

铁路隧道下穿施工引起高速公路路基沉降规律研究

段恩新

(中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 270004)

摘要: 铁路隧道下穿既有高速公路引起路基路面沉降, 威胁交通安全。通过建立隧道-地基-路基相互作用计算模型, 在路面荷载作用下, 采用数值计算方法分析计算了隧道下穿深度、地层模量、泊松比及强度参数等因素与路基沉降变形规律之间的关系。计算结果表明, 隧道下穿深度不仅影响路基沉降变形的大小, 而且影响沉降槽的形状, 而土层性质主要对路基沉降变形影响较大, 对沉降槽形状影响相对较小。计算结果较好地反映了不同因素对路基沉降变形的影响, 对类似工程的设计和施工具有参考意义。

关键词: 铁路隧道; 地表沉降; 路基; 数值计算

中图分类号: U448 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)02-0041-06

铁路隧道下穿既有公路路基不可避免地会对周围土体产生扰动, 引起路基沉降变形和路面产生破坏, 进而影响交通安全。许多学者对隧道施工引起地表沉降变形进行了深入的研究。1969年 Peck^[1]在大量隧道开挖施工引起的地表沉降实测资料的基础上, 归纳总结了隧道施工引起地表沉降槽的形状和控制参数, 系统地提出了地层损失的概念和估算隧道开挖地表下沉的实用方法, 国内学者周顺华、李强^[2-5]等通过离心模型试验和数值计算的方法研究了隧道施工引起地表沉降变形规律。现通过建立铁路隧道下穿既有公路路基施工的有限元模型, 计算分析了隧道埋深、地层性质、隧道跨度等因素与路基沉降变形规律之间的关系, 在此基础上, 归纳总结了隧道不同设计参数和地层性质对既有高速公路路基沉降变形的影响, 为铁路隧道设计与下穿施工提供技术参考。

1 数值计算方案及模型建立

1.1 数值计算方案

针对铁路隧道下穿既有公路施工时引起路基沉降变形机理的量化分析^[6], 主要考虑路基沉降变形的各个影响因素的影响程度与影响机理。而路基沉降变形的影响因素很多, 有些还相互影响。为了分析隧道埋深、地层参数和隧道跨度等对路面的沉降影响, 对各个因素在非等地层损失率下逐个进行单独分析, 以便于研究每一种因素的影响程度与机理。因此在分析上述每一种因素变化对路基沉降影响时, 采用正交数值试验的方法进行模拟。具体计算过程中, 隧道下穿深度分别选取 3、5、10、20、30、40 m 6 种, 上覆土层力学参数如表 1 所示, 铁路隧道跨度考虑单线隧道和双线隧道两种。

表 1 不同地层性质参数影响的计算方案表

隧道下穿深度/m	弹性模量/MPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
3	25	0.3	10	15
5	50	0.35	15	20
10	150	0.4	20	25
20	250	—	30	30
30	1 000	—	—	—
40	1 500	—	—	—

收稿日期: 2013-01-14

作者简介: 段恩新 男 1968 年出生 高级工程师

1.2 数值计算模型的基本参数

(1) 数值计算模型。根据一般标准高速公路采用双向 4 车道,路面宽度计算为:标准车道宽为 3.75 m、紧急停车带 2.5 m(也可用路肩作为紧急停车带)、中央隔离带 1 m、路肩宽度 2.5 m,如果双向 4 车道计算,外加紧急停车带计算: $3.75 \times 4 + 2.5 \times 2 + 1 + 2.5 \times 2 = 21$ m。一般高速路基宽度取 26 m。三维数值模拟计算模型大小为:纵向沿高速公路段下穿隧道轴线方向取 60 m,水平边界长度约为隧道跨度的 5 倍,长 180 m;垂直方向隧道底部以下 25 m,上边界取近似地表的自由边界。模型左、右、前、后和下部边界均施加法向约束,地表为自由边界。采用管棚进行超前支护,三台阶开挖的施工方法,计算简图如图 1 所示。

