

文章编号:1673-9469(2023)01-0055-11

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.01.009

盾构隧道下穿高速铁路基变形分析及影响因素研究

王立新^{1,2},高洋³,苗苗⁴,汪珂^{1,2},李储军¹,赖金星³,邱军领^{3*}

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西西安 710043;2. 西安理工大学土木建筑工程学院,陕西西安 710048;
3. 长安大学公路学院,陕西西安 710064;4. 广联达科技股份有限公司,北京 100193)

摘要: 为研究地铁盾构隧道下穿高速铁路基时的变形规律及其影响因素,以西安市实际工程为背景,建立三维数值模型,分析地铁盾构隧道下穿既有高速铁路基时高速铁路基位移、道床位移等因素的变化规律。同时,利用正交试验研究隧道开挖间距、隧道下穿角度等因素对高速铁路基的影响。结果表明:盾构隧道施工完成后,路基和道床的最大竖向位移分别为9.18、7.43 mm;路基土体横向最大位移不同方向分别为0.24、-0.29 mm;道床最大位移不同方向分别为0.17、-0.13 mm。此外,竖向净距对既有高速铁路基与高速铁路基道床竖向变形影响最大;下穿角度对既有高速铁路基道床横向变形影响最大。

关键词: 盾构隧道;高速铁路基;CFG桩复合地基;数值模拟;正交试验

中图分类号:U451

文献标识码:A

Research on Deformation Analysis and Influencing Factors of Shield Tunnel Passing Down the High-Speed Railway Foundation

WANG Lixin^{1,2}, GAO Yang³, MIAO Miao⁴, WANG Ke^{1,2}, LI Chujun¹, LAI Jinxing³, QIU Junling^{3*}

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd, Xi'an, Shanxi 710043, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shanxi 710048, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710064, China; 4. Glodon Company Limited, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to study the deformation law and its influencing factors when the shield tunnel underpasses the high railway foundation, a three-dimensional numerical model is established based on the actual project in Xi'an city, and the variation laws of the displacement of the high railway foundation and the displacement of the track bed when the shield tunnel underpasses the existing high railway foundation are analyzed. At the same time, orthogonal experiments are used to study the influences of tunnel excavation distance, tunnel underpass angle and other factors on the high railway foundation. The results show that the maximum vertical displacements of roadbed and roadbed after shield tunnel construction are 9.18 mm and 7.43 mm, respectively. The maximum lateral displacements of subgrade soil in different directions are 0.24 mm and -0.29 mm, respectively. The maximum displacements of the track bed in different directions are 0.17 mm and -0.13 mm, respectively. In addition, the vertical clear distance has the greatest effect on the vertical deformations of the existing high railway foundation and the high railway foundation bed. The underpass angle has the greatest influence on the transverse deformation of the existing high railway foundation bed.

Key words: shield tunnel; high-speed railway foundation; composite foundation with CFG piles; numerical simulation; orthogonal test

收稿日期:2022-08-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078421);陕西省“特支计划”青年拔尖人才(陕组通字[2018]33号);中铁一院科研项目(院科19-75-01)

作者简介:王立新(1983-),男,吉林德惠人,博士,正高级工程师,主要从事隧道与地下工程设计与研究工作。

* 通讯作者: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。

路基的位移变化规律,依据实际工程情况,采用仿真软件建立三维模型,研究其数值分析结果。首先采用 Rhino 创建三维实体模型,然后将实体模型通过 Griddle 插件剖分网格,控制网格单元的形状及大小,从而更好地模拟实际工况,将 Griddle 插件生成的 f3grid 格式的网格文件导入 FLAC 3D^[16-17],最后输入不同工况命令流进行计算。

依据隧道的实际尺寸以及隧道所穿越地层的类别建立盾构下穿高铁的三维数值模型。模型尺寸为:120 m×90 m×45 m。其中道床厚度为 0.28 m,支撑层厚度为 0.4 m,上路基厚度为 0.9 m,下路基厚度为 1.8 m,褥垫层厚度为 2.5 m,CFG 桩桩径为 0.6 m,桩间距 1.8 m,桩长 13 m,盾构隧道直径为 6.3 m,管片厚度为 0.3 m,盾壳厚度为 0.2 m,管片混凝土等级为 C50,模型尺寸与相对位置如图 3 所示。

三维模型中的地层根据地勘报告自上而下分为五层,所有土层都采用等厚度分布的实体单元来模拟,土体的本构模型采用以 Mohr-Coulomb 为屈服准则的弹塑性模型,土体参数由地质勘察报告等相关工程资料确定,如表 1 所示。高速铁路基包括道床、支撑层、高速铁路基和 CFG 复合地基等,各部分材料属性与参数如表 2 所示。

盾构开挖通过激活有限差分软件中的空模型来模拟开挖过程,通过改变赋予实体单元的参数

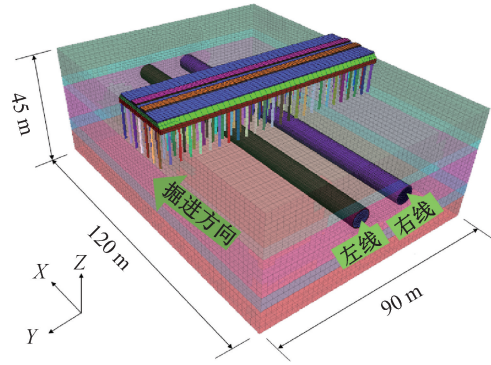


图 3 数值模拟整体模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the overall numerical simulation model

