

地铁隧道长距离下穿高速公路施工扰动影响及控制技术研究

刘鑫榕

(湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410015)

摘要:以某地铁双线盾构隧道下穿高速公路路基工程为研究背景,基于FLAC^{3D}软件建立下穿隧道三维有限差分计算模型,研究盾构隧道长距离下穿高速公路路基段施工对路基的扰动影响规律,并分析袖阀管注浆加固对路基变形的控制效果,得到合理的加固参数,基于现场实测数据分析了加固措施的有效性,研究结果表明:双洞隧道施工过程中路基最大沉降会由先行洞侧逐渐往后行洞侧隧道上方偏移,最大沉降值远超规范允许值,需采取有效路基保护措施;注浆加固对减小路基沉降效果较为明显,增大路基加固厚度对于控制路基沉降存在“极限值”,当加固厚度超过极限值时继续增大加固厚度对路基沉降减小作用不明显,加固厚度10 m为加固“极限值”;隧道施工完成时路基沉降约14.55 mm,路基沉降在安全可控范围内。

关键词:盾构隧道;高速路基;下穿施工;注浆加固;变形控制

随着中国城市交通的迅速发展,城市交通网络密度愈来愈大,不可避免地会遇到城市地铁线路与高速公路交叉的情况,地铁盾构隧道下穿高速公路路基尤为常见,然而隧道下穿高速公路路基时隧道往往埋深较浅,施工极易引起较大的路面沉降,进而引起高速公路路面开裂甚至路基失稳,危机路面交通安全。高速公路运营对路面沉降要求较为严格,为了减小隧道施工对路基的扰动,隧道下穿路基施工时需采取可靠的变形控制措施。目前对于隧道下穿路基施工的研究较多,同时也取得了一些研究成果。王航等、林利安等、龚彦峰等、侯豪斌结合下穿隧道工程的特点,从经济及安全上分析比选了几种下穿隧道的常用施工方法及控制措施,并为下穿隧道施工提出了一些建议;朱正国等、曹成勇等、余晓琳等、万利等、陈荣伟等、李现者等基于数值计算与现场监测研究了下穿隧道施工过程对路基变形受力影响,得到了下穿隧道施工影响规律;已有研究大多集中于下穿隧道施工对路基变形受力的影响规律,且对于下穿隧道施工影响控制措施偏向于定性研究,而对于下穿隧道施工对路基保护措施量化的研究成果甚少,急需开展相关研究。

该文依托某一地铁双线盾构隧道下穿高速公路路

基工程,基于FLAC^{3D}软件建立下穿隧道三维有限差分数值计算模型,研究盾构隧道下穿高速公路路基段施工扰动效应规律,并分析袖阀管注浆加固对路基变形的控制效果,对注浆加固参数进行优化分析。

1 工程概况

某地铁盾构隧道左右线下穿某高速公路路基段,路基填筑高度为12 m,路面双向四车道宽度28 m,隧道与高速公路夹角约62.5°,隧道穿越路基段最大埋深16 m,最小埋深4 m,左右线隧道间距10.2 m,其中左线隧道下穿路基长度43.7 m,右线隧道下穿路基长度42.6 m,隧道主要穿越砾质黏性土地层,盾构隧道内径5.4 m,外径6 m,钢筋混凝土管片厚度0.3 m,盾构隧道施工顺序为先开挖左线,待左线完全贯通后再对右线进行开挖,隧道每循环开挖进尺1.5 m。

2 隧道下穿高速公路路基施工模拟

2.1 计算模型建立

考虑工程实际尺寸及模型的计算方便性,模型横

收稿日期:2019-02-25(修改稿)

基金项目:湖南省交通科技项目(编号:200928,201023)

作者简介:刘鑫榕,女,大学本科,工程师.E-mail:l522839150@qq.com

向宽度取 120 m,高度取 90 m,纵向长度取 180 m,隧道衬砌采用弹性模型,地层采用 M-C 本构模型,采用板单元模拟盾构衬砌,地层与路基土采用三维实体

单元模拟,模型共划分 157 000 个单元。路基隧道及穿越土层的材料参数见表 1。

表 1 数值计算参数

材料	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	厚度/ m
路基土	1 900	50.00	0.33	28.0	23.0	8
素填土	1 895	20.98	0.30	24.9	21.9	4
含砾性黏土	1 825	17.70	0.33	14.8	18.1	15
全风化花岗岩	1 878	18.30	0.25	32.1	24.5	28
强风化花岗岩	1 980	24.00	0.25	35.2	25.1	35
盾构管片	2 500	34 500.00	0.20	—	—	—

