

# 铁路工程抗震设计规范竖向设计反应谱谱值研究

司明非<sup>1,2</sup>, 江辉<sup>1,2</sup>, 陈良江<sup>3</sup>, 高日<sup>1,2</sup>, 周勇政<sup>3</sup>, 卢文良<sup>1,2</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京市轨道交通线路安全与防灾工程技术研究中心, 北京 100044;  
3. 中国铁路经济规划研究院有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 竖向地震动对高烈度区桥梁等结构存在严峻威胁, 且与水平向地震动之间关系复杂。然而当前我国 GB 50111—2006《铁路工程抗震设计规范》(2009年版)未对竖向设计反应谱做出专门规定; 其他部分规范仅规定竖向反应谱取水平谱的某一固定比值, 可能使对竖向地震动的估计不可靠。因此, 在我国现行铁路工程抗震设计规范亟需修编的大背景下, 选取了国内外的 4 350 条地震动记录, 按场地类别和震级分类, 进行竖向与水平向加速度谱比值的定量研究。结果表明, 竖向与水平向反应谱比普遍超过 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》等现行规范给出的定值 0.65, 且受场地类别和地震烈度的影响显著。因此, 建议引入竖向场地系数表征竖向地震动作用, 通过试算并与 JTG/T 2231—01—2020《公路桥梁抗震设计规范》相关规定对比, 确定了适用于铁路工程抗震设计规范的竖向场地系数计算方法。计算不同场地类别和抗震设防烈度下的竖向与水平向加速度反应谱峰值比, 给出了竖向场地系数的建议取值。研究成果可为铁路工程抗震设计规范中竖向加速度设计谱谱值的确定提供参考。

**关键词:** 铁路桥梁抗震设计; 竖向地震动; 加速度反应谱; 反应谱比; 竖向场地系数; 加速度峰值比

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

## Research on the value of vertical design response spectra in the code for seismic design of railway engineering

SI Mingfei<sup>1,2</sup>, JIANG Hui<sup>1,2</sup>, CHEN Liangjiang<sup>3</sup>, GAO Ri<sup>1,2</sup>, ZHOU Yongzheng<sup>3</sup>, LU Wenliang<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Engineering and Technology Research Center of Rail Transit Line Safety and Disaster Prevention, Beijing 100044, China; 3. China Railway Economic and Planning Research Institute, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Vertical ground motion is a serious threat to bridges and other structures in high intensity areas, and the relationship with horizontal ground motion is complicated. However, the current *Code for seismic design of railway engineering* (GB 50111—2006) (2009 edition) does not make special provisions for the vertical design response spectra. Some other specifications only stipulate that the vertical response spectra should be taken as a fixed ratio of the horizontal spectra, which may make the estimation of vertical ground motion unreliable. In view of the urgent need to revise the current seismic design code for railway engineering in China, 4 350 ground motion records at home and abroad were selected, and a quantitative study on the ratio of vertical to horizontal acceleration spectra according to the site category and magnitude classification was carried out. The results show that the ratio of vertical to horizontal response spectra generally exceeds the fixed value of 0.65 given by the current codes such as *Code for seismic design of buildings* (GB 50011—2010), and is significantly affected by the site category and seismic intensity. Therefore, it was proposed to introduce vertical site coefficient to characterize the vertical ground motion effect, and the method of calculating the vertical site coefficient, which is applicable to code for seismic design of

收稿日期: 2023-11-12; 修回日期: 2023-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378473); 中国国家铁路集团有限公司重大项目(K2022G014); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2023JBZY029); 国家铁路局基础研究项目(2021JS011)

作者简介: 司明非(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事桥梁抗震与减隔震研究。E-mail: simingfei@bjtu.edu.cn

通信作者: 江辉(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁抗震减灾与工程结构减灾研究。E-mail: jianghui@bjtu.edu.cn

railway engineering, was determined through the trial calculation and comparison with the relevant provisions of *Specifications for seismic design of highway bridges* (JTG/T 2231-01-2020). The peak ratios of vertical and horizontal acceleration response spectra under different site categories and seismic defense intensities were calculated, and the proposed values of vertical site coefficients were given. The research findings presented in this paper can serve as a reference for determining the value of vertical acceleration design spectra in seismic design codes for railway engineering.

**Key words:** seismic design of railway bridge; vertical ground motion; acceleration response spectra; response spectra ratio; vertical site coefficient; peak acceleration ratio

## 0 引言

地震活动是影响人类社会安全的自然灾害之一,对建筑结构的破坏性不可忽视。竖向地震动作为地震荷载的重要组成部分,对工程结构的安全性有着重要影响,位于高烈度区和近断层区域的大跨度桥梁、悬臂结构、高柔高耸结构等对竖向地震动作用尤其敏感<sup>[1]</sup>。然而,国内外现行规范对竖向设计反应谱谱值的规定一般较为简单,我国 GB 50111—2006《铁路工程抗震设计规范》(2009年版)<sup>[2]</sup>、美国 AASHTO 规范<sup>[3]</sup>等国内外现行规范未对竖向反应谱取值做单独规定,GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[4]</sup>等通常仅规定竖向反应谱取水平谱的某一固定比值(如 65%)。

20 世纪 90 年代以来,随着强震动观测技术的发展,国内外一系列基于实测记录的研究结果<sup>[5-9]</sup>表明,竖向地震动与水平向地震动之间关系复杂,部分竖向加速度峰值甚至远超水平向峰值。近年来,更多国内外学者针对竖向与水平向反应谱的比值进行了更深入的研究。江辉等<sup>[10]</sup>指出,实际地震中竖向与水平向加速度峰值比显著高于现行抗震设计规范的取值,且并非常量,建议采用分段线性方法建立竖向与水平向反应谱比值随各影响因素变化的关系式。AKKAR 等<sup>[11]</sup>根据欧洲地震动实测数据,得到了竖向与水平向加速度峰值比,并给出了其预测公式。赵培培等<sup>[12-13]</sup>发现竖向与水平向加速度反应谱峰值比在大震远场及周期超过 1.0 s 的情况下通常远高于 0.65。李宁等<sup>[14]</sup>根据实测近断层强震数据,分析了地震动竖向与水平向加速度峰值比与场地类别等因素的关系,并给出了峰值比的合理取值。

