

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.018

长周期地震动的非弹性反应谱

李宇¹, 王佳豪¹, 范陆¹, 殷东朔¹, 李琛²

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学建筑学院 陕西 西安 710061)

摘要: 根据长周期地震动的特性, 选取 139 条长周期地震动记录, 以分析结构动力参数和长周期地震动特性对长周期地震动非弹性反应谱的影响规律。研究表明: 与常规地震动相比, 恢复力模型和屈服后刚度比(η)对地震动非弹性反应谱中长周期段的影响较大, 且场地土对非弹性反应谱的放大效应更为显著; 相反, 阻尼比(ξ)和位移延性比(μ)对常规和长周期地震动非弹性反应谱的影响规律较为类似。提出在建立长周期地震动设计谱时, 应选取合理的恢复力模型和 η , 参考已有 ξ 和 μ 对常规地震动反应谱的影响规律, 并针对不同的场地类型建立相应的设计谱; 可以先建立某标准设防烈度的长周期地震动的设计谱, 其他设防烈度的设计谱可用 $PGA_{\text{设防}}$ 与 $PGA_{\text{标准}}$ 的比值调整得到。

关键词: 长周期地震动; 非弹性反应谱; 地震峰值加速度; 屈服后刚度比; 阻尼比; 位移延性比
中图分类号: U448.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)02-0138-12

Inelastic response spectra of long-period ground motions

LI Yu¹, WANG Jiahao¹, FAN Lu¹, YIN Dongshuo¹, LI Chen²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: According to the characteristics of long-period ground motions (GMs), 139 long-period GM records are selected to study the influence of structural dynamic parameters and long-period GM characteristics on the inelastic response spectra of long-period GMs. The following conclusions are obtained: compared with conventional GMs, the influence of the restoring force model and the post-yield stiffness ratio (η) on the spectral values of the medium- and long- periods of inelastic response spectra is larger, and the amplification effect of site soil on the inelastic response spectra is more significant; on the contrary, the effects of damping ratio (ξ) and displacement ductility ratio (μ) on the inelastic response spectra of conventional and long-period GMs are similar. Therefore, when establishing the design spectra of long-period GMs, it is necessary to select a reasonable restoring force model and η , while the existing influence law of ξ and μ on the conventional GM response spectra can be referred to, and the corresponding design spectra should be established according to different types of site soil; moreover, the design spectra of long-period GMs of a standard fortification intensity can be established first, and then the design spectra of other fortification intensities can be adjusted by the ratio of $PGA_{\text{fortification}}$ and PGA_{standard} .

Key words: long-period ground motion; inelastic response spectra; PGA; post-yield stiffness ratio; damping ratio; displacement ductility ratio

在土耳其盖迪兹地震(1970 年)、墨西哥城地震(1985)、日本十胜冲地震(2003)、东日本地震(2011)中, 远场型的大地震对长周期结构造成了特殊震害, 但对自振周期小的低矮房屋影响较小, 该现象引起有关学者对长周期地震的关注^[1-4], 许多学者开展了长周期结构地震响应的研究。Chen 等^[5]研究了超高层建筑在长周期地震动作用下的动力响应特性; Mohammed 等^[6]比较了 RNC 隔震桥梁在近断层、长周期和脉冲型地震动作用下的抗震性能; Asai 等^[7]探讨了高层建筑物的长期地震动响应; Shekari^[8]研究了频率含量对基础隔

基金项目: 国家自然科学基金(51408042); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JQ-507, 2023-JC-YB-438); 重庆市在渝院士牵头创新引导专项(2022YSZX-JSX0003CSTB)

作者简介: 李宇(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事桥梁抗震及抗风研究。E-mail: liyu@chd.edu.cn

引用本文: 李宇, 王佳豪, 范陆, 等. 长周期地震动的非弹性反应谱[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 138-149.

LI Yu, WANG Jiahao, FAN Lu, et al. Inelastic response spectra of long-period ground motions[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 138-149.

震混凝土矩形储液罐抗震性能的影响;Mazza 等^[9-10]评估了基础隔震不规则结构在脉冲型地震作用下的抗震需求;Hu 等^[11]对长周期地震动进行了模拟,并讨论了长周期地震动对高层建筑物地震反应的影响;Huo 等^[12]在考虑土-结构相互作用的基础上,对风电机组筒形塔在长周期地震动下的动力响应进行了研究;Zhou 等^[13]提出了一种改进的长周期地震动参数的定义方法,并将其应用于超高层建筑物的地震响应计算中;姬淑艳等^[14]研究了远场长周期地震动作用下超高层建筑结构的地震响应特性;Bai 等^[15]研究了高层钢筋混凝土框架在长周期地震动作用下的倒塌全过程。

另外,长周期结构的抗震设计需要长周期地震动反应谱的辅助。李宇等^[16]选取了 47 条长周期地震动记录,对长周期地震动弹性反应谱进行了参数影响研究;Zhou 等^[17]基于 GB 50011—2010《中国建筑抗震设计规范》的场地分类标准,研究了长周期地震动的弹性反应谱;张亮泉等^[18]采用遗传算法对长周期地震动加速度反应谱进行了拟合。然而这些研究依据的长周期地震动数据较少,不具有统计意义,也没有讨论长周期地震动的非弹性反应谱。

本文根据长周期地震动的特性,选取 139 条长周期地震动记录,用于研究结构动力参数和长周期地震动特性对长周期地震动非弹性反应谱的影响规律,为长周期地震动设计谱的建立提供参考依据。

1 长周期地震动的特征

相比于常规地震动,长周期地震动的卓越周期较长,蕴含的能量以低频成分为主。长周期地震动可分为远场型和近场脉冲型两种。远场型长周期地震动产生于距离较远的盆地或厚冲击层平原,受场地土的影响较大,其主要成分是低频的长周期面波。图 1 为长周期地震动(台湾集集地震的 TCU018 和 TCU094,图 1(a)(b))和常规地震动(El Centro 波和天津波,图 1(c)(d))加速度时程曲线

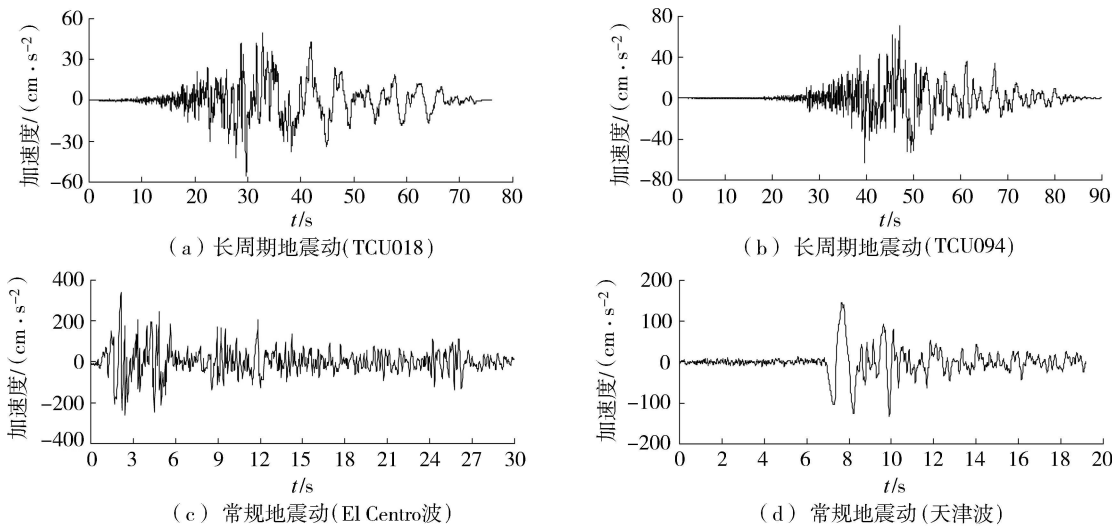


图 1 长周期和常规地震动的加速度时程曲线

Fig.1 Acceleration time-history curves of long-period and conventional ground motions

a. 对图 1 地震动记录进行傅里叶变换,得到其傅里叶幅值谱(图 2)。从图 2 可知:常规地震动的卓越频率分布较宽,且主要集中在高频段(1~5 Hz);而长周期地震动的卓越频率分布较窄,主要集中在低频段(0.1~1.0 Hz)。

b. 将 4 条地震动按同一地震动峰值加速度(PGA)调幅后,对比其弹性加速度和位移反应谱(图 3)。从图 3 可知:在长周期段,长周期地震动的反应谱值要远大于常规地震动,即长周期地震动对长周期结构(如大跨桥梁、超高层建筑)的影响很大。

