

闫春岭,张书石,李阳阳,等.地铁荷载下隧道周围粉性土变形的 2^2 因子设计[J].地震工程学报,2018,40(5):1012-1017.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1012

YAN Chunling, ZHANG Shushi, LI Yangyang, et al. 2^2 Factorial Design for Deformation of Silty Soil around Tunnel under Subway Loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 1012-1017. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1012

地铁荷载下隧道周围粉性土变形的 2^2 因子设计

闫春岭^{1,2}, 张书石¹, 李阳阳¹, 孔豫栋¹

(1. 安阳工学院土木与建筑工程学院, 河南 安阳 455000; 2. 同济大学地下与建筑工程系, 上海 200092)

摘要:为研究地铁荷载作用下饱和粉性土的累积塑性变形特性,针对上海地铁 10 号线国权路附近的饱和粉性土进行多功能 GDS 循环三轴试验,考虑振动频率、动应力幅值对累积塑性应变的影响。试验结果表明:相同振动频率下,动应力幅值越大产生的累积塑性应变就越大;相同动应力幅值条件下,频率越小产生的累积塑性应变就越大。采用 2^2 因子设计法进行分析,得到振动频率、动应力幅值及振动频率与动应力幅值互作等因素均对累积塑性应变有显著影响。通过回归分析理论,建立考虑振动频率、动应力幅值及振动频率与动应力幅值互作等因素的累积塑性应变的非线性方程,并对方程进行检验。该研究成果能为控制地铁运营产生的沉降提供有价值的理论依据。

关键词:地铁荷载;因子设计;变形特性;粉性土

中图分类号: TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)05-1012-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1012

2^2 Factorial Design for Deformation of Silty Soil around Tunnel under Subway Loading

YAN Chunling^{1,2}, ZHANG Shushi¹, LI Yangyang¹, KONG Yudong¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, Henan, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To study the cumulative plastic deformation characteristics of saturated silty soil under subway loads, the GDS cyclic triaxial testing system was used to test the saturated silty soil near the Guoquan Road, Shanghai Metro Line 10. The effects of vibration frequency and dynamic stress amplitude on the cumulative plastic strain were considered. The experimental results show that the cumulative plastic strain increases with the dynamic stress amplitude, and with the same dynamic stress amplitude, the cumulative plastic strain increases as the frequency decreases. By an analysis with the 2^2 factorial design method, it was found that the vibration frequency, the dynamic stress amplitude, and the interaction between the two have a significant effect on the cumulative plastic strain. Based on the theory of regression analysis, the nonlinear equation of cumulative plastic strain was established, which considers the vibration frequency, the dynamic stress amplitude, and the interaction between the two, and the equation was tested. The research

收稿日期: 2017-11-18

基金项目: 河南省科技计划重点攻关资助项目 (152102310204) (132102310334); 河南省高校 2016 年重点科研项目 (16B560001); 大学生科技创新项目

第一作者简介: 闫春岭(1975-),男,河北滦南人,副教授,主要从事土木工程方面的教学与研究工作。E-mail: yanchunling2003@163.com。

results can provide a valuable theoretical basis for controlling the subsidence induced by subway operation.

Keywords: subway loading; factorial design; deformation characteristics; silty soil

0 引言

随着我国轨道交通系统的迅猛发展,地铁作为一种新型的交通工具在给人们带来舒适、安全的同时,也带来一些工程环境问题,如地铁长期运营引起的土体破坏、隧道管片错位开裂等,特别是在循环荷载作用下引起的隧道周围土体变形现象。如上海地铁 1 号线某路段最大沉降量已超到 200 mm;天津地铁 1 号线最大沉降量已达到 180 mm^[1]。目前,国内外学者对隧道周围土体变形特性进行了大量研究,并取得了一系列研究成果。早期,Seed 等^[2]通过对饱和软土的动三轴试验发现,软土的累积塑性应变与固结压力、动应力大小及振动次数等因素有关。随后,Monismith 等^[3]通过大量的循环载荷试验,得出了饱和软土累积塑性应变与振动次数的拟合方程。Matsui 等^[4]、Yasuhara 等^[5]、Hyde^[6]、周文权等^[7]对动荷载作用下土体的变形和强度进行了深入研究,认为循环次数和应力水平是土体变形和强度的重要影响因素。陈颖平等^[8]对萧山软黏土进行循环三轴试验,得到了有静偏应力和无静偏应力的不排水瞬态累积应变模型。周建等^[9]通过对杭州正常固结饱和软黏土进行循环三轴试验,建立了一个反映土体软化的数学模型。黄茂松等^[10]通过对大量饱和软黏土进行动三轴试验,并引入相对偏应