尽管研究人员已对竖向加速度谱进行了大量研究,但相关成果在规范中仍鲜有体现。我国现行《铁路工程抗震设计规范》于 2009 年修编,对竖向设计谱未做规定;而 2020 年颁布的 JTG/T 2231-01-2020《公路桥梁抗震设计规范》<sup>[15]</sup>已通过专门的竖向场地系数,确定了竖向设计谱谱值。另外,当前国内抗震设计规范修订工作的专题研究中,所用地震动记录大多来自国外<sup>[16-17]</sup>,宜适当增大我国记录所占比例。基于此,面向我国新版铁路工程抗震设计规范的修编工作,本文选取国内外地震动实测记录(其中约 1/3 来自国内)进行设计反应谱谱值的定量研究,以期规范中竖向设计反应谱部分的内容编制提供参考。

## 1 地震动记录的选取

本文选取的地震动数据分别来自中国地震局强震动观测中心数据库和美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research, PEER)的 NGA-West2 数据库。其中,PEER NGA-West2 数据库主要包括美国西部的地震动记录,该地区的地质构造与我国相似<sup>[18]</sup>,其地震烈度衰减关系也与我国地震动接近<sup>[19]</sup>,因此可作为我国地震动记录的补充。地震动记录的选取标准为矩震级  $M_w \geq 4.5$  且具有三分量地震动记录(即 2 个水平分量、1 个竖向分量)的台站数据。

下载到的实测地震动记录共计 4 350 条,来自国内外数十次强震事件。其中,来自中国地震局强震动观测中心数据库的地震动共 1 482 条,包括四川汶川、青海玉树、四川芦山和青海门源等强震事件的实测记录,具体使用的地震动记录及地震波数量如表 1 所示;来自 PEER NGA-West2 数据库的地震动共 2 868 条,包括 San Fernando 地震、Loma Prieta 地震、Northridge 地震,神户地震和集集地震等强震事件的实测记录,其震级与断层距的分布情况如图 1 所示。

表 1 地震动记录数量

Table 1 Number of ground motion records

强震事件	地震动记录数量/条
1996 年云南丽江 7.0 级地震	12
2007 年云南普洱 6.4 级地震	36
2008 年四川汶川 8.0 级地震	609
2009 年四川绵竹 5.6 级地震	27
2010 年青海玉树 7.1 级地震	96
2013 年四川芦山 7.0 级地震	291
2014 年云南景谷 6.6 级地震	18
2016 年青海门源 6.4 级地震	192
2017 年四川九寨沟 7.0 级地震	198
2022 年青海门源 6.9 级地震	3

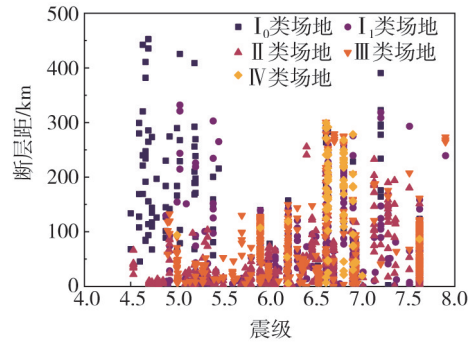


图 1 PEER NGA-West2 地震动记录的震级和断层距分布

Fig. 1 Distribution of magnitude and fault distance of PEER NGA-West2 ground motion records

根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》、GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》<sup>[20]</sup> 等国内最新规范的分方法,将场地分为 I<sub>0</sub>类、I<sub>1</sub>类、II类、III类和IV类共 5 个类别。其中,对来自中国地震局强震动观测中心的地震动,根据文献[21]介绍的方法,由台站所在地的特征周期确定其场地类别;对于来自 PEER NGA-West2 数据库的地震动,采用文献[22-23]提出的  $V_{s30}$  与我国场地类别的对应关系,确定其场地类别。本文采用的地震动记录分布情况见表 2。由表可知,除 I<sub>0</sub>类和IV类场地的地震动记录较少外,其他场地的地震动记录均较为丰富,且分布均匀。

表 2 本研究采用的地震动记录分布

Table 2 Distribution of ground motion records adopted in this study

数据来源	场地类别					总计
	I <sub>0</sub> 类	I <sub>1</sub> 类	II类	III类	IV类	
中国地震局强震动观测中心	16	196	720	542	8	1482
美国 PEER NGA-West2 数据库	250	712	886	860	160	2868
总计	266	908	1606	1402	168	4350

## 2 竖向与水平向加速度反应谱比值的研究

### 2.1 加速度反应谱的计算

基于竖向和水平向地震动记录,分别计算其阻尼比为 0.05 的加速度反应谱,并求出 3 个不同方向上的平均反应谱。五类场地竖向和水平向反应谱与平均反应谱的计算结果分别如图 2~图 6 所示。

