

盾构隧道下穿引起铁路轨道沉降变形数值研究

张鹏辉¹, 吴波^{1,2}, 杨思¹

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 结合福州某地铁双线盾构隧道下穿铁路轨道的工程实例,采用有限元数值模拟与实测值相结合的方法,分析研究了盾构隧道在下穿的施工过程中对轨道沉降、轨道水平偏差以及轨向偏差影响的一般性规律,探讨了不同盾构隧道埋深条件下的轨道沉降与变形规律。研究表明,轨道沉降主要发生在盾构掌子面到达前、盾构通过期间及盾尾通过后的3个阶段;最大水平偏差一般出现在掌子面到达隧轨相交处位置;最大轨向偏差一般发生在掌子面到达轨道线路之前或通过轨道线路以后1倍的盾构隧道直径左右的距离位置;同时表明,在不考虑地下水位的情况下,盾构隧道埋深越大,轨道线路沉降与变形越小,列车运行越平稳安全。

关键词: 盾构隧道; 数值模拟; 轨道沉降; 水平偏差; 轨向偏差

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)04-0332-07

Numerical study on settlement and deformation of railway tracks induced by shield tunnelling crossing under railway track

Zhang Penghui¹, Wu Bo^{1,2}, Yang Si¹

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory for Advanced Technology and Informationization of Civil Engineering, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Combined with an engineering example of a double line shield tunnel crossing underneath railway track in Fuzhou, finite element numerical simulation and measurement data were utilized to analyse the regularity of the influences of shield tunnel crossing underneath railway track on the track settlement, the track horizontal deviation and the track direction deviation. The track settlement and deformation under the condition of different tunnel depths were discussed. The track settlement occurs mainly at three stages: before the arrival of the shield tunnel face, during the passing period of the shield, and after the pass of the shield tail. The maximum horizontal deviation usually occurs at the time when the tunnel face arrives at the intersection position of the shield tunnel and the railway track. The maximum track direction deviation usually occurs before tunnel face arrives at the track or approximately 1 times of the diameter of the shield tunnel after shield tunnel face passes the track. At the same time, when the underground water level is not considered, the greater the depth of the shield tunnel and the smaller the settlement and the deformation of the track line, the more stable the train operates.

Keywords: shield tunnel; numerical simulation; track settlement; horizontal deviation; track direction deviation

收稿日期: 2016-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478118);福建省自然科学基金项目(2014J01170)

第一作者简介: 张鹏辉(1990-),男,湖北潜江人,硕士研究生,主要从事岩土与地下工程科研工作。

隧道的下穿施工会引起周围土体及路基产生应力变化和沉降变形,从而导致铁路轨道产生形变,使同条线路同股轨道的不同位置产生前后高差,致使轨道线路产生较大的沉降变形;或使同条线路的两股轨道产生相对高差,导致水平偏差过大;或使轨道偏离原始设计位置发生水平位移,产生轨向偏差;亦或使轨道与路基相互脱离,产生空轨现象等^[1]。由此带来的轨道不平顺是机动车辆产生振动的主要原因,直接导致轮轨之间产生相互作用力,影响列车运行的平稳性、舒适性和安全性^[2]。

目前国内外许多学者通过理论计算、现场经验和数值模拟等办法对盾构隧道下穿铁路轨道施工引起的路基不均匀沉降进行了一系列研究^[3~5],研究表明,通过注浆加固以及施工参数优化等办法可很好控制路基的不均匀沉降,从而控制铁路的沉降变形,且都取得了一定的效果。然而,由于路基与轨道结构的不同,直接通过路基的沉降代替轨道沉降的办法虽有可取之处,但并不全面。本文通过数值模拟的办法结合 Midas 有限元软件,对盾构隧道下穿施工引起的铁路轨道变形情况进行三维数值模拟^[6~7]。重点研究了盾构隧道下穿施工引起的轨道结构沉降与变形规律,探讨了不同盾构隧道埋深对轨道结构沉降变形的影响。为盾构隧道下穿铁路轨道的施工提供了科学依据。