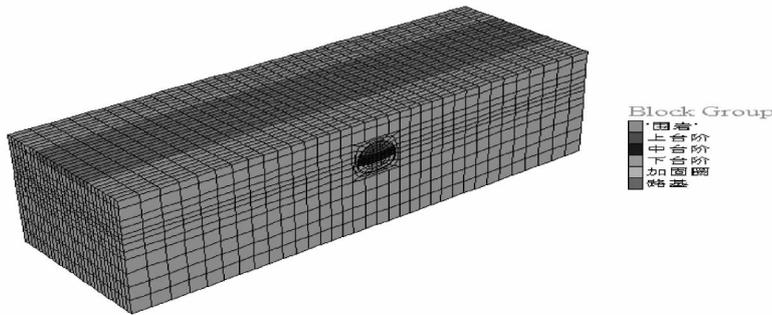


图 1 三维计算简图

(2) 计算参数。模型计算参数如表 1,通过车辆荷载等效均布荷载传入路基可采用 20 kPa,故可以简化到路基 26 m 宽范围内地表施加 20 kPa 均布荷载。

2 数值计算结果分析

2.1 下穿隧道埋深对路基沉降变形的影响

为综合反应施工隧道不同下穿深度对既有公路路面的影响,分别取隧道公路路面以下 3、5、10、20、30、40 m 处下穿既有公路,针对每种不同下穿深度情况下,对单线铁路隧道和双线铁路隧道分别进行了数值计算。最大地面沉降与隧道埋深的关系曲线如图 2,沉降槽宽度系数 i 与隧道埋深 H 的关系如图 3,沉降槽宽度系数 i 是指最大沉降点到沉降槽反弯点的距离,代表了沉降槽的宽度与形状。

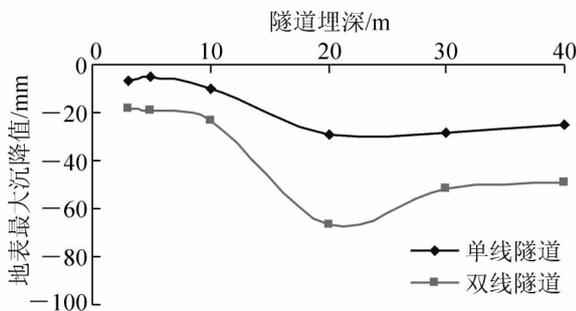


图 2 地表最大沉降与埋深关系曲线

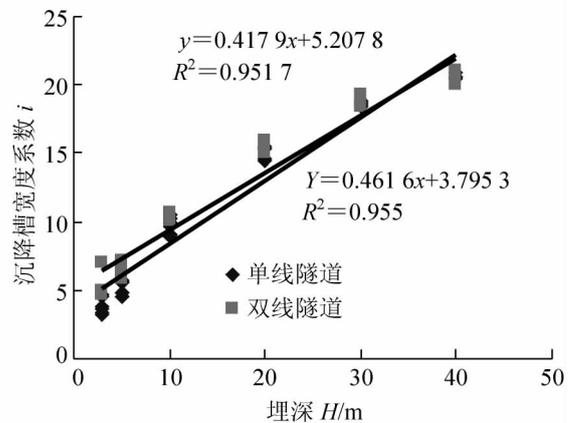


图 3 不同埋深 H 和沉降槽宽度系数 i 的关系

从图 2 可以看出,铁路隧道下穿高速公路路基引起的路基沉降变形与隧道下穿深度有直接关系。对于单线隧道,当埋深很小时($H < 0.5D$),隧道埋深越小,施工引起的路面沉降值越大,因此针对于埋深很小的下穿隧道施工必须采取相应的技术措施,避免隧道上覆土层塌陷;当隧道埋深大于隧道二分之一跨度后($H > 0.5D$),随着隧道埋深的增加,施工引起地层损失和土体的再固结会加大,因此路面最大沉降值

