

文章编号:1671-1637(2014)02-0014-07

## 临近既有有线基坑支护影响因素的正交分析

沈宇鹏<sup>1,2</sup>, 王辉煌<sup>1</sup>, 荆 鹏<sup>1</sup>, 田亚护<sup>1,2</sup>, 付小雁<sup>1,3</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 轨道工程北京市重点实验室, 北京 100044; 3. 天津铁道职业技术学院, 天津 300240)

**摘要:**以既有线的轨道水平作为控制标准,对基坑尺寸、既有线形式与支护形式等影响因素进行正交优化分析,并与现场沉降结果进行对比。根据极差和方差分析方法,确定了临近既有线轨道水平的影响因素的重要性顺序,分析了是否考虑渗流影响下的轨道水平。分析结果表明:临近既有线轨道水平的影响因素的重要性顺序依次为基坑宽度、既有线路基高度、既有线股道数量(路基面宽度)、基坑深度、支撑点位置、支撑强度、桩长和基坑距坡脚距离;在支护参数中,第1道支撑点位置是主导因素;当考虑渗流后,轨道水平将大大增加。建议在施工过程中,优先考虑基坑宽度因素,且临近既有线的开挖必须在止水条件下进行,应采用优化参数的结构形式,使得轨道水平在3.0 mm范围内。

**关键词:**路基工程;临近既有线;正交分析;基坑支护;轨道水平;渗流

**中图分类号:**U213.1

**文献标志码:**A

## Orthogonal analysis of influence factors for foundation pit support approaching existing railway line

SHEN Yu-peng<sup>1,2</sup>, WANG Hui-huang<sup>1</sup>, JING Peng<sup>1</sup>, TIAN Ya-hu<sup>1,2</sup>, FU Xiao-yan<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Key Laboratory of Track Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Tianjin Railway Technical and Vocational College, Tianjin 300240, China)

**Abstract:** The track level of existing railway line was taken as control standard, the influence factors including foundation pit size, existing railway line form and support form were orthogonally analyzed, and the calculation results and field settlement situation were compared. Based on the analysis methods of range and variance, the importance order of influence factors on track level approaching existing railway line was determined, and the track levels were analyzed with and without seepage. Analysis result shows that the importance order of influence factors on track level approaching existing railway line are the width of foundation pit, the subgrade height of existing railway line, the track number of existing railway line(the width of subgrade surface), the depth of foundation pit, support point position, support strength, pile length and the distance from foundation pit to slope toe. For support parameters, the first support position is dominant influence factor. When seepage is considered, the railway track level increases greatly. It is suggested to consider the width of foundation pit preferentially in construction process. The excavation approaching existing railway line should be done under sealing condition. The structure type with optimized parameters should be used to make railway track level less than

收稿日期:2013-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目(50908012);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011JBZ009)

作者简介:沈宇鹏(1977-),男,浙江嵊州人,北京交通大学副教授,工学博士,从事路基工程研究。

3.0 mm. 5 tabs, 4 figs, 18 refs.

**Key words:** subgrade engineering; approaching existing railway line; orthogonal analysis; foundation pit support; track level; seepage

**Author resume:** SHEN Yu-peng (1977-), male, associate professor, PhD, +86-10-51683954, ypshe@bjtu.edu.cn.

## 0 引言

随着土地资源的越来越紧缺,许多新建的铁路项目常常会临近既有运营线(既有线)。在市区或市郊,为了满足车流和人流、排水、输油气的要求,会在新建铁路中设置许多低于地面的涵洞或小桥,必将涉及临近既有线的基坑开挖。同时,在松软土地区进行基坑土体开挖,也将引起既有线的沉降、变形,从而成为铁路运营潜在的危险源。而既有线的行车振动也必将在基坑侧壁中形成附加应力,将对基坑支护安全性产生不良影响。目前,在临近既有线的基坑开挖没有相应规范可循,建设单位通常需要将支护体系设计得过分保守,而这种结构属于临时设施,没有必要设置过高的安全系数;同样,既有铁路工务人员担心在土体开挖或支护体系的拆除过程中会引起线路的不平顺,要求支护结构(如拉森钢板桩)作为永久废弃物置于既有线一侧,也造成了工程材料的极大浪费。