1 工程概况

福州地铁轨道交通 1 号线下穿有砟铁路轨道段该工程为双线盾构隧道。盾构穿越区间位于福州火车北站-罗汉山站之间,下穿轨道的里程为: XK4+020~XK4+049、SK4+010~SK4+062,盾构隧道管片内径 5.5 m,外径 6.2 m,厚度 0.35 m,管片环宽 1.2 m,两隧道最小净距 10.16 m,典型断面隧道埋深 14.3 m。沿规划西路向南下穿福州火车站轨道线路密集区,其中车站正线 14 股道,线间距 11~14.65 m,轨道线路平面与隧道线路约成 60°。区间隧轨平面位置关系如图 1。

2 数值模型分析

2.1 建立有限元模型

数值模型的选取主要考虑边界效应和计算效率,并参考《铁路路基设计规范》^[8]和《铁路隧道

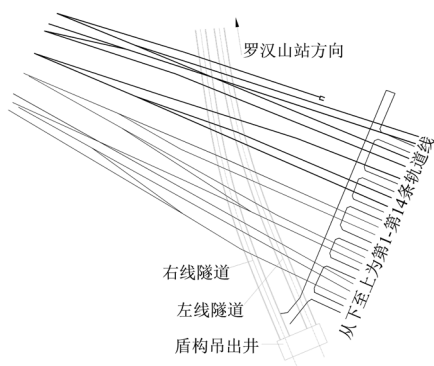


图1 隧道与铁路平面关系图

Fig.1 The plan relationship between tunnel and rail way

设计规范》^[9]。模型区域沿隧道线路方向取长 60 m。根据福州地区及国内盾构法施工的相关经验,盾构隧道施工引起的地表沉降槽宽度基本位于 10~20 m,因此隧道结构左、右两侧取 3 倍的洞径 18 m。为便于后文研究不同埋深条件下的轨道结构变形规律,下边界取 32 m,隧道埋深 15 m。模型单元尺寸为 1 m,单元划分采用自动混合六面体,最大尺寸为 2.5 m,最小尺寸为 0.5 m。模型前、后、左、右及下表面均施加法向约束,地表采用自由约束,轨道施加绕线路的转动约束。且轨道结构为线弹性材料,采用植入式梁单元模拟。整体结构网格划分如图 2 所示。

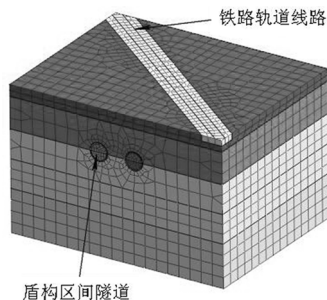


图2 数值网格模型

Fig.2 Numerical grid model

2.2 选取材料参数

(1) 土体参数

盾构隧道经过该地段原状土多为淤泥质软土层,掘进地层从上至下依次主要为:杂填土、淤泥质粘土、粉质粘土,局部全风化及散体状装强风化花岗岩。道砟层及路基体部分等效为一层路基结构。各土层及路基的详细参数见表 1。

表 1 各土层及路基结构参数表

Tab.1 The structure parameters of soil layers and subgrade

土层名称	厚度/ m	容重 $\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模 $E /$ MPa	泊松 比 μ	内摩 擦角 $\varphi /(^{\circ})$	粘聚 力 $c /$ kPa
路基	2	35.0	80.0	0.30	28.0	25.0
杂填土	4	18.9	5.0	0.32	10.0	5.0
淤泥	11	18.0	3.7	0.35	4.5	13.5
粉质粘土	10	18.8	17.1	0.29	17.6	33.3
全风化岩	10	25.0	70.0	0.29	33.0	78.0
强风化岩	15	30.0	110.0	0.42	21.0	80.0

(2)轨道参数

参考《铁路轨道设计规范》^[9] 轨道结构采用标准钢轨,轨道重 60 kg/m,轨距 1.435 m,容重 78 kN/m³,弹性模量 2.01×10⁵ MPa,泊松比 0.3。

(3)盾构隧道结构参数

为了更加真实地模拟盾构的掘进过程,得到最接近于实际情况的路基及轨道沉降变形结果,特别建立 3 层不同厚度的环形实体单元^[6],来模拟盾构隧道支护体管片衬砌结构、管片后注浆层及超挖产生的超空隙层。盾构机的壳体结构(简称盾壳)采用改变注浆层所在土层属性的方法来模拟。盾构模拟分层如图 3;模型计算参数如表 2。