会有加大趋势,但当埋深达到一定深度后($H = 3D$)路面沉降不再增加甚至减小,最后隧道埋深对路面沉降的影响越来越小。而对于双线隧道,当埋深较小时($H < 3D$)隧道施工引起的路面最大沉降值随着隧道埋深的增加而逐渐加大,当隧道埋深较大时($H > 3D$)隧道施工引起的路面最大沉降值随着隧道埋深的增加而逐渐减小,减小量将趋于缓和,最后隧道埋深对路面沉降的影响越来越小,由于双线隧道跨度较大,所采用连续介质计算模型较难模拟埋深很小时的土层沉降变形的变化,但根据既有工程的监测资料表明,当隧道埋深小于 $0.5D$ 时沉降变形的变化规律与单线隧道相一致。一般情况,地层损失是造成地表沉降的主要原因,在相同地层损失情况下,上覆土层厚度越大,沉降槽范围越大,地表最大沉降值越小^[7]。而对于路面有交通荷载的路基来说,除了地层损失是造成路面沉降的主要因素之外,路面交通荷载的存在对最大沉降值的影响是显著的。

从沉降槽的形状看,隧道埋深较浅时,沉降槽的宽度相对较小,但沉降槽的沉降曲率较大;随着隧道埋深的增加,路面沉降槽的宽度逐渐增加,但沉降槽的曲率变得越来越缓和。因此,当隧道埋深较小时对路面的破坏要比深埋隧道严重,隧道埋深较大时对路面交通的影响相对浅埋隧道要小。

单线隧道和双线隧道施工引起路基的最大沉降和沉降范围有一定差别,从图 2、图 3 中可以看出,双线隧道引起的路基最大沉降远远大于单线隧道引起的路基沉降,但沉降槽宽度系数 i 与隧道埋深有关,当隧道埋深较小($H < 2D$)时,双线隧道地表沉降槽宽度系数大于单线隧道,但当隧道埋深较大($H > 2D$)时,双线隧道引起的地表沉降槽宽度与单线隧道基本一致。由此可以看出,隧道跨度越大,施工引起的路基沉降变形也越大,但对沉降范围影响较小。

沉降槽的宽度系数 i 代表了沉降槽的形状和宽度。从图 3 可以看出,沉降槽宽度与隧道埋深成正比,埋深越大,沉降槽宽度系数越大。由图 3 可以得到路基沉降槽宽度系数公式分别为:单线隧道, $i = 0.4189H + 5.2843$;双线隧道, $i = 0.4629H + 3.8893$ 。

2.2 上覆土层模量对路基沉降变形的影响

高速公路路基主要由面层、基层和地基构成,每个构造层相对都是由均匀的材料组成,构造相对简单,因此数值计算只是分析上覆土层不同模量对既有公路路面的影响。分别针对单线和双线铁路隧道选取了 25、75、250、500、1 000 和 1 500 MPa 共 6 种不同上覆土层模量进行了计算,计算结果图 4 和图 5。

