

震级、震中距和场地类别对加速度谱与 伪加速度谱关系的影响

杭保健¹, 张海仲², 赵衍刚^{1,2}

(1. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124; 2. 神奈川大学 工学部建筑学科, 日本 横滨 221-8686)

摘要: 加速度反应谱(Sa)和伪加速度反应谱(PSa)在结构抗震设计中均起着至关重要的作用, 然而目前大多数抗震规范都只规定了其中一种反应谱。明确两者的关系有助于从规定谱得到所需的另一种谱。现有关于 Sa 与 PSa 关系的研究大多只局限于分析结构阻尼比和周期的影响, 最近研究表明, 震级、震中距和场地类别对两者的关系也有影响。文中首先通过对大量地震动记录(16 660 条地震加速度时程)的统计分析, 系统地探讨了震级、震中距和场地类别对 Sa 与 PSa 关系的影响。结果表明: (1) 震级对 Sa 与 PSa 关系的影响非常显著, Sa 与 PSa 的差异随着震级的增大而缩小; (2) 场地类别的影响弱于震级且与震级大小有关, 不同震级条件下场地类别对 Sa 与 PSa 关系的影响规律不统一; (3) 震中距的作用很小, 可以忽略其对 Sa 与 PSa 关系的影响。最后基于这些结论, 通过非线性回归分析, 建立了考虑震级和场地类别的 Sa 与 PSa 的转换表达式。

关键词: 加速度反应谱; 伪加速度反应谱; 震级; 震中距; 场地类别

中图分类号: TU318.1

文献标识码: A

Effects of magnitude, epicentral distance and site class on the relationship between spectral and pseudo-spectral acceleration

HANG Baojian¹, ZHANG Haizhong², ZHAO Yangang^{1,2}

(1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Department of Architecture, Kanagawa University, Yokohama, 221-8686, Japan)

Abstract: Both spectral and pseudo-spectral acceleration play an important role in the seismic design of structures. However, only one of them is specified in most seismic codes. To clarify the relationship between the two helps to obtain another spectrum from the given spectrum. Previous research on the relationship between Sa and PSa are mostly confined to the analysis of the effects of structural damping ratio and period. Recent studies have shown that magnitude, epicentral distance and site class also have an effect on the relationship between the two. In this paper, the effects of magnitude, epicentral distance and site class on the relationship between Sa and PSa are systematically discussed by statistical analysis of a large number of ground motion records (16 660 seismic acceleration time histories). The results show that (1) the influence of magnitude on the relationship between Sa and PSa is very significant, and the difference between Sa and PSa decreases with the increase of magnitude; (2) The effect of site class is second to magnitude and is related to magnitude. The influence of site class on the relationship between Sa and PSa is not uniform under different magnitudes. (3) The influence of epicentral distance on the relationship be-

收稿日期: 2021-06-29; 修订日期: 2021-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51738001)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51738001)

作者简介: 杭保健(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事地震输入研究. E-mail: lctahbj@163.com

通讯作者: 张海仲(1988-), 男, 助理教授, 博士, 主要从事地震输入研究. E-mail: zhang@kanagawa-u.ac.jp

tween Sa and PSa is very small and can be ignored. Finally, based on these conclusions and through nonlinear regression analysis, the transformation expression of Sa and PSa considering magnitude and site class is established.

Key words: spectral acceleration; pseudo-spectral acceleration; magnitude; epicentral distance; site class

引言

近一个世纪以来,反应谱理论经过不断的发展和完善,已被广泛应用于工程结构抗震设计中。如今,基于反应谱的设计方法已经成为用于结构抗震设计最主要的方法之一。世界多数抗震规范都是以反应谱的形式来表征地震作用力的。我国抗震规范^[1]用加速度反应谱标定了地震影响系数^[2-3]。加速度反应谱表示最大加速度响应随自振周期变化的关系,它对应于作用在结构上的惯性力^[4-6],在数值上等于恢复力和粘性力之和。然而,欧美及其他一些国家的抗震规范使用的则是伪加速度反应谱^[7]。伪加速度反应谱是在小阻尼比的假设下由加速度反应谱近似得到的^[8],它忽略了粘性力的作用,因此恰好对应于作用在结构上的恢复力。既往研究^[9-12]表明,加速度反应谱与伪加速度反应谱在阻尼比相对较小时非常接近,能够互换使用。然而当阻尼比较大时,例如基础隔震系统和附加阻尼结构^[13],两者相差很大,互换使用会带来很大误差。具体地,在大阻尼比情况下,用加速度反应谱代替伪加速度反应谱来估算恢复力会造成设计过于保守,反之用伪加速度反应谱代替加速度反应谱来估算惯性力则会使设计力偏小。为了能够从规定谱得到另一种谱(加速度反应谱或伪加速度反应谱),从而能够同时合理地评价惯性力和恢复力,并且避免构建新的规范反应谱,有必要明确加速度反应谱与伪加速度反应谱的关系。

加速度反应谱与伪加速度反应谱的相关研究已经取得了一些研究成果。Sadek 等^[9]、Song 等^[11]和 Mentrasti^[4]分别基于实际地震动记录的统计分析和振动理论探讨了加速度反应谱与伪加速度反应谱的关系。这些研究专注于结构阻尼比 ξ 和周期 T 对两个谱之间关系的影响。Papagiannopoulos 等^[12]通过分析 866 条地震加速度时程,发现震级、震中距和场地类别对加速度反应谱与伪加速度反应谱关系也存在影响。然而,这些地震参数具体如何影响两者的关系在其研究中并未讨论。而这些具体的关系对于合理地确立两个谱之间的关系式却是重要的信息。文中旨在通过对大量地震动记录的统计分析,系统地探讨震级、震中距和场地类别对加速度反应谱与伪加速度反应谱关系的影响,并且提出一个考虑这些参数的将这两种谱进行互相转换的表达式。

1 加速度反应谱与伪加速度反应谱

为了阐明加速度反应谱和伪加速度反应谱的关系,本节从理论定义出发简单地讨论了两个谱和他们的工程应用。对于线性单自由度体系考虑粘滞阻尼并遭受地震动加速度时程 $\ddot{x}_g(t)$ 的运动方程可以表示为式(1)或式(2),

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

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

式中: m 、 c 、 k 、 ξ 、 ω 分别为质量、阻尼系数、刚度、临界阻尼比($\xi = c/2m\omega$,以下简称为阻尼比)和固有圆频率, $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 、 $\ddot{x}(t)$ 分别为相对位移、相对速度和相对加速度响应。由于反应谱对应于单自由度体系响应的最大值,相对位移反应谱 Sd 、相对速度反应谱 Sv 和绝对加速度反应谱 Sa (以下简称加速度反应谱)分别定义为 $Sd = |x(t)|_{\max}$ 、 $Sv = |\dot{x}(t)|_{\max}$ 、 $Sa = |\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)|_{\max}$ 。

