

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.015

明挖地铁车站对临近桩基的影响分析

周勇¹, 严登平¹, 任永忠²

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州工业学院 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对明挖地铁车站对临近桩基的影响问题, 以兰州地铁1号线省政府车站为工程背景对其进行了较为系统地研究和分析。采用岩土工程有限元软件 PLAXIS 3D 建立了地铁深基坑以及临近建筑物的三维有限元模型, 土体采用 HS-small 小应变本构模型, 既有建筑物桩基采用 Embedded 桩单元, 随基坑开挖过程对既有建筑物桩基的变形及受力进行了分析。分析结果表明: 临近建筑物一侧基坑的水平位移量略比另一侧水平位移量大; 既有建筑物筏板发生了倾斜变形, 针对本工程其倾斜率为 0.275%, 满足规范的设计要求; 随着基坑的开挖, 基坑的支撑体系对桩基的水平变形影响较大, 同时桩基的轴力有所增大, 但变化量较小。

关键词: 地铁车站; 深基坑; 桩基; 沉降量; 数值分析

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)03-0081-05

Influence of Open-cut Subway Station Structure on Adjacent Pile Foundation

ZHOU Yong¹, YAN Dengping¹, REN Yongzhong²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. College of Civil Engineering, Lanzhou Institute Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Focusing on the influence of the open subway station on the adjacent pile foundation, this paper makes a systematic study and analysis on the Lanzhou subway line 1 provincial government station. The three-dimensional finite element model of deep foundation pit and adjacent building of the subway is established by the geotechnical finite element software Plaxis 3D. HS small strain constitutive model is adopted for the soil, and the embedded pile element is used for the existing building pile. Pit excavation process of existing building pile foundation deformation and stress were also analyzed. The results show that the horizontal displacement of the foundation pit near the building is slightly larger than the horizontal displacement of the other side. The tilt of the existing building raft has been inclined. For this project, the inclination of the foundation is 0.275% which could meet the code design requirements. With the excavation of foundation pit, the supporting system of foundation pit has a great influence on the deformation of pile foundation, meanwhile, the axial force of pile foundation increases but the variation is small.

Keywords: subway station; deep excavation; pile foundation; settlement; numerical analysis

随着城市建设逐步推进导致城市空间向立体化发展。截至 2016 年年底, 我国将新建轨道交通线路近 228 条, 建成和在建的城市轨道交通总里程将接近 5 636.5 km^[1]。由于城市建筑密度大, 地铁深基坑工程的施工对周边环境影响较大, 许多学者针对此问题作了大量的研究工作。逢铁铮等^[2]以厦门梧村隧道明挖段深基坑施工为例, 对施工期间的支护

结构自身安全以及对周边环境的影响相应开展安全监测研究工作, 研究表明地质条件是引起变形监测成果分布差异的主要因素。李淑等^[3]对北京地铁 30 个明挖车站的现场实测数据进行统计, 分析表明北京地铁车站深基坑开挖引起的地表变形表现为“凹槽形”。梅源等^[4]基于西安地铁 10 个明挖车站的实测数据, 研究了湿陷性黄土在西安地铁车站深

收稿日期: 2017-12-19

修稿日期: 2018-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51568042); 教育部长江学者创新团队支持计划项目(51IRT_17R51)

作者简介: 周勇(1978—), 男, 湖北宣恩人, 博士, 教授, 博导, 主要从事深基坑、高边坡支挡结构的研究与教学工作。

E-mail: gsutzhouy@163.com

基坑开挖过程中引起地面沉降和排桩侧向变形的取值范围。吴锋波等^[5]根据基坑开挖深度、地层条件的不同,研究了北京地区砂卵石及黏性土地质条件下 80 多个深基坑工程开挖引起地表沉降的规律。王卫东等^[6]分析研究了上海软土地区 35 个基坑工程开挖引起地面变形的规律。国外许多学者们研究了深基坑降水、支护桩等因素对周边环境的影响^[7-9]。赵浩^[10]基于现场监测到的原始资料,采用数值分析的手段研究了深基坑时空效应下的变形规律并对其进行了风险识别。针对大型复杂实际工程,为了保证工程的顺利进行,学者们采用数值分析的方法对其进行了研究分析,为工程后续施工提供了科学的指导依据^[11-14]。

