

地铁隧道暗挖施工对上部建筑的影响分析

宗志栓

中铁十五局集团有限公司, 上海

收稿日期: 2021年11月27日; 录用日期: 2021年12月11日; 发布日期: 2021年12月28日

摘要

随着城市经济的快速发展, 城市易出现交通拥堵, 而城市地铁能有效地缓解城市拥堵问题。城市地铁属于地下建筑结构, 无法避免下穿某些高层建筑, 地铁隧道施工会影响上部建筑的安全性能。本文结合实际工程案例, 采用MIDAS软件, 分析地铁隧道施工对上部结构的影响。分析结果可为类似工程案例提供参考。

关键词

地铁隧道, 施工, 沉降, 上部建筑, 安全性能

Study on the Influence of the Underground Excavation Construction of the Subway Tunnel on the Superstructure

Zhishuan Zong

China Railway 15th Bureau Group Corporation Limited, Shanghai

Received: Nov. 27th, 2021; accepted: Dec. 11th, 2021; published: Dec. 28th, 2021

Abstract

With the rapid development of urban economy, cities are prone to traffic congestion, and urban subway can effectively alleviate the problem of urban congestion. The urban subway belongs to the underground structure, it will not be able to avoid wearing some high-rise buildings, and the subway tunnel construction will affect the safety performance of the upper building. In this paper, combined with the actual engineering case, the MIDAS software is used to analyze the subway excavation and the influence of tunnel construction on the upper structure. The results of this paper can provide reference for similar engineering cases.

Keywords

Subway Tunnel, Construction, Settlement, Upper Structure, Safety Performance

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市地铁隧道无法避免下穿既有建筑物，而隧道开挖会影响上部建筑物的安全性，严重时会造成建筑物倒塌或者减少其使用寿命。因而当地铁隧道下穿建筑物时，需要分析对上部建筑的影响。朱逢斌等[1]通过建立三维弹塑性有限元模型，研究地铁隧道的开挖对上部桩基和地表沉降的影响。何历超等[2]采用有限元分析方法进行数字模拟仿真，对两种不同工况的地表沉降进行了研究。程邦富等[3]对地铁暗挖施工对既有建筑的影响进行研究，采用有限元软件对其进行仿真研究。肖博等[4]采用 FLAC3D 建立相关的模型对隧道开挖后地表建筑物的变形和受力进行了相应的分析。王丽等[5]采用 ABAQUS 建立三维有限元模型模拟隧道下穿位置对建筑物框架结构的影响。田明杰[6]采用强度折减法对隧道以及隧道下穿既有城市道路近接体系的稳定性进行分析。但以上分析大多采用荷载结构法、等效荷载法，未采用地层结构法进行分析研究，地层结构法可以充分考虑地下结构与周围地层的相互作用，根据具体的施工过程可以充分模拟地下结构以及周围地层在每一个施工工况下的结构内力和地层的变形。本文基于地层结构法，采用 MIDAS 有限元软件分析，结合 Peck 公式预测地表沉降量，研究重庆地铁 18 号线某区间隧道施工对上部建筑的影响。本文研究结果可为类似工程案例提供参考。

2. 工程概况

富华路站~歇台子站区间为重庆 18 号线工程由北向南的第 1 个正线区间，区间隧道下穿重庆总部城 A 区 10 号建筑物，隧道左右线均下穿该建筑物，位置关系如图 1 所示。隧道开挖宽度为 7.02 m，开挖高度为 6.78 m，双线净距为 8.14 m。隧道下穿的建筑物为钢筋混凝土框架结构，地上 5 层，地下 1 层，层高 3 m，竖向距隧道拱顶约 94.7 m。