雷震宇等采用弹塑性动力有限元法分析了行车动荷载对轨下施工中隧道的影响,同时分析了轨下构筑物对路基内动应力的影响<sup>[1]</sup>;高伟君等分析了新建地铁车站深基坑开挖过程中既有车站内的轮轨接触荷载对车站结构与周围土层变形的影响<sup>[2]</sup>;毕湘利等通过模拟轮轨激振荷载,分析了新建的平行换乘车站深基坑开挖过程中既有车站结构的动力响应<sup>[3]</sup>;林刚采用有限元数值模拟研究手段,对地铁重叠隧道上、下两洞结构的力学参数进行了数值模拟<sup>[4]</sup>;张晨明等采用三维增量有限元弹性分析方法,对既有线结构的变形进行了分析,并对新线的施工方法进行了优化<sup>[5]</sup>;曹艳梅等通过迭加方式得到了整车对路基的动荷载,并采用有限元分析方法计算了高层建筑所受到的振动影响<sup>[6]</sup>;罗锐等通过建立车辆-轨道-路基耦合系统动力分析模型和路基-土体-基坑-支护结构耦合系统动力分析模型,分析了基坑对路基沉降的影响<sup>[7]</sup>;潘杰麟基于理论研究与ANSYS软件,对车辆移动荷载作用下基坑中悬臂单桩与地基的相互作用进行了研究<sup>[8]</sup>;李梅芳等根据系统动力学与有限元理论,建立了铁路路基-土

体-邻近线基坑-支护结构数值计算模型,分析了列车振动荷载作用下,邻近既有线的深基坑开挖过程中路基-基坑体系的动变形响应规律<sup>[9]</sup>;王菲等以西柏坡高速公路田家庄互通立交桥为例,利用ABAQUS大型通用有限元软件,模拟了立交桥承台基坑开挖的施工过程<sup>[10]</sup>。

本文以既有线的轨道水平作为控制标准,通过平面有限元对基坑尺寸、既有线条件、支护参数(桩长、支撑强度、第1道支撑点位置)等影响因素进行优化分析,同时考虑渗流对轨道水平的影响。

## 1 工程地质与场地条件

京沪高速铁路廊坊段以低路堤浅挖为主,轨道类型为CRTSII板式无砟轨道,右侧为既有京沪铁路。本文依托既有京沪铁路旁某一小桥基坑开挖工程,距路基坡脚为5.0 m,开挖深度为8 m,长度为24.1 m,宽为10.0 m。采用排桩支护形式,分别设置在地表以下0.5、3.0 m处,基坑开挖断面与场地平面布置分别见图1、2,场地地基土物理力学参数见表1。

## 2 基坑开挖对既有线影响的关键因素正交分析

### 2.1 正交试验设计原理

在实际问题中,考虑2个以下影响因素对试验结果的显著性分析可以选用一元或二元方差分析。而评价基坑开挖对既有线轨道水平的影响涉及多个影响因素,包括既有线的条件、基坑开挖与支护条

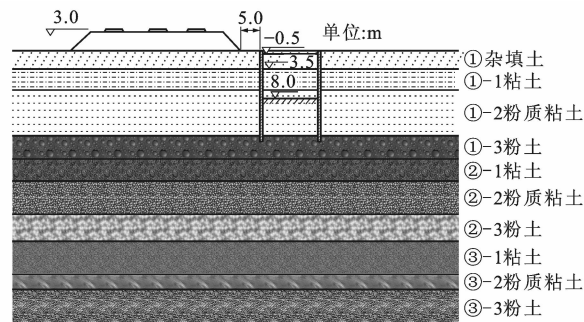


图1 基坑开挖断面

Fig. 1 Excavation section of foundation pit



力条件下轨道水平的变化,不考虑列车振动引起的轨道水平的变化。

2.5 正交的模型建立

为验证支护结构的合理性,找出各个影响因素

对基坑环境的影响规律,从而得到基坑支护的优化设计。本文在考虑假设条件后,通过基于二维有限元法的 Plaxis 软件进行支护桩的正交分析<sup>[16]</sup>,共建立二维模型 27 个,见表 3。

