

近断层地震动作用下设计速度反应谱研究

杜永峰^{1,2}, 徐天妮², 王亚楠², 包 超²

(1. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要:近断层地震动是一种特点明显且破坏力巨大的地面运动,其速度反应谱与远场地震动的速度反应谱有显著不同。本文从美国太平洋地震工程研究中心(PEER)强震数据库选取具有特定震级、震源机制、土层剪切波速和断层距的 30 条近断层地震记录作为输入;运用状态空间法,利用 MATLAB 进行地震动作用下单自由度体系的运动方程计算得到体系的速度反应谱;通过标准化、求均值的方法研究速度反应谱的特征;按照速度反应谱峰值对应的周期对所选的 30 条地震记录进行分组,并用分段线性拟合方法建立了设计速度反应谱;通过不同组的设计速度反应谱与速度反应谱平均值的对比,验证本文提出的设计速度反应谱的合理性。研究结果表明,近断层地震动下的速度反应谱谱形包括四个阶段;结构的阻尼比对速度反应谱的谱形没有影响,但是会影响速度反应谱的谱峰值,结构阻尼比不同时,两两比较后的最大相对误差为 16.68%。

关键词:近断层地震动;速度反应谱;峰值速度;线性拟合

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0997-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0997

Analysis of Designed Velocity Response Spectra Subjected to Near-fault Ground Motion

DU Yong-feng^{1,2}, XU Tian-ni², WANG Ya-nan², BAO Chao²

(1. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech.,

Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: In recent years, several disastrous near-fault earthquakes, such as the Wenchuan earthquake in China, the Chi-Chi earthquake in Taiwan, the Kobe earthquake in Japan, and the Northridge earthquake in the United States, have occurred. A large amount of near-fault pulse-type earthquake data from all these earthquakes has been recorded, and has attracted close scrutiny and extensive research. This seismic record contains obvious long-period velocity pulses. Near-fault ground motions not only cause serious damage to buildings, but also cause slope instability and damage to infrastructure. These disasters have a serious impact on the economic infrastructure and safety of people. Therefore, understanding the response of structures to near-fault ground motions is necessary. This allows for more reliable and efficient seismic design. Different ground motion records contain different types of information such as peak acceleration, peak velocity, peak displacement, and duration of ground motions. Near-fault ground motions have prominent

收稿日期: 2014-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(51178211)

作者简介: 杜永峰(1962-), 男(汉族), 甘肃正宁人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事结构抗震和减灾控制研究。

E-mail: dooyf@sohu.com

features and destructive force and their velocity response spectra are significantly different from the velocity response spectra of far-fault ground motions. This study used 30 near-fault earthquake records from the Pacific Earthquake Engineering Research Center's strong motion database; the records contain magnitude, fault mechanism, soil layer shear wave velocity, and fault distance information. First, a motion equation for a single degree-of-freedom system was established. Then, a state-space method and MATLAB was used to change the motion equation to a state equation. Next the equation was solved to obtain the velocity response of a single degree-of-freedom system and based on the velocity response, the velocity response spectra of the single degree-of-freedom system was obtained. Because the velocity response is related to the acceleration response and the displacement response, the velocity response of structures are analyzed in the present study. The features of the velocity response spectra were obtained by normalizing and averaging, and then the 30 near-fault earthquake records selected from the PEER strong motion database were divided into different groups based on the period corresponding to the peak velocity. A velocity design spectra was established using a piecewise linear fitting method. The reasonableness of the velocity design spectra was verified by comparing the velocity design spectra and the velocity average spectra of different groups. The results show that the velocity response spectra of near-fault ground motions consist of four stages: ascent segment, peak segment, depression segment, and horizontal segment. The damping ratio of the structure has no influence on the spectral shape of the velocity response spectra, but the damping ratio of the structure can affect the spectra peak of the velocity response spectra. When the damping ratio of the structure is different, the maximum relative error of the velocity response spectra peak is 16.68% after pairwise comparison.

