

文章编号:1671-6833(2011)06-0027-05

地震动特性对单自由度系统地震能量响应的影响

李宇,白桦,王涛

(长安大学公路学院旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室,陕西西安710064)

摘要:合理地选取了4类场地320条强震记录,基于SDOF体系的地震能量方程,利用弹塑性动力分析程序,研究了地震动特性对SDOF体系的地震能量响应及其分配规律的影响,结果表明,SDOF体系的地震总输入能、滞回耗能、阻尼耗能都随着震级的增大而增大,阻尼耗能是中长周期结构在小震作用下消耗地震能量的主要方式,而滞回耗能则是结构在大震作用下消耗地震能量的主要方式;随着场地土质的变软,各类地震能量响应都呈递增趋势,它们的增幅也随着场地土质的变软而加剧;只要以某一设防烈度为标准,并给出相应的能量反应谱,则其它设防烈度的能量反应谱就可以根据 $PGA_{\text{设防烈度}}$ 与 $PGA_{\text{标准烈度}}$ 比值的平方调整得到。

关键词:单自由度系统;地震能量响应;地震动特性;滞回耗能;阻尼耗能

中图分类号:U442.5 **文献标志码:**A

0 引言

近年来,从能量的角度来研究结构的地震反应和损伤水平的思想日益受到国内外地震工程界的广泛重视.而抗震设计的能量方法首要问题在于如何选择合适的能量参数以评估结构的地震需求.目前,由于谱形式便于设计应用,且和已有的抗震设计思路能保持一定的延续性,所以大多数学者倾向于采用能量谱的形式来确定地震动对结构的总能量输入.因此,很多学者对SDOF体系地震能量响应进行了研究^[1-6].

但是,地震动是频带较宽的非平稳随机过程,受到震源性质、震中距、传播途径和场地条件等因素的影响,不同的地震动计算所得的结构响应有时相差可达几倍、甚至几十倍之多.而上述研究^[1-6]或是所依据的地震动记录太少,不具统计规律,或是仅从经验公式推导,结果过于粗略,离工程设计应用尚有相当的距离.因此,笔者选取了4类场地的320条强震记录,采用与钢筋混凝土受弯构件试验吻合较好的Takeda双线性刚度退化模型,利用单自由度弹塑性动力分析程序,研究了地震动特性对SDOF体系的地震能量响应及其分配规律的影响,以期对桥梁结构基于能量的抗

震设计提供重要的参考和依据.

1 单自由度系统的地震能量方程

单自由度体系的运动方程左右两端分别除以质量 m 可以得到^[7]

$$\ddot{X}(t) + (4\pi\xi/T)\dot{X}(t) + r(X) = -\ddot{X}_g(t) \quad (1)$$

式中: $\ddot{X}(t)$ 、 $\dot{X}(t)$ 、 $X(t)$ 分别为质点相对于地面的加速度、速度和位移; T 为自振周期; ξ 为阻尼比; $r(X)$ 为单位质量的恢复力; $\ddot{X}_g(t)$ 为地面运动加速度.将式(1)左右两端对质点相对位移 $X(t)$ 积分,可得^[8-11]

$$\int_0^t \ddot{X}(t) dX(t) + (4\pi\xi/T) \int_0^t \dot{X}(t) dX(t) + \int_0^t r(X) dX(t) = - \int_0^t \ddot{X}_g(t) dX(t) \quad (2)$$

式中:左端3项依次为以相对位移 $X(t)$ 为基础的单位质量的动能 $E_k(t)$ 、阻尼耗能 $E_d(t)$ 、滞回耗能和弹性应变能之和 $E_H(t) + E_S(t)$,右端为单位质量的地震总输入能 $E_I(t)$.在任意时刻,系统的总输入能与其它能量之和平衡^[8-11].

$$E_I(t) = E_k(t) + E_d(t) + E_H(t) + E_S(t) \quad (3)$$

式(2)~(3)称为相对能量方程.