力水平参数对不排水累积塑性应变特性进行了相应的研究。Yan 等^[11]对上海地铁 10 号线国权路站附件的粉性土进行动三轴试验,建立了影响土体变形的回归方程。黄娟等^[12]通过对泥炭质土的循环荷载试验,得出了随着循环振次的增加和振级水平的提高,累积塑性应变就越大的结论。臧濛等^[13]通过黏土的动三轴试验并引入指数型函数与指数双曲线函数的叠加融合,提出了一种改进的累积变形的模型。

目前,对于地铁荷载作用下饱和软黏土变形特性的研究相对较多,但对于地铁荷载作用下隧道周围粉性土的累积塑性应变影响因素强弱的研究则较少,特别是由影响因素强弱再建立累积塑性方程更为鲜见。本文利用英国进口 GDS 动三轴试验,研究振动频率和动应力幅值及其互作等因素对土体累积塑性应变的影响程度,并建立相应的回归方程,以期地铁运营引起的土体沉降提供理论依据。

1 动三轴试验

1.1 试验设备

试验采用英国进口多功能 GDS 动态三轴循环系统(图1),加载模块采用应力控制方式,施加正弦

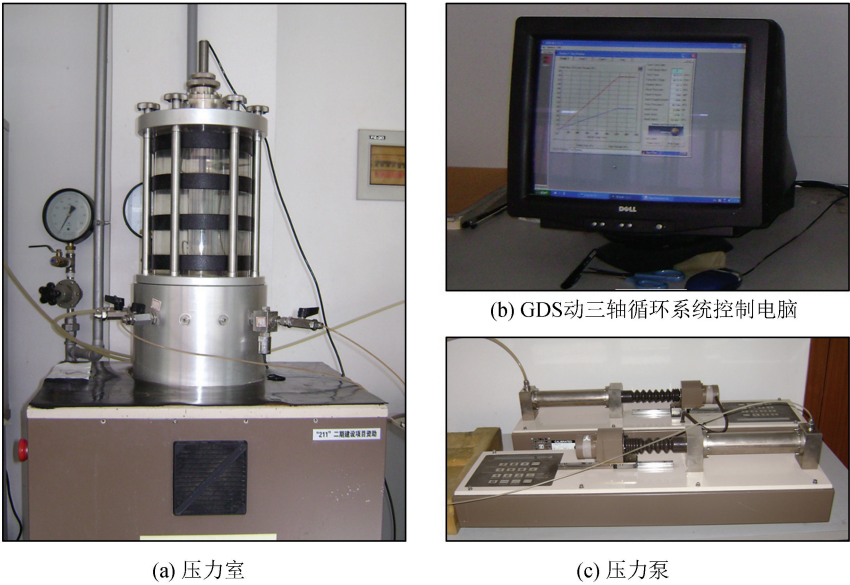


图 1 GDS 动三轴循环系统

Fig.1 GDS dynamic triaxial cycle system

波模拟地铁循环往复的荷载。

1.2 试验土样

试验土样取自上海地铁 10 号线国权路站附近埋深 12.5 m 的第②₃ 层砂质粉土。该土层为 Q₄³ 的

滨海—河口相沉积,含云母,局部夹薄层粉质黏土,土层不均,厚约 10 m。土层分布如图 2 所示。采用贯入式薄壁取土器,所取圆柱形土样高为 30 cm、直径 10 cm,其物理力学参数如表 1 所列。

