

盾构下穿胶济铁路路基沉降规律与变形控制

李锁在¹, 郭仁亮², 孙 博¹, 孔德森², 安鹤鹏¹

(1. 中铁三局集团 第四工程有限公司, 北京 102300;

2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要:以青岛地铁 2 号线盾构隧道下穿既有胶济铁路为背景,采用三维数值模拟方法研究胶济铁路路基的沉降规律和变形控制。首先针对工程存在破碎带的情况,分析盾构穿越破碎带对铁路路基沉降的影响。然后考虑青岛上软下硬地层的特点,分别采用上部土层注浆加固和下部岩层全断面帷幕注浆加固方案,研究不同加固方案对盾构下穿既有铁路路基的变形控制效果。研究结果表明:盾构穿越破碎带区段时铁路路基沉降偏大,施工存在安全风险,影响胶济铁路的安全运营;地层加固后路基的沉降相较于地层未进行加固有明显的降低,上部土层注浆加固使路基沉降值降低了约 40%,全断面帷幕注浆加固使路基沉降值降低了约 65%,同时下部岩层加固相较于上部土层注浆加固对路基变形控制更加显著;地层加固后盾构下穿施工对铁路路基的影响减小,能够确保胶济铁路的正常运营。

关键词:盾构隧道;地层加固;数值计算;铁路路基;破碎带

中图分类号:U455 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)08-0398-06

随着中国经济持续发展和城市现代化进程的快速推进,城市规模不断扩大,人口不断增加,对交通规模及其效率提出更高的要求。地铁建设和铁路建设蓬勃发展,同时地铁隧道下穿运营铁路工程^[1-4]也急剧增加。盾构隧道的穿越施工影响机理复杂,会导致铁路路基沉降及铁路股道变形。因此,对于盾构下穿胶济铁路的情况下,开展盾构施工引起路基的沉降规律与控制研究具有十分重要的意义。

针对新建地铁隧道地表和路基沉降与控制变形的研究,部分学者对传统的 Peck 公示进行了修正。陈春来等^[5]基于 Peck 公式,对双线水平平行盾构隧道施工中土体损失引起的三维土体沉降计算方法进行了研究;贾宝新等^[6]在 Peck 公式中引入修正系数,使其适用于上软下硬地层中隧道施工的地表沉降预测。部分学者通过数值模拟研究隧道下穿铁路的沉降规律及变形控制。霍军帅等^[7]采用板十桩组合结构的形式对地基进行加固并进行了安全性分析;仇文革等^[8]研究砂卵石地层中盾构下穿敏感区域时地表的沉降规律及控制措施;杜明芳等^[9]研究了地铁隧道不同斜向夹角下穿施工对铁路

沉降的影响;王文谦等^[10]研究 3 种不同加固方案下大直径盾构下穿既有高铁路基及轨道的变形控制效果和措施;郭现钊^[11]对地铁盾构隧道近距离下穿广深铁路影响分析及防护措施进行了研究;陈袁东^[12]对大直径盾构隧道下穿铁路线群沉降控制技术进行了研究;杜虎^[13]对不良地层下盾构区间穿越既有铁路技术进行了研究;刘建友等^[14]针对盾构隧道下穿高速铁路路基沉降控制标准进行了研究;任建喜等^[15]研究了黄土地地区地铁盾构下穿铁路变形控制技术。

尽管关于地铁隧道下穿铁路有着丰富的研究,但是大多数都是研究盾构在土层中掘进时既有铁路路基沉降规律以及地层加固措施,缺乏盾构在岩层中掘进既有铁路路基沉降和地层加固的研究。因此以青岛地铁 2 号线国际邮轮港站—泰山路站区间盾构下穿胶济铁路为工程背景,通过 ABAQUS 软件研究盾构下穿铁路的路基沉降规律,论证上部土层注浆加固和下部岩层全断面帷幕注浆加固两种方案的可行性。研究成果可为地铁盾构下穿既有铁路施工时路基的沉降控制和铁路的安全运营提供参考依据。

