路基地震峰值加速度响应特性振动台试验研究。

邱长林,张庆建

(天津大学建筑工程学院岩土工程研究所,天津 300072)

摘要:在采用拟静力法分析公路路基抗震稳定时,需要考虑路基对地震加速度产生动力放大效果的 影响。为了研究该放大效果,针对填方路基在强地震动作用下的动力响应,设计并完成了1:20比 尺的路基大型振动台模型试验。通过输入不同类型、幅值、频率的地震波激励,研究地震作用下路 基模型边坡地震峰值加速度的放大系数。试验结果表明,路基边坡对输入的水平地震波具有明显 的放大作用,而对竖向地震波的放大作用不明显。沿路基高程向上,水平地震波加速度峰值放大系 数呈现波动,且坡面的放大系数大于路基内部的放大系数。在不同类型、不同振幅和不同频率的地 震波作用下,路基地震峰值加速度放大系数具有明显的差异。试验结果可为确定路基抗震稳定设 计的动力荷载提供相应的参考。

Shaking-table Tests on Response Characteristics of Seismic Peak Acceleration of Subgrade

QIU Chang-lin, ZHANG Qing-jian

(Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Many slopes of subgrades fail during earthquakes. Therefore, it is necessary to evaluate the stability of slopes under seismic loading in the design of the subgrade. The pseudo-static method is one of the most frequently used methods in seismic stability analysis of slopes and is the specified method in the "Specifications of Seismic Designs for Highway Engineering." One of the key factors in this method is the effect of amplification of the peak acceleration of a seismic load. To study this effect, a large-scale shaking-table model was developed with a subgrade model at a scale of 1:20.A series of tests was performed with various inputs of seismic wave type, amplitude, and frequency. Seismic wave type included one type of artificial-seismic wave (sinusoidal wave) and two types of observed seismic waves (EL Centro and Wenchuan seismic waves). The amplitude and the frequency of each wave were determined by the scales of model similarity. In these tests, accelerometers were set at various locations in the subgrade model. Accelerations of the model under seismic loading were then measured in both vertical and horizontal directions. Amplification coefficients were calculated by dividing these accelerations by the measured acceleration at the surface of shaking-table. Test results show that horizontal seismic waves are greatly amplified by the subgrade; amplification of vertical seismic waves was not noticeable. Maximum amplification coefficients of 2.45 and 1.3 were located at the surface of the slope for both vertical and horizontal waves, respectively. The amplification coefficient of the horizontal seismic wave varied along the height of the subgrade and was divided into three stages of height increase such as increasing, decreasing, and later increasing again. The maximum amplification coefficient was reached at the highest point of the pavement, and it varied along the pavement. The amplification coefficients were greater at the surface of the slope than those inside for both horizontal and vertical seismic waves. For horizontal waves, the amplifications differed significantly under seismic waves with different frequencies, wave type, and amplitude. The amplification coefficient increased with an increase in frequency in the test. For the three types of input waves, the amplification coefficient was maximum under EL Centro seismic waves and minimum under sinusoidal waves. Moreover, the amplification coefficient decreased with an increase in amplitude. These results show that the amplification varies under different seismic loads and should be evaluated according to actual situations. Further, these results are helpful for determining seismic load in the seismic stability design of subgrades.

Key words: subgrade; seismic stability-peak acceleration; amplification coefficient; shaking-table test

0 引言

我国是一个多地震的国家, WI 度以上的高烈度 区覆盖了一半的国土, 仅 1955—1999 年的 45 年间, 造成严重破坏的 7 级以上地震就有 15 次, 如唐山地 震、海城地震、邢台地震等^[1]。这些灾害在给我国造 成了十分惨重的人员伤亡和经济损失的同时, 对路 基的稳定性也造成了极大的破坏, 如 2008 年 5 月 12 日的汶川地震导致重灾区 14 个县(市)主要公路 全部瘫痪, 主要铁路、通信、水库和城镇遭受严重破 坏。据统计, 灾害造成公路受损近 2.8×10⁴ km^[2]。 因此地震作用下路基的稳定性已成为岩土工程十分 关心的问题之一。