当SDOF体系的质量为 M 时,以上定义的各

收稿日期:2011-07-08;修订日期:2011-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578007);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC003, CHD2011JC004);中国博士后科学基金资助项目(2011M501429)

作者简介:李宇(1982-),男,福建福州人,长安大学讲师,博士,主要进行桥梁抗震与抗风方面的研究, E-mail: liyu@chd.edu.cn.

能量可由相应的单位质量能量乘以 M 得到,即各能量反应与质量成正比.需要指出的是:以下计算所得的能量值都是与单位质量相对应的能量(单位为 m^2/s^2).另外,为了能对 SDOF 体系的滞回耗能 E_H 和阻尼耗能 E_D 做出合理评价,笔者定义滞回耗能比为结构非弹性变形所消耗的能量在地震中输入能中所占的比例($\lambda_H = E_H/E_I$)、阻尼耗能比 $\lambda_D = E_D/E_I$.

2 地震波的选取

由于本研究的目的是为桥梁结构基于能量的抗震设计提供的参考和依据.所以,该研究以《铁路工程抗震设计规范》^[12]和《公路桥梁抗震设计细则》^[13]为依据,从美国太平洋地震工程研究中心的强震记录数据库中挑选了国外十几次主要地震事件(断层距在 6.2 ~ 161.7 km、震级 5.7 ~ 7.6)的 320 条强震记录(I、II、III、IV类场地各 80 条),其震级和震中距分布情况如图 1 所示.

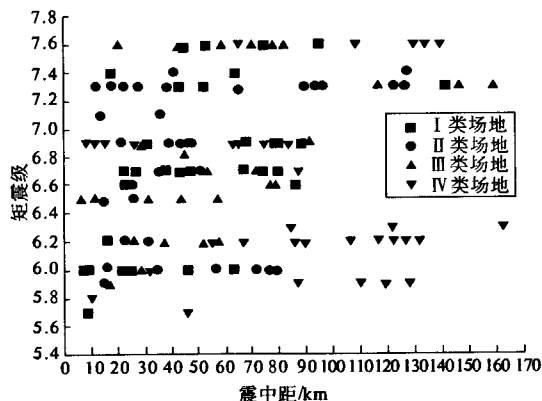


图1 震级-距离分布

Fig.1 Magnitude-distance distribution

图2给出了以所选取的4类场地320条地震波为激励所统计的I、II、III、IV类场地的动力放大系数 β 曲线(阻尼比 $\xi = 5\%$),并与《铁路工程抗震设计规范》^[12]的动力放大系数 β 曲线进行了比较.从中可以看出:本研究所统计的动力放大系数 β 曲线总体上与规范值符合较好,这说明笔者

所选用的4类场地320条地震记录的特性基本符合规范的要求.

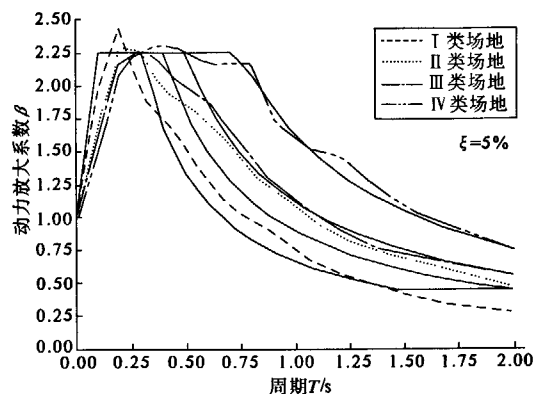


图2 不同场地的动力放大系数

Fig.2 Dynamic magnification factors in different sites

3 地震震级的影响

笔者以I类场地为例,将所选取的80条强震记录按照震级的大小划分为小震($MW5.7 \sim 6.2$)、中震($MW6.3 \sim 6.8$)和大震($MW6.9 \sim 7.6$)3类,并按照罕遇地震下7度设防标准调幅为0.21 g后,基于Takeda双线性刚度退化模型,假定SDOF体系的阻尼比 $\xi = 5\%$,屈服后刚度比 $\eta = 0.05$,位移延性比 $\mu = 1.0 \sim 5.0$,利用Bispec程序计算了各类能量响应的平均值,研究了地震震级对SDOF体系地震能量响应及其分配规律的影响.