伪加速度反应谱 PSa 是在小阻尼比假设下对 Sa 的近似,可表示为,

$$PSa = \omega^2 \cdot Sd \quad (3)$$

从 Sa 的定义可知, Sa 对应于结构的惯性力,并且计算结构基底剪力 V 时需要确定惯性力^[5],所以 Sa 适合于结构基底剪力 V 的计算,表示为,

$$V = |kx(t) + c\dot{x}(t)|_{\max} = m|\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)|_{\max} = m \cdot Sa \quad (4)$$

相似地,从 PSa 的定义可以发现 PSa 与恢复力对应,并且在确定上层主体结构的地震作用力时需要计算恢复力^[4],所以 PSa 适用于结构恢复力 F 的计算,即

$$F = k|x(t)|_{\max} = m \frac{k}{m} Sd = m\omega^2 \cdot Sd = m \cdot PSa \quad (5)$$

当阻尼比较小时, $c\dot{x}(t)$ 很小, Sa 与 PSa 在数值上基本相等, 可以互换使用。然而, 当阻尼比较大时, 如基础隔震系统和附加阻尼装置结构, 互换使用 Sa 与 PSa 会带来很大的误差。图 1 展示了不同阻尼比情况下 ($\xi=5\%$ 和 $\xi=50\%$) Sa 与 PSa 的对比。选用的地震数据是日本 K-NET 台网观测站 HKD004 处的一条震级为 5.9 的加速度时程。因此, 在大阻尼比情况下, 用 Sa 代替 PSa 来计算恢复力会造成结构地震响应(如位移、构件内力等)的过保守估计, 反之, 用 PSa 代替 Sa 来计算惯性力会低估地震作用下结构的响应。

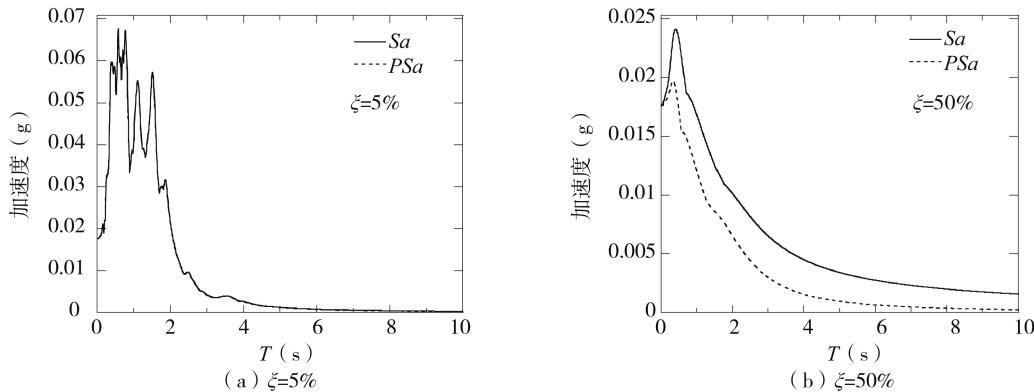


图 1 不同阻尼比情况下 Sa 与 PSa 结果对比

Fig. 1 Comparison of Sa and PSa with different damping ratios

2 地震动记录的选择

文中为了分析震级、震中距和场地类别对 Sa 与 PSa 关系的影响, 从日本 K-NET 和 KiK-net 台网 (<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>) 选取了大量的实际地震动记录。K-NET 和 KiK-net 台网是由日本国家地球科学与灾害预防研究所 (NIED) 建设和管理的强震动台网, 有丰富的地震动记录和翔实的台站场地资料, 为探讨震级、震中距和场地类别对 Sa 与 PSa 的关系提供了必要的条件。文中选取了 338 个观测站的 8 330 条地震动记录, 其中每条地震动记录的 2 个水平分量 (EW 和 NS 方向) 被选用, 共计 16 660 条地震加速度时程, 选定震级 M 为 4.0 ~ 9.0, 震中距 R 为 10 ~ 200 km, 不考虑近场地震的影响, 最大加速度大于 20 Gal。为简化起见, 采用分组的形式进行讨论。根据 NEHRP^[15] 规定的 30 m 覆盖土层平均剪切波速将场地分为 A、B、C、D、E 这 5 类。KiK-net 台网观测站的土层剪切波速数据超过 30 m, 可直接计算 30 m 覆盖土层平均剪切波速 \bar{v}_{s30} 。K-NET 台网仅提供了至多 20 m 覆盖土层剪切波速信息, 文中根据现有资料计算了 20 m 覆盖土层平均剪切波速 \bar{v}_{s20} 。根据 Kanno^[16] 的研究, \bar{v}_{s20} 可通过下式转换为 \bar{v}_{s30}

$$\bar{v}_{s30} = 1.13\bar{v}_{s20} + 19.5 \quad (6)$$

整理发现 A 类场地很少, 所以只分析场地 B、C、D、E 的情况。在场地分组内, 考虑到各组数据数量上的平衡, 根据震级分为 $4.0 \leq M < 5.5$, $5.5 \leq M < 6.5$ 和 $M \geq 6.5$, 再根据震中距分为 $10 \leq R < 50$ km, $50 \leq R < 100$ km 和 $100 \leq R < 200$ km。基于场地类别、震级和震中距的共计 36 组地震动记录分组见表 1。

表 1 基于震级、震中距和场地类别的地震加速度时程分组

Table 1 Seismic acceleration time histories grouping based on magnitude, epicentral distance and site class

组	场地类别	震级 M	震中距 R (km)	条数	组	场地类别	震级 M	震中距 R (km)	条数
1			$10 \leq R < 50$	1 102	19			$10 \leq R < 50$	1 606
2		$4.0 \leq M < 5.5$	$50 \leq R < 100$	700	20		$4.0 \leq M < 5.5$	$50 \leq R < 100$	1 566
3			$100 \leq R < 200$	196	21			$100 \leq R < 200$	706
4			$10 \leq R < 50$	142	22			$10 \leq R < 50$	194
5	B	$5.5 \leq M < 6.5$	$50 \leq R < 100$	298	23	D	$5.5 \leq M < 6.5$	$50 \leq R < 100$	568
6			$100 \leq R < 200$	274	24			$100 \leq R < 200$	1 046
7			$10 \leq R < 50$	40	25			$10 \leq R < 50$	104
8		$M \geq 6.5$	$50 \leq R < 100$	102	26		$M \geq 6.5$	$50 \leq R < 100$	116
9			$100 \leq R < 200$	178	27			$100 \leq R < 200$	512

