

城市浅埋隧道埋深对地面沉降的影响规律*

曹元均

(中铁十四局集团第五工程有限公司, 272117, 济宁)

摘要 [目的]隧道埋深是隧道施工引起地面沉降的重要因素之一,特别是在城市地下空间施工过程中,细微的环境变化极易产生安全隐患。因此,有必要研究城市浅埋隧道的埋深对地面沉降的影响规律。[方法]提出一种关于隧道半径与埋深比的地面沉降理论解二维修正模型;以重庆地区某在建隧道为例,通过模型试验,分析不同埋深条件下地面沉降的变形规律,验证所提修正模型对地面沉降预测的合理性与可行性。[结果及结论]随着隧道埋深的增加,地面沉降总体呈下降趋势,沉降槽的宽度逐渐增大,隧道轴线上的最大沉降量逐渐减小;相较于原理论解及 Peck 公式解,修正后的沉降预测模型与试验值所得曲线较为接近,且修正模型在不同隧道埋深条件下具有更好的适用性;在浅埋隧道施工过程中,当隧道埋深增加时,建议扩大控制保护区的范围。

关键词 浅埋隧道;地面沉降;地面沉降理论解二维修正模型

中图分类号 U231.3; U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.007

Influence Law of Urban Shallow-buried Tunnel Buried Depth on Land Subsidence

CAO Yuanjun

(Fifth Engineering Co., Ltd., China Railway 14th Construction Bureau Group, 272117, Jining, China)

Abstract [Objective] The buried depth of tunnel is one of the important factors contributing to land subsidence induced by tunnel construction, especially in urban underground space where subtle environmental changes are prone to cause safety hazards. Therefore, it is necessary to investigate the influence law of urban shallow-buried tunnel buried depth on land subsidence. [Method] A two-dimensional modified model is proposed, regarding the ratio of tunnel radius to buried depth for land subsidence theoretical solution. Taking a tunnel under construction in Chongqing as example, with model tests, the deformation law of land subsidence under different buried depth conditions is analyzed, and the rationality and feasibility of the proposed modified model are verified in predicting land subsidence. [Result & Conclusion] With an increase in tunnel bur-

ied depth, the overall trend of land subsidence decreases, and the width of subsidence trough increases gradually, while the maximum subsidence amount along the tunnel axis decreases gradually. Compared to the original theoretical solution and Peck's formula solution, the modified subsidence prediction model aligns closer with the curves obtained from tests. Moreover, the modified model demonstrates better applicability under different tunnel buried depth conditions. During the construction of shallow-buried tunnel, it is recommended to expand the scope of control protection zone as tunnel buried depth increases.

Key words shallow-buried tunnel; land subsidence; two-dimensional modified model for land subsidence theoretical solution

在轨道交通建设中,复杂多变的地下环境是施工中比较棘手的问题。在隧道开挖过程中,周围地层会产生水平和垂直位移,对各种建筑物造成不同程度的破坏。因此在隧道开挖过程中,地面沉降的预测与控制是极其关键的步骤,许多研究人员已对由隧道开挖引起的地面沉降规律进行了研究^[1-2]。其中,隧道埋深是影响地面沉降的重要因素,但其相关研究相对较少。

目前,国内外对于地面沉降的预测研究方法可分为经验公式法、理论分析法、模型试验法和数值模拟法等。文献[3]基于 Peck 公式,提出改进方法并应用于实际工程中。文献[4]提出一种新的地面沉降分析方法,基于虚拟图像技术,分析并预测软土条件下由浅埋隧道掘进引起的地面沉降变形。文献[5]设计了离心模型试验方案,分析不同工况下,由隧道开挖引起的地面沉降情况。文献[6-7]通过同步开挖法及分部开挖法,对不同地层条件、不同施工工序等因素控制下的具体工程展开数值计算分析。

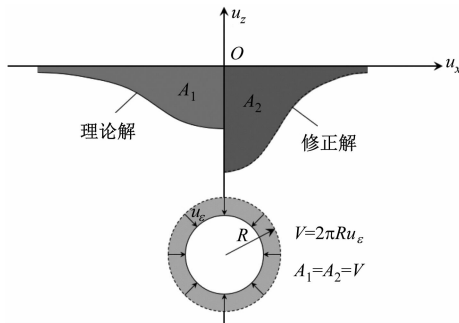
为了进一步提高文献[4]提出的理论解在不同

* 重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2020jscx-msxmX0130)

埋深条件下由隧道开挖引起地面沉降方面的适用性,本文提出一种关于隧道半径与埋深比的地面沉降理论解二维修正模型。通过模型试验,分析不同埋深条件下地面沉降的变形规律,验证所提修正解对地面沉降预测的合理性与可行性。