收稿日期:2022-01-24

基金项目:中铁三局集团有限公司科研项目(K20-重大-01)。

作者简介:李锁在(1987—),男,内蒙古呼和浩特人,中铁三局集团第四工程有限公司,工程师,研究方向为地铁隧道及高速公路。

1 工程概况

青岛地铁2号线一期工程的国际邮轮港站—泰山路站区间位于青岛市市南区,本区间起讫里程为:右线 YCK24+177.400~YCK24+668.290,全长为 490.89 m;左线 ZCK24+177.400~ZCK24+661.706,全长为 499.552 m。在此区间的 K24+450~K24+490 段盾构隧道以 40°角下穿既有胶济铁路,平面曲线半径为 350 m,下穿长度约为40 m。盾构隧道为双洞单线隧道,左右线并行。盾构隧道下穿既有胶济铁路平面关系如图 1 所示。

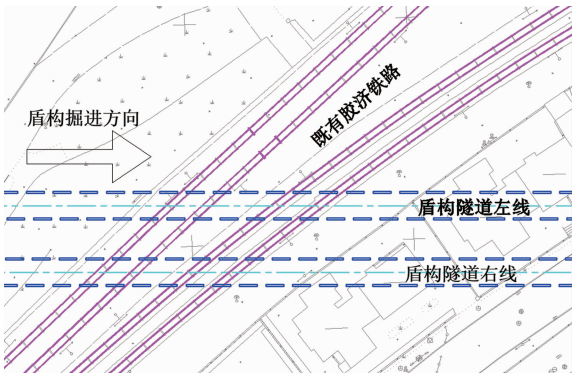


图 1 地铁盾构隧道下穿既有胶济铁路平面关系

国际邮轮港站—泰山路站区间地层主要由第四系全新统人工填土层(Q_4^{ml})、全新统海相沉积层(Q_4^m)及海相沼泽化层(Q_4^{mh})、全新统陆相洪冲积层(Q_4^{pl+al})、上更新统陆相洪冲积层(Q_3^{pl+pl})、燕山晚期粗粒花岗岩(γ_3^c)组成。隧道穿越胶济铁路区段地层从上到下依次为素填土、粗粒砂、中风化花岗岩、微风化花岗岩,同时在 K24+469~K24+510 有 F9 破碎带。盾构主要穿过中风化花岗岩和破碎带,中风化花岗岩呈块石状结构,均一性一般,破碎带呈碎裂状结构,黏聚力低且自稳性差。隧道顶部距离地表最小净距约 18 m,两隧道中心相距15 m。盾构下穿既有铁路位置关系与地层分布如图 2 所示。

工程线路揭露地下水类型主要为第四系孔隙潜水及基岩裂隙水,其中第四系潜水主要分布在滨海滩涂及侵蚀堆积缓坡地貌单元,基岩裂隙水主要分布在剥蚀斜坡地貌单元。

2 数值计算模型

2.1 模型尺寸

数值模拟选用 ABAQUS 有限元软件,分析盾构下穿胶济铁路路基沉降规律,研究不同加固方案

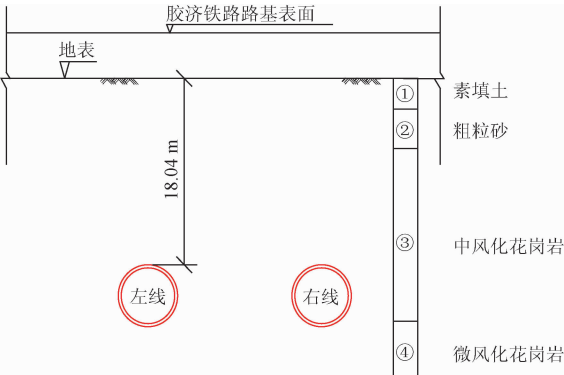


图 2 盾构下穿既有铁路位置关系与地层分布

对铁路路基沉降的作用。模型分为 6 个部件,分别为岩土体、路基、衬砌、等代层、盾构、铁轨。盾构下穿铁路区段隧道顶部距地表约 18 m,隧道下部地层取 3 倍洞径,最终取土体高度为 40 m。考虑边界效应以及路基的影响,土体宽度取 80 m,长度取 130 m。路基填土高度为 3.5 m,上宽 25 m,下宽 30 m;路基道砟层高度为 0.5 m,上宽 19 m,下宽 20 m。隧道开挖直径为 6.3 m,衬砌采用厚度为 300 mm 的 C50 混凝土管片,等代层厚度为 150 mm。数值模拟模型如图 3 所示。