2 长周期地震动的选取

本文的研究对象是远场型长周期地震动,根据远场型长周期地震动的定义、特性以及界定方法,确立远场型长周期地震动记录选取原则如下:矩震级 $M \geq 6.0$;断层投影距 $R_{jb} > 50$ km;弹性加速度反应谱的长周期段具有明显的波峰;PGV(地震动峰值速度)与 PGA 的比值大于等于 0.2。

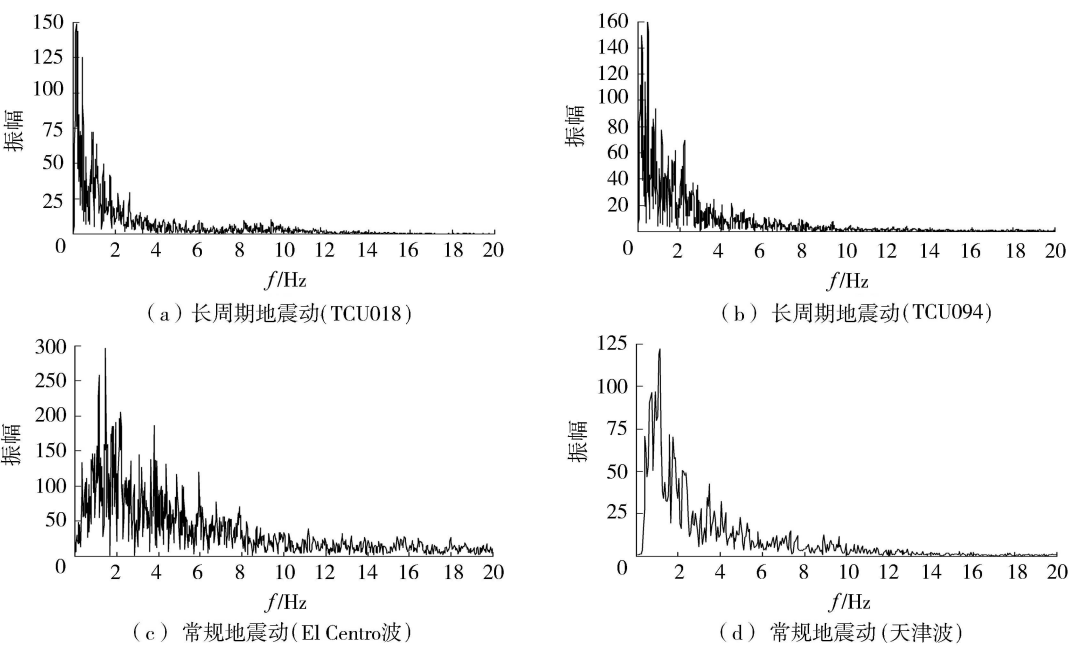


图2 长周期和常规地震动的卓越频率对比

Fig.2 Frequency comparison of long-period and conventional ground motions

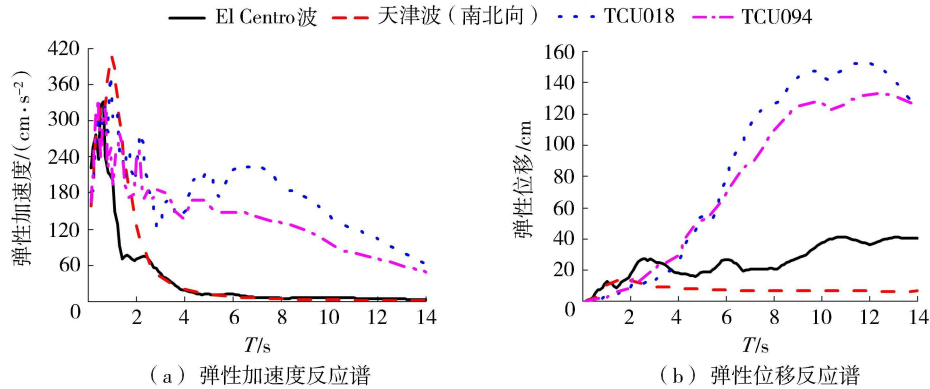


图3 长周期地震动和常规地震动的反应谱对比

Fig.3 Comparison of response spectra of long-period and conventional ground motions

在此基础上,从 PEER、K-NET 和 KIK-NET 等强震数据库中,挑选远场型长周期地震动记录 139 条。根据文献[19],美国抗震设计规范 v_{s30} (覆盖层厚度为 30 m 的剪切波速) ≥ 510 m/s、 260 m/s $\leq v_{s30} < 510$ m/s、 150 m/s $\leq v_{s30} < 260$ m/s、 $v_{s30} < 150$ m/s 的场地分别对应 GB50011—2010《中国建筑抗震设计规范》和 JTGB02—2013《中国公路工程抗震设计规范》中的场地标准 I~IV,得到 139 条远场型长周期地震动记录如表 1 所示,其中 I 类 38 条,II 类 40 条,III 类 41 条,IV 类 20 条。

3 非弹性反应谱的基本方程

地震动 $\ddot{x}_g(t)$ 作用下,非弹性单自由度(SDOF)体系的运动方程^[20]为

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + k(x)x(t) = -m\ddot{x}_g(t) \tag{1}$$

式中: $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 、 $\ddot{x}(t)$ 分别为质点相对于地面的位移、速度、加速度; m 为质量; c 为阻尼系数; $k(x)$ 为非线性恢复力模型的切线刚度。

设非弹性 SDOF 体系的线弹性刚度为 k_1 ,则式(1)两边除以 m 得

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_0\dot{x}(t) + \frac{k(x)}{k_1}\omega_0^2x(t) = -\ddot{x}_g(t) \tag{2}$$