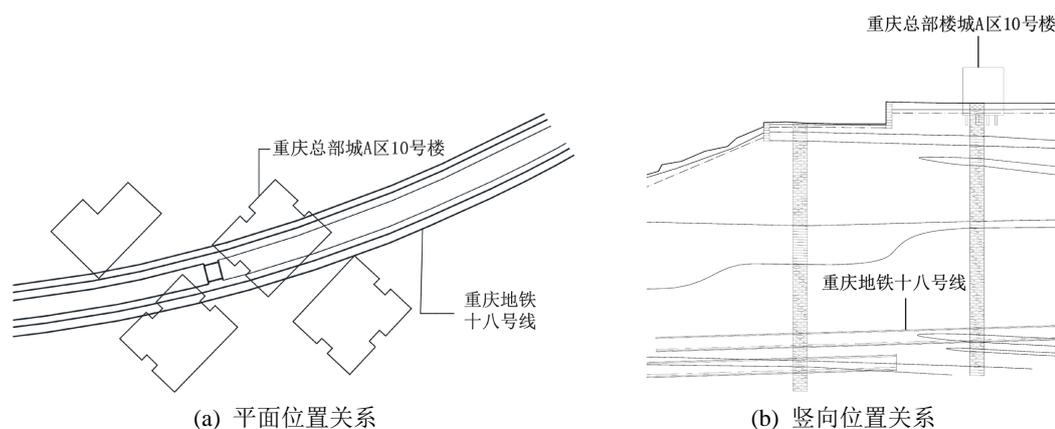


Figure 1. Location relationship between tunnel and building

图 1. 隧道与建筑位置关系

隧道采用复合式衬砌，其中初期支护为 C25 喷射混凝土层，厚度为 220 mm，预留变形量 50 mm，内设锚杆长度 $L = 2.5 \text{ m} @ 1.2 \times 1.2 \text{ m}$ 梅花形布置，钢架采用 I14 工字钢，间距为 1.2 m，以及钢筋网 $\phi 8 @ 200 \times 200 \text{ mm}$ ；二次衬砌采用钢筋混凝土结构，混凝土为 C40，厚度为 350 mm。隧道采用全断面开挖，每循环开挖进尺不大于 2 m，隧道断面形状及开挖步骤如图 2 所示。

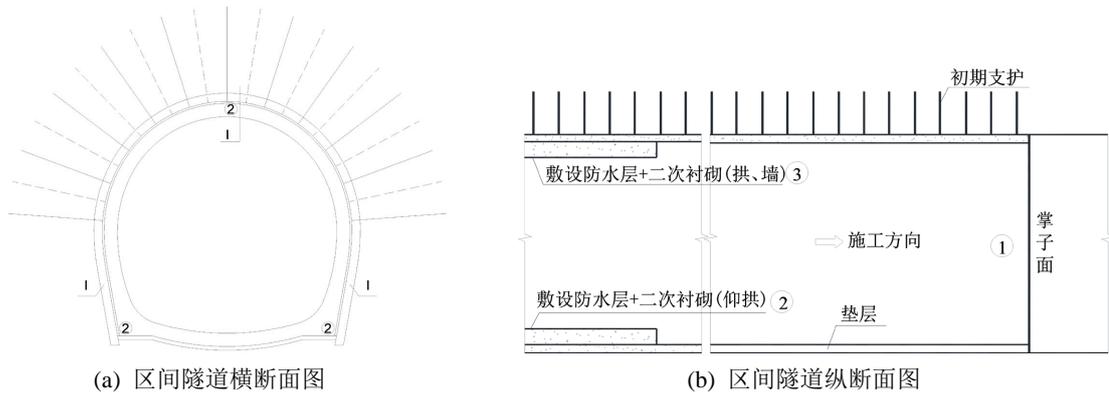


Figure 2. Tunnel excavation steps
图 2. 开挖步骤

3. 有限元计算分析

为研究重庆地铁 18 号线隧道开挖对上部建筑的影响，本文采用 MIDAS GTS NX 有限元分析软件模拟分析隧道开挖时隧道拱顶沉降量、地表面沉降值以及建筑物整体倾斜度。

3.1. 模型参数

模型在隧道截面的横向方向，左右各取 3 倍的开挖宽度；在隧道截面的竖向方向，隧道底部往下取 3 倍的开挖高度；隧道顶部取至地表。土层的材料采用德鲁克-普拉格本构模型，以考虑围岩的非线性变形，岩土体力学参数见表 1。初期支护中喷射的混凝土层采用梁单元，锚杆采用植入式桁架单元；隧道围护结构材料力学参数见表 2 所示。计算模型如图 3 所示。

Table 1. Physical and mechanical parameters
表 1. 岩土物理力学参数

岩土类别	重度 kN/m^3	内摩擦角 $\phi (^{\circ})$	内聚力 $C (\text{kPa})$	变形模量 (MPa)	弹性模量 (MPa)	泊松比 μ
砂岩	24.8	42.6	2277	5674	9055	0.11
砂质泥岩	25.6	32.4	552	1420	2320	0.36