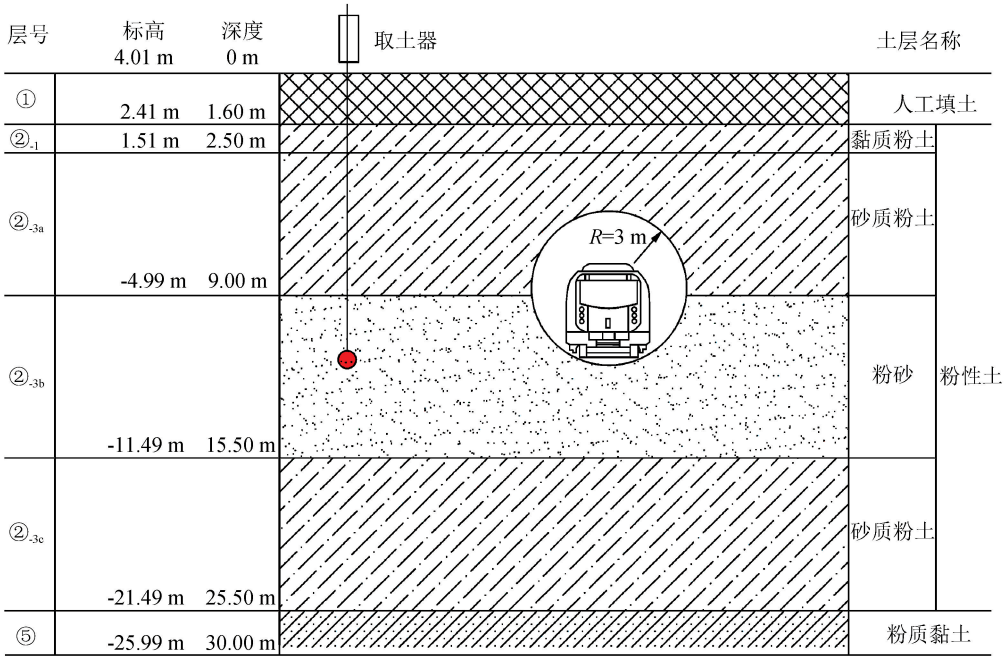


图 2 土层分布及取样位置

Fig.2 Soils distribution and sampling position

表 1 粉性土的物理力学指标

Table 1 Physical and mechanix index of silty soil

含水量 $w/\%$	孔隙比 e	比重 G_s	压缩系数/ MPa^{-1}	重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角/ $(^\circ)$	黏聚力/ kPa
36.5	0.98	2.7	0.32	18.5	27.2	5

1.3 试验结果

本次试验考虑了 2 个因素,即动应力幅值和振动频率。考虑到列车及隧道体系施加给隧道土体的附加应力取 20~40 kPa^[19],本次试验动应力幅值的

最高值取 40 kPa,最小值取 20 kPa。根据课题组前期的现场实测资料^[18],振动频率取 2.5 Hz 作为地铁运营的最高频率,0.5 Hz 作为运营的最低频率。试验结果列于表 2。

表 2 动三轴试验控制参数方案

Table 2 Control parameters for dynamic triaxial test

编号	固结比	波形	反压/ kPa	轴压/ kPa	围压/ kPa	动应力 幅值/kPa	频率 /Hz	累积塑性 应变/%
1	2.5	正弦波	100	220	48	20	0.5	1.04
2	2.5	正弦波	100	220	48	20	0.5	1.06
3	2.5	正弦波	100	220	48	20	0.5	1.01
4	2.5	正弦波	100	220	48	20	2.5	0.21
5	2.5	正弦波	100	220	48	20	2.5	0.23
6	2.5	正弦波	100	220	48	20	2.5	0.22
7	2.5	正弦波	100	220	48	40	0.5	6.90
8	2.5	正弦波	100	220	48	40	0.5	6.23
9	2.5	正弦波	100	220	48	40	0.5	6.46
10	2.5	正弦波	100	220	48	40	2.5	3.27
11	2.5	正弦波	100	220	48	40	2.5	3.49
12	2.5	正弦波	100	220	48	40	2.5	3.18