续表

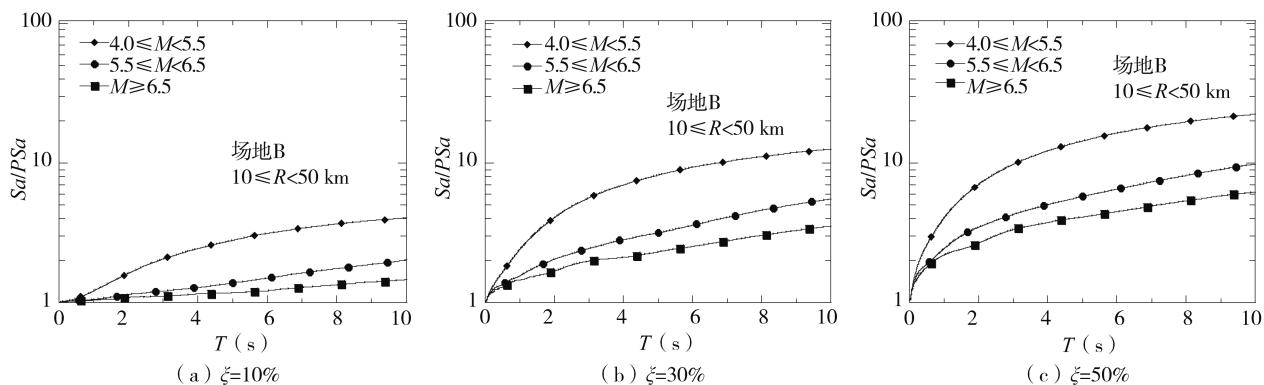
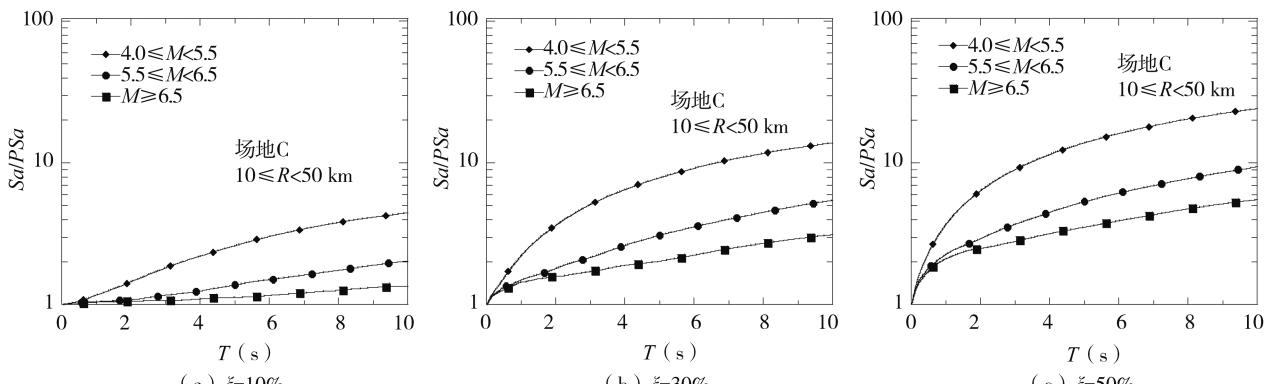
组	场地类别	震级 M	震中距 R (km)	条数	组	场地类别	震级 M	震中距 R (km)	条数
10			$10 \leq R < 50$	1 326	28			$10 \leq R < 50$	828
11		$4.0 \leq M < 5.5$	$50 \leq R < 100$	978	29		$4.0 \leq M < 5.5$	$50 \leq R < 100$	594
12			$100 \leq R \leq 200$	272	30			$100 \leq R \leq 200$	206
13			$10 \leq R < 50$	164	31			$10 \leq R < 50$	124
14	C	$5.5 \leq M < 6.5$	$50 \leq R < 100$	384	32	E	$5.5 \leq M < 6.5$	$50 \leq R < 100$	278
15			$100 \leq R \leq 200$	470	33			$100 \leq R \leq 200$	542
16			$10 \leq R < 50$	102	34			$10 \leq R < 50$	38
17		$M \geq 6.5$	$50 \leq R < 100$	176	35		$M \geq 6.5$	$50 \leq R < 100$	68
18			$100 \leq R \leq 200$	412	36			$100 \leq R \leq 200$	248
				7 316					9 344

3 震级、震中距和场地类别对 Sa/PSa 的影响分析

根据以上分组,文中对结构周期 $T=0.01$ s ~ 10 s(间隔取 0.01 s)、阻尼比 $\xi=5$ 、10、20、30、40、50% 的弹性单自由度体系进行计算,得到 Sa 与 PSa ,并对两反应谱取平均值,系统分析了震级、震中距和场地类别对 Sa 与 PSa 关系的影响。

3.1 震级的影响

图 2 ~ 图 5 分别展示了不同场地类别条件下震级对 Sa/PSa 的影响,可以得到:(1) Sa/PSa 值在 $4.0 \leq M < 5.5$ 时最大,在 $M \geq 6.5$ 时最小, Sa/PSa 值随着震级的增大而减小,即 Sa 与 PSa 的差异随着震级的增大而缩小;(2)随着震级的增大, Sa/PSa 值衰减速率变小,即 Sa 与 PSa 的差异在小震级时对周期的变化更为敏感;(3)任意场地类别、震中距情况下的 Sa/PSa 值趋势相同,且不同场地类别下的 Sa/PSa 值差异很小,可知震级相对于震中距和场地类别起主导作用。从图中还可以观察到与以往研究相似的结果,具体体现为: Sa/PSa 值在 $\xi=5$ 、10% 时最大,在 $\xi=50$ % 时最小。

图 2 B 类场地不同阻尼比情况下的 Sa/PSa 值Fig. 2 Sa/PSa values of site class B with different damping ratios图 3 C 类场地不同阻尼比情况下的 Sa/PSa 值Fig. 3 Sa/PSa values of site class C with different damping ratios

10%时最小,在 $\xi=50\%$ 时最大, Sa/PSa 值随着阻尼比的增大而增大,即 Sa 与 PSa 的差异随着阻尼比的增大而增大; Sa/PSa 值随着周期的增大而增大,即 Sa 与 PSa 的差异随着周期的增大而增大。 $50 \leq R < 100 \text{ km}$ 、 $100 \leq R < 200 \text{ km}$ 的对比结果与上述结论相同,限于篇幅原因不再赘述。