Table 2. Physical and mechanical parameters of tunnel structure
表 2. 隧道结构材料物理力学参数

材料类型	重度 (kN/m^3)	弹性模量 (MPa)	泊松比 μ	材料强度等级
喷射混凝土	25	2.3×10^4	0.2	C25
锚杆	78.5	2.0×10^5	0.3	HPB400

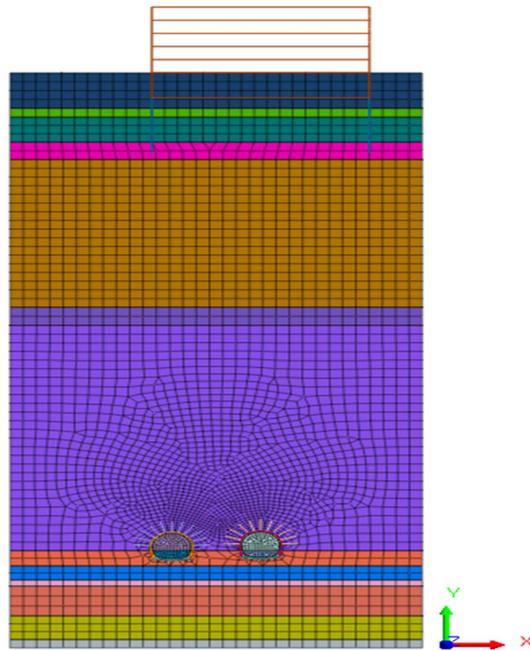


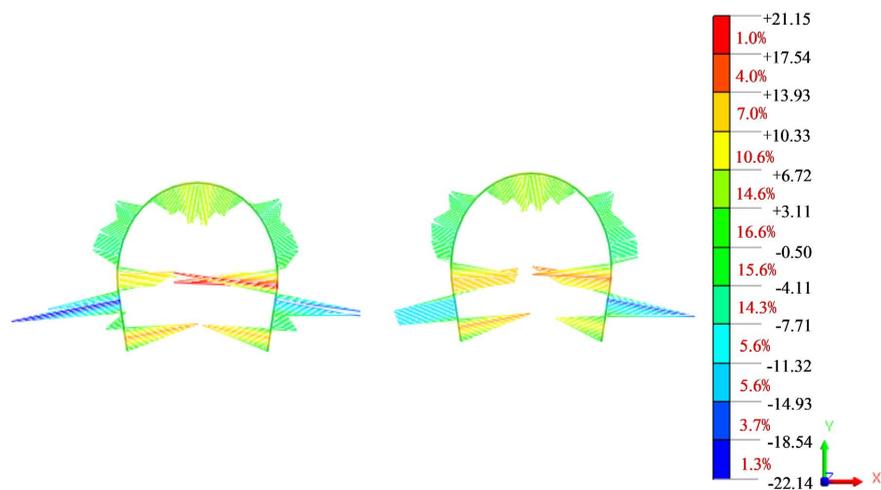
Figure 3. Computational model

图 3. 计算模型

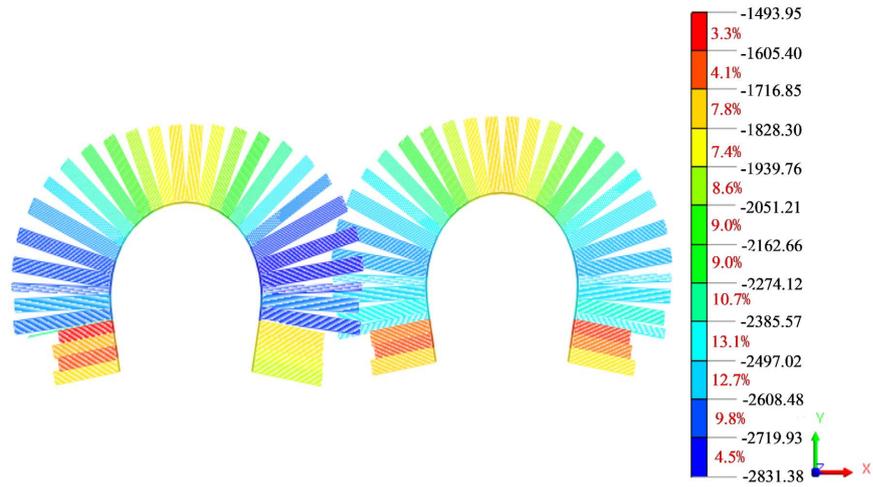
3.2. 结果分析

首先计算原始地应力，岩土体的开挖是在前一计算步骤所得地应力分布的基础上进行的，根据结构整体刚度的改变，按全断面法开挖地层并逐步释放荷载，最终求解开挖后的应力场。其中初期支护根据平面应变理论，采用地层结构法进行分析，通过设置释放系数控制初期支护的受力，开挖过程中应力释放 40%，初期支护承担 60%的荷载。

