

软土区盾构隧道下穿施工对在建高铁的影响研究

卢洪强¹, 陈典华¹, 牟晶¹, 符小林¹, 韦志凯², 王少雄²

(1. 中铁十八局集团市政工程有限公司, 天津 300000; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对软土地层中地铁盾构隧道曲线下穿在建高铁的工程问题, 提出采用桩板结构对下穿区域软土地层进行加固的工程措施, 并运用数值模拟和现场实测相结合的方法, 研究了盾构下穿施工对软土加固区、高速铁路路基和轨道的影响。研究表明: 采用桩板结构对软土区进行加固可以有效减小盾构施工对上部结构的影响; 加固后的软土区域在盾构掘进时上部路基和钢轨变形均很小, 而在远离桩板结构加固区域, 其变形大于加固区域, 说明在盾构下穿软土区段采用桩板结构进行加固对控制上部结构的变形具有显著的效果。

关键词: 软土地层; 盾构隧道; 下穿施工; 数值模拟

中图分类号: U445.43

文献标识码: A

Study on the Influence of Shield Tunnel Underpass Construction on High-speed Railway under Construction in Soft Soil Area

LU Hongqiang¹, CHEN Dianhua¹, MOU Jing¹, FU Xiaolin¹, WEI Zhikai², WANG Shaoxiong²

(1. China Railway 18th Bureau Group Municipal Engineering Co. Ltd, Tianjin 300000, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In view of the engineering problem of subway shield tunnel under curve in the soft soil layer under construction of high-speed railway, the engineering measures of strengthening the soft soil layer in the area under penetration by pile-plate structure are put forward. The influence of shield tunneling on soft soil reinforcement area, high railway foundation and track is studied by the method of numerical simulation and field measurement. The results show that the pile-sheet structure can effectively reduce the influence of shield construction on the superstructure. In the reinforced soft soil area, the deformation of the upper subgrade and rail is very small, and the deformation of the area that is far away from the reinforced area of the pile-plate structure is larger than that of the reinforced area, indicating that the reinforcement of the pile-plate structure in the soft soil area under the shield has a significant effect on controlling the deformation of the superstructure.

Key words: soft soil layer; shield tunnel; underpass construction; numerical simulation

1 引言

中国城市化进程的加快和城市人口的迅速增加, 给城市的交通和人们的出行带来了很大的挑战。地铁因不占用地面空间且方便高效而成为城市交通的发展趋势, 然而地铁在开挖施工时不可避免地下穿上部构筑物(建筑物)的现象。

当下穿淤泥等软土地层时, 软土地层具有天然含水量高、压缩性大、渗透性小、抗剪强度低、流变性以及强度受排水条件影响较大等特点, 承载能力不能满足工程建设的需要。在这种地质条件下修建高速铁路并采用盾构下穿, 在施工及后期运营阶段均面临很大的潜在问题, 主要表现为上部高速铁路路基、钢轨等产生过大的变形, 给高速列

收稿日期: 2023-08-03

作者简介: 卢洪强, 高级工程师, 本科, 研究方向为隧道及地下工程施工技术

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(编号: 52168070); 甘肃省科技计划资助(编号: 22JR5RA330)