来激活注浆范围。运行数值模拟软件,隧道开挖时不采取加固措施时,盾构隧道左右线分别开挖完成后,地铁隧道与高速铁路基沉降云图如图 4 所示。

由图 4 可见,盾构掘进完成后,隧道底部区域土体发生了隆起变形,地表出现了明显的沉降槽,既有高铁的路基、道床和 CFG 群桩都产生了明显的沉降。为探究盾构隧道掘进施工对上部高速铁路基的影响规律及程度,提取模型不同位置的计算结果进行分析,包括地铁盾构隧道开挖过程中既有高速铁路基和道床的位移情况、复合地基 CFG 群桩的位移情况和轴力变化情况。

表 1 土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

序号	地层名称	层厚/m	弹性模量 E/MPa	天然重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	泊松比 μ	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
1	新黄土	11.6	15	18.9	0.28	24	22.5
2	古土壤	4.2	13	19.7	0.32	21	24
3	粉质粘土	14.5	24	19.1	0.35	31	19
4	细砂	5.4	30	20.0	0.30	0	34
5	中砂	9.3	26	19.1	0.35	28	21

表 2 盾构隧道及高速铁路基材料属性及参数

Tab. 2 Properties and parameters of shield tunnel and high-speed railway base materials

结构	名称	属性	单元类型	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$
盾构隧道	管片	C50 混凝土	实体单元	27 600	0.25	24
	盾壳	钢材	Shell 单元	206 000	0.3	78
高速铁路基	道床	C55 混凝土	实体单元	35 500	0.18	24.2
	支撑层	C15 混凝土	实体单元	22 000	0.2	23.6
	路基表层	级配碎石	实体单元	16 000	0.3	20.8
	路基底层	水泥土	实体单元	12 000	0.2	23
	褥垫层	碎石土	实体单元	10 000	0.35	17.5
	CFG 桩	C20 混凝土	Pile 单元	25 500	0.2	23

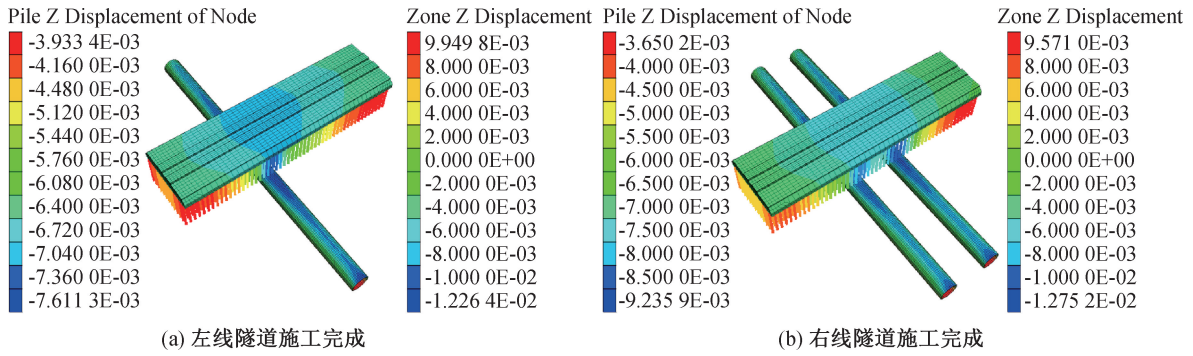


图4 地铁隧道与高铁路基沉降云图

Fig. 4 Settlement cloud diagram of subway tunnel and high-speed railway foundation

2.2 路基位移分析

为分析盾构施工过程中对铁路路基的影响,在隧道左右线划分不同断面,提取当隧道开挖至断面位置时,路基中线上的竖向及横向位移,并分析其计算结果。掘进断面 A—L 位置及路基测线和测点的布置如图 5 所示。

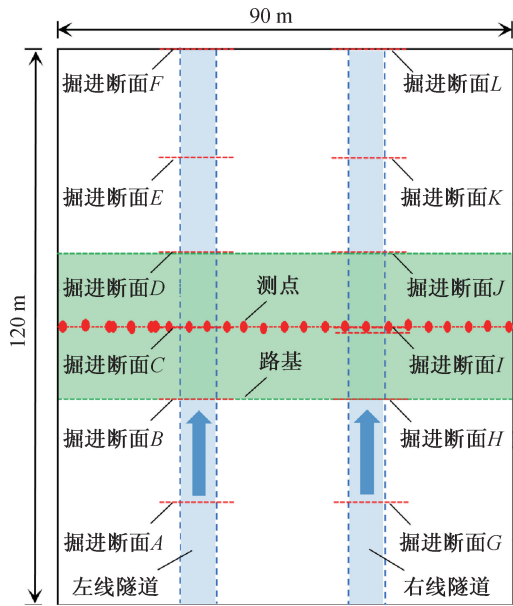


图5 高铁路基监测点布设及隧道掘进断面位置

Fig. 5 Layout of high speed railway base monitoring points and position of tunnel excavation section

将隧道掘进至不同断面时,高铁路基测线上各测点的竖向位移值绘制成曲线,如图 6 所示。

由图 6 可知:(1)左线隧道施工完成后(掌子面掘进到断面 F),测点 12 沉降值最大,为 6.68 mm。右线隧道施工完成后,测点 17 沉降值最大,为 9.18 mm。(2)左线隧道开挖完成后(掌子面掘进到断面 L),其轴线上方路基沉降值最大,向路基两侧逐渐减弱。右线隧道开挖完成后,路基应力发生重分布,路基最大沉降区域位于左、右线隧道中

