

李同安.广州市轨道交通二十一条工程路基抗震性测试研究[J].地震工程学报,2018,40(4):759-764.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.759

LI Tongan, Seismic Test of the Subgrade of Guangzhou Rail Transit Line 21 [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 759-764. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.759

# 广州市轨道交通二十一条工程路基 抗震性测试研究

李同安

(中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

**摘要:**传统路基动模量法大都进行单路基抗震性能分析,缺乏复合路基抗震性能分析,存在较高的偏差。对广州市轨道交通二十一条工程路基抗震性进行测试,分析该地地质条件后,通过标准贯入实验法判断原始路基土质液化情况,使用瑞典条分法测试原始路基的抗震性能,判别出该路基液化土层滑动安全系数低、抗震稳定性差,应对其进行复合路基加固。通过圆弧滑动法对加固后的复合路基中碎石桩网结构路基以及CFG桩网结构路基进行抗震性测试。实验结果表明,所提方法抗干扰性能强且测试结果精度高。

**关键词:**轨道;路基;抗震性测试;土质液化;复合路基;瑞典条分法

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2018)04-0759-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.759

## Seismic Test of the Subgrade of Guangzhou Rail Transit Line 21

LI Tongan

(China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd. Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The traditional dynamic modulus method for subgrade analysis provides results with high deviation because it mainly focuses on the seismic performance of a single roadbed and not the seismic performance of composite subgrades. A seismic test method for the subgrade analysis of Guangzhou Rail Transit Line 21 is proposed. After the analysis of geological conditions, the soil liquefaction of the original subgrade is assessed through the standard penetration test. On this basis, the Swedish strip method is used to test the seismic performance of the original subgrade. Results show that the liquefied soil of the subgrade has low safety and poor seismic stability. Thus, the composite roadbed should be reinforced. The seismic performance of the reinforced subgrade is tested through the circular sliding method. Experimental results show that the proposed method has strong antijamming performance and high accuracy.

**Keywords:** track; roadbed; seismic test; soil liquefaction; composite subgrade; Sweden slice method

收稿日期:2017-08-20

基金项目:陕西省教育厅2017专项科学研究计划项目(17JK1059)

作者简介:李同安(1972-),男,高级工程师。研究方向:地铁施工、隧道施工。E-mail:litongan1@163.com

## 0 引言

广州市是华南地区最大的城市,其经济发展具有重要作用。城市基础建设是城市发展的基础,随着广州市交通中轨道应用飞速崛起,其本身路基的抗震性能问题也逐渐成为人们关注的重点。以往对广州市轨道路基抗震性测试采用测试模型,在测试精度方面存在较大误差,在多方面干扰因素的影响下测试结果不准确,对后期建设以及使用产生很大影响,因此对轨道路基抗震测试的准确性和安全性能成为当下研究的重点,研究出高效的测试方法,能够提高轨道交通的安全性,确保人民群众的生命和财产安全。

以往国内外专家在对路基抗震性测试研究中存在一定误差的问题,如杨博等<sup>[1]</sup>采用一种路基动模量法测试,过程过于复杂,工作效率低,测试结果有误差;聂根良等<sup>[2]</sup>通过在建筑施工前对挡墙使用柔性加筋措施提前预防地震侵害,而未考虑土层液化会产生抗震性能降低的弊端;邱长林等<sup>[3]</sup>对路基地震峰值加速度响应特性振动台进行分析,主要是针对岩溶区进行研究,分析结果具有单一性;赵涛等<sup>[4]</sup>使用SWS-3型连续面波仪对路基强度进行测试,只适用于对浅层地质进行测试,存在一定的局限性。

基于以上问题,本文主要对广州市轨道交通二十一条工程路基的抗震性能进行研究,提升路基抗震性的测试的抗干扰性,提高测试结果准确性。

## 1 广州市轨道交通二十一条工程路基抗震性测试

### 1.1 地质条件风险分析

广州市轨道交通二十一条建设过程中最大的障碍为:软土、砂土、残积土和风化岩等复杂地质,为确保工程能够安全顺利进行,需要对该地实施地质勘查<sup>[5]</sup>。结果如下:

(1) 软土:软土层的含水量较高、透水性能低而孔隙比大,承载力小。容易出现基坑失稳、沉降以及塌陷等情况。

(2) 砂土:分布范围广、厚度大、且含水量较高,因为砂土层本身由于渗水系数大容易引起粉细砂层液化,导致地面出现塌陷和沉降的现象。

(3) 残积土和风化岩:勘探资料表明,该线路上残积土和风化岩主要以砂质黏性土为主,土质不均匀。一旦遇到降雨等极端天气,与水相融后产生软

化崩解等灾害。

以上3种地质易出现土质液化现象<sup>[6]</sup>,一旦遭遇地震,后果不堪设想,因此在施工过程前后需要对路基液化性进行详细的判断,对路基抗震性进行准确的测试研究,以免造成不可挽回的损失。本文对广州市轨道交通二十一条工程原始路基进行抗震性测试<sup>[7]</sup>,对后期地基加固中的复合地基加固区也进行测试,提高广州市轨道交通二十一条工程路基抗震性能。

### 1.2 原始路基土液化性判断

基于广州市轨道交通二十一条的3种地质土层,使用标准贯入实验法对其进行土质液化判断<sup>[8]</sup>,液化土的判断标准为实际测试标贯击数 $N$ 是否大于液化临界标贯击数 $N_{cr}$ , $N < N_{cr}$ 即为土层液化。在施工勘测时提取到水位埋深 $d_w = 2$  m,埋深在地表下2 m的饱和细沙层,在施工处深度 $d_w = 9.35$  m时的标准贯入锤击次数是12击。公式(1)为液化临界标贯击数:

$$N_{cr} = N_0 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \quad (1)$$

式中:临界锤击数基准值用 $N_0$ 来描述, $N_0$ 为10击;地下水水位埋深 $d_w$ 的修正系数用 $\alpha_1$ 来描述,通过公式 $\alpha_1 = 1 - 0.065(d_w - 2)$ 得出 $\alpha_1 = 1$ ;标准贯入试验点深度 $d_w$ 修正系数用 $\alpha_2$ 来描述,通过公式 $\alpha_2 = 0.52 + 0.175d_w - 0.005d_w^2$ 得出 $\alpha_2 = 1.72$ ;上层覆盖不是液化土层的厚度的 $d_w$ 修正系数用 $\alpha_3$ 来描述,通过公式 $\alpha_3 = 1 - 0.05(d_w - 2)$ 得出 $\alpha_3 = 1.1$ ,其中上层覆盖土层是软弱土,计算非液化土层厚度时可以忽略该土层;黏粒重量百分比为 $p_c$ ,其修正系数用 $\alpha_4$ 来描述,且在土层是砂土时, $\alpha_4 = 1$ 。

通过计算可知, $N_{cr} = 18.92 > N$ ,因此判断广州市轨道交通二十一条工程土层是液化土层。

### 1.3 原始路基抗震稳定性分析

已判断广东轨道二十一条工程中土质为液化土层,使用瑞典条分法,对其抗震性进行测试<sup>[9]</sup>,由于出现地震时,液化土层的摩擦力和摩擦角以及抗剪强度等力学标准需要实行折减<sup>[10]</sup>,将折减系数设为 $\phi_1$ ,路基土抗液化指数设为 $F_i$ , $F_i = N/N_0$ , $F_i = 0.63$ ,其中 $\phi_1$ 的值和标贯试验点深度 $d_w$ 以及 $F_i$ 关系密切, $\phi_1 = 0.33$ 。稳定性测试公式为:

$$K = \frac{\sum \tan \phi_i \cdot N_i + \sum c_i l_i}{\sum T_i + \sum t_i} \quad (2)$$