基于现场实际隧道施工工序,盾构隧道下穿高速公路掘进的施工模拟过程为:

(1) 对土层进行激活,将模型的四周和底部边界条件设置为法向约束,将地表边界条件设置为自由边界,在考虑自重条件下求解至平衡,并将位移清零。

(2) 在路面施加 20 kPa 的路面荷载,求解至平衡,并将位移清零。

(3) 根据施工方案,隧道施工先开挖左线,待左线完全贯通后再对右线进行开挖,隧道每循环开挖进尺为 1.5 m。

2.2 计算结果分析

重点分析隧道掘进通过路基段的最终累积变形,此处只对最后的计算结果进行相应的研究分析。提取开挖后路基竖向位移结果如图 1 所示。

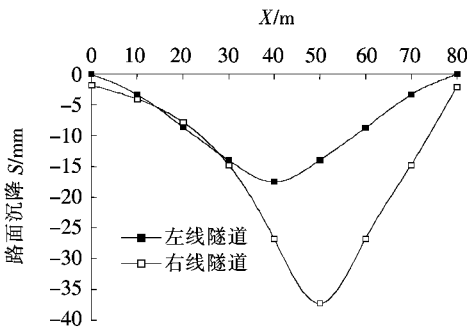


图 1 左、右线隧道开挖完时路面沉降

由图 1 可知:随着隧道的施工,路面会发生较大沉降,当开挖左线隧道时,路面沉降最大值位于左线隧道正上方,最大沉降值为-17.5 mm。当右线隧道施工时,路面最大沉降点逐渐移到右线隧道正上方,最终路面最大沉降值为-37.5 mm,大于规范控制值 30 mm,盾构隧道施工对路基沉降影响大,在施工过程中需采

取适宜的工程措施来控制路基沉降的发展,避免过大的路基沉降,影响路基的安全使用。

3 隧道下穿高速公路路基施工加固方案研究

基于上文数值计算得到的路基变形规律,结合工程地质特点,为了控制隧道下穿施工对路基的扰动,需对施工范围内路基进行加固处理,施工现场采用 $\phi 76$ mm 袖阀管对路基土进行注浆加固,注浆水泥水灰比为 1:1,注浆孔间距 1.0 m,施工时现场采取有效交通疏解方案,以减小路基注浆施工对路面交通的影响。

现场拟对全路基进行加固(加固厚度为 12 m),基于 FLAC^{3D} 有限元模拟加固方案下盾构隧道开挖对路基沉降的影响,并与未加固情况结果对比,分析现有加固方案的可行性及是否存在可优化的空间。提取不同加固方案下右线隧道开挖完时路面监测点沉降计算结果,如图 2 所示。

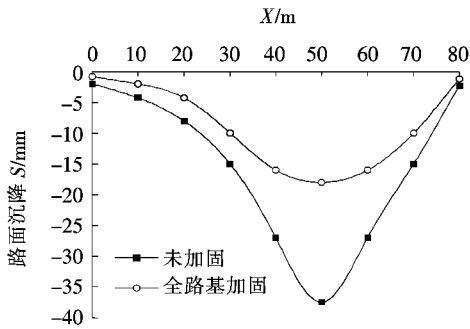


图 2 加固与未加固情况路面沉降对比

由图 2 可知:加固后路基沉降在隧道穿越路基后最大值为-18 mm,远小于路基沉降控制值-30 mm,

相比未加固情况下最大路基沉降值 -37.45 mm ,减小幅度为 51.9% ,说明采取全路基加固能够有效地控制路基沉降,同时基于路基沉降值大小可以说明原方案具有较大的优化空间。

路基加固的作用是为了减小路基的沉降,为了更好地体现加固措施对路基沉降的影响,引入加固有效率 P :

$$P = \frac{S_{i-1} - S_i}{S_0 - S_{h_{\max}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S_i 、 S_{i-1} 分别为加固厚度为 h_i 、 h_{i-1} 时对应的路基沉降值; S_0 为未加固时的沉降; $S_{h_{\max}}$ 为加固厚度达 h_{\max} 时的沉降值。

为了进一步研究袖阀管注浆加固对路基稳定性的影响规律,优化加固参数,以上述仿真模型为基础,在原加固方案基础上(全路基加固),研究加固厚度(厚度取 0 、 2 、 4 、 6 、 8 、 10 及 12 m)对高速公路路基沉降控制效果的影响,结合安全性对注浆加固范围进行优化,得到合理的加固厚度。结果见图3、4。