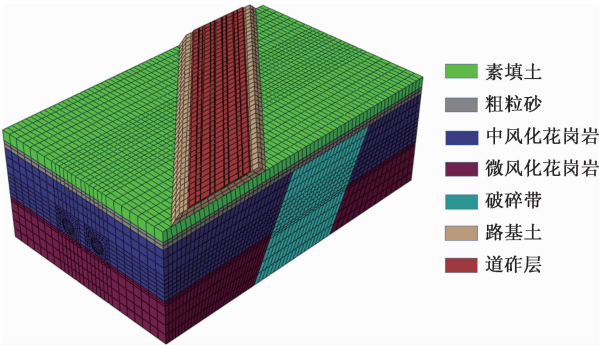


图 3 数值模拟模型图

2.2 模型参数与边界条件

数值模拟模型中的岩土体、路基和加固土体采用摩尔-库仑本构模型,衬砌、等代层、盾构、铁轨采用弹性本构模型。总结地勘报告、青岛地区相关工程^[16-17]经验以及胶济铁路相关工程^[18]经验,确定了地层、铁路路基和加固土体的参数。由于衬砌是由管片拼接而成,对其弹性模量折减 20%。模型参数列于表 1 和表 2。

模型中岩土体的前后两面限制 x 方向的位移,左右两面限制 y 方向上的位移,底面限制 z 方向的位移。路基的左右两面限制 y 方向的位移。

表 1 地层和路基结构参数

材料名称	$\rho/$ (kg/m^3)	$E/$ MPa	$c/$ kPa	$\varphi/$ ($^\circ$)	泊松比
素填土	1 850	10	10	18	0.35
粗粒砂	2 050	20	0	25	0.32
中风化花岗岩	2 570	7 000	300	35	0.3
微风化花岗岩	2 580	10 000	500	40	0.25
破碎带	2 570	200	100	30	0.3
路基土	2 100	100	15	28	0.35
道砟层	1 900	130	0	35	0.25

表 2 加固区及支护结构参数

材料名称	$\rho/$ (kg/m^3)	$E/$ GPa	$c/$ kPa	$\varphi/$ ($^\circ$)	泊松比
素填土加固区	2 050	0.1	40	25	0.3
粗粒砂加固区	2 100	0.2	30	25	0.3
破碎带加固区	2 600	0.8	400	35	0.25
盾构	7 850	210	—	—	0.3
管片	2 500	27.6	—	—	0.2
等代层	2 400	1	—	—	0.25

2.3 模型建立

为分析盾构下穿铁路时在破碎带影响下的沉降规律和验证不同地层加固措施的可行性,数值模拟过程中建立了以下 3 个模型。

模型 1:在安装管片和盾构盾尾注浆的情况下盾构下穿胶济铁路。

模型 2:在安装管片和盾构盾尾注浆的前提下,对上部土层注浆加固后盾构下穿胶济铁路。

模型 3:在安装管片和盾构盾尾注浆的前提下,对下部岩层全断面帷幕注浆加固后盾构下穿胶济铁路。

3 地层加固前数值计算结果

由于地层的复杂性和铁路路基的多样性,目前为止还没有一套成熟的铁路路基沉降标准;但随着学者们的深入研究,沉降控制标准在不断提高。根据《铁路线路维修规则》和娄国充^[19]基于平顺性要求的最大允许沉降变形标准,结合胶济铁路运营速度、隧道埋深、隧道类型,最终确定路基表面沉降控制在 3.8 mm 以内。