通过以上综述分析发现,目前学者们关于明挖地铁深基坑施工过程关注点为坑边的地表沉降、支护体系受力与变形、周边建筑物的沉降等。但针对明挖地铁深基坑开挖过程中对周边建筑物桩基的影响研究较少。为此本文以兰州地铁 1 号线省政府车站为工程背景,采用岩土分析软件 PLAXIS 3D 对其进行研究分析,以期对类似工程的设计与评价有一定的借鉴意义。

1 工程概况

1.1 车站概况

兰州地铁 1 号线西起西固区石岗北侧的环行西路,东至东岗,线路全长 34 000 m,目前已全部修建,无地上线路,共计有 20 个车站。

本站位于兰州市张掖路省政府门口,车站总长 313 m,车站设计起点里程为 AK16 + 641,车站终点里程为 AK16 + 954,中心里程为 AK16 + 868,车站宽度约 21 m,为地下三层主体结构,主体结构底板埋深约 21.6 m~22.5 m。设 4 个通道出入口,施工方法采用明挖法施工,本站北距黄河右岸的距离约 500 m。图 1 为地铁车站与邻近建筑物位置关系。

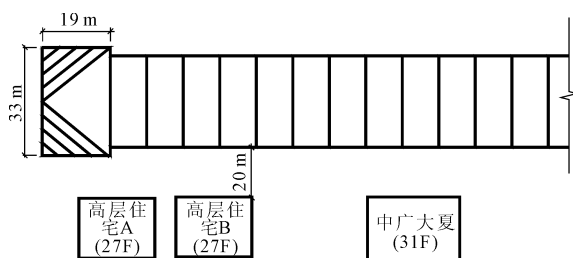


图 1 地铁车站与邻近建筑物位置关系

1.2 工程地质概况

兰州市城区位居兴隆山至七道梁山前黄土塬与

皋兰北山梁崩沟壑区之间的黄河河谷盆地内。本车站地貌单元属黄河右岸一级阶地,阶面宽度约 1.5 km~2.5 km,地面高程介于 1 520.76 m~1 522.79 m 之间,最大相对高差约 2.03 m。

地层竖向分布为第四系全新统人工填土、粉细砂、卵石土及下伏上第三系砂岩等。依据土层特性等划分为 6 个地质层。具体各土层的力学指标见表 1。

表 1 各土层的力学指标

土层名称	层厚 /m	重度 r /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比 ν	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 ϕ /($^{\circ}$)
杂填土	3.8	19.0	5.0	0.39	8.0	15.0
素填土	3.0	18.5	5.0	0.38	10.0	18.0
粉细砂	0.5	19.8	25.0	0.31	5.0	30.0
卵石土	5.6	23.0	55.0	0.16	5.0	40.0
强风化砂岩	5.9	20.6	40.0	0.23	5.0	30.0
强风化砂岩	>20.0	23.0	60.0	0.20	6.0	34.0

1.3 水文地质概况

依据岩土工程勘察可知,地下水位埋深为 -4.2 m~-5.9 m 处,由于卵石层的透水性好,是地层的主要含水层,其他土层含水率较少,地下水的来源主要为大气降水和黄河侧向补给,排泄方式为径流排泄、蒸发等,由于受季节的影响,地下水位年变化幅度为 1 m~2 m。

1.4 支护结构设计方案概况

基坑最大开挖深度为 24 m,为了保证基坑开挖的安全性,其支护结构采用咬合桩加钢管内支撑。咬合桩桩径为 1.0 m,桩间距为 1.5 m,钢管内支撑支撑位置分别为 -2 m、-8 m、-14 m、-20 m 处,水平间距为 3.0 m,钢管直径为 0.6 m,最大壁厚为 14 mm,并对其施加了预应力,其预应力值分别为 100 kN、200 kN、200 kN 和 150 kN。图 2 为车站围护结构及邻近建筑物剖面图。

