

# 浅埋偏压小净距隧道衬砌地震应变规律研究\*

江学良,王飞飞,杨慧,连鹏远,牛家永

(中南林业科技大学 a.土木工程与力学学院, b.岩土工程研究所,长沙 410004)

**摘要:**设计并制作了比例为1:10的浅埋偏压小净距隧道物理试验模型,并开展了大型振动台试验,研究了地震波类型及加速度激振峰值对浅埋偏压小净距隧道衬砌应变响应规律的影响。研究表明:在0.1g与0.2g的工况下,衬砌的拉应变变化趋势较为相近且平缓;在0.4g与0.6g的工况下,衬砌的拉应变变化趋势较为相近且波动较大。拉应变受地震波类型的影响较小,而受地震波加速度激振峰值的影响较明显且随着加速度激振峰值增大而增大。在衬砌拱脚及拱顶处会产生较大的拉应变。衬砌的拉应变大于压应变且拉应变的变化趋势较为明显。在不同的加载波类型和不同的加速度激振峰值作用下,应变变化趋势呈现明显的非线性变化特征。研究结果可为浅埋偏压小净距隧道的设计与建设提供有益参考。

**关键词:**隧道工程;振动台模型试验;浅埋偏压小净距隧道;应变响应

中图分类号:U45

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2017)01-0506-11

## Study on Seismic Lining Strain Law of Shallow-buried Bias Tunnel with Small Clear Distance

Jiang Xueliang, Wang Feifei, Yang Hui, Lian Pengyuan, Niu Jiayong

(a. School of Civil Engineering and Mechanics, b. Rock and Soil Engineering Research Institute, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, P.R. China)

**Abstract:** A physical test model of shallow-buried bias tunnel with small clear distance of 1:10 was made to perform the large-scale shaking table tests. Influences of seismic wave type and acceleration excitation peak value were studied on the lining strain response laws of shallow-buried bias tunnel with small clear distance. The results show that under the conditions of 0.1 g and 0.2 g, the tension strain variation trends are similar and gentle, but under the conditions of 0.4 g and 0.6 g, the tension strain variation trends are similar with large fluctuation. The tension strain is less affected by the type of seismic wave, but it obviously increases with the increase of the acceleration excitation peak value. Larger tension strain can be generated at arch foot and arch crown of lining. The tension strain of lining is larger than compression strain, and the change trend of the tension strain is more obvious. Under different types of seismic wave and different acceleration excitation peak values, changing trend of strain presents obvious nonlinear characteristics. The research results can provide useful reference for the design and construction of shallow buried bias tunnel with small clear distance.

**Keywords:** tunneling engineering; shaking table model test; shallow-buried bias tunnel with small clear distance; strain response

\* 收稿日期:2016-09-08(修改稿)

作者简介:江学良(1977-),男,湖南桃江人,博士,教授,主要从事地下工程抗震的教学与研究工作。

E-mail: iamjxl@163.com

通讯作者:王飞飞(1991-),男,安徽蚌埠人,硕士生,主要从事地下工程领域抗震减震研究。

E-mail: 18274897949@163.com

基金项目:国家自然科学基金(51204125, 51404309)

0 引言

随着我国经济的发展,西部大开发战略的稳步推进,西部地区的交通得到较快发展。但因西部地区地形地质复杂、地震多发,给公路、铁路隧道的修建带来很大的困难。受地形、地质与环境等客观条件的限制,小净距隧道可能成为隧道建设的最优方案。小净距隧道是介于普通分离式隧道与连拱隧道的一种新型隧道结构形式,在工程实践中已经得到应用<sup>[1]</sup>。

因地下结构相对于地上结构其抗震性能较强,在我国进行有关地下结构抗震的研究起步较晚且相关研究工作开展较少。近些年来国内发生的地震对隧道产生一定程度上的破坏<sup>[2-3]</sup>,地下结构抗减震的重要性逐渐被重视。目前,已有学者开展地下结构振动台模型试验的相关研究。殷琳等<sup>[4]</sup>进行了土-地下结构动力相互作用的大型振动台模型试验,分析了地下结构的加速度反应和应变反应规律。周林聪等<sup>[5]</sup>通过大型振动台试验,总结了地下结构地震反应规律,并分析了地下结构的变形机制。高峰等<sup>[6]</sup>通过大型振动台模型试验,研究了不同地震波类型、地震强度及不同埋深隧道下的地震响应。方林等<sup>[7]</sup>开展了穿越断层隧道振动台模型试验研究,试验重点研究在地震作用下穿越断层隧道动力响应规律及特征。王峥峥等<sup>[8]</sup>开展了隧道洞口段抗减震大型振动台模型试验,通过对有无

减震层体系对比试验研究了减震层的减震效果。申玉生等<sup>[9]</sup>对山岭隧道洞口段进行了大型振动台模型试验,分析了强震区山岭隧道洞口段结构动力的特性。蒋树屏等<sup>[10]</sup>通过大型振动台模型试验,研究了隧道洞口段的地震动力响应及洞口段地震动力响应特点。由以上学者开展的振动台模型试验研究可知,地下结构抗震研究取得了一定的成果,而对基于大型振动台模型试验的浅埋偏压小净距隧道衬砌应变响应规律研究较少。

浅埋偏压小净距隧道与其他形式隧道相比,具有上覆岩层较薄、围岩压力不对称、整体稳定性差等特点,衬砌应变响应规律定不同于其他形式隧道衬砌。基于相似理论,笔者设计并制作了比例为1:10的浅埋偏压小净距隧道试验模型,并进行了振动台试验,研究了其在地震波类型和不同的加速度激振峰值条件下的应变响应规律。研究成果促进了对浅埋偏压小净距隧道在地震作用下动力特性的认识,为此类隧道抗震减震设计提供有益参考。

1 振动台试验方案设计

1.1 试验设备

试验由中南大学高速铁路建造技术国家工程实验室中的一个三向六自由度振动台完成。振动台的台面尺寸及各项参数如表1所示,设备如图1所示。

表1 振动台的主要参数  
Table 1 Primary parameters of shaking table

台面尺寸 /m <sup>2</sup>	自由度	最大位移 /mm	加速度	最大地震 振动速度 /(mm·s <sup>-1</sup> )	最大倾覆 力矩 /ton·m	最大偏心 力矩 /ton·m	最大 承重 /ton	工作 频率 /Hz
4×4	6Dofs in 3directions	X:250	1.0g	1 000	30	20	30	0.1~50
		Y:250	±1.0g					
		Z:250	±1.6g					