一般认为,轨道在沿铁路方向可看作是无限长的柔性结构,可以认为轨道的变形与路基地表变形是一致的,所以主要是研究路基表面沉降。下穿区段铁路路基一共 4 条铁路干线,取这 4 条路线作为数值模拟的监测线。比对 4 条监测线的沉降差异,分析破碎带对于铁路路基沉降的影响,研究不同加固方式对铁路路基沉降的作用。数值模拟 4 条监测线的俯视图如图 4 所示。

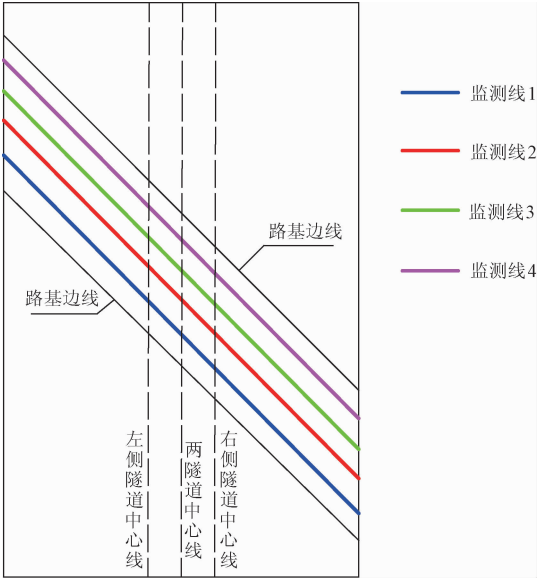


图 4 数值模拟监测线俯视图

模型 1 的 4 条监测线数值模拟结果和路基沉降云图分别如图 5 和图 6 所示。由图可见,在没有地层加固的情况下出现的沉降槽是典型的 Peck 沉降曲线。由于两隧道间距较近,沉降槽呈“U”形。监测线 1~4 的路基最大沉降值依次为 4.4、4.7、5.0、5.2 mm。监测线 1~4 的沉降值依次增大,这是由于路基下方地层中的破碎带分布不均,盾构在 K24+450~K24+490 段下穿既有胶济铁路,但是仅在 K24+469~K24+510 存在破碎带。监测 4 最大沉降值在两隧道中心线处,监测线 1~3 最大沉降值位于两隧道中心线的左侧 3 m 处。监测线 1~3 最大沉降值偏中心线左侧,除上述破碎带分布不均的原因外,盾构与胶济铁路并不垂直而是呈 45°角也是原因之一。