车运行带来安全隐患。

针对下穿施工问题,当前国内外隧道盾构下穿铁路工程的工程实例中,以下穿既有线路较多,相关研究大多是在此背景下开展。左凯^[1]分析指出在软土地基中施工会对路桥工程产生直接影响,研究了不同施工方法在软土地基中的应用。Leitner A. 等^[2]针对维也纳新建高速公路隧道下穿 U2/U5 地铁工程开展研究,分析了淤泥河黏土地层的地层变形时间空间分布规律。陈靖^[3]以南京地铁 3 号线某区间盾构下穿沪宁城际铁路为背景工程,研究发现采用 CFG 桩、钻孔灌注桩和混凝土筏板进行地基加固后,地层变形控制效果明显。许朋成^[4]基于北京地铁某区间盾构下穿京沪高铁等工程案例,主要通过数值模拟的方法,结合实测数据,对上部地层、轨道变形等进行了深入研究。游龙飞等^[5]结合双线隧道下穿沪宁铁路,提出采用“桩+板”地基预处理加固方案,且采用加强配筋管片后,有效控制了隧道盾构时的铁路变形。邢烨炜^[6]以北京地铁 14 号线穿越京津城际铁路为背景工程,通过数值模拟盾构施工过程,对既有铁路的变形影响规律和影响范围展开研究。杨兵明^[7]以宁波软土地层区间隧道下穿铁路为工程背景,对盾构施工、动荷载引起的地表沉降规律、隧道-基础-上部结构的相互作用等方面进行了研究。刘英诚^[8]以广州地铁 3 号线盾构下穿广深高铁为背景工程,通过对盾构施工方案进行对比研究,总结出采用水平定向大管棚等施工方法时,轨面沉降量最小。朱双厅等^[9]以长沙地铁 1 号线盾构下穿京广铁路为背

景工程,鉴于富水、软弱等地层特点,针对性地提出使用旋喷桩对地基进行加固,并采用“横抬纵挑法”施工的组合模式,研究证明了其施工风险控制效果明显。肖广良^[10]以上海地铁下穿沪宁铁路为背景工程,结合数值模拟对工后路基沉降进行了对比研究。冯超等^[11]以南京地铁 S8 线某段盾构隧道下穿宁启铁路为背景工程,通过建立三维模型进行模拟分析,提出地基加固方案有效控制铁路变形。

现有工程研究大都是针对盾构下穿既有铁路展开研究,针对下穿在建工程施工的研究较少。本文针对盾构隧道下穿在建高铁时所面临的淤泥质软土地层条件,采取相应的加固措施,并研究盾构下穿施工对加固区域以及对上部在建铁路路基和钢轨的影响,判断软土区加固措施对控制上部结构最终沉降变形的效果,为类似地层中盾构隧道下穿施工提供有价值的参考依据。

2 工程概况

2.1 工程简介

工程位于福州地铁 5 号线 3 标 3 工区福州南站—樟岚车辆段盾构区间,盾构直径 6.45 m,双线累计长度 2059.09 m。地铁线路出福州南站后下穿农田、福厦高铁路基(在建)。其中,DK1+287.248~DK1+396.733 段为区间下穿施工段,总长度约为 99.5 m。其中,区间右线 RDK0+637.00~RDK0+772.00 段下穿福厦高铁路基,以 316 m 半径斜穿在建福厦高铁高填方路基。下穿段工程平面图如图 1 所示。

