

文章编号:1673-9469(2024)01-0081-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.01.011

地铁隧道近接下穿城市沉降敏感区影响及优化分析

王万锋¹,陈宇华²,赵凯²,邹祯祥²,邱军领^{2*},杨桃^{3,4}

(1. 中铁建云南投资有限公司,云南昆明 650200;2. 长安大学公路学院,陕西西安 710064;3. 四川都金山地轨道交通有限责任公司,四川成都 611830;4. 四川蜀道新制式轨道集团有限责任公司,四川成都 610023)

摘要: 为研究地铁盾构下穿城市中沉降敏感地区时的沉降特性,基于地铁盾构隧道下穿加油站工程实例,建立三维有限元模型,得到盾构隧道近接加油站过程中地表以及油罐的沉降分布曲线,并进一步通过改变油罐位置,对比分析油罐在不同排列方式下受到隧道开挖的影响。结果表明:在油罐双层布置下,地表沉降随着隧道的掘进而增大,在施工结束后最大沉降达到 11.48 mm,靠近左线隧道一侧;油罐在隧道施工的扰动下,其最大沉降达到 2.85 mm。油罐单层排列相较于双层布置,油罐的最终沉降减少至 2.68 mm;油罐的上下侧的最大沉降差减少了 38%,同时油罐表面测点的沉降变化率减少了 41%,安全性大幅提升。

关键词: 盾构隧道;近接加油站;沉降特性;安全影响;数值分析

中图分类号:U455.4

文献标识码:A

Influence and Optimization Analysis of Subway Tunnels Close to and Under the Settlement Sensitive Area

WANG Wanfeng¹, CHEN Yuhua², ZHAO Kai², ZOU Zhenxiang², QIU Junling^{2*}, YANG Tao^{3,4}

(1. China Railway Construction Yunnan Investment Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China;
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3. Sichuan Dujinshandi Railway Transportation Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611830, China; 4. Sichuan Shudao New System Rail Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610023, China)

Abstract: To study the settlement characteristics of subway shield tunneling passing through settlement sensitive areas in cities, a three-dimensional finite element model is established based on the example of subway shield tunneling passing through gas stations. The settlement distribution curves of the ground and oil tanks during the process of shield tunneling approaching gas stations are obtained. Furthermore, by changing the position of oil tanks, the influence of tunnel excavation on oil tanks under different arrangement modes is compared and analyzed. The results show that under the double-layer arrangement of oil tanks, surface settlement increases with the excavation of the tunnel, and the maximum settlement reaches 11.48 mm after construction is completed, close to the left side of the tunnel. Under the disturbance of tunnel construction, the maximum settlement of the oil tank reached 2.85 mm. Compared to the double-layer arrangement, the final settlement of oil tanks is reduced to 2.68 mm in the single-layer arrangement. The maximum settlement difference between the upper and lower sides of the oil tank has been reduced by 38%, and the settlement change rate of the surface measurement points of the oil tank has been reduced by 41%, significantly improving safety.

Key words: shield tunnel; close to the gas station; settlement characteristics; safety impact; numerical analysis

收稿日期:2022-11-02

基金项目:中铁建昆仑投资集团重点研发项目(KLTZ-KX01-2020-009);陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBSF-511)

作者简介:王万锋(1974-),男,云南昆明人,硕士,高级工程师,主要从事岩土与隧道工程方向的研究。

* 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。

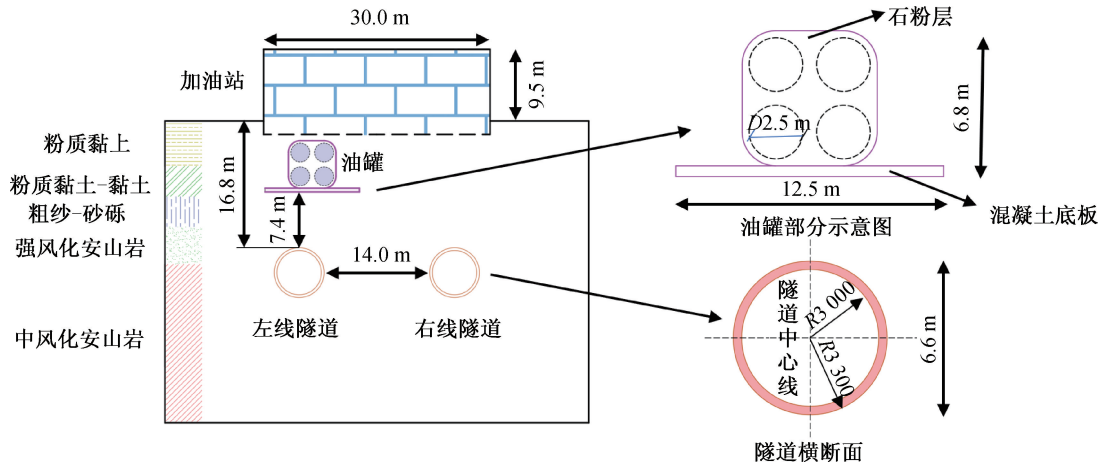


图1 盾构隧道与建筑物相对位置

Fig. 1 Relative position of shield tunnel and buildings

随着城市的快速发展,地面空间的利用率趋于饱和,地铁等城市交通轨道对促进城市交通发展有着重大的意义。盾构法以其施工较安全、施工效率高和对地层以及上部建筑物扰动影响小等优点,逐渐成为了城市地铁施工的主要方式^[1]。然而受到复杂地质条件和施工地区周围环境的影响,盾构推进过程所造成的不利影响仍然是不能被忽略的^[2]。目前,盾构开挖隧道与地上、地下建筑物的相互作用所引起的地表以及既有建筑的沉降分析成为许多专家学者研究的热点^[3]。