Key words: near-fault ground motion; velocity response spectra; peak velocity; linear fitting

0 引言

近年来,全球发生过多灾害性的近断层地震,如中国汶川地震、中国台湾集集地震、日本 Kobe 地震、美国 Northridge 地震等。从这些地震中取得了大量的近断层脉冲型地震记录数据,引起了世界地震工程界的密切关注和广泛研究。这些地震记录都包含有明显的长周期速度脉冲。近断层地震动不仅能引起建筑结构的严重破坏,也会造成边坡工程失稳而引发一系列的工程灾害,对经济建设及人民的生命安全造成严重的影响^[1]。因此更有必要从近断层地震动的角度出发,研究结构在近断层地震作用下的真实响应,以便让结构抗震设计更加可靠合理。

不同地震动记录包含着不同的地震动加速度峰值、速度峰值、位移峰值、以及强震持时等多种信息^[2]。就地震动峰值而言,它的大小反应了地震过程中某一时刻地震动的最大强度,而且也直接反映出了地震作用及其产生的振动能量和引起结构变形的大小,是地震对结构影响大小的尺度^[3]。目前抗震设计规范^[4]通常只是考虑了地震作用下结构的加速度响应;基于位移的抗震设计则考虑了结构的位移响应,李慧等^[5]还研究了近断层脉冲型地震动作

用下的位移反应谱。但是,目前并未对结构的速度响应作出分析研究。中频结构最大地震响应取决于速度,且速度反应谱可以通过结构频率将结构的加速度和位移联系起来,是加速度和速度反应谱的纽带,即 $S_v = \omega S_d = \frac{S_a}{\omega}$ 。裴星洙等^[6]通过 $S_a = \omega S_v$ 关系得到设计用速度谱,并将其作为目标速度谱,采用不同的地震地面运动位相特性,生成了对应抗震设防烈度、地震分组、场地类别的罕遇地震人工波,并使所得的人工波速度谱曲线与目标谱进行拟合。

国内外已有的研究表明^[7-8],能够揭示建筑结构抗震机理的是能量原理,因为地震对结构的作用从本质上讲是一种能量的传递、转化与耗散的过程。地震总输入能是由激励与结构速度响应的乘积在激励作用时间内进行积分得到的。因此结构的速度在分析中的作用不容忽视。

本文从结构的地震动速度记录出发,针对某一类地震记录,分析结构的真实设计速度反应谱,以期结构设计提供新的思路,并使利用设计速度谱生成的某种场地条件下的人工波更加精确,使结构时程分析结果更加合理。

1 近断层地震记录的选取

李明等^[9]划分了近断层地震动区域。根据其划分原则,选取全球9次近断层地震中的30条地震记录作为本文输入结构的地震作用,采用的30条地震记录均来自美国太平洋地震工程研究中心(PEER)强震数据库,选择原则为^[10]:

(1) 选取矩震级大于5.5级的地震记录,突出了近断层地震异于远场地震的强度特征;

(2) 根据大多数学者公认的近断层地震的定义,选取震源距小于20 km的地震记录;

另外,本文在PEER强震数据库中选取的地震记录的特征是震源机制类型为走滑断层、土层剪切波速为180~360 m/s。

根据上述原则所选取的9次地震记录如表1所示。表中的震源距和最大速度对应的周期为不同地震记录的最大值和最小值。

表1 选用的近场地震记录

Table 1 Near-fault earthquake records utilized in this study

记录名称	记录条数	矩震级/ M_W	震源距/km	最大速度对应的周期 T_v/s
Imperial-valley-06	14	6.53	(0.1,12.4)	(1.0,10)
Kobe-Japan	3	6.9	(0.3,1.5)	(0.6,1.8)
Mammoth Lakes-06	1	5.94	16.2	1.2
Westmorland	2	5.9	(6.5,16.7)	(2.6,7.0)
San Salvador	2	5.8	7.0	(2.0,2.4)
Superstition Hills-02	3	6.54	(1.0,18.5)	(2.0,3.0)
Erzincan-Turkey	1	6.69	4.4	7.6
Kocaeli-Turkey	2	7.51	4.8	(7.0,7.4)
Duzce-Turkey	2	7.14	(6.6,12.0)	(3.4,10)