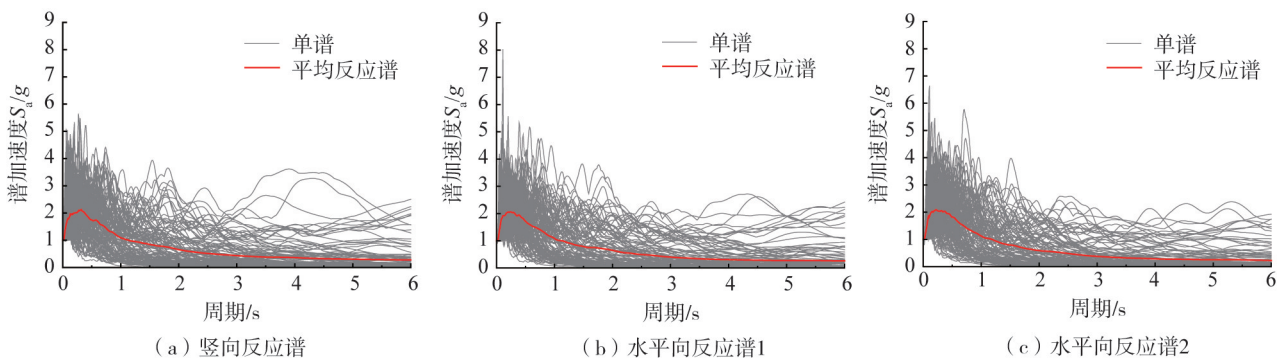


图 2 I<sub>0</sub>类场地反应谱计算结果

Fig. 2 Calculation results of response spectra for I<sub>0</sub> type site

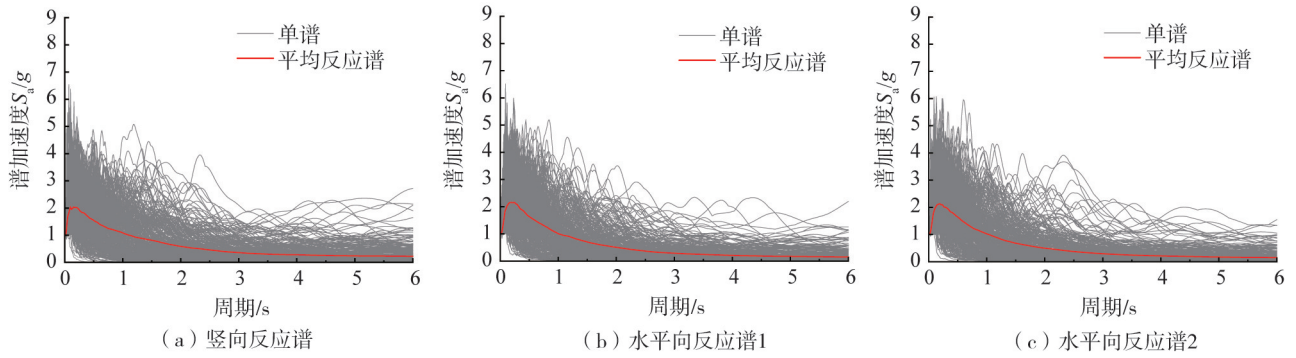
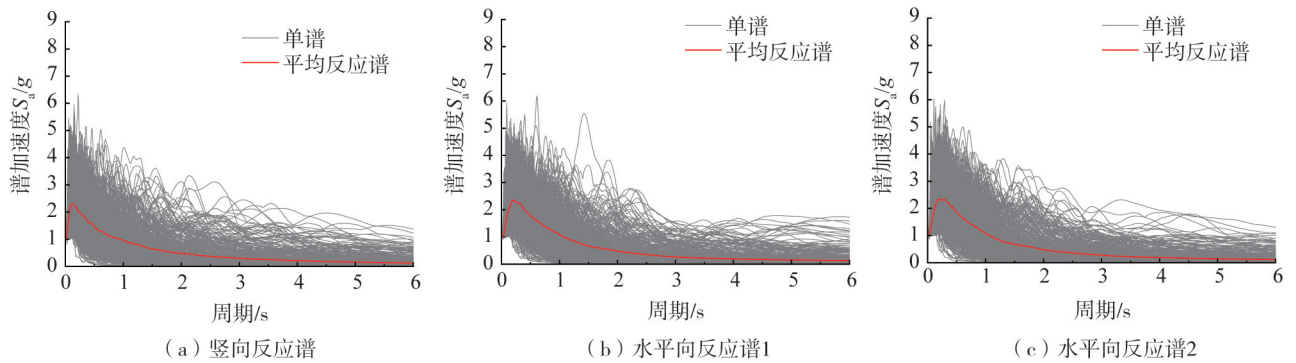
图3 I<sub>1</sub>类场地反应谱计算结果Fig. 3 Calculation results of response spectra of I<sub>1</sub> type site