式中:在第 $i$ 条滑裂面中,土的固结快剪黏聚力为

$c_i$ ;快剪摩擦角为  $\phi_i$ ;自重在滑弧法线方向的总作用力为  $N_i$ ,  $N_i = W_i \cos \alpha_i - n$ ;水平地震力对其在滑弧法线方向出现的作用力为  $n_i$ ,  $n_i = F_{ihE} \sin \alpha_i$ ;  $F_{ihE} = \eta \cdot A_g \cdot m_i$ 。第  $i$  条土块质心中的水平地震力为  $F_{ihE}$ ,其作用修正系数为  $\eta$ ,  $\eta = 0.25$ 。在第  $i$  条土块中,质量( $t$ )和滑裂面对水平面的夹角分别用  $m_i$  和  $\alpha_i$  来描述;滑面上方土的重量和滑裂面的长度分别用  $l_i$  和  $W_i$  来描述;在滑弧切线方向出现的下滑力为  $T_i$ ,  $T_i = W_i \sin \alpha_i$ ;在滑弧方向出现的水平地震力为  $t_i$ 。  $t_i = F_{ihE} \cdot (y/r)$ ;滑弧半径是  $r$ ,土条质心到滑弧圆心的直径为  $y$ 。

通过计算路基液化土层经过折减可知,下滑力

总计是 1.789.6 kN,抗滑力总计是 1 441.9 kN,滑动安全系数是  $0.806 < 1.1$ ,原始路基抗震性达不到安全条件,需要对路基进行加固。

### 1.4 复合路基加固区抗震性测试

通过对广州市轨道交通二十一号线工程原始路基抗震稳定性的检测,判别出该路基下方地质呈土质液化现象,因此对其进行复合路基加固<sup>[11]</sup>,则为桩网结构路基,桩网结构路基分为碎石桩和 CFG 桩两类,采用圆弧滑动法对轨道路基抗震性进行测试。地震强度决定了圆弧滑动方法中的两类计算方法的使用<sup>[12]</sup>,两类计算方式的使用条件如表 1 所述。

表 1 复合路基抗震性分析方法

Table 1 Seismic analysis method of composite subgrade

地震强度	检测时间	方式	作用力	程度
中度	震时与震后	有效应力	强力	静(基于超孔隙水承载力)
重度	震时	总应力	强力,强烈	动(基于初始剪应力情况)
大范围	震后	总应力	强力	液化后的残留程度

表 1 中,中度地震的烈度是 0.18;重度地震的烈度是 0.60。

(1) 碎石桩桩网结构路基:使用圆弧滑动方法利用 Geo-Slope 软件对碎石桩桩网结构路基实行抗震性测试,测试结果用表 2 来描述。

表 2 路基地震安全系数

Table 2 Seismic safety factor of subgrade

承载力状况	没有震力	震动峰值加速度/ $g$		
		0.2	0.3	0.4
安全程度系数值	2.379	2.067	1.662	1.532

通过表 2 可以看出,轨道模式是 A 型板式且安全系数合格,侧面体现抗震性能较高。

测试中若圆弧通过了加固范围和未加固范围,土的强弱度计算应区别对待<sup>[13]</sup>。若依据最坏的预期情况,需要分析加固范围和未加固范围的土液化详情<sup>[14]</sup>,桩体对其提供抗剪切力程度。则抗震性的测试中土强需要进行折减。

(2) CFG 桩桩网结构路基:采用圆弧滑动法对 CFG 桩桩网路基抗震性能进行测试中,当中度地震的情况下,CFG 桩桩网结构的路基和碎石桩桩网结构路基的抗震性相同<sup>[15]</sup>,所以,当处于Ⅶ度设防状况中,CFG 桩桩网结构路基的抗震性符合要求。

## 2 实验分析

为了验证本文方法在对广州市轨道交通二十一

号线工程路基抗震性的测试有效,在土质液化并出现地震时,使用大型堆叠式剪切变形模型箱对原始路基和复合加固的两种路基实行仿真实验,箱体长  $\times$  宽  $\times$  高 = 4.0 m  $\times$  1.5 m  $\times$  2.5 m。设加载加速度为 0.324g,3 类模型路基响应加速度对比情况用图 1 来描述。

