

长周期结构地震反应的特点与反应谱

方小丹^{1,2}, 魏 璘³, 周 靖²

(1. 华南理工大学建筑设计研究院, 广东广州 510640;

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. 深圳市力鹏建筑设计事务所, 广东深圳 518031)

摘要: 讨论长周期结构地震反应的特点, 分析我国建筑抗震设计规范中反应谱存在的主要缺陷。对反应谱进行人为的改变, 会导致地震动特性的失真。我国规范反应谱的长周期段由于人为的调整, 改变了地震动的统计特性, 导致加速度反应谱对应的功率谱在长周期段异常, 也导致长周期结构在地震作用下的计算位移偏大。抗震规范所规定的最小地震剪力系数仅与地震影响系数的最大值 $\alpha_{\max}$ 相关, 而与场地类别无关, 有悖于软土地地上结构地震反应大于硬土地地上地震反应的一般规律。由加速度谱 S_a 、拟速度谱 S_v 和位移谱 S_d 之间的拟谱关系, 给出了具有较长周期段 (T 延长至约 10 s) 的反应谱建议, 可供规范修订时参考。工程算例表明, 依据建议的反应谱进行结构的位移验算是可行的。

关键词: 长周期结构; 反应谱; 位移谱; 最小地震剪力系数; 抗震设计

中图分类号: TU318.1 **文献标志码:** A

Characteristics of earthquake response for long-period structures and response spectrum

FANG Xiaodan^{1,2}, WEI Lian³, ZHOU Jing²

(1. Architectural Design and Research Institute of South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

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

3. LPS Architectural Engineering Design Associates, Shenzhen 518031, China)

Abstract: The characteristics of earthquake response for long-period structures, and a few shortages existing in the response spectrum of China code for seismic design of buildings are analyzed. It can be clearly found that an artificial modification to response spectrum can result in the distortion of ground motion characteristics. The revision to the long-period segment in the response spectrum of China code can cause the change in the characteristics of ground motions, which results in an abnormal representation of power spectrum corresponding to acceleration spectrum. The analysis results show that the calculated displacements of long-period structures under earthquake action are over estimated. Minimum story seismic shear coefficient described in the specification is only related to maximal earthquake influence coefficient ($\alpha_{\max}$), but is not related to site classification, which is in conflict with the general rule that the earthquake responses of a structure at the soft-soil site are larger than those of a structure at the hard-soil site. According to the pseudo spectrum relations among acceleration spectrum, pseudo-velocity spectrum and displacement spectrum, a response spectrum pattern with longer-period segment (T is approximately extended to 10 s) is proposed, which can provide a reference to specification revision. Engineering cases show that calculating the displacement of structure according to the proposed response spectrum is feasible.

Keywords: long-period structure; response spectrum; displacement spectrum; minimum storey seismic shear coefficient; seismic design

基金项目: 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室重点项目(2014ZA06)。

作者简介: 方小丹(1951—)男, 广东汕头人, 教授级高工。E-mail: f5101@126.com

收稿日期: 2013年9月

0 引言

关于长周期结构的定义,欧洲抗震设计规范^[1]认为基本自振周期大于3 s的结构为长周期结构,我国GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[2](以下简称《抗震规范》)认为基本自振周期大于5 s的结构为长周期结构。基于反应谱理论以及《抗震规范》的地震影响系数谱(以重力加速度为单位的加速度反应谱),可以认为加速度反应谱的第二下降段起点对应的周期($T = 5T_g$)是长周期结构的分界点,即结构基本自振周期大于5倍建筑物所在场地特征周期值(T_g)时可定义为长周期结构。因此,长周期结构除与其自振周期有关外,还与场地的特征周期相关。近年来,随着高层和超高层建筑的快速发展,长周期地震动特性及长周期结构的抗震设计备受关注^[3-5]。对汶川地震时上海同济记录的地震波的分析表明,虽然该地震波的加速度峰值较小,但功率谱在0.28~0.50 Hz之间的分量(对应周期2.0~3.5 s)卓越性却较突出,共振效应造成长周期高层建筑地震反应明显^[4]。规范设计反应谱采用等效静力的方法确定地震作用,是结构抗震设计的主要依据。设计反应谱的形状、分段以及取值是国内外研究的热点,其中对长周期段的反应谱也有研究^[6-8]。本文在分析长周期结构地震反应的特点以及我国抗震设计规范反应谱缺陷的基础上,研究长周期段加速度谱的特点及其拟谱关系,对长周期段反应谱提出改进建议,并通过工程实例进行验证。