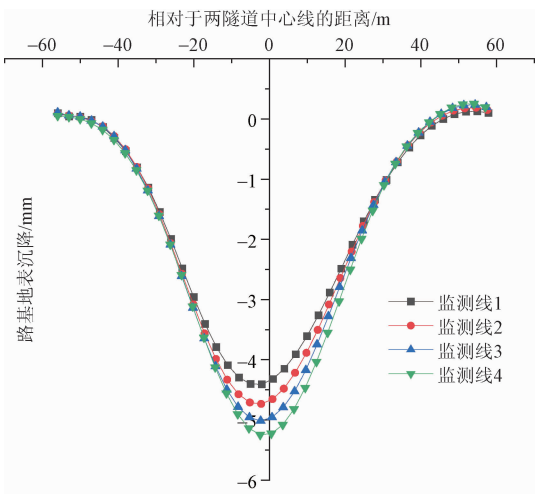


图 5 模型 1 的 4 条监测线数值模拟结果

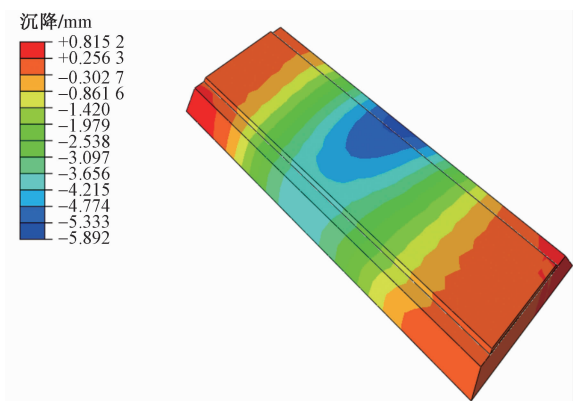


图6 模型1路基沉降云图

综上所述,在未进行地层加固的情况下,路基的沉降分布不均且大于安全警戒值 4 mm,无法保证胶济铁路运营的平顺性及安全性。

4 盾构隧道下穿既有铁路区段地层加固措施

根据模型 1 数值模拟的结果可知,在没有地层加固措施的情况下,盾构下穿施工会影响胶济铁路的平顺性及安全性;同时胶济铁路作为青岛市的重要交通路线,保证胶济铁路的安全运营成为青岛地铁 2 号线的工作重点。根据青岛地层上软下硬的工程特点,同时借鉴相关工程^[10,20-21]经验,在原有的管片支护前提下对路基下方地层进行加固。最终选取了两种合适的加固方案,一种是针对上部素填土和粗粒砂的注浆加固,另一种是针对中风化花岗岩尤其是破碎带的下部岩层全断面帷幕注浆加固。

4.1 上部土层注浆加固

青岛地区属于典型的上软下硬地层,针对上部素填土和粗粒砂地层在盾构施工前进行地面注浆加固,增强地层的强度和黏聚力,降低盾构施工引起的沉降,加强路基基础的整体性和稳定性。浆液采用水泥+水玻璃双浆液,注浆压力为 0.15~0.2 MPa。根据盾构施工的影响范围,注浆加固区域的深度为素填土和粗粒砂地层共 7 m,宽度为两侧隧道边线外延 29 m,长度为铁路路基地部边线外延 40 m。上部土层加固方案如图 7 所示。

4.2 下部岩层全断面帷幕注浆加固

盾构在铁路路基下部穿越中风化花岗岩和破碎带,中分化花岗岩均一性一般,破碎带强度和黏聚力较低,为了降低路基的沉降和保证铁路的安全运营,对隧道围岩注浆加固。为了尽可能减少盾构施工对胶济铁路运营的影响,在盾构施工前从地表对隧道围岩进行全断面帷幕注浆加固。浆液采用

水泥+水玻璃双液浆,注浆压力为 1.5~3 MPa。注浆加固区域深度为从隧道上下边线各外延 3 m,宽度从左线隧道边线外 3 m 处至右线隧道边线外 3 m 处,长度为铁路路基地部边线外延 40 m。全断面帷幕注浆加固方案如图 8 所示。

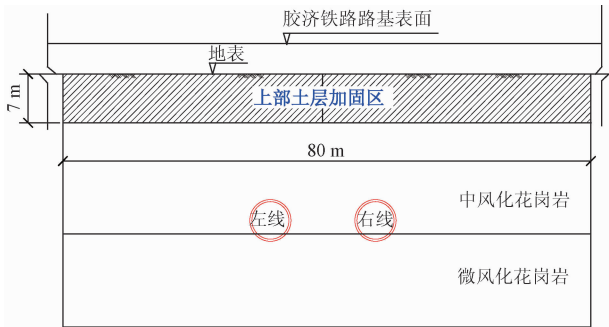


图7 上部土层加固剖面图

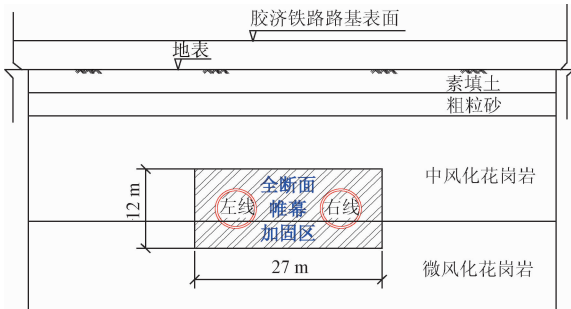


图8 全断面帷幕注浆加固剖面图

5 地层加固后数值计算结果

5.1 上部土层注浆加固后数值计算结果

模型 2 的 4 条监测线数值模拟结果和路基沉降云图分别如图 9 和图 10 所示。由图可见,在上部土层加固的情况下沉降槽依然为“U”形的 Peck 沉降曲线。路基沉降值均大于 2.5 mm,同时小于安全警戒值 4 mm;监测线 1~4 的最大沉降值分别为 2.8、3.0、3.2、3.4 mm。路基整体的最大沉降值出现在相对于两隧道中心线的左侧。