1.2 模型相似关系的确定

由相似理论可知,模型与原型的相关参数必须满足相似关系,而在实际情况下却很难完全满足相似关系的要求,需要将几何相似比、加速度相似比和密度相似比作为相似关系的主控因素,并对一些次要的影响因素进行弱化处理。

综合考虑振动台尺寸、测试仪器相关参数、承载能力和模型边界效应等因素,确定 $C_l=10$ , $C_a=1$ , $C_\rho=1$ ,其他主要相似常数均可由相似理论和量纲分析方法<sup>[11-13]</sup>推出。模型主要相似常数如表2所示。

表 2 模型主要相似常数

Table 2 Primary similitude coefficients of model		
物理量	相似比表达式	相似比
长度/m	$C_l$	10
密度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$C_\rho$	1
弹性模量/MPa	$C_E = C_l \cdot C_\rho$	10
应变	$C_\epsilon = 1$	1
应力/kPa	$C_\sigma = C_l \cdot C_\rho$	10
泊松比	$C_\mu = 1$	1
时间/s	$C_v = C_{l0.5}$	3.16
加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	$C_a = 1$	1
位移/mm	$C_u = C_l$	10
速度/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$C_v = C_{l0.5}$	3.16
频率/Hz	$C_\omega = 1$	1



图 1 三向地震模拟试验台

Fig.1 Triaxial seismic simulation testing table

1.3 模型边界设计

试验采用的是刚性模型箱,其内部尺寸为 3.5 m×1.5 m×2.1 m (长×宽×高)。原型在实际中是半无限体,而试验中模型会受到模型箱的约束,同时,在振动过程中模型箱边界会对地震波产生反射,会出现模型箱效应<sup>[14]</sup>。为了减小模型箱效应对试验结果产生的影响,对模型箱边界进行滑动边界、摩擦边界和柔性边界处理,在模型箱底部用粒径 4 cm 的碎石和中砂将底部处理成摩擦边界,预防模型与模型箱出现相对滑移;为了减少模型箱反射地震波对试验的影响,在模型箱三个侧壁内粘贴

5 cm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料板用来吸收反射地震波;平行于隧道轴线方向的模型箱内壁处理成柔性边界,减少侧壁对岩层应变的约束作用。垂直于隧道轴线方向的模型箱内壁在聚苯乙烯泡沫塑料板表面粘贴一层聚乙烯薄膜,将内壁处理成滑动边界<sup>[15]</sup>。模型箱边界经处理后的效果如图 2 所示。通过对模型进行模态分析得知,模型箱自振频率远离模型自振频率,在振动台试验中模型箱与试验模型不会发生共振现象。

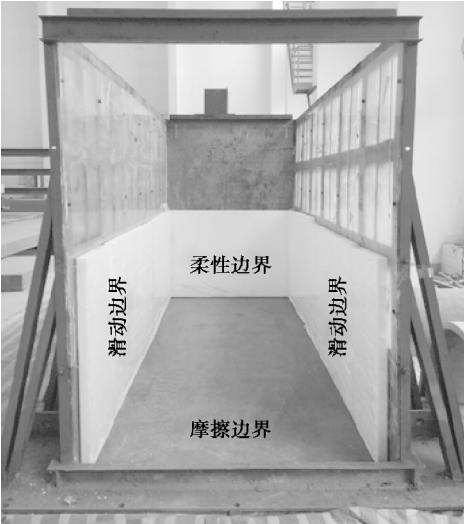


图 2 模型边界处理方法

Fig.2 Processing method of model boundary

1.4 模型的制作

衬砌模型采用与混凝土各项物理性能相近的微混凝土制作,钢筋则用镀锌铁丝模拟,依据相似常数确定衬砌厚度为 4 cm,衬砌强度按照应力相似比换算强度为 5 MPa,经过多次配比试验,确定最佳衬砌模型材料配比为 1 : 6.9 : 1.3 (水泥 : 砂 : 水),衬砌采用预制成形方式进行制作。进行本次试验的偏压隧道是由地形因素引起的,边坡坡度约为 1 : 1.2,模型长 3.5 m、宽 1.5 m、高 1.8 m,偏压隧道的围岩分为 3 层,从上而下依次为Ⅲ类弱风化岩、Ⅳ类软岩、Ⅲ类硬岩,隧道宽度为 0.7 m,埋深 0.9 m,中隔墙厚度为 0.4 m。围岩在地震作用时弹性系数和应变关系不明确,故采用与岩层性质相近的砂浆模拟,其中Ⅲ类弱风化岩配比 1 : 5.58 : 1.04,Ⅳ类软岩配比 1 : 7.25 : 1.35,Ⅲ类硬岩配比 1 : 6.30 : 1.17 (水泥 : 砂 : 水),围岩及隧道如图 3 所示。由相似关系可确定模型中围岩及衬砌材料的几个关键物理力学参数,如表 3 所示。

表3 岩层与衬砌材料参数  
Table 3 Material parameters of rock and lining

岩体类别	弹性模量 /MPa	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚力 $C$ /kPa	容重 $\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	抗压强度 /MPa
弱风化岩	6 000	0.25	39	700	23	75
软岩	1 300	0.3	27	200	20	50
硬岩	189 000	0.3	50	1 500	25	100
衬砌	34 500	0.167	—	—	24	—

1.5 传感器的布置

试验使用型号为 BX120-100AA、电阻为  $120.3\pm 0.2\ \Omega$ 、尺寸为  $100\ \text{m}\times 3\ \text{mm}$ 、灵敏度为  $2.08\pm 1\%$  的应变片。在每个洞衬砌内壁的拱脚、拱肩及拱顶处