2 2² 因子设计

2.1 2² 因子设计简介

因子设计是一种因子试验设计统计方法,广泛应用于电子、化工、生物及土木工程等各项领域。通过因子设计可以迅速找到试验因子取哪种水平时试验最佳,同时能提供影响主因子和互作的信息,也能减少试验次数和费用。

2.2 2² 因子试验设计及平均主效

二水平 2² 虽然是一种较简单的因子设计,但在工程中因实用而被广泛优先采用。为了不失一般性,设 A、B 为两个二水平因子,A 的两个水平为“高”和“低”,分别记作“+”和“-”;同理,B 的两个水平为“高”和“低”,也分别记作“+”和“-”,共有 2×2=4 个水平组合。该设计中的 4 种处理组合用小写字母表示(图 3)。从图 3 中可以看出,a 表示 A

为高水平而 B 为低水平;b 表示 A 在低水平而 B 在高水平;ab 表示 A 及 B 均为高水平,而{1}表示 A 及 B 均为低水平。2² 因子试验设计数据列于表 3。

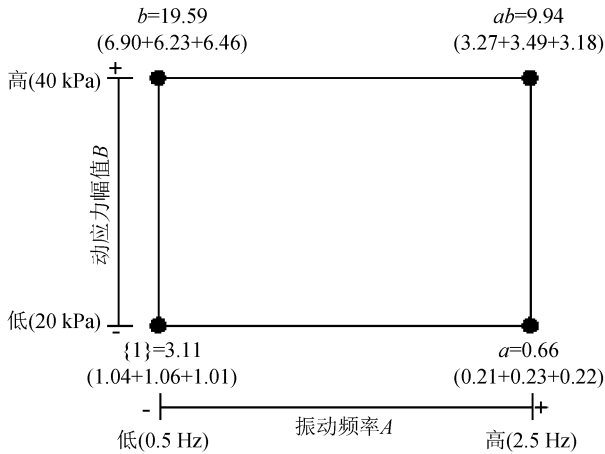


图 3 2² 试验设计处理组合

Fig.3 Processing combination for 2² test design

表 3 2² 因子试验设计数据

Table 3 Data of 2² factor test design

因子		处理组合	重复试验/%			总和/%
A(频率)	B(动应力幅值)		I	II	III	
-	-	A 低,B 低	1.04	1.06	1.01	3.11
+	-	A 高,B 低	0.21	0.23	0.22	0.66
-	+	A 低,B 高	6.90	6.23	6.46	19.59
+	+	A 高,B 高	3.27	3.49	3.18	9.94

(1) 主效与互作

A 因素有两个简单效应,B 为低水平时 A 因素的简单效应(A₀) 为:

$$A_0 = (a - \{1\})/n \tag{1}$$

其中:n 为重复试验的次数。

同理,B 为高水平时 A 因素的简单效应(A₁) 为:

$$A_1 = (ab - b)/n \tag{2}$$

取式(1) 和(2) 的平均值可以得到 A 的平均主效应:

$$A = \frac{1}{2n}(ab + a - b - \{1\}) \tag{3}$$

同理,B 的平均主效应:

$$B = \frac{1}{2n}(ab + b - a - \{1\}) \tag{4}$$

A 与 B 互作的平均主效应:

$$AB = \frac{1}{2n}(ab + \{1\} - b - a) \tag{5}$$

(2) 对照及平方和

若线性组合 $\sum_{i=1}^a c_i \mu_i$ 满足约束条件 $\sum_{i=1}^a c_i = 0$, 则称这样的线性组合为对照。即

$$(\Gamma)_c = \sum_{i=1}^a c_i \mu_i \tag{6}$$

式中:c_i 为对照系数;(Γ)_c 为对照函数。

基于以上的定义,则对照系数的离差平方和为:

$$S_c = \frac{\left(\sum_{i=1}^a c_i \mu_i\right)^2}{n \sum_{i=1}^a c_i^2} = \frac{(\Gamma)_c^2}{n \sum_{i=1}^a c_i^2} \tag{7}$$