2 脉冲型地震动速度反应谱

2.1 速度反应谱的建立

单自由度体系在地震作用下的运动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (1)$$

式中, m 、 c 、 k 分别为体系的质量、阻尼系数和刚度系数; \ddot{x}_g 为地面运动加速度。上式左右两边同除以 m ,可得

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{x}_g \quad (2)$$

式中, ω 为无阻尼时体系的自振圆频率; ξ 为体系的临界阻尼比。

对上式进行求解得到体系的相对速度反应为

$$\dot{x}(t) = -\xi\omega x(t) - \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos[\omega_d(t-\tau)] d\tau \quad (3)$$

式中 ω_d 为有阻尼时体系的自振圆频率。

反应谱^[11]提供了一种方便的手段来概括线性

单自由度体系对地面运动的某个特定分量(加速度、速度、位移)的峰值反应。而某个特定分量的峰值关于体系自振周期的函数图形就是该分量的反应谱。

由公式(3)可知,单自由度体系的最大相对速度 S_v 为

$$S_v = \max |\dot{x}(t)| \quad (4)$$

地面运动加速度 \ddot{x}_g 给定的前提下,最大相对速度 S_v 只是 ξ 和 ω 的函数,也可以说是 ξ 和 $T(=\frac{2\pi}{\omega})$ 的函数。若阻尼比 ξ 已知,最大相对速度 S_v 就仅仅是 T 的函数,此时函数 $S_v(\xi, T)$ 就会变成 $S_v(T)$,

这就是相对速度谱函数——以周期 T 为横坐标,最大相对速度 $S_v(T)$ 为纵坐标绘制的图形。

建立速度反应谱时,假设阻尼比 ξ 为定值,分别取0.05、0.15、0.2;周期 T 的取值范围为0.02~10 s,时间间隔为0.02 s。利用MATLAB对表1选取的近断层地震记录进行地震响应分析,得到结构在不同阻尼比条件下的速度反应谱及其平均值,如图1所示。分析结构的阻尼比主要是为了对比普通抗震结构与隔震结构的速度响应之间的区别。图1中的粗实线为不同阻尼比时由30条地震波计算得到的平均值。从图中可以看出阻尼比小的抗震结构的速度响应比阻尼比大的隔震结构的速度响应大。

2.2 速度反应谱的特征研究

只有对速度反应谱的谱形、峰值、特征周期等进行研究,才能定量地描述速度反应谱。

从图1可以看出,大多数地震记录得到的速度反应谱谱形都较相似,含有峰值、上升段、下降段、水平段。由于地震记录频谱成分的复杂性及地面运动的不规则性,结构的速度谱出现了两个或更多个峰值。对30条地震记录得到的速度谱进行平均,得到图1(d)的速度谱平均值,从中可以清楚地看出速度反应谱随周期的变化是多峰值点的,当周期大于某一定值后曲线的形状会呈现出与周期轴大致平行的趋势,且随着结构阻尼比的增加结构的速度反应谱值减小,与文献^[12]得到的现象一致。

以谱最大值为基准,对速度反应谱的谱值进行标准化(消除量纲影响,使不同的峰值参数具有可比性)处理,可得到如图2所示的标准化速度谱及粗实线代表的平均值。从图2中可以看出,标准化后速度反应谱的谱值随阻尼比的增大呈现出增大的趋势,但不同阻尼比得到的结构速度反应谱走势基本相同,唯一区别在于速度响应峰值有所不同。