国内外学者在盾构施工所造成的地表以及建筑物沉降的分析中,大多以理论分析、有限元模拟和实地监测为主^[4]。于丹丹等^[5]通过理论分析研究了盾构隧道近接建筑物所造成的影响以及对建筑物本身抵抗变形的因素,并对建筑物的风险等级进行分级;黄宏伟等^[6]依托现场监测对盾构隧道施工所引起的地表沉降进行了研究;Yin等^[7]通过数值模拟研究了盾构隧道施工近接穿越既有隧道时对相邻现有隧道的影响并提出了相应的控制措施;Bilotta等^[8]对隧道穿越邻近历史建筑物进行三维有限元数值模拟,并分析了自然地下条件与考虑建筑影响两种情况下的地面沉降影响。

现有研究主要集中于盾构隧道下穿既有建(构)筑物所造成的影响,鲜有研究盾构近接下穿城市中沉降敏感区地带方面的报道。加油站通常会将油库或者油罐埋于地下,其受到隧道施工扰动的影响应着重研究。本文依托于地铁盾构隧道下穿加油站及其下埋油罐工程实例,建立三维有限元模型,研究地铁盾构下穿加油站时地表和油罐的沉降特性,对比分析不同油罐放置方式对隧道开挖后地表沉降的影响,以期盾构隧道近接

城市中沉降敏感区等类似工程提供参考。

1 工程概况

某地铁隧道采用盾构法施工,下穿加油站以及侧穿埋于加油站下方的油罐,二者之间的位置关系如图1所示。加油站油棚为1.5 m独立基础的1层网架结构,距隧道拱顶约12.7 m;4个地下油罐位于加油站的侧下方,其中2个汽油罐、2个柴油罐,双层排列,油罐直径2.5 m,油罐长约6 m,体积约为25 m³。该区间穿越地层从上到下依次为粉质黏土、粉质黏土-黏土、粗砂-砂砾、强风化安山岩和中风化安山岩。其中加油站区域隧道穿越地层为中风化安山岩,拱顶覆岩厚度小于1 m。设计定义风险源等级为I级。根据《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》(GB 50652—2011)^[9]要求,穿越加油站时必须降低风险源等级。根据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)^[10]要求,建筑物以及油罐竖向位移沉降控制值以及加油站倾斜控制值如表1所示。

表1 竖向位移沉降控制值

Tab. 1 Control values of vertical displacement and settlement

工程监测等级	一级	二级	三级
建筑物竖向位移控制值 S/mm	$S < 25$	$25 \leq S < 40$	$S \geq 40$
油罐竖向位移控制值 S/mm	$S < 15$	$15 \leq S < 30$	$S \geq 30$

2 有限元模型

2.1 模型建立

为接近真实情况,有限元模型的尺寸根据所在地区围岩的情况选为90 m×30 m×40 m(长×宽×

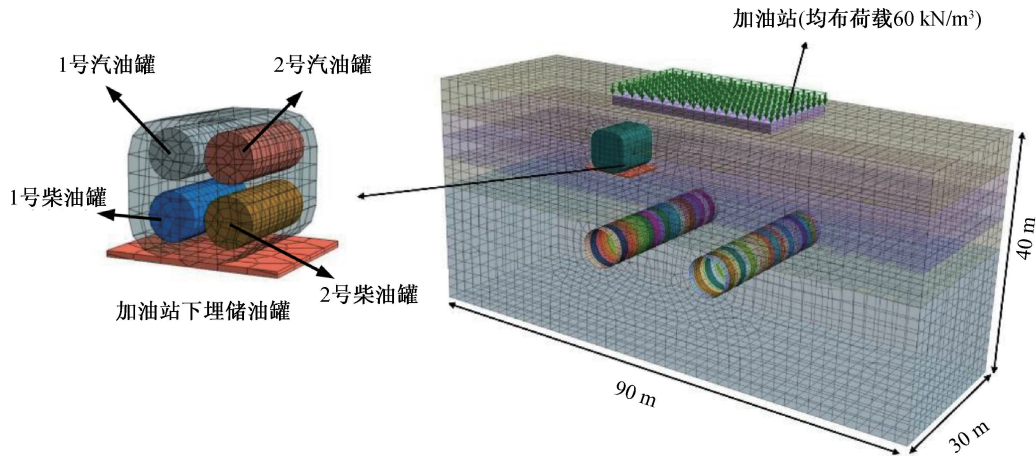


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

高),各层土体深度依次为 6、4、4、5、21 m,并且在模型的底部、四周侧边分别施加固定边界的约束。盾构隧道采用圆形断面,隧道直径 6 m,盾构注浆区域 0.3 m,两隧道净距 14 m,隧道拱顶埋深 19.7 m。有限元模型见图 2 所示,地层及建筑物材料建模参数见表 2、表 3。本模型主要模拟地层的沉降,因此在数值模拟的过程中加油站仅以均布荷载的形式加载在混凝土底座上。加油站占地面积为 30 m×12 m。

表 2 地层物理参数

Tab. 2 Physical parameters of stratum

地层名称	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	重度 γ $/(kN \cdot m^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa
粉质黏土	5.00	0.250	19.50	19.4	16.8
粉质黏土-黏土	9.15	0.231	18.83	20.9	15.9
粗砂-沙砾	15.60	0.305	20.70	23.9	14.4
强风化安山岩	35.90	0.250	25.10	42.6	35.4
中风化安山岩	70.00	0.250	30.00	41.3	32.5

表 3 施工所需材料物理参数

Tab. 3 Physical parameters of materials required for construction

材料名称	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$
盾构外壳	24 000	0.30	78.5
盾构管片	16 500	0.25	24.5
注浆体	3 000	0.31	24.0
油罐	200 000	0.30	76.9
石粉层	40 000	0.25	25.0
C30 混凝土	30 000	0.25	24.0