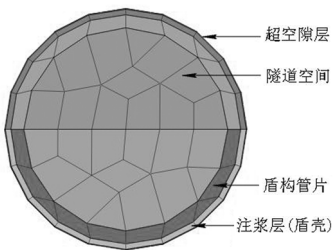


图 3 盾构模拟分层图

Fig.3 Simulation stratum of shield tunnelling

表 2 模型计算参数

Tab.2 Model calculation parameters

材料	厚度/ m	容重 $\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模 $E /$ GPa	泊松比 μ
管片	0.35	25	24.15	0.20
盾壳	0.15	78	34.50	0.20
注浆	0.15	18	2.2e-01	0.25
超空隙	0.02	0.1	2.5e-05	0.30

2.3 模拟施工步骤

根据福州地铁盾构隧道的施工办法,先进行右侧隧道的开挖,待右侧隧道开挖完毕后,进行左侧隧道的施工。在此过程中,采用激活与钝化的方法来模拟盾构机的开挖与掘进,单元被钝化(杀死)以后,该区域的应力为零,且没有体力作用。通过激活相应区域的支撑来模拟开挖后的支护效果。盾构法隧道施工模拟的具体实现步骤如下:

1) 令模型在自重和列车荷载(按等效静荷载考虑,取列车速度为 80 km/h 时的等效静荷载为 49 kPa^[10])作用下平衡并生成初始应力场,节点荷载清零;

2) 给开挖的掌子面施加土舱压力(220 kPa),保持开挖面的稳定平衡;

3) 开挖一环管片长度(1.2 m)的隧道土体,包括预先定义的隧道土体、管片、注浆层及超空隙层;

4) 通过改变属性的方法将注浆层所在土体属性改变成盾壳;用同样的方法模拟由于超挖造成的盾构周围的超空隙层;

5) 通过属性的改变将管片所在土体赋予管片的属性,盾壳赋予注浆的属性;

6) 设置注浆压力(200 kPa)和千斤顶推力(813 kPa)。

依此过程实现盾构机的每一步推进,直至整个隧道开挖完毕。

3 铁路轨道沉降变形规律

3.1 下穿施工对轨道沉降的影响

为了便于研究盾构隧道下穿的施工过程中铁路轨道的沉降变形规律,选取 3 个监测点进行分析,分别为右隧道中心线与轨道中线交点 A(简称隧轨交点 A,下同),左隧道中心线与轨道中线交点 B 及两隧道中线与轨道中线交点 C。数值模型俯视图如图 4。

在盾构隧道下穿的施工过程中,选取开挖掌子面与隧轨交点 A(B)的距离 $L = -D$ 、 $L = 0$ 和 $L = D$ 时的 3 个典型断面进行对比分析。将右线和左线盾构隧道开挖至该 3 个典型断面时的 1 号轨道线沉降曲线分别绘制于图 5 中。