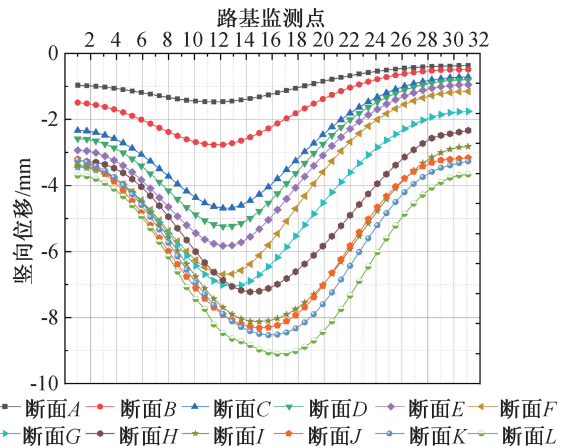


图6 高铁路基不同掘进断面上的监测点的竖向位移值
Fig. 6 Vertical displacement values of monitoring points on different driving sections of high-speed railway foundation

间区域的上方,向路基两侧逐渐衰减,呈明显对称分布。(3)在双线隧道逐一开挖的过程中,沉降槽由左线隧道上方向右移动,逐渐至双线隧道中轴线上方。

隧道掘进至不同断面时,将高铁路基测线上各测点的横向位移值绘制成曲线,如图 7 所示。在图 7 中,位移正值表示路基土体沿模型 Y 轴正向发生变形,位移负值表示路基土体沿模型 Y 轴负向发生变形。由结果可知,(1)当左线隧道施工完成后,双线隧道中心线附近路基土体横向位移为零,左右两侧路基土体呈相反方向分布。(2)左线隧道开挖完成后,路基两侧测点 8 与测点 20 的位移值分别达到最大,为 0.15 mm 和 -0.11 mm。右线隧道开挖后,路基土体受土层扰动逐渐增大,地层损失量同时增大,路基横向位移逐渐增大,直到右线隧道施工完毕。测点 8 和测点 22 的横向位移值达到最大,分别为 0.27 mm 和 -0.30 mm。

2.3 道床位移分析

由于相互作用的关系,盾构隧道开挖使得整

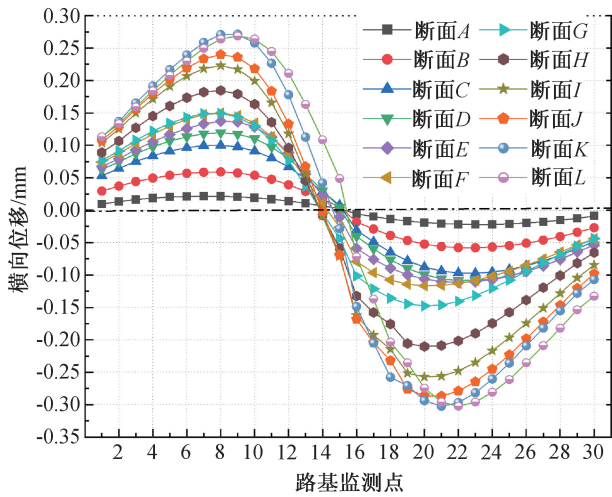


图 7 高速铁路基测线上不同掘进断面的横向位移值
 Fig. 7 Transverse displacement values of different driving sections on the base survey line of high speed railway

个体系的应力与变形平衡状态发生改变,高速铁路基上方道床将产生变形,轨道产生弯曲下沉及轨向弯曲等破坏。在模型中高速铁路基道床上布置测线,如图 8 所示。

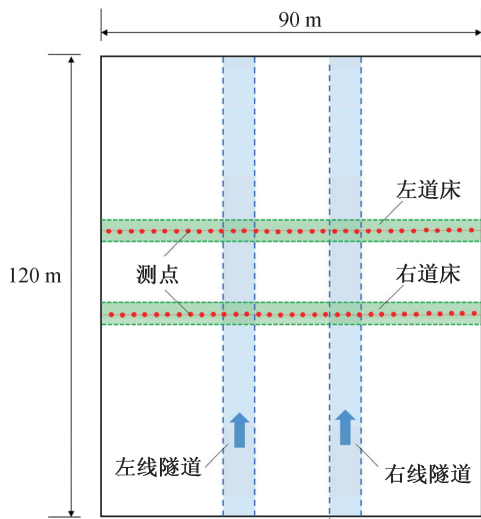


图 8 既有高速铁路基道床监测线布设
 Fig. 8 Monitoring line layout of existing high railway foundation bed

首先,在左线、右线盾构隧道施工完成后,将高速铁路基道床测线上测点的竖向位移值提取并绘制曲线,如图 9 所示。由图 9 可知:(1)左右线隧道开挖时,道床出现了竖向沉降槽,与路基竖向沉降变化趋势基本一致。左线隧道施工完成时,沉降槽中心位于右道床监测点 11 处,最大沉降值为 6.12 mm。(2)右线隧道施工完成时,沉降槽中心位于右道床监测点 16 处,最大沉降值为 7.43 mm。(3)道床沉降槽与路基类似,均在隧道开挖过程中