2 数值建模

2.1 三维有限元模型

为分析明挖地铁车站对临近桩基的影响分析,采用岩土工程有限元软件 PLAXIS 3D 对其进行分析。有限元计算模型如图 3 所示,模型主要包括了两大类:一是土体;二是支护结构,其包括了竖向围护体系和水平支撑体系。临近的中广大厦(31F)、高层住宅 A(27F)和高层住宅 B(27F),为了模拟建筑物自重荷载,将其转化为总荷载,每层荷载取值为

12 kN/m²,即中广大厦(31F)自重荷载为 372 kN/m²,高层住宅 A(27F)和高层住宅 B(27F)自重荷载为 324 kN/m²。边界条件为:模型侧边界约束法线方向位移,模型底部边界约束法向和切线方向位移。采用 10 节点的土体单元来划分模型。在计算中将咬合桩采用等效惯性矩换算为板桩墙,其等效惯性矩换算公式为:

$$\pi D^4 / (64l) = d^3 / 12 \quad (1)$$

式中: D 为咬合桩直径; l 为咬合桩间距; d 为等效后板桩墙厚度。

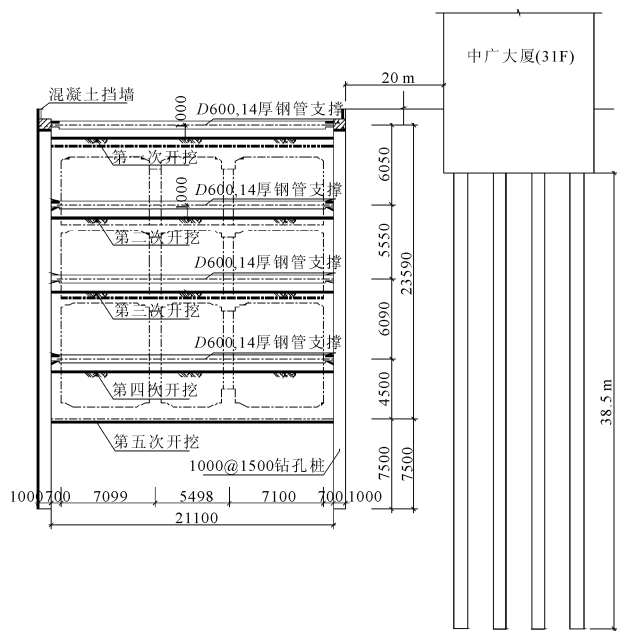


图 2 车站围护结构及邻近建筑物剖面图(单位:mm)

板桩墙采用板单元模拟。此外在软件中模拟既有桩基有两种方式,一种为采用实体单元模拟,另一种采用软件提供的 Embedded 桩单元模拟,在本次模拟桩基采用的是 Embedded 桩单元,其弹性模量为 3.25×10^7 MPa,直径为 1.0 m。板的力学参数见表 2。

表 2 板的力学参数

板类型	厚度 /m	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比 ν
等效板桩墙	0.735	8.0	3.25×10^7	0.20
中板	0.500	25.0	3.25×10^7	0.20
底板	0.500	25.0	3.25×10^7	0.20

土体本构关系的选择直接决定了计算结果的准确性。本文土体本构关系采用能考虑剪切硬化和压缩硬化特性的小应变硬化模型本构,此模型可以考虑在微小应变范围内剪切模量随应变衰减的力学行为^[15]。计算参数见表 1。

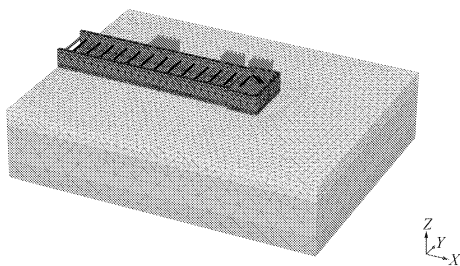


图 3 有限元计算模型(-4 m 位置处模型)