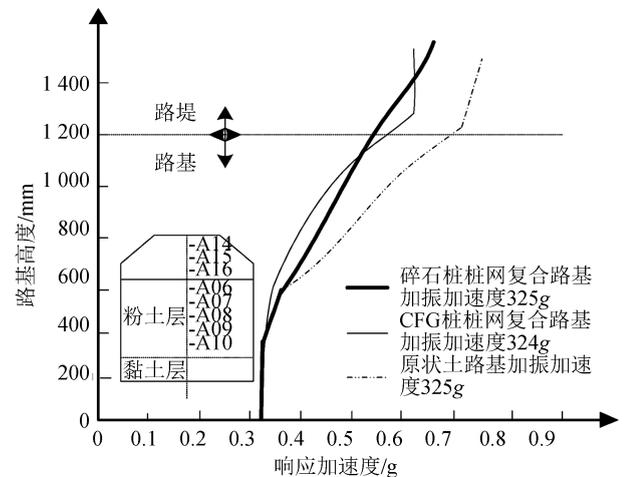


图 1 不同路基情况下路基响应加速度与加振加速度关系对比曲线图

Fig. 1 Comparison between acceleration and response acceleration of subgrade under different subgrade conditions

通过图 1 可看出,在路基土质液化的前提下,碎石桩与 CFG 桩桩网结构路基都比原状土路基对地震的响应加速度慢,说明该两种复合加固路基的抗

震性高,从而可以减小地震带来的破坏性扩散。在深度为 1 400 mm 的原始路基环境中进行测试,本文方法测试结果准确有效。

由于路基的抗震性测试结果准确率容易受到其他地质结构以及地震的影响,摩擦角的变化对抗震性测试的影响较大,因此采用本文方法与传统路基动模量法、Janbu 法在发生地震和未发生地震的情况下,对路基内摩擦角的变化引起的干扰进行对比,结果用图 2 和图 3 来描述。

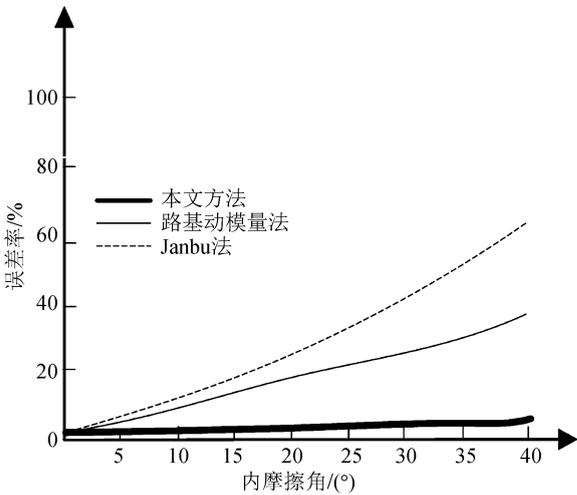


图 2 无震时内摩擦角变动后抗震性测试结果  
Fig.2 Seismic test result after the change of internal friction angle without earthquake

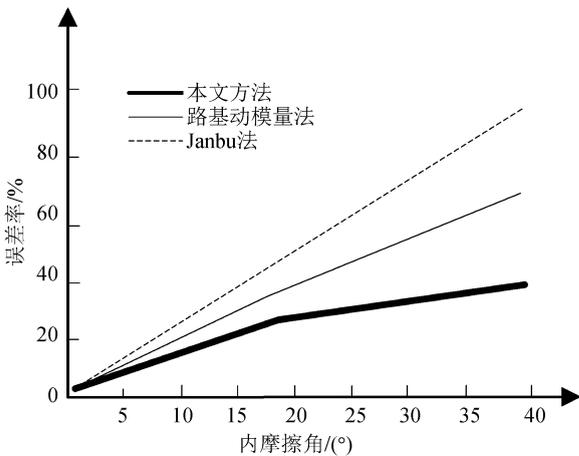


图 3 地震时内摩擦角变动后抗震性测试结果  
Fig.3 Seismic test result after the change of internal friction angle during earthquake