5.2 下部岩体注浆加固后数值计算结果

模型 3 的 4 条监测线数值模拟结果和路基沉降云图分别如图 11 和图 12 所示。由图可见,在全断面帷幕加固的情况下沉降槽依然为“U”形的 Peck 沉降曲线,与模型 1 相比较,模型 2 曲线更加平缓。路基沉降值均大于 1.5 mm,远小于安全警戒值 4 mm;监测线 1~4 的最大沉降值分别为 1.65、1.7、1.75、1.8 mm,路基整体的沉降趋于一致。路基的最大沉降值出现在相对于两隧道中心线的左侧。

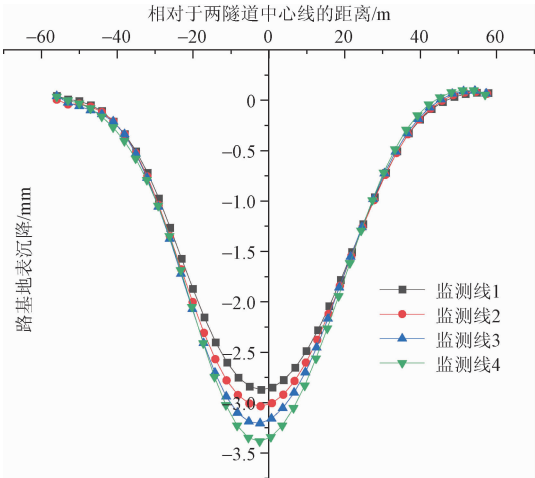


图 9 模型 2 的 4 条监测线数值模拟结果

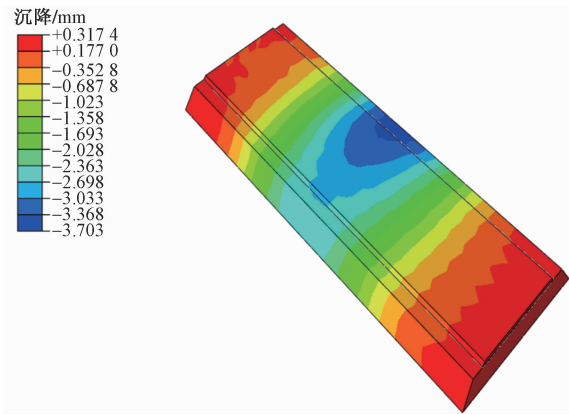


图 10 模型 2 路基沉降云图

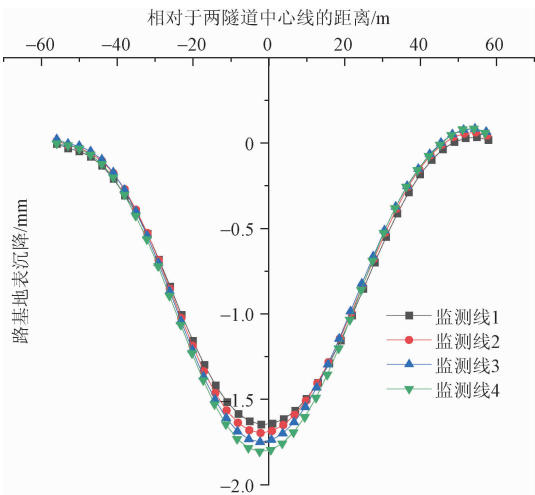


图 11 模型 3 的 4 条监测线数值模拟结果

5.3 地层加固前后数值计算结果对比分析

地层加固前后数值计算结果列于表 3。通过对比可得:模型 2 与模型 1 相比,路基的最大沉降值降低了 1.8 mm,监测线 1~4 沉降分别降低 41%、

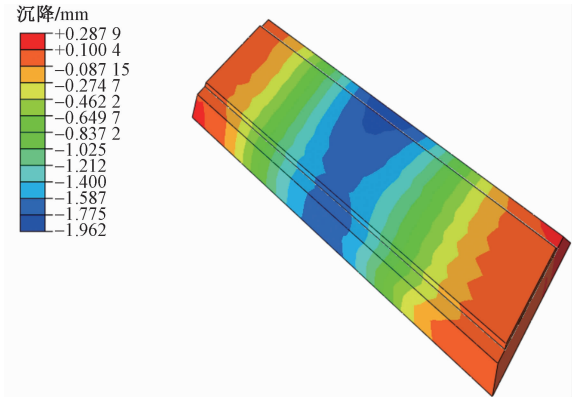


图 12 模型 3 路基沉降云图

38%、36%、35%;模型 3 与模型 1 相比,监测线 1~4 的最大沉降值分别降低了 66%、64%、65%、65%;模型 3 与模型 2 相比,各监测线沉降值降低率更加平均。综上,分别对上部土体和下部岩体加固后,铁路路基沉降有了明显的降低,利于铁路的安全运营;下部岩体加固与上部土体加固相比,沉降更低且差异小,更利于铁路的平顺性。

表 3 地层加固前后数值计算结果 单位:mm

数值模型	监测线 1 最大沉降	监测线 2 最大沉降	监测线 3 最大沉降	监测线 4 最大沉降
模型 1	4.4	4.7	5.0	5.2
模型 2	2.8	3.0	3.2	3.4
模型 3	1.65	1.7	1.75	1.8

6 结论

以青岛地铁 2 号线盾构下穿胶济铁路为工程背景,通过 ABAQUS 软件对地层未加固、上部土体加固、下部岩层全断面帷幕注浆加固 3 种模型进行模拟,得到以下结论:

1)盾构下穿胶济铁路过程中,破碎带的存在对于路基沉降有着显著的影响;同时由于破碎带的分布不均和铁路与盾构隧道的夹角关系,引发了路基的不均匀沉降,对于铁路安全运营存在不利影响。

2)盾构在硬岩中掘进相较于以往盾构在土层中掘进,路基的沉降值明显降低;但随着高速铁路的控制标准不断提高,不进行地层加固已经不能满足铁路对于安全性和平顺性的要求。

3)青岛地层是典型的上软下硬结构,通过对上部较软土层进行注浆加固使路基沉降降低了约 40%,既满足了安全运营要求又节约成本,证实了对上部土层注浆加固的可行性。

4)通过对下部岩体尤其是破碎带的加固使路基沉降有了明显的降低,降低了约 65%,不仅满足

铁路安全运营要求,同时有利于铁路的平顺性,但是存在施工难度大和施工成本较高的缺点。

5)通过研究盾构在上软下硬并夹杂破碎带的地层掘进对既有路基的影响,提出了合理的加固措施,为后续类似工程提供参考。

参考文献

[1] 许有俊,陶连金,李文博,等. 地铁双线盾构隧道下穿高速铁路路基沉降分析[J]. 北京工业大学学报,2010,36(12): 1618-1623.

[2] 蔡向辉. 城市轨道交通盾构下穿既有高速铁路的相互作用研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.

[3] 杨龙,徐海清,李长冬,等. 武汉软土地区盾构施工地面沉降与注浆加固研究[J]. 人民长江,2021,52(3):131-136.

[4] 徐干成,李成学,王后裕,等. 地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J]. 岩土力学,2009,30(S2):269-272,276.

[5] 陈春来,赵城丽,魏娟,等. 基于 Peck 公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J]. 岩土力学,2014,35(8):2212-2218.

[6] 贾宝新,高宗贤,惠鹏飞. 上软下硬地层隧道盾构施工引起的地表沉降研究[J]. 安全与环境学报,2021,21(3): 1083-1088.