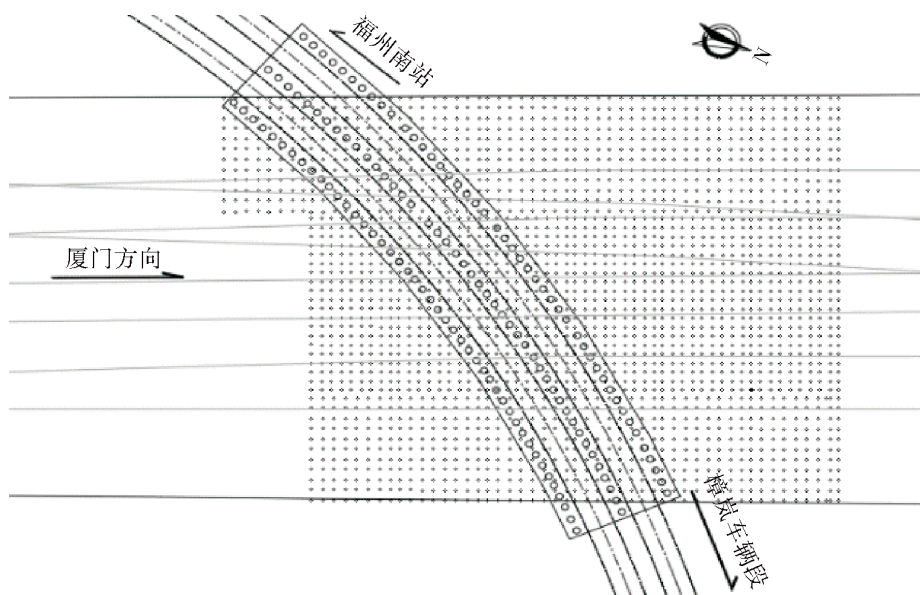


图1 下穿段平面图

2.2 水文地质工程地质概况

根据项目的岩土工程勘察报告，结合地质钻探结果，可知主要地层从上到下有：第四系全新统人工填土层（ Q_4^{pd} ）填筑土；第四系全新统长乐组上段（ Q_4^3 ）；下段（ Q_4^{1-2} ）冲积、冲洪积地层；第四系上更新统东山组（ Q_3^3 ）、龙海组

（ Q_3^1/Q_3^2 ）冲积、海积地层；第四系残积层（ Q_4^{el} ）；燕山晚期花岗岩（ γ_5^3 ）及侏罗系凝灰岩（J）。该下穿施工段主要位于软土地层，包含杂填土、淤泥、淤泥质土、粉质黏土等，具有含水量高、孔隙比大、强度低、灵敏度高等特点。软土区下穿段钻孔揭露的地层情况如图 2 所示。

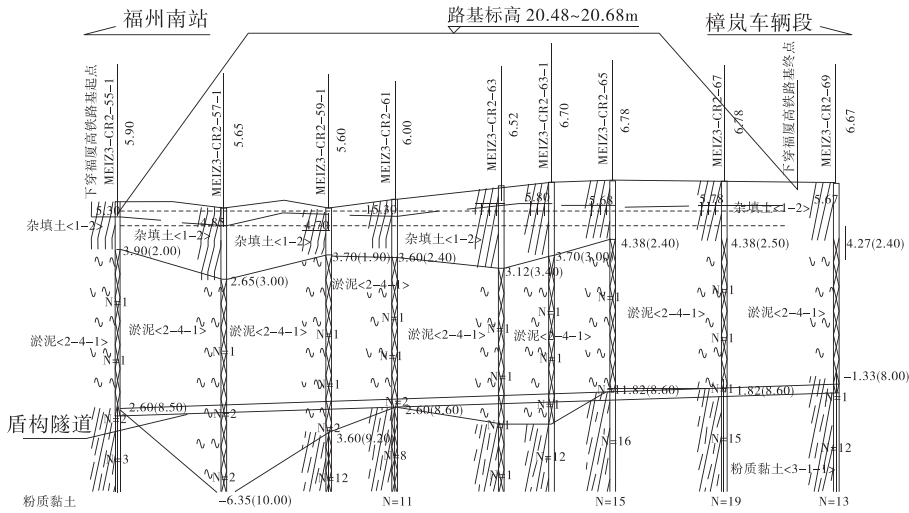


图 2 盾构下穿段地质纵断面图

2.3 下穿段软土加固方案

为保证隧道能顺利下穿该软土区段且满足地基承载力要求，同时保证盾构下穿施工引起上部路基和钢轨沉降的沉降值满足要求，需要在该段施作桩板结构。桩板结构加固范围为曲线构造，

曲率半径为 316 m，纵向长度外侧为 143.46 m，内侧为 131.53 m，横向范围分别为 26.533 m 和 26.508 m，在桩板结构横向外侧 6 m 范围内施作外延过渡加强桩。桩板结构平面和 I - I 剖面图如图 3 ~ 图 4 所示。