由于隔震结构隔震层与主体结构的阻尼特性之

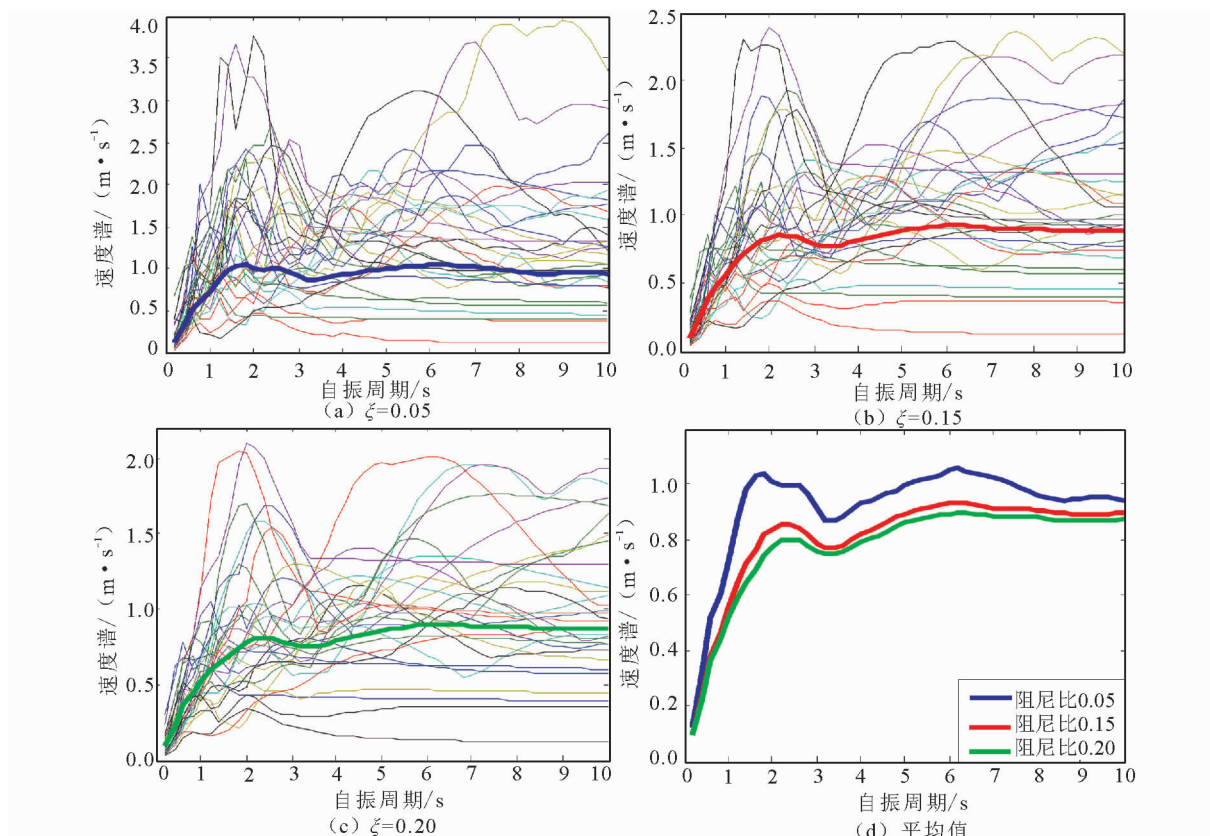


图1 未标准化的速度反应谱

Fig. 1 Velocity response spectra which are not normalized

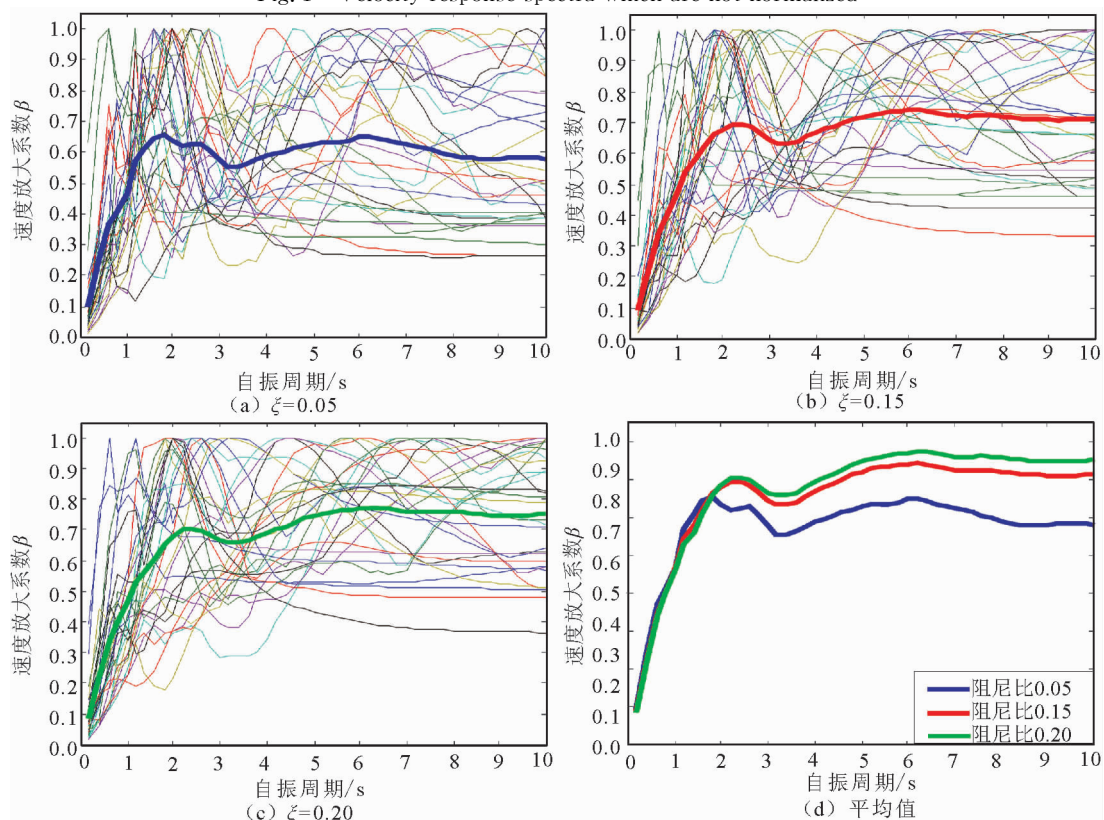


图2 标准化速度反应谱

Fig. 2 Normalized velocity response spectra

间存在着差异,杜永峰等^[13]通过建立多级串联非比例阻尼隔震结构动力分析模型,研究了隔震结构的地震响应。因此隔震结构的阻尼比大于抗震结构的阻尼比,在文中为了便于分析,选择隔震结构的阻尼比为 0.20。根据每条速度反应谱峰值对应的周期 T_v 将所选的地震记录分成 3 组,见表 2。

由分析可知^[12],虽然每个地震加速度记录都不相同,可是所获得的反应谱求平均值后,可以得到共同的特征。图 3(a)~图 3(c)是 3 组标准化速度反

应谱,图中黑色实线为求均值后得到的各组的平均速度反应谱。可以看出,平均速度反应谱的峰值分布在 0.8~1.0 之间,平均速度反应谱的峰值可近似取 0.9。由于速度是加速度与位移的纽带,已知结构的速度就可以根据公式求得结构的加速度和位移,所以可以用速度反应谱的峰值区间求得加速度和位移,验证所求值的准确性。从图 3 中可以更清楚地看出,结构的速度反应谱包含上升段、下降段、水平段、峰值。