图3反映了震级对SDOF体系地震总输入能 E_I 、滞回耗能 E_H 、阻尼耗能 E_D 的影响.从中可以看出:随着震级的增大, E_I 、 E_H 、 E_D 都呈递增趋势.这是因为震级代表了震源特性,反映了一次地震中释放能量的规模,震级越大则地震所释放的能量也越大,这就使得SDOF体系 E_I 的增加,进而导致 E_H 和 E_D 的增加.另外,震级对不同延性 SDOF 体系的各种地震能量响应的影响程度也不相同,例如随着震级的增大, $E_D(\mu < 1.5)$ 的增幅远小于 $E_D(\mu > 3)$.

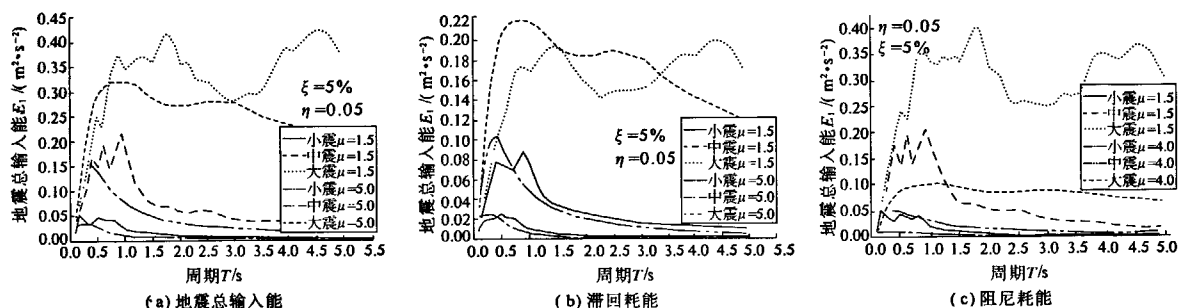


图3 震级(MW)对地震能量响应的影响

Fig.3 Effect of MW on the energy response

图4则反映了震级对SDOF体系地震能量分配规律的影响,从中可以看出:

(1)滞回耗能比 λ_H 随着周期 T 的增加而减少,特别是在小震作用下, λ_H 的降幅更是达到了57.5%。可见,中长周期结构在小震作用下所产生的非弹性变形较少,主要是通过阻尼耗能 E_D 来消耗地震能量,这就减轻了结构的震害;

(2)随着震级的增大,滞回耗能比 λ_H 不断增加,特别是在大震时, λ_H 值在61%~67%之间变化。可见,滞回耗能 E_H 是结构在大震时消耗地震能量的主要方式,但这却要以非弹性变形的增多为代价,进而导致了结构损伤程度的加剧。

4 场地土类型的影响

将4类场地320条强震记录按照罕遇地震下8度设防标准调幅为0.38g后,采用Takeda双线性刚度退化模型,假定阻尼比 $\xi=5\%$,屈服后刚

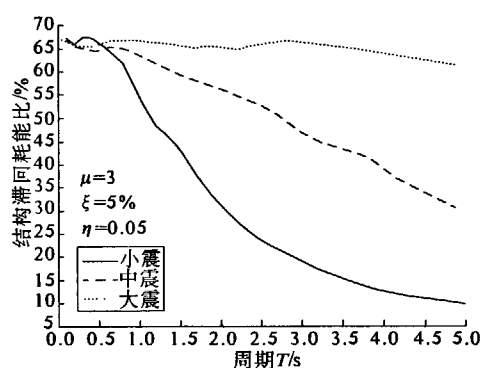


图4 震级(MW)对地震能量分配规律的影响

Fig. 4 Effect of MW on distributive rules of energy response

度比 $\eta=0.05$,位移延性比 $\mu=1.0\sim 5.0$,利用Bispec程序计算了SDOF体系各类能量响应的平均值,研究了场地土质条件对单自由度体系地震能量响应及其分配规律的影响。

