

不同场地高铁隔震桥梁概率地震需求模型比较

吴 迪¹, 熊 焱², 蒋国平³, 吴成亮⁴, 冼巧玲¹, 徐 丽¹

(1. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广东, 广州 510006; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东, 广州 510640;
3. 福建江夏学院工程学院, 福建, 福州 350108; 4. 鑫拓力工程技术有限公司, 湖北, 武汉 430073)

摘 要: 根据我国典型高速铁路(高铁)桥梁摩擦摆隔震支座的力学性能试验和桥梁结构设计参数, 建立高铁隔震梁桥有限元模型。根据不同场地的地震反应谱特征, 提出不同场地条件下高铁隔震桥梁概率地震需求模型的比较方法。根据上述研究方法和分析结果, 获得场地条件对典型高铁隔震桥梁概率需求模型的影响规律。

关键词: 高铁桥梁; 场地类别; 隔震; 概率地震需求; 有限元方法

中图分类号: U442.55 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.05.S006

COMPARISON OF PROBABILISTIC SEISMIC DEMAND MODEL FOR HIGH-SPEED RAILWAY ISOLATED RAILWAY BRIDGE IN DIFFERENT SITES

WU Di¹, XIONG Yan², JIANG Guo-ping³, WU Cheng-liang⁴, XIAN Qiao-ling¹, XU Li¹

(1. Key Laboratory of Seismic Engineering and Applied Technology in Guangdong Province, Guangzhou 510006, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China;

4. Xintuoli Engineering & Technology Co., Wuhan 430073, China)

Abstract: According to the test of mechanical property of friction pendulum isolators and design parameters of a typical Chinese high-speed railway bridge, the finite element method is used to model a general simple support beam bridge in Chinese high-speed railway. Based on the characteristics of the response spectrum in different sites, a comparative method in the probability seismic demand model of a high-speed railway isolation bridge under different site conditions has been put forward. By means of the methods proposed, the effect law of site conditions on the probability seismic demand model of a high-speed railway isolation bridge has been studied.

Key words: high-speed railway bridge; site condition; isolation; probabilistic seismic demand; finite element method

在地震作用下桥梁一旦受到严重破坏, 将会使灾后救援活动难以开展, 从而造成巨大的人员伤亡和经济损失^[1]。汶川地震中铁路桥梁工程就曾发生包括桥梁纵向、横向移位、支座损坏严重、

桥梁墩台破坏等震害^[2]。自 21 世纪初以来, 我国完成了高速铁路(高铁)桥梁的大规模建设, 一旦地震发生会为高铁造成难以想象的严重后果。此类问题引起了高铁桥梁领域的广泛关注, 并已开

收稿日期: 2019-05-20; 修改日期: 2020-01-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0703600); 国家自然科学基金项目(51778160, 51578168);

广东省科技计划重点项目(2018B02028003); 广州市科技计划项目(201707010258); 广州市教育局高校科研项目(201831826)

通讯作者: 熊 焱(1978—), 女, 江西南昌人, 副教授, 博士, 硕导, 从事结构工程研究 (E-mail: xyan@scut.edu.cn).

作者简介: 吴 迪(1978—), 男, 江西南昌人, 副研究员, 博士, 硕导, 从事结构工程研究 (E-mail: 11795234@qq.com);

蒋国平(1974—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士, 硕导, 从事结构工程研究 (E-mail: 63599143@qq.com);

吴成亮(1974—), 男, 湖北武汉人, 高工, 硕士, 从事结构工程研究 (E-mail: 233683368@qq.com);

冼巧玲(1962—), 女, 广东南海人, 教授, 博士, 从事结构工程研究 (E-mail: 2354696547@qq.com);

徐 丽(1971—), 女, 河南新野人, 副研究员, 博士, 硕导, 从事结构工程研究 (E-mail: 983309485@qq.com).