2.2 盾构施工模拟

盾构长度取隧道方向 30 m,施工顺序为双线分开施工,左线施工完毕后进行右线的施工。根据现场施工实测^[11],其施工控制参数为掘进压力 9 000 kN,顶推力 500 kN,注浆压力 0.5 MPa。施工过程可分为三个步骤:第一步,盾壳先行,在原本的开挖区以及注浆层施加掘进压力,每环推进 3 m,开挖出注浆和安装管片的土体;第二步,向前推进两环,施加顶推力,安装管片;第三步,在管片安装好后,开始移出盾壳,更换注浆层的属性用以模拟施加在管片上的注浆层,并在注浆后一个阶段施加注浆压力。

3 模型计算结果

3.1 地表沉降分析

在隧道施工过程中,不可避免地会影响到附近地层,因此,本文对地表的沉降以及建筑物附近的地表沉降进行研究。

3.1.1 地表沉降随施工过程的沉降变化规律

由于盾构隧道的推进会从加油站及附属建筑物下方穿过,所以本文对加油站所在位置的地表选取六个测点,如图 3 所示,以分析加油站区域地表沉降变化。

左线先行施工,该过程中测点 1 与测点 4 的沉降变化比较明显且沉降的变化率相似,左线施工完成后两测点沉降均维持在 9.49 mm,占总体沉降的 89%;而测点 2、5,由于测点位置位于双线隧道的正上方,其在左线施工过程中趋近于线性变化,在左线施工完毕时两测点的沉降均达到 4.98 mm,占总体沉降的 49%;测点 3、6 位于右线隧道上方,

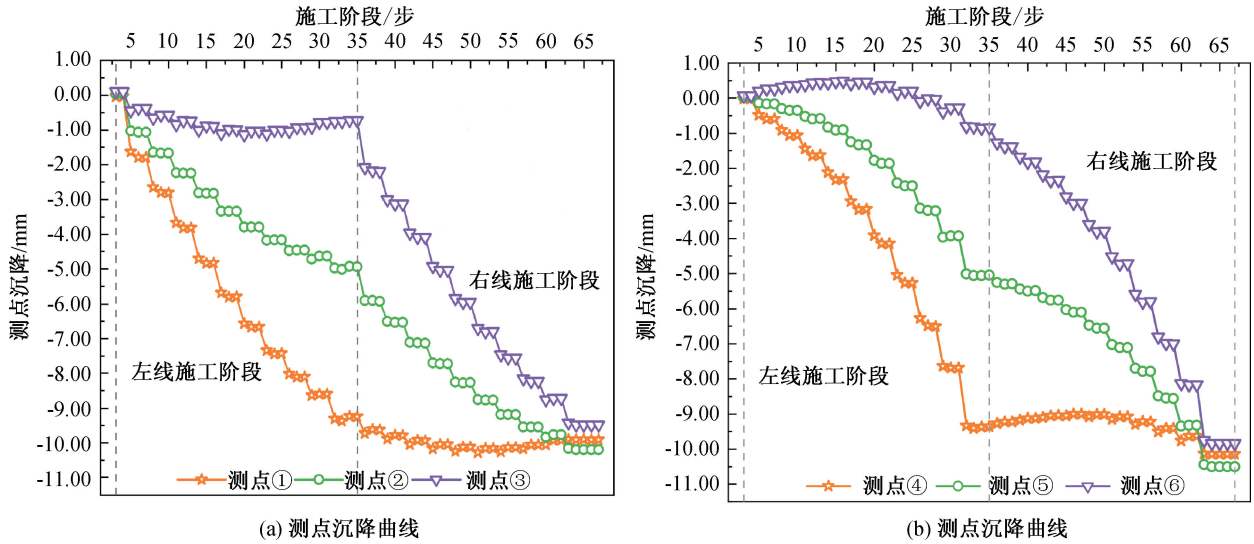


图3 建筑物测点沉降

Fig. 3 Settlement of building measurement points

因此受到左线施工的影响较小,左线施工结束时两测点沉降维持在 1.21 mm 处,占总体沉降的 8%。在右线施工的过程中测点 1、4 距离施工区域较远,受到影响较小,在施工结束后两测点沉降增至 9.90 mm;测点 2、5,其沉降规律仍趋近于线性变化,在施工结束时,沉降增至 10.52 mm;测点 3、6 距离右线施工区域较为接近,其沉降变化率增大,待右线施工结束两测点处沉降达到 9.60 mm。

由上述分析可知,当双线隧道施工结束后,建筑物各测点的沉降均维持在 9.80~10.50 mm,沉降均保持在表 1 所给出的一级控制值之内,隧道施工安全穿越建筑物。

3.1.2 施工结束后的地表沉降分布规律

地表在施工结束后的沉降规律见图 4,地表的沉降以隧道施工区域为对称轴呈“V”型分布,在隧道正上方的沉降达到最大值。累计沉降最大值达到 11.48 mm,位于左、右线隧道起始点的上方,且靠近左线施工区域。距离隧道施工范围外的地表区域会产生小范围的隆起,且隆起高度最大为 0.5 mm,对建筑物以及地上道路的影响可忽略。

施工结束后,加油站所在位置的地表出现了一定程度的下沉,并且建筑物为网架结构,建筑物所在地区的沉降达到了 10.36 mm,从图 3(b)中可以看出接近建筑物地区的沉降变化梯度有所减小,达到近乎水平的程度,说明建筑物在施工结束后的沉降较为均匀,并没有出现倾斜的情况。根据表 1 所提供的建筑物沉降控制值,模拟结果处在报警值以内,是偏于安全的。由图 5 实测结果可知地表在施工过程中产生的最大沉降为 9.93 mm^[11]。