其中 $\omega_0 = \sqrt{k_1/m}$ $T = 2\pi/\omega_0$ $\xi = c/(2m\omega_0)$

表 1 远场型长周期地震动记录

Table 1 Selected records of the far-fault and long-period ground motion

编号	地震数据库 的记录编号	PGA/ (cm·s ⁻²)	编号	地震数据库 的记录编号	PGA/ (cm·s ⁻²)	编号	地震数据库 的记录编号	PGA/ (cm·s ⁻²)
I -1	NH0270	24.7	II -10	CHB002EW	6.9	III -17	NIG013EW	7.9
I -2	KAU057	15.8	II -11	CHB010EW	3.8	III -18	CAL360	66.6
I -3	TCU003	50.8	II -12	SIT009NS	6.4	III -19	chnua370397	54.7
I -4	TCU006	59.2	II -13	SIT013NS	4.8	III -20	AKT0051103111451EW	5.7
I -5	TCU018	55.5	II -14	SITH04EW	5.0	III -21	AKT0051103111451NS	3.2
I -6	TCU048	175.7	II -15	SITH04NS	4.8	III -22	AKT0091103111451EW	2.7
I -7	TCU087	111.6	II -16	TKY006NS	5.3	III -23	AOMH101103111451NS2	1.6
I -8	TCU094	70.8	II -17	TKY007EW	5.5	III -24	CHB0111103111451NS	10.1
I -9	TCU100	111.2	II -18	TKY007NS	6.4	III -25	CHB0131103111451EW	7.1
I -10	TCU128	141.2	II -19	TKY022NS	9.2	III -26	HKD0590309260450NS	58.7
I -11	TCU006	4.6	II -20	TKYH11NS	7.4	III -27	HKD1051103111446NS	17.2
I -12	KAU003	10.2	II -21	FKS021EW	9.8	III -28	HKD1180309260450NS	24.8
I -13	TTN036	11.3	II -22	FKS021NS	7.1	III -29	HKD1790309260450 NS	38.6
I -14	GIFH22	1.1	II -23	NIG024EW	2.0	III -30	HKD1790309260450EW	38.6
I -15	MYGH03	0.4	II -24	TCG005EW	12.1	III -31	HKD1791103111446EW	11.7
I -16	YMNH09	1.3	II -25	FKOH02EW	2.5	III -32	HKD1791103111446NS	12.8
I -17	NIG023EW	1.4	II -26	SITH04EW	7.4	III -33	HKD1821103111446EW	13.7
I -18	NIG023NS	2.0	II -27	YMT002EW	5.3	III -34	HKD1821103111446NS	15.9
I -19	NIGH12NS	1.8	II -28	KHZNS	4.4	III -35	NIGH051103111446 EW1	18.4
I -20	TCGH09EW	3.1	II -29	KIKSS25E	10.3	III -36	NIGH051103111446 EW2	37.4
I -21	TCGH17EW	0.9	II -30	CIADOHNN	7.2	III -37	NIGH051103111446 NS1	18.7
I -22	TCGH17NS	0.8	II -31	CIDLAHNN	16.5	III -38	NIGH051103111446 NS2	32.9
I -23	YMTH05EW	7.0	II -32	CILAFHNE	9.4	III -39	HKD1220309260450EW	42.9
I -24	FKO010NS	2.7	II -33	CILFPHNE	5.0	III -40	HKD1780309260450EW	40.2
I -25	FKOH01NS	6.0	II -34	CILGBHNE	10.9	III -41	HKD1780309260450NS	35.2
I -26	FKOH09NS	5.0	II -35	CILGBHNN	9.3	IV -1	IKRH020309260450EW2	64.1
I -27	KMMH02EW	2.6	II -36	CIRVRHNE	3.9	IV -2	IKRH020309260450NS1	26.1
I -28	KOCH04EW	1.3	II -37	CISMSHNN	6.9	IV -3	IKRH020310311006NS1	97.2
I -29	MIEH07NS	1.2	II -38	HKD0580309260450EW	29.4	IV -4	IKRH020611152015EW2	1.2
I -30	OITH05NS	1.7	II -39	HKD1230309260450EW	28.7	IV -5	IKRH021103111446EW1	9.6
I -31	OSKH02EW	17.4	II -40	HKD1290309260450EW	61.2	IV -6	IKRH021103111446NS2	10.4
I -32	YMGH01NS	5.9	III -1	CHY002NS	134.7	IV -7	IKRH021103111446EW2	17.9
I -33	YMGH06NS	4.5	III -2	CHY002EW	108.3	IV -8	IKRH020309260450EW1	27.9
I -34	YMGH12EW	4.9	III -3	CHY017NS	54.1	IV -9	NIG0141107100957EW	2.7
I -35	YMGH12NS	5.1	III -4	CHY026EW	76.2	IV -10	NIG0100305261824EW	4.8
I -36	MYGH03NS	0.7	III -5	CHY026NS	65.9	IV -11	NIG0101103111446NS	26.4
I -37	SZOH36EW	0.8	III -6	CHY027EW	54.0	IV -12	1999Chi-ChiLA004NS	62.7
I -38	NGNH280305261824	1.1	III -7	CHY093EW	52.8	IV -13	1999Chi-ChiLA004EW	71.7
II -1	OBR000	41.7	III -8	CHY116NS	50.9	IV -14	TKCH060309260450EW1	64.0
II -2	CHY092NS	82.8	III -9	ILA041NS	62.0	IV -15	TYM0051103111446NS	25.8
II -3	CHY092EW	101.3	III -10	ILA048NS	75.2	IV -16	TYM0051411222208NS	7.8
II -4	ILA055NS	68.1	III -11	TCU115EW	94.4	IV -17	TYM0051411222208EW	8.1
II -5	ILA055EW	74.6	III -12	TCU115NS	115.3	IV -18	YMT0011103111446NS	37.4
II -6	TCU008EW	66.6	III -13	TCU115NS	38.8	IV -19	YMT0011103111515NS	8.7
II -7	TCU081EW	76.8	III -14	CHY093EW	14.7	IV -20	YMT0011407120422NS	2.4
II -8	TCU104NS	86.9	III -15	CHBH10NS	5.1			
II -9	B6M090	41.8	III -16	AOM021NS	14.9			

式中: ω_0 为圆频率; T 为周期; ξ 为阻尼比。

求解式(2),可得非弹性 SDOF 体系的绝对加速度、相对位移、残余位移和强度折减系数的最大地震响应。然后,改变非弹性 SDOF 体系的 T 和 ξ ,再连续求解式(2),最终可得非弹性 SDOF 体系的绝对加速度反应谱 S_{at} 、相对位移反应谱 S_d 、残余位移反应谱 S_{res} 和强度折减系数反应谱 S_R ^[20]。

4 结构动力参数的影响

以 139 条长周期地震动记录作为输入,考虑周期 ($T=0.01\text{ s}\sim 20\text{ s}$)、恢复力模型、屈服后刚度比 ($\eta=k_1/k_2=0.0\sim 0.05$, k_2 为二次刚度)、阻尼比 ($\xi=2\%\sim 14\%$)、位移延性比 ($\mu=x_{\max}/x_y=1.0\sim 5.0$, $x_{\max}$ 为最大位移, x_y 为屈服位移)、 M 、场地和 PGA 的影响,利用美国伯克利大学编制的地震反应谱计算软件 (BISPEC) 计算长周期地震动的非弹性反应谱 (S_{at} 、 S_{d} 、 S_{res} 、 S_{R})。

4.1 恢复力模型的影响

以 I 类场地为例,将 38 条长周期地震动记录的 PGA 调幅为 $0.15g$,取 $\xi=5\%$ 、 $\eta=0.05$ 、 $\mu=1.0\sim 5.0$,计算双线性模型 (无刚度退化) 和 Takeda 双线性刚度退化模型 (图 4) 对应的长周期地震动非弹性反应谱,结果如图 5 所示。