布置 5 个关键测点,右洞测点编号为 1~5,左洞测点编号为 6~10。应变片编号为 S-1~S-10,最终各个传感器布置如图 3 所示。

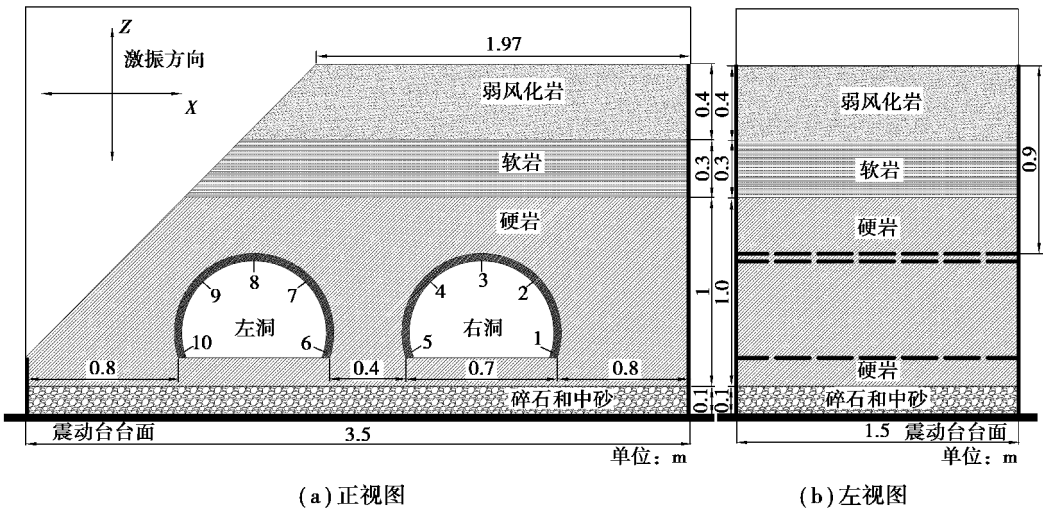


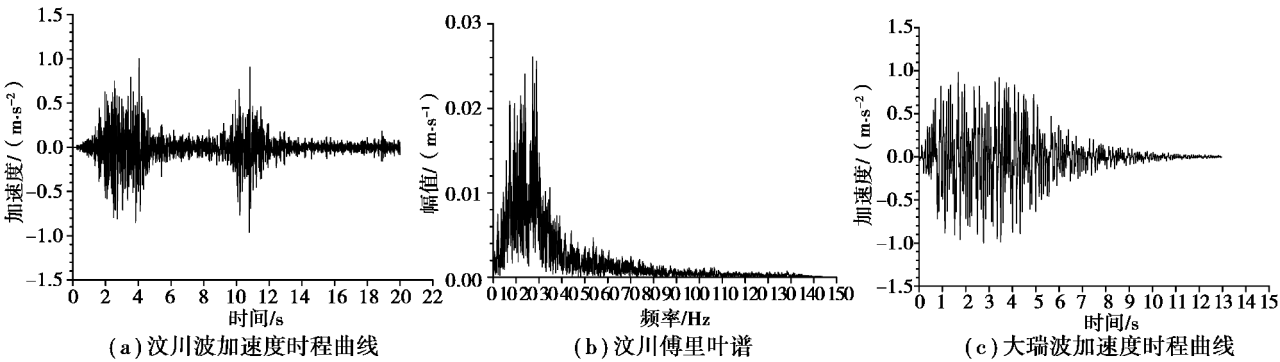
图3 隧道围岩与传感器布置

Fig.3 Tunnel surrounding rock and layout of transducer

1.6 地震波输入与加载制度

在发生地震时,建(构)筑物受到的地震波作用较为复杂。为更加贴合地震发生时的实际情况,振动台模型试验采用水平向和竖向双向加载的汶川波(WC-XZ)、大瑞波(DR-XZ)和 Kobe 波(K-XZ)这

3 种地震波作为振动台加载波,水平向( $X$ 向)为垂直隧道轴线方向,竖向( $Z$ 向)为垂直振动台面方向。3 种加载波的加速度时程曲线与傅里叶谱如图 4 所示。从傅氏谱可知汶川波、大瑞波及 Kobe 波的卓越频率分别为  $8\sim 20\ \text{Hz}$ 、 $4\sim 14\ \text{Hz}$ 、 $4\sim 13\ \text{Hz}$ 。





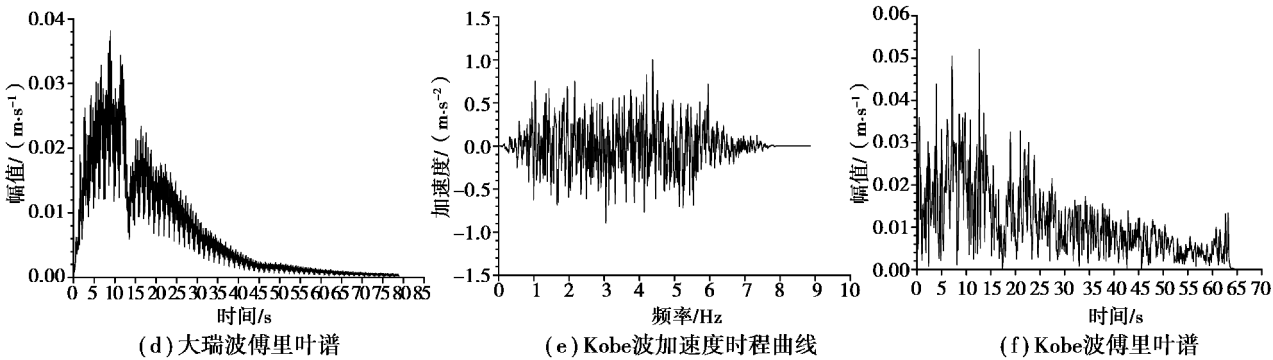


图 4 不同地震波加速度时程曲线及傅里叶谱

Fig.4 Acceleration time-history curves and Fourier spectrum of different seismic waves

在试验的水平地震波和竖向地震波合成波中,竖向地震波取水平向地震波加速度激振峰值的2/3进行合成<sup>[16]</sup>。振动台加载波加速度激振峰值按0.1g、0.2g、0.4g与0.6g逐级加载<sup>[17]</sup>。在振动台每次加载地震波前,都加载了时长为60s白噪声(WN-XZ),以便观察模型动力特性的情况变化。试验共有16个工况,具体加载制度如表4。