由左向中心处移动。(4)由于下方盾构隧道掘进时先经过高铁行进方向右道床后再经过左道床,故右道床竖向沉降经过一定时间累积后大于左道床。

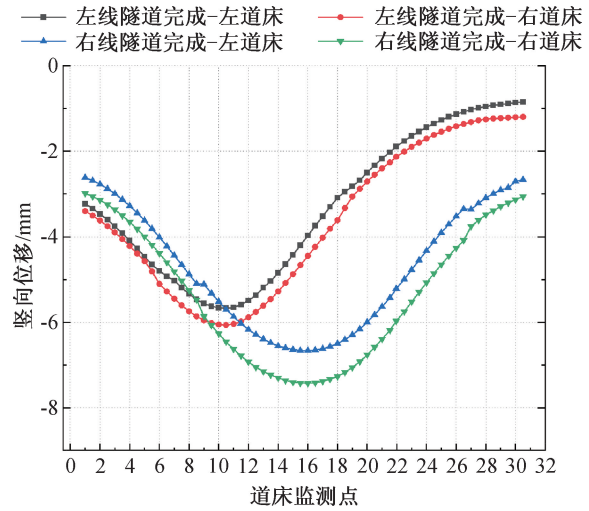


图 9 道床竖向位移图
 Fig. 9 Vertical displacement of the bed

其次,在左线、右线盾构隧道施工完成后,将高速铁路基道床测线上测点的横向位移值提取并绘制曲线,如图 10 所示。

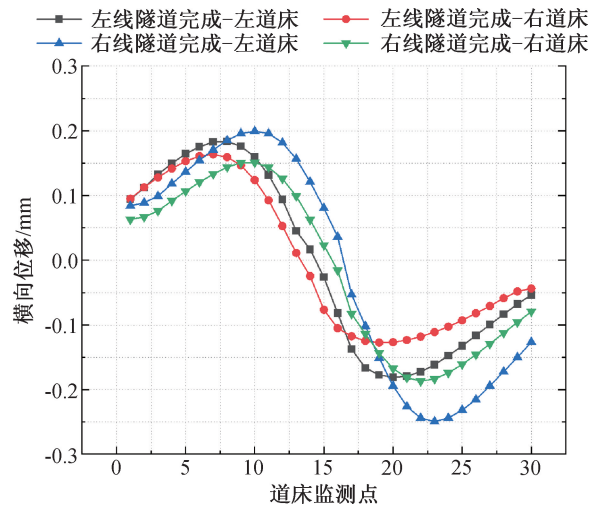


图 10 道床横向位移图
 Fig. 10 Lateral displacement of the bed

由图 10 可知:(1)左线盾构隧道施工完成后,由于开挖卸荷,隧道两侧土体产生了向隧道开挖区域运动的趋势,地层变形首先传递到 CFG 桩复合地基,进一步传递至上部高速铁路基,道床随之产生了相应的横向位移。(2)左线盾构隧道施工完成后,道床产生的最大正横向位移位于左道床监测点 8 处,横向位移值为 0.17 mm,道床产生的最大负横向位移位于左道床监测点 20 处,横向位移

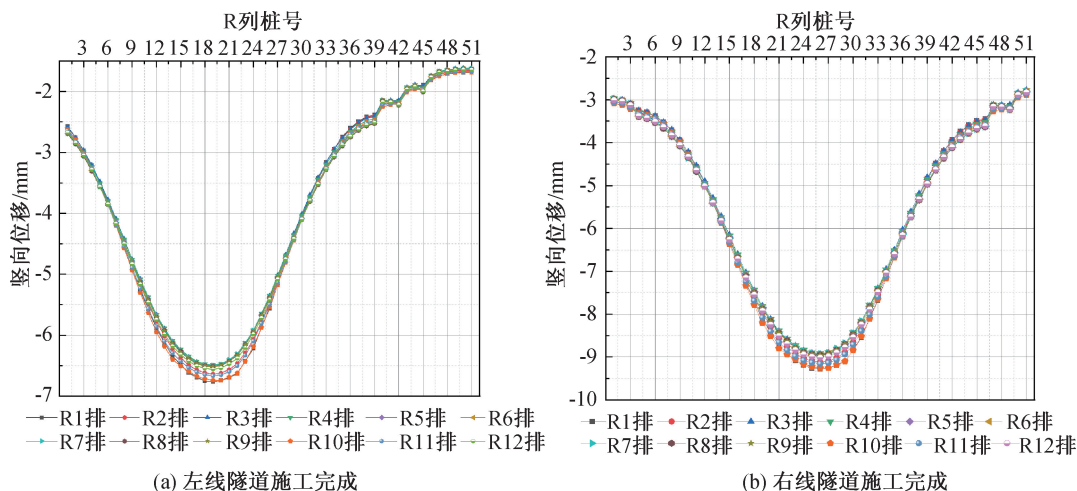


图 11 施工完成后复合地基 CFG 群桩竖向位移图

Fig. 11 Vertical displacement of CFG pile group in composite foundation after construction

值为 -0.13 mm。(3)右线隧道施工完成后,规律与左线隧道施工完成后类似,随着右线盾构隧道的开挖,卸荷区域的中心由左线隧道中心线逐渐转移至地铁隧道中轴线。(4)右线隧道施工完成后,道床产生的最大正横向位移位于左道床监测点 10 处,横向位移值为 0.20 mm,道床产生的最大负横向位移位于左道床监测点 23 处,横向位移值为 -0.25 mm。

2.4 CFG 群桩位移分析

由于既有高铁路基下方的地基采取了 CFG 群桩加固,CFG 群桩的受力与变形状态将影响到上部路基。为更方便地分析群桩位移规律,沿着区间隧道盾构开挖方向依次将 CFG 群桩进行编号,共计 12 排(Row),沿高铁轨道线路将 CFG 群桩进行编号共 51 列(Column),如 R1/C1 即为第 1 排 1 列。在左右线隧道盾构隧道掘进结束后,在模型中分别提取 CFG 群桩的桩顶中心测点的竖向位移值,如图 11 所示。