图4 II类场地反应谱计算结果

Fig. 4 Calculation results of response spectra of II type site

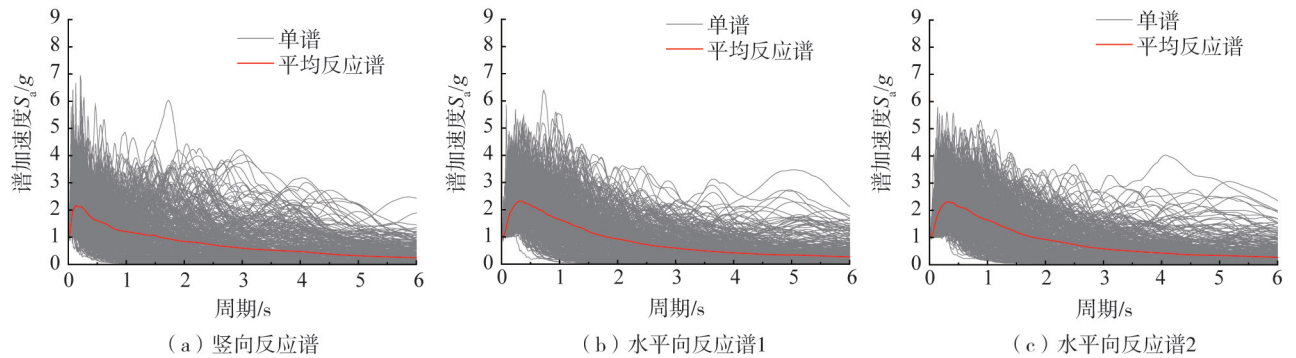


图5 III类场地反应谱计算结果

Fig. 5 Calculation results of response spectra of III type site

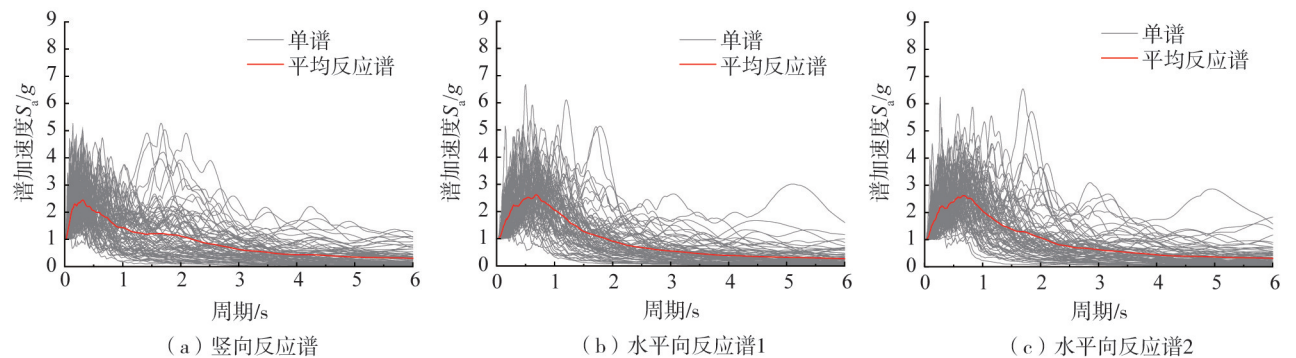


图6 IV类场地反应谱计算结果

Fig. 6 Calculation results of response spectra of IV type site

## 2.2 竖向与水平向反应谱比值的影响因素分析

计算水平2个方向反应谱的平均值,以此作为计算中采用的水平向反应谱。为了更准确地分析竖向与水平向反应谱比的总体特征,先对每类场地下的强震动记录计算谱比,再对谱比进行平均<sup>[13]</sup>。

在不同场地类别下,分别计算同一地震动事件中竖向与水平向加速度反应谱的比值(以下称为 V/H 谱比),并求得各场地类别中 V/H 谱比的平均值,如图 7 所示。由图可知,场地类别对 V/H 谱比的影响比较显著,不同场地的平均谱比曲线的形状基本相似,但不同场地的谱比大小有所不同。V/H 谱比的最大值基本位于短周期,可达到 1.4 左右。周期超过 0.5 s 后,随场地变软, I<sub>1</sub>类、II类、III类场地的 V/H 谱比总体上逐渐减小,但仍大于现行规范规定的竖向设计反应谱与水平设计反应谱的定值 0.65。I<sub>0</sub>类、IV类场地的 V/H 谱比随周期变化同样表现出相似的变化规律,但其大小与另外三类场地 V/H 谱比表现出的规律并不完全相符,造成这种现象的原因可能是 I<sub>0</sub>类、IV类场地上的强震动记录数量较少引起的统计偏差。

另一方面,按照震级区间  $4.5 \leq M_w < 5.5$ 、 $5.5 \leq M_w < 6.5$ 、 $6.5 \leq M_w < 7.5$ 、 $M_w \geq 7.5$  分组,每个震级区间内的 V/H 谱比如图 8 所示。其中, I<sub>1</sub>类、II类和 III类场地在各震级区间内的地震动记录均较为丰富,统计分析的结果更加可靠。周期小于 0.1 s 时,V/H 谱比与震级关系不明显,除 IV 场地(样本数量较少)外,谱比最大值可达到 1.4。但周期超过 1 s 后,V/H 谱比总体上随震级增大而增大, I<sub>0</sub>类和 I<sub>1</sub>类场地在各个震级区间的平均谱比除个例外基本远高于 0.65 的定值,有些谱比均值甚至达到 1.4 左右。II类和 III类场地的 V/H 谱比在震级较小( $M_w < 6.5$ )时接近 0.65,当震级较大( $M_w \geq 6.5$ )时可达 1。

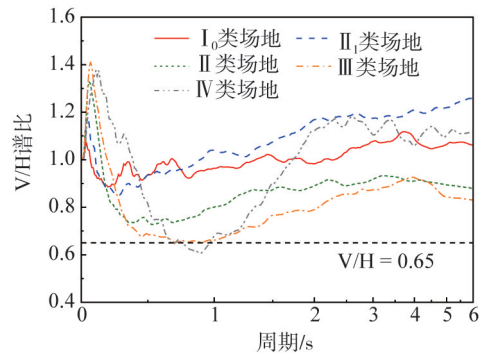


图 7 不同场地的平均 V/H 谱比曲线  
Fig. 7 Average V/H spectral ratio curves for different sites