目前,路基稳定性的动力计算方法主要有拟静力法、Newmark方法和动力有限元方法^[2]。其中拟静力法是工程常用的方法,也是规范规定的路基抗震稳定验算方法^[4],但是该方法中的地震荷载作用需要采用其他方法进行确定;Newmark方法过于简单;动力有限元法由于边界条件、本构关系、计算条件等问题没有得到很好的解决,需要对模型做大量的简化,这些简化导致其计算结果的可信程度将无法确定,其分析总结出的规律需要实际震害或试验的验证。

由于地震具有突发性和不可预料性,通过现场 监测路基相应的地震响应过程非常困难。因此建立 在相似关系基础上的振动台模型试验就成为抗震试 验研究最主要的一种手段,并在高土石坝地震规律 研究方面得到广泛的应用^[5]。在路基的稳定性方 面,徐光兴等^[6]利用大型振动台模型探讨地震作用 下边坡的动力特性与动力响应规律,以及地震动参 数对动力特性和动力响应的影响;王建等^[7]利用振 动台模型试验研究了路堤的震害模式并验证了数值 分析的合理性,但未通过试验给出动力荷载的分布 规律;李金贝等设计了填方路基大型振动台模型试 验方案^[8],并利用大型振动台研究了带挡土墙的路 基动力响应、抗震薄弱部位、破坏过程以及地震动参 数对动力响应的影响^[9-10],但其针对的主要是带挡 土墙的路基动力特性。

路基动力稳定分析中的拟静力法是公路抗震规 范规定的路基抗震稳定验算方法^[4],在工程设计中 得到广泛的应用。因此,研究该方法中地震荷载的 取值对路基的抗震设计有极其重要的意义,而目前 对该问题的振动台试验研究较少。针对该问题,本 文通过大型振动台模型试验,分析了地震作用下边 坡动力荷载的分布规律,以及地震动参数对动力荷 载分布规律的影响,从而为拟静力法中地震荷载的 取值提供依据。

1 振动台试验方法

1.1 试验设备及模型

振动台包括激振器、台面、控制器、伺服器等部分,其示意图见图1。振动台工作频率范围为0.1~50 Hz,台面尺寸3m×6m,可承受试件最大重量为35 吨。

试验在模型箱内进行,模型箱内部尺寸为 2.8 m(长) 2.38 m(宽),在高度上不限制。箱的主体框架由 7 号等边角钢焊接而成,四面用 5 mm 厚型钢板围护。箱内采用防水海绵作为减震层内衬材料, 并用透明胶带将其紧贴于模型箱壁,厚度约为 5



mm。为了减小土体和模型箱两侧面的摩擦,表层 衬一层聚乙烯塑料薄膜。

振动台试验模型断面尺寸见图 2。在模型制作时,填土逐层铺设并压实,每层厚度控制在 15~20 cm 之内。





埋设的传感器包括土压力传感器、百分表和加 速度传感器,布置在模型挡墙和填土中间这两个纵 剖面上,具体布置位置见图 2,图中仅绘制了加速度 传感器。每一点的加速度计可同时监测三个方向上 加速度的变化。

1.2 相似关系及材料选择

模型设计最关键的是确定模型与原型之间的相 似关系。本试验以模型尺寸、密度和加速度为控制 量,按 Bockingham π定理导出了各物理量之间的 相似关系,见表 1。

选择现场填土土样为本模型试验的填料。由于 现场土样的最大粒径达 60 mm,需对超径料进行必 要的处理,然后依据现场筛分所得的填料级配情况, 添加适量的石英砂,以满足 C_E 、 C_ρ 和 C_μ 的相似率 要求。现场土样的含石量 30%,不均匀系数 C_u = 16.88,曲率系数 C_c =1.41。配制后的土样最大干密 度 $\rho_{dmax} = 2.09 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,最佳含水量 $w_{op} =$ 10.9%。