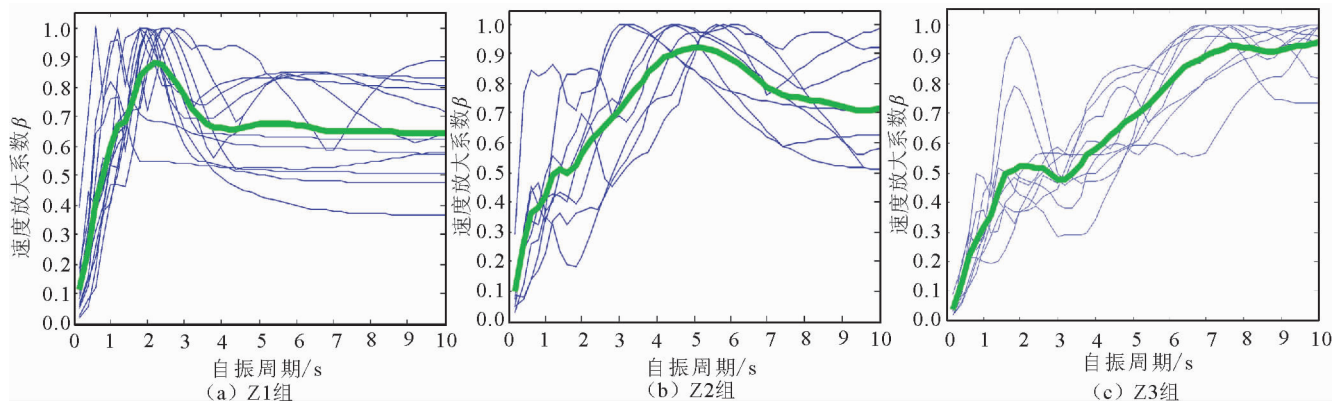


图 3 各组的标准化速度反应谱

Fig. 3 Normalized velocity response spectra of different groups

表 2 地震记录分组

Table 2 Different groups of earthquake records

组号	T_v 的范围	地震记录数量
Z1	0.6, 3.0	13
Z2	3.0, 7.0	8
Z3	>7.0	9

2.3 设计速度反应谱的拟合表达式

通过前面的分析,可以看出近断层地震动作用下结构速度反应谱的特征。

根据文中得到的平均速度反应谱,采用分段线性拟合的方法,可得到结构的设计速度反应谱,如下式所示:

$$\beta = \frac{S_v}{S_{vmax}} = \begin{cases} \frac{P_v}{T_v} T & [0, T_v) \\ P_v & [T_v, T_{v1}) \\ \frac{(P_v - P_{v1})}{T_{v2} - T_{v1}} (T_{v1} - T) + P_{v1} & [T_{v1}, T_{v2}) \\ P_{v1} & [T_{v2}, 10) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, S_v 是速度反应谱谱值, S_{vmax} 是速度谱最大值; P_v 是速度反应谱的峰值,根据以上的统计结果近似取为 0.9; T_v 是该峰值在横坐标上的投影; T_{v1} 是速度反应谱水平段与下降段的交接点在横坐

标上的投影值,大约是 T_v 的 1.5 倍; P_{v1} 是速度反应谱下降段与水平段的交接点在纵坐标上的投影值; T_{v2} 是该交接点在横坐标上的投影值,大约是 T_v 的 2.0 倍。根据上式可得到速度反应谱的图形如图 4 所示。

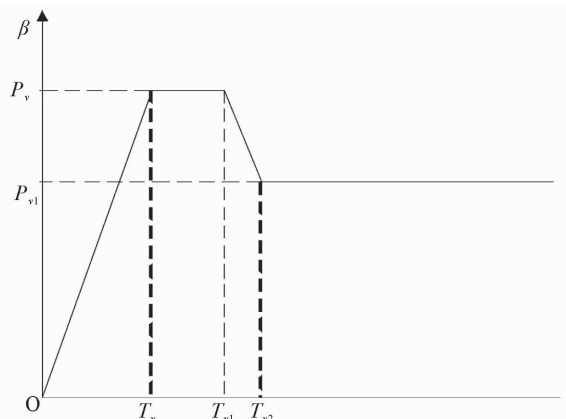


图 4 设计速度反应谱

Fig. 4 Velocity design response spectra

图 5(a)~图 5(c)是上述 3 组地震记录作用下设计速度反应谱与各组平均反应谱的对比。从对比图中可以看出,设计速度反应谱与实际地震记录的平均速度反应谱在谱形上的相似性,都有上升段、下