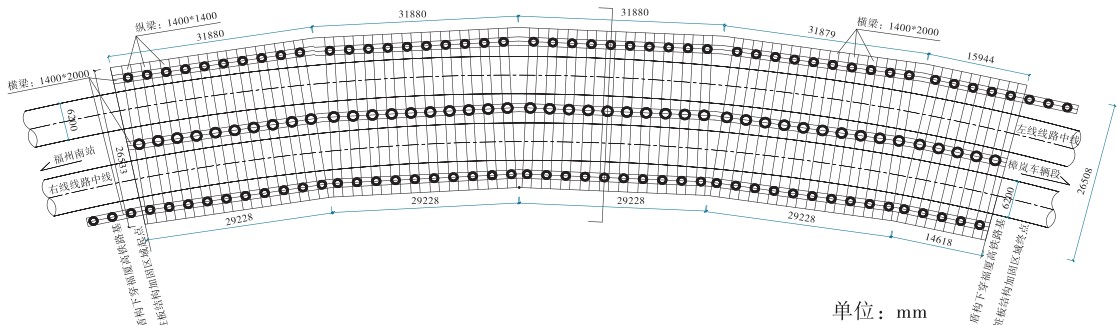
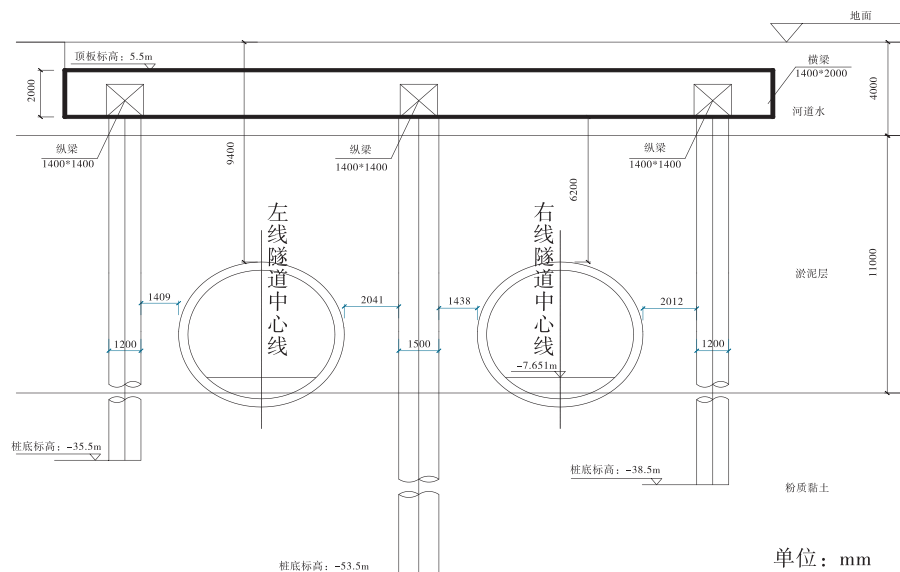


图 3 桩板结构平面图

在该桩板结构中，桩基采用钻孔灌注桩，共 291 根，平均桩长 35.2 m。横梁截面尺寸为 1400 mm × 2000 mm，纵梁截面尺寸为 1400 mm × 1400 mm，托板结构采用 C45 混凝土、HPB300、HRB400E 钢筋现浇结构。桩板结构外延过渡加强段中，采用 A850@600 三轴水泥搅拌桩进行加固，加固范围为桩板结构外侧 6 m，由地面向下加固至下部淤泥层底，竖向布置。具体桩基数量及类型如表 1 所示。

表 1 桩基数量类型汇总表

部位	里程	桩径/m	桩数/根	桩长/m	桩基类型
中间桩	DK0 + 637.00 - DK0 + 772.00	1.5	45	44 ~ 57	端承
					摩擦桩
侧边桩	DK0 + 637.00 - DK0 + 772.00	1.2	90	34 ~ 52	端承
					摩擦桩
隔离桩	小、大里程	1.2	6	14.4 ~ 15.7	端承
					摩擦桩
加固桩	线路左、右侧	1.0	150	29	端承
					摩擦桩