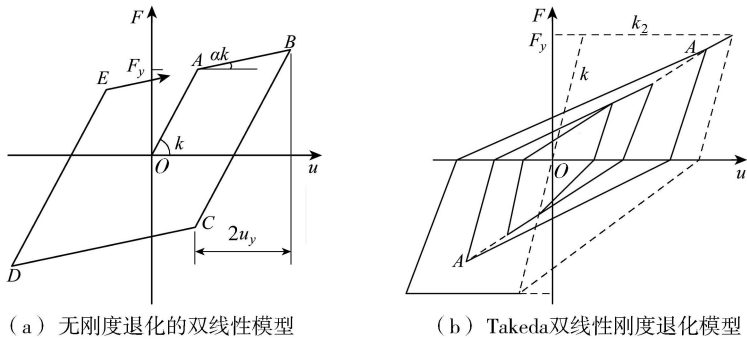


图 4 恢复力模型
Fig. 4 Restoring force model

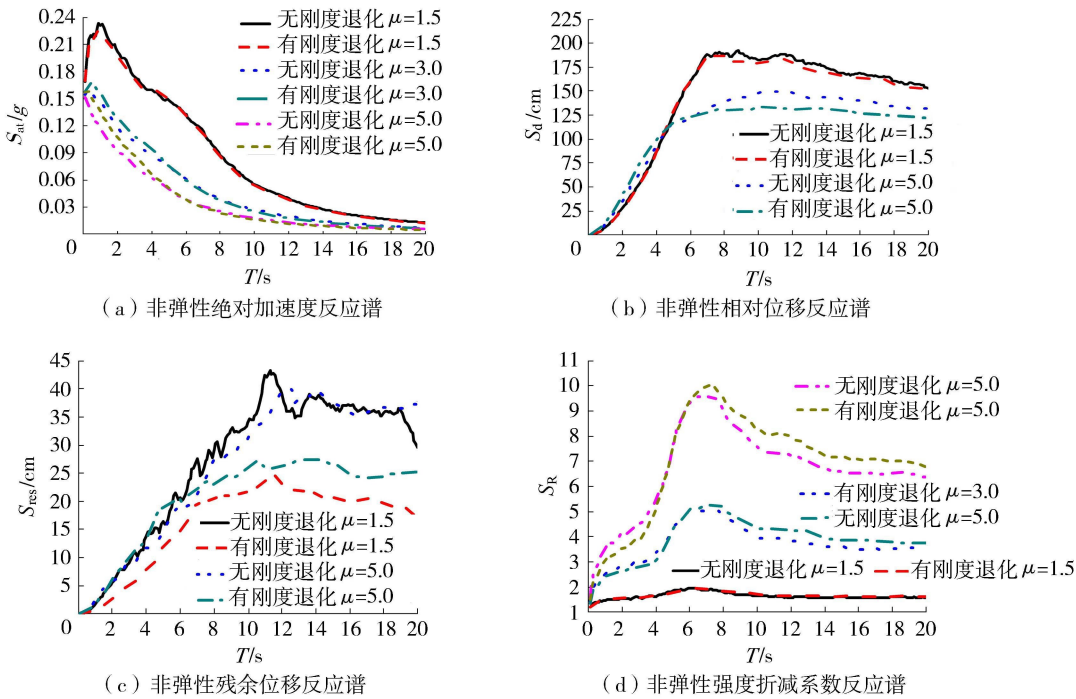


图 5 恢复力模型对长周期地震动非弹性反应谱的影响

Fig. 5 Effect of restoring force model on the inelastic response spectra of long-period ground motions

从图 5 可知:①当 μ 相同时,恢复力模型对 S_{at} 的影响可以忽略;②当 $\mu<1.5$ 时,恢复力模型对 S_{d} 的影响可以忽略,当 $\mu>5$ 时,长周期地震动非弹性反应谱中长周期段无刚度退化的 S_{d} 大于有刚度退化的 S_{d} ;③当 μ 相同时,长周期地震动非弹性反应谱中长周期段无刚度退化的 S_{res} 明显大于有刚度退化的 S_{res} ;④随着 μ 增大,长周期地震动非弹性反应谱中长周期段无刚度退化的 S_{R} 明显小于有刚度退化的 S_{R} ;⑤对于无刚度退化的恢复力模型, μ 的变化并不会引起 S_{res} 的变化,这是因为当不考虑刚度退化的影响时, μ 的变化对残余位移

的影响较小。

可见,对于长周期地震动,恢复力模型对 S_{at} 的影响很小,但对中长周期段 S_d 、 S_{res} 和 S_R 的影响很大——即恢复力模型对长周期地震动非弹性反应谱中长周期段的影响较大。相反地,对于常规地震动,恢复力模型对非弹性反应谱的影响可以忽略^[20-21]。因此,在后续建立长周期地震动的设计反应谱时,要考虑恢复力模型的影响,并选取合理的恢复力模型。

4.2 屈服后刚度比的影响

以 I 类场地为例,将 38 条长周期地震动记录 PGA 调幅为 $0.15g$,采用 Takeda 双线性刚度退化模型,取 $\xi=5\%$ $\mu=1.0\sim5.0$,计算不同 η 对应的长周期地震动非弹性反应谱,结果如图 6 所示。

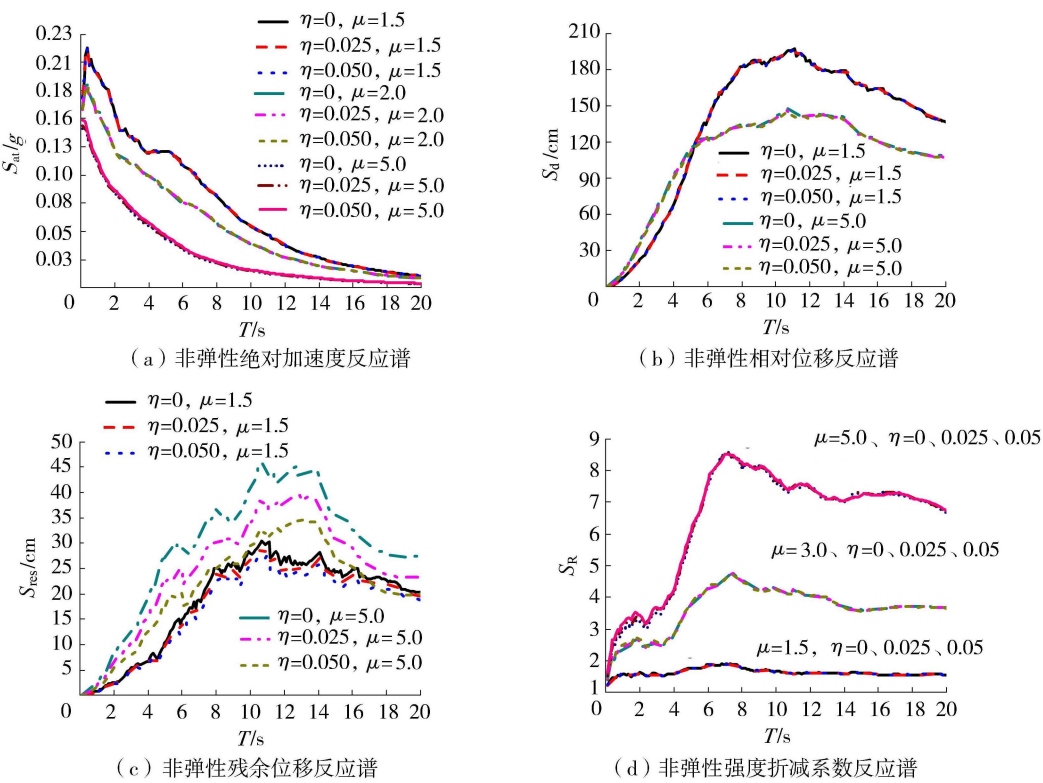


图 6 η 对长周期地震动非弹性反应谱的影响

Fig.6 Effect of η on the inelastic response spectra of long-period ground motions

从图 6 可知,当 $\eta=0、0.025、0.05$ 时, η 对长周期地震动非弹性反应谱的影响较小。但是,从图 7 (PGA 为 $0.15g$) 可知,当 $\eta>0.05$ 时,对于短周期结构 ($T<0.5\text{ s}$), η 对 S_d 、 S_{res} 的影响可以忽略;但对于中长周期结构 ($T>3.0\text{ s}$),随着 η 的增加, S_d 增大而 S_{res} 则减小,可见, η 对 S_{at} 和 S_R 的影响可以忽略。但 η 对长周期地震动非弹性反应谱中长周期段的 S_d 和 S_{res} 影响显著,即随着 η 的增加,中长周期段 S_d 增大,而 S_{res} 减小——即

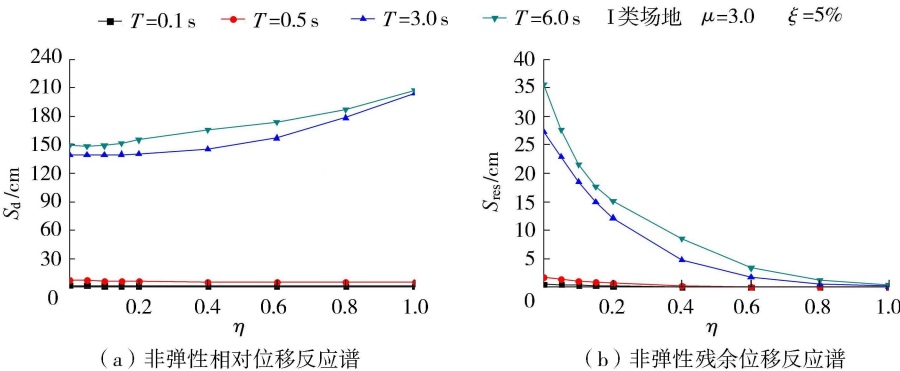


图 7 η 对短、长周期结构 S_d 和 S_{res} 的影响

Fig.7 Effect of η on the S_d and S_{res} of short-period and long-period structures

η 对长周期地震动非弹性反应谱中长周期段影响较大。相反地,对于常规地震动, η 对非弹性反应谱的影响则可以忽略^[20-21]。因此,在后续建立长周期地震动的设计谱时,要考虑 η 的影响,并选取合理的 η 。