1 地面沉降理论解二维修正模型

在浅埋隧道的地面沉降变形计算模型中,通常假设隧道段为半无限弹性空间。文献[4]提出一个简明的闭合理论解,可用于计算均匀弹性半无限空间中不可压缩土体的沉降变形。该闭合理论解由三部分组成,前两部分是弹性理论的奇异解,由于这两个基本解具有对称性,所以地面位置的剪应力和垂直位移均为0。但这两个奇异解引起的法向应力叠加后并不等于0,因此为了满足地面法向应力为0的边界条件,考虑采用修正解来平衡垂直作用于表面的应力分布,即为闭合理论解的第三部分。修正解与理论解的地面沉降计算结果对比示意图如图1所示。



注: u_x 为 x 轴位移; u_z 为 z 轴位移; A_1 为地面沉降槽体积的理论解; A_2 为地面沉降槽体积的修正解; V 为地面损失体积; R 为隧道半径; u_ε 为径向变形参数(单位 m)。

图1 修正解与理论解的地面沉降计算结果对比示意图

Fig. 1 Comparison diagram of land subsidence calculation results between modified and theoretical solutions

在短期条件下,隧道衬砌椭圆化导致的地面变形仅在长期条件下才会出现。基于文献[4]提出的理论解, x 轴位移 u_x 和 z 轴位移 u_z 可以表示为:

$$u_x = -\varepsilon R^2 x \left(\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} \right) - \frac{2\varepsilon R^2 x}{m} \left(\frac{1}{r_2^2} + \frac{2mzz_2}{r_2^4} \right) \quad (1)$$

$$u_z = -\varepsilon R^2 \left(\frac{z_1}{r_1^2} + \frac{z_2}{r_2^2} \right) + \frac{2\varepsilon R^2}{m} \left(\frac{(m+1)z_2}{r_2^2} + \frac{mz(x^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right) \quad (2)$$

$$z_1 = -z - H \quad (3)$$

$$z_2 = -z + H \quad (4)$$

$$r_1 = x^2 + z_1^2 \quad (5)$$

$$r_2 = x^2 + z_2^2 \quad (6)$$

$$m = 1/(1 - 2\nu) \quad (7)$$

$$\varepsilon = u_\varepsilon/R \quad (8)$$

式中:

ε ——隧道均匀径向位移相关的地面损失参数;

R, H ——隧道半径和埋深,单位 mm;

r_1, r_2 ——埋深到奇异点的径向距离,单位 m;

z_1, z_2 ——埋深到奇异点的垂直距离,单位 m;

m ——与泊松比相关的弹性常数;

ν ——土体泊松比。

对于隧道均匀径向收缩引起的地面变形,将 $z = 0$ 代入式(2),可获得地面 $z = 0$ 处的垂直位移 u_0 , 则有:

$$u_0 = -2\varepsilon R^2 \frac{(m+1)H}{m(x^2 + H^2)} \quad (9)$$

但在实际工程应用中,由于受多种地质因素的影响,隧道径向收缩引起的地面沉降值往往与理论解得到的沉降值有所偏差。为了使式(9)满足实际情况,本文提出一种地面沉降理论解的二维修正形式 $u_{0,mo}$, 可以表示为:

$$u_{0,mo} = -2\lambda_1 \varepsilon R^2 \frac{(m+1)H}{m[(\lambda_2 x)^2 + H^2]} \quad (10)$$

式中:

λ_1 ——地面最大沉降值修正参数;

λ_2 ——沉降槽宽度修正参数。

假设土体是不可压缩的,则土体泊松比 $\nu = 0.5$ 且 $(m+1)/m = 1$, 此时的地面损失体积等于地面沉降槽体积,即 $V = 2\pi R u_\varepsilon$ 。为了进一步优化修正解,同时对式(9)和式(10)积分,可以获得:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} -2\varepsilon R^2 \frac{H}{x^2 + H^2} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} -2\lambda_1 \varepsilon R^2 \cdot \frac{H}{(\lambda_2 x)^2 + H^2} dx \quad (11)$$

简化后可得:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda \quad (12)$$

式中:

λ ——与土壤特性相关的修正参数, λ 的取值情况将根据试验结果确定。

因此,式(10)可以简化为:

$$u_{0,mo} = -2\lambda \varepsilon R^2 \frac{H}{(\lambda x)^2 + H^2} \quad (13)$$