1 长周期结构地震反应的特点

长周期结构应在长周期振动激励下结构反应才明显,尤其当地震动的长周期成分丰富,场地的卓越周期长,若结构的基本周期与之相近时,即形成所谓的“双共振”,结构反应更趋剧烈。理论和实践^[9-10]表明,大震级、场地的深厚软弱土以及远距离是长周期地震动的必要条件。因此,I类和II类场地(特征周期0.20~0.45 s)上的结构不需考虑长周期地震动的影响。以6.5~7.0级以上地震作为大震级地震(相当于《抗震规范》中震中烈度为8度(峰值加速度为0.3g)、美国地震3区及以上),有可能产生长周期成分较丰富的地震动。周边存在可能发生大震级地震潜在震源的III类和IV类场地、远震的长周期结构是否需要考虑长周期地震动的影响,则取决于地震动的传播路径和结构所处的场地类别。如我国上海地区,软土层深厚、IV类场地,是否采用墨西哥地震的地震记录进行长周期结构的地震反应分析,则需考

查传播至上海的地震波是否有类似于墨西哥地震记录的地震动长周期分量。事实上,上海距大震级地震多发的台湾地区约600~900 km,但还没有受长周期地震动影响的报道。这表明台湾较大震级地震动可能产生的长周期分量在传播至上海过程中衰减殆尽。

从反应谱角度,结构反应有以下两种极端情况:

1) 按《抗震规范》,当结构的自振周期为0.1 s时,即刚度趋近于无限大的结构加速度与地面加速度相同,达到最大,作用于结构的惯性力也达到最大。

2) 当结构的自振周期无限大,即刚度趋近于0时,地震动引发的结构惯性力趋近于0,也就是说,地震引起地面运动,而结构不动,结构与地面之间的相对位移实际上就是地面位移。

自振周期4~5 s以上的长周期结构,通常为超高层建筑,承受的风荷载较大,更高的建筑,如自振周期6~7 s以上的超高层结构,为避免明显的重力二阶效应,结构体系和抗侧力构件截面尺寸常为刚重比所控制,结构构件有较高的承载力安全度储备;而由于结构自振周期长、刚度小、地震作用相对较小,结构的“保有耐力”大,可确保中震甚至大震作用下结构处于弹性工作状态(不屈服)。

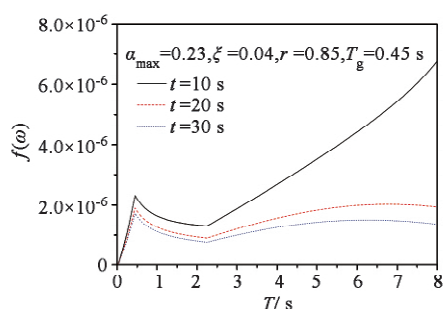
如果反应谱的第一下降段以 T^{-1} 的规律下降,第二下降段以 T^{-2} 的规律下降,则长周期结构的位移除与地震烈度(以设计最大加速度表达)相关外,还与5倍场地特征周期的平方成正比,即结构位移随场地特征周期的加长而急速增大。

综上所述,对于长周期结构,地震动使结构产生较大的位移,且由于超高层建筑的阻尼比较小,结构低频振动持续的时间较长,不利于建筑非结构构件以及设备、管线的正常使用,而结构本身一般并不存在安全问题。

2 《抗震规范》反应谱中存在的缺陷

反应谱法是中、美、欧、日等国家抗震设计规范计算结构地震反应的最主要方法。长期以来,由于模拟式地震仪自身的缺点,也由于大震级地震发生的概率较小,记录到的长周期地震动时程不多。由于反应谱长周期段下降较快,抗震设计对所采用的地震作用作为结构设计的依据不充分,规定结构承担最低限度的地震作用是一项可行的、保证结构安全的抗震设计措施,其他国家的规范也有类似的规定,即规定结构的最小地震剪力系数。但最小地震剪力系数不是反应谱实际具有的特征,地震反应谱描述了给定的地震作用下单质点弹性体系最大地震反应与体系自振周期的关系,其实质反映了地震动

的特性。人为改变反应谱曲线会导致地震动反应谱特性的失真,这从《抗震规范》加速度反应谱对应的功率谱以及位移谱在长周期段的异常走向可以看出。功率谱表示地震动能量在不同周期分量上的分布密度,实际上反映了地震动对结构的能量输入,随自振周期的增大而逐步衰减。当自振周期趋近无穷大时,能量分布密度趋近于零。因此,随结构自振周期的增加,输入能量应逐渐衰减,当自振周期趋近无穷大时,相应的输入能量应趋近于零,结构趋于静止。而《抗震规范》加速度反应谱求出的功率谱(图1)在长周期段则相反,能量分布随着周期的增大而增大。采用拟谱关系求出的相对位移谱在任何场地和阻尼比条件下都有随结构自振周期的延长而呈线性增长的现象^[7],这与相对位移谱统计特征不符^[11],即结构自振周期达到某一值时,相对位移谱并不随自振周期增大而线性增长。相对位移反应谱在极长周期处(理论上是无穷大)等于地震动地面位移最大值。此外,在反应谱长周期段,不同阻尼比的地震影响系数汇集于一点后分叉(图2),阻尼比较大的地震影响系数衰减速度明显低于阻尼比较小的地震影响系数的衰减,这不符合工程中不同阻尼比结构的振动衰减关系^[12]。