4.3 阻尼比的影响

以 I 类场地为例,将 38 条长周期地震动 PGA 调幅为 0.15g,采用 Takeda 双线性刚度退化模型,取 $\eta = 0.05$ $\mu = 1.0 \sim 5.0$,计算 $\xi = 2\%$ 、5%、10%、14% 时的长周期地震动非弹性反应谱,结果如图 8 所示。

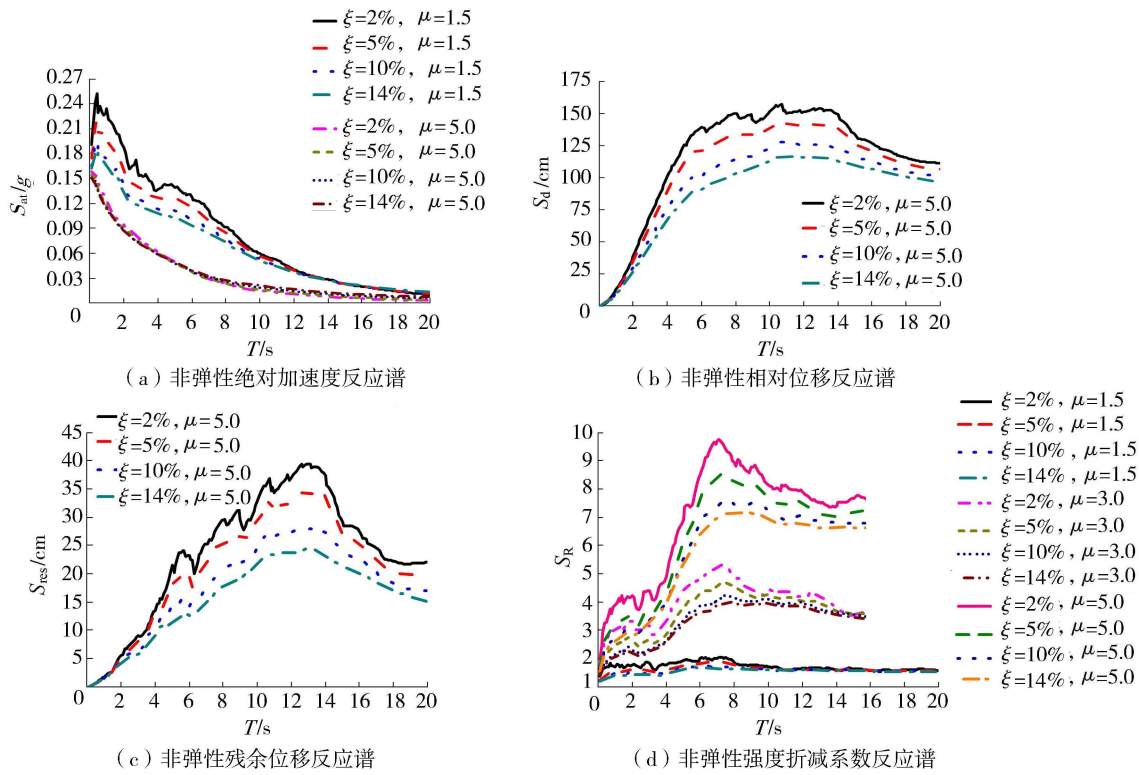


图 8 ξ 对长周期地震动非弹性反应谱的影响

Fig. 8 Effect of ξ on the inelastic response spectra of long-period ground motions

从图 8 和图 9(PGA 为 0.15g)可知:①当 $\mu < 1.5$ 时, ξ 对 S_{at} 和 S_R 的影响可忽略,但当 $\mu > 5$ 后,随着 ξ 的增加, S_{at} 和 S_R 逐渐减小;②随着 ξ 的增加,长周期地震动非弹性反应谱中长周期段的 S_d 和 S_{res} 逐渐减小;③对于短周期结构 ($T < 1.0$ s), ξ 对 S_d 、 S_{res} 的影响可以忽略。

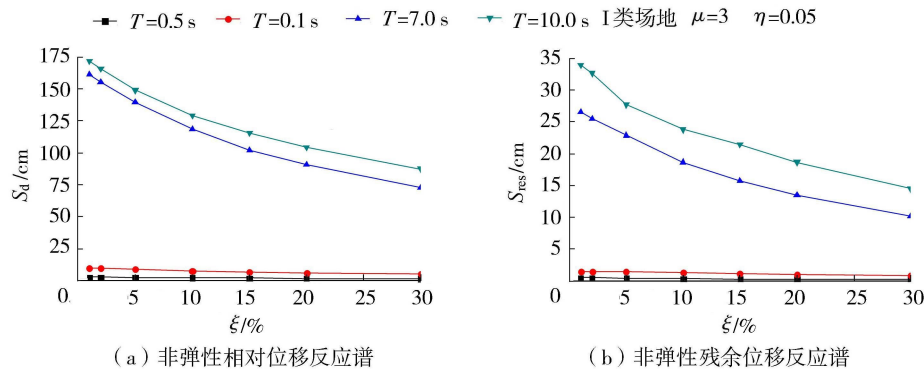


图 9 ξ 对短、长周期结构的 S_d 和 S_{res} 的影响

Fig. 9 Effect of ξ on the S_d and S_{res} of short-period and long-period structures

可见, ξ 对 S_{at} 和 S_R 、 S_d 和 S_{res} 短周期段的影响较小,但是,长周期地震动非弹性反应谱中长周期段的 S_d 和 S_{res} 则随着 ξ 的增加而降低——这与以往阻尼比对常规地震动非弹性反应谱的影响规律^[20-21] 较为接近。因此,在后续建立长周期地震动的设计谱时,可以参考 ξ 对常规地震动非弹性反应谱的影响规律。

4.4 位移延性比的影响

以Ⅲ类场地为例,将 41 条长周期地震动记录的 PGA 调幅为 $0.15g$,采用 Takeda 双线性刚度退化模型,取 $\xi=5\%$ 、 $\eta=0.05$,计算 $\mu=1.0\sim5.0$ 长周期地震动非弹性反应谱,结果如图 10 所示。

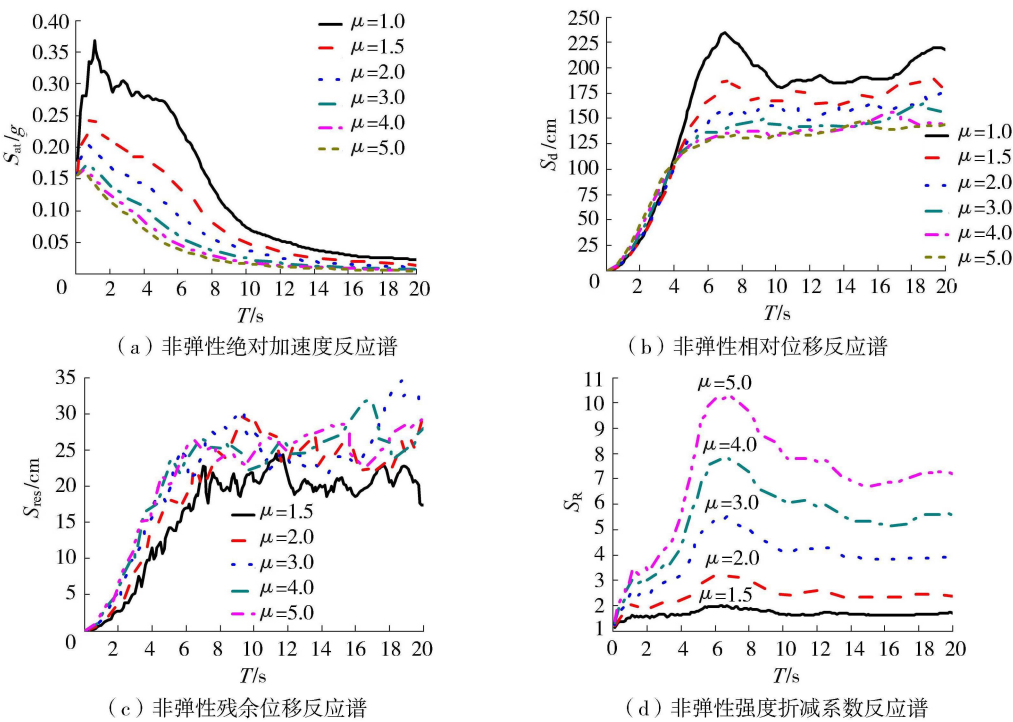


图 10 μ 对长周期地震动非弹性反应谱的影响
Fig. 10 Effect of μ on the inelastic response spectra of long-period ground motions