1.3 加载方式

试验输入的地震波为人工波和天然地震波,其

中天然地震波包括 EL Centro 和汶川波。输入过程 中,天然地震波按照相似率确定时间压缩比,改变相 应的频率,并按照设计方案改变其加速度峰值。

试验开始前先进行白噪声激励,以测定模型的 动力特性,然后根据设计方案输入地震波进行试验。 具体的地震波输入方案见表 2。每级别加速度的作 用时间为 30~60 s,施加完成后,停止 5 分钟左右进 行观测,然后再施加下一级的加速度。

表 1 振动台模型试验相似关系

Table 1 Similar relation of test model and prototype

物理量	符号及关系式	相似系数
长度 *	C_l	1/20
密度 *	$C_{ ho}$	1/1
弹性模量 *	C_E	1/1
时间	$C_t = C_l^{1/2}$	1/4.472
泊松比	C_{μ}	1/1
应力	$C_{\sigma} = C_E C_{\varepsilon}$	1/20
应变	$C_{\varepsilon} = C_l C_{\rho} C_E^{-1}$	1/20
位移	$C_u = C_l C_{\epsilon}$	1/400
速度	$C_{v} = C_{l}C_{t}^{-1}$	1/4.472
加速度	$C_a = C_l C_t^{-2}$	1/1
力	$C_F = C_\rho C_l^3$	1/8 000
频率	$C_f = C_{\rho}^{-1/3} C_l^{3/4}$	1/0.224

注:*表示为控制比尺,其他为导出比尺。

表 2 振动台模型试验加载制度

Table 2 Loading rule of shaking table test

序号	地震波描述	加速度峰值/g
1	EL波、汶川波、汶川波	0.05
2	EL波、正弦波、正弦波(竖向)	0.05
3	EL波、汶川波、正弦波、正弦波(竖向)	0.10
4	正弦波(竖向)	0.05
5	EL 波	0.10
6	EL 波	0.10
7	EL 波	0.10
8	EL 波	0.20
9	汶川波	0.20
10	正弦波、正弦波(竖向)	0.20
11	EL 波	0.30
12	汶川波	0.30
13	正弦波、正弦波(竖向)	0.30
14	EL 波	0.40

注:(1)每个荷载序列间施加白噪声激励; (2)没有特别说明的波方向为水平向;

(3)5、6、7号波的相似比分别为 5.536、3.113 和 1.750。

2 路基边坡的加速度动力响应分析

2.1 路基边坡的水平加速度动力响应分析

各测点动力响应加速度峰值与振动台台面实测 加速度峰值的比值为放大系数,则图3给出了输入 波为2号的EL波时路基各测点处水平向地震波放 大系数随高度的变化规律,此时的输入峰值加速度 为 0.05 g。从图 3(a)可以看出,沿路基坡面方向上, 路基边坡对水平向输入地震动具有明显的放大作 用。该结果还表明,放大系数并不随路基高度的增 加而单调增加,而是可以分为三个阶段:从路基底部 向上到测点 2,放大系数随高度的增加而增加;从测 点 2 到到测点 5,随高度的增加,放大系数开始又降 低;从测点 5 到路面的测点 7,加速度放大系数又随 着高度的增加而增加,而且增加速度明显变大。该 规律与王建等^[7]通过计算得到的放大系数形态中的 第二种,即"三段形态"(h >20 m)的规律一致。最 大的放大系数位于路基表面,约为 2.45。从图 3(b) 中的曲线可以看出,该位置处的放大系数规律与图 3(a)的规律基本相同,沿高度也是分为三段,但是放 大系数的数值明显小于坡面的数值,路基表面的最