表 3 模型参数  
Tab.3 Model parameters

序号	距坡脚距离/m	桩长/m	基坑深度/m	基坑宽度/m	路基高度/m	既有线股道数量	支撑强度	第 1 道支撑点位置/m	轨道水平/mm
1	1	12	11	10	1	2	Y	1.0	4.2
2	5	12	5	5	1	1	Z	1.0	2.8
3	10	12	8	15	1	3	X	1.0	8.8
4	1	15	8	5	1	2	Y	0.5	2.0
5	5	15	11	15	1	1	Z	0.5	4.3
6	10	15	5	10	1	3	X	0.5	4.9
7	1	18	5	15	1	2	Y	0.0	7.2
8	5	18	8	10	1	1	Z	0.0	2.7
9	10	18	11	5	1	3	X	0.0	1.3
10	1	12	5	5	3	3	Z	0.0	1.6
11	5	12	8	15	3	2	X	0.0	3.4
12	10	12	11	10	3	1	Y	0.0	1.5
13	1	15	11	15	3	3	Z	1.0	4.5
14	5	15	5	10	3	2	X	1.0	3.8
15	10	15	8	5	3	1	Y	1.0	1.0
16	1	18	8	10	3	3	Z	0.5	1.9
17	5	18	11	5	3	2	X	0.5	1.1
18	10	18	5	15	3	1	Y	0.5	4.0
19	1	12	8	15	5	1	X	0.5	1.9
20	5	12	11	10	5	3	Y	0.5	3.2
21	10	12	5	5	5	2	Z	0.5	1.4
22	1	15	5	10	5	1	X	0.0	2.2
23	5	15	8	5	5	3	Y	0.0	1.0
24	10	15	11	15	5	2	Z	0.0	2.5
25	1	18	11	5	5	1	X	1.0	0.6
26	5	18	5	15	5	3	Y	1.0	4.9
27	10	18	8	10	5	2	Z	1.0	2.1

模型的假设条件为:采用平面应变假设,大小为 50 m×100 m;地下水位为地下 1.0 m;支撑为从上至下逐级支撑;采用摩尔库伦模型,考虑桩土摩擦;荷载按 I 级重型铁路换算土柱取值<sup>[17-18]</sup>,分别在铁路两轨之间均布加载;5 m 深度基坑设 1 道支撑,8 m 深度基坑设 2 道支撑,11 m 深度基坑设 4 道支撑。

3 计算结果与正交分析

3.1 正交模型与现场数据的对比分析

图 3 为基坑侧壁和距侧壁 1、3、5 m 的现场试验数据与模拟结果的对比,从中可见模型计算结果在

沉降变形的趋势上和实测结果基本吻合,3 个开挖阶段的特征十分明显,距基坑坑壁越近,产生的沉降越大。

3.2 正交模型计算结果

按照表 2 中因素水平的设定值,以轨道水平为分析目标,对每个施工过程进行正交分析。因基坑深度不同,施工过程不同,选择各个深度共有的第 2 层土体开挖(开挖至地表以下 3.5 m)。从表 3 可以看出,相当一部分工况的轨道水平已经不能满足静态平顺的要求,最大轨道水平达到了 8.8 mm,而部分工况的轨道水平满足小于 3.0 mm 的要求,因此,在