从图 10 可知,随着 μ 的增加, S_{at} 和 S_d 逐渐减小,而 S_{res} 和 S_R 却逐渐增大。从图 11 可知(PGA 为 $0.15g$),对于短周期结构($T<1.0s$), μ 对 S_d 和 S_{res} 的影响较小;但对于长周期结构($T>5.0s$),随着 μ 的增加, S_d 减小而 S_{res} 无规律变化。

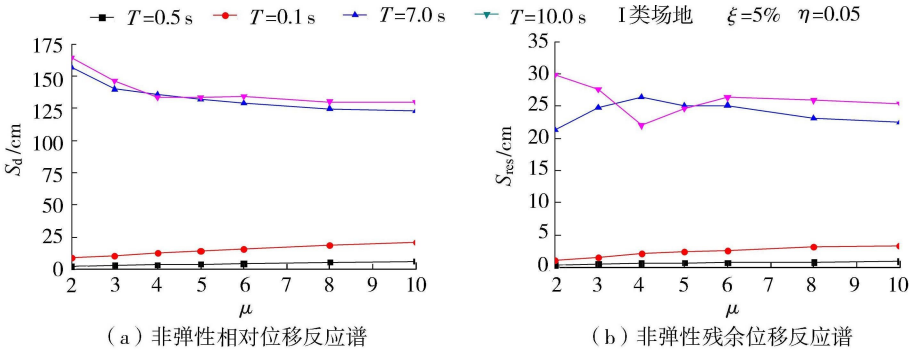


图 11 μ 对短、长周期结构 S_d 和 S_{res} 的影响
Fig. 11 Effect of μ on the S_d and S_{res} of short-period and long-period structures

可见,随着 μ 的增加,长周期地震动的 S_{at} 和 S_d 减小——这与位移延性比对常规地震动非弹性反应谱的影响规律^[20-21]较为接近。因此,在后续建立长周期地震动的设计谱时,可以参考 μ 对常规地震动非弹性反应谱的影响规律。

5 长周期地震动特性的影响

5.1 矩震级的影响

以Ⅱ类场地为例,将 40 条长周期地震动记录按 M 分为 $6.5\sim6.9$ 、 $7.0\sim7.4$ 、 $7.5\sim9.0$ 三类,并将 PGA 调幅为 $0.15g$ 。采用 Takeda 双线性刚度退化模型,取 $\xi=5\%$ 、 $\eta=0.05$ 、 $\mu=1.0\sim5.0$,计算不同 M 的长周期地震动非弹性反应谱,结果如图 12 所示。

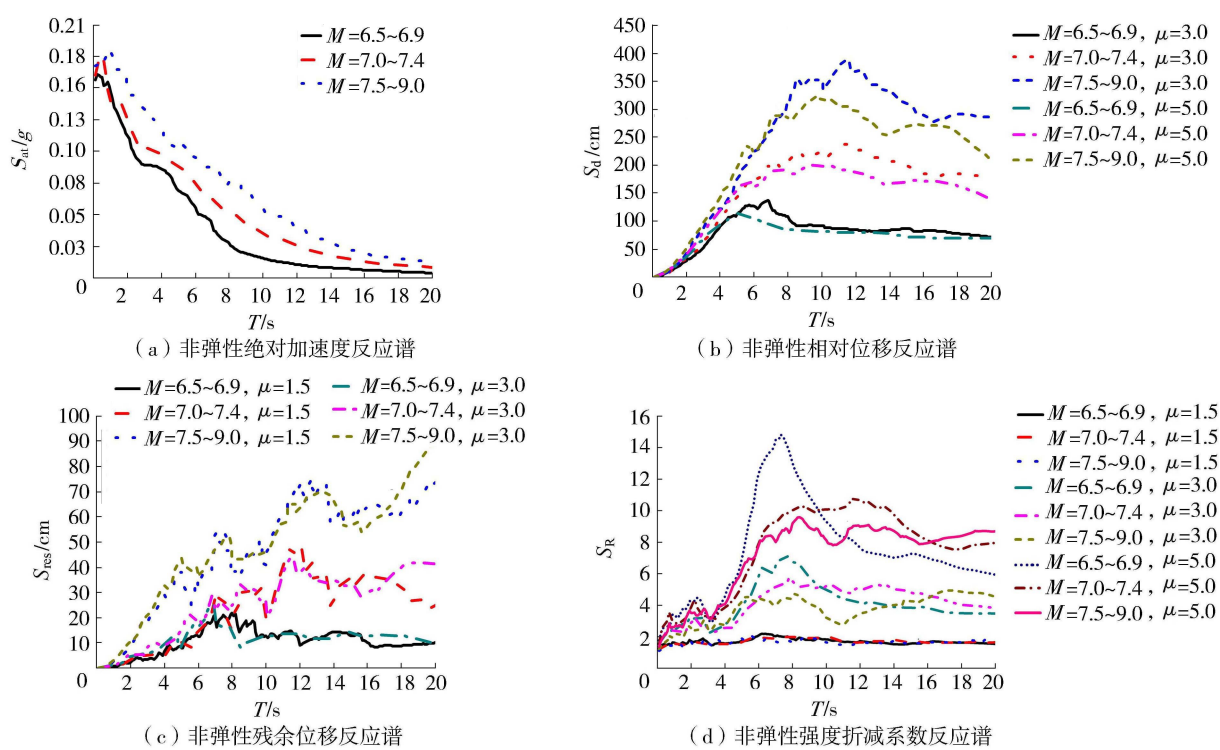


图 12 M 对长周期地震动非弹性反应谱的影响

Fig. 12 Effect of M on the inelastic response spectra of long-period ground motions

从图 12 可知:①随着 M 的增加, S_{at} 、 S_d 、 S_{res} 、 S_R 都逐渐增加。这是因为 M 越大,震源所释放的地震能量就越多,所造成的地震动持时越长,进而输入到结构的地震能量就越多,因此结构需要产生更多的非弹性变形来消耗地震输入能(即增加了结构的非弹性加速度、位移等地震响应)。②对于高延性($\mu>3.0$)结构, M 对 S_{at} 、 S_d 、 S_R 的长周期段($T>6\text{ s}$)影响(增幅)则更加显著。

5.2 场地土的影响

将 139 条长周期地震动记录的 PGA 调幅为 0.15g,采用 Takeda 双线性刚度退化模型,取 $\xi=5\%$ 、 $\eta=0.05$ 、 $\mu=1.0\sim 5.0$,计算 I、II、III、IV 类场地的长周期地震动非弹性反应谱,如图 13 所示。