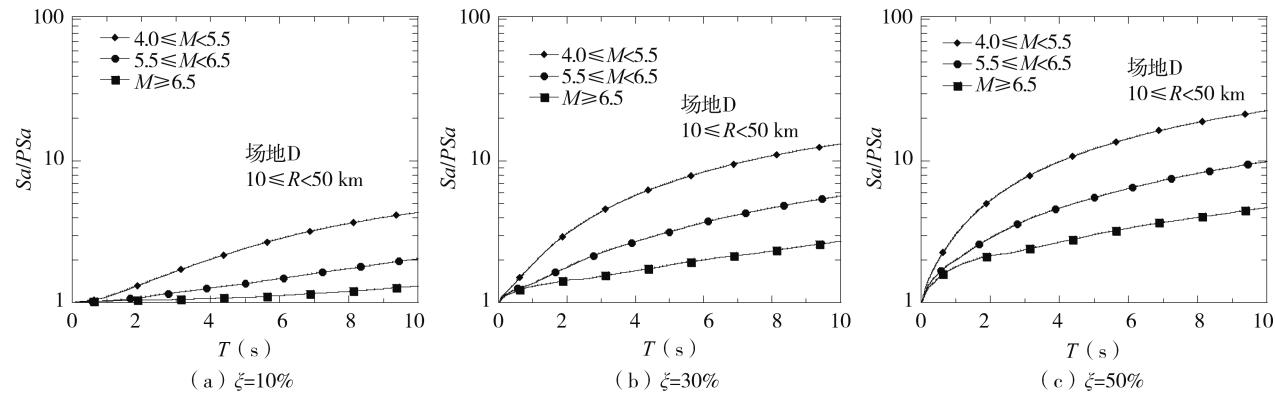


图4 D类场地不同阻尼比情况下的 Sa/PSa 值

Fig. 4 Sa/PSa values of site class D with different damping ratios

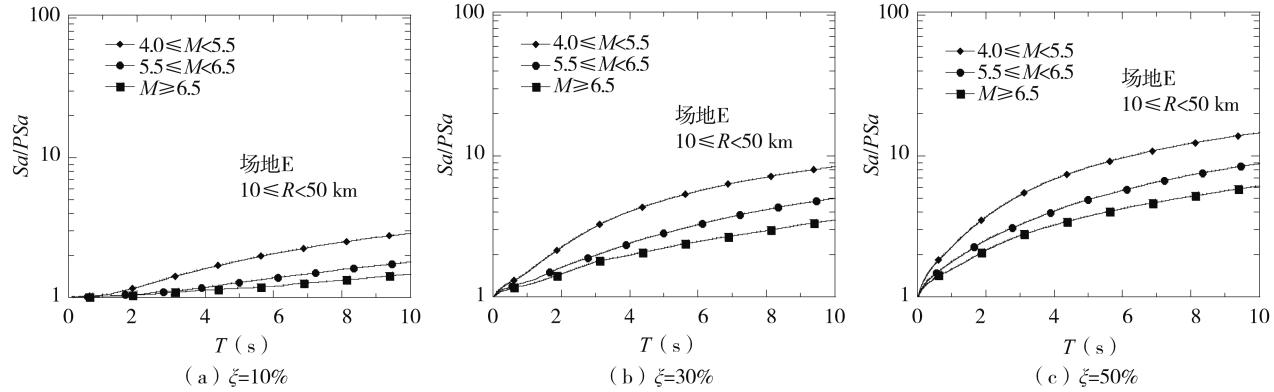


图5 E类场地不同阻尼比情况下的 Sa/PSa 值

Fig. 5 Sa/PSa values of site class E with different damping ratios

3.2 场地类型的影响

图6~图8分别展示了不同震级条件下场地类别对 Sa/PSa 的影响,可以得到:(1)在 $4.0 \leq M < 5.5$ 的情况下,场地E的 Sa/PSa 值最小,且明显低于其他场地;在 $T < 8 \text{ s}$ 时, Sa/PSa 值在场地B条件下最大,其次为场地C和D;在 $T=8 \sim 10 \text{ s}$ 时,场地C的 Sa/PSa 值最大。(2)在 $5.5 \leq M < 6.5$ 的情况下,任意阻尼比情况下,场地E的 Sa/PSa 值最小;场地C和场地D的 Sa/PSa 值基本相同;场地B的 Sa/PSa 值在短周期时明显高于其它场地条件,在长周期时与场地C、D情况下相当。(3)在 $M \geq 6.5$ 的情况下,除场地E外, Sa/PSa 值在场地B条件下最大,在场地C条件下次之,在场地D条件下最小;场地E的 Sa/PSa 值随着周期的增大而增大,在 $T=10 \text{ s}$ 时达到最大,且增长速率明显高于其他场地情况。