由图 11(a)曲线可得出以下结论:左线隧道盾构结束后 CFG 群桩沉降云图近似呈不对称分布,桩的竖向位移最大值产生于左线隧道中轴线附近 C18—C21,最大桩顶沉降变形为 6.84 mm,并且表现为沿盾构掘进施工方向桩的竖向位移先增大后减小。由图 11(b)曲线可得出以下结论:右线隧道盾构掘进结束后 CFG 群桩沉降云图近似成对称分布,桩顶竖向沉降近似于对称分布,桩的竖向位移最大值向右偏移,产生于双线隧道中心区域,CFG 桩编号为 C24—C27,最大沉降变形为 9.23 mm。

由图 11 可知:(1)左右线隧道施工结束后,

CFG 群桩桩顶部位移均为负值,即桩均出现竖向沉降变形。(2)盾构施工结束后,CFG 群桩整体产生下沉变形,沿盾构施工方向,远部两排桩沉降较小,中部桩竖向沉降较大。

此外,为研究各单桩竖向位移随盾构隧道掘进动态施工过程的变化曲线,选取在隧道施工结束时竖向沉降最大的 R10 所在列的奇数编号的 CFG 单桩作为典型研究对象。如图 12 所示。

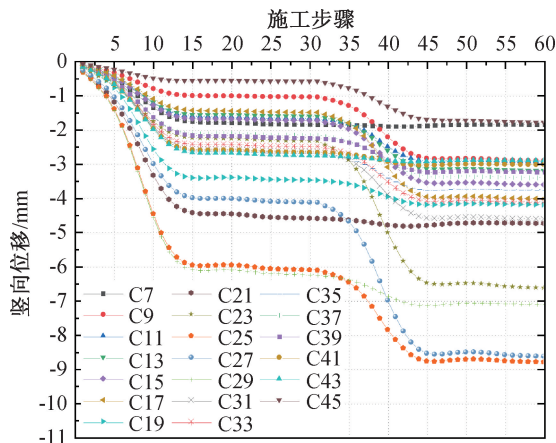


图 12 CFG 群桩随施工阶段桩顶位移变化图

Fig. 12 Variations of CFG pile group with pile top displacement during construction

由图 12 可知,CFG 群桩各桩桩顶竖向位移曲线随盾构掘进施工步骤近乎一致,各桩桩顶竖向位移在左右线隧道盾构掘进过程中均表现为两阶段变化规律,左线隧道盾构施工阶段 1—13 过程中,位移随施工步骤增加而不断增加,至第 13 个施工阶段达到最大,如编号为 C19 的单桩竖向位移达到 6.25 mm。当施工至第 13 个阶段时,桩体正对下方隧道进入盾尾注浆环节,盾构施工对土体

的扰动较小进而对使得桩体产生较小的位移,经历该阶段后随着施工步骤增加,位移增长率减小,单桩水平位移几乎不再增长。当右线隧道开始施工掘进后,与左线隧道施工掘进单桩竖向沉降规律趋势一致,最终所有单桩桩体的竖向位移均达到了最大值,如编号为 C19 的单桩竖向位移达到 9.13 mm。其中单桩编号为 C37 和单桩编号为 C39 的两个单桩由于距离右线隧道较远,右线盾构隧道施工掘进对其扰动较小,其单桩竖向位移在右线隧道施工过程几乎没有明显的增长。

2.5 CFG 群桩轴力分析

由施工完成后复合地基 CFG 群桩竖向位移图可知,编号为 R10 的 CFG 桩的竖向位移在左右线隧道施工结束时达到最大值,故选取 R10 所在列的奇数编号的 CFG 单桩作为典型研究对象,分析各单桩附加轴力随桩身埋深的变化曲线,如图 13 所示。

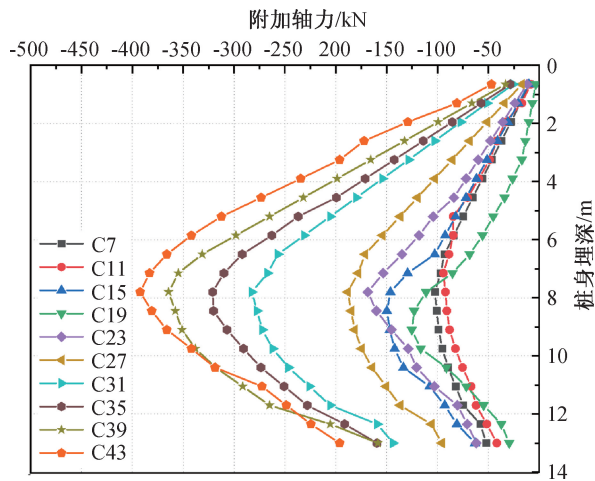


图 13 复合地基 CFG 群桩桩身附加轴力
Fig. 13 Additional axial force of CFG group pile in composite foundation

由图 13 可知,桩体附加轴力表现出明显的“内鼓型”,随着桩身埋深的增长单桩附加轴力先增加,至桩身埋深为 8 m 时单桩附加轴力逐渐减小,但单桩桩身轴力均为负值,表明单桩全部受压,即产生桩身负摩阻力,在中性轴以上位置时桩身附加轴力沿埋深方向逐渐增加,而在中性轴以下时单桩桩身附加轴力沿桩埋深逐渐减小,故中性轴埋深处其附加轴力达到最大值,如单桩编号为 C43 时附加轴力最大为 -392.2 kN。高铁褥垫层的存在使得荷载传递起到调节缓冲作用,并重新使桩土荷载的分担产生调整。