展一系列隔震的相关理论^[3-4]和试验^[5]研究。隔震技术越来越多的被应用于高铁桥梁的设计和建设中。在桥梁隔震性能的研究方面,杨风利^[6]对不同场地条件地震波作用下的谱密度强度最大值进行研究,并以此作为列车行车安全性的评价指标。夏修身等^[7]采用非线性时程分析方法研究高速铁路多跨简支梁桥摩擦摆支撑的隔震效果,发现隔震支座的最大剪切位移受到桥墩高度和地震强度的影响。吴迪等^[8]通过建立隔震连续梁桥的简化力学模型,研究不同桥墩高度对隔震桥梁周期的影响,并分析高度对桥梁隔震性能的影响规律。

高铁桥梁全长几百甚至上千公里,对于不同场地条件高铁隔震桥梁的地震影响研究将有利于设计和抗震规范的制定。本文采用实际工程技术参数,建立典型高速铁路隔震桥梁的有限元模型,按照美国 FEMA450 规范的场地分类标准,对

不同场地条件高铁桥梁结构地震响应进行研究,并且对不同场地隔震桥梁结构的概率地震需求模型进行比较。

1 工程概况及有限元分析

1.1 典型高铁隔震桥概况

本文以某典型高铁简支梁隔震桥为研究对象。该桥墩高 13 m, 梁体长度为 32 m。根据铁路工程抗震设计规范, 桥梁抗震验算按有列车进行, 横桥向按 50% 活载引起的地震力作用于轨顶处, 活载竖向力按列车竖向静活载的 100% 计算^[9]。根据设计参数获得梁体恒载和按单方向列车设计活载合计为 1522 t。桥墩墩身采用 C35 混凝土, 截面形状为圆端形实体桥墩, 桥梁梁体采用 C50 等级混凝土, 桥梁结构纵筋采用 HRB400 和 HRB335 等级, 箍筋采用 HRB335 等级^[5]。桥墩立面图、横截面和配筋等尺寸如图 1 所示。

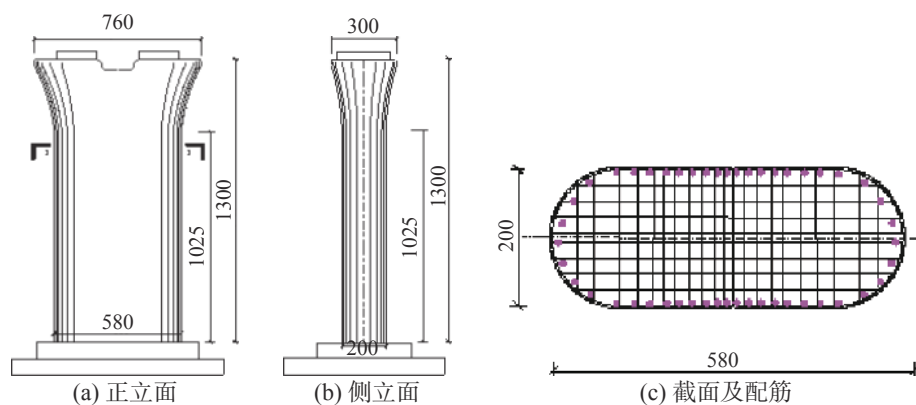


图 1 桥墩和配筋布置 /cm

Fig. 1 Dimension of pier and arrangement of reinforcement

1.2 建模与参数

该典型桥梁结构采用摩擦摆隔震支座, 支座的球面为镶嵌不锈钢。通过支座水平力学试验获得支座的力学性能, 试验采用 0.25 Hz 的加载速度进行摩擦摆支座水平拟静力实验, 在竖向荷载 5.5×10^3 kN 且水平变形 ± 100 mm 时测得摩擦摆的水平初始刚度为 6.6×10^4 N/mm。试验对测得支座的力学性能数据进行整理和分析, 获得摩擦摆支座的水平向剪力-位移曲线, 其他支座的力学性能参数如表 1 所示。采用有限元软件 (OpenSees) 中 SingFPBearing 单元^[10]对摩擦摆隔震支座进行模拟。

在高铁隔震桥梁的有限元模型建立中, 桥墩和梁体采用梁柱单元 (force beam column) 和纤维截

面 (fiber section)。梁体横截面接近等腰梯形上底边长 12.2 m、下底边长 5.5 m、高 2.6 m, 横截面积为 22.81 m^2 。高铁隔震桥梁的有限元模型如图 2 所示。由于摩擦摆支座刚度的非线性特性, 本文按设计位移 100 mm 时的等效刚度计算获得结构的第 1 自振周期为 2.03 s。

表 1 产品设计参数^[11]