通过图 2 和图 3 可知,在发生地震和无地震的情况下,随内摩擦角的增大,本文方法对实验工程路基抗震性能进行检测的误差率低于其他两种方法。

假设地震烈度为Ⅶ度,采用本文方法与传统路

基动模量法、Janbu 法对复合加固路基进行抗震性测试对比分析,结果用图 4 来描述。

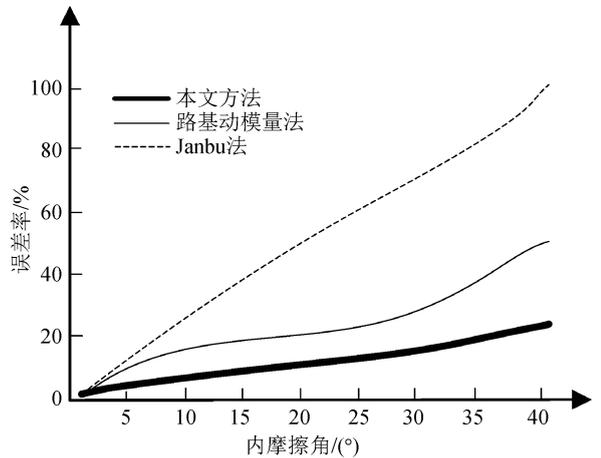


图 4 复合路基内摩擦角变动后抗震性测试结果  
Fig.4 Seismic test result of composite subgrade after changing the internal friction angle

通过图 4 可以看出,路基经过复合加固之后,本文方法的测试结果误差率在内摩擦角的变动下,都控制在 30%之内,且低于其他两种方法。因此,不论是对原始路基还是复合加固路基,发生地震还是未发生地震,本文方法对实验工程路基抗震稳定性的测试结果准确稳定。

为保证路基稳定,在路基两侧具有一定坡度的坡面叫边坡,其是影响路基稳定的重要因素。边坡坡角与测试结果的准确度有着密切关系。因此使用 3 种方法对实验工程路基边坡的坡角与安全系数结果的关系进行对比,对比结果用图 5 描述。