注: $\alpha_{\max}$ 为地震影响系数最大值; ξ 为阻尼比; r 为反应谱的概率水平; T_g 为场地特征周期; t 为地震动持时。

图1 抗震规范反应谱对应的功率谱

Fig. 1 Power spectrum corresponding to acceleration spectrum in seismic design code

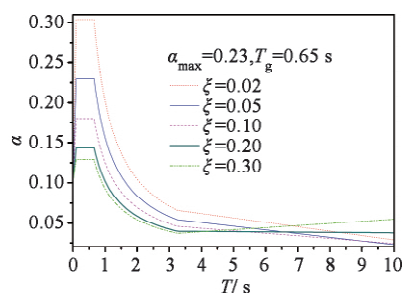


图2 不同阻尼比地震影响系数曲线

Fig. 2 Seismic influence coefficient curves with different damping ratios

《抗震规范》中规定的楼层最小地震剪力系数仅与地震影响系数的最大值 $\alpha_{\max}$ 相关,与场地类别无关,这有悖于软土场地上建筑结构的地震反应大于硬土场地上地震反应的一般规律,导致 I、II 类场地的长周期建筑结构比 III、IV 类场地更难满足最小地震剪力要求,显然不合理^[13]。实际上,楼层最小剪力系数不是反应谱特性的一部分,而是由于对长周期结构地震反应研究不够深入,为保证结构安全所采取的设计措施,可能是恰当的,也可能过于保守。随着社会经济水平不断提高,考虑到地震动的不确定性,可以适当提高设计地震的最小剪力系数;而随着地震学、抗震工程学的不断进步,对地震动认识的不断深入,也有可能降低甚至取消最小剪力系数。无法证明最小剪力系数与结构体系合理性的相关关系,相反,畸形、不合理的结构体系可能满足最小剪重比的要求,而规则、合理的结构却有可能不满足。因此,以是否满足人为设定的、与结构体系合理性无关的最小剪力系数来评判结构体系合理与否显然没有依据。在一些情况下,可以通过加大结构刚度来满足最小剪力系数的要求,但“可以做到”是一回事,是否合理又是一回事。文献[13]所列工程实例并非特例,亦非不规则结构。在低烈度(6、7度)区, I、II 类场地设计 250~300 m 以上超高层建筑时,常有此问题的困扰。在采取各种提高结构刚度的措施之后发现效果甚微;而“可以做到”的结构,实际上已可满足更高抗震设防烈度区结构的刚度和承载力需求。

以广西金融广场为例。该工程位于南宁市,抗震设防烈度 6 度, II 类场地。总建筑面积约 21.64 万平方米。地下 4 层,主塔楼为酒店及办公楼,地面以上 68 层,至主体结构的屋面高度 299.7 m,至直升飞机停机坪 325.5 m,建筑面积约 13.09 万平方米。采用钢管混凝土柱框架-混凝土核心筒结构,钢梁-混凝土板组合楼盖。典型结构平面和剖面如图 3 所示。

该结构为规则的 44 m × 44 m 的正方形平面,核心筒平面尺寸 23.2 m × 23.2 m,高宽比 7.13。初步计算表明,尽管在风荷载、地震作用下,结构的层间位移角满足规范的限值,但计算剪重比不满足规范最小剪重比的要求。一般在建筑物平、立面以及建筑使用功能确定之后,建筑物的质量分布大致确定,可以通过加大抗侧力构件的截面尺寸、设置加强层等措施来增加结构的刚度。在设备层、避难层设置两层通高、刚度较大的环桁架。采用 ETABS 程序进行结构计算分析。表 1、表 2 分别为无环桁架以及分别设置一道、两道、三道环桁架计算结果的对比。