Table 1 Product design parameters

竖向承载力/kN	水平限位力/kN	位移限值/mm	球面半径/mm	摩擦系数
5500	1650	± 100	3000	0.03

2 场地类别和地震动

根据美国 FEMA450 规范^[11-12]场地类别选取

地震动, 以地表深度 30 m 之内土层的平均剪切波速作为场地类别划分依据, 具体划分标准见表 2。

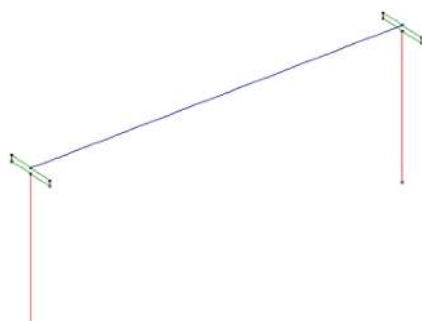


图 2 隔震桥梁有限元模型

Fig. 2 Finite element model of isolated bridge

表 2 场地类别划分^[11-12]
Table 2 Classification of sites

场地类别	A	B	C	D	E
平均剪切波速 V_s /(m/s)	>1500	1500~760	760~360	360~180	<180

考虑场地类别因素从美国地震动记录数据库 PEER NGA database^[13] 按照地震震级 3 级~8 级范围内世界各地已经发生的 90 次地震, 选取的地震包括 ValDesBois(2010)、Mineral(2011)、MtCarmel(2008)、Enola(2001)、Caborn(2002)、Charleston(2002)、AuSableForks(2002)、Chichi(1999)、Coalinga(1983)、Northridge(1994)、MtCarmel(2008)、Imperial Valley(1979)、Morgan Hill(1984)、Greenbrier(2011)、MtCarmel(2008) 等。并根据表 2 场地类别划分选择 5 类不同场地地震记录的地震动加速记录, 获得不同场地类别的 5 组地震动加速度反应谱如图 3 所示。

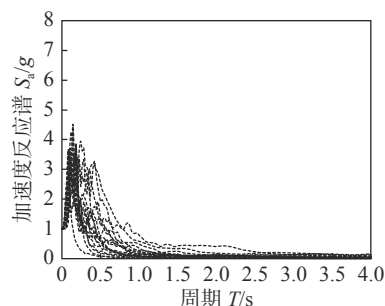
根据不同场地的地震动加速度反应谱的统计分析, 获得不同场地情况下结构平均加速度反应谱第 1 周期 (2.03 s) 的谱值与峰值之间的关系如下:

$$S_a(T_1) = \begin{cases} 0.03S_a, & \text{A类场地} \\ 0.08S_a, & \text{B类场地} \\ 0.17S_a, & \text{C类场地} \\ 0.17S_a, & \text{D类场地} \\ 0.28S_a, & \text{E类场地} \end{cases} \quad (1)$$

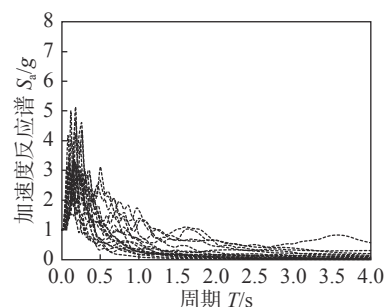
式中: $S_a(T_1)$ 为平均加速度反应谱第 1 周期处谱值; S_a 为平均加速度反应谱的峰值。

3 不同场地的概率地震需求模型

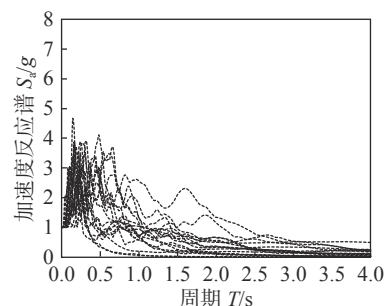
概率地震需求模型可表示为通过回归分析建立结构地震需求与地震动强度的关系。Cornell 等^[14] 通过结构的需求参数和地震动强度指标回归分析得出结构地震响应关系如下:



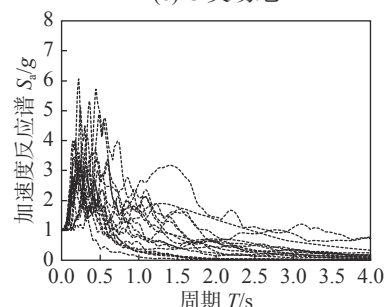
(a) A 类场地



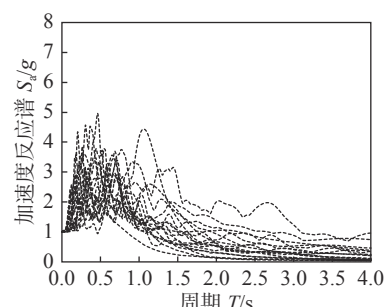
(b) B 类场地



(c) C 类场地



(d) D 类场地



(e) E 类场地

图 3 不同场地类别的地震加速度反应谱

Fig. 3 Response spectrum of different site categories

$$S_D = aIM^b \quad (2)$$

式中: IM 为地震动强度指标; a 和 b 为拟合的参数; S_D 为结构地震需求参数。根据有关隔震结构概率地震需求模型的研究结果显示, 隔震层的变形是隔震结构失效的主要原因^[15-16]。因此, 本文采取地震作用下隔震支座的最大剪切变形作为结构的地震需求参数。

由于在顺桥方向高铁隔震桥梁的梁体受到轨道板纵向刚度和搭接的影响, 梁体顺桥方向的变形会受到一定抑制。因此, 本文对地震作用下横桥方向桥梁响应开展研究。利用本文之前已建立的高铁隔震桥梁的 OpenSees 有限元软件模型, 输入 5 组不同场地条件的地震动, 地震动加速度峰值分别采用 0.2 g 、 0.3 g 、 0.4 g , 进行有限元计算分析, 计算得到的隔震桥梁支座最大剪切位移。由于在隔震结构第 1 自振周期处加速度反应谱值是影响结构隔震装置失效的关键地震强度因素之一^[15], 因此对 5 类不同场地条件下结构第 1 周期处加速度反应谱值与支座水平位移的计算结果进行统计回归, 获得高铁隔震桥梁结构概率地震需求模型关系如图 4 所示。图 4 中的横坐标 ($S_a(T_1)$) 表示结构 1 周期处的地震加速度反应谱值, 纵坐标 (Δ) 表示支座的剪切变形。

图 4 中 R^2 表示可决系数, 是度量拟合优度的统计量, 它反映数据的拟合程度。 R^2 的值越接近 1, 说明回归直线对观测值的拟合程度越好。由图 4 的统计结果可知, 采用第 1 周期最大加速度反应谱值作为隔震结构的地震强度指标比较合适。

由图 3 可知不同场地的加速度反应谱存在较大差别。采用第 1 周期反应谱的谱值建立的不同场地的结构概率地震需求模型, 将无法考虑不同场地的地震动的频谱特性, 也无法比较不同场地的结构概率地震需求模型。为比较不同场地条件下桥梁隔震结构的地震响应规律, 本文将不同场地的第 1 周期地震加速度反应谱值与加速度反应谱峰值关系式 (式 (1)) 代入结构概率地震需求模型 (图 4)。那么, 通过以上方法可以在相同的地震加速度反应谱峰值的情况下比较不同场地类别的结构概率地震需求模型。高铁隔震桥梁结构的概率地震需求模型可表示如图 5 所示。图 5 中的横坐标 (S_a) 表示地震加速度反应谱峰值, 纵坐标 (Δ) 表示桥梁隔震支座的剪切变形。

