2021,24(3):138.
YAN Li, ZHANG Zhihui, ZHU Xing. Construction control technology of metro tunnel crossing under river in water-rich weak stratum[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 138.

[3] 石钰锋,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.
SHI Yufeng, YANG Junsheng, SHAO Huaping, et al. Risk analysis and control study of super-shallow tunnel with large cross-section under water-rich channel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 229.

[4] 武松,汤华,罗红星,等. 浅埋软岩公路隧道超前管棚支护机制与工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(增刊 1):3080.
WU Song, TANG Hua, LUO Hongxing, et al. Research on mechanism and engineering application of advanced support of pipe-roof for shallow buried and soft rock highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3080.

[5] 李健,谭忠盛,喻渝,等. 浅埋下穿高速公路黄土隧道管棚变形监测及受力机制分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(增刊 1):3002.
LI Jian, TAN Zhongsheng, YU Yu, et al. Analysis of deformation monitoring and mechanical behaviors of big pipe-roof for shallow-buried large-span tunnel to underpass highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3002.

(收稿日期:2021-11-27)