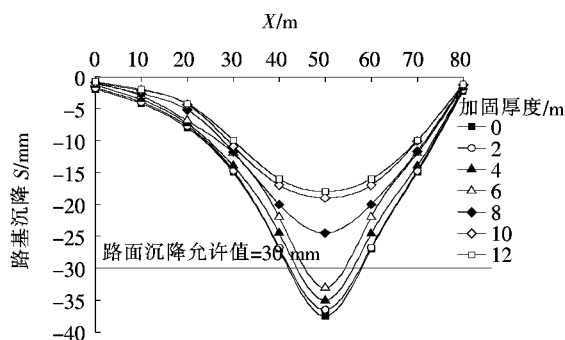


图3 加固厚度对路基沉降影响

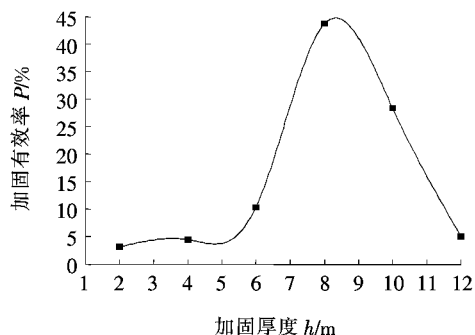


图4 加固厚度对加固有效率 P 影响

由图3、4可知:

(1) 路基沉降随着加固厚度增加而减小,隧道开挖完成后,路基加固厚度为 2 、 4 、 6 m 时的路基最大沉降均超过允许值 30 mm 。当加固厚度小于 6 m 时,加固有效率 P 值较小,加固厚度增大对路基沉降减小作

用小,当加固厚度为 $6\sim 10\text{ m}$ 变化时 P 较大,且在加固厚度为 8 m 时路基沉降减小幅度最大,加固有效率 P 达到最大,路基最大沉降减小最为明显,随着加固厚度的继续增加,路基最大沉降减小幅度逐渐变小,由 10 m 增加到 12 m 变化幅度微小,加固有效率急剧下降且最终保持较小值,继续增大加固厚度对路基沉降减小作用不明显。可见增大路基加固厚度对于控制路基沉降存在“极限值”,当加固厚度超过极限值时继续增大加固厚度对路基沉降减小作用不明显,因此考虑加固厚度对路基最大沉降的影响,路基加固厚度取 10 m 为加固“极限值”。

(2) 当加固厚度为 6 m 时,路基最大沉降为 -33 mm ,超出路基沉降允许值 -30 mm ,因此从经济性及安全性考虑,建议该工程及类似工程的路基工程加固,加固厚度取 8 m 左右且不宜超过 10 m 及小于 6 m 。

4 基于现场实测的路基沉降控制效果分析

采用优化后的加固参数应用于实际工程加固,现场对路基路面以下 10 m 范围内路基土进行加固。

在隧道左右线上方路面分别设置了3个沉降监测点,对盾构隧道施工过程中路基沉降进行监测,其中左线路面监测点为 A_1 、 A_2 、 A_3 ;右线路面监测点为 B_1 、 B_2 、 B_3 ,相邻监测点纵向距离为 10 m (图5),提取各监测点的观测结果如图6、7所示。

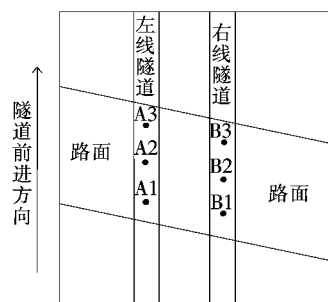


图5 路面监测平面图

由图6、7可知:各监测点路面沉降随着开挖长度的增加逐渐增大,且最终趋于稳定,右线路面沉降在隧道开挖完成时要大于左线路面,左右线最大沉降分别为 -9.9 mm 和 -14.55 mm ,远小于路基沉降允许值 -30 mm ,说明现场采用的加固措施达到了预期的加固效果,有效地控制了路基沉降在安全范围以内。