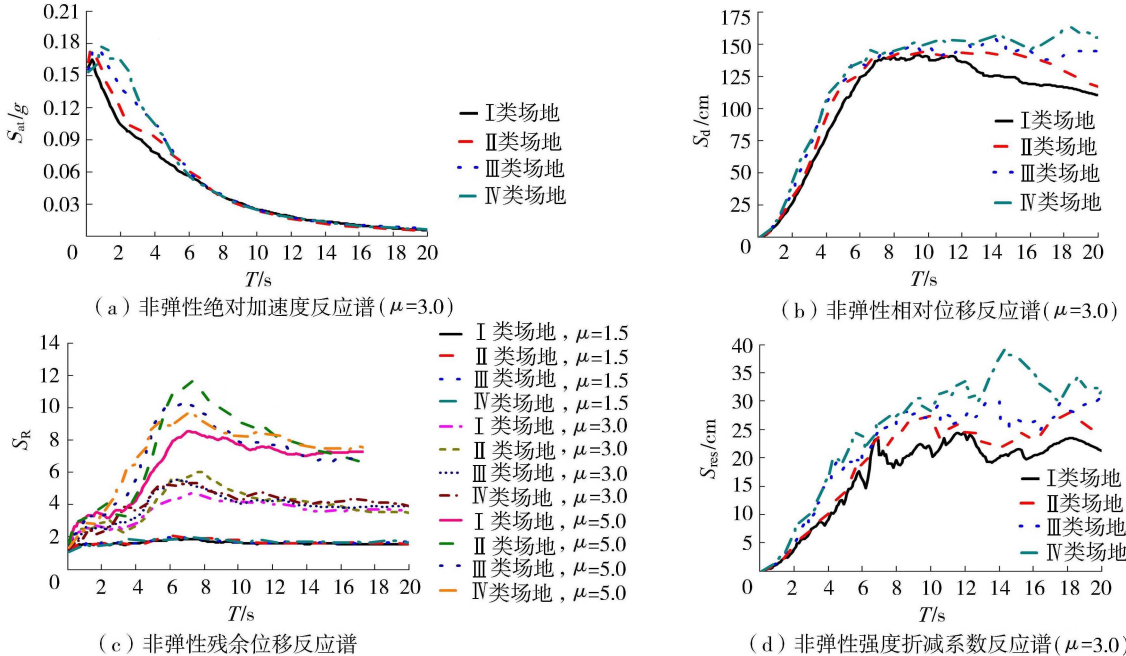


图 13 场地对长周期地震动非弹性反应谱的影响

Fig. 13 Effect of sites on the inelastic response spectra of long-period ground motions

从图 13 可知:①随着场地土变软,中短周期段 S_{at} 逐渐增加,但长周期段 S_{at} 则变化不大;②随着场地土变软, S_d 和 S_{res} 逐渐增加;③当 $\mu < 1.5$ 时,场地土对 S_R 的影响较小,当 $\mu > 5$ 时,场地土对 S_R 的影响较显著。

可见,当场地土变软后,场地与长周期地震动的卓越周期更加接近,进而放大了结构(特别是长周期)的地震响应——其放大效应远大于场地土对常规地震动非弹性反应谱的影响^[20-21]。因此,在后续建立长周期地震动的设计谱时,要针对不同的场地土类型建立相应场地的设计谱。

5.3 地震峰值加速度的影响

以 I 类场地为例,将 38 条长周期地震动记录的 PGA 分别调幅为 0.05g、0.15g、0.30g 和 0.40g,采用 Takeda 双线性刚度退化模型,取 $\xi = 5\%$ 、 $\eta = 0.05$ 、 $\mu = 1.0 \sim 5.0$,计算不同 PGA 对应的长周期地震动非弹性反应谱,如图 14 所示。

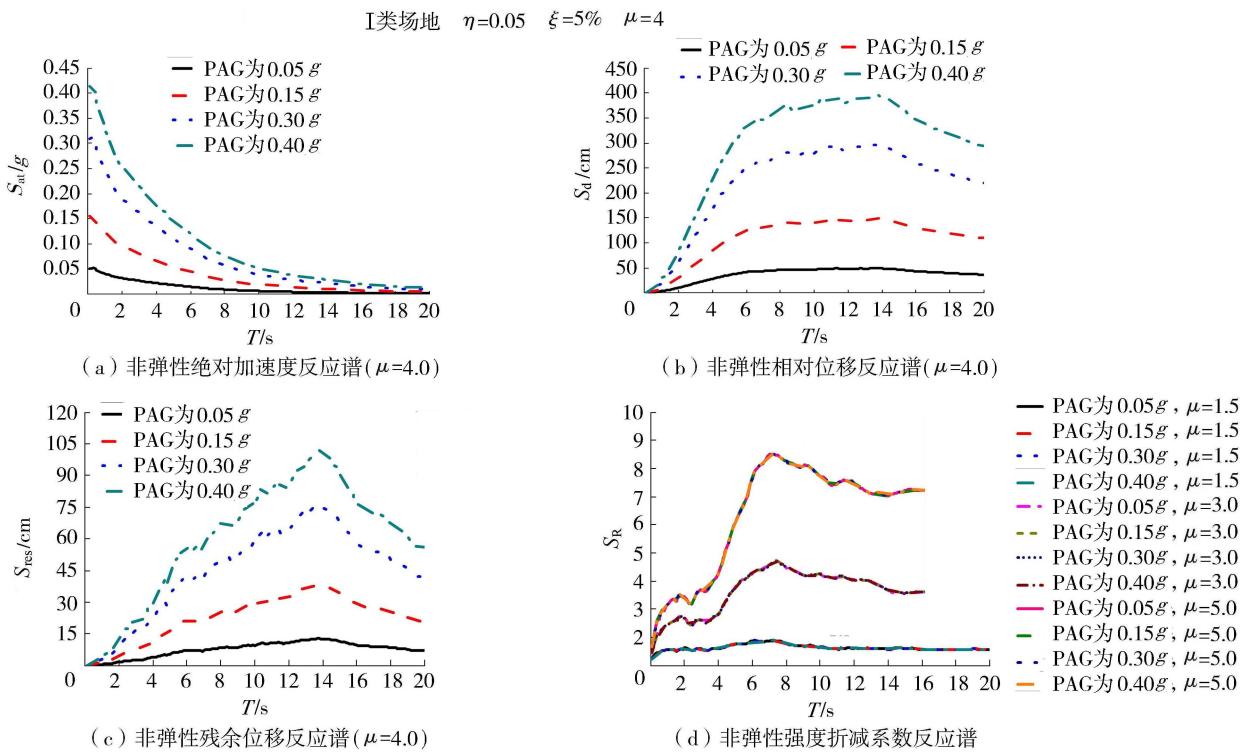


图 14 PGA 对长周期地震动非弹性反应谱的影响

Fig. 14 Effect of PGA on the inelastic response spectra of long-period ground motions

从图 14 可知,随着 PGA 的增大, S_{at} 、 S_d 、 S_{res} 都随之增加,但 S_R 却无变化。从图 15 可知,若以 PGA 为 0.15g 时的 S_{at} 、 S_d 、 S_{res} 为标准值,PGA 为 0.05g、0.30g 和 0.40g 时的 S_{at} 、 S_d 、 S_{res} 为标准值的 0.33、2.00、2.67 倍。因此,在后续建立长周期地震动非弹性反应谱时,可以以某一设防要求的 S_{at} 、 S_d 、 S_{res} 为标准,通过调整比例系数来得到其他设防要求的 S_{at} 、 S_d 、 S_{res} 。

6 结 论

a. 常规地震动的卓越频率分布较宽且集中在高频段,而长周期地震动的卓越频率则较窄且集中在 0.1~1.0 Hz 的低频段;对于反应谱的长周期段,长周期地震动的反应谱值要远大于常规地震动的反应谱值。因此,相比于常规地震动,长周期地震动会使得长周期结构产生更大的地震响应。

b. 对于常规地震动,恢复力模型和屈服后刚度比对非弹性反应谱的影响可以忽略。相反地,对于长周期地震动,恢复力模型和屈服后刚度比对长周期地震动非弹性反应谱的中长周期段影响较大。因此,在后续

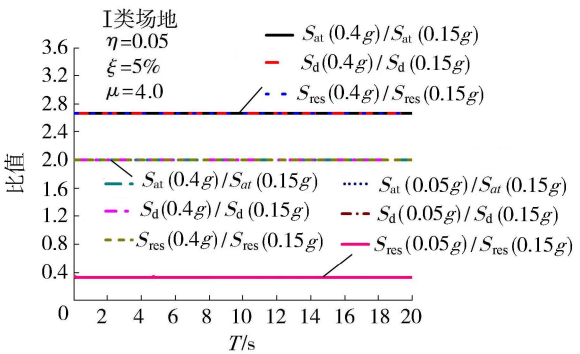


图 15 S_{at} 、 S_d 、 S_{res} 在不同 PGA 下的比值

Fig. 15 Ratio of S_{at} 、 S_d 、 S_{res} with different PGA

建立长周期地震动的设计谱时,应选取合理的恢复力模型和屈服后刚度比。

c. 对于常规地震动和长周期地震动,阻尼比和位移延性比对其非弹性反应谱的影响规律比较接近。因此,在后续建立长周期地震动的设计谱时,可以参考已有的阻尼比和位移延性比对常规地震动非弹性反应谱的影响规律。

d. 相比于常规地震动,长周期地震动场地土对非弹性反应谱的放大效应更为显著。因此,在后续建立长周期地震动的设计谱时,要针对不同的场地土类型建立相应场地的设计谱。

e. 在后续建立长周期地震动非弹性反应谱时,可以以某设防烈度的 S_{at} 、 S_d 、 S_{res} 为标准,其他设防烈度的 S_{at} 、 S_d 、 S_{res} 可由 $PGA_{设防}$ 与 $PGA_{标准}$ 比值的调整得到。