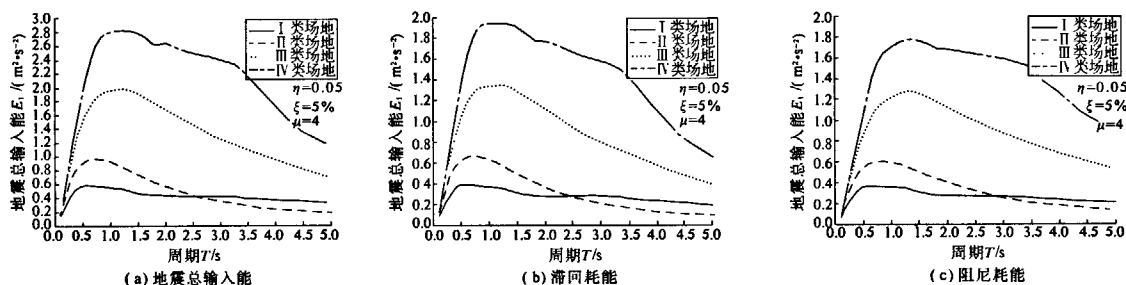


图5 场地类型对地震能量响应的影响

Fig. 5 Effect of site conditions on the energy response

图5(a)~(c)反映了场地土质条件对SDOF体系地震总输入能 E_I 、滞回耗能 E_H 、阻尼耗能 E_D 的影响,从中可以看出: E_I 、 E_H 、 E_D 总体上都是随着场地土质的变软而呈递增趋势,而且它们的增幅也随着场地土质的变软而加剧。

图6则反映了场地土质条件对SDOF体系地震能量分配规律的影响,从中可以看出:

①4类场地的滞回耗能比 λ_H 都随着周期 T 的增大而降低。其中:I、III、IV3类场地的 λ_H 曲

线大体上相同,减幅也比较接近(大致为13.4%、18.6%、18.7%);而II类场地的 λ_H 曲线则在 $1.6\text{ s} < T < 5.0\text{ s}$ 的周期范围内,与上述3类场地有较大差距,最大时可相差11.4%;

②随着周期 T 的增大,I类场地的阻尼耗能比 λ_D 曲线变化不大,在30.8%~32.8%上下浮动,而II、III、IV3类场地的 λ_D 曲线则随着周期 T 的增加而递增。

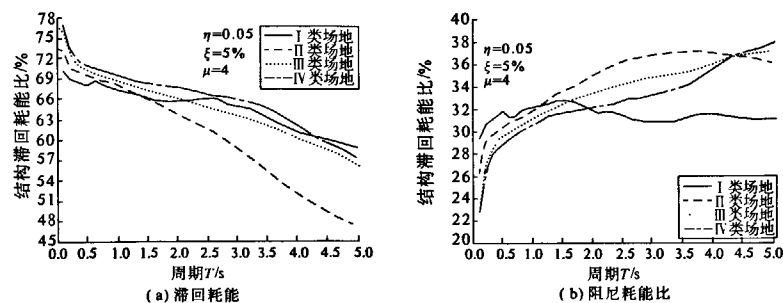


图6 场地类型对地震能量分配规律的影响

Fig. 6 Effect of site conditions on energy response

5 地震动峰值加速度(PGA)的影响

笔者将 4 类场地 320 条强震记录分别按照罕遇地震下 6 度、7 度、8 度和 9 度设防标准调幅为 0.11 g、0.21 g、0.38 g 和 0.64 g,并采用 Takeda

双线性刚度退化模型,假定阻尼比 $\xi = 5\%$, 屈服后刚度比 $\eta = 0.05$, 位移延性比 $\mu = 1.0 \sim 5.0$, 利用 Bispec 程序计算了 6 度、7 度、8 度和 9 度罕遇地震作用下 SDOF 体系各类能量响应的平均值。