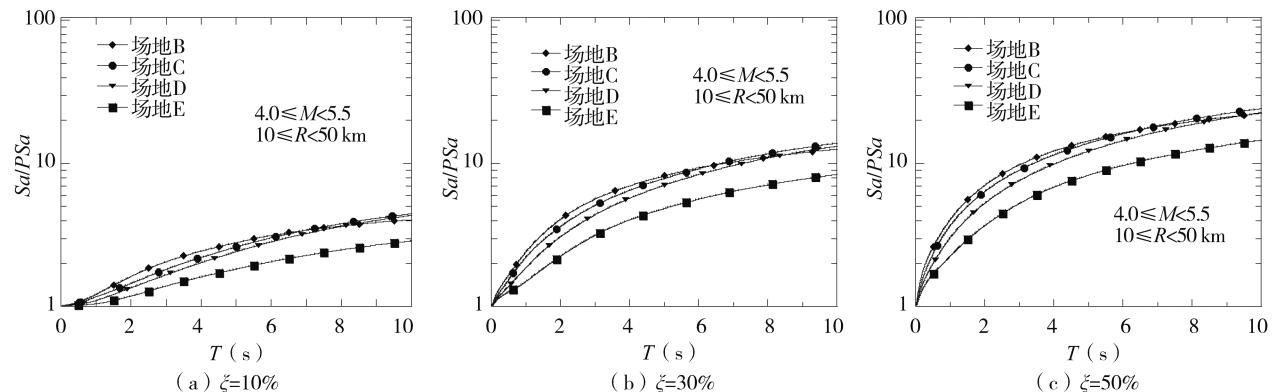
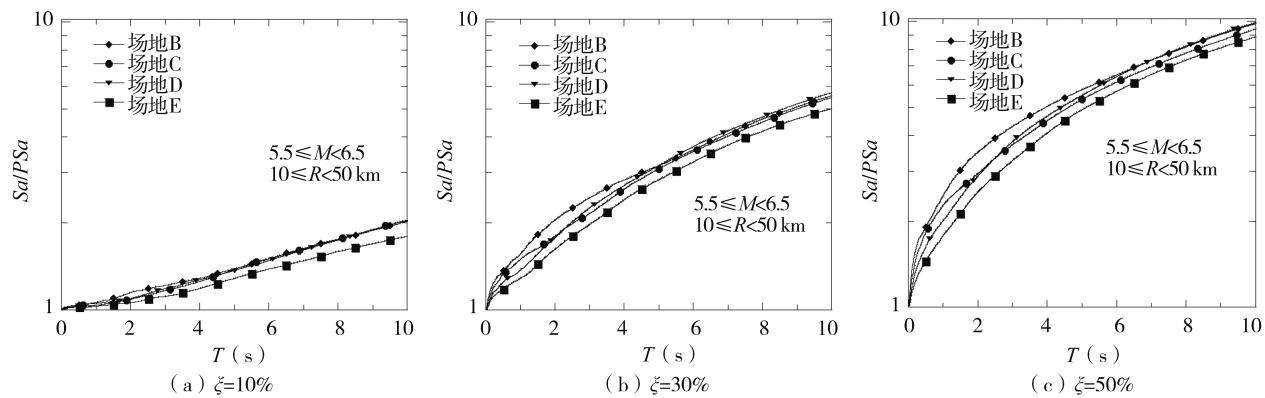
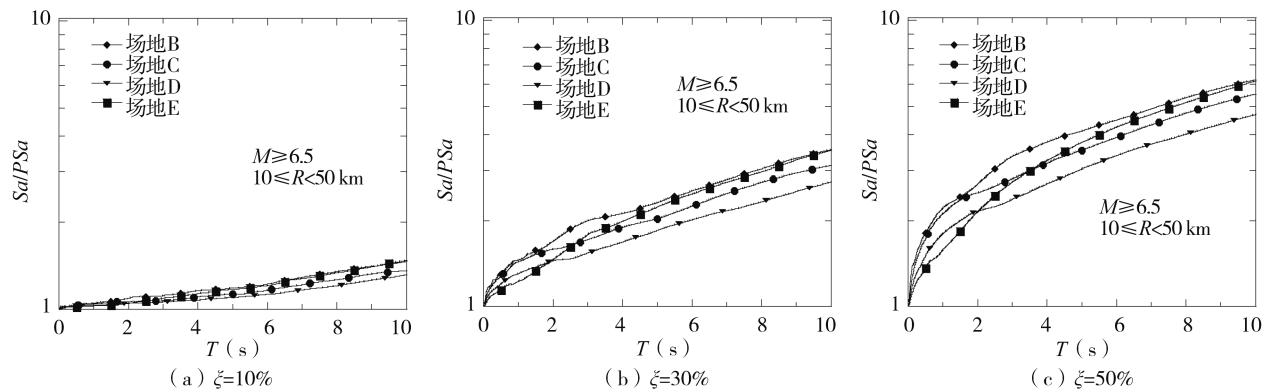


图6 $4.0 \leq M < 5.5$ 时不同阻尼比情况下的 Sa/PSa 值

Fig. 6 Sa/PSa values of $4.0 \leq M < 5.5$ with different damping ratios

图7 $5.5 \leq M < 6.5$ 时不同阻尼比情况下的 Sa/PSa 值Fig. 7 Sa/PSa values of $5.5 \leq M < 6.5$ with different damping ratios图8 $M \geq 6.5$ 时不同阻尼比情况下的 Sa/PSa 值Fig. 8 Sa/PSa values of $M \geq 6.5$ with different damping ratios

3.3 震中距的影响

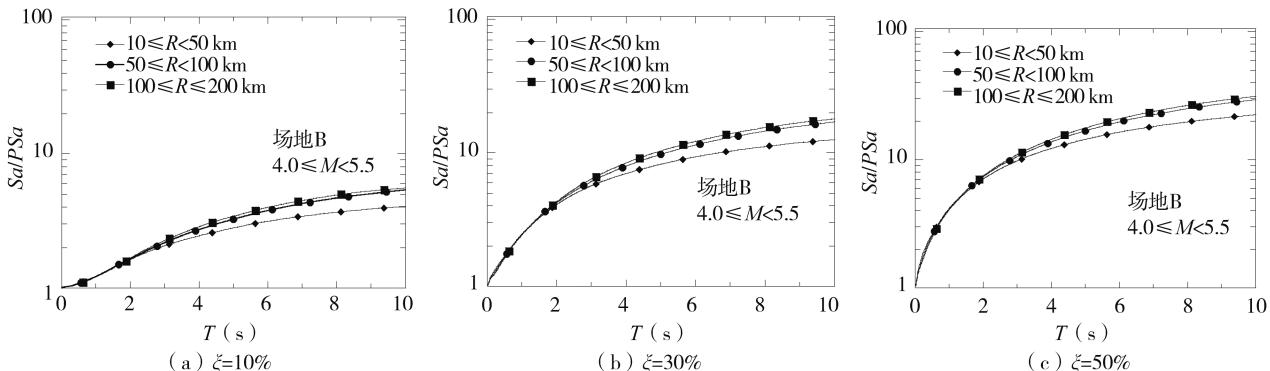
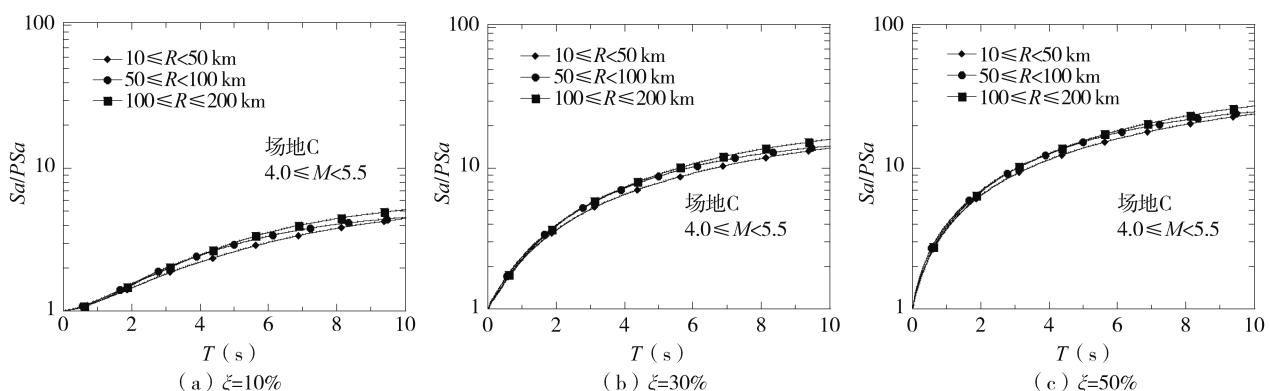
图9 B类场地不同阻尼比情况下的 Sa/PSa 值Fig. 9 Sa/PSa values of site class B with different damping ratios图10 C类场地不同阻尼比情况下的 Sa/PSa 值Fig. 10 Sa/PSa values of site class C with different damping ratios