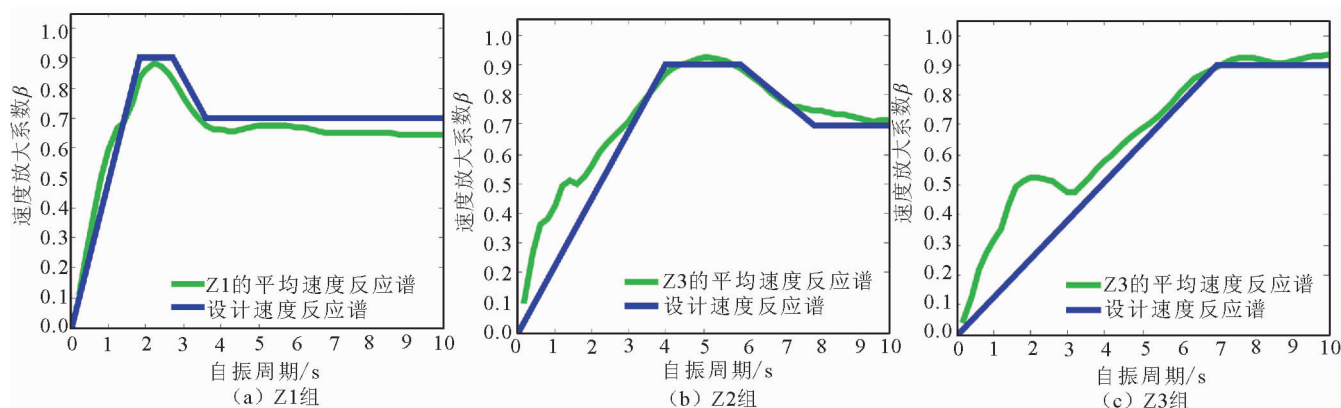


图5 不同组的设计速度反应谱与平均速度反应谱对比

Fig. 5 Comparison between velocity design spectra and velocity average spectra in different groups

降段、平稳段、水平段四个阶段。从图中对比可以看出文中的设计速度谱相对准确。

3 结论

文中根据速度峰值对应的周期对地震记录进行分组,通过标准化、求均值的方法研究了近断层地震动作用下结构的速度反应谱的特征,并用线性拟合的方法得到了结构的设计速度反应谱,还对比了速度峰值对应周期与震级的关系。通过本文研究,可以得到如下结论:

(1) 设计速度反应谱的形状由四个阶段组成,分别是:上升段、下降段、平稳段和水平段。

(2) 经过标准化、平均化的方法得到的设计速度反应谱的峰值在 0.8~1.0 之间。

(3) 阻尼比对设计速度反应谱的谱形并没有影响,但对设计速度反应谱的峰值大小有影响,两两比较后的最大相对误差为 16.68%。

反应谱的特征与震源机制、地震波的传播途径、场地类型有很大的关系,本文的设计速度反应谱只是在走滑断层、土层剪切波速在 180~360 m/s 时得到的,具有一定的局限性。下一步将会对不同影响因素下的速度谱进行分析研究。

参考文献(References)

- [1] 宋健,高广运,陈青生,等.近断层地震动作用下土质边坡动力响应研究[J].地震工程学报,2013,35(1):62-68.
SONG Jian, GAO Guang-yun, CHEN Qing-sheng, et al. Dynamic Response of Soil Slope under Near-fault Ground Motions [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 62-68. (in Chinese)
- [2] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,1988:177.
HU Yi-xian. Earthquake Engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 1988: 177. (in Chinese)

- [3] 李杰,李国强.地震工程导论[M].北京:地震出版社,1993:46-48.

LI Jie, LI Guo-qiang. Earthquake Engineering Introduction [M]. Beijing: Seismological Press, 1993: 46-48. (in Chinese)

- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范(GB50011-2010)[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

Ministry of Housing and Urban-rural Development of PRC. Code for Seismic Design of Buildings (GB50011-2010) [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2010. (in Chinese)

- [5] 李慧,王亚楠,杜永峰,等.近场脉冲型地震动作用下设计位移反应谱的研究[J].中南大学学报, (已录待刊).

LI Hui, WANG Ya-nan, DU Yong-feng, et al. Displacement Design Spectra for Near-fault Pulse-type Ground Motions [J]. Journal of Central South University, (in Press). (in Chinese)

- [6] 裴星洲,王维,王星星.基于能量原理的隔震结构地震响应预测法研究[J].工程力学,2011,28(7):65-72.