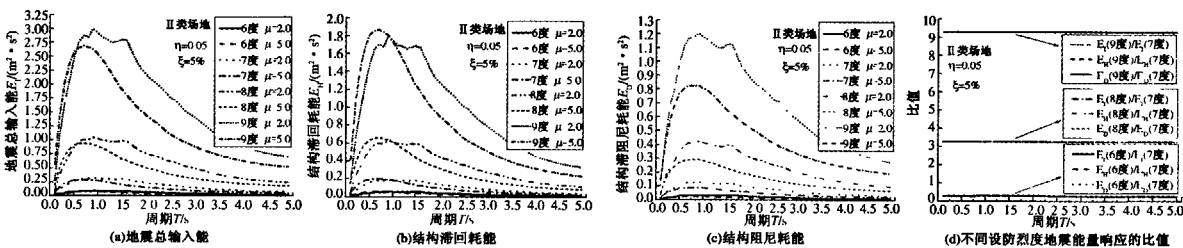


图 7 PGA 对地震能量响应的影响
Fig.7 Effect of PGA on the energy response

图 7(a) ~ (c) 反映了不同的 PGA 对 SDOF 体系 E_I 、 E_H 、 E_D 的影响(Ⅱ类场地),从中可以看出:

- ①PGA 和周期 T 都是影响 E_I 、 E_H 、 E_D 的重要因素,而且 E_I 、 E_H 、 E_D 都随着 PGA 的增大而增加,这是因为地面动强度越大,输入至结构的地震能量也越多,进而导致结构通过阻尼及非弹性变形等形式所耗散的能量增加;
- ②如果以 7 度时的 E_I 为基准,6 度、8 度和 9 度时的 E_I 分别为 7 度时 E_I 的 0.281 倍、3.275 倍和 9.290 倍,这分别和 6 度、8 度、9 度的 PGA 与 7 度 PGA 比值的平方大致相同,如图 7(d) 所示:
 $(PGA_{6度}/PGA_{7度})^2 = (0.11g/0.21g)^2 = 0.274(4)$

$(PGA_{8度}/PGA_{7度})^2 = (0.38g/0.21g)^2 = 3.274(5)$
 $(PGA_{9度}/PGA_{7度})^2 = (0.64g/0.21g)^2 = 9.288(6)$
同时,PGA 对 E_H 、 E_D 的影响也与上述规律基本相同(其它场地也有相同的结论)。

另外,从图 8 中可以看出:当其它条件相同时,不同 PGA 条件下的滞回耗能比 λ_H 和阻尼耗能比 λ_D 曲线相互重合,这就证实了上述结论。可见,只要以某一设防烈度为标准,并给出该标准烈度所对应的能量反应谱,则其它设防烈度下的能量反应谱就可以很方便的根据 $PGA_{设防烈度}$ 与 $PGA_{标准烈度}$ 比值的平方调整得到。

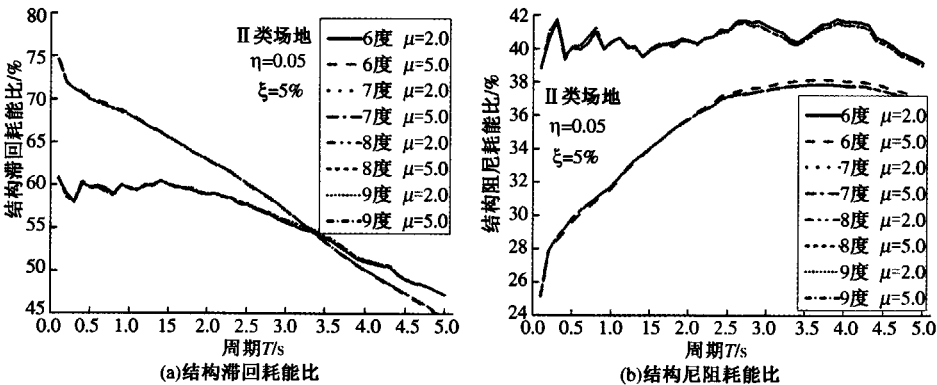


图 8 PGA 对地震能量分配规律的影响
Fig.8 Effect of PGA on distributive rules of energy response