2 试验方案

为了模拟隧道径向收缩引起的地面沉降,基于三大相似定理,按照 1:100 的几何相似比对重庆地区某在建隧道进行模型试验。试验模型装置及流程示意图如图 2 所示。试验模型箱尺寸为 750 mm(长)×650 mm(宽)×650 mm(高),设置隧道轴线与模型箱底部的距离为 200 mm。采用三维扫描装置,通过非接触式测量技术,采集地面及地面建筑物沉降的位移数据。相较于传统土压力盒测量装置,该数据采集方法可以有效避免测量设备因接触土体而产生的误差。试验中采用的三维扫描装置的扫描精度为 0.01 mm。

考虑城市建筑物对地面沉降的影响,在隧道模型试验箱上方搭建 100 mm(长)×80 mm(宽)×50 mm(高)的小型砖石建筑物,该结构由边长为 10 mm 的立方体实心积木组成,单个积木的质量为 0.12 g,在试验操作过程中,为了尽量避免土体结构对试验结果的干扰作用,选用干燥的中粗砂作为试验土。由于隧道模型材料的内外管径向尺寸不同,周围土体可能会发生收缩,因此试验中还设计了两个不同直径的同心管相互嵌套。隧道周围土体径向收缩下的开挖过程示意图如图 3 所示。指定外侧套管缓慢抽离的方向为隧道开挖方向,外侧套管(径向收缩前)和内侧套管(径向收缩后)的直径分别为 110 mm 和 100 mm,则 $u_e = 5$ mm。

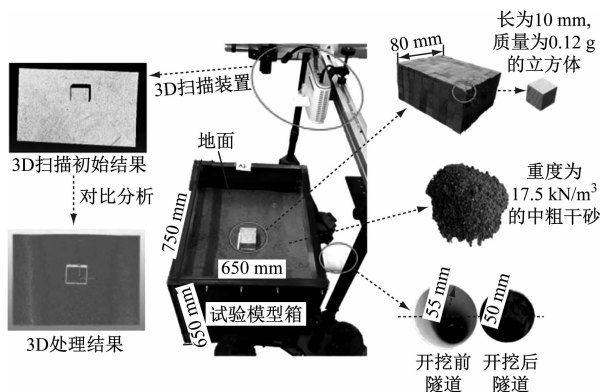
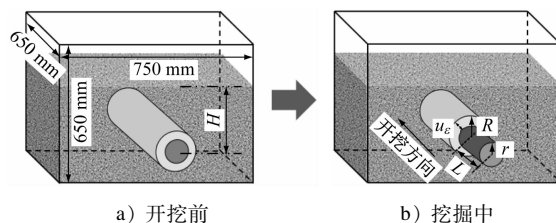


图 2 试验模型装置及流程示意图

Fig. 2 Diagram of test model device and procedure

为了更好地预测由隧道开挖引起的地面沉降值,研究不同隧道埋深($H = 124$ mm、193 mm、262 mm、331 mm)对地面沉降的影响规律,每种埋深工况均进行 6 次重复试验。所有试验数据均通过三维扫描装置进行采集,根据拉依达准则(3σ 准则)剔



a) 开挖前

b) 挖掘中

注: L 为隧道开挖长度; r 为开挖后的隧道半径。

图 3 隧道周围土体径向收缩下的开挖过程示意图

Fig. 3 Diagram of excavation process under tunnel surrounding soil mass radial contraction condition

除异常数据,并通过分析开挖前后的三维扫描结果差异获得位移等值线图。

3 地面沉降值预测

3.1 三维扫描结果

不同埋深情况下,隧道轴线处的地面沉降三维扫描结果如图 4 所示。由图 4 可知:随着隧道埋深的增加,地面沉降总体呈下降趋势,沉降槽宽度逐渐增大,隧道轴线上的最大沉降逐渐减小;对于浅埋隧道而言,隧道埋深较浅时对应的地面沉降槽更窄更尖锐,隧道埋深较深时所对应的地面沉降槽更宽更平缓,这与已有文献研究结果一致^[7]。

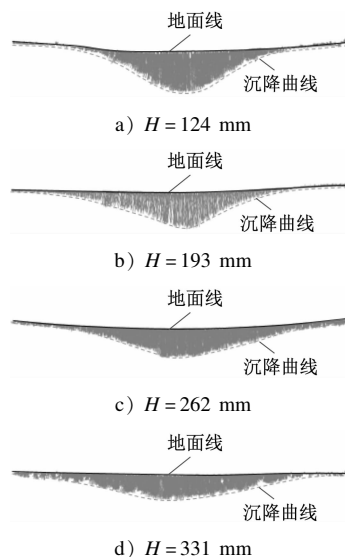


图 4 不同埋深情况下隧道轴线处的地面沉降三维扫描结果

Fig. 4 Three-dimensional scanning results of land subsidence at the tunnel axis under different burial depth conditions