表 1 为结构前 6 阶自振周期,由表中数据可知,结构没有耦联。此外,考虑偶然偏心,在规定水平地

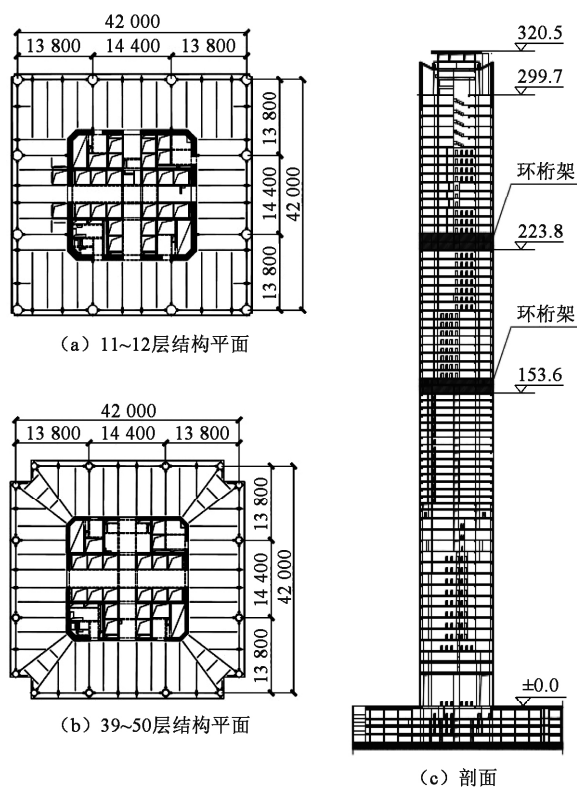


图3 广西金融广场典型结构平面和剖面图
Fig. 3 Structural plans and building cross-sectional view of the Guangxi Financial Plaza

震作用下,结构的最大扭转位移比为1.16,小于1.2;沿高度方向除加强层外,其他楼层的侧向刚度和受剪承载力没有突变情况。依照规范及相关规定,该结构属规则结构。

表1 前6阶自振周期
Table 1 Vibration periods of first six

振型	T/s			
	无	一道环桁架	二道环桁架	三道环桁架
1阶	7.925 4 (1.00)	7.345 9 (1.00)	6.910 7 (1.00)	6.614 1 (1.00)
2阶	7.648 0 (1.00)	7.125 5 (1.00)	6.728 1 (1.00)	6.456 8 (1.00)
3阶	3.067 4 (0.00)	3.078 8 (0.00)	3.027 9 (0.00)	2.941 3 (0.00)
4阶	2.294 7 (1.00)	2.129 4 (1.00)	2.151 9 (1.00)	2.116 5 (1.00)
5阶	2.189 1 (1.00)	2.047 5 (1.00)	2.068 3 (1.00)	2.039 5 (1.00)
6阶	1.338 9 (0.00)	1.285 8 (0.00)	1.254 4 (0.00)	1.270 8 (0.00)

注:括号内数据为振型方向因子。

表2为结构计算剪重比及振型质量参与系数,由表中数据可看出,如果不设置环桁架,1~25层(约占地面以上总楼层数的38%)的计算楼层剪力系数均不满足《抗震规范》中规定的设防烈度6度区,结

表2 1~25层计算剪重比及振型质量参与系数
Table 2 Calculated shear-gravity ratios and participate coefficient of modal mass for 1~25 stories

楼层	无		一道		二道		三道	
	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向
25	0.60	0.59	0.61	0.61	0.62	0.62	0.63	0.62
24	0.59	0.59	0.61	0.61	0.61	0.61	0.62	0.61
23	0.58	0.58	0.60	0.60	0.61	0.61	0.62	0.61
22	0.58	0.58	0.59	0.59	0.60	0.60	0.61	0.60
21	0.57	0.57	0.59	0.59	0.59	0.59	0.61	0.60
20	0.57	0.56	0.58	0.58	0.59	0.59	0.60	0.59
19	0.56	0.56	0.58	0.58	0.58	0.58	0.59	0.58
18	0.55	0.55	0.57	0.57	0.57	0.57	0.58	0.57
17	0.55	0.54	0.56	0.56	0.57	0.57	0.58	0.57
16	0.54	0.54	0.55	0.55	0.56	0.56	0.57	0.56
15	0.53	0.53	0.54	0.54	0.55	0.55	0.56	0.55
14	0.52	0.52	0.54	0.53	0.54	0.54	0.55	0.55
13	0.52	0.51	0.53	0.53	0.54	0.54	0.55	0.54
12	0.51	0.51	0.52	0.52	0.53	0.53	0.54	0.53
11	0.50	0.50	0.51	0.51	0.52	0.52	0.53	0.52
10	0.50	0.49	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52	0.51
9	0.49	0.49	0.50	0.50	0.51	0.51	0.52	0.51
8	0.49	0.48	0.50	0.49	0.50	0.50	0.51	0.50
7	0.48	0.48	0.49	0.49	0.50	0.50	0.50	0.50
6	0.48	0.47	0.49	0.48	0.49	0.49	0.50	0.49
5	0.47	0.47	0.48	0.48	0.49	0.49	0.50	0.49
4	0.47	0.46	0.48	0.47	0.48	0.48	0.49	0.49
3	0.46	0.46	0.47	0.47	0.48	0.48	0.49	0.48
2	0.46	0.45	0.47	0.46	0.48	0.48	0.49	0.48
1	0.45	0.45	0.46	0.46	0.47	0.47	0.48	0.47
振型质量参与系数/%	94.3	93.9	94.5	94.2	94.7	94.5	94.8	94.7