表 4 振动台模型试验加载制度

Table 4 Loading rule of shaking table test			
序号	工况	激振峰值/(m·s <sup>-2</sup> )	
	代号	X向	Z向
1	WN-XZ	—	—
2	WC-XZ	0.1	0.067
3	DR-XZ	0.1	0.067
4	K-XZ	0.1	0.067
5	WN-XZ	—	—
6	WC-XZ	0.2	0.133
7	DR-XZ	0.2	0.133
8	K-XZ	0.2	0.133
9	WN-XZ	—	—
10	WC-XZ	0.4	0.267
11	DR-XZ	0.4	0.267
12	K-XZ	0.4	0.267
13	WN-XZ	—	—
14	WC-XZ	0.6	0.400
15	DR-XZ	0.6	0.400
16	K-XZ	0.6	0.400

2 隧道衬砌应变响应规律

本文主要分析衬砌在WC-XZ、DR-XZ和K-XZ加载波作用下的拉压应变响应规律。由于在地震波的作用下衬砌主应力的大小和方向很难确定,所以应变片贴成如图5所示的45°三轴应变花形式,有利于计算主应变最大值和最小值。再由式(1)和式(2)计算出最大主应变和最小主应变,最大主应变为拉应变,数值为正,最小主应变为压应变,数值为负。

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{2} [ (\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \sqrt{2 [ (\varepsilon_x - \varepsilon_u)^2 + (\varepsilon_u - \varepsilon_y)^2 ] } ]$$
 (1)

$$\varepsilon_{\min} = \frac{1}{2} [ (\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \sqrt{2 [ (\varepsilon_x - \varepsilon_u)^2 + (\varepsilon_u - \varepsilon_y)^2 ] } ]$$
 (2)



图 5 45°应变花

Fig.5 45°strain rosette

限于篇幅,图6与图7中仅给出0.2g工况下,衬砌拱顶测点拉压应变在WC-XZ波作用下的时程曲线。由图6和图7可知,在地震波激振结束后,衬砌在每个方向都产生一定残余应变。衬砌上各个测点的应变响应峰值如表5所示,在不同种类地震波及不同加速度激振峰值条件下,应变的变化规律如图8~11所示。

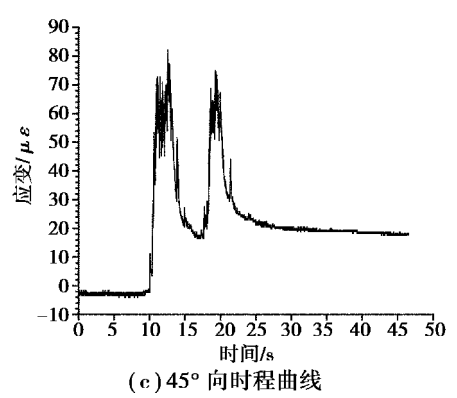
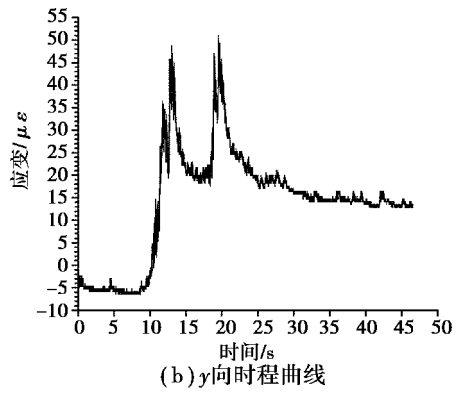
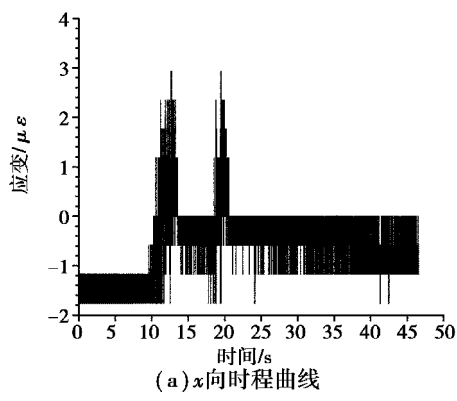


图6 右洞拱顶应变时程曲线

Fig.6 Time-history curve of strain at the right hole vault

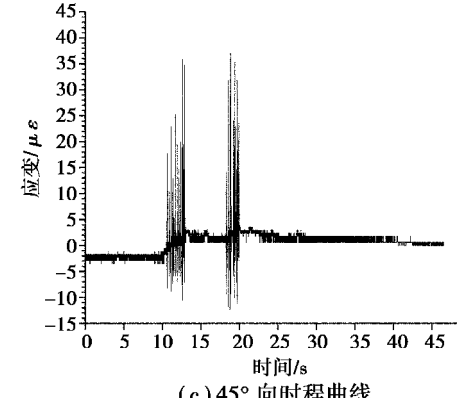
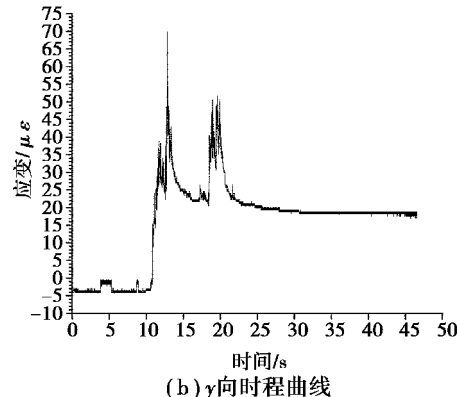
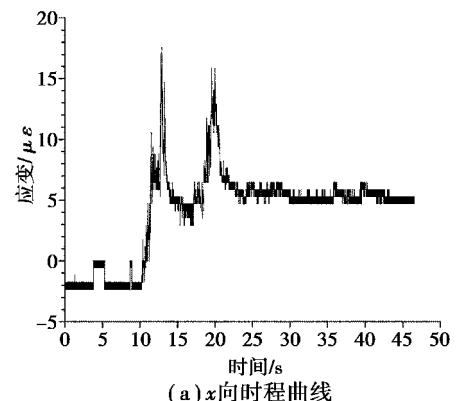


图7 左洞拱顶应变时程曲线

Fig.7 Time-history curve of strain at the left hole vault

表5 测点应变值(με)  
Table 5 Strain value of measuring points(με)