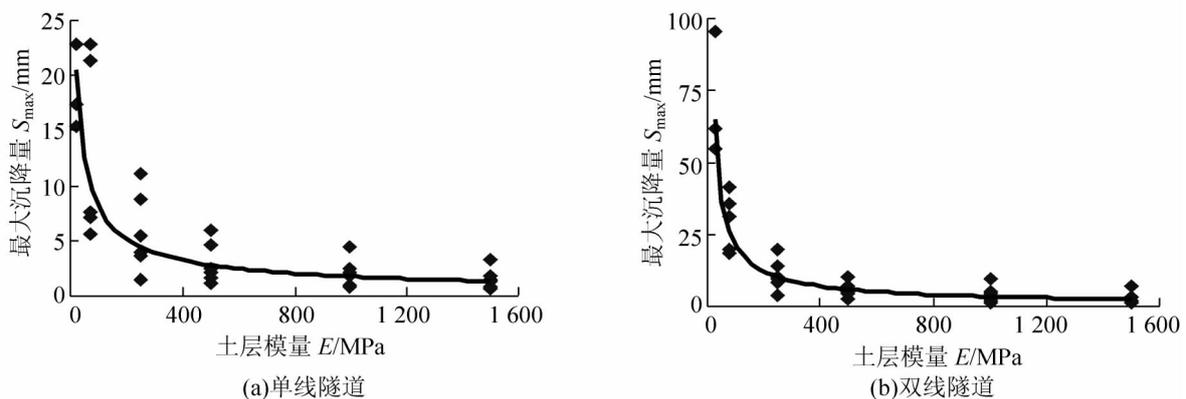


图 4 地表最大沉降量与土层模量关系曲线

土层模量的大小代表了土体承受变形的能力。从图 4 可以看出,上覆土层模量对隧道下穿施工引起既有公路路面最大沉降值有较大的影响,当上覆土层模量较小时引起的路面最大沉降值很大,随着上覆土层模量增大,路面最大沉降值会急剧减小。当上覆土层模量达到某一值时,路面最大沉降值的减小量趋于零,且最大沉降趋于最小。土层模量对单线隧道和双线隧道施工沉降变形的影响规律基本一致,如图 4 所示。

综合分析图 4、图 5 可知,上覆土层模量主要影响路面最大沉降值的大小,对沉降槽形态及宽度影响较小。因此,在施工过程中采取提高上覆土层模量的方法可以有效地降低路面沉降量的发展,但不能明显降低路基的沉降范围。

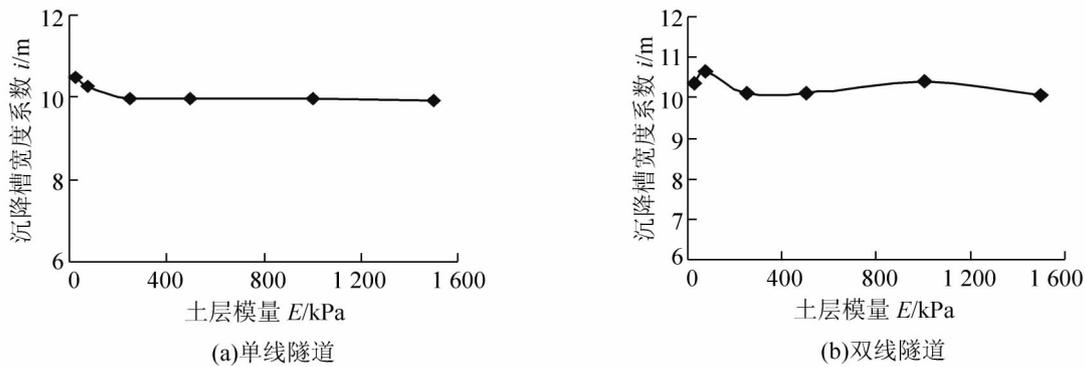


图 5 沉降槽宽度系数与土层模量关系曲线

2.3 上覆土层泊松比对路基沉降变形的影响

泊松比表示上覆土层侧向变形性质。为了研究上覆土层不同泊松比对路面沉降槽的影响规律及机理,针对单线和双线隧道计算,分析了泊松比分别为 0.3、0.35 和 0.4 时的路基路面沉降变形特点,得到了不同泊松比情况下路面最大沉降值及沉降范围的变化规律,如图 6 和图 7。