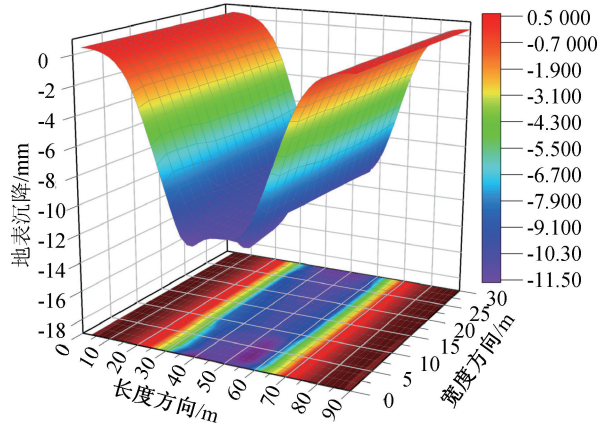


图4 施工结束后的地表沉降

Fig. 4 Surface settlement after construction

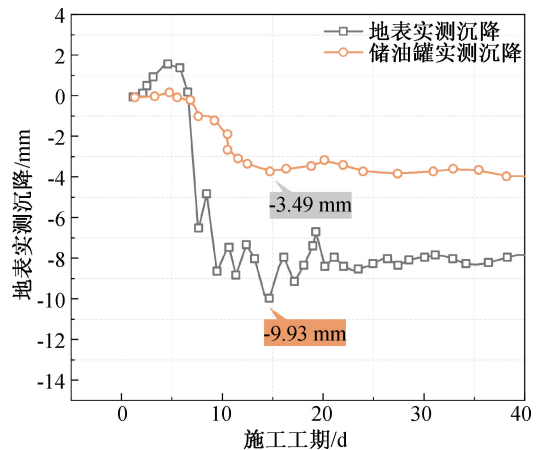


图5 沉降实测曲线

Fig. 5 Measured settlement curve

与实测数据相比,模拟数值偏大,这与施工及地上的行车会对土体产生扰动有关,同时实测时的环

境因素也是使数据出现偏差的原因之一。

3.2 油罐沉降分析

油罐位于左线隧道的侧上方,以石粉层填筑,在石粉层下方施加混凝土底板。由于隧道的施工,对加油站下方埋置的油罐会有一些影响,现将隧道所测穿油罐进行编号,见图 2。

3.2.1 油罐沉降随施工过程的变化规律

油罐可能会受到隧道施工的影响产生沉降或挤压。对此进行模拟计算,分析油罐表面测点随着施工过程所产生的位移。沉降情况取各个油罐上侧与下侧的测点进行沉降监测,沿罐身选取如图 6(a) 所示三个测点。

根据图 6 中结果,油罐的沉降随着 Y 方向坐标的增长有所增加,沉降累计最大值为 2.84 mm。油罐靠近左线施工区域,左线的掘进施工对油罐的

扰动相对较明显,并且在盾构隧道的施工中,注浆压力的施加阶段会对油罐的沉降影响较为明显,会使油罐有些许的隆起;之后由于施工进行到下一个阶段,油罐表面将会再次沉降;最终油罐的沉降稳定在 2.75 mm。可以看出,盾构的施工对油罐会有一些程度的影响,而且对于处在第二层的两个柴油罐来说,较上层两汽油罐所产生的沉降幅度大。油库沉降报警值为 1.5 cm 符合规范^[9]要求,隧道施工可安全通过油罐部分。实际工况的累计最大沉降为 3.49 mm^[11],见图 7,模拟与实测结果的偏差,可能与施工过程对土体的扰动比模拟的情况更加复杂有关。