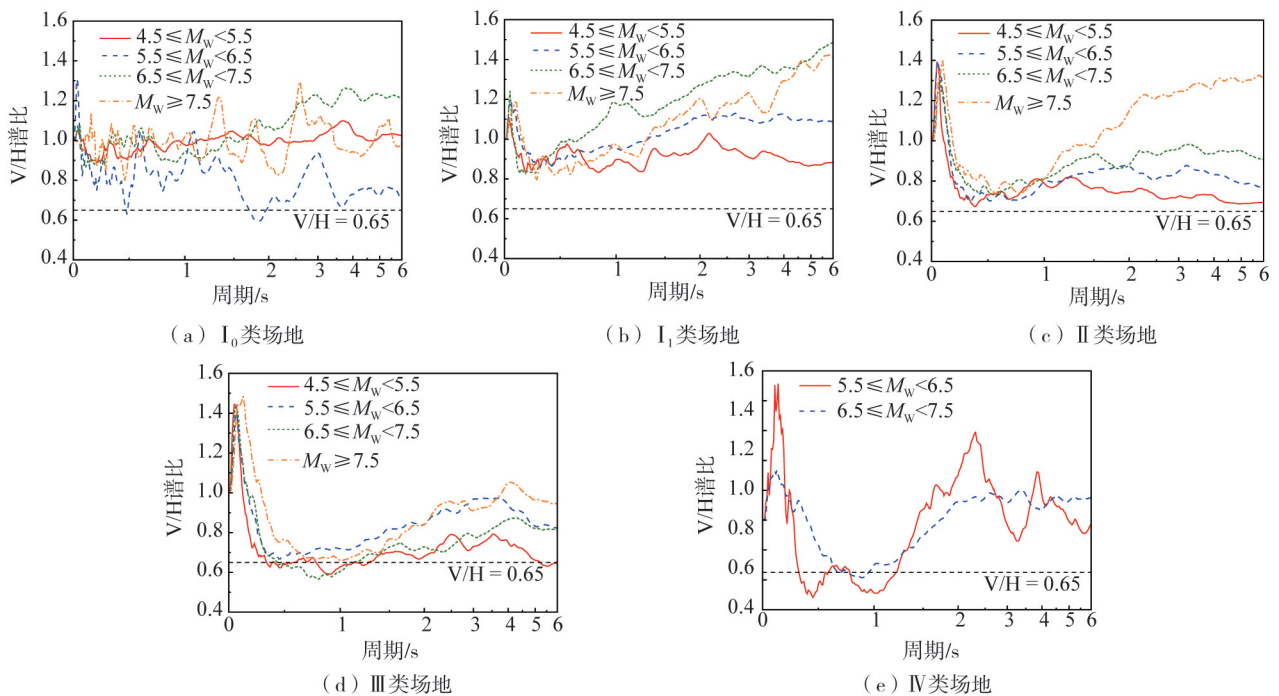


图 8 不同震级区间的平均 V/H 谱比曲线

Fig. 8 Average V/H spectral ratio curves for different magnitude intervals

由此可见,GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》等现行规范中规定竖向地震动影响系数取水平向影响系数的 0.65 倍,可能低估竖向地震动大小。另外,由于 V/H 谱比受场地类别和震级的影响显著,对于竖向加速度设计反应谱的谱值,建议针对不同场地类别和抗震设防烈度,分别做不同规定。

### 3 规范竖向加速度设计反应谱取值研究

#### 3.1 国内外既有规范调研分析

表 3 汇总了国内外现行主要规范对竖向设计反应谱的规定。可以发现,我国 GB 50111—2006《铁路工

程抗震设计规范》(2009年版)和美国 AASHTO 等规范未进行专门规定;我国 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》、CJJ 166—2011《城市桥梁抗震设计规范》<sup>[24]</sup> 和日本铁道构造物设计标准<sup>[25]</sup> 等规范对竖向地震动采用固定比值0.65或0.50简化考虑。JTG/T B02-01—2008《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[26]</sup> 给出了竖向/水平向谱比函数,但该函数实际使用较为繁琐,且低周期段存在不合理情况<sup>[15]</sup>。因此,经专题研究,JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》中的竖向设计谱与水平谱采用相同图形、相同公式,针对竖向谱给出了单独的场地系数和特征周期值。此外,美国 ASCE/SEI 7-16 规范<sup>[27]</sup> 和欧洲 Eurocode 8 规范<sup>[28]</sup> 则单独给出了竖向加速度反应谱。

表3 国内外规范对于竖向设计反应谱的规定

Table 3 Regulations on vertical design response spectrum in domestic and foreign codes

抗震设计规范	竖向反应谱谱值的规定
中国 GB 50111—2006《铁路工程抗震设计规范》(2009年版) <sup>[2]</sup>	无相关规定
中国 JTG/T D65-05—2015《公路悬索桥设计规范》 <sup>[29]</sup>	无相关规定
中国《川藏铁路悬索桥设计暂行规定》	无相关规定
美国 AASHTO 规范 <sup>[3]</sup>	无相关规定
中国 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》 <sup>[4]</sup>	竖向地震动影响系数取为水平地震影响系数的0.65倍
中国 CJJ 166—2011《城市桥梁抗震设计规范》 <sup>[24]</sup>	竖向设计加速度反应谱可由水平向设计加速度反应谱乘以0.65得到
中国 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》 <sup>[30]</sup>	竖向地震动对结构影响较大时,应计入竖向地震动作用,场地竖向地震动峰值加速度取值应不小于水平的0.65倍
中国 GB 55002—2021《建筑与市政工程抗震通用规范》 <sup>[31]</sup>	设计地震动竖向峰值加速度不应小于水平峰值加速度的65%
日本铁道构造物设计标准 <sup>[25]</sup>	竖向设计反应谱取水平向设计反应谱0.5倍
日本道路桥示方书 <sup>[32]</sup>	设计竖向地震动由水平地震动乘以折减系数得到,折减系数根据竖向支座类型和地震动水平取为0.50或0.67
中国 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》 <sup>[15]</sup>	采用竖向场地系数调整加速度反应谱最大值,竖向场地系数根据抗震设防烈度和场地类别确定
中国 JTG/T B02-01—2008《公路桥梁抗震设计细则》 <sup>[26]</sup>	竖向加速度反应谱由水平向设计加速度反应谱乘竖向/水平向谱比函数 $R$ ,竖向谱比函数取值根据场地类别确定
美国 ASCE/SEI 7-16 规范 <sup>[27]</sup>	给出了专门的竖向加速度反应谱
欧洲 Eurocode 8 规范 <sup>[28]</sup>	给出了专门的竖向加速度反应谱

对比可知,我国现行 GB 50111—2006《铁路工程抗震设计规范》(2009年版)等由于修订时间相对久远,在竖向设计反应谱方面的规定尚且不完善。在铁路工程抗震设计规范的修编工作中,有必要进行竖向与水平向加速度反应谱的定量研究,以确定竖向设计反应谱的谱值。