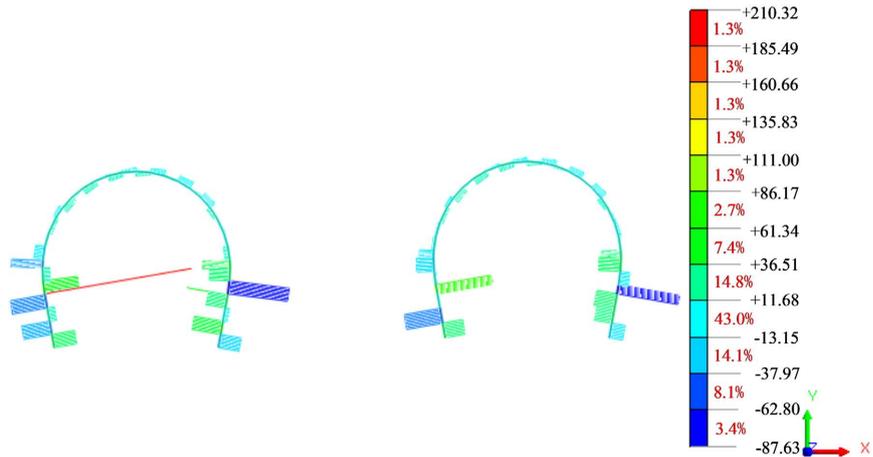
隧道开挖并支护完成后，初期支护内力如图 4 所示，锚杆最大轴力为 30.7 kN，从锚杆轴力图可以看出，锚杆轴力均在其抗力强度范围内，区间隧道开挖支护后初支的最大弯矩值 21.1 kN·m，最大轴力值为 1494.0 kN，最大剪力值为 210.3 kN，安全系数为 2.77 (抗压控制)，计算结果表明初期支护设计参数满足受力要求。



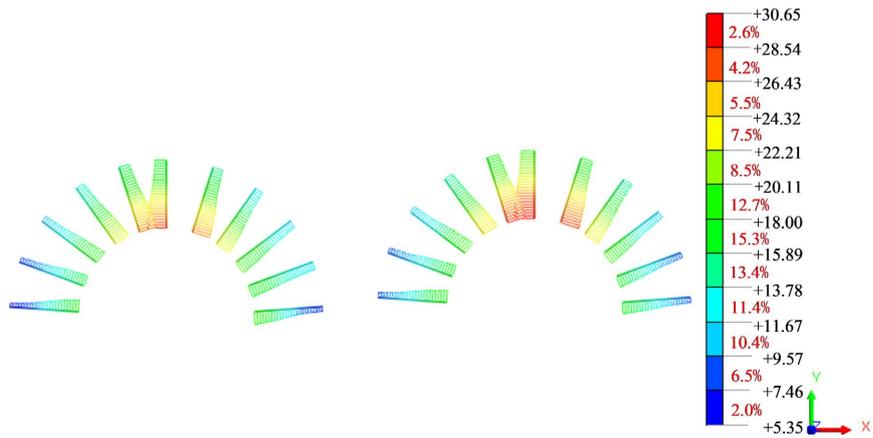
(a) 初支弯矩图(单位: kN·m)



(b) 初支轴力图(单位: kN)



(c) 初支剪力图(单位: kN)



(d) 锚杆轴力图(单位: kN)

Figure 4. Internal force diagram of primary support

图 4. 初期支护内力图

由图 5 可知, 隧道开挖完成后, 区间隧道支护后最大的竖向位移值为: 左线拱顶为-5.51 mm, 底板隆起值为+3.10 mm; 右线拱顶为-5.59 mm, 底板隆起值为+2.93 mm, 隧道拱顶及地表面沉降满足要求。