3.2.2 油罐沉降分布规律

由上述分析可以看出,隧道施工的过程对油罐有一定的扰动,且施工结束后油罐的沉降基本较为平稳。为了更加细致地分析隧道施工对油罐

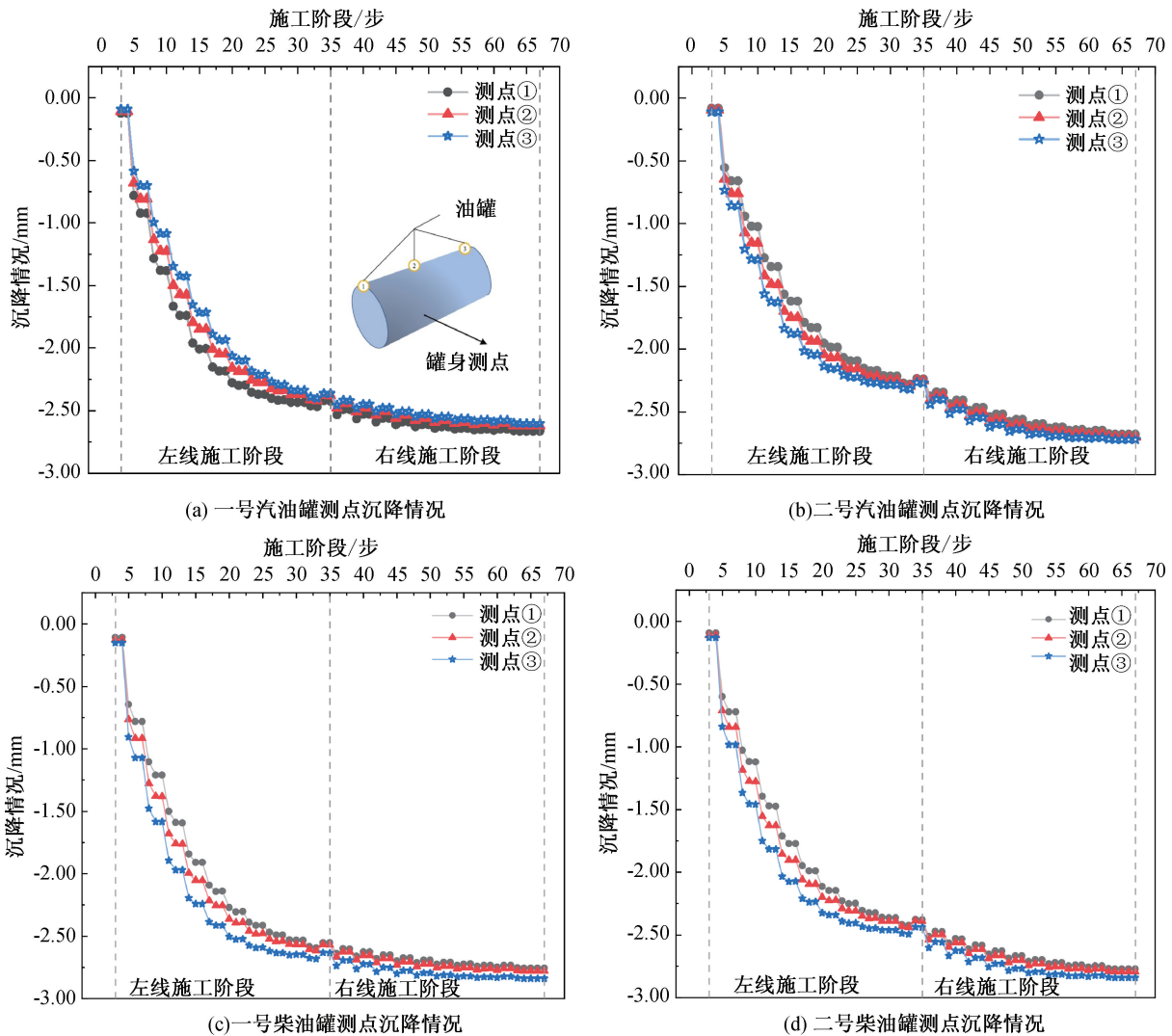


图 6 油罐罐身测点沉降

Fig. 6 Settlement of measurement points of oil tank body

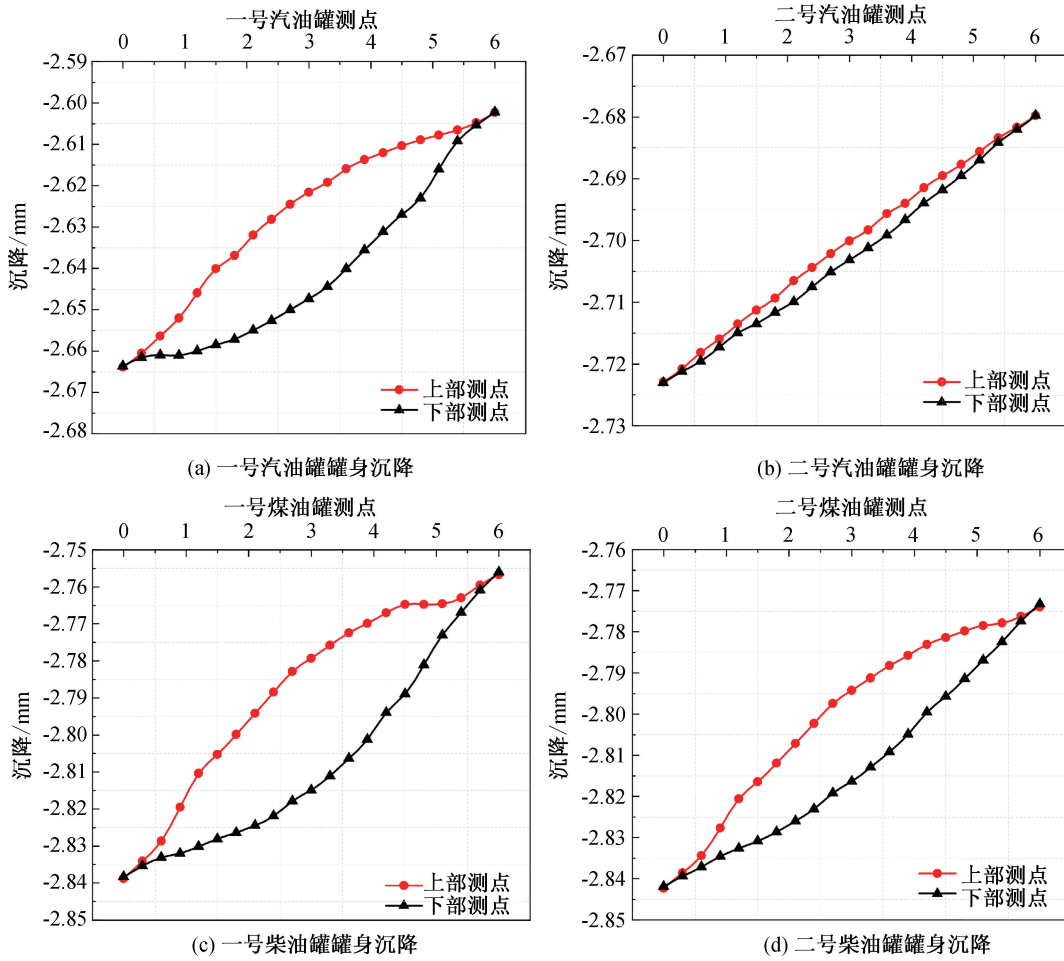


图7 施工结束后罐身沉降

Fig. 7 Tank body settlement after construction

所造成的影响。在罐身上侧与下侧沿着罐身轴线每0.5 m设置一个测点,分析其沉降规律,其施工结束后的沉降结果如图7所示。

各油罐的沉降均由罐首至罐尾逐渐减小。另外每个油罐的上部测点与下部测点的变化率并不一致,由图7对比得出,一号汽油罐与一号柴油罐的上下测点的沉降幅度相差较为显著,一号柴油罐在3 m处(油罐罐体中段)的上下部沉降差相差最为明显。