由图 5 盾构下穿至不同位置时的轨道沉降曲线可知:①右、左线盾构隧道施工完毕时的轨道最

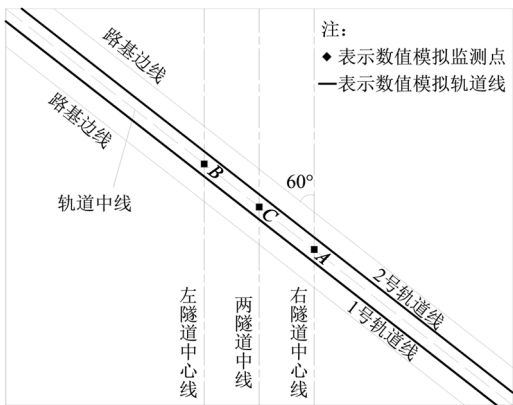


图 4 数值模型俯视监测图

Fig.4 The monitoring planform of numerical model

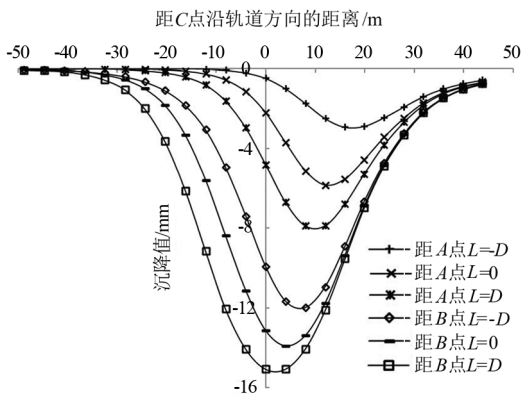


图 5 盾构下穿到不同位置引起的轨道沉降

Fig.5 The track settlement caused by shield tunnelling into different positions

大沉降值分别为-9.26、-16.12 mm,右线隧道施工所产生的轨道沉降量占总沉降量的 57.4%,表明,轨道的沉降量主要发生在上行线隧道的施工中。②右侧隧道施工过程中,盾构开挖掌子面在距隧轨 A 交点 1 倍的隧道直径、位于 A 点正下方处以及超出 A 点 1 倍的隧道直径时的轨道最大沉降值分别为-2.37、-5.84 和-8.06 mm。因此,掌子面在 $L=-D$ 到 $L=0$ 施工段产生的沉降量占单线施工总沉降量 37.5%;在 $L=0$ 至 $L=D$ 施工段产生的沉降量占单线施工总沉降量的 24.0%,可见,盾构隧道下穿铁路轨道的施工引起的轨道沉降量主要发生在盾构到达前,盾构通过期间及盾尾通过后 3 个阶段,且盾构到达前的沉降量尤为显著。③由轨道沉降曲线的变化规律可以看出,沉降中心随着施工的向前推进逐渐向左侧偏移,这主要是由于轨道线路与隧道沿线方向为斜交,致使开

挖掌子面在影响到正前方轨道线路之前,先影响到距掌子面斜前方的轨道线路。因此在实际施工中,尤其应注意距掌子面更近的轨道位置的沉降变化情况。

3.2 下穿施工对轨道水平偏差的影响

图 6、7、8 和 9 分别给出了右、左线盾构隧道施工过程中的轨道沉降曲线及水平偏差变化规律曲线。由图可知:①当盾构开挖掌子面距隧轨交

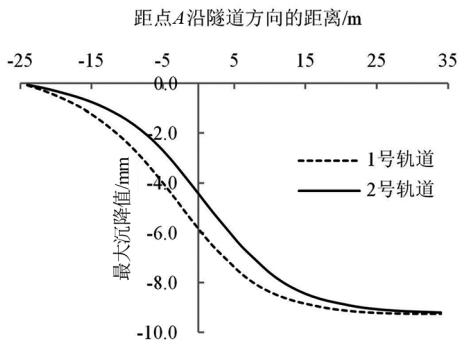


图 6 右线隧道施工引起的轨道沉降

Fig.6 The track settlement caused by construction of right line tunnel

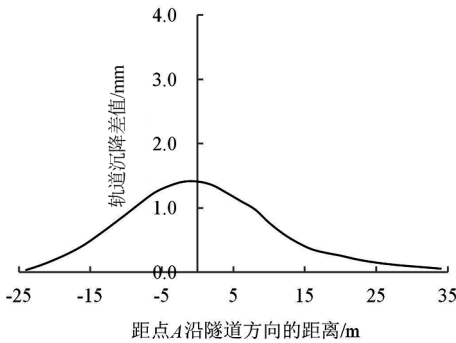


图 7 右线隧道施工引起的轨道水平偏差

Fig.7 The track horizontal deviation caused by construction of right line tunnel

点较远时,轨道的沉降相对较小,水平偏差也较小;随着掌子面的逐渐靠近,轨道沉降量集聚增大,对应的水平偏差也迅速增大,当开挖掌子面位于隧轨交点处正下方时,水平偏差达到最大值。随着掌子面的逐渐远离,沉降虽仍有增大,但增大速度相对减慢,水平偏差也因此减小,随着掌子面的进一步远离,水平偏差也逐渐减小趋近于 0。可见,水平偏差与轨道沉降增长速度有着密切的关系,轨道沉降增长速度越大,则水平偏差越大。②对比右、左线盾构隧道下穿施工引起的轨道水

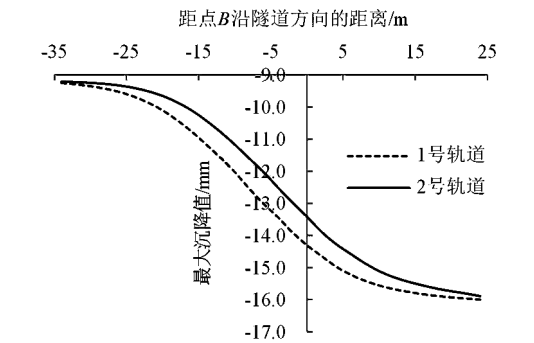


图 8 左线隧道施工引起的轨道沉降
Fig.8 The track settlement caused by construction of left line tunnel