图9~图12分别展示了不同场地类别条件下震中距对 Sa/PSa 的影响,可以得到:(1)对于场地B, $10 \leq R < 50$ km 条件下的 Sa/PSa 值在长周期段最小,且明显低于震中距为 $50 \leq R < 100$ km 和 $100 \leq R \leq 200$ km 的情况;对于场地C、D、E, Sa/PSa 值在不同震中距情况下的差异不明显。(2)与震级和场地类别相比,震中距对 Sa 与 PSa 关系的作用很小,可不考虑震中距的影响。

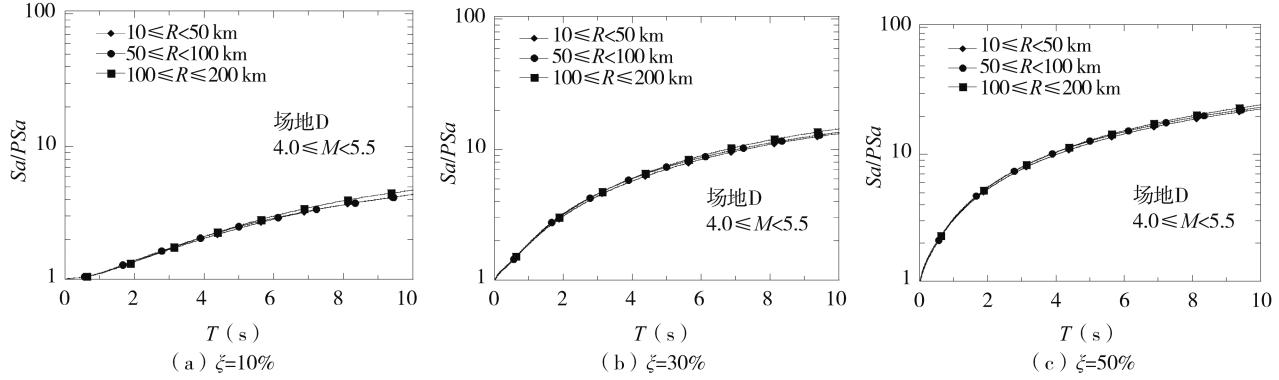


图11 D类场地不同阻尼比情况下的 Sa/PSa 值

Fig. 11 Sa/PSa values of site class D with different damping ratios

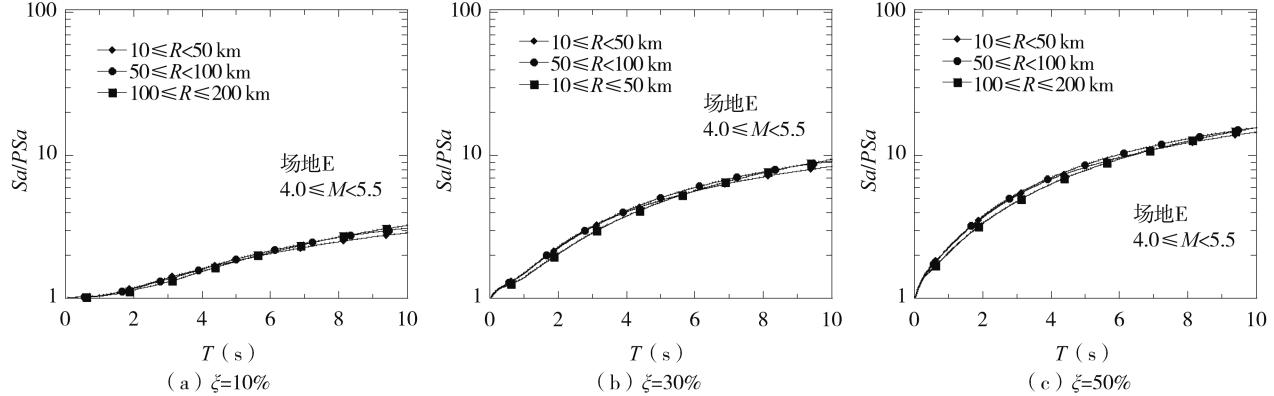


图12 E类场地不同阻尼比情况下的 Sa/PSa 值

Fig. 12 Sa/PSa values of site class E with different damping ratios

3.4 阻尼比和周期影响的理论分析

通过上述震级、场地类别和震中距对 Sa/PSa 的分析,可以证实阻尼比和周期对 Sa/PSa 存在影响。本节从理论上分析了阻尼比和周期对 Sa/PSa 的影响。根据式(2)、式(3)以及 Sd 、 Sa 的定义, Sa/PSa 可表示为,

$$\frac{Sa}{PSa} = \frac{\left| \ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) \right|_{\max}}{\omega^2 \cdot Sd} = \frac{\left| \omega^2 x(t) + 2\xi\omega\dot{x}(t) \right|_{\max}}{\omega^2 |x(t)|_{\max}} = \frac{\left| x(t) + \frac{\xi T}{\pi} \dot{x}(t) \right|_{\max}}{|x(t)|_{\max}} \quad (7)$$

设 t_x 为相对位移反应 $x(t)$ 达到最大值的时刻,这一时刻 $x(t)$ 的一阶导数 $\dot{x}(t)$ 为 0,则有 $|x(t)|_{\max} = |x(t_x)|$ 、 $\dot{x}(t_x) = 0$,由于全局最大值必然大于或等于某一时刻的值,所以将其代入式(6)的分子可得 $\left| x(t) + \frac{\xi T}{\pi} \dot{x}(t) \right|_{\max} \geq \left| x(t_x) + \frac{\xi T}{\pi} \dot{x}(t_x) \right| = |x(t)|_{\max}$,因此 $\frac{Sa}{PSa} \geq 1$,从而 PSa 总是小于等于 Sa ,当阻尼比为 0 时等号成立。

根据不等式性质,式(7)可表示为:

$$\frac{Sa}{PSa} = \frac{\left| x(t) + \frac{\xi T}{\pi} \dot{x}(t) \right|_{\max}}{|x(t)|_{\max}} \leq \frac{|x(t)|_{\max} + \left| \frac{\xi T}{\pi} \dot{x}(t) \right|_{\max}}{|x(t)|_{\max}} = 1 + \frac{\xi T}{\pi} \frac{|\dot{x}(t)|_{\max}}{|x(t)|_{\max}} \quad (8)$$