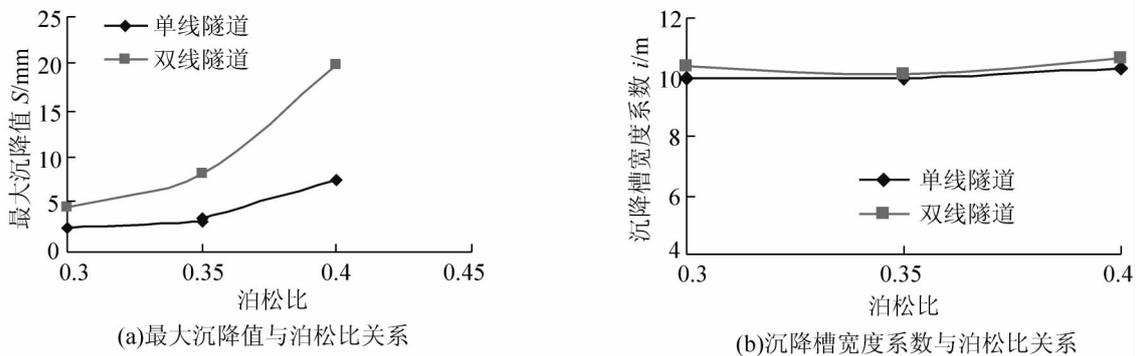


图 6 最大沉降值、沉降槽宽度系数与泊松比关系曲线

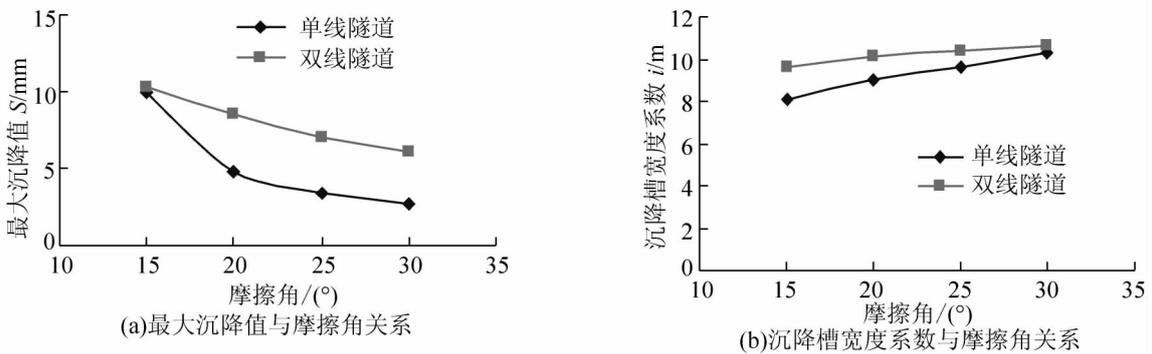


图 7 最大沉降值、沉降槽宽度系数与摩擦角关系曲线

从图 6 可以看出,随着上覆土层泊松比的增加,路面最大沉降值急剧增加,两者呈非线性关系,但沉降槽宽度参数的变化不大。分析主要原因在于泊松比表示上覆土层的竖向变形对横向变形的影响大小,泊松比越大,土体侧向变形也越大,因此土层泊松比直接影响隧道开挖引起周围土层地层损失的大小,所以土层泊松比对路面沉降更比较敏感。

2.4 上覆土层土体强度对路基沉降变形的影响

为了得到隧道周围土体强度参数对隧道开挖引起的路基沉降变形的影响,针对土层强度参数分别选取粘聚力为 10.0、15.0、20.0、30.0 kPa 和内摩擦角为 15°、20°、25°、30°进行了有限元计算分析,得到了不同土层强度参数下路面最大沉降值及沉降分布规律,其关系曲线见图 7 和图 8 所示。