### 3.2 竖向设计反应谱谱值研究

2.2节得出的结论与 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》中对竖向设计反应谱谱值的规定方法相匹配。但铁路桥梁的自振周期低于公路桥梁,因而设计反应谱周期范围更短,V/H谱比也可能存在差别。因此,面向我国新版铁路工程抗震设计规范,建议采用 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》中的规定方法,根据不同场地类别和抗震设防烈度,通过不同的竖向场地系数规定竖向设计反应谱的谱值。

JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》在其条文说明中指出,竖向场地系数的数值是根据竖向与水平向反应谱的最大值之比归纳得出的。因此,本研究按照图9所示的计算流程,根据不同场地类别、不同抗震设防烈度,对地震动记录及其加速度反应谱计算结果分组,并计算不同分组下的竖向与水平向加速度反应谱峰值比( $a_v/a_H$ )。

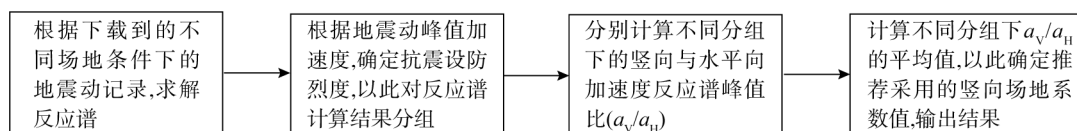


图9 计算流程图

Fig. 9 Flowchart for the calculation

经调研,铁路桥梁自振周期普遍超过0.2 s,因此在计算 $a_v/a_H$ 时,可去除周期0~0.2 s范围内的反应谱数据。其他基于规范的设计反应谱研究也采取了同样的做法,认为忽略这部分比值对竖向抗震设计谱的影

响在工程设计中是可接受的<sup>[33]</sup>。为进一步验证这一做法的可靠性,将不同反应谱周期范围内  $a_v/a_H$  的试算结果与 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》给出的竖向与水平向场地系数之比进行对比。由于该规范给出的反应谱周期范围为 10 s,故计算周期范围至 10 s 的加速度反应谱,分别取周期 0~10 s 和 0.2~10 s 的部分,计算  $a_v/a_H$ 。计算结果分别见表 4、表 5,与规范中相应比值的误差分别见表 6、表 7。

表 4  $a_v/a_H$  计算结果(周期范围 0~10 s)

Table 4 Calculation results of  $a_v/a_H$ (Period range 0~10 s)

场地类别	抗震设防烈度					
	Ⅵ度		Ⅶ度		Ⅷ度	
	0.05 g	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g	0.40 g
I <sub>0</sub>	1.02	0.98	0.98	0.97	0.86	0.84
I <sub>1</sub>	0.92	0.91	0.84	0.89	0.94	0.96
Ⅱ	0.82	0.83	0.79	0.74	0.90	1.04
Ⅲ	0.73	0.76	0.79	1.02	1.00	1.02
Ⅳ	0.75	0.78	0.84	0.97	1.16	1.05

表 5  $a_v/a_H$  计算结果(周期范围 0.2~10 s)

Table 5 Calculation results of  $a_v/a_H$ (Period range 0.2~10 s)

场地类别	抗震设防烈度					
	Ⅵ度		Ⅶ度		Ⅷ度	
	0.05 g	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g	0.40 g
I <sub>0</sub>	0.93	0.89	0.89	0.88	0.78	0.76
I <sub>1</sub>	0.77	0.76	0.70	0.74	0.79	0.80
Ⅱ	0.68	0.69	0.66	0.62	0.75	0.87
Ⅲ	0.61	0.63	0.66	0.85	0.83	0.85
Ⅳ	0.71	0.74	0.80	0.92	1.10	1.00

表 6 表 4 计算结果与《公路桥梁抗震设计规范》规定的误差

Table 6 Error between results in table 4 and the specified values in code for seismic design of highway bridges

场地类别	抗震设防烈度					
	Ⅵ度		Ⅶ度		Ⅷ度	
	0.05 g	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g	0.40 g
I <sub>0</sub>	0.23	0.21	0.22	0.21	0.21	0.25
I <sub>1</sub>	0.23	0.25	0.17	0.25	0.28	0.37
Ⅱ	0.36	0.38	0.32	0.24	0.29	0.31
Ⅲ	0.36	0.35	0.30	0.28	0.25	0.28
Ⅳ	0.16	0.16	0.15	0.07	0.22	0.18

表 7 表 5 计算结果与《公路桥梁抗震设计规范》规定的误差

Table 7 Error between results in table 5 and the specified values in code for seismic design of highway bridges

场地类别	抗震设防烈度					
	Ⅵ度		Ⅶ度		Ⅷ度	
	0.05 g	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g	0.40 g
I <sub>0</sub>	0.12	0.10	0.11	0.10	0.10	0.13
I <sub>1</sub>	0.03	0.04	0.03	0.04	0.06	0.14
Ⅱ	0.13	0.15	0.10	0.03	0.07	0.09
Ⅲ	0.13	0.13	0.08	0.06	0.04	0.06
Ⅳ	0.11	0.10	0.10	0.02	0.16	0.12

由表 6、表 7 可知,以 0.2~10 s 为周期范围时,  $a_v/a_H$  的计算结果与 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》相关规定的误差较小,最大误差仅为 16%,且该误差小于以 0~10 s 为周期范围计算时的误差,证明了图 9 所示的计算方法和去除 0~0.2 s 周期范围内反应谱数据这一做法的可靠性。在面向铁路工程的抗震设计规范修编工作中,由于作者建议的设计反应谱周期范围为 6 s,故取 0.2~6 s 周期范围内的竖向与水平向反应谱,按照不同场地类别、不同抗震设防烈度分组,计算其  $a_v/a_H$  值,结果如表 8 所示。