结合 Sd 、 Sv 和伪速度反应谱 PSv 的定义,引入系数 δ 使得上式等号成立,式(8)可表示为:

$$\frac{Sa}{PSa} = 1 + \delta \frac{\xi T}{\pi} \frac{|\dot{x}(t)|_{\max}}{|x(t)|_{\max}} = 1 + \delta \frac{\xi T}{\pi} \frac{Sv}{Sd} = 1 + 2\delta\xi \frac{Sv}{PSv} \quad (9)$$

式中 $0 < \delta \leq 1$, $PSv = \omega \cdot Sd$ 。

令 $\beta = \delta \cdot \frac{Sv}{PSv}$, 上式可表示为,

$$\frac{Sa}{PSa} = 1 + 2\beta\xi \quad (10)$$

式中 β 是关于阻尼比和周期的函数, 且 $\beta > 0$ 。

文中计算了 16 660 条地震加速度时程在不同阻尼比情况下的 β 值, 结果均显示 β 随周期和阻尼比增大而增大的趋势。图 13 为 16 660 条地震加速度时程在阻尼比为 10%、30% 和 50% 情况下 β 的平均值, 从图中可看出 β 随周期和阻尼比的增大而增大。结合式(9)可知, Sa/PSa 与周期和阻尼比呈正相关, 即 Sa 与 PSa 的差异随着阻尼比和周期的增大而呈增大趋势。

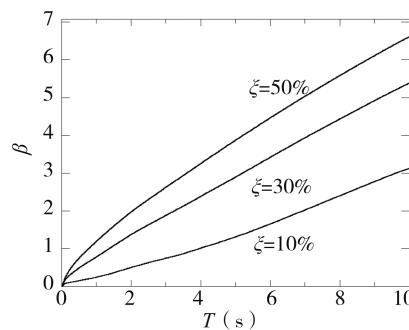


图 13 16 660 条地震加速度时程在不同阻尼比情况下的 β 的平均值

Fig. 13 Average values of 16 660 seismic acceleration time histories β under different damping ratios

4 Sa/PSa 的非线性回归分析

本节建立了考虑以上参数的 Sa 与 PSa 互相转换的数学表达式, 由前面分析可知, 震级对 Sa 与 PSa 关系的影响最为显著, 场地类别次之, 震中距的影响很小。为简化起见, 不考虑震中距对 Sa 与 PSa 关系的影响。使用 MATLAB 软件对同一震级和场地类别情况下的 Sa 与 PSa 均值之比进行非线性回归分析, 通过尝试大量函数形式确定的 Sa/PSa 经验公式为:

$$\frac{Sa}{PSa} = 1 + a\xi^b T^c \quad (11)$$

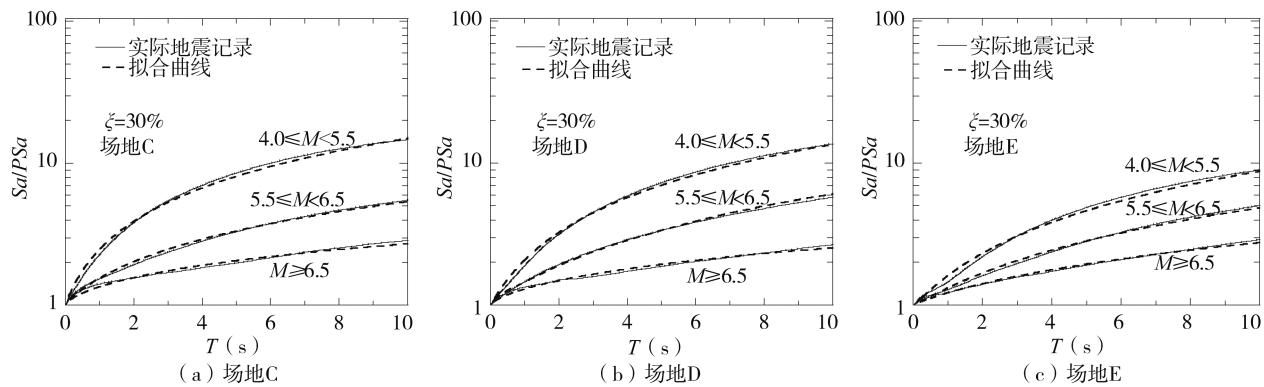
式中, ξ 、 T 分别为结构阻尼比和周期, a 、 b 、 c 为回归参数。表 2 为利用非线性最小二乘法原理, 使用 MATLAB 软件求出的对应于 12 组情况的回归参数以及拟合优度 R^2 。当阻尼比为 0 时, 上式等于 1, 符合在小阻尼比情况时 Sa 与 PSa 相等的边界条件。

表 2 非线性回归分析参数

Table 2 Parameters of nonlinear regression analysis

组	场地类别	震级	a	b	c	R^2	组	场地类别	震级	a	b	c	R^2
1	B	$4.0 \leq M < 5.5$	8.01	1.31	0.98	0.988	7	D	$4.0 \leq M < 5.5$	4.96	1.27	1.07	0.997
2	B	$5.5 \leq M < 6.5$	4.10	1.44	0.81	0.998	8	D	$5.5 \leq M < 6.5$	2.67	1.45	1.01	0.998
3	B	$M \geq 6.5$	3.65	1.64	0.55	0.999	9	D	$M \geq 6.5$	2.25	1.67	0.71	0.996
4	C	$4.0 \leq M < 5.5$	7.11	1.31	0.98	0.994	10	E	$4.0 \leq M < 5.5$	3.00	1.31	1.10	0.997
5	C	$5.5 \leq M < 6.5$	3.12	1.44	0.90	0.999	11	E	$5.5 \leq M < 6.5$	1.84	1.43	1.07	0.998
6	C	$M \geq 6.5$	2.62	1.67	0.69	0.995	12	E	$M \geq 6.5$	1.64	1.64	0.89	0.998

图 14(a) ~ (c) 分别为场地 B、C、D, 不同震级情况下的实际地震动记录与拟合曲线之间的对比。可以看出, 拟合曲线与实际地震动记录吻合较好, 所提经验公式可以很好地反映 Sa 与 PSa 之间的关系。其他的結果与图 14 相似, 限于篇幅原因不再赘述。

图 14 实际地震动记录与拟合曲线的 Sa/PSa 值对比Fig. 14 Comparison of Sa/PSa values between actual ground motion records and fitting curves