3.2 确定修正系数

为了优化理论解与试验值的吻合程度,在理论解的基础上增加了修正系数 λ ,可以表示为:

$$\lambda = \frac{u_{0,mo,max}}{u_{0,max}} \quad (14)$$

式中:

$u_{0,mo,max}$ ——地面沉降修正解的最大值;

$u_{0,max}$ ——地面沉降理论解的最大值。

考虑隧道半径与埋深的相关性,建立隧道半径与埋深比(R/H)的关系项,将其与修正系数进行拟合,所获得的关系曲线如图5所示。在隧道半径不变的情况下, λ 和埋深比之间的关系呈负指数变化。拟合方程可以表示为:

$$\lambda = 0.514 + 3.356e^{-2.466\frac{R}{H}} \quad (15)$$

由此可以将式(13)改写为:

$$u_{0,mo} = \frac{-2(0.514 + 3.356e^{-2.466\frac{R}{H}})u_e RH}{[(0.514 + 3.356e^{-2.466\frac{R}{H}})x]^2 + H^2} \quad (16)$$

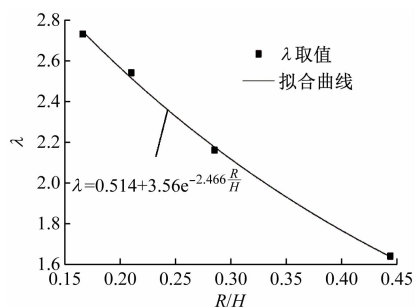


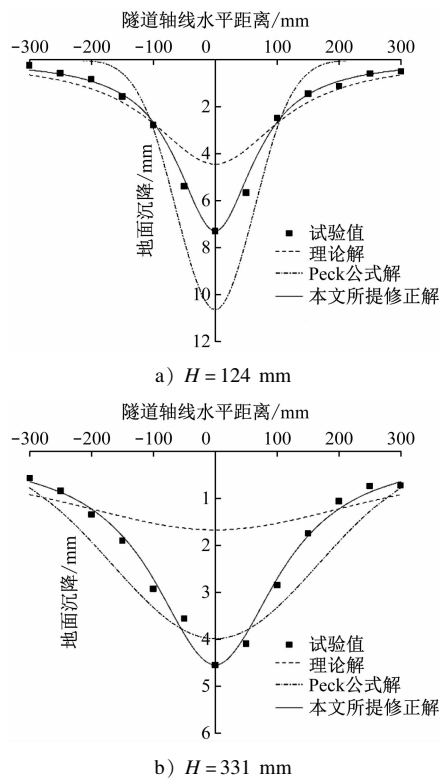
图5 λ 与 R/H 的关系曲线

Fig. 5 Relation curve of λ and R/H

3.3 修正模型对比分析

为了验证所提修正模型的适用性,对修正模型进行曲线拟合,并将其与试验值、理论解及 Peck 公式曲线进行对比。两种埋深条件下,隧道轴线处试验值、理论解、Peck 公式解与修正解的地面沉降值对比如图6所示。当 $H = 124 \text{ mm}$ 时,由 Peck 公式获得的沉降曲线比试验值沉降曲线窄;当 $H = 331 \text{ mm}$ 时,由 Peck 公式获得的沉降曲线比试验值沉降曲线宽,两者的变化规律存在不确定性。对于理论解沉降曲线而言,两种埋深条件下的拟合曲线较其他拟合曲线更平坦,即实际情况下的隧道均匀径向收缩对地面沉降的影响范围大于由理论解得到的地面沉降影响范围,这可能与理论解中土体性质的弹性假设有关。通过引入修正系数,本文所提修正模型有效改善了理论解中的缺点,其沉降曲线与试验值沉降曲线基本吻合,且比 Peck 公式沉降曲线的变化趋势呈现更稳定的状态,能够较好地预测出两种埋深条件下浅埋隧道地面沉降的变化趋势。综上所述,所提修正解比原理论解及 Peck 公式解更符合

合试验结果。



注:隧道轴线水平距离以隧道开挖方向为正。

图6 两种埋深条件下隧道轴线处试验值、理论解、Peck 公式解与修正解的地面沉降值对比

Fig. 6 Comparison of land subsidence values by experiment, theoretical, Peck's formula and modified solutions at tunnel axis under two buried depth conditions

4 结语

1) 在隧道径向收缩情况下,隧道中心的沉降大于隧道两侧的沉降。随着隧道埋深的增加,地面沉降最大值逐渐减小,地面沉降形状也趋向平缓。

2) 相较于原理论解及 Peck 公式解,修正后的沉降预测模型与试验值所得的曲线较为接近,且修正模型在不同隧道埋深条件下具有更好的适用性。

3) 在浅埋隧道施工过程中,当隧道埋深增加时,建议扩大控制保护区的范围。

参考文献

- [1] LIAO S M, LIU J H, WANG R L, et al. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 454.
- [2] 段宝福, 宋立坤, 周鑫明, 等. 浅埋暗挖地铁隧道地表沉降研究现状[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(4): 25.