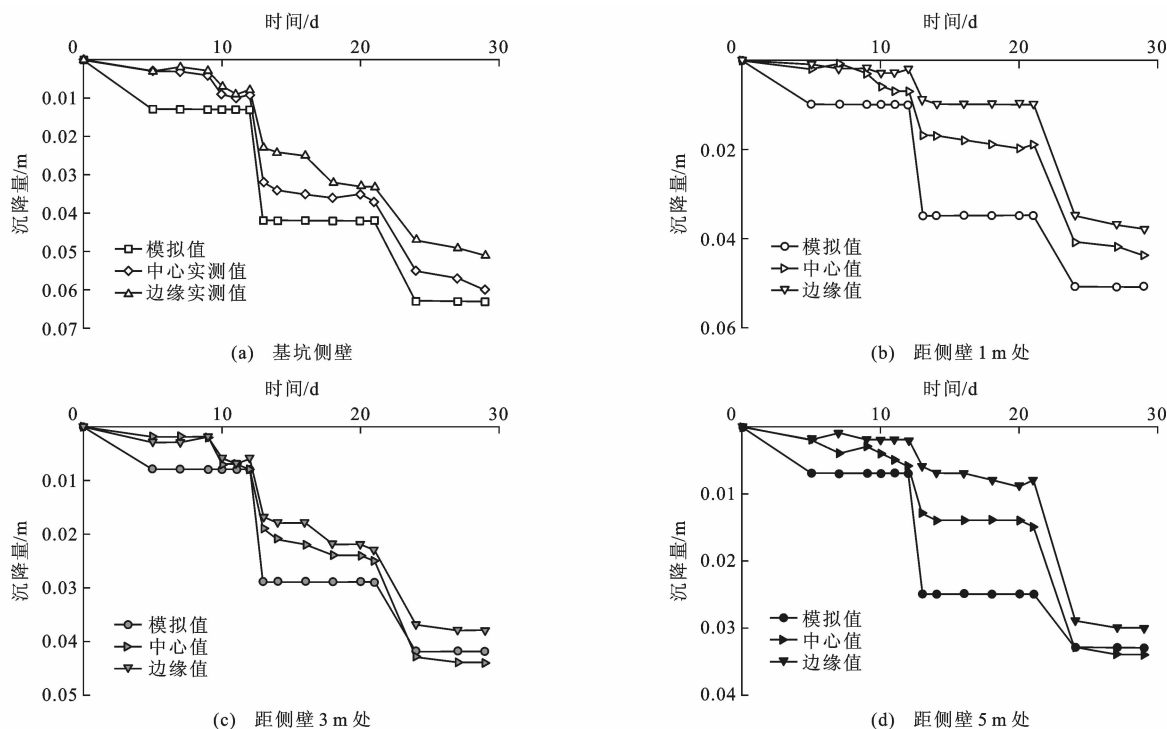


图 3 模拟结果与试验数据的比较

Fig. 3 Comparison of simulation results and test data

开挖过程中必须进行优化。

### 3.3 极差分析

对轨道水平的计算结果进行极差分析,结果见表 4,从中可以看出,各个影响因素对临近既有有线基坑支护的影响次序依次为:基坑宽度、路基高度、既有有线股道数量(路基面宽度)、基坑深度、第 1 道支撑点位置、支撑强度、桩长、距坡脚距离。

从极差分析结果可以看出,正交试验轨道水平的最小组合值为  $A_1B_3C_3D_1E_3F_1G_3H_1$ ,即距坡脚距离为 1 m,桩长为 18 m,基坑深度为 11 m,基坑宽度为 15 m,路基高度为 1 m,既有有线股道数量为 1,支撑强度类型为 Z,第 1 道支撑点位置为 0。

表 4 极差分析分析结果

Tab. 4 Extreme difference analysis result

影响因素	第 1 水平均值	第 2 水平均值	第 3 水平均值	极差
距坡脚距离	2.90	3.02	3.06	0.20
桩长	3.20	2.91	2.87	0.33
基坑深度	3.64	2.76	2.58	1.07
基坑宽度	1.42	2.94	4.61	3.19
路基高度	4.24	2.53	2.20	2.04
既有有线股道数量	2.33	3.08	3.57	1.23
支撑强度	3.11	3.22	2.64	0.58
第 1 道支撑点位置	2.60	2.74	3.63	1.03

### 3.4 方差分析

极差分析的方法较为简单直观,只需要少量计

算,就能知道影响因素主次顺序,但无法判断各个因素水平所对应的试验结果间的差异究竟是由因素水平不同所引起的,还是由试验误差所造成的。此外,各个影响因素对试验结果影响的大小无法给以精确的估计,不能提出 1 个标准来判断所考察因素作用是否显著。因而需要通过方差分析,进一步得出各个影响因素对轨道水平的影响波动情况,8 个影响因素的方差分析结果见表 5。

表 5 方差分析结果

Tab. 5 Variance analysis results

影响因素与误差	偏差平方和/ $\text{mm}^2$	均方/ $\text{mm}$	F 检验结果
距坡脚距离	0.122	0.061	0.062 9
桩长	0.591	0.296	0.305 2
基坑深度	5.880	2.940	3.035 6
基坑宽度	45.790	22.890	23.639 0
路基高度	21.660	10.830	11.180 2
既有有线股道数量	6.944	3.472	3.584 9
支撑强度	1.693	0.847	0.874 1
第 1 道支撑点位置	5.638	2.819	2.910 6
试验误差	9.685	0.969	
总偏差平方和	$9.800 \times 10^{-5}$		

从表 5 可以看出,方差分析的结果与极差分析的结果一致。但在实际工程中,基坑宽度、路基高度、路基宽度、基坑深度、距坡脚距离均由工程实际

确定,因此,为了保证施工中轨道结构的几何尺寸和基坑支护工程的安全,可以优化桩长、第1道支撑点位置、支撑强度等设计参数和施工工序。在桩长、支撑强度、第1道支撑点位置3个影响因素中,第1道支撑点位置是主导因素,影响顺序为第1道支撑点位置、支撑强度、桩长。