构自振周期大于5s时的最小剪力系数为0.6%的要求。即使设置三道两层通高的环桁架,自振周期由7.9254s减少至6.6141s,结构的侧向刚度约提高了43.5%,而首层的剪力系数仅增加了0.044%~0.066%。必需指出,以上计算是依据《抗震规范》地震动参数的计算结果,如果依据场地安评报告, $\alpha_{\max}=0.06$,若结构的自振周期 $T_1 \geq 5.0$ s,则最小剪力系数 $\lambda_{\min}=0.9\%$;若结构自振周期 $T_1 < 5.0$ s,则最小剪力系数 $\lambda_{\min}=1.2\%$;而按安评报告反应谱,设置三道环桁架进行计算得到的结构底层剪力系数仅为0.30%(X向)、0.29%(Y向)。按规范谱计算得到的楼层剪力系数较大,原因是规范谱的长周期段被人为修正而提高了。显然,采用提高结构刚度的方法,将计算剪力系数提高至原来的3~4倍,以满足最小剪力系数的要求,由以上的分析可知,几乎不可能实现。

规范谱的长周期段因人为修正致使楼层剪力系数提高,也导致了长周期结构在地震作用下计算的位移值偏大。

为保证长周期结构的安全度可采用多种方法,其中使结构承担给定的最小地震剪力,即为简单、可行的方法之一,无需人为改变反应谱;以加大结构刚度来满足计算最小剪重比的要求,理论上不正确,有违结构抗震设计的基本概念,实践上不但增加设计的困难,也造成结构工料的浪费。

3 建议的加速度谱及相应拟速度谱和位移谱

理论上加速度谱 S_a 、拟速度谱 S_v 和位移谱 S_d 之间有如式(1)所示的关系。加速度反应谱的第一下降段可简单地按 T^{-1} 的规律下降,第二下降段按 T^{-2} 的规律下降,如式(2)所示。

$$S_v = S_a / \omega \quad (1)$$

$$S_d = S_a / \omega^2 \quad (2)$$

$$\alpha = \begin{cases} (T_g/T) \alpha_{\max} & (T_g \leq T < 5T_g) \\ (5T_g^2/T^2) \alpha_{\max} & (5T_g \leq T < 10s) \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_a, S_v, S_d 分别为加速度谱、拟速度谱和位移谱; ω 为周期对应的圆频率; α 为地震影响系数; $\alpha_{\max}$ 为地震影响系数的最大值; T 为结构的自振周期; T_g 为场地特征周期。

假定结构阻尼比为 0.05,与现行建筑抗震设计规范反应谱比较,第一下降段的差异不大,第二下降段即长周期段表达形式简单,可避免设计规范反应谱的缺陷。其加速度反应谱对应的功率谱曲线如图 4 所示,由图可见,长周期段并没有随周期增大而出现谱值增大的趋势,符合“随自振周期增加,输入能量应逐渐衰减”的物理规律。目前,美国 ASCE 7-2010^[14] 和欧洲 EC8^[11] 等规范的加速度反应谱均采用与此类似的形式。

对于 I、II、III、IV 类场地,动力放大系数最大值 $\beta_{\max}$ 可分别取为 2.00、2.25、2.50、2.75,则加速度反应谱平台段 ($\alpha_{\max}$) 与场地类别相关,统一的楼层最小剪力系数 $\lambda_{\min}$ 反映了场地类别的影响。当 $T = 5T_g$

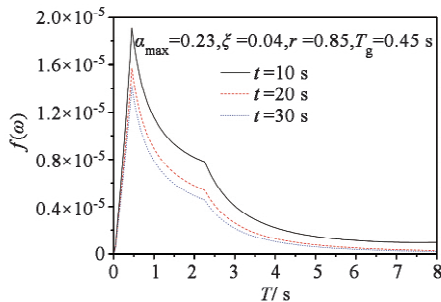


图 4 建议反应谱对应的功率谱

Fig. 4 Power spectrum corresponding to proposed acceleration spectrum

时, $\alpha = (T_g/T) \alpha_{\max} = 0.2 \alpha_{\max}$; 当 $T = 10s$ 时,地震影响系数最小值为 $\alpha_{\min} = 0.1 \alpha_{\max}$; 当 $5T_g < T < 10s$ 时,可线性内插。此外,在对长周期地震动记录进行谱分析的基础上,必要时可适当提高 III、IV 场地第三组(远震)的特征周期,使之符合长周期地震动的统计规律。