软土加固区-高铁段”为一体的有限元模型进行数值模拟分析。盾构隧道、桩板结构和高铁路基三者之间的相对位置如图 6 所示。

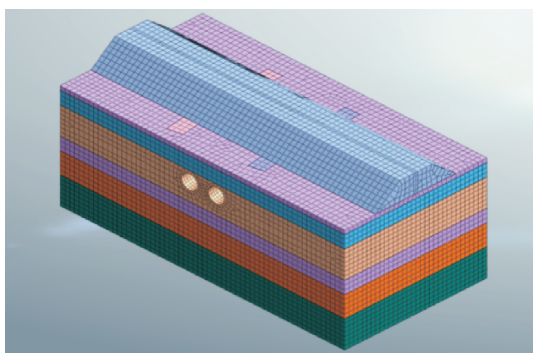


图 5 整体计算模型图

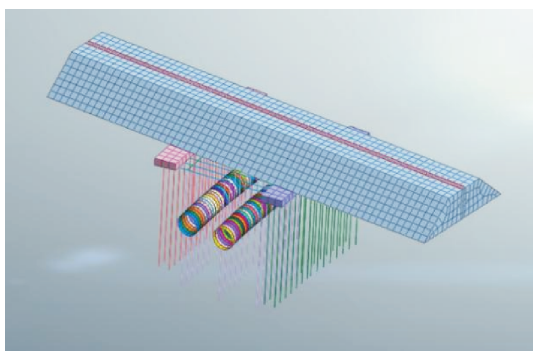


图 6 隧道、软土加固区、高铁段相对位置图

3.3 计算工况

由于桩板结构在盾构开挖之前已经施工完成,双线隧道在三排桩之间下穿,所以双线隧道水平间距固定取值,隧道埋深为 9.5 m,路基高度为路基填筑完工后的 18.5 m。盾构开挖采用先右线后左线的顺序。

4 盾构下穿施工影响分析

4.1 盾构开挖对软土加固区的影响分析

为了更直观地看出不同工况下地表的沉降规律,在下穿段中部取一与隧道垂直断面,在地表位置从左至右均匀选取 477491 号、477488 号、477485 号、477482 号、477479 号、477476 号、477473 号等七个节点进一步分析,点位选取如图 7 所示。盾构下穿施工双线隧道贯通时地表沉降变形如图 8 所示。