3 正交试验

为进行施工方案优化设计,并探究地铁盾构隧道下穿高速铁路基时,影响高速铁路基变形的影响因素,设计正交试验,并结合数值分析手段进行研究。

3.1 正交试验设计

通过对已有文献资料的调查研究,确定盾构隧道下穿既有高速铁路基的影响因素有四个,分别是竖向净距、双洞间距、下穿角度、开挖间距,每个因素确定四个分析水平,如表 3 所示。

表 3 盾构隧道开挖对既有高铁影响的正交试验因素及水平
Tab. 3 Orthogonal test factors and levels of influence of shield tunnel excavation on existing high-speed railway

水平	因素			
	竖向净距/m	双洞间距/m	下穿角度/(°)	开挖间距/m
1	3	9	90	0
2	6	12	60	40
3	9	15	45	80
4	12	18	30	120

依据上表,全面试验所产生的排列组合是 256 次,为提高效率并节约时间,采用正交试验,表 4 为本次设计的正交试验方案表,需进行 16 次试验。

3.2 正交试验模型

正交试验分析所使用的三维模型,与最初所使用的模型基本相同,土层参数和主要材料参数也相同。不同的是,模拟盾构隧道开挖过程中,改变盾构隧道拱顶与既有高速铁路基 CFG 桩桩底的竖向净距、盾构隧道左右线的双洞间距、盾构隧道对既有高速铁路基的下穿角度、左右线隧道的开挖顺序四个因素,分析影响既有高速铁路基最显著的因素。正交试验模型共有 16 个,各因素组合方式参考表 4,模型图如图 14 所示。

3.3 正交试验分析结果

3.3.1 极差分析

由正交试验表 4 的实验数据和图 14 的 FLAC 3D 数值模型,分别得出 16 个试验中各影响因素下的路基沉降值、路基道床最大横向位移值、路基道床最大竖向位移值,其值如表 5 所示,极差分析如表 6 所示。

表 4 正交试验方案表
Tab. 4 Orthogonal test scheme table

试验号	水平组合	试验条件				试验值
		竖向净距 A/m	双洞间距 B/m	下穿角度 $C/(^\circ)$	开挖间距 D/m	
1	$A_1B_1C_1D_1$	3	9	90	0	Y1
2	$A_1B_2C_2D_2$	3	12	60	40	Y2
3	$A_1B_3C_3D_3$	3	15	45	80	Y3
4	$A_1B_4C_4D_4$	3	18	30	120	Y4
5	$A_2B_1C_2D_3$	6	9	60	80	Y5
6	$A_2B_2C_1D_4$	6	12	90	120	Y6
7	$A_2B_3C_4D_1$	6	15	30	0	Y7
8	$A_2B_4C_3D_2$	6	18	45	40	Y8
9	$A_3B_1C_3D_4$	9	9	45	120	Y9
10	$A_3B_2C_4D_3$	9	12	30	80	Y10
11	$A_3B_3C_1D_2$	9	15	90	0	Y11
12	$A_3B_4C_2D_1$	9	18	60	40	Y12
13	$A_4B_1C_4D_2$	12	9	30	40	Y13
14	$A_4B_2C_3D_1$	12	12	45	0	Y14
15	$A_4B_3C_2D_4$	12	15	60	120	Y15
16	$A_4B_4C_1D_3$	12	18	90	80	Y16