2.2 模拟工况

为了数值模拟与施工过程相近,在软件操作中采用“单元生死”功能来实现,工况操作步骤如下:Step0,计算土体的初始地应力;Step1,激活临近建筑物桩基;Step2,第一次开挖,第一道支撑;Step3,第二次开挖,第二道支撑;Step4,第三次开挖,第三道支撑;Step5,第四次开挖,第四道支撑;Step6,开挖至坑底面;Step7,建造底板;Step8,拆第四道支撑;Step9,拆第一、二、三道支撑,建造中板。

3 计算结果分析

3.1 整体水平位移场

图 4 为明挖地铁深基坑在经过开挖、施加预应力、建造底板、拆除内支撑工序后整体水平位移云图。由图 4 可以看出,最大水平位移发生在靠近既有建筑物一侧,其最大水平位移值为 66 mm,而另一侧的水平位移值为 48 mm。基坑两侧水平位移分布形式基本对称,仅是在有建筑物一侧处其水平位移值略有所增大,这说明在基坑开挖过程中通过支护结构等型式有效地限制其侧向位移的发生后,对临近建筑物的桩基影响较小。

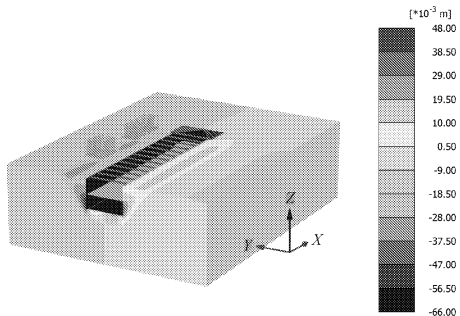


图 4 整体水平位移场云图

3.2 建筑物筏板沉降

图 5 为既有建筑物筏板沉降量云图。从图 5 可以看出,中广大厦为 31 层,其筏板的竖向沉降量最大,其值为 32 mm,而高层住宅均为 27 层,其筏板的竖向沉降量次之。从云图分布模式来看,靠近基坑开挖一侧沉降较大,即随基坑开挖过程的进行,建筑

物的筏板发生了一定的倾斜,其倾斜率为 0.275%。依据《建筑桩基技术规范》^[16](JGJ 94—2008)第 5.5.4 条款可知,框架-剪力墙结构变形允许值为 0.002 l ,针对本工程而言其变形允许值约为 200 mm,由此可见,在支护结构有效的情况下,深基坑开挖对周边建筑物桩基的影响较小。

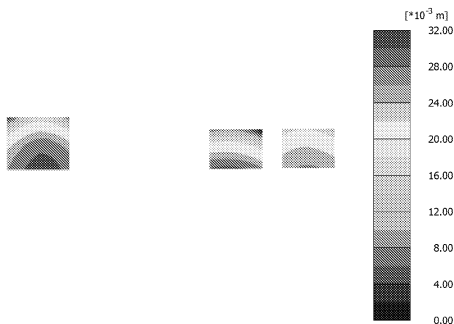


图 5 建筑物筏板沉降量云图

3.3 桩基的水平位移量

图 6 为随着施工步的进行,既有建筑物桩基的水平变形曲线。由图可知,随着施工步的进行,既有建筑物桩基的水平位移量总体趋势增大,其最大水平位移量发生在桩顶略靠下处,其值为 13.78 mm,桩顶处水平位移量为 13.57 mm。然而在桩埋深为 17.5 m 位置处(基坑坑底部位处)的水平位移量最小,其原因有两个:一是因为此部位为基坑底部,超过此部位基坑未开挖;二是在基坑底部底板的设置起到了支撑作用。同时也可以看出,在基坑底面以下部位处,桩基的水平位移略有所增大,这是由于在基坑开挖部位处支撑以及预应力锚杆的设置,使得桩基产生了一定的翘曲变形。