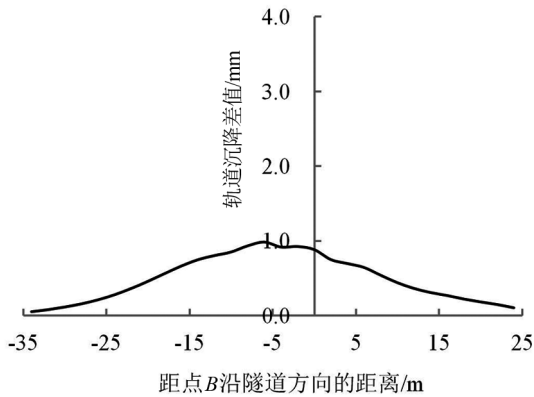


图 9 左线隧道施工引起的轨道水平偏差
Fig.9 The track horizontal deviation caused by left line construction of left line tunnel

平偏差可以发现,右线施工引起水平偏差(最大值 1.41 mm)大于左线施工引起的水平偏差(最大值 0.98 mm);同时也可以看出,右线隧道施工过程中,掌子面在下穿隧轨交点处时引起的轨道沉降增长速度明显较左线隧道下穿时大,因此同样可以得到,水平偏差随轨道沉降速度而增长的结论。③双线盾构隧道下穿铁路轨道的施工过程中,会导致轨道线路产生一定量的水平偏差,但均小于《铁路安全运营管理规则》中规定的 4 mm。

3.3 下穿施工对轨道轨向偏差的影响

图 10 为右线盾构隧道掘进过程中 A 点处两轨道间轨向偏差的变化规律曲线,从图中可以看出,最大轨向偏差位于盾构到达隧轨交点之前或通过以后 1 倍的隧道直径的距离位置。

因此,取掌子面距隧轨交点的距离分别为 $L=-D$ 、 $L=0$ 和 $L=D$ 时的轨道轨向偏差进行对比分

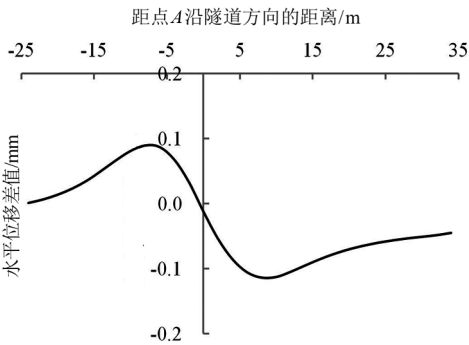


图 10 右线隧道掘进 A 点处轨向偏差变化曲线
Fig.10 The curve of track direction deviation of point A during right line tunnel construction

析,如图 11 所示。由图可知:①在 A 点附近和 A 点右侧轨道位置的轨向偏差相对较大,A 点左侧轨道位置的轨向偏差相对较小,这主要是由于掌子面距隧轨交点右侧部分的轨道距离较近,致使隧轨交点及右侧处轨道受到施工的持续影响时间较长,影响量也就越大的缘故。②整个隧道施工过程中的最大轨向偏差为 0.28 mm(位于左线隧道掘进过程中),可见盾构隧道施工对轨道的轨向变形影响甚微。

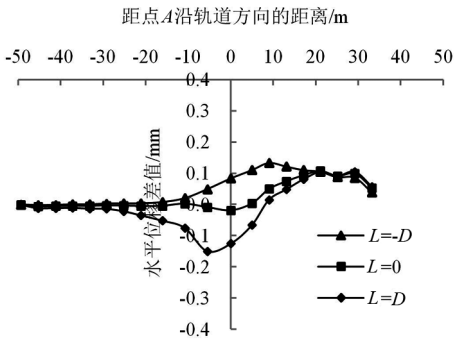


图 11 右线掘进到不同位置的轨向偏差
Fig.11 The track direction deviation caused by right line shield tunnelling into different positions

4 数值分析与实测对比

图 12 给出了双线贯通后的 1 号轨道沉降模拟值与实测值对比曲线。由图可知,采用数值模拟的方法与实测结果十分接近,轨道沉降槽宽度系数与实测结果基本相同,沉降幅值相差不到 2 mm(约为轨道沉降值的 10%)。证明了数值模拟的正确性。