隧道支护后最大的水平位移值为：左线左侧向洞内变形 1.08 mm，右侧向洞内变形-1.07 mm；右线左侧向洞内变形 1.24 mm，右侧向洞内变形-1.18 mm，满足收敛要求，开挖支护后围岩稳定性较好。

由图 5 可知，隧道下穿建筑物整体最大沉降为 1.85 mm，相邻基础最大差异沉降为： $1.85 - 1.85 = 0$ mm < 8 mm，满足变形控制标准。建筑整体倾斜为： $(1.85 - 1.85)/33068.4$ (建筑物横向宽度) = 0 < 0.002，满足变形控制标准。

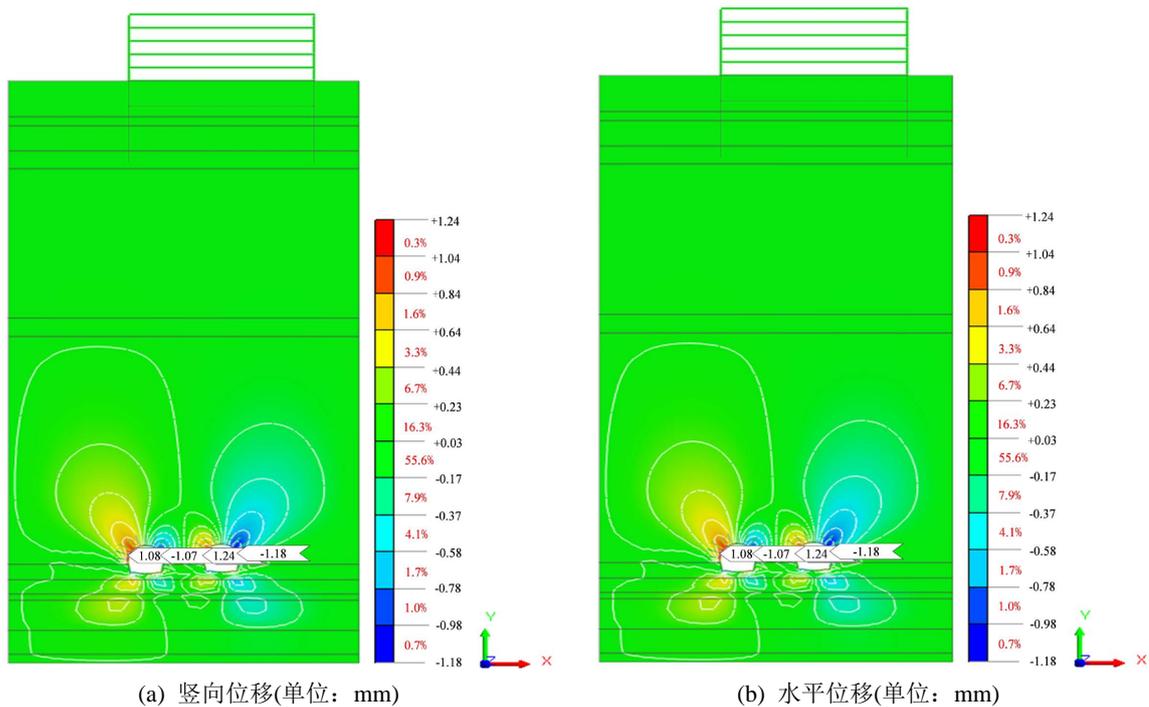


Figure 5. Displacement nephogram
图 5. 位移云图

4. Peck 公式沉降预测计算

在有限元计算的基础上，采用 Peck 公式进行沉降预测计算。Peck 在分析大量地表沉降观测数据的基础上提出地表沉降槽符合正态分布曲线，地表沉降分布曲线计算公式见式(1) [7]：

$$y = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中， y 为距离隧道中心线为 x 处的地表沉降值。 S_{\max} 为隧道中心线处地表最大沉降值，计算公式见式(2) [8]； i 为沉降槽宽度系数，计算公式见式(3) [9]。

$$S_{\max} = \frac{0.313V_1D^2}{i} \quad (2)$$

式中， V_1 为地层损失率，取值主要与工程地质情况、水文地质情况、隧道施工方法、施工技术水平以及工程管理经验等因素相关。 D 为隧道直径，对于类圆形隧道(如椭圆隧道、公路隧道、断面常用的量同心圆或三同心圆隧道等)，可采用等效大圆模型[10]。

$$i = KZ_0 \quad (3)$$

式中， Z_0 为隧道埋深， K 为沉降槽宽度参数，主要取决于岩土体特性。

对于平行修建的双线隧道，利用叠加原理，即可得到双线隧道 Peck 公式[10]。该工程隧道埋深 Z_0 取 94.7 m，对于砂质泥岩地层，沉降槽宽度参数 K 可取 0.5~0.7，地层损失率取 V_l 取 0.8~1.8 [10]，隧道直径按 D 取 7.02 m 的圆形隧道计算。