盾构开挖双线贯通时在以上点位的地表沉降曲线,如图 9 所示。双线隧道上方地表横向分布曲线如图 10 所示。

由图 9~图 10 可以看出,在盾构隧道开挖施

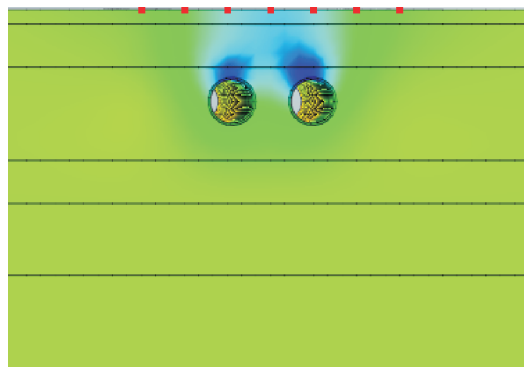


图 7 点位选取位置图

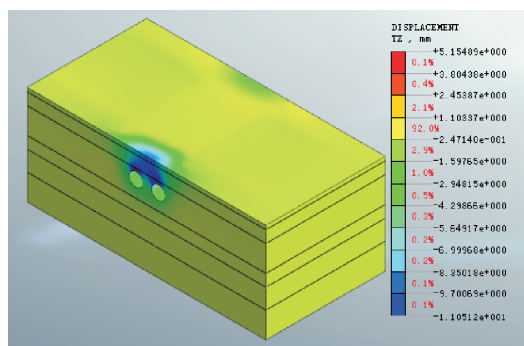


图 8 地表沉降云图

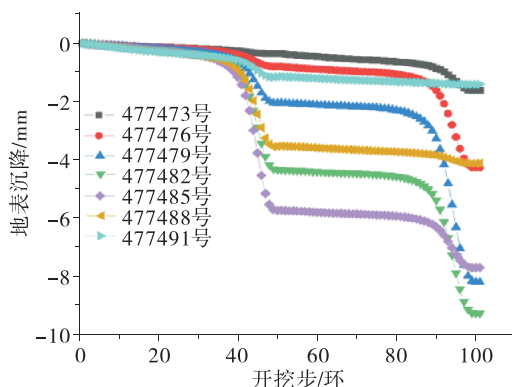


图 9 地表沉降曲线

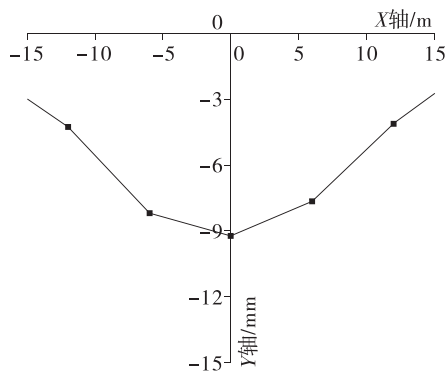


图 10 地表沉降横向分布曲线

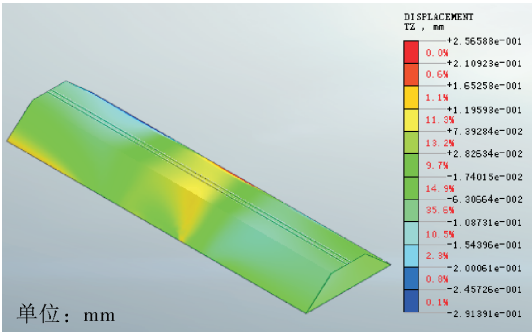
工过程中,地表各测点持续发生沉降,当盾构单项下穿测点所在断面时,沉降量有较大幅度增加,然后基本保持稳定不变;当盾构隧道反向再

次下穿该断面时, 又一次产生较大幅度的沉降。当双线隧道贯通后, 该断面的沉降值又保持稳定不变, 地表最大沉降值为 9.24 mm, 位于双线隧道水平间距中心上方地表。同时, 由地表沉降横向分布曲线看出, 地表沉降曲线呈中心下凹的“V 型沉降槽”形式。

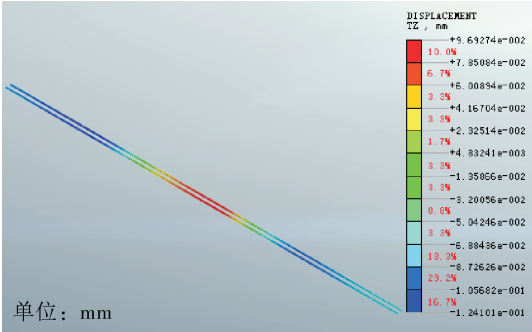
4.2 盾构施工对上部在建高铁的影响分析

为了分析盾构开挖对上部路基及钢轨的影响, 模型中只考虑路基受下穿隧道的影响, 不考虑路基自身的固结沉降变形, 所以在数值模拟时, 路基自身的固结沉降变化过程在盾构下穿施工前在有限元模型中被初始化。