对于油罐所处的位置来说,位于上层的两个汽油罐的沉降幅度小于下方的两个柴油罐的。上层汽油罐的最大沉降达到2.69 mm,而对于下层的两个柴油罐,由于距离施工隧道更近,所以受到的影响就更加显著,其最大沉降达到2.84 mm。

油罐外侧的石粉层,可以降低油罐受到隧道施工的影响。根据图8石粉层结构的位移云图可以看出,石粉层的沉降分布由上至下逐渐增大。沉降最小部分位于左上部分,平均沉降达到2.42 mm;沉降的最大部分位于石粉层的下部,平

均沉降达到3.04 mm,受到施工影响较为明显。对于石粉层的内部安置油罐的部分,其沉降变形情况与罐体的沉降情况一致,隧道施工造成罐体与石粉层外壳出现空隙,故隧道施工可安全穿越油罐所在区域。

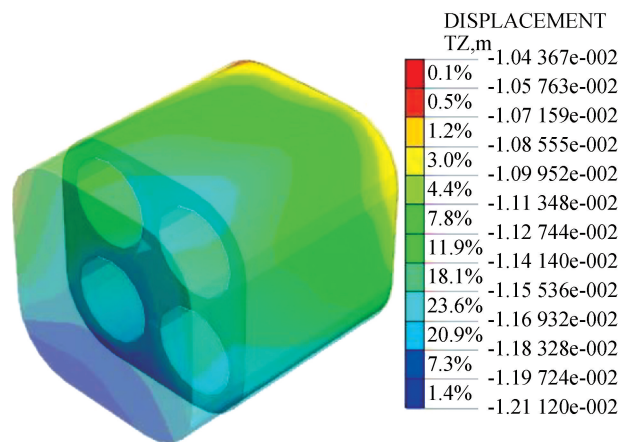


图8 石粉层沉降云图

Fig. 8 Cloud chart of stone powder layer settlement

4 优化方案对比分析

根据上述分析可知,油罐的布置形式会导致上下两层罐体的沉降随着施工而出现偏差。本次

数值模拟借鉴郑州地铁隧道下穿加油站中油罐水平依次排列方式^[12],改变油罐的排列方式见图 9 所示。测点选取同图 6(a),对油罐沉降随施工步骤的变化进行分析,如图 10 所示。