由式(1)~(3)计算可得隧道左或右线正上方的地表沉降量在 0.37~1.16 mm，隧道左右线中心点正上方的地表沉降量在 0.37~1.17 mm，建筑物角部地表沉降量在 0.36~1.07 mm 之间，如图 6 所示。Peck 公式预测的地表沉降量比 MIDAS GTS NX 有限元计算的值小，最大沉降量相对误差约为-37%，两者在定性上较为吻合。由此可知，邻基础最大差异沉降约为 0.1 mm < 8 mm，满足变形控制标准。建筑整体倾斜为：0.1/24140 mm (隧道中心线至建筑物角部距离) = 0 < 0.002，满足变形控制标准。

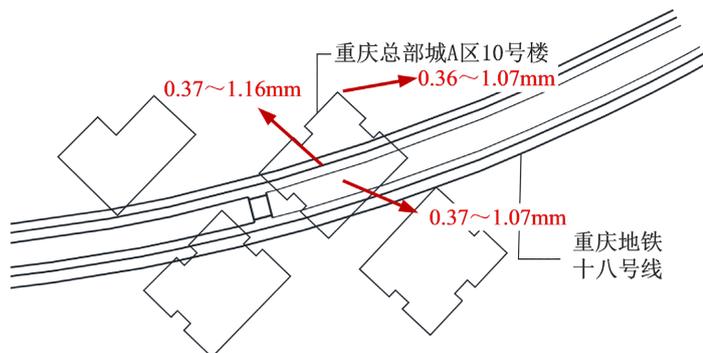


Figure 6. Distribution of building settlement
图 6. 地表建筑物沉降分布曲线

5. 结论

本文以重庆市地铁 18 号线某暗挖段隧道为研究背景，基于地层结构法有限元分析和 Peck 公式沉降预测分析了隧道施工对上部建筑结构的影响，得到了以下结论：

- 1) 隧道拱顶最大沉降为 5.59 mm，水平位移最大为 1.24 mm，且初期支护结构设计参数满足受力要求；
- 2) 有限元模拟分析表明，重庆总部城 A 区 10 号楼建筑物整体沉降最大值 1.85 mm，差异沉降最大值为 0，整体建筑没有发生倾斜。
- 3) Peck 公式预测地表最大沉降量约 1.17 mm，与有限元模拟分析结果在定性上较为一致，建筑物地表沉降差最大值为 0.01 mm，建筑物自身可以抵抗隧道开挖的影响。

参考文献

- [1] 程邦富, 张有桔, 汪光裕. 地铁隧道暗挖施工对既有建筑桩基的影响分析[J]. 工程与建设, 2020, 34(1): 142-144.
- [2] 肖博, 王建华, 朱仁景. 山地城市隧道开挖对既有建筑物的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 365-372.
- [3] 何历超, 王梦恕, 李宇杰. 地铁隧道暗挖施工对地表密集建筑物的影响研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 311-315.
- [4] 王丽, 郑刚. 地铁隧道近距离穿越对上部框架结构的影响[J]. 大连交通大学学报, 2012, 33(5): 72-77.
- [5] 朱逢斌, 杨平, 余才高. 城市地铁隧道对结构物上部桩基的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33(6): 108-112.
- [6] 田明杰. 新建隧道下穿既有城市道路的影响分区及对策研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [7] Peck, R.B. (1969) Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. *Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, State of the Art Report, Mexico City.

-
- [8] 韩焯, 李宁, Standing, J.R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 23-28.
- [9] O'Reilly, M.P. and New, B.M. (1982) Settlements above Tunnels in the United Kingdom—Their Magnitude and Prediction. *Tunnelling 82, Third International Symposium*, Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [10] 邓明贵, 胡海涛, 王炯超. 隧道施工引起地表沉降 Peck 公式参数反分析程序与云数据库[J]. 科技通报, 2020, 36(11): 63-68.