在临近既有线开挖基坑时,要特别重视第1道支撑点的位置,在满足施工要求的前提下应当尽量靠近地表。支撑强度和桩长2个影响因素对轨道水平影响较小,临近既有线基坑开挖时,在保证其满足规范安全前提下,可以作为次要因素考虑。

### 3.5 考虑渗流

在基坑开挖过程中,降水会造成基坑周边不同体中地下位置存在水头差,从而引起基坑周边土体中地下水的流动。从渗流理论可知,土体中地下水的流动会给土体颗粒施加一个动水压力(渗透力),从而造成土体有效应力的变化。由于在正交模型设计过程中,未考虑渗流作用,为验证是否应该考虑渗流,本文在正交分析结果的基础上,对比了与不考虑渗流影响下的轨道水平。

当不考虑渗流时,计算过程为地应力平衡→荷载施加与排桩施工→固结过程→开挖第1层土体(开挖厚度为1.0 m)→加顶层支撑→开挖第2层土体(开挖至3.5 m)→加底层支撑→开挖第3层土体(开挖至基坑底)。当考虑渗流时,计算过程为地应力平衡→荷载施加及排桩施工→固结过程→降水至地下1.5 m→开挖第1层土体(开挖厚度为1.0 m)→加顶层支撑→降水至地下4.0 m→开挖第2层土体(开挖至3.5 m)→加底层支撑→降水至地下8.5 m→开挖第3层土体(开挖至基坑底)。是否考虑渗流的轨道水平计算结果的对比见图4。

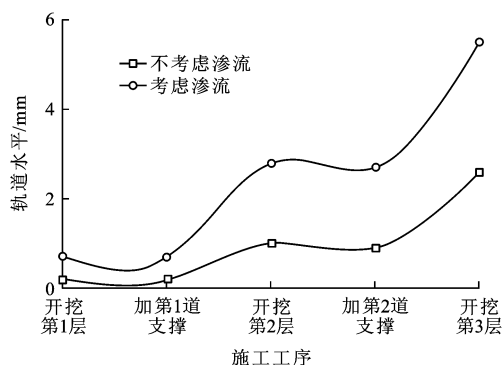


图4 轨道水平计算结果对比

Fig. 4 Comparison of calculation results for track levels

由图4可见,不考虑渗流时,当开挖第3层土体时,轨道水平接近2.6 mm,能满足规范3 mm的限制

值<sup>[15]</sup>。而当考虑渗流后,轨道水平是未考虑渗流时的1倍以上,说明考虑渗流后,轨面沉降会大大增加,从而增大轨道水平,因此,临近既有线的开挖,必须在止水条件下进行,否则将增大既有线的轨道水平,危及行车安全。

## 4 结 语

以既有线的轨道水平为控制指标,确定了临近既有线基坑开挖因素的重要性,依次为基坑宽度、路基高度、既有线股道数量(路基面宽度)、基坑深度、支撑点位置、支撑强度、桩长、距坡脚距离。对于既定的线路参数和基坑条件,第1道支撑点位置是主导因素。对于本文工程的最优组合为距坡脚距离为1 m,桩长为18 m,基坑深度为5 m,基坑宽度为15 m,路基高度为1 m,既有线股道数量为1,支撑强度类型为Z,第1道支撑点位置为0。

考虑渗流的轨道水平是未考虑渗流的1倍以上,验证了水的流动性会给基坑周围土体造成附加沉降,从而增大轨道水平。建议临近既有线的开挖必须在止水条件下进行。

本文没有考虑既有线的运营对支护结构的影响,需要进一步收集列车运行速度、轨道条件对支护结构的影响,为既有线的基坑支护设计提供参考。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 雷震宇,周顺华,许 恺. 铁路下穿式结构施工受轮轨作用力的影响分析[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(6): 70-73.  
LEI Zhen-yu, ZHOU Shun-hua, XU Kai. Dynamic analysis of wheel/rail interaction during construction of tunnel under railway[J]. China Railway Science, 2003, 24(6): 70-73. (in Chinese)
- [2] 高伟君,姚燕明,蔚俊霞. 列车荷载对平行换乘地铁站深基坑变形影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(增2): 375-379, 382.  
GAO Wei-jun, YAO Yan-ming, WEI Jun-xia. Study on deep deformation of parallel transfer metro station caused by vehicle load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 375-379, 382. (in Chinese)
- [3] 毕湘利,周顺华. 列车振动荷载对邻近深基坑的既有站变形影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(12): 1599-1602.  
BI Xiang-li, ZHOU Shun-hua. Analysis on deformation of old metro station close to deep excavation by vehicle dynamic load[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(12): 1599-1602. (in Chinese)
- [4] 林 刚. 列车振动对地铁重叠隧道结构力学行为的影响[J]. 铁道建筑技术, 2006(3): 9-11.  
LIN Gang. Influence of train vibration on structural mechanical