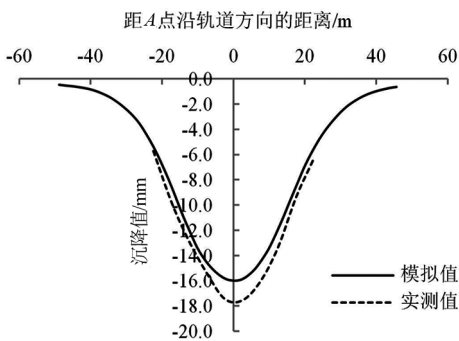


图 12 双线贯通后的轨道沉降模拟与实测对比曲线

Fig.12 The simulated and measured contrast curves of track settlement after dual lines completion

图 13、14 分别为右线隧道施工引起的轨道水平偏差和 A 点的轨向偏差数值模拟与实测对比曲线。由图可知;①水平偏差和轨向偏差的实测值与模拟值均基本吻合,再次验证了数值模拟的

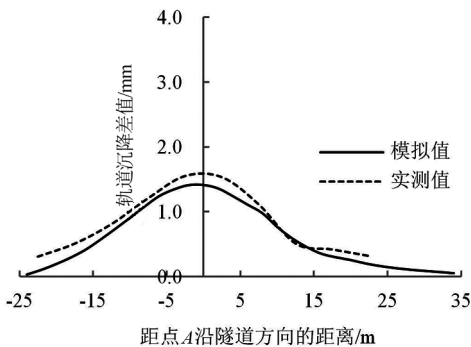


图 13 右线施工水平偏差模拟与实测对比曲线

Fig.13 The simulated and measured contrast curves of track horizontal deviation during right line tunnel construction

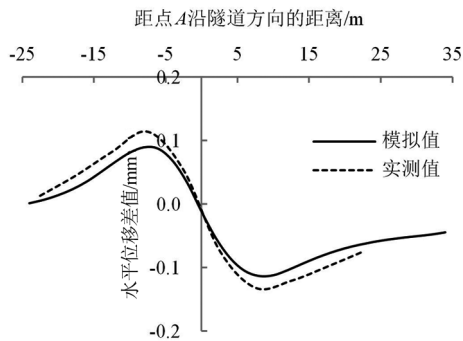


图 14 右线施工 A 点轨向偏差模拟与实测对比曲线

Fig.14 The simulated and measured contrast curves of track direction deviation of point A during right line tunnel construction

准确性。②实测与模拟规律均显示,水平偏差在盾构开挖掌子面达到隧轨交点时最大;轨向偏差在掌子面距隧轨交点 1 倍的隧道直径的距离位置时最大。

5 隧道埋深对轨道沉降变形的影响

图 15、16、17 和 18 分别给出了不同盾构隧道埋深(7、15、25 和 40 m)对轨道最大沉降、轨道沉降槽宽度、轨道水平偏差和轨道轨向偏差的影响规律曲线。

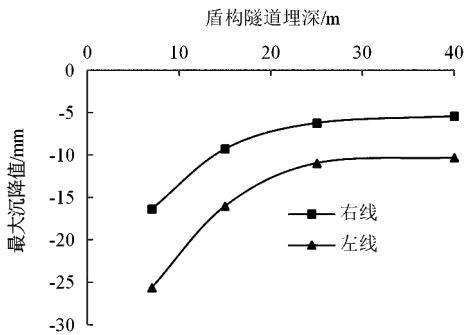


图 15 不同埋深下的轨道最大沉降变化曲线

Fig.15 The maximum settlement curve of track at different buried depths

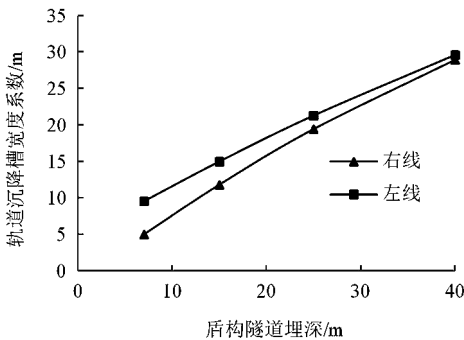


图 16 不同埋深下的轨道沉降槽宽度变化曲线

Fig.16 The changing curve of track settlement trough width at different buried depths

由图 15 和 16 可知,盾构隧道埋深越小,施工中产生的扰动则越接近或包含既有铁路轨道线路,产生的轨道沉降量就越大,对列车的安全运营影响也就越大;盾构隧道埋深越大,施工产生的扰动则越远离既有铁路轨道线路,尽管此时对铁路轨道线路的影响范围相对较大,但所产生的轨道沉降量却越小,列车运行越平稳安全。