测点	加载波	0.1g		0.2g		0.4g		0.6g	
		ε拉	ε压	ε拉	ε压	ε拉	ε压	ε拉	ε压
1	WC-XZ	56.93	-57.52	108.73	-99.92	336.37	-297.04	1125.15	-1057.65
	DR-XZ	68.15	-58.11	118.60	-113.88	2 019.60	-1 952.10	1 125.10	-1 057.70
	K-XZ	23.51	-22.91	55.51	-49.89	1 858.20	-1 833.60	2 506.20	-2 425.20
2	WC-XZ	102.68	-17.62	132.89	-13.80	136.06	-19.95	169.50	-47.92
	DR-XZ	98.48	-12.59	131.94	-17.61	159.97	-120.66	326.21	-57.64
	K-XZ	76.65	-15.43	131.89	-15.92	147.10	-17.06	252.27	-73.02

续表5

测点	加载波	0.1g		0.2g		0.4g		0.6g	
		$\varepsilon_{拉}$	$\varepsilon_{压}$	$\varepsilon_{拉}$	$\varepsilon_{压}$	$\varepsilon_{拉}$	$\varepsilon_{压}$	$\varepsilon_{拉}$	$\varepsilon_{压}$
3	WC-XZ	38.48	-29.67	83.61	-67.61	174.31	-62.52	248.20	-151.82
	DR-XZ	44.47	-21.25	108.92	-71.92	190.72	-121.77	368.19	-175.43
	K-XZ	45.38	-32.29	93.96	-56.93	177.83	-105.64	280.75	-124.10
4	WC-XZ	12.92	-3.05	37.69	-6.62	100.01	-11.07	133.00	-29.63
	DR-XZ	13.05	-0.57	29.23	-10.74	87.47	-33.27	189.34	-54.34
	K-XZ	7.01	-4.76	24.66	-7.05	102.61	-6.58	137.71	-13.41
5	WC-XZ	21.15	-14.54	296.72	-29.68	616.18	-83.26	819.43	-60.65
	DR-XZ	34.56	-23.41	296.56	-27.96	724.51	-222.38	774.96	-116.21
	K-XZ	23.70	-18.33	249.92	-25.72	397.84	-29.56	450.54	-56.45
6	WC-XZ	25.14	-8.36	40.29	-3.89	48.36	-6.01	42.57	-17.26
	DR-XZ	33.88	-13.98	37.89	-4.25	55.64	-16.54	41.91	-16.93
	K-XZ	12.09	-4.96	21.85	-3.53	43.45	-10.3	34.49	-11.88
7	WC-XZ	19.20	-6.01	46.39	-3.97	39.73	-4.72	32.08	-9.16
	DR-XZ	21.84	10.02	38.67	-11.76	29.07	-9.56	33.54	-8.82
	K-XZ	14.94	-4.21	30.38	-8.72	23.96	-10.15	26.18	-12.59
8	WC-XZ	35.22	-26.43	90.89	-18.19	151.16	-16.03	144.88	-32.42
	DR-XZ	61.08	-34.64	72.76	-41.71	148.21	-93.80	189.39	-60.88
	K-XZ	43.24	-19.71	61.04	-18.08	145.41	-36.60	175.97	-27.89
10	WC-XZ	20.09	-29.26	37.64	-28.19	80.76	-24.08	88.62	-56.40
	DR-XZ	60.12	-91.57	71.68	-51.80	121.36	-48.30	166.48	-84.95
	K-XZ	29.93	-24.07	50.58	-35.88	96.00	-58.12	145.59	-93.38

\* 注:测点 9 应变片异常。

2.1 隧道衬砌拉应变响应规律分析

在不同地震波类型及不同加速度激振峰值情况下,隧道衬砌各个测点的拉应变变化规律如图 8 及图 9 所示。

由图 8 可知,在 3 种波的作用下,右洞拉应变整体变化趋势较为相似。0.1g 和 0.2g 的工况下,拉应变变化趋势不大;而 0.4g 和 0.6g 的工况下,拉应变变化趋势较为明显且测点 1 与测点 5 的拉应变均较大。产生此现象原因可能是地震波加速度

激振峰值在较小的情况下,对测点的拉应变响应影响较小,而随着地震波加速度激振峰值的增大,对测点的拉应变响应的影响增大。

由图 9 可知,在 3 种加载波的作用下,左洞拉应变整体变化趋势相近。在 0.1g 和 0.2g 的工况下,拉应变变化趋势相对较为平缓;而 0.4g 和 0.6g 的工况下拉应变变化趋势较大,特别是测点 7 到测点 8 的变化过程较为强烈,测点 8 的应变达到最大值。原因可能是由于偏压小净距隧道左洞整体受

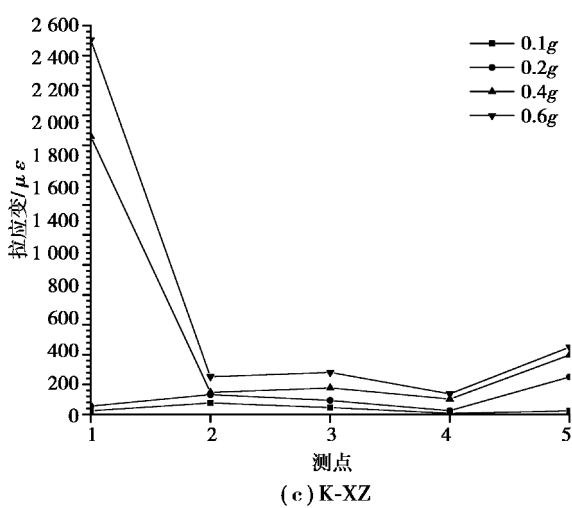
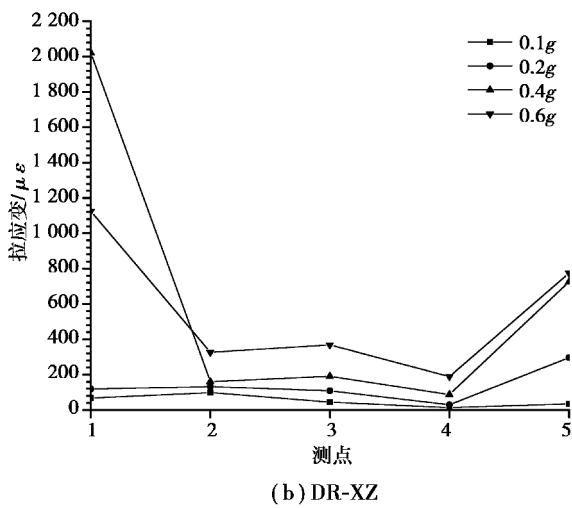
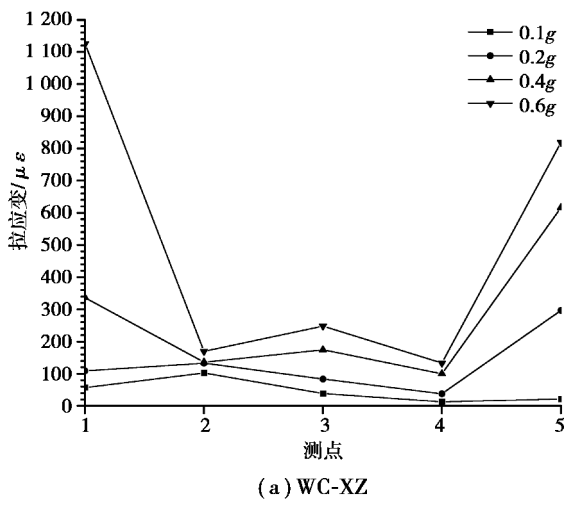