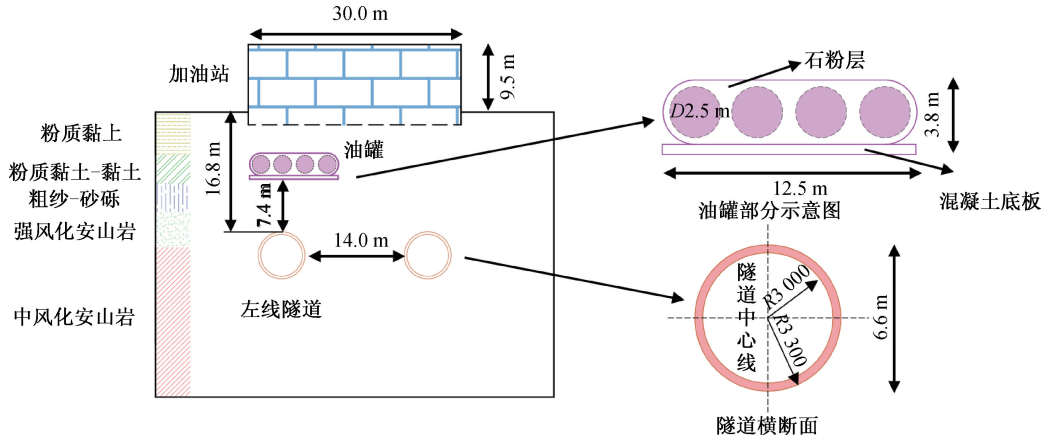


图 9 更改位置后的相对位置

Fig. 9 Relative position after changing position

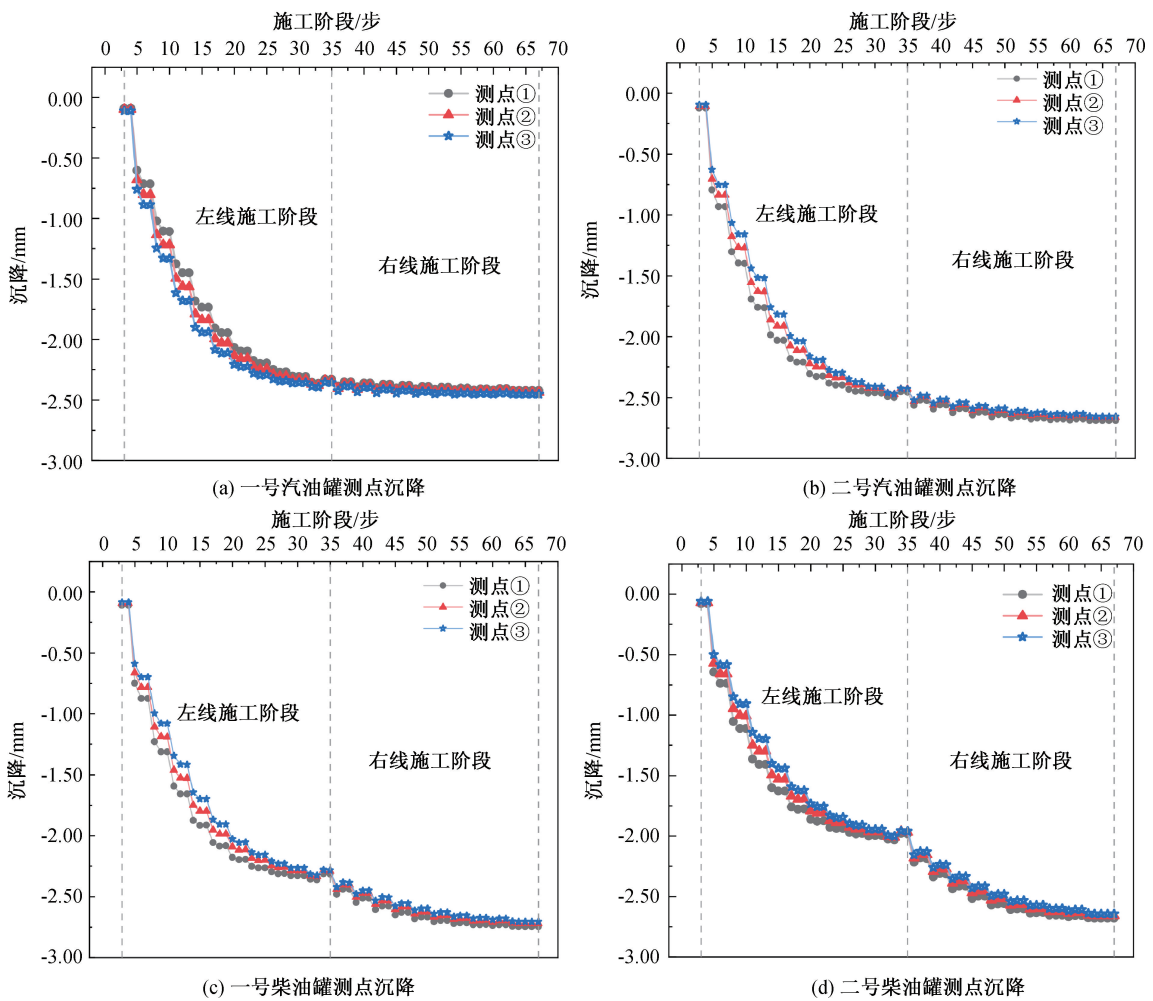


图 10 更改油罐排列位置后的油罐罐身测点沉降

Fig. 10 Settlement of oil tank body measurement points after changing the arrangement position of oil tanks

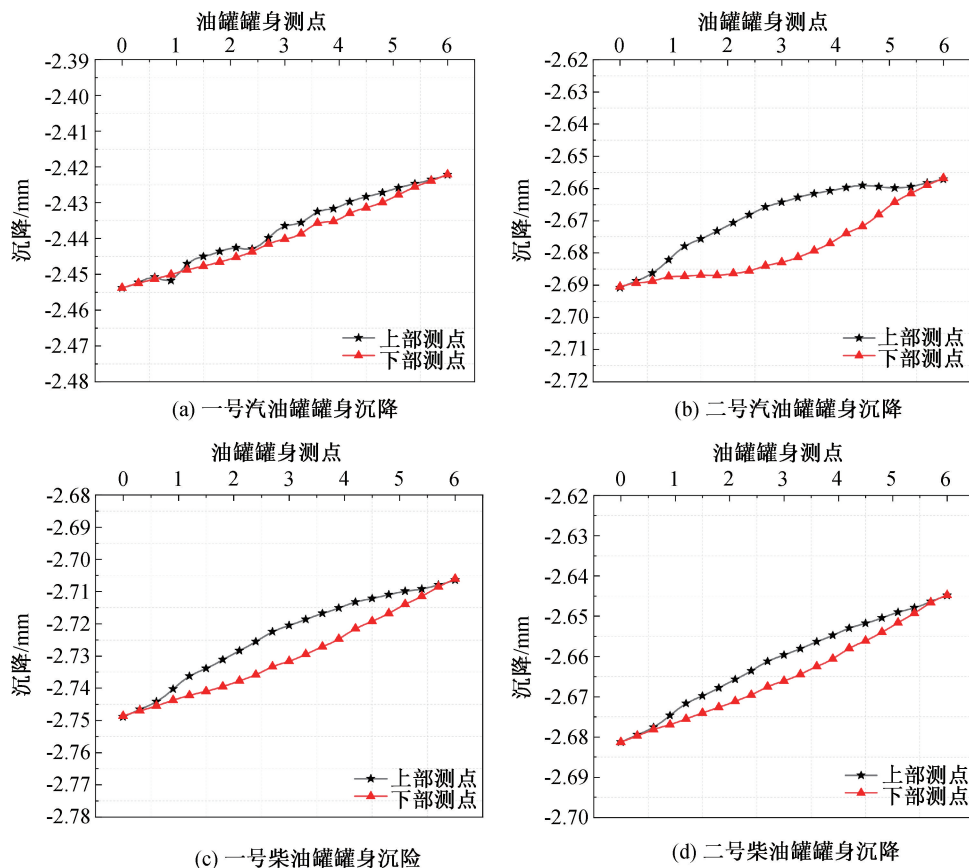


图 11 更改油罐排列方式后的罐身沉降

Fig. 11 Tank body settlement after changing arrangement of oil tanks

根据模拟结果可知,更改油罐的安装位置后,油罐的沉降随着施工的进行逐渐增大,最终均稳定在 2.68 mm。较之前的安装模式,四个油罐位于同一高度,其沉降较为均匀,并且其沉降的幅度也较之前有所减小,同时也会减轻油罐四周石粉层所产生的变形。为进一步探究这种排列方式对减小油罐表面沉降的影响,在施工结束阶段对四油罐进行研究,测点的选取同为油罐上、下表面轴线,计算结果见图 11。位于左线隧道正上方的二号汽油罐受到隧道开挖的影响相对较大,上下相差最大处位于二号汽油罐中部,较原始工况的沉降差减少 38%。更改排列位置后,罐身的沉降变化率相比之前减少 41%。

更改油罐摆放顺序后,不仅可消除上下层油罐的相对影响,同时罐体上、下沉降差减小显著。隧道掘进施工对油罐有一定扰动,但扰动影响较少。

加油站地表沉降在改变油罐位置后其变化规律如图 12 所示。可以看出,其地表最大沉降相较于油罐改变位置前降低了 24%,加油站附近地表受到隧道开挖所产生的沉降也较之前有所降低。