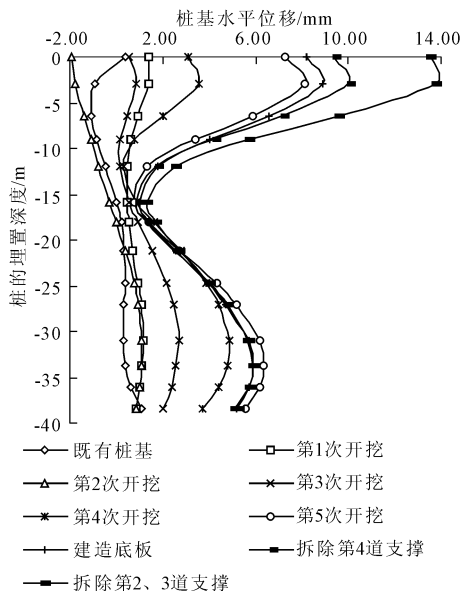


图 6 随施工步桩基的水平变形曲线

3.4 桩基的轴力

图 7 为随着施工步的进行,既有建筑物桩基的轴力变化曲线。由图 7 可以看出,随着施工步的进行,既有建筑物的桩基轴力变化量较小。其变化范围为 1 898.29 kN ~ 2 071.43 kN 范围内。但是从桩身的埋深深度来看,在基坑开挖范围内桩身轴力变化量较大,而在桩顶以及基坑底面以下部位桩身轴力变化量较小。从轴力变化的趋势来看,随着施工步的进行,其轴力略微有所增大。这是因为在基坑的开挖过程中桩基产生了水平位移,桩基由竖向受力变为倾斜受力。但是由于支护结构的限制,其水平位移量较小,故轴力的变化量也较小。

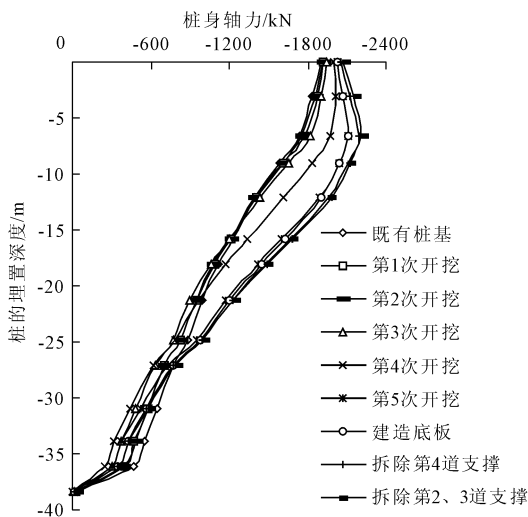


图 7 随施工步桩基的轴力变化曲线

4 结论

针对明挖地铁深基坑的开挖对临近建筑物桩基的影响,本文依托兰州地铁 1 号线省政府车站为工程背景,采用 PLAXIS 3D 岩土有限元软件分析了地铁深基坑的开挖对中广大厦以及高层住宅 A 和 B 三栋建筑物桩基的影响,其主要结论如下:

(1) 从地铁深基坑变形角度而言,临近既有建筑物一侧的水平位移量比另外一侧的水平位移量大,但其水平位移值的增加量与既有建筑物桩基的受力类型以及地铁深基坑的支护型式有很大关系。

(2) 通过分析可知,既有建筑物的筏板沉降量靠近基坑一侧其沉降量较大,在深基坑开挖过程中筏板产生了翘曲变形,但是此变形量满足《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)的设计要求。

(3) 随着深基坑开挖过程的进行,既有建筑物桩基产生了水平位移,其最大值发生在桩顶略微靠下部位,桩基的轴力略微有所增大。

参考文献:

- [1] 中国智能交通协会. 2016年中国城市轨道交通发展概况[EB/OL]. (2017-12-25) http://www.itschina.org/trc_yyhbForOne?CNEWID=1514167272.
- [2] 逢铁铮,方勇生,覃卫民. 厦门梧村隧道明挖深基坑施工监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 31(S1): 2751-2757.
- [3] 李淑,张顶立,房倩,等. 北京地铁车站深基坑地表变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 189-198.
- [4] 梅源,胡长明,王雪艳,等. 西安地区湿陷性黄土地铁车站深基坑开挖引起的地表及基坑支护桩变形特性[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 9-16.
- [5] 吴锋波,金淮,朱少坤. 北京市轨道交通基坑工程地表变形特性[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1066-1074.
- [6] 王卫东,徐中华,王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1659-1666.
- [7] Pujades E, Vázquez-Suñé E, Carrera J, et al. Dewatering of a deep excavation undertaken in a layered soil[J]. Engineering Geology, 2014, 178(15): 15-27.
- [8] Castillo L G, Carrillo J M, Álvarez M A. Complementary methods for determining the sedimentation and flushing in a reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(11): 05015004.
- [9] Liyanapathirana D S, Nishanthan R. Influence of deep excavation induced ground movements on adjacent piles[J]. Tunneling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2016, 52: 168-181.
- [10] 赵浩. 地铁车站深基坑的变形规律研究与风险识别[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011.
- [11] 蔡武林. 深基坑开挖对临近地铁车站及区间影响的数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 222-226.
- [12] 于雅琳,武科,王亚君. 深圳地铁在建明挖隧道区间基坑工程施工过程数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 158-162.
- [13] 丁毅,邢艳如. 超长、超大基坑开挖对邻近地铁结构安全影响的数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 170-175.
- [14] 裴行凯,倪小东. 深基坑开挖对临近既有地铁隧道的影响分析与对策[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(3): 45-48.
- [15] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequence[D]. Stuttgart: Institute of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart, 2007.
- [16] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

(上接第76页)

(2) 基底换填刚度的提高有利于改善上部路面的使用性能,软基处治可采用模量较高的材料进行换填或通过增加换填厚度的方法改善基底性能。

(3) 车速、车载对路堤结构层以及地基动力响应皆有影响,宜严控车速和超载,以减小两者引起路基较大附加应力导致的工后沉降增加。

参考文献:

- [1] 陈舒阳,徐林荣. 增加社会效益总成的低路堤经济效益评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 1248-1255.
- [2] Tashiro M, Noda T, Inagaki M, et al. Prediction of settlement in natural deposited clay ground with risk of large residual settlement due to embankment loading[J]. Soils and foundations, 2011, 51(1): 133-149.
- [3] 郑瑞海. 交通荷载对低矮路堤工后沉降影响研究[D]. 天津:河北工业大学, 2014: 53-64.
- [4] 王桦,卢正,姚海林,等. 交通荷载作用下低路堤软土地基硬壳层应力扩散作用研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 164-170.
- [5] 曹海莹,刘云飞,任晓军,等. 交通荷载作用下上覆硬壳层软土地基动力响应特征[J]. 河北工业大学学报, 2015, 44(3): 94-98.
- [6] 牛力强. 交通荷载作用下港区道路受力特性研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2014, 35(6): 95-99.
- [7] 张浩,杨玲,郭院成. 交通荷载作用下低填道路软土地基的动力响应分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(1): 11-15.
- [8] 陈泽南,浦少云,饶军应,等. 交通荷载作用下土体黏弹性疲劳本构模型[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(1): 68-73.
- [9] Samang L, Miura N, Sakai A. Long-term measurements of traffic load induced settlement of pavement surface in Saga airport highway, Japan[J]. Journal Teknik Sipil, 2005, 12(4): 275-286.
- [10] 郭大智,冯德成. 层状弹性体系力学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2001.
- [11] 田飞,褚进晶. 交通荷载特性及其模拟方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(4): 66-71.
- [12] 张颖,张睿,唐道伦. 交通荷载引起的高速公路低路堤永久性沉降研究[J]. 中外公路, 2013, 33(5): 14-18.
- [13] 简文彬,樊秀峰,彭军,等. 交通荷载下岩坡疲劳劣化及其服役寿命研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(1): 1-5.
- [14] 廖公云,黄晓明. ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M]. 2版. 南京:东南大学出版社, 2014: 1-320.
- [15] 沙爱民. 路基路面工程[M]. 北京:高等教育出版社, 2011: 1-298.