DUAN Baofu, SONG Likun, ZHOU Xinming, et al. On research

- status of surface settlement of a bored subway tunnel with a shallow overburden [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(4): 25.
- [3] 师刚, 袁浩旭, 张澄宏, 等. 基于 Peck 公式的双线隧道地面沉降模型及参数研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(1): 161.
- SHI Gang, YUAN Haoxu, ZHANG Chengxuan, et al. Study on ground settlement model and parameters of twin-line tunnel based on Peck's formula[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(1): 161.
- [4] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Géotechnique, 1996, 46(4): 753.
- [5] 马险峰, 王俊淞, 李削云, 等. 盾构隧道引起地层损失和地表沉降的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 942.
- MA Xianfeng, WANG Junsong, LI Xiaoyun, et al. Centrifuge modeling of ground loss and settlement caused by shield tunnelling in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 942.
- [6] BURD H J, HOULSBY G T, AUGARDE C E, et al. Modelling tunnelling-induced settlement of masonry buildings[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2000, 143(1): 17.
- [7] 朱语聪, 曾彬, 叶四桥, 等. 双圆盾构隧道开挖引起邻近桩土位移试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(5): 1504.
- ZHU Yucong, ZENG Bin, YE Siqiao, et al. Experimental research on double-O-tube shield tunneling-induced adjacent pile-soil displacement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(5): 1504.
- 收稿日期:2022-01-13 修回日期:2022-05-24 出版日期:2024-07-10
Received:2022-01-13 Revised:2022-05-24 Published:2024-07-10
· 通信作者:曹元均,高级工程师,374184892@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 33 页)

- [8] GAO X, SHI M, SONG X, et al. Recurrent neural networks for real-time prediction of TBM operating parameters[J]. Automation in Construction, 2019, 98: 225.
- [9] 王飞, 龚国芳, 段理文, 等. 基于 XGBoost 的隧道掘进机操作参数智能决策系统设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(4): 633.
- WANG Fei, GONG Guofang, DUAN Liwen, et al. XGBoost based intelligent determination system design of tunnel boring machine operation parameters[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(4): 633.
- 收稿日期:2022-02-22 修回日期:2022-03-22 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-22 Revised:2022-03-22 Published:2024-07-10
· 第一作者:王伯芝,正高级工程师,740825286@qq.com
通信作者:丁爽,工程师,dingshuang525@hotmail.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 37 页)

- LIN Fengtao, WANG Ruitao, YANG Yang, et al. Analysis on the influence of flat spot on wheel-rail impact[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(3): 140.
- [4] 凌亮, 曹亚博, 肖新标, 等. 车轮擦伤对高速轮轨接触行为的影响[J]. 铁道学报, 2015, 37(7): 32.
- LING Liang, CAO Yabo, XIAO Xinbiao, et al. Effect of wheel flats on the high-speed wheel-rail contact behavior[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7): 32.
- [5] 刘国云, 曾京, 郭平波, 等. 车轮扁疤所引起的车辆系统振动特性分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 182.
- LIU Guoyun, ZENG Jing, WU Pingbo, et al. Vibration characteristic analysis of vehicle systems due to wheel flat[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 182.
- [6] 杨光, 任尊松, 袁雨青. 车轮扁疤损伤对高速列车轮对动力学性能影响[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(3): 103.
- YANG Guang, REN Zunsong, YUAN Yuqing. Influence of wheel flat on dynamic performance of high-speed train wheelset[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(3): 103.
- [7] 邹航宇, 张卫华, 王志伟. 车轮扁疤对高速列车齿轮箱动态特性影响分析[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(3): 29.
- ZOU Hangyu, ZHANG Weihua, WANG Zhiwei. Influence analysis of wheel flat on dynamic characteristics of high-speed train gearbox[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(3): 29.
- 收稿日期:2021-07-27 修回日期:2021-09-01 出版日期:2024-07-10
Received:2021-07-27 Revised:2021-09-01 Published:2024-07-10
· 通信作者:陈光圆,讲师,1513879549@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license