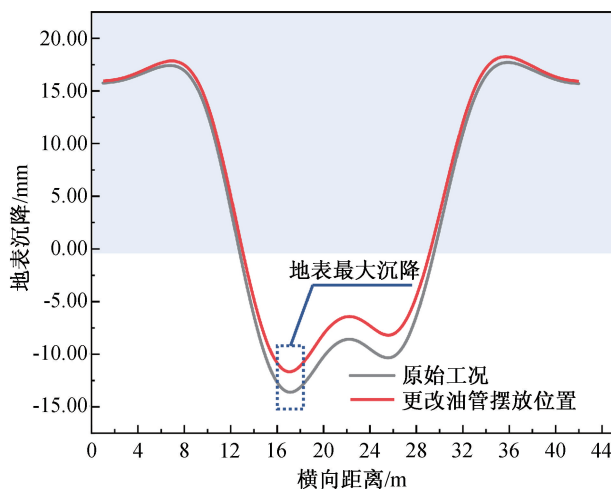


图 12 地表沉降对比

Fig. 12 Comparison of surface settlement

5 结论

1) 油罐位于左线隧道一侧,受施工扰动影响较大。施工结束后,隧道上方最大沉降位于两隧道中心偏左线一侧,为 11.48 mm。在盾构隧道施工扰动和建筑载荷影响下,最终沉降稳定在 9.50 mm

至 10.75 mm,左线隧道附近略大于右线。建议在双线隧道施工中,提前对先施工一侧隧道附近的建筑进行加固,可以减轻对先施工一侧地表的影响。

2)油罐的沉降变化会在施工阶段中受到注浆压力的影响,沉降会在隧道施加注浆压力的阶段有所减小。在左线施工的过程中油罐的整体沉降会达到 2.50 mm,而右线施工结束后,油罐的整体沉降达到 2.85 mm,可以看出油罐的沉降受到左线的影响较大,因此应该在左线施工的过程中注重油罐的保护。

3)在上下双层油罐布置下,油罐上下侧轴线处沉降差值最大为单层的 5.69 倍。下层油罐不仅受隧道施工影响,还受到上层油罐额外荷载影响。如果将油罐改为单层摆放,则油罐上下侧最大沉降差值可减少 38%,最大沉降减小 19%,地表沉降减小 24%。因此,建议隧道下穿油罐时,将油罐改为单层排列,这有利于减少油罐沉降,提高施工安全性。

参考文献:

- [1] 刘维正,戴晓亚,孙康,等. 地铁盾构隧道近距离上穿既有线路纵向变形计算方法[J]. 岩土力学,2022,43(03):831-842.
- [2] 晏启祥,王二力,张君臣,等. 列车荷载作用下联络横通道对平行交叉盾构隧道振动影响机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(S1):2892-2900.
- [3] 王海涛,苏鹏,孙昊宇,等. 软岩地层盾构隧道施工引起的地层沉降预测[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3549-3556.
- [4] 何川,张景,封坤. 盾构隧道结构计算分析方法研究[J]. 中国公路学报,2017,30(08):1-14.
- [5] 于丹丹,双晴. 地铁隧道施工邻近建筑物安全风险评价[J]. 城市轨道交通研究,2013,16(04):32-37+102.
- [6] 黄宏伟,张冬梅. 盾构隧道施工引起的地表沉降及现场监控[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(10):1814-1820.
- [7] YIN M, JIANG H, JIANG Y, et al. Effect of the excavation clearance of an under-crossing shield tunnel on existing shield tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 78: 245-258.
- [8] BILOTTA E, PAOLILLO A, RUSSO G, et al. Displacements induced by tunnelling under a historical building [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 61: 221-232.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范:GB 50652—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社出版,2014.
- [11] 徐森. 地铁盾构隧道下穿加油站的地表沉降分析[J]. 设备管理与维修,2021(10):111-112.
- [12] 康永胜. 郑州地铁盾构隧道下穿加油站的沉降分析[J]. 隧道建设,2015,35(08):766-771.
- (责任编辑 王利君)
- (上接第 80 页)
- [6] 孙巍,官林星,温竹茵. 大断面矩形盾构法隧道的受力分析与工程应用[J]. 隧道建设,2015,35(10):1028-1033.
- [7] 袁森林. 特大断面矩形顶管管节受力分析与设计[J]. 特种结构,2020,37(04):8-14.
- [8] 吴东鹏,王春凯. 超大类矩形钢管节顶进阶段受力状态研究;中冶建筑研究总院有限公司 2020 年工业建筑学术交流会议论文集(下册)[C]. 北京:中冶建筑研究总院有限公司,2020.
- [9] 任兆丹,陈伟超. 拼装式矩形顶管力学特性数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(S1):241-246.
- [10] 潘伟强,焦伯昌,柳献. 大断面类矩形钢顶管结构受力性能现场试验研究——以上海轨道交通 14 号线静安寺站顶管车站工程为例[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(06):975-983.
- [11] 郑斌. 大断面类矩形顶管壳体土压及顶进阻力分析——以上海淞沪路—三门路下立交工程为例[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(10):1740-1747.
- [12] 薛青松. 苏州城北路大断面矩形顶管顶力计算与实测分析[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(12):1717-1724.
- [13] 周浩,周千森,谈力昕,等. 考虑注浆作用的矩形顶管竖向土压力计算模型[J]. 地质科技通报,2021,40(02):125-130.
- [14] 袁心,马保松,赵阳森,等. 矩形顶管施工中管周压力的实测与分析[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(04):1225-1233.
- [15] 杨红军,荣亮,徐虎城. 超大断面矩形顶管减阻技术在郑州市下穿中州大道隧道工程中的应用[J]. 隧道建设,2016,36(04):458-464.
- (责任编辑 王利君)