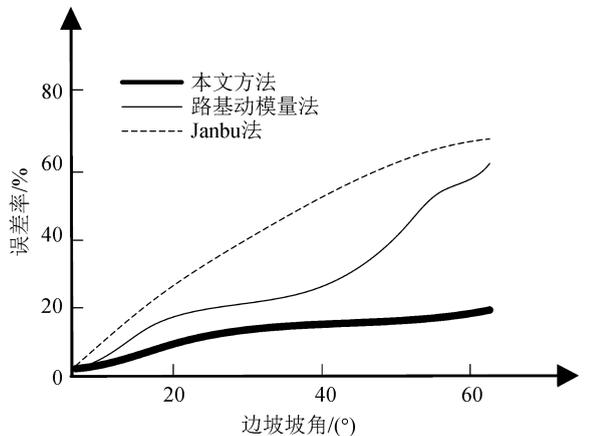


图 5 边坡坡角的变动后抗震性测试结果  
Fig.5 Seismic test result after changing the slope angle

通过图 5 可知,边坡角的变大并没有对本文方法的抗震性测试结果造成较大的干扰,本文方法的边坡误差率低于其他两种方法,因此本文方法对路

基边坡的抗震性检测比其他两种方法更适用。

图 6 是针对复合加固后的路基坡角在发生地震烈度Ⅶ度区时,使用 3 种方法对路基进行抗震性测试的结果。

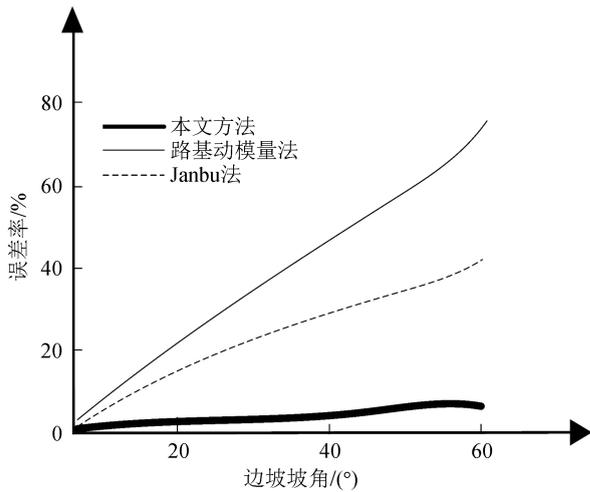


图 6 复合路基坡角变动后抗震性测试结果

Fig.6 Seismic test result after changing the slope angle of composite subgrade

分析图 6 可知,在出现Ⅶ度地震时,随着坡角的增大,本文方法对实验路基抗震性测试的误差率明显低于其他两种方法。

图 7 是针对路基整体施工中的黏聚力对不同方法抗震性的测试结果对比图。

通过图 7 可知,随着黏聚力的增大其他两种方法的测试误差率结果随之增大,本文方法的误差率始终低于其他两种方法。说明在多种影响因素的干扰下,本文方法的稳定性较高。

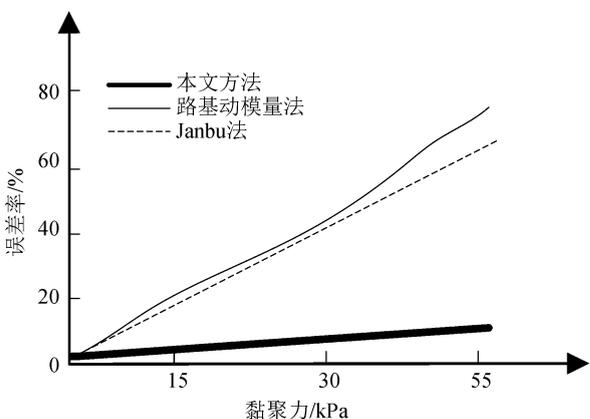


图 7 黏聚力变动后抗震性测试结果

Fig.7 Seismic test result after changing the cohesive force

对实验中所有数据进行整理,得到不同干扰因素对 3 种方法测试结果干扰性情况,结果用表 3 描述。

表 3 不同干扰因素对测试结果的干扰性对比

Table 3 Comparison between the interference of different factors to test results

干扰因素	本文方法	路基动模量法	Janbu法
无震时内摩擦角变化	低	高	高
地震时内摩擦角变化	低	高	高
复合路基加固后内摩擦角变化	低	高	高
边坡坡角变化	低	高	高
复合路基加固后坡角变化	低	高	高
黏聚力变化	低	高	高

通过表 3 可以得出,在对广州市轨道交通二十一号线工程路基抗震性测试中,与路基动模量法和 Janbu 法相比,本文方法抗干扰性能强、稳定性高、实用性强。

### 3 结论

运用传统方法对路基抗震性能进行分析时存在分析结果偏差过大的问题,因此提出一种新型路基抗震性能测试方法,该方法主要针对广州市轨道交通二十一号线工程路基进行测试。首先对该地区地质风险和原始路基抗震稳定性进行分析,并对原始路基土液化性进行判断,根据分析和判断结果对该地区路基进行复合加固。通过实验验证了运用所提方法对路基抗震性能进行检测时抗干扰性较强且误差率低于 40%,说明该方法具有有效性。但是文章只是对广州市轨道交通二十一号线工程路基进行测试,结果可能具有局限性,未来将扩大研究范围,提高方法的应用价值。

### 参考文献(References)

[1] 杨博,张锐,查旭东,等.一种路基动模量测试方法[J].岩土力学,2014,35(5):1514-1519.  
 YANG Bo, ZHANG Rui, ZHA Xudong, et al. A Method for Testing Dynamic Moduli of Subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1514-1519.

[2] 聂根良,程晓红,朱宏伟,等.柔性加筋挡墙的抗震性能及适用条件研究[J].铁道建筑,2017,57(12):85-88.  
 NIE Genliang, CHENG Xiaohong, ZHU Hongwei, et al. Seismic Performance and Applicable Conditions of Flexible Reinforced Retaining Walls[J]. Railway Engineering, 2017, 57(12): 85-88.