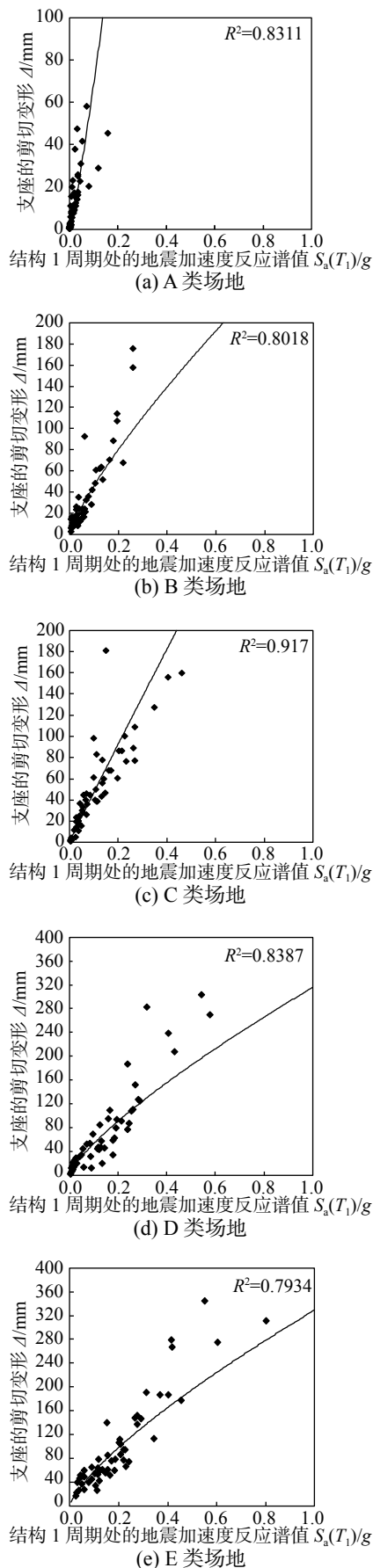


图 4 5 种场地类别的结构概率地震需求模型
Fig. 4 Demand model for 5 site condition

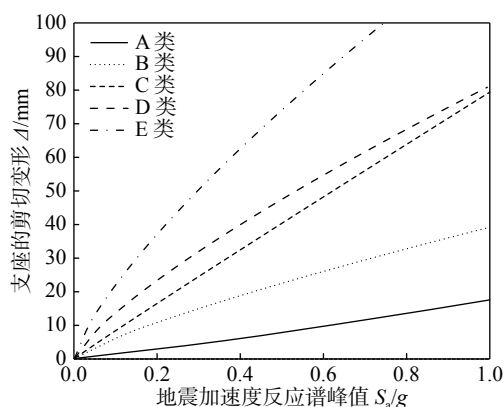


图5 不同场地类别的结构概率地震需求模型比较
Fig. 5 Comparison of demand model for different classifications of site

由图5可知,不同场地类别的结构概率地震需求模型之间存在较大差异。在地震加速度反应谱峰值相同的情况下,E类场地的结构响应最显著,其次是D类场地,再次是C类场地,再次是B类场地,最后是A类场地。且E类场地的结构概率地震需求模型增加趋势显著高于其他场地类别的结果。

4 结论

本文开展不同场地条件隔震桥梁结构概率地震需求模型比较的理论研究。根据典型高铁隔震桥梁及摩擦摆隔震支座的设计参数,建立高铁隔震隔震桥梁结构的有限元模型。通过对不同场地条件地震作用下隔震桥梁结构的响应模拟,统计回归了不同场地条件下高铁隔震桥梁的概率地震需求模型。经过本文研究获得如下初步结论:

(1) 基于桥梁结构第1周期加速度反应谱值,所建立的不同类别场地条件高铁隔震桥梁的结构概率地震需求模型拟合较好。

(2) 对不同场地桥梁结构概率地震需求模型比较可知,场地条件对高铁隔震桥梁的地震响应具有显著影响。当所在场地由A类向E类变化时,高铁隔震桥梁的地震响应逐渐增加,其中E类场地情况时地震响应增加幅度最显著。因此,在E类场地上设计和建设高铁隔震桥梁时,需要特别注意隔震层变形是否超过设计限值要求。避免地震时高铁隔震桥梁发生破坏和倒塌

参考文献:

[1] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松.汶川大地震公路桥梁震害分

析及对策[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1377—1387.

Zhuang Weilin, Liu Zhenyu, Jiang Jinsong. Earthquake-induced damage analysis of highway bridges in Wenchuan earthquake and countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1377 — 1387. (in Chinese)

[2] 朱颖,魏永幸.汶川地震铁路工程震害特征及工程抗震设计对策思考[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):3378—3386.

Zhu Ying, Wei Yongxing. Characteristics of railway damage due to Wenchuan earthquake and countermeasure considerations of engineering seismic design [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Suppl 1): 3378 — 3386. (in Chinese)

[3] 范立础,王志强.我国桥梁隔震技术的应用[J].振动工程学报,1999,12(2):173—181.

Fan Lichu, Wang Zhiqiang. Application of seismic isolation technology for Bridge in China [J]. Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(2): 173 — 181. (in Chinese)

[4] 孔令俊,陈彦北,姜其斌.太白路桥减隔震设计分析[J].铁道建筑,2012,12(9):44—46.