参考文献:

- [1] 李钊. 索塔长周期地震总输入能的简化计算方法[D]. 西安:长安大学,2017.
- [2] 方有珍,张志成,黄志豪,等. PEC柱-钢梁摩擦耗能部分自复位组合框架抗震性能数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):140-147. (FANG Youzhen,ZHANG Zhicheng,HUANG Zhihao,et al. Numerical simulation on seismic performance of PEC column-steel beam composite frame with friction damped self-centering connection[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):140-147. (in Chinese))
- [3] 曹学兴,何蕴龙,迟福东,等. 高土石坝 Hardfill 新型抗震加固措施[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):340-346. (CAO Xuexing,HE Yunlong,CHI Fudong,et al. A new type aseismic reinforcement measures of high earth and rockfill dam using Hardfill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(4):340-346. (in Chinese))
- [4] 钱向东,李震东,李晨. 混凝土重力坝非黏滞阻尼地震响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):342-348. (QIAN Xiangdong,LI Zhendong,LI Chen. Non-viscous damped seismic response analysis of concrete gravity dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):342-348. (in Chinese))
- [5] CHEN Q J,YUAN W Z,LI Y C,et al. Dynamic response characteristics of super high-rise buildings subjected to long-period ground motions[J]. Journal of Central South University,2013,20:1341-1353.
- [6] MOHAMMED I,JOSÉ R,CASAS J R. Seismic behavior of RNC-isolated bridges:a comparative study under near-fault, long-period, and pulse-like ground motions[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2016,2016:1897045.
- [7] ASAI T,WATANABE Y. Outrigger tuned inertial mass electromagnetic transducers for high-rise buildings subject to long period earthquakes[J]. Engineering Structures,2017,153:404-410.
- [8] SHEKARI M R. A coupled BE-FE-BE Study for investigating the effect of earthquake frequency content and predominant period on seismic behavior of base-isolated concrete rectangular liquid tanks[J]. Journal of Fluids and Structures,2018,77:19-35.
- [9] MAZZA F. Seismic demand of base-isolated irregular structures subjected to pulse-type earthquakes[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering,2018,108:111-129.
- [10] MAZZA F,MAZZA M. Nonlinear modeling and analysis of RC framed buildings located in a near-fault area[J]. The Open Construction and Building Technology,2012,6:346-354.
- [11] HU R P,XU Y L,ZHAO X. Long-period ground motion simulation and its impact on seismic response of high-rise buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering,2018,22(7):1285-1315.
- [12] HUO T,TONG L W,ZHANG Y F. Dynamic response analysis of wind turbine tubular towers under long-period ground motions with the consideration of soil-structure interaction[J]. Advanced Steel Construction,2018,14(2):227-250.
- [13] ZHOU Y,PING T Y,GONG S M,ZHU Y. An improved defining parameter for long-period ground motions with application of a super-tall building[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2018,113:462-472.
- [14] 姬淑艳,刘烁宇,李英民. 远场长周期地震动作用下超高层建筑响应特性[J]. 建筑结构学报,2018(11):1-10. (JI Shuyan,LIU Shuoyu,LI Yingmin. Response characteristics of super high-rise building subjected to far-field long-period ground motion[J]. Journal of Building Structures,2018(11):1-10. (in Chinese))
- [15] BAI Y T,GUAN S Y,LIN X C,MOU B. Seismic collapse analysis of high-rise reinforced concrete frames under long-period ground motions[J]. Tall and Special Building,2019,28(1):e1566.
- [16] 李宇,吴桂楠,李琛,等. 长周期地震动弹塑性反应谱的参数影响研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2018,54(1):90-97. (LI Yu,WU Guinan,LI Chen,et al. Parametric analysis on elasto-plastic response spectra of long-period ground motion [J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2018,54(1):90-97. (in Chinese))
- [17] ZHOU J,JIANG Y,WANG L X,et al. A long-period elastic response spectrum based on the site-classification of Chinese seismic

code[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2018,115:622-633.

[18] 张亮泉,于建杰. 基于遗传算法的长周期地震动加速度反应谱的拟合[J]. 自然灾害学报,2019,28(6):11-27. (ZHANG Liangquan,YU Jianjie. Study on the fitting of the long-period ground motion acceleration response spectrum based on genetic algorithm[J]. Journal of Natural Disasters,2019,28(6):11-27. (in Chinese))

[19] 刘培玄,刘红帅,赵纪生,等. 基于 KiK-net 台站的中美场地类别对比分析[J]. 地震工程与工程振动,2015,35(6):42-46. (LIU Peixuan,LIU Hongshuai,ZHAO Jisheng,et al. Comparison of site classification between Chinese and American seismic codes based on data of Japanese KiK-net station[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2015,35(6):42-46. (in Chinese))

[20] 李宇,王森,车艳阳,等. 梁式桥抗震设计的弹塑性位移反应谱[J]. 振动与冲击,2015,34(10):1-5. (LI Yu,WANG Sen,CHE Yanyang,et al. Elasto-plastic response spectra for beam bridge's aseismic design[J]. Journal of Vibration and Shock,2015,34(10):1-5. (in Chinese))

[21] 李宇. 考虑残余位移和土-结构相互作用的桥梁结构基于性能的抗震设计及评估[D]. 北京:北京交通大学,2010.

(收稿日期:2022-03-14 编辑:胡新宇)

(上接第 80 页)

[26] BENGIO Y,SIMARD P,FRASCONI P. Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult[J]. IEEE Transactions on Neural Networks,1994,5(2):157-166.

[27] HOCHREITE S,SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation,1997,9(8):1735-1780.

[28] 李敏,盛毅. 高斯拟合算法在光谱建模中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析,2008(10):2352-2355. (LI Min,SHENG Yi. Study on application of Gaussian fitting algorithm to building model of spectral analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2008(10):2352-2355. (in Chinese))

[29] 任秋兵,沈扬,李明超,等. 水工建筑物安全监控深度分析模型及其优化研究[J]. 水利学报,2021,52(1):71-80. (REN Qiubing,SHEN Yang,LI Mingchao,et al. Safety monitoring model of hydraulic structures and its optimization based on deep learning analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(1):71-80. (in Chinese))

[30] 王鑫,吴际,刘超,等. 基于 LSTM 循环神经网络的故障时间序列预测[J]. 北京航空航天大学学报,2018,44(4):772-784. (WANG Xin,WU Ji,LIU Chao,et al. Exploring LSTM based recurrent neural network for failure time series prediction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2018,44(4):772-784. (in Chinese))

[31] KINGMA D P,BA J. Adam: a method for stochastic optimization [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations, San Diego:ICLR,2015.

[32] 王浩军,蒋建群,李富强. 基于 MATLAB 的 Elman 神经网络在大坝位移预测中的应用[J]. 水力发电,2005(1):31-33. (WANG Haojun,JIANG Jianqun,LI Fuqiang. Application of Elman neural network and MATLAB to dam displacement prediction [J]. Hydropower,2005(1):31-33. (in Chinese))

[33] 江显群,陈武奋,邵金龙,等. 大坝变形预报模型应用[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(10):870-874. (JIANG Xianqun,CHEN Wufen,SHAO Jinlong,et al. Application of dam deformation prediction model[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2019,37(10):870-874. (in Chinese))

[34] HANSEN C L. Limitations of parametric modeling of the left ventricle using first harmonic analysis: possible role for gaussian modeling[J]. Original Article,2014,21(4):723-729.

(收稿日期:2022-02-23 编辑:刘晓艳)