最后,文中通过与以上实际地震动记录结果对比,对现有 Sa 与 PSa 的转换式进行了检验,其代表性结果如图 15 所示。Sadek 等^[9],Song 等^[11]和 Mentrasti^[4]所提转换式均只与阻尼比和周期有关,对于不同的震级和场地类别, Sa/PSa 的值不变。Papagiannopoulos 等^[12]给出了一个统一的经验公式,按照震级、震中距和场地类别的不同分组给出了回归参数的值,图中是其震级分别为 6.6 ~ 6.6, 6.7 ~ 7.3, 7.4 ~ 8.0 的结果。文中选取了阻尼比为 30%, 场地类别为 C, 震级为 $4.0 \leq M < 5.5$, $5.5 \leq M < 6.5$, $M \geq 6.5$ 的实际地震动记录作为对比。可以发现,现有转换式均与实际地震动记录偏差较多,不能较好的反映 Sa 与 PSa 之间的关系。

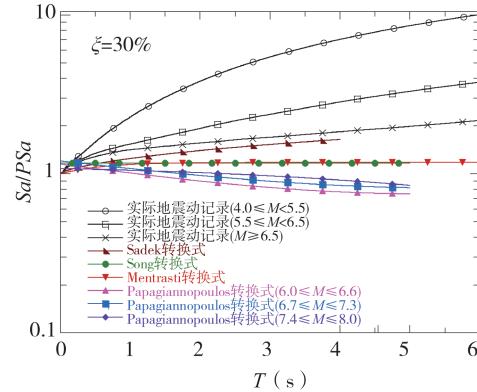
5 结论

文中通过分析 16 660 条地震加速度时程,对结构周期范围 $T=0.01 \text{ s} \sim 10 \text{ s}$ 间隔取 0.01 s, 阻尼比为 5、10、20、30、40、50% 的单自由度结构体系的反应谱进行计算,系统分析了震级、震中距和场地类别对加速度反应谱和伪加速度反应谱关系的影响,提出了两者互相转换的经验公式。文中的主要结论归纳如下:

- (1) 加速度反应谱与伪加速度反应谱的差异随着结构阻尼比和周期的增大而呈增大趋势。
- (2) 震级对加速度反应谱与伪加速度反应谱关系有显著影响。在任意阻尼比下,加速度反应谱和伪加速度反应谱的差异随着震级的增大而缩小,且在小震级时对周期的变化更为敏感。
- (3) 场地类别对加速度反应谱和伪加速度反应谱关系的影响弱于震级且受震级大小影响。震级较小时,加速度反应谱和伪加速度反应谱的差异在场地 E 条件下最小,在场地 B、C、D 条件下无明显差异;震级较大时,加速度反应谱和伪加速度反应谱的差异在场地 B 条件下最大,在场地 E 条件下的增长速率明显高于其他场地情况。
- (4) 与震级和场地类别相比,震中距对加速度反应谱与伪加速度反应谱关系的影响很小,可不考虑其影响。
- (5) 与实际统计数据相比,提出的经验公式表现良好,可实现加速度反应谱与伪加速度反应谱之间的互相转换。

参考文献:

- [1] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- GB50011-2010 Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 31-35. (in Chinese)
- [2] 张敦元,白羽,高静. 对我国现行抗震规范反应谱若干概念的探讨[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 110-118.
- ZHANG Dunyuan, BAI Yu, GAO Jing. Probe into several important concepts in Chinese current seismic response spectra[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(4): 110-118. (in Chinese)

图 15 现有 Sa/PSa 转换式与实际地震动记录的对比Fig. 15 Comparison between existing Sa/PSa transformation and actual ground motion records

- [3] 谭启迪,薄景山,郭晓云,等.反应谱及标定方法研究的历史与现状[J].世界地震工程,2017,33(2): 46 – 54.
TAN Qidi, BO Jingshan, GUO Xiaoyun, et al. History and current situation of research on response spectrum and the calibrating methods [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(2): 46 – 54. (in Chinese)
- [4] MENTRASTI L. Estimate of spectral and pseudo-spectral acceleration proximity[J]. Engineering Structures, 2008, 30(9): 2338 – 2346.
- [5] 蒋建,吕西林,周颖,等.考虑场地类别的阻尼比修正系数研究[J].地震工程与工程动,2009,29(1): 153 – 161.
JIANG Jian, LU Xilin, ZHOU Ying, et al. Esearch on modification factors of damping ratios considering site conditions [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2009, 29(1): 153 – 161. (in Chinese)
- [6] 大崎顺彦.地震动的谱分析入门[M].2版.田琪,译.北京:地震出版社,2008: 132 – 134.
OSAKI Y. Introduction to the Spectral Analysis of Earthquake Ground Motion [M]. 2nd ed. TIAN Qi translated. Beijing: Seismological Press, 2008: 132 – 134. (in Chinese)
- [7] CHOPRA A K. Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering, Fourth Edition [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2012: 835 – 851.
- [8] TRIFUNAC M D. 23rd ISET annual lecture: 70th anniversary of Biot spectrum[J]. ISET Journal of Earthquake Technology, 2003, 40(1): 49 – 53.
- [9] SADEK F, MOHRAZ B, RILEY M A. Linear procedures for structures with velocity-dependent dampers[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(8): 887 – 895.
- [10] WEITZMANN R, OHSAKI M, NAKASHIMA M. Simplified methods for design of base-isolated structures in the long-period high-damping range [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(4): 497 – 515.
- [11] SONG Jianwei, CHU Yilun, LIANG Zach, et al. Estimation of peak relative velocity and peak absolute acceleration of linear SDOF systems [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 6(1): 1 – 10.
- [12] PAPAGIANNOPoulos G A, HATZIGEORGIOU G D, BESKOS D E. Recovery of spectral absolute acceleration and spectral relative velocity from their pseudo-spectral counterparts[J]. Earthquakes and Structures, 2013, 4(5): 489 – 508.
- [13] ZHANG Haizhong, ZHAO Yangang. Damping modification factor based on random vibration theory using a source-based ground-motion model [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 136: 106225.
- [14] 罗开海,王亚勇.关于不同阻尼比反应谱的研究[J].建筑结构,2011,41(11):16 – 21.
LUO Kaihai, WANG Yayong. Researches about the response spectra with different damping ratio [J]. Building Structure, 2011, 41(11): 16 – 21. (in Chinese)
- [15] Building Seismic Safety Council. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA – 273)[S]. Federal Emergency Management Agency, Washington D C, 1997.
- [16] KANNOT, NARITA A, MORIKAWA N, et al. A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(3): 879 – 897.