Kong Lingjun, Chen Yanbei, Jiang Qibin. Analysis of shock-isolation design for Taibailu Bridge [J]. Railway Engineering, 2012, 12(9): 44 — 46. (in Chinese)

[5] 吴迪,戴隆华,臧晓秋,等.高铁隔震桥梁模拟地震振动台试验研究[J].铁道建筑,2018,58(4):29—33.

Wu Di, Dai Longhua, Zang Xiaoqiu, et al. Analysis of isolated high-speed railway bridge by simulated earthquake shaking table tests [J]. Railway Engineering, 2018, 58(4): 29 — 33. (in Chinese)

[6] 杨风利.铁路桥梁减隔震设计方法及设计参数研究[D].北京:北京交通大学,2007.

Yang Fengli. Research on design method and design parameters of seismic isolation for railway bridges [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. (in Chinese)

[7] 夏修身,赵会东,欧阳辉来.高速铁路桥梁基于摩擦摆支座的减隔震研究[J].工程抗震与加固改造,2014,36(3):21—26.

Xia Xiushen, Zhao Huidong, Ouyang Huilai. Study on seismic isolation of high-speed railway bridge with friction pendulum bearings [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(3): 21 — 26. (in Chinese)

[8] 吴迪,黄泽军,周福霖,等.桥墩高度对桥梁隔震性能的影响研究[J].土木工程学报,2014(增刊2):328—333.

Wu Di, Huang Zejun, Zhou Fulin, et al. Study of influence on isolation performance of bridge by pier height [J]. China Civil Engineering Journal, 2014(Suppl 2): 328 — 333. (in Chinese)

[9] GB50111—2006,铁路工程抗震设计规范[S].北京:中国计划出版社,2006.

- GB50111-2006, Seismic design code of railway engineering [S]. Beijing: China Project Press, 2006. (in Chinese)
- [10] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, Fenves G L. OpenSees command language manual [M]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2006.
- [11] FEMA450-1, Nohp recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (Part1: Provisions) [S]. Washington, D.C.: Building Seismic Safety Council, 2003.
- [12] FEMA450-2, Nohp recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (Part2: Commentary) [S]. Washington, D.C.: Building Seismic Safety Council, 2003.
- [13] Pacific Earthquake Engineering Research Center. Peer ground motion database [DB]. <https://ngawest2.berkeley.edu/>, 2010.
- [14] Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines [J]. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 2002, 128(4): 526-533.
- [15] 熊焱, 吴迪, 崔杰. 抗震规范中隔震装置的地震风险分析[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(13): 109-114.
Xiong Yan, Wu Di, Cui Jie. Seismic risk analysis of earthquake-isolation equipment in seismic design codes [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(13): 109-114. (in Chinese)
- [16] 吴迪, 李健军, 谭平, 等. 串联隔震结构体系的地震易损性分析[J]. *工程力学*, 2017, 34(增刊1): 227-232.
Wu Di, Li Jianjun, Xiong Yan, et al. Seismic vulnerability analysis of series isolated structure system [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(Suppl1): 227-232. (in Chinese)

(上接第 50 页)

- [11] Iwan, Wilfred D. Strong-motion earthquake instrument arrays [C]. Proceedings of the International Workshop on Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays, May 2-5, 1978, Honolulu, Hawaii. California Institute of Technology. (Unpublished) <https://resolver.caltech.edu/CaltechEERL:EERL.1978.001>
- [12] Boore D M. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 91(5): 1199-1211.
- [13] Wu Y M, Wu C F. Approximate recovery of coseismic deformation from Taiwan strong-motion records [J]. *Journal of Seismology*, 2007, 11(2): 159-170.
- [14] Jin M. An improved automatic scheme for empirical baseline correction of digital strong-motion records [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 101(5): 2029-2044.
- [15] Kuo C H, Huang J Y, Lin C M, et al. Strong ground motion and pulse-like velocity observations in the near-fault region of the 2018 Mw 6.4 Hualien, Taiwan, earthquake [J]. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(1): 40-50.
- [16] Tian S, Gardoni P, Yuan W. Coseismic deformation of the 6 February 2018 Mw 6.2 Hualien earthquake based on strong-motion recordings [J]. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(1): 108-117.
- [17] 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, Ministry of code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)