注:水平组合中 A 为竖向净距; B 为双洞间距; C 为下穿角度; D 为开挖间距。

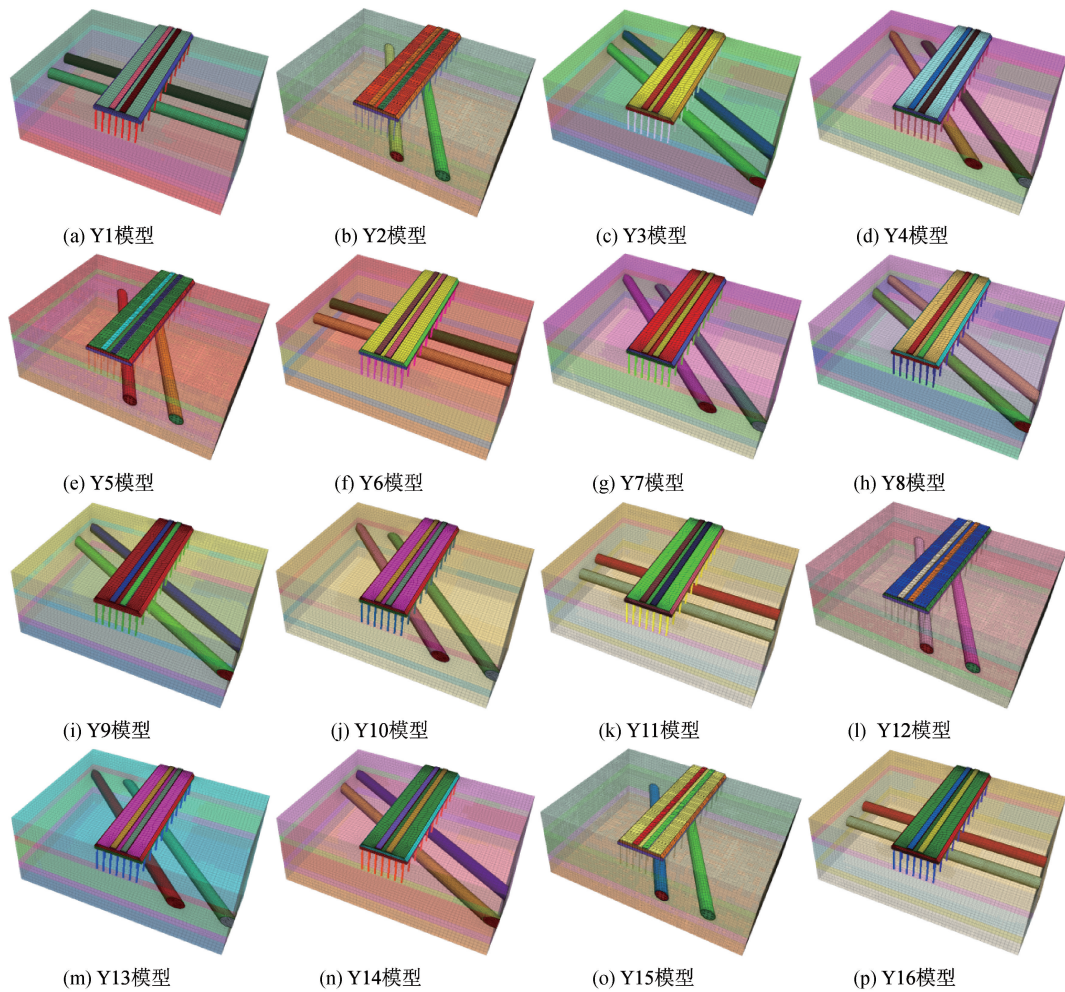


图 14 正交实验不同工况模型图

Fig. 14 Model diagram of different working conditions in orthogonal experiment

表 5 不同因素作用下路基沉降、路基道床最大横向位移、路基道床最大竖向位移值

Tab. 5 Subgrade settlement, maximum lateral displacement of subgrade roadbed and maximum vertical displacement of subgrade roadbed under different factors

工况编号	路基最大竖向沉降值/mm	道床最大横向位移值/mm	道床最大竖向位移值/mm
Y1	14.91	0.261	7.66
Y2	12.43	0.429	6.02
Y3	10.87	0.665	5.38
Y4	7.28	0.892	3.79
Y5	9.04	0.367	3.03
Y6	8.32	0.314	3.24
Y7	7.11	0.836	4.09
Y8	6.56	0.721	4.50
Y9	8.20	0.511	3.50
Y10	6.83	0.748	4.27
Y11	6.34	0.378	2.88
Y12	5.80	0.558	3.15
Y13	6.99	0.689	2.03
Y14	6.74	0.583	1.77
Y15	4.05	0.501	3.34
Y16	3.41	0.435	3.29

表 6 极差分析表

Tab. 6 Table of range analysis

名称	因素	K_i	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	极差 R
路基沉降	A	K_i^A	45.49	31.03	27.17	21.19	—
		k_i^A	11.37	7.76	6.80	5.30	6.07
	B	K_i^B	39.14	34.32	28.37	23.05	—
		k_i^B	9.79	8.58	7.09	5.76	4.03
	C	K_i^C	32.98	31.32	32.37	28.21	—
		k_i^C	8.25	7.83	8.09	7.05	1.20
	D	K_i^D	34.56	32.32	30.15	27.89	—
		k_i^D	8.64	8.08	7.54	6.96	1.68
A(竖向净距) > B(双洞间距) > D(开挖间距) > C(下穿角度)							
道床横向位移	A	K_i^A	2.247	2.238	2.195	2.208	—
		k_i^A	0.562	0.560	0.549	0.552	0.013
	B	K_i^B	1.828	2.074	2.380	2.606	—
		k_i^B	0.457	0.519	0.595	0.652	0.195
	C	K_i^C	1.388	1.855	2.480	3.165	—
		k_i^C	0.347	0.464	0.620	0.791	0.444
	D	K_i^D	2.238	2.217	2.215	2.218	—
		k_i^D	0.560	0.554	0.554	0.555	0.006
C(下穿角度) > B(双洞间距) > A(竖向净距) > D(开挖间距)							
道床竖向位移	A	K_i^A	22.85	14.86	13.80	10.43	—
		k_i^A	5.71	3.72	3.45	2.61	3.100
	B	K_i^B	19.77	16.90	13.80	11.47	—
		k_i^B	4.94	4.23	3.45	2.87	2.070
	C	K_i^C	17.07	15.44	15.15	14.18	—
		k_i^C	4.27	3.89	3.79	3.55	0.720
	D	K_i^D	16.67	15.43	15.97	13.87	—
		k_i^D	4.17	3.86	3.99	3.47	0.700
A(竖向净距) > B(双洞间距) > C(下穿角度) > D(开挖间距)							

表7 方差分析表
Tab.7 Variance analysis table

影响因素	离差	自由度	路基沉降			
			均方离差	F 比值	F 临界值	显著性顺序
竖向净距 A	80.17	3	36.72	37.63	15.44	1
双洞间距 B	37.80	3	12.60	17.75	15.44	2
下穿角度 C	5.37		1.79	2.52	15.44	4
开挖间距 D	9.77	3	3.26	4.59	15.44	3
误差	2.13	3	0.71			
总和	135.24	15				
道床横向位移						
竖向净距 A	0.020 4	3	0.006 8	2.52	15.44	3
双洞间距 B	0.067 4	3	0.022 5	5.32	15.44	2
下穿角度 C	0.426 5	3	0.142 2	52.65	15.44	1
开挖间距 D	0.012 1	3	0.004 1	1.49	15.44	4
误差	0.008 1	3	0.002 7			
总和	0.534 5	15				
道床竖向位移						
竖向净距 A	20.75	3	6.917	69.17	15.44	1
双洞间距 B	9.83	3	3.277	33.77	15.44	2
下穿角度 C	1.08	3	0.360	3.60	15.44	3
开挖间距 D	1.06	3	0.353	3.53	15.44	4
误差	0.30	3	0.100			
总和	33.02	15				