利用加速度谱 S_a 、拟速度谱 S_v 和位移谱 S_d 之间的拟谱关系,得到拟速度谱计算式(4)和位移谱计算式(5)。

$$S_v = \begin{cases} \left(\frac{T}{2\pi}\right)(0.45 + 5.5T) S_{a, \max} & (0 \leq T < 0.1s) \\ \left(\frac{T}{2\pi}\right) S_{a, \max} & (0.1s \leq T \leq T_g) \\ \left(\frac{T_g T}{2\pi \cdot T}\right) S_{a, \max} & (T_g \leq T < 5T_g) \\ \left(\frac{5T_g^2}{2\pi \cdot T}\right) S_{a, \max} & (5T_g \leq T \leq 10s) \end{cases} \quad (4)$$

$$S_d = \begin{cases} \left(\frac{T^2}{4\pi^2}\right)(0.45 + 5.5T) S_{a, \max} & (0 \leq T < 0.1s) \\ \left(\frac{T^2}{4\pi^2}\right) S_{a, \max} & (0.1s \leq T \leq T_g) \\ \left(\frac{T_g T}{4\pi^2}\right) S_{a, \max} & (T_g \leq T < 5T_g) \\ \left(\frac{5T_g^2}{4\pi^2}\right) S_{a, \max} & (5T_g \leq T \leq 10s) \end{cases} \quad (5)$$

图 5 为建议的反应谱曲线,从图中可以看到加速度谱、速度谱和位移谱的特点和相互关系。加速度谱中的“加速度控制段、速度控制段、位移控制段”,分别对应于加速度谱、速度谱和位移谱中的峰值平台,在各自的周期区间内,反应达到最大。建议的反应谱形式简单,且能体现地震动的真实特性,由图 4 及图 5f 可知,功率谱和位移谱物理意义正确,符合地震动的统计规律。理论上,不论是加速度谱、速度谱还是位移谱,都可以作为结构地震反应分析的输入,所得到的结构反应,包括位移和力,都应该一致。选择何种输入方式,主要取决于数值方法实现的效率和方便(包括结构边界条件处理的方便),以及原始地震动记录的形式。比如,利用相对位移谱,只需求得结构前几阶振型周期,无需求解大型线性方程组,可方便地计算结构的顶点位移。利用结构顶点位移角与最大层间位移角的经验关系,还可估计结构在地震作用下的最大层间位移角。