(1) 路基及钢轨竖向位移。路基及钢轨的竖向位移云图如图 11 所示。由图 11 可以看出, 盾构隧道在双线贯通后, 路基受盾构影响产生的最大沉降值在 $-0.29 \sim +0.26$ mm 范围内, 钢轨的最大沉降值在 $-0.12 \sim +0.096$ mm 范围内, 可以看出在采用桩板结构加固后的软土结构区域内, 盾构隧道下穿对上部高铁路基和钢轨变形的影响均很小。说明在这种软土区域中采用桩板结构加固后, 其承载能力有了很大的提高, 充分说明桩板结构加固措施非常有效。



(a) 路基竖向位移

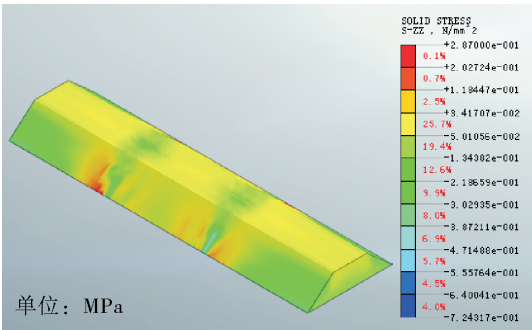


(b) 钢轨竖向位移

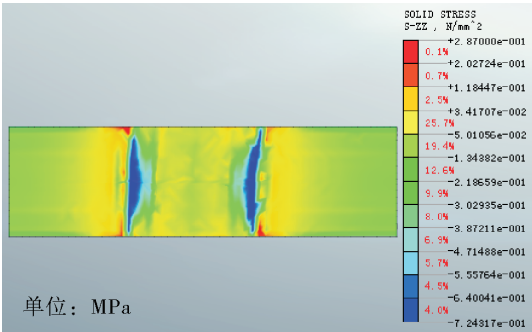
图 11 路基及钢轨竖向位移云图

(2) 路基应力。盾构开挖施工时路基应力云图如图 12 所示。由图 12 可以看出, 盾构施工时

路基主要承受压应力, 路基最大压应力分布于下穿区域路基基底处, 随着逐渐接近路基上表面, 路基应力也在逐渐减小, 直至为零。双线隧道贯通后, 路基最大压应力为 0.72 MPa, 而最大拉应力为 0.29 MPa, 可以看出盾构隧道下穿施工后对路基的受力影响很小, 这是因为桩板结构加固提高了基础的承载能力, 但是应注意路基可能会由于受拉而产生裂缝。



(a) 轴侧图



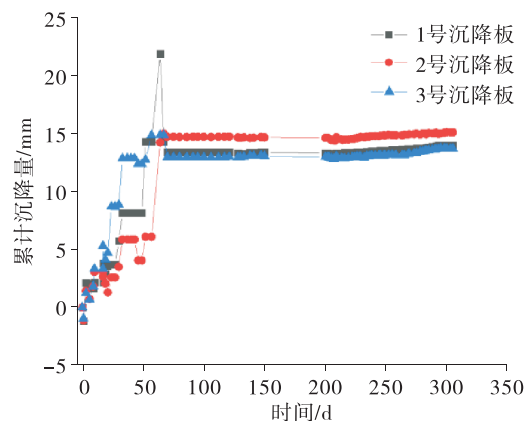
(b) 基底剖面图

图 12 路基应力云图

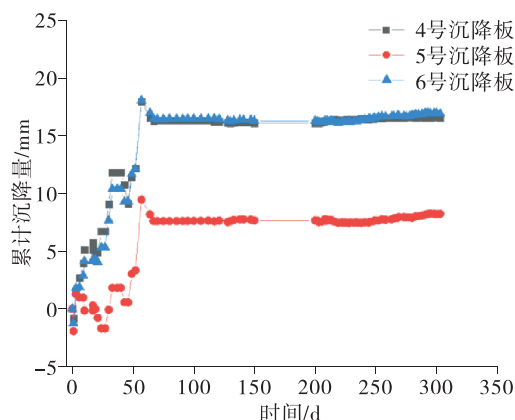
4.3 路基沉降实测分析

隧道开挖时在路基顶部每隔 50 m 布设一个沉降监测断面, 每个断面布有 3 个沉降板, 下穿段共布设 2 个监测断面。路基沉降监测从路基填筑开始, 路基填筑完工到隧道盾构掘进至下穿段的时间段未监测, 其时程曲线如图 13 所示。