图8 右洞测点的拉应变

Fig.8 Tension strain of measuring points in the right hole  
力不平衡,以及右洞对左洞产生的影响所致。左洞左半拱相对右半拱拉应变整体差异较大,可能是因为左半拱与边坡距离较近,边坡与隧道在地震波作用下产生耦合作用。

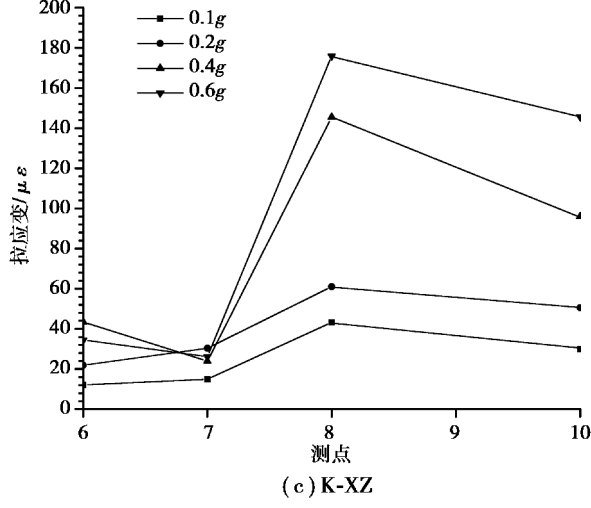
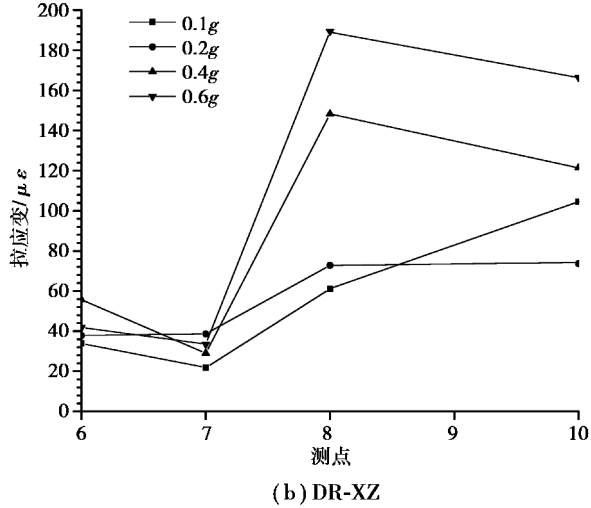
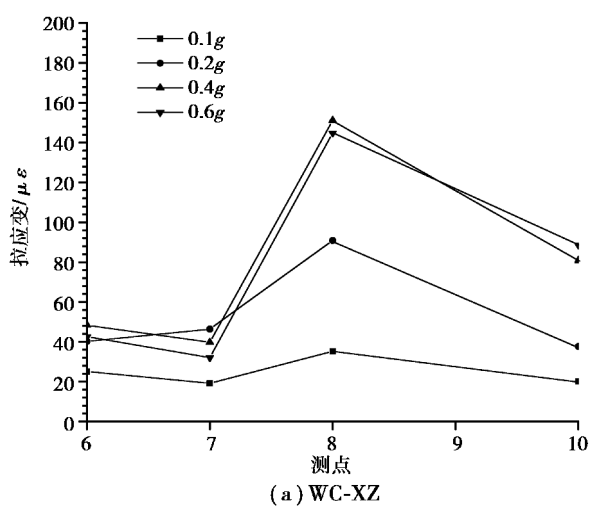


图9 左洞测点的拉应变

Fig.9 Tension strain of measuring point in left hole  
由图8及图9可知,0.1g与0.2g的工况下,拉应变变化趋势较为相近且变化趋势较为平缓,而0.4g与0.6g的工况下拉应变变化趋势较为相近且图形变化趋势较大。在WC-XZ、DR-XZ和K-XZ 3



种波的作用下,拉应变皆为随着加载波加速度激振峰值的增大而增大。同种加载波类型或相同加速度激振峰值的情况下,左洞与右洞拉应变变化趋势差异很大,说明左右洞拉应变响应规律方面具有很大的差异。