综合考虑结构安全性与工程应用简便性,建议在规范修编中采用竖向场地系数确定竖向设计反应谱谱值。竖向场地系数通过水平向场地系数乘以 0.2~6 s 周期范围内  $a_v/a_H$  的计算结果(表 8)得到,建议取值如表 9 所示。其中水平向场地系数采用 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》中的表 5.2.2-1,该表直接引自 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》推荐的表 E.1。

表 8  $a_v/a_H$  计算结果(周期范围 0.2~6 s)

Table 8 Calculation results of  $a_v/a_H$ (Period range 0.2~6 s)

场地类别	抗震设防烈度					
	Ⅵ度		Ⅶ度		Ⅷ度	
	0.05 g	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g	0.40 g
I <sub>0</sub>	1.07	1.08	1.06	1.05	0.90	0.86
I <sub>1</sub>	0.90	0.88	0.85	0.84	0.85	0.88
Ⅱ	0.73	0.75	0.74	0.77	0.84	0.88
Ⅲ	0.60	0.63	0.72	0.82	0.85	0.86
Ⅳ	0.72	0.74	0.77	0.94	1.05	0.99

表 9 竖向场地系数建议取值

Table 9 Suggested values for vertical site coefficient

场地类别	抗震设防烈度					
	Ⅵ度		Ⅶ度		Ⅷ度	
	0.05 g	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g	0.40 g
I <sub>0</sub>	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
I <sub>1</sub>	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
Ⅱ	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
Ⅲ	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9
Ⅳ	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9

## 4 结论

本文采用4350条国内外实测强震动记录,分析了加速度反应谱的V/H谱比随不同影响因素的变化规律。基于此,提出了建议用于铁路工程抗震设计规范中竖向设计反应谱的规定形式,并根据反应谱峰值比 $a_v/a_H$ 的计算结果,给出了竖向场地系数的建议取值。主要结论如下:

1) 加速度反应谱V/H谱比的计算结果总体上均超过0.65;随场地硬度增大、震级增大,V/H谱比大小总体呈增大趋势。由此可见,当前部分抗震设计规范中竖向设计反应谱谱值取水平向65%的规定值得商榷,在对竖向设计反应谱谱值进行规定时,需考虑场地类别和地震烈度的影响。

2) 建议通过引入竖向场地系数,规定竖向加速度设计反应谱谱值。试算反应谱峰值比 $a_v/a_H$ ,并将结果与《公路桥梁抗震设计规范》相关规定对比,确定了根据 $a_v/a_H$ 得到竖向场地系数的计算方法与应选用的反应谱周期范围。

3) 计算 $a_v/a_H$ ,给出了适用于新修订铁路工程抗震设计规范的竖向场地系数建议取值。本文的研究方法对面向其他抗震规范修编的专题研究同样适用,研究结果可为针对竖向反应谱的下一步定量研究提供基础,同时可为新版铁路工程抗震设计规范的修编工作提供参考。

**致谢:** 感谢中国地震局工程力学研究所强震动观测中心为本研究提供数据支持。

## 参考文献:

- [1] 吴宜峰, 司明非, 李爱群, 等. 预应力厚层橡胶三维隔震装置的力学性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(1): 37-43.  
WU Yifeng, SI Mingfei, LI Aiqun, et al. Analysis on mechanical properties of prestressed three-dimensional thick rubber seismic isolation device[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(1): 37-43. (in Chinese)
- [2] GB 50111—2006 铁路工程抗震设计规范[S]. 2009年版. 北京: 中国计划出版社, 2009.  
GB 50111—2006 Code for seismic design of railway engineering[S]. 2009 ed. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese)
- [3] GSID—2014 Guide specifications for seismic isolation design (Fourth Edition) [S]. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
- [4] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [5] BOZORGNIYA Y, NIAZI M, CAMPBELL K W. Characteristics of free-field vertical ground motion during the northridge earthquake[J]. Earthquake Spectra, 1995, 11(4): 515-525.
- [6] 谢俊举, 温增平, 高孟潭, 等. 2008年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J]. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1796-1805.  
XIE Junju, WEN Zengping, GAO Mengtan, et al. Characteristics of near-fault vertical and horizontal ground motion from the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(8): 1796-1805. (in Chinese)
- [7] JAIMES M A, RUIZ-GARCÍA J. New vertical-to-horizontal ratio spectrum due to intraslab earthquakes for soft-soil sites of Mexico City[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105804.
- [8] MAZLOOM S, ASSI R. Estimate of V/H spectral acceleration ratios for firm soil sites in eastern Canada[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 159: 107350.
- [9] 戴君武, 柏文, 周宝峰, 等. 从泸定6.8级地震看建筑隔震技术发展亟待解决的问题[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(6): 1-11.  
DAI Junwu, BAI Wen, ZHOU Baofeng, et al. Urgent problems need to be solved in the development of seismic base isolation for buildings from the Luding  $M_s$ 6.8 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(6): 1-11. (in Chinese)
- [10] 江辉, 李新乐, 窦慧娟. 近断层长周期脉冲型地震动对竖向反应谱的影响研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 56-61.  
JIANG Hui, LI Xinle, DOU Huijuan. Influence of near-fault long-period pulse-type earthquake ground motions on vertical response spectra[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(16): 56-61. (in Chinese)
- [11] AKKAR S, SANDIKKAYA M A, AY B Ö. Compatible ground-motion prediction equations for damping scaling factors and vertical-to-horizontal spectral amplitude ratios for the broader Europe region[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(1): 517-547.
- [12] 赵培培, 王振宇, 薄景山, 等. 南北地震带川滇甘陕地区竖向与水平向加速度反应谱比的统计分析[J]. 地震学报, 2019, 41(3): 391-398, 411.  
ZHAO Peipei, WANG Zhenyu, BO Jingshan, et al. Statistic analyses on the vertical to horizontal acceleration response spectra ratios of Sichuan-Yunnan-Gansu-Shaanxi region in the North-South Seismic Belt[J]. Acta Seismologica Sinica, 2019, 41(3): 391-398, 411. (in Chinese)
- [13] 赵培培, 王振宇, 薄景山, 等. 川滇甘陕地区地震的加速度峰值比和竖向反应谱的统计分析[J]. 世界地震工程, 2021, 37(3): 148-154.  
ZHAO Peipei, WANG Zhenyu, BO Jingshan, et al. Statistical analysis of peak acceleration ratio and vertical response spectrum of earthquakes in