提取路基加固厚度为 10 m 时对应监测点位置路基沉降计算值并与实际监测值进行比较,结果见表2。

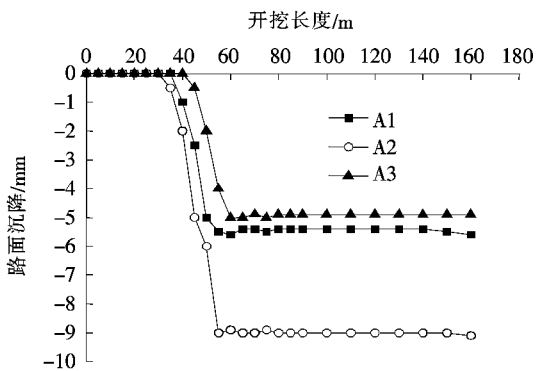


图 6 左线路路面监测点沉降

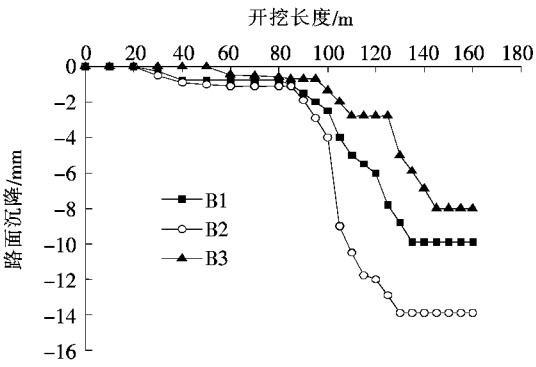


图 7 右线路路面监测点沉降

表 2 各监测点路面沉降监测结果与数值计算结果对比

监测点	监测值/mm	计算值/mm	相对误差/%
A1	-5.6	-6.1	9.5
A2	-9.1	-9.6	8.8
A3	-5.0	-5.2	6.8
B1	-9.9	-10.9	9.2
B2	-13.9	-14.8	9.0
B3	-8.0	-8.8	9.1

从表 2 可知:有限元模拟计算路面沉降值和监测结果比较吻合,相对误差在 10% 以内,且计算结果大于监测结果,说明计算结果较安全且合理,满足工程需要。

5 结论

依托某地铁双线盾构隧道下穿高速公路路基工程,基于 FLAC^{3D} 软件建立下穿隧道三维有限差分数值计算模型,研究盾构隧道下穿高速公路路基段施工

扰动效应规律,并分析袖阀管注浆加固对路基变形的控制效果,对注浆加固参数进行优化分析,主要研究结论如下:

(1) 双洞隧道施工过程中路基最大沉降会由先行洞侧逐渐往后行洞侧隧道上方偏移,最大沉降值远超规范允许值,需采取有效措施保护路基。

(2) 注浆加固对减小路基沉降效果较为明显,增大路基加固厚度对于控制路基沉降存在“极限值”,当加固厚度超过极限值时继续增大加固厚度对路基沉降减小作用不明显,路基加固厚度 10 m 为加固“极限值”。

(3) 隧道下穿施工完成时高速公路路基最大沉降约为 14.55 mm,路基沉降在安全范围内,有限元模拟计算路面沉降值和监测结果比较吻合,相对误差在以 10% 内,且计算结果大于监测结果,说明计算结果较安全且合理,可以满足工程需要。

参考文献:

[1] 王航,韩磊.浅埋大跨隧道下穿既有公路施工技术[J].公路,2012(8).

[2] 林利安,李晓博.复杂地质条件下隧道下穿既有公路施工与监测[J].广东公路交通,2016(4).

[3] 龚彦峰,唐墨,李强,等.高速铁路隧道超浅埋下穿高速公路设计研究[J].铁道标准设计,2016(2).

[4] 侯豪斌.隧道下穿已建高速公路设计方案比选[J].山西交通科技,2014(6).

[5] 朱正国,黄松,朱永全.铁路隧道下穿公路引起的路面沉降规律和控制基准研究[J].岩土力学,2012(2).

[6] 曹成勇,施成华,彭立敏,等.下穿高速公路的浅埋大跨隧道开挖力学行为分析[J].现代隧道技术,2017(5).

[7] 余晓琳,罗霞.隧道下穿高速公路施工方案可行性数值分析[J].公路与汽运,2010(5).

[8] 万利,李振江,吴涛.大跨度浅埋暗挖隧道下穿既有高速公路设计方案研究[J].公路,2015(2).

[9] 陈荣伟,杨健,汪波.新建隧道下穿既有高速公路关键问题的探讨[J].公路,2009(11).

[10] 李现者,王道远,袁金秀,等.WSS 工法下双线暗挖隧道下穿既有城市主干道施工过程模拟[J].中外公路,2013(5).

[11] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2009.

[12] GB 50911-2013 城市轨道交通工程监测技术规范[S].