2.2 隧道衬砌压应变响应规律分析

在不同地震波加载及不同加速度激振峰值的情况下,左右洞各个测点的压应变变化规律如图 10 及图 11 所示。

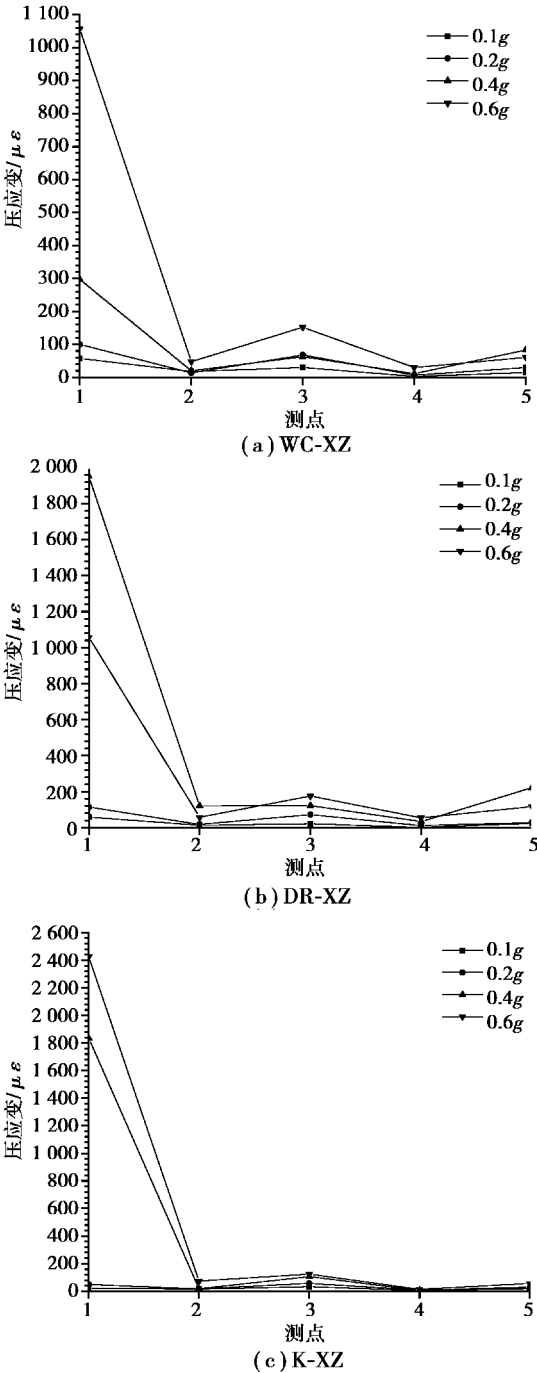


图 10 右洞测点的压应变

Fig.10 Compressive strain of measuring points in the right hole

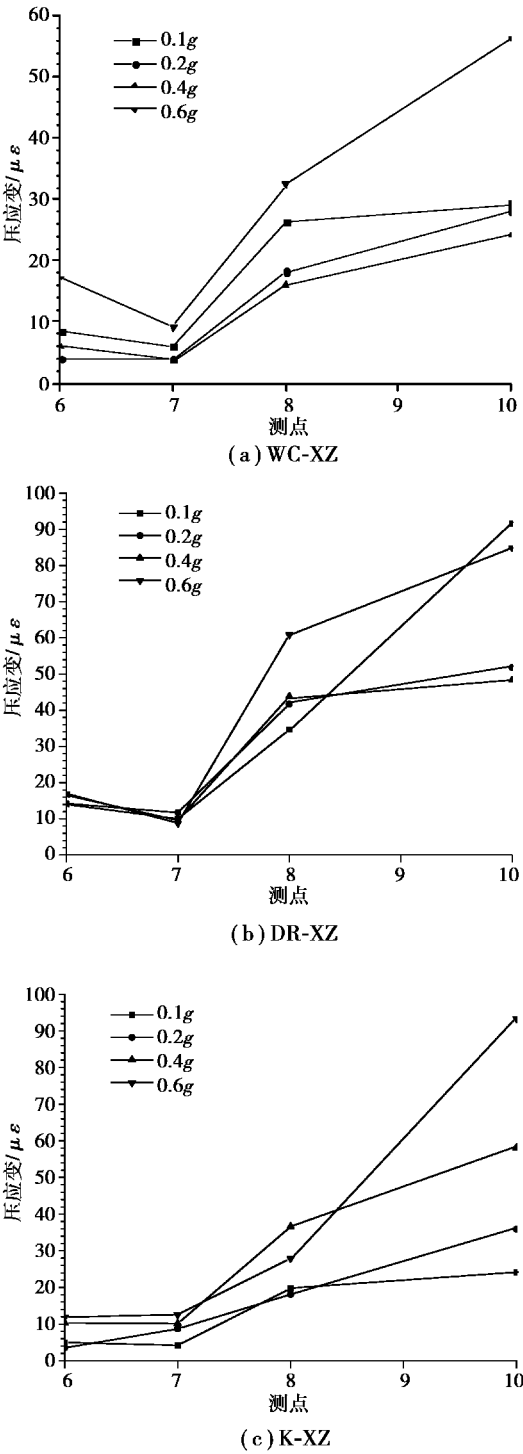


图 11 左洞测点的压应变

Fig.11 Compressive strain of measuring points in the left hole

由图 10 可知,在 3 种不同加载波的作用下,右洞压应变整体变化趋势相差较小。0.1g 和 0.2g 的工况下,压应变变化趋势不大,但在拱顶及右拱脚处压应变较大;而 0.4g 和 0.6g 的工况下压应变变化趋势为测点 1 到测点 2 变化较大且测点 1 产生

较大压应变。在 3 种加载波的作用下,压应变皆为随着加载波加速度激振峰值的增大而增大。

由图 11 可知,压应变总体变化趋势是递增的。左洞右半拱的压应变相对左半拱较小,可能是由于右半拱与边坡的距离较近,偏压状态明显,在地震波作用下产生较大的压应变;左洞左拱脚的压应变最大。在不同加载波或不同加载波峰值的情况下,压应变变化趋势相差均较大。

由图 10~11 可知,同种加载波作用下,左右洞的压应变变化趋势差异很大,左右洞相对应的测点的压应变也不同。在左右洞的拱脚位置处的压应变出现最大值。右洞压应变随着加载波加速度激振峰值的增加而增加,而左洞则不同,说明了左右洞表现出的压应变响应规律差异很大,设计抗震设防措施时需要区别对待,制订合理的抗震措施。

综合表 4 及图 8—图 11 可知,在不同加载波作用下,应变的变化规律有很大差异。各个测点的拉应变大于压应变,拉应变约为压应变的 1.03~13.5 倍。这说明隧道衬砌主要受拉应变的作用,在地震作用下较易破坏,要加强防护措施。应变在 0.4g 和 0.6g 的工况下,变化较为突出,左洞左半拱相对于左洞右半拱拉压应变较大,右洞拱脚与拱顶处拉压应变普遍较大。说明偏压小净距隧道的左洞左半拱及右洞拱脚、拱顶处在地震发生时受破坏的可能性较大,在抗震设计中要加强拱顶与拱脚的设防措施。边坡的存在对左洞的应变响应影响较大。