PEI Xing-zhu, WANG Wei, WANG Xing-xing. Earthquake Response Prediction of Isolated Structures Based on Energy Principle [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7): 65-72. (in Chinese)

- [7] 叶献国,许政.钢筋混凝土框架结构基于能量响应的地震反应分析[D].合肥:合肥工业大学,2010.

YE Xian-guo, XU Zheng. Energy Based Seismic Response of RC Frame Structures [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010. (in Chinese)

- [8] Housner G. Limit Design of Structure to Resist Earthquake [C]//Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering. 1956: 1-12.

- [9] 李明,谢礼立,翟长海,等.近断层地震动区域的划分[J].地震工程与工程振动,2009,29(5):20-25.

LI Ming, XIE Li-li, ZHAI Chang-hai, et al. Scope Division of Near-Fault Ground Motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(5): 20-25. (in Chinese)

(下转 1013 页)

2546.
ZHU Yi-qing, XU Yun-ma, LV Yi-pei, et al. Relations between Gravity Variation of Longmenshan Fault Zone and Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake [J]. Chinese J Geophys, 2009, 52 (10): 2538-2546. (in Chinese)
- [9] 褚庆忠, 武泽, 邵先杰, 等. 地震重力异常形成机理及其在地震预报中的作用[J]. 地震工程学报, 2014, 36(1): 201-206.
CHU Qing-zhong, WU Ze, SHAO Xian-jie, et al. Mechanism of Gravity Anomaly before Earthquake and Its Role in Earthquake Prediction [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1): 201-206. (in Chinese)
- [10] 张晶. 中强震前重复流动重力异常的模糊识别[J]. 壳形变与地震, 1996, 16(4): 66-70.
ZHANG Jing. Fuzzy Recognition of Abnormal in Repeat Mobile Gravity Before Moderate Earthquake [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1996, 16(4): 66-70. (in Chinese)
- [11] 李辉, 申重阳, 孙少安, 等. 中国大陆近期重力场动态变化图像[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(3): 1-10
LI Hui, SHEN Chong-yang, SUN Shao-an, et al. Dynamic Gravity Change in Recent Years in China Continent [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(3): 1-10. (in Chinese)
- [12] 任镇寰, 李健梅, 乔计花, 宫会玲. 广西灵山地区深部断裂系统的重力资料解释[J]. 华南地震, 2012, 32(2): 1-8.
REN Zhen-huan, LI Jian-mei, QIAO Ji-hua, GONG Hui-ling. Interpretation of Gravity Data of Deep Fault System in Lingshan Region of Guangxi [J]. South China Journal of Seismology, 2012, 32(2): 1-8. (in Chinese)

(上接 1002 页)

- [10] 韩森, 段燕玲, 孙欢, 等. 近断层地震动特征参数对基础隔震结构地震响应的影响分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 8-13.
HAN Miao, DUAN Yan-ling, SUN Huan, et al. Influence of Characteristics Parameters of Near-fault Ground Motions on the Seismic Responses of Base-isolated Structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (6): 8-13. (in Chinese)
- [11] Anil k Chopra, 著. 谢礼立, 吕大刚, 等. 结构动力学理论及其在地震工程中的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 141-177.
Anil K Chopra, Editor. XIE Li-li, LV Da-gang, et al. Theory and Applications to Earthquake Engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 141-177. (in Chinese)
- [12] 李爱群, 丁幼亮. 工程结构抗震分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 73-78.
LI Ai-qun, DING You-liang. Analysis of Earthquake Resistance of Engineering Structures [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 73-78. (in Chinese)
- [13] 杜永峰, 张尚荣, 李慧. 多级串联非比例阻尼隔震结构地震响应分析[J]. 西北地震学报, 2012, 34(4): 319-323.
DU Yong-feng, ZHANG Shang-rong, LI Hui. Seismic Response Analysis on Multistage Series Non-proportion Damping Isolated Structure [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(4): 319-323. (in Chinese)