反应谱受震级、震中距、场地条件、震源机制等多种因素的影响,为获得具有普遍意义的反应谱,需要大量地震动记录的统计分析,合理确定第二下降

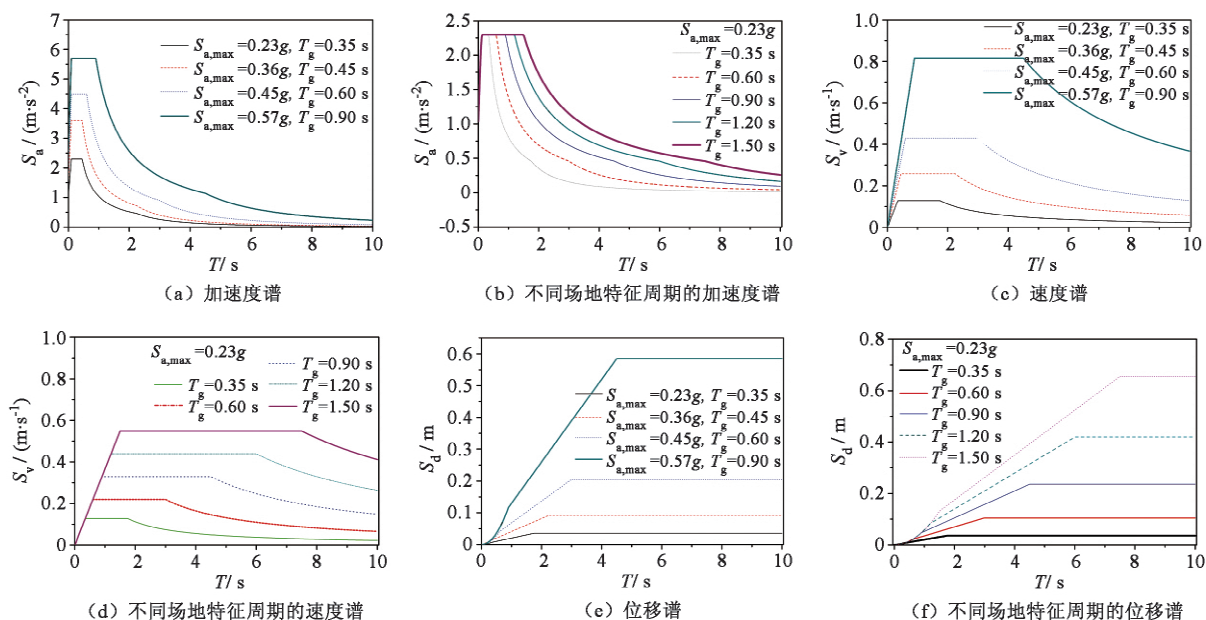


图5 建议的反应谱曲线形式

Fig.5 Curve shape of proposed response spectrum

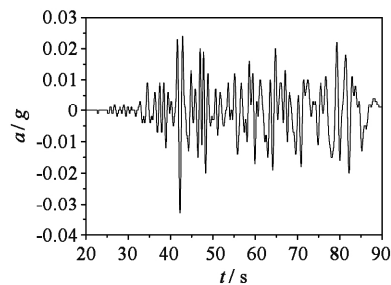
段的起点。1999 年台湾集集大地震中,地震台站记录了很多低频长周期地震动^[3],本文采用其中的 10 条地震波(如表 3 所示,平均峰值加速度 35.6 cm/s^2 ,相当于我国设防烈度 7 度区多遇地震峰值加速度水平),具有基本相同条件的主震长周期地震动记录,通过反应谱分析得到统计平均反应谱。10 条记录的选取原则:东西向记录、断层距 $100 \sim 140 \text{ km}$ 、按台湾地区场地分类标准的软土类,滤除高频成份。加速度时程如图 6a 所示,典型的 Fourier 谱特征如图 6b 所示,主频成份一般都小于 1.0 Hz 。加速度反应谱如图 6c 所示。

表3 台湾集集地震记录

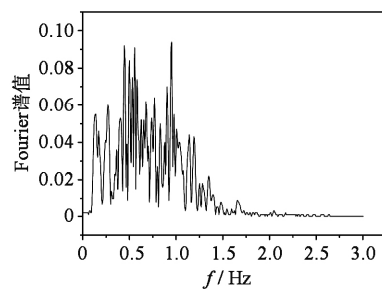
Table 3 Ground motions of Chichi earthquake in Taiwan

台站	断层距/km	峰值加速度 / g
KAU010-W	104.97	0.034
KAU011-W	108.56	0.056
KAU022-W	110.84	0.032
KAU030-W	115.55	0.039
KAU044-W	135.26	0.034
KAU048-W	105.03	0.039
KAU062-W	121.95	0.027
KAU064-W	106.82	0.040
KAU073-W	124.29	0.029

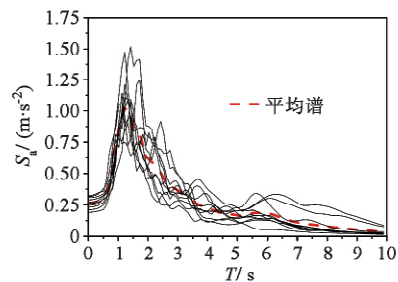
比较统计平均反应谱、本文建议反应谱($T_g = 0.9 \text{ s}$, $\alpha_{\max} = 0.035 \times 2.75 = 0.097$)以及《抗震规范》反应谱($T_g = 0.9 \text{ s}$, $\alpha_{\max} = 0.08$)如图 7 所示。由图 7 可见,在长周期段($5T_g < T < 10 \text{ s}$)本文建议的设



(a) KAU011-W 波的加速度时程



(b) KAU011-W 波的 Fourier 谱



(c) 加速度反应谱曲线

图6 集集地震动记录频谱特性

Fig.6 Spectral features of Chichi ground motions

计谱与统计平均谱吻合较好,而规范反应谱有人为修正的“上移”趋势。此外,反应谱中取《抗震规范》中最大的场地特征周期 $T_g = 0.9\text{ s}$,统计平均谱的峰值点对应的周期大于反应谱第一下降段起点(平台段最右边点)对应的周期,表明适当提高Ⅲ、Ⅳ场地第三组(远震)的特征周期,使之符合长周期地震动的统计规律是必要的。