由图 13 可以看出, 路基开始填筑后, 沉降板产生瞬时沉降, 随时间推移, 沉降量大致呈不均匀增大趋势。在第 70 d 之后, 其值逐渐趋于稳定, 这是因为下穿段为软土地层, 虽然提前进行了地基加固, 但随着路基自重不断增大, 路基固结沉降稳定需要一段时间。当监测到第 150 d 时, 路基最大沉降值稳定在 16.04 mm (控制值为 30 mm), 稳定后的沉降值达到了控制值的 53.47%, 位于 6 号沉降板。监测至第 200 d 后, 盾构隧道开始掘进直至双线贯通, 从两个断面第



(a) 断面一



(b) 断面二

图13 路基沉降量时程曲线

200 d后的沉降曲线图中可以看出,路基不同位置处仅发生了微小沉降,与数值模拟分析结果非常相近,这也说明了本软土区域采用桩板结构所采取加固措施的有效性。

5 结论

针对软土地层盾构隧道曲线下穿高填方路基施工的特殊性,采用有限元软件 Midas/GTS 建立“隧道-软土加固区-高铁段”为一体的有限元模型进行数值模拟分析,并结合现场实测值,得到以下主要结论:

(1) 采用桩板结构对淤泥质软土区域进行加固后,盾构掘进时变形量均较小,当盾构隧道

双线贯通时,软土加固区的地表最大沉降值为 9.24 mm,位于双线隧道水平间距中心上方地表。同时,由地表沉降横向分布曲线看出,地表沉降曲线呈中心下凹的“V型沉降槽”形式。

(2) 下穿段盾构隧道双线掘进完成时,上部路基和钢轨的变形均较小,但路基中存在拉应力。可以判定在本淤泥质软土区域采用桩板结构进行加固能显著提高基础的承载能力,对控制上部结构的变形具有良好的效果。应密切关注路基由于受拉而产生裂缝。

参考文献:

- [1] 左凯. 路桥工程中软土地基施工工艺研究[J]. 工程技术研究, 2020, 5(16): 88-89.
- [2] LEITNER A, HERZFELD T, NEBOIS C, et al. The new line crossing U2/U5 of the vienna subway: das neue linien-kreuz U2/U5 der Wiener U-Bahn [J]. Geomechanik Und Tunnelbau, 2017, 10(4): 395-405.
- [3] 陈靖. 地铁盾构隧道下穿沪宁城际铁路的影响分析[J]. 铁道勘测与设计, 2011(2): 80-83.
- [4] 许朋成. 盾构下穿高铁的地层变形分析及列车的动力响应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [5] 游龙飞, 王效文, 龚彦峰, 等. 盾构下穿新建铁路站场地基预处理技术研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(06): 104-108.
- [6] 邢焯炜. 北京地铁14号线盾构下穿京津城际铁路变形规律及动力响应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [7] 杨兵明. 宁波软土地层盾构隧道下穿铁路施工引起地层变形规律及控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [8] 刘英城. 盾构机穿越高速铁路的施工[J]. 隧道建设, 2006(S2): 47-49, 84.
- [9] 朱双厅, 沈炜东, 刘锦成, 等. 长沙地铁富水软弱地层盾构下穿京广铁路风险分析与控制研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(06): 102-107.
- [10] 肖广良. 盾构在软土地层穿越既有铁路施工技术[J]. 隧道建设, 2008, 28(3): 324-329.
- [11] 冯超, 高志刚. 地铁盾构隧道下穿宁启铁路的变形影响规律及控制技术[J]. 隧道建设, 2015, 35(10): 1015-1021.