- behavior of metro overlapping tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2006(3): 9-11. (in Chinese)
- [5] 张晨明,董秀竹. 新线施工对既有车站影响分析[J]. 铁道工程学报, 2006(9): 85-88.
- ZHANG Chen-ming, DONG Xiu-zhu. Analysis of effect on existing line station due to new line construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(9): 85-88. (in Chinese)
- [6] 曹艳梅,夏 禾. 运行列车对高层建筑结构的振动影响[J]. 工程力学, 2006, 23(3): 162-167.
- CAO Yan-mei, XIA He. Vibration of high-rise buildings induced running trains[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(3): 162-167. (in Chinese)
- [7] 罗 锐,雷晓燕. 沪宁城际铁路基坑开挖对既有线动态影响分析[J]. 铁道工程学报, 2010(9): 5-8.
- LUO Kun, LEI Xiao-yan. The dynamic analysis of the existing railway's subgrade settlement caused by excavation pit on Hu-Ning Line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(9): 5-8. (in Chinese)
- [8] 潘杰麟. 车辆移动荷载作用下基坑支护桩-土相互作用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- PAN Jie-lin. The interaction of support pile-soil under vehicle moving loads in deep foundation pit[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] 李梅芳,肖军华,宫全美,等. 邻近既有深基坑开挖过程中的动力响应分析[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(5): 93-97.
- LI Mei-fang, XIAO Jun-hua, GONG Quan-mei, et al. Dynamic analysis of the interaction between the existed line and the foundation system during excavation[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2011, 28(5): 93-97. (in Chinese)
- [10] 王 菲,嵇 一. 基坑开挖对既有铁路桥基础变位的影响分析[J]. 铁道工程学报, 2012(8): 28-33.
- WANG Fei, ZHUO Yi. Analysis of influence of foundation pit excavation on displacement of existed railway bridge foundation[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(8): 28-33. (in Chinese)
- [11] 付宏渊,刘建华,张 立,等. 基于正交试验的岩质边坡动力稳定性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(9): 2853-2859.
- FU Hong-yuan, LIU Jian-hua, ZHANG Li, et al. Dynamic stability analysis for rock slope based on orthogonal test[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(9): 2853-2859. (in Chinese)
- [12] 何本贵,高 谦,刘 芳. 公路路堑边坡稳定性影响因素正交分析与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 716-719.
- HE Ben-gui, GAO Qian, LIU Fang. Orthogonal analysis and numerical simulation on influential factors of freeway slope stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 716-719. (in Chinese)
- [13] 张旭辉,龚晓南,徐日庆. 边坡稳定影响因素敏感性的正交法计算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 36-39.
- ZHANG Xu-hui, GONG Xiao-nan, XU Ri-qing. Orthogonality analysis method of sensibility on factor of slope stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 36-39. (in Chinese)
- [14] 王 屏,黄 卫. 路面结构设计中关键因素的正交分析[J]. 公路交通科技, 2002, 19(3): 20-22.
- WANG Ping, HUANG Wei. Orthogonal analysis of key factors in pavement structure design[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(3): 20-22. (in Chinese)
- [15] TB 10082—2005, 铁路轨道设计规范[S].
- TB 10082—2005, code for design of railway track[S]. (in Chinese)
- [16] PYHADES E, VAZQUEN-SUNE E, CARRERA J, et al. Deep enclosures versus pumping to reduce settlements during shaft excavations[J]. Engineering Geology, 2014, 169(4): 100-111.
- [17] TB 10001—2005, 铁路路基设计规范[S].
- TB 10001—2005, code for design on subgrade of railway[S]. (in Chinese)
- [18] 潘雪峰. 高速公路深挖方路段高边坡处治方案设计与施工[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(12): 62-65.
- PAN Xue-feng. Scheme design and construction of high slope treatment in deeply excavated section of expressway[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2013, 30(12): 62-65. (in Chinese)