6 结 论

(1)随着震级的增大,SDOF 体系地震总输入能、滞回耗能、阻尼耗能都呈递增趋势. 在小震作用下,中长周期结构主要是通过阻尼耗能来消耗地震能量;而在大震作用下,滞回耗能则成为结构消耗地震能量的主要方式。

- (2)场地土质条件对 SDOF 体系地震能量响应及其分配规律的影响显著:随着场地土质的变软,各类地震能量响应都呈递增趋势,而且它们的增幅也随着场地土质的变软而加剧。
- (3)只要以某一设防烈度为标准,并给出该标准烈度所对应的能量反应谱,则其它设防烈度

下的能量反应谱就可以很方便的根据 $PGA_{\text{设防烈度}}$ 与 $PGA_{\text{标准烈度}}$ 比值的平方调整得到。

上述结论可为桥梁结构基于能量的抗震设计提供重要的参考和依据。

参考文献:

- [1] HOUSNER G W. Limit design of structures to resist earthquake [C]// Proceedings of 1st Conference on Earthquake Engineering, America; Berkeley, 1956.
- [2] AKIYAMA H. Earthquake Resistant Design Based on the Energy Concept [C]// Proceedings of 9th WCEE, Japan; Tokyo, 1988: 905 - 910.
- [3] MICHEL B. Some aspects of energy methods for the inelastic seismic response of ductile SDOF structures [J]. Engineering Structures, 1996, 18(1): 1 - 12.
- [4] LUIS D D. An energy-based methodology for the assessment of seismic demand [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21: 113 - 137.
- [5] 熊仲明, 史庆轩. 框架结构基于能量地震反应分析及设计方法的理论研究 [J]. 振动与冲击, 2003, 22(4): 8 - 12.
- [6] 江辉. 近场地震下桥梁结构基于性能抗震设计的能量方法 [D]. 北京: 北京交通大学土建学院, 2007.
- [7] 胡聿贤. 地震工程学 [M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [8] 史庆轩, 杨文星, 门进杰. 单自由度体系非线性地震能量反应分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 25 - 29.
- [9] 李菊芳. 建筑结构基于能量的地震反应分析及设计方法 [D]. 西安: 西安建筑科技大学土木建筑工程学院, 2004.
- [10] 肖明葵. 基于性能的抗震结构位移及能量反应分析方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学土木建筑工程学院, 2004.
- [11] ANINDYA D. Bridge on energy based seismic analysis and design of highway [D]. Faculty of the Graduate School of the State University of New York at Buffalo, 1999.
- [12] 中华人民共和国铁道部. GB 50111—2006 铁路工程抗震设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. JTG/TB 02 - 01—2008 公路桥梁抗震设计细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

Effects of Characteristics of Earthquake Motion on Seismic Energy Response of Single-degree-of-freedom System

LI Yu, BAI Hua, WANG Tao

(Key Laboratory of Ministry of Communications for Bridge Detection & Reinforcement Technology, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: 320 strong motion records of four sites are appropriately selected. Based on energy equations of SDOF system, the elasto-plastic dynamic analysis program is used to study the effects of characteristics of earthquake motion on seismic energy response of SDOF system. The study results are obtained as follows: Seismic energy response, hysteretic energy dissipation and damping energy dissipation increased with the increase of earthquake magnitude. The medium length period structures subjected to minor shock are depended on damping energy dissipation to consume the seismic energy. And, structures subjected to major shock are dependant on hysteretic energy dissipation to consume the seismic energy. When the site soil softens, seismic energy response increases and its amplification also aggravates. Seismic energy spectra of other protected earthquake intensity can be obtained by adjusting seismic energy spectra of the standard protected earthquake intensity according to square ratio of PGA (protected earthquake intensity) to PGA (standard protected earthquake).

Key words: SDOF system; seismic energy response; characteristics of earthquake motion; hysteretic energy dissipation; damping energy dissipation