[7] 霍军帅,王炳龙,周顺华. 地铁盾构隧道下穿城际铁路地基加固方案安全性分析[J]. 中国铁道科学,2011,32(5): 71-77.

[8] 仇文革,万世付,高刚刚,等. 砂卵石地层盾构隧道下穿铁路咽喉区地表沉降控制研究[J]. 现代隧道技术,2021,58(5):37-45.

[9] 杜明芳,满景奇,易领兵,等. 郑州地铁某盾构区间隧道不同斜向交角下穿施工对铁路的影响研究[J]. 现代隧道技

术,2020,57(S1):466-472.

[10] 王文谦,刘方,金张澜,等. 大直径盾构隧道下穿高铁无砟轨道路基预加固方案研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(12):96-102.

[11] 郭现钊. 地铁盾构隧道近距离下穿广深铁路影响分析及防护措施研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(8):107-112,133.

[12] 陈袁东. 大直径盾构隧道下穿铁路线群沉降控制技术研究[J]. 铁道运营技术,2021,27(3):11-13.

[13] 杜虎. 不良地层盾构区间穿越既有铁路技术研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(4):63-68.

[14] 刘建友,赵振华,韩琳,等. 盾构隧道下穿高速铁路路基沉降控制标准研究[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(2): 256-260.

[15] 任建喜,李龙,郑赞赞,等. 黄土地区地铁盾构下穿铁路变形控制技术[J]. 铁道工程学报,2013,30(5):57-62,111.

[16] 张为社,王渭明,贺广良,等. 青岛地铁穿越富水弱胶结地层支护方案优化研究[J]. 铁道标准设计,2016,60(10):81-87.

[17] 徐杨. 青岛地铁施工过断层破碎带围岩稳定性分析[D]. 青岛:青岛理工大学,2018.

[18] 王亚会. 盾构穿越运营铁路群的掘进施工扰动及主动防护研究[D]. 济南:济南大学,2019.

[19] 娄国充. 铁路隧道下穿既有路基沉降规律及控制标准研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.

[20] 孙连勇,黄永亮,王启民,等. 地铁盾构隧道下穿既有铁路变形控制研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(5):140-145,173.

[21] 李士中. 合肥地区新建盾构隧道下穿铁路路基段地层预加固措施研究[J]. 铁道建筑,2019,59(12):60-64.

Settlement Law and Deformation Control of Subgrade When Shield Underneath Jiaoji Railway

LI Suozai¹, GUO Renliang², SUN Bo¹, KONG Desen², AN Hepeng¹

(1. The Fourth Engineering Co., Ltd., China Railway No. 3 Engineering Group Co., Ltd., Beijing 102300, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China)

Abstract: Taking the shield tunnel of Qingdao Metro Line 2 undercrossing the existing Jiaoji Railway as the background, the settlement law and deformation control of Jiaoji Railway subgrade were studied based on three-dimensional numerical simulation method. Firstly, in view of the existence of crushing zone in the project, the influence of shield crossing crushing zone on railway subgrade settlement was studied. Then according to the characteristics of the upper soft and lower hard strata in Qingdao, the upper soil grouting reinforcement scheme and the lower rock curtain grouting reinforcement scheme were used to study the deformation control effect of shield undercrossing the existing railway subgrade. The results show that the settlement of railway subgrade is too large when shield passes through the broken zone section, and there are safety risks in construction, which affects the safe operation of Jiaoji Railway. The settlement of the roadbed after stratum reinforcement is significantly lower than that of the stratum without reinforcement. The upper soil grouting reinforcement reduces the settlement value of the roadbed by about 40%, and the whole section curtain grouting reinforcement reduces the settlement value of the roadbed by about 65%. At the same time, the lower rock reinforcement is more significant than the upper soil grouting reinforcement. The influence of shield tunneling on railway subgrade reduces after stratum reinforcement, which can ensure the normal operation of Jiaoji railway.

Keywords: shield tunnel; ground reinforcement; numerical calculations; railway foundations; fracture zones