因此 A、B、AB 的任一对照的平方和代入式(7),得

$$\begin{cases} S_A = \frac{(ab + a - b - \{1\})^2}{4n} \\ S_B = \frac{(ab + b - a - \{1\})^2}{4n} \\ S_{AB} = \frac{(ab + \{1\} - a - b)^2}{4n} \end{cases} \tag{8}$$

把表 3 中的数据代入式(1)~(8),得到的结果列于表 4。

给出显著性检验水平 α=0.01,查出 F_{0.05}(1,8)=5.23,F_{0.01}(1,8)=11.26,而 F_A=338.91>11.26,F_B=1 536.06>11.26,F_{AB}=120>11.26,因此得出 A(振动频率)、B(动应力幅值)及 AB(振动频率与

动应力幅值互作)均对试验结果(累积塑性应变)有显著的影响。

表 4 试验方差分析表

Table 4 Analysis of test variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
A	12.20	1	12.20	338.91	**
B	55.29	1	55.29	1 536.06	**
AB	4.32	1	4.32	120.00	**
误差 e	0.29	8	0.04		
总和	72.10	11			

3 回归方程的建立

考虑到因素之间物理量的量纲不同,要建立回归方程,首先需进行变形因素的归一化处理。先定义频率比 $f_R=f/2.5$,同理,定义动应力幅值比 $\sigma_R=\sigma_d/40$ 。由前面分析可知,振动频率、动应力幅值、振动频率与动应力幅值互作均对地铁荷载下粉性土的累积塑性应变有显著性影响,故设非线性回归方程为:

$$y=a_0+a_1f_R+a_2\sigma_R+a_3f_R\sigma_R \tag{9}$$

将试验结果代入式(9),得到回归方程(10) 和回归方差分析表(表 5)。由于篇幅所限,计算过程不再赘述,具体计算过程请参见文献[16]。

$$y=-4.85+1.98f_R+12.2\sigma_R-6.00f_R\sigma_R \tag{10}$$

表 5 回归方差分析表

Table 5 Analysis of regression variance

方差来源	自由度	平方和	均方	F
回归	3	71.819	23.940	664.68
误差	8	0.288	0.036	
总和	11	72.107		

考虑工程中的实用性,给出检验水平 $\alpha=0.05$,从 F 分布表中查得 $F_{0.05}(3,8)=4.07$,因为 $F=664.68>4.07$,回归方程显著、可信。

为了进一步推广回归方程的应用性,对地铁荷载下粉性土累积塑性应变的试验值与回归值进行残差分析,分析结果列于表 6。由表 6 可以看出,试验值与回归值相对误差较小($<6\%$),进一步表明回归方程较为理想。

4 结论

通过对上海地铁 10 号线附近的粉性土进行多功能 GDS 循环三轴试验,考虑了振动频率与动应力幅值两种因素对累积塑性应变的影响,得到:

(1) 相同振动频率下,动应力幅值越大产生的累积塑性应变就越大;相同动应力幅值条件下,频率越小产生的累积塑性应变就越大。

表 6 回归与残差分析表

Table 6 Regression and residual error analysis

试验号	$y_{\text{试验}}/\%$	$y_{\text{回归}}/\%$	$y_{\text{试验}}-y_{\text{回归}}/\%$	$(y_{\text{试验}}-y_{\text{回归}})/y_{\text{试验}}\times 100$
1	1.04	1.05	-0.01	0.96
2	1.06	1.05	0.01	0.94
3	1.01	1.05	-0.04	0.99
4	0.21	0.22	-0.01	-4.55
5	0.23	0.22	-0.00	4.55
6	0.22	0.22	0.00	0.00
7	6.90	6.55	0.35	5.07
8	6.23	6.55	-0.32	-5.14
9	6.46	6.55	-0.09	-1.39
10	3.27	3.33	-0.06	-1.83
11	3.49	3.33	0.16	4.58
12	3.18	3.33	-0.05	-1.57

(2) 采用 2^2 因子设计方法,得到振动频率、动应力幅值及振动频率与动应力幅值互作均对累积塑性应变有显著的影响。

(3) 通过回归分析,建立了考虑振动频率、动应力幅值及振动频率与动应力幅值互作等因素的累积塑性应变的非线性方程,对方程进行了检验。

参考文献(References)

[1] 詹云超,张建新.地铁行车荷载下天津滨海软土累积变形特性试验研究[J].天津城建大学学报,2015,21(5):329-334.
ZHAN Yunchao,ZHANG Jianxin.Experimental Study of Accumulative Deformation Characteristics of Tianjin Coastal Mollisol under Subway Vehicle Loading[J].Journal of Tianjin Chengjian University,2015,21(5):329-334.