图 4 给出了输入波为 2 号的 EL 波时路基表面 上水平向的放大系数沿路面宽度的分布。从图中可 以看出,随着离坡面距离的增加加速度响应峰值成 增大趋势,当达到峰值后又衰减。由于路基坡面的 不对称性,其峰值分布的最大值位置不在路基表面 的中间,而是在路基中间靠近下坡面的位置。

2.2 路基边坡的竖向加速度动力响应分析

图 5 给出了序号 4 荷载作用下路基坡面各测点



处竖向放大系数随坡高的变化规律。从图 5(a)可 以看出,沿坡面方向向上,路基边坡对竖直向输入地 震动具有一定的放大作用,但放大系数较小,平均大 约为 1.2 左右。从图 5(b)可以看出,在路基内部加 速度放大作用不明显,甚至出现小于 1.0 的现象。

图 6 为竖向地震波在路基表面的分布规律。该 图表明,随着离坡面距离的增加放大系数呈递减趋势,但是变化幅度很小,可以认为没有变化,平均值 约为 0.95 左右。图 5 和图 6 的结果表明,边坡对于 竖直向输入的正弦波没有明显的放大作用。



3.1 地震波频率对放大系数的影响

对路基断面输入幅值为 0.1 g、时间压缩比分别 为 5.536、3.113 和 1.75 的 EL 波激振试验(对应于 试验加载制度中的序号 5、6 和 7),测量不同压缩比 条件下路基的放大系数,三种工况下坡面测点 6、7 处的放大系数如图 7 所示。从图 7 中可以看出,当 压缩比较小时,测点 6 和测点 7 的放大系数分别为 1.0 和 1.1,随着压缩比的增加,输入地震波频率的 增大,坡面各测点放大系数呈现明显的增大趋势。 在压缩比为 5.536 时,测点 6 和测点 7 的放大系数 分别达到 1.6 和 1.8,远大于压缩比为 1.75 时对应的 放大系数。





Fig.7 Amplification coefficients under seismic waves with different frequencies

3.2 地震波类型对路基边坡动力响应的影响

分别输入 EL 波、汶川波和正弦波三种地震波 波型,各种波水平向幅值为 0.1 g(对应于试验加载 制度中的序号 3 中的前三个波)。三种波形作用下 测点 6、7 处放大系数如图 8 所示。从图中可以看 出,这两个测点的动态反应中, EL 波作用下坡面加 速度放大最多,分别达到 1.7 和 1.9;汶川波次之,分 别为 1.1 和 1.4;正弦波放大系数最小,分别仅为 1.1 和 1.3。这个结果表明,不同的波形对路基的放大系 数影响是非常大的。



图 8 不同类型的地震波作用下坡面放大系数

Fig.8 Amplification coefficients of slope under different types of seismic waves

3.3 地震波幅值对路基边坡动力晌应的影响

为研究地震波幅值对路基边坡动力响应的影响,进行了加速度幅值分别为 0.05、0.1、0.2、0.3 和 0.4 g的激振试验,结果如图 9 所示。从图中可以看出,随着振幅的增加放大系数有所降低,特别是当幅 值低于 0.1 g时,降低的速度比较大,当幅值大于 0.1 g后,放大系数随振幅的增加而减小的幅值比较小,此时影响不大。根据规范规定^[4],公路工程构筑 物的地震基本烈度对应的水平向设计基本地震动峰 值加速度如表 3 所示。表 3 和图 9 结果表明,地震 基本烈度为 II 度时,其放大系数应该取较大的值; II 度及 II 度以上的烈度时,放大系数取值可以取较小的放大系数。



图 9 不同振幅地震波作用下放大系数

Fig.9 Amplification coefficients under seismic waves with different amplitudes

表 3 地震基本烈度和水平向设计基本地震动峰值加速度

Table 3 Basic seismic intensity and horizontal peak acceleration

烈度	VI	VII	VIII	IX
A_h/g	≥ 0.05	0.10 0.15	0.20 0.30	0.40

783

4 结论

本文利用大型振动台模型试验,研究了边坡对 地震加速度的影响。通过研究,得出如下结论:

(1) 路基边坡对水平地震加速度有明显的放大 作用,且坡面位置的放大效果大于内部的放大作用;

(2)无论是沿着路基边坡坡面还是路基边坡内 部,路基边坡对竖向地震加速度的放大作用不明显;

(3)路基的加速度放大作用与输入地震动的类型、峰值强度以及频率等动荷载的动力特性有关,不同地震波作用下的地震动响应差异明显。在实际工程设计中,需要根据实际情况进行具体的分析。

参考文献(References)

- [1] 陈国兴.岩土地震工程学[M].北京:科学出版社,2007.
 CHEN Guo-xing. Geotechnical Earthquake Engineering[M].
 Beijing:Science Press,2007.(in Chinese)
- [2] 姚令侃,冯俊德,杨明.汶川地震路基震害分析及对抗震规范改进的启示[J].西南交通大学学报,2009,44(3):301-311. YAO Ling-kan,FENG Jun-de,YANG Ming.Damage Analysis of Subgrade Engineering in Wenchuan Earthquake and Recommendations for Improving Seismic Design Code[J].Journal of Southwest Jiaotong University,2009,44(3):301-311.(in Chinese)
- [3] 薄景山,徐国栋,景立平.土边坡地震反应及其动力稳定性分析
 [J].地震工程与工程振动,2001,21(2):116-120.
 BO Jing-shan, XU Guo-dong, JING Li-ping. Seismic Response and Dynamic Stability Analysis of Soil Slopes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(2): 116-120. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国交通运输部.公路工程抗震规范(JTG B02-2013)[S].北京:人民交通出版社,2014.

Ministry of Transport of the People's Republic of China.Specification of Seismic Design for Highway Engineering(JTG B02 -2013)[S].Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese).

[5] 刘汉龙.土动力学与土工抗震研究进展综述[J].土木工程学

报,2012,45(4):148-164.

LIU Han-long. A Review of Recent Advances in Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4):148-164. (in Chinese)

[6] 徐光兴,姚令侃,高召宁,等.边坡动力特性与动力响应的大型 振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3): 624-632.

XU Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-ning, et al. Largescale Shaking Table Model Test Study on Dynamic Characteristics and Dynamic Responses of Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (3): 624-632. (in Chinese)

[7] 王建,姚令侃,吴伟.路堤震害模式及路堤动力特性研究[J].岩 土力学,2010,31(12):3801-3108.
WANG Jian, YAO Ling-kan, WU Wei. Research on Seismic Damage Mode and Dynamic Characteristics of Road Embankment[J].Rock and Soil Mechanics,2010,31(12): 3801-3108.

(in Chinese)

- [8] 李金贝,张鸿儒,李志强,高烈度地震区公路填方路基大型振动 台模型试验[J].公路交通科技,2011,28(11):1-6. LI Jin-bei,ZHANG Hong-ru,LI Zhi-qiang.Large-scale Shaking Table Model Test for Fill Subgrade of Highway in High-intensity Earthquake Area[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(11): 1-6.(in Chinese)
- [9] 李金贝,张鸿儒,李志强.填方路基振动台动力破坏试验研究 [J].岩土力学,2011,32(10):3075-3081.

LI Jin-bei,ZHANG Hong-ru,LI Zhi-qiang.Experimental Study of Dynamic Failure of Fill Subgrades Using a Shaking Table [J].Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3075-3081.(in Chinese)

[10] 李金贝,张鸿儒,李志强.路基动力响应与动力破坏的大型振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增2): 3746-3754.

LI Jin-bei, ZHANG Hong-ru, LI Zhi-qiang. Large-scale Shaking Table Model Test Study of Dynamic Response and Dynamic Failure of Subgrade[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (Supp. 2): 3746-3754. (in Chinese)