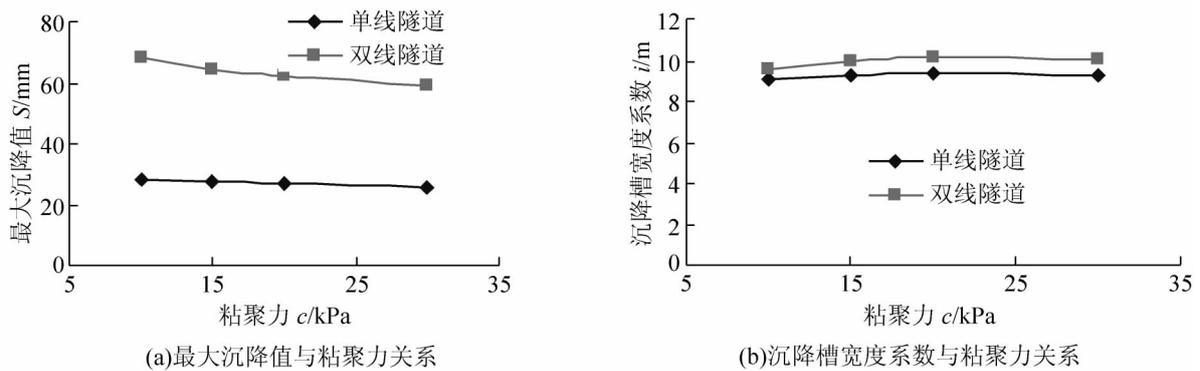


图 8 最大沉降值、沉降槽宽度系数与粘聚力关系曲线

从图 7 可以看出,土层内摩擦角 φ 对路基沉降具有较大影响,随着土层内摩擦角 φ 的增加,路面最大沉降值开始急剧减小,当摩擦角 φ 达到某值时,沉降量减小变得缓慢,两者呈非线性关系。内摩擦角 φ 的大小对路面沉降槽宽度也有一定影响,随着内摩擦角 φ 的增大,路面沉降槽宽度有一定的增大,但增加幅度不是很大。相对于双线隧道,土层内摩擦角 φ 对单线隧道引起的路面沉降影响更大。

从图 8 分析可以看出,土层粘聚力 c 的变化对路面沉降有一定影响。随着土层粘聚力 c 的增加,路面最大沉降值有一定的减小,但减小幅度很小,两者基本呈线性关系。但土层粘聚力 c 对沉降槽宽度没有明显的影响。

综上所述,土层强度参数中粘聚力 c 对路基沉降变形影响相对较小,而内摩擦角 φ 是影响路基沉降变形的主要因素。内摩擦角 φ 增加,路面最大沉降值减小,但沉降槽宽度有一定增加。

3 结论

在路面交通荷载作用下,通过对下穿既有公路隧道的不同埋深、地层性质和隧道跨度的数值分析,得到了铁路隧道下穿施工过程中影响路基沉降变形的主要因素及影响规律:

(1) 铁路隧道下穿施工会使高速公路路基产生明显不均匀沉降,下穿深度不但影响路基路面的沉降大小,而且也影响沉降槽的形状和宽度;隧道下穿深度与沉降槽宽度系数 i 呈线性关系。

(2) 铁路隧道上覆土层模量主要影响路面最大沉降值的大小,二者呈非线性关系。当上覆土层模量较小时,随着铁路隧道上覆土层模量的增加,路面最大沉降值急剧减小,当上覆土层模量较大时,最大沉降值减小幅度会变得很小。路面沉降趋于稳定;但上覆土层模量对路面沉降槽形状和宽度影响较小。

(3) 铁路隧道上覆土层泊松比对路基最大沉降值影响显著,随着泊松比的增加,路基最大沉降值急剧增大,二者呈非线性关系,但土层泊松比的增加对路面沉降槽宽度影响不明显。

(4) 土体强度参数中粘聚力 c 值对路基沉降曲线影响较小。随着粘聚力 c 值的增加,路基最大沉降值会减小,但减小幅度很小,二者呈线性关系,但粘聚力 c 对沉降槽宽度没有明显影响。

(5) 土体强度参数内摩擦角 φ 值对路基沉降曲线影响较大。随着内摩擦角 φ 值的增加,地层损失减小,路基最大沉降值会急剧减小并趋于稳定,二者呈非线性关系,同时内摩擦角 φ 对沉降槽宽度也有一定影响,但影响很小。

参 考 文 献

- [1] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: State of the Art Volume, 1969: 225-290.
- [2] 周顺华, 杨龙才. 变跨度隧道施工引起的地表沉降[J]. 同济大学学报, 2003, 30(4): 408-412.
- [3] 卿伟寰, 廖红建, 钱春宇. 地下隧道施工对相邻建筑物及地表的沉降的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2005(6): 960-963, 978.