[3] 邱长林,张庆建.路基地震峰值加速度响应特性振动台试验研究[J].地震工程学报,2014,36(4):778-783.  
 QIU Changlin, ZHANG Qingjian. Shaking-table Tests on Response Characteristics of Seismic Peak Acceleration of Subgrade[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 778-783.

- [4] 赵涛,吴志坚,梁庆国,等.青藏高速公路路基地震动力响应分析[J].铁道科学与工程学报,2016,13(12):2381-2387.  
ZHAO Tao,WU Zhijian,LIANG Qingguo,et al.Seismic Dynamic Response Analysis of Embankment along the Qinghai-Tibet Expressway[J].Journal of Railway Science and Engineering,2016,13(12):2381-2387.
- [5] 付建.随机振动下大跨度钢管混凝土柱结构抗震性能测试方法[J].地震工程学报,2018,40(2):241-245.  
FU Jian.Research on Seismic Performance Testing Method of Long-span Concrete-filled Steel Tubular Columns under Random Vibrations[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(2):241-245.
- [6] 何江,王玉振.大跨度桥梁结构多级地震响应研究[J].地震工程学报,2018,40(1):26-31.  
HE Jiang,WANG Yuzhen.Study on the Multistage Seismic Response of Long-span Bridge Structures[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):26-31.
- [7] 徐鹏,蔡成标.列车-轨道-路基耦合振动及地震条件下行车安全性分析[J].中国铁道科学,2014,35(2):125-127.  
XU Peng,CAI Chengbiao.Study on Vibration of Train-Track-Subgrade Coupled System and Running Safety of Train in Earthquake[J].China Railway Science,2014,35(2):125-127.
- [8] 罗信伟,冯青松,柳宪东,等.现代有轨电车轨道路基联合优化分析[J].铁道标准设计,2017,61(9):50-54.  
LUO Xinwei,FENG Qingsong,LIU Xiandong,et al.Joint Optimization Analysis of Tack and Subgrade of Modern Tram[J].Railway Standard Design,2017,61(9):50-54.
- [9] 闫磊,李青宁,尹俊红,等.非规则曲线桥梁地震模拟振动台试验研究[J].世界地震工程,2016,(4):1-6.  
YAN Lei,LI Qingning,YIN Junhong,et al.Experimental Study on Shaking Table of Irregular Curved Bridge[J].World Earthquake Engineering,2016,(4):1-6.
- [10] 丁声荣,霍艳华.混凝土结构建筑物抗震加固强度测试仿真[J].计算机仿真,2017,34(8):429-432.  
DING Shengrong,HUO Yanhua.Strength Test and Simulation of Seismic Strengthening of Concrete Structures[J].Computer Simulation,2017,34(8):429-432.
- [11] 吴海波,王新妮.圆柱形支撑大跨度建筑结构强震冲击分析模型仿真[J].地震工程学报,2018,40(1):48-53.  
WU Haibo,WANG Xinni.Impact Analysis Model Simulation for Long-span Cylindrical Support Building Structures under Strong Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):48-53.
- [12] 姚玮,温树杰,孙汉正.浸水路基边坡最小势能稳定性分析方法[J].公路交通科技,2017,34(8):50-56.  
YAO Wei,WEN Shujie,SUN Hanzheng.An Analytical Method of Minimum Potential Energy Stability of Submerged Subgrade Slope[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2017,34(8):50-56.
- [13] 吕伟荣,胡益民,李远.节能型砌体组合墙片的抗震性能分析[J].地震研究,2014,37(2):293-297.  
LÜ Weirong,HU Yimin,LI Yuan.Analysis on Seismic Behavior of Composite Wall of Energy-saving Masonry[J].Journal of Seismological Research,2014,37(2):293-297.
- [14] WOODWARD P K,KENNEDY J,LAGHROUCHE O,et al.Study of Railway Track Stiffness Modification by Polyurethane Reinforcement of Theballast [J].Transportation Geotechnics,2014,1(4):214-224.
- [15] LONGPRE M A,KLUGEL A,DIEHL A,et al.Mixing in Mantle Magma Reservoirs Prior to and During the 2011-2012 Eruption at El Hierro, Canary Islands [J].Geology,2014,42(4):315-318.