### 3 结 论

(1)在 0.1g 与 0.2g 的工况下,衬砌拉应变变化趋势较为相近且平缓,在 0.4g 与 0.6g 的工况下,衬砌拉应变变化趋势较为相近且变化波动较大。

(2)拉应变受加载波的类型影响较小,而受加载波加速度激振峰值影响较明显,拉应变随着加速度激振峰值增大而增大。一般在拱脚及拱顶处拉应变较大。

(3)在 WC-XZ、DR-XZ 和 K-XZ 3 种波的作用下,除了左洞压应变外,应变响应皆为随着加载波加速度激振峰值的增大而增大,加速度的峰值影响

衬砌的应变响应。相同加载波及加速度激振峰值的情况下,左洞与右洞应变变化趋势差异很大。

(4)衬砌测点的拉应变大于压应变,且拉应变变化规律较为明显。在不同的加载波类型及加速度激振峰值作用下,应变变化趋势呈现明显的非线性变化特征。

### 参考文献 (References)

[1] 黄拔洲,陈少华,秦峰.小净距隧道在京福高速公路上的实践[J].重庆大学学报,2003,26(10):19-22. (Huang Bazhou, Chen Shaohua, Qin Feng. Development of parallel tunnels with super small interval in Beijing-Fuzhou freeway engineering[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(10): 19-22. (in Chinese))

[2] 高波,王峥峥,袁松,等.汶川地震公路隧道震害启示[J].西南交通大学学报,2009,44(3):336-374. (Gao Bo, Wang Zhengzheng, Yuan Song, et al. Lessons learnt from damage of highway tunnels in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3): 336-374. (in Chinese))

[3] 崔光耀,王明年,林国进,等.汶川地震公路隧道洞口段震害机理及抗震对策研究[J].现代隧道技术,2011,48(6):6-10. (Cui Guangyao, Wang Mingnian, Lin Guojin, et al. Study of the earthquake damage mechanism and aseismatic counter measure of a highway tunnel portal in the Wenchuan seismic disaster area [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(6): 6-10. (in Chinese))

[4] 殷琳,楼梦麟,康帅.地下结构地震反应的振动台模型试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(10):1471-1479. (Yin Lin, Lou Menglin, Kang Shuai. Seismic response of underground structure shaking table model test [J]. Journal of Tongji University (Nature Science Edition), 2015, 43(10): 1471-1479. (in Chinese))

[5] 周林聪,陈龙珠,宫必宁.地下结构地震模拟振动台试验研究[J].地下空间与工程学报,2005,1(2):182-213. (Zhou Lincong, Chen Longzhu, Gong Bining. Underground structure seismic simulation shaking table test [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(2): 182-213. (in Chinese))

[6] 高峰,孙常新,谭绪凯,等.不同埋深隧道的地震响

- 应振动台试验研究[J].岩土力学,2015,36(9):2517-2531.( Gao Feng, Sun Changxin, Tan Xukai, et al. Different buried depth of seismic response of the tunnel shaking table test[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,4 (9):2517-2531.(in Chinese))
- [7] 方林, 蒋树屏, 林志, 等.穿越断层隧道模型试验研究[J].岩土力学,2011,32(9):2709-2715.( Fang Lin, Jiang Shuping, Lin Zhi, et al. Through fault tunnel model test[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(9): 2709-2715.(in Chinese))
- [8] 王峥峥, 高波, 索然绪.双洞隧道洞口段抗减震振动台试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22 ( 2 ): 71-76. ( Wang Zhengzheng, Gao Bo, Suo Ranxu. Shaking table tests on entrance anti-seism of double track tunnels [J]. China Journal of Highway and Transport,2009,22 (2):71-76.(in Chinese))
- [9] 申玉生, 高波, 王英学.强震区山岭隧道洞口段结构动力特性分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28 ( 增 1 ): 3131-3136. ( Shen Yusheng, Gao Bo, Wang Yingxue. Structural dynamic properties analysis for portal part of mountain tunnel in strong earthquake area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 ( Supp. 1 ): 3131-3136. ( in Chinese))
- [10] 蒋树屏, 文栋良, 郑升宝.嘎隆拉隧道洞口段地震响应大型振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2011, 30 ( 4 ): 649-656. ( Jiang Shuping, Wen Dongliang, Zheng Shengbao. Large-scale shaking table test for seismic response in portal section of Galongla Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineer,2011,30(4):649-656.(in Chinese))
- [11] Meymand P J. Shaking table scale model testsof nonlinear soil-pile-super structure interaction in soft clay [ D ]. University of California,Berkeley,1998.
- [12] Ai S.Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1-g gravitational field [ J ]. Soils and Foundations,1989,29(1):105-108.
- [13] 罗先启, 程圣国, 牛恩宽. 滑坡物理模型试验畸变修正及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28 ( 增 1 ):3082-3088.( Luo Xianqi, Cheng Shengguo, Nu Enkuan. Research on aberration correction and application in Landslide geomechanical model test [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009, 28(Supp.1):3082 -3088.(in Chinese))
- [14] 吕西林, 陈跃庆, 陈波, 等.结构-地基动力相互作用体系振动台模型试验研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(4):20-29. ( Lü Xilin, Chen Yueqing, Chen Bo, et al. Shaking table testing of dynamic soil-structure interaction system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20 ( 4 ): 20-29. ( in Chinese))
- [15] 徐炳伟, 姜忻良.大型复杂结构-桩-土振动台模型试验土箱设计[J].天津大学学报,2010,43(10):913-917.( Xu Bingwei, Jiang Xinliang. Soil chamber design of shaking test table for large-scale soil-pile-complex structure interaction[J]. Journal of Tianjin University, 2010,43(10):913-917.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国国家标准编写组.建筑抗震设计规范(GB50011-2010)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.( The National Standards Compilation Group of Peoples Republic of China. Code for seismic design of buildings ( GB50011-2010 ) [ S ]. Beijing: China Architecture and Building Press,2011.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国国家标准编写组.铁路工程抗震设计规范(GB50011-2006)[S]. 北京:中国计划出版社, 2009.( The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for seismic design of railway engineering ( GB50011-2006 ) [ S ]. Beijing: China Planning Press,2009.(in Chinese))