极差分析应按照以下步骤进行:

(1)假设各因素之间无交互作用,计算 K_i 值, K_i 表示任一列上水平号为 i 时对应的试验结果之和;

(2)计算 K_i 值, K_i 表示任一列上因素取水平 i 时所得试验结果的算术平均值, $K_i = K_i/S$, 其中 S 为每一列各水平出现的次数;

(3)计算极差 R , $R = \max\{K_i\} - \min\{K_i\}$;

(4)根据计算得到的极差来分析因素的主次顺序,极差 R 越大,说明对盾构隧道下穿河流段安全性的影响越大。

3.3.2 方差分析

相对于极差分析,方差分析能够表示数据偏离平均值的程度,具有精确度高、显著性明显等特点,如表7所示。

其中,常见的信度 α 取值有 0.005、0.01、0.025、0.05、0.1,查询 F 分布临界值表,结合试验因子与试验误差的自由度,有: $F_{0.005(3,3)} = 47.47$, $F_{0.01(3,3)} = 29.46$, $F_{0.025(3,3)} = 15.44$, $F_{0.05(3,3)} = 9.28$, $F_{0.1(3,3)} = 5.36$,表7中 F 临界值取 $F_{0.025(3,3)} = 15.44$ 。

针对以上四个影响因素,方差结果表明竖向净距与下穿角度对三种变形值的影响最为显著,与极差分析结果一致。

4 结论

1)盾构隧道施工完成后,既有高铁路基沉降槽中心位于左右线隧道对称中心线正上方靠右位置。此外,在横向位移方面,由于开挖卸荷,隧道两侧土体产生了往隧道开挖区域运动的趋势。道床随之产生相应的横向位移。

2)盾构施工结束后,CFG 群桩整体产生下沉变形,沿盾构施工方向,中部桩竖向沉降较大,最大沉降变形为 9.23 mm。高铁褥垫层的存在使得荷载传递起到调节缓冲作用,并重新使桩土荷载的分担产生调整,单桩桩身附加轴力随着桩身埋深的增加,单桩附加轴力先增加后减小。

3)综合正交试验分析结果,建议在类似工程实际施工设计时,将竖向净距与下穿角度作为主要考虑对象,可选取本文 12 m 竖向净距与 90° 下穿角度作为参考对象。

参考文献:

- [1] 刘维正,孙康,戴晓亚,等. 地铁盾构长距离下穿对既有铁路框架桥影响的数值与实测分析[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(1):208-218.
- [2] 刘志涛,王立川,蒋岩松,等. 基于露空长度优化的盾

- 构隧道下穿合肥火车站施工沉降控制探讨[J]. 隧道建设:中英文,2021,41(S2):565-573.
- [3] 卢鑫月,许成顺,侯本伟,等. 基于动态贝叶斯网络的地铁隧道施工风险评估[J]. 岩土工程学报,2022,44(3):492-501.
- [4] 杨荟斯,刘涛,缪红彬,等. 盾构隧道近距离下穿对既有运营隧道影响[J]. 大连理工大学学报,2022,62(3):263-271.
- [5] 何占坤. 盾构隧道下穿既有车站桩筏基础影响分析及施工控制——以杭州地铁5号线盾构隧道下穿杭州南站站房工程为例[J]. 隧道建设:中英文,2022,42(S1):222-231.
- [6] 甘晓露,俞建霖,龚晓南,等. 新建双线隧道下穿对既有盾构隧道影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3586-3594.
- [7] 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.
- [8] WEI X, ZHANG M, MA S, et al. Deformation Characteristics of Existing Twin Tunnels Induced by Double Shield Undercrossing with Prereinforcement: A Case Study in Hangzhou[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021: 7869899.
- [9] 马相峰,王立川,龚伦,等. 砂卵石地层双线地铁盾构下穿铁路路基变形及地层注浆加固研究[J]. 隧道建设:中英文,2021,41(S1):181-189.
- [10] 魏英华. 北京地铁16号线区间隧道下穿4号线施工变形模拟分析与控制[J]. 铁道建筑,2020,60(2):75-78+115.
- [11] 杜强. 地铁隧道盾构下穿富水粉土层时地层及管片变形规律[J]. 铁道建筑,2021,61(5):54-59+79.
- [12] 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.
- [13] 李军,雷明锋,林大涌. 城市地铁盾构隧道下穿运营铁路施工控制技术研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(2):174-179.
- [14] 高利宏. 双线盾构隧道近接下穿既有隧道结构沉降变形与施工节点控制分析[J]. 现代隧道技术,2021,58(4):194-202.
- [15] 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.
- [16] 覃涛,冯云,郭健,等. 三面围合盾构隧道底板注浆对地下通道结构的影响[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2020,37(1):1-6.
- [17] HEIDARZADEH H. Evaluation of Modified Cam-Clay Constitutive Model in FLAC and its Development by FISH Programming[J]. *European Journal of Environmental and Civil engineering*, 2019:1-19.

(责任编辑 王利君)