由图 17 可知,埋深小时,轨道水平偏差明显

较大,列车在运行中容易出现上下颠簸,产生较大

的振动,对列车的安全运行较为不利;当埋深大于 15 m 时,水平偏差迅速减小,此时对列车的运行较安全有利。不同的盾构隧道埋深对轨道的轨向偏差影响甚微(图 18)。

6 结论

1)盾构下穿施工过程中产生的轨道沉降量主要发生在盾构到达轨道前、盾构通过期间和盾尾通过以后的 3 个阶段,且盾构到达前的轨道沉降量尤为显著。同时,在轨道线路与隧道沿线为斜交的实际工程施工中,应特别注意距开挖掌子面较近的轨道线路沉降变形。

2)盾构隧道下穿铁路轨道施工会引起一定量的轨道水平偏差和轨向偏差。最大水平偏差一般出现在盾构掘进至隧轨交点处位置,且水平偏差随轨道沉降速度的增大而增大;最大轨向偏差一般位于盾构到达隧轨交点之前或通过隧轨交点以后 1 倍的隧道直径的距离位置。但均在《铁路安全运营管理规定》规定的范围内,只需做好相应阶段的安全防护工作即可。

3)盾构隧道的埋深较小时,轨道的最大沉降值会集聚大,沉降槽宽度相对较窄,沉降变形相对陡峭,水平偏差也相对较大,轨向偏差几乎保持不变。因此,在盾构隧道下穿既有铁路线路的施工中,盾构隧道埋深越浅,对列车运行的平稳性、舒适性和安全性越不利;反之,埋深越大则越有利。

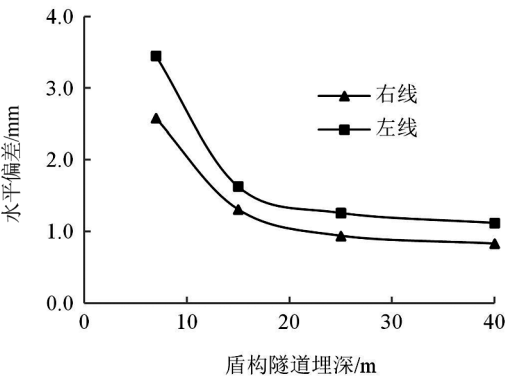


图 17 不同埋深下的轨道水平偏差变化曲线

Fig.17 The curve of track horizontal deviation at different buried depths

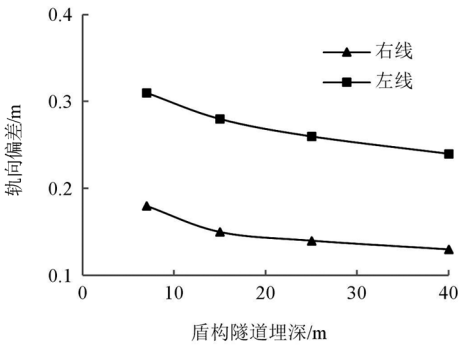


图 18 不同埋深下的轨道轨向偏差变化曲线

Fig.18 The curve of track direction deviation at different buried depths

参考文献:

[1] 邹春华,周顺华,王长丹,等.路基不均匀沉降引起有砟轨道沉降的计算方法[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(8):1237-1242.

[2] Burland J B, Standing J R, Jardine F M. Building response to tunnelling, case studies from construction of the Jubilee Line-Extension[M]. London: Thomas Telford Publishing,2001:509-545.

[3] 葛世平,廖少明,陈立生.地铁隧道建设与运营对地面房屋的沉降影响与对策[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):550-556.

[4] 张达栋.地铁盾构隧道施工引起地表沉降机制及数值分析[J].公路交通科技(应用技术版),2015(2):181-183.

[5] 王伟忠,臧延伟.盾构下穿既有铁路线路地基加固方案与效果分析[J].铁道建筑,2007(6):63-65.

[6] 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(S1):269-276.

[7] 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):1619-1622.

[8] 铁道部.铁路路基设计规范:TB10001-2005[S].北京:中国铁道出版社,2005.

[9] 铁道部.铁路隧道设计规范:TB10003-2005[S].北京:中国铁道出版社,2005.

[10] 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.

(责任编辑:陈雯)