- Sichuan Yunnan Gansu Shaanxi[J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(3): 148-154. (in Chinese)
- [14] 李宁,刘洪国,刘平,等.近断层竖向地震动特征统计分析[J].土木工程学报,2020,53(10):120-128.  
LI Ning, LIU Hongguo, LIU Ping, et al. Statistical analysis of vertical ground motion characteristics in near-fault regions[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(10): 120-128. (in Chinese)
- [15] JTG/T 2231-01—2020 公路桥梁抗震设计规范[S].北京:人民交通出版社,2020.  
JTG/T 2231-01—2020 Specifications for seismic design of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [16] 耿淑伟,陶夏新.地震动加速度反应谱竖向分量与水平分量的比值[J].地震工程与工程振动,2004,24(5):33-38.  
GENG Shuwei, TAO Xiaxin. The ratios of vertical to horizontal acceleration response spectra[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2004, 24(5): 33-38. (in Chinese)
- [17] 唐光武,郑万山,刘海明. JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》修订简介[J].公路交通技术,2021,37(6):103-107.  
TANG Guangwu, ZHENG Wanshan, LIU Haiming. Brief introduction to specifications for seismic design of highway bridges (JTG/T2231-01—2020)[J]. Technology of Highway and Transport, 2021, 37(6): 103-107. (in Chinese)
- [18] 毛天尔,曾双双,栾极,等.抗震设计反应谱的动力放大系数[J].土木工程与管理学报,2012,29(1):89-92.  
MAO Tianer, ZENG Shuangshuang, LUAN Ji, et al. Dynamic amplification coefficient of seismic design response spectrum[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, 29(1): 89-92. (in Chinese)
- [19] 郭玉学,王国新.华北地区地震动参数的确定方法(上)[J].世界地震工程,1989,5(3):13-17.  
GUO Yuxue, WANG Guoxin. Determinate method on the ground motion parameters of north China ( I ) [J]. World Earthquake Engineering, 1989, 5(3): 13-17. (in Chinese)
- [20] GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S].北京:中国标准出版社,2016.  
GB 18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [21] 罗开海,李孟青,康艳博,等.场地设计特征周期的插值方法[J].工程抗震与加固改造,2023,45(2):65-70.  
LUO Kaihai, LI Mengqing, KANG Yanbo, et al. Interpolation method for design characteristic period[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2023, 45(2): 65-70. (in Chinese)
- [22] 吕红山,赵凤新.适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J].地震学报,2007,29(1):67-76,114.  
LV Hongshan, ZHAO Fengxin. Site coefficients suitable to China site category[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 67-76, 114. (in Chinese)
- [23] 周健,李小军,李亚琦,等.中美建筑抗震设计规范中工程场地类别的对比和换算关系[J].地震学报,2021,43(4):521-532,534.  
ZHOU Jian, LI Xiaojun, LI Yaqi, et al. Comparative analysis and transformation relations between China and the US site classification systems in building seismic code provisions[J]. Acta Seismologica Sinica, 2021, 43(4): 521-532, 534. (in Chinese)
- [24] CJJ 166—2011 城市桥梁抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.  
CJJ 166—2011 Code for seismic design of urban bridges[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [25] 日本财团法人铁道综合技术研究所.铁道构造物等设计标准·同解说-耐震设计[S].东京:丸善株式会社,2012.  
Railway Technical Research Institute. Design standards and commentary for railway structures-seismic design[S]. Tokyo: Maruzen Co., Ltd., 2012. (in Japanese)
- [26] JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S].北京:人民交通出版社,2008.  
JTG/T B02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges[S]. Beijing: China Communication Press, 2008. (in Chinese)
- [27] American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE/SEI 7-16 [S]. New York: Structural Engineering Institute (SEI), 2010.
- [28] European Committee for Standardization. Design of structures for earthquake resistance-Part 2: Bridges: EN 1998-2 [S]. Bruxelles, Belgium: European Committee for Standardization, 2005.
- [29] JTG/T D65-05—2015 公路悬索桥设计规范[S].北京:人民交通出版社,2015.  
JTG/T D65-05—2015 Specifications for design of highway suspension bridge[S]. Beijing: China Communication Press, 2015. (in Chinese)
- [30] GB 50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S].北京:中国计划出版社,2014.  
GB 50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)
- [31] GB 55002—2021 建筑与市政工程抗震通用规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.  
GB 55002—2021 General code for seismic precaution of buildings and municipal engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021. (in Chinese)
- [32] 日本道路协会.道路桥示方书·同解说 V 耐震设计编[S].东京:神谷印刷株式会社,2017.  
Japan Road Association. Design specifications for road bridges and commentary Part V: Seismic design [S]. Tokyo: Kamiya Printing Co., Ltd., 2017. (in Japanese)
- [33] 潘毅,包韵雷,刘永鑫,等.基于中国规范的近断层区竖向抗震设计谱研究[J].工程力学,2021,38(12):183-190.  
PAN Yi, BAO Yunlei, LIU Yongxin, et al. Study on vertical seismic design spectra of near fault area based on Chinese code[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12): 183-190. (in Chinese)