[2] SEED H B, IDRIS I M.Simplified Procedure for Evaluation Soil Liquefaction Potential[J].Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,ASCE,1971,97(9):1249-1273.

[3] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent Deformation Characteristics of Subsoil Due to Repeated Loading[J].Transportation Research Record,1975,537:1-17.

[4] MATSUI T,BAHR M,ABE N.Estimation of Shear Characteristic Degradation and Stress-Strain Relationship of Saturated Clays after Cyclic Loading[J].Soils and Foundations,1992,32(1):161-172.

[5] YASUHARA K,MURAKAMI S,SONG B W,et al.Post Cyclic Degradation of Strength and Stiffness for Low Plasticity Silt[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,ASCE,2003,129(8):756-769.

[6] HYDE A F L.A Pore Pressure and Stability Model for a Silty Clay under Repeated Loading[J].Geotechnique,1985,35(2):113-125.

[7] 周文权,冷伍明,刘文劼,等.低围压循环荷载作用下饱和粗粒土的动力特性与骨干曲线模型研究[J].岩土力学,2016,37(2):415-423.
ZHOU Wenquan,LENG Wuming,LIU Wenjie,et al.Dynamic

- Behavior and Backbone Curve Model of Saturated Coarse-grained Soil under Cyclic Loading and Low Confining Pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2): 415-423.
- [8] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下软黏土不排水累积变形特性[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(5): 764-768.
- CHEN Yingping, HUANG Bo, CHEN Yunmin. Reliability Analysis of High Level Backfill Based on Chaotic Optimization [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(5): 764-768.
- [9] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J]. *土木工程学报*, 2000, 33(5): 75-82.
- ZHOU Jian, GONG Xiaonan. Study on Strain Soften in Saturated Soft Clay under Cyclic Loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(5): 75-82.
- [10] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(7): 891-895.
- HUANG Maosong, LI Jinjun, LI Xingzhao. Cumulative Deformation Behaviour of Soft Clay in Cyclic Undrained Tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(7): 891-895.
- [11] YAN Chunling, TANG Yiqun, WANG Yuandong. Accumulated Deformation Characteristics of Silty Soil under the Subway Loading in Shanghai [J]. *Natural Hazards*, 2012, 62(2): 375-384.
- [12] 黄娟, 丁祖德, 袁铁映, 等. 循环荷载作用下泥炭质土的动变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(9): 1001-1008.
- HUANG Juan, DING Zude, YUAN Tieying, et al. Experimental Study of Dynamic Deformation Properties of Peaty Soil under Cyclic Loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(9): 1001-1008.
- [13] 臧濛, 孔令伟, 曹勇. 描述循环荷载作用下黏土累积变形的改进模型[J]. *岩土力学*, 2017, 38(2): 435-442.
- ZANG Meng, KONG Lingwei, CAO Yong. An Improved Model for Cumulative Deformations of Clay Subjected to Cyclic Loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(2): 435-442.
- [14] YAN Chunling, TANG Yiqun, LIU Yuting. Study on Fractals of Silty Soil Around Tunnel under Subway Loading in Shanghai [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(5): 1529-1535.
- [15] 唐益群, 张曦, 周念清, 等. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土动力响应研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(2): 85-88.
- TANG Yiqun, ZHANG Xi, ZHOU Nianqing, et al. Dynamic Response of Saturated Soft Clay Around a Subway Tunnel under Vibration Load [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(2): 85-88.
- [16] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- HE Wei, XUE Weidong, TANG Bin. Optimization of Experimental Design Methods and Data Analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.