(下转第 82 页)

参 考 文 献

- [1]铁道部经济规划研究院. TZ202—2008 客货共线铁路路基工程施工技术指南[S]. 北京: 中国铁道出版社出版 2008.
- [2]中华人民共和国铁道部. TB10414—2003 铁路路基工程施工质量验收标准[S]. 北京: 中国铁道出版社出版 2003.
- [3]王志军. 花管注浆在西康增建二线铁路地基处理中的应用[J]. 山西建筑 2012(7): 142-143.
- [4]王继坤 张方方. 花管注浆在基坑边坡加固工程中的应用[J]. 资源环境与工程 2011(1): 65-70.
- [5]铁路工程技术标准所. 铁建设[2004]8号 新建时速 200 公里客货共线铁路工程施工质量验收暂行标准[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部 2004.

Application of Holed-Steel-Tube Grouting in Construction of Heavy-Duty Railways

Ma Yingxian

(The 20th Bureau Group Co. Ltd. of China Railway Engineering Corporation ,Xi'an 710016 ,China)

Abstract: With the strict requirements of heavy-duty railways in bearing capability and the characteristics of being small in settlement taken into account and based on the construction of the heavy-duty railway of the Mid-south Railway Passage in Shanxi Province ,in which roadbed consolidation is performed by means of the holed-steel-tube grouting technique to improve its bearing capability ,this paper analyzes in depth the choice and positioning of the drillers ,the processing and fixing of the holed steel tubes ,the order of the grouting processes ,etc. Finally ,the bearing capability of the consolidated sections is checked with static load tests ,which show that the expected effects are realized. This paper may serve as a useful reference for the construction of other similar projects.

Key words: the consolidation of the roadbed; holed steel tube; grouting; spoil area; check

(责任编辑 刘宪福)

(上接第 45 页)

- [4]李兆平 黄庆华. 下穿大型铁路站场的地铁车站施工对线路变形影响的监测分析[J]. 岩石力学与工程学报 2005 24 (A02): 5569-5575.
- [5]李强 王明年 李德才 等. 地铁车站暗挖隧道施工对既有桩基的影响[J]. 岩石力学与工程学报 2006 25(1): 184-190.
- [6]张培森 施建勇. 小变形条件下隧道开挖引起横向沉降槽分析[J]. 岩土力学 2011 32(2): 411-416.
- [7]柳厚祥. 地铁隧道盾构施工诱发地层移动机理与控制研究[D]. 西安: 西安理工大学岩土工程研究所 2008.

Study on Settlement of Highway Bed Due to Underground Construction of Crossing Railway Tunnels

Duan Enxin

(China Railway 14th Engineering Bureau Group Corporation Ji'nan 270004 ,China)

Abstract: Ground settlement due to construction of underground crossing railway is an important issue. In this paper ,the influence of the tunnels depths ,the elasticity modulus ,Poisson's ratio ,and internal friction angle of the sub grade soil property to the ground settlement during construction is simulated by the numerical simulation method. Some conclusions are drawn. Firstly ,the tunnels depth does not only influence the growth of the ground settlements ,but also the shape of traverse settler. Secondly ,the sub grade soil properties mainly affect the larger settlement; the shape of the settlement trough is relatively small.

Key words: railway tunnels; ground settlement; highway bed; numerical simulation method

(责任编辑 车轩玉)