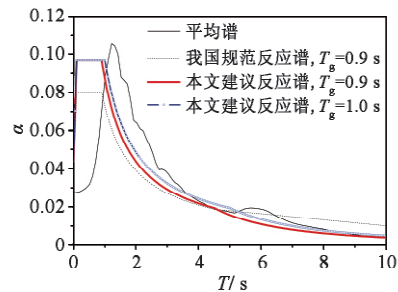


图 7 反应谱的比较
Fig. 7 Comparison of response spectrums

4 工程实例

通过实际工程分别采用加速度谱方法和位移谱方法分别计算结构顶点位移,验证采用位移谱进行结构弹性位移分析方法的可行性。算例中加速度谱计算顶点位移采用 ETABS 程序计算,取前 12 阶阵型的 SRSS 组合;位移谱计算顶点位移采用手工计算,取前 12 阶振型的 SRSS 组合。工程实例分别是广州珠江新城西塔^[15]、广西柳州九洲大厦和珠海仁恒滨海中心酒店。广州珠江新城西塔,抗震设防烈度 7 度,Ⅱ类场地,建筑面积约 25 万平方米,地下 4 层,地面以上 103 层,建筑高度 432 m (至停机坪 440 m),钢管高强混凝土柱斜交网格外筒-钢筋混凝土核心筒结构;广西柳州九洲大厦,抗震设防烈度 6 度,Ⅱ类场地,建筑面积约 11 万平方米,地下 3 层,地面以上 38 层,建筑高度 149 m,钢管高强混凝土柱框架-核心筒结构;珠海仁恒滨海中心酒店,抗震设防烈度 7 度,Ⅱ类场地,建筑面积约 12 万平方米,地下 4 层,地面以上 48 层,建筑高度 214.8 m,部分框支剪力墙结构。采用 ETABS 软件计算的前 12 阶振型周期如表 4 所示,按设计软件计算加速度谱方法和人工位移谱方法计算的结果比较见表 5。由表 5 可知,对不同地震影响系数水平(0.23 和 0.45)、场地特征周期值(0.35~1.5 s)和计算方向(X 向和 Y 向),二种计算方法得到的顶点位移值相同。

表 4 工程实例的前 12 阶振型周期
Table 4 Vibration periods of first 12 of engineering cases

振型 阶数	T /s		
	珠江新城西塔	九洲大厦	仁恒滨海中心酒店
1	7.707	5.082	4.475
2	7.674	4.104	3.292
3	2.660	3.707	3.125
4	2.190	1.332	1.264
5	2.163	1.280	1.135
6	1.165	1.131	1.024
7	1.147	0.582	0.714
8	0.678	0.554	0.615
9	0.578	0.477	0.608
10	0.556	0.389	0.536
11	0.502	0.265	0.480
12	0.262	0.197	0.406

表 5 结构顶点位移计算值对比
Table 5 Comparision of calculated displacement at structural top

工程 名称	α_{max}	T_g /s	顶点位移 Δ /mm			
			加速度谱方法		位移谱方法	
			X 向	Y 向	X 向	Y 向
广州珠江 新城西塔	0.23	0.35	90	90	90	90
		0.60	241	240	240	240
		0.90	509	509	509	509
		1.20	875	874	875	874
		1.50	1 336	1 335	1 335	1 335
	0.45	0.35	175	175	175	175
		0.60	471	470	470	470
		0.90	996	995	996	995
		1.20	1 712	1 710	1 711	1 710
		1.50	2 613	2 611	2 613	2 611
柳州九洲 大厦	0.23	0.35	56	77	56	77
		0.60	153	209	153	209
		0.90	276	450	276	450
		1.20	359	661	359	661
		1.50	439	810	439	810
	0.45	0.35	110	151	110	151
		0.60	299	409	299	409
		0.90	539	881	539	881
		1.20	702	1 293	702	1 293
		1.50	859	1 584	859	1 584
珠海仁恒 滨海中心 酒店	0.23	0.35	63	71	63	71
		0.60	174	197	174	197
		0.90	277	424	277	424
		1.20	360	552	360	552
		1.50	441	676	441	676
	0.45	0.35	124	140	124	140
		0.60	341	385	341	385
		0.90	541	829	541	829
		1.20	704	1 079	704	1 079
		1.50	862	1 323	862	1 323

5 结论

1) 反应谱的形式应满足加速度谱、速度谱、位移谱之间的内在关系,第一下降段可简单地按 T^{-1} 的规律下降,第二下降段按 T^{-2} 的规律下降,并延长至 10 s。

2) 加速度反应谱平台段与场地类别相关,I、II、III和IV类场地的动力放大系数最大值 $\beta_{\max}$ 可分别取为 2.00、2.25、2.50 和 2.75,适当延长大震级地震影响所及的 III、IV 场地的特征周期。

3) 规范给定的最小剪力系数与反应谱无关。不应以加大结构刚度来满足人为设定的最小剪力系数,可直接令结构承担必要的最小地震剪力来保证结构的抗震安全性。

4) 工程算例表明,依据建议的反应谱并由拟谱关系得到的相对位移谱,进行结构的位移验算是可行的。

参 考 文 献

- [1] EN V1998-1 Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance[S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardizations, 2004.
- [2] 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 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [3] 李春锋, 张旻, 赵金宝, 唐晖. 台湾集集大地震及其余震的长周期地震动特性[J]. 地震学报, 2006, 28(4): 417-418. (Li Chunfeng, Zhang Yang, Zhao Jinbao, Tang Hui. Long-period ground motion characteristics of the 1999 JiJi (Chi-Chi) [J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 28(4): 417-418. (in Chinese))
- [4] 楼梦麟, 杨燕, 潘小樟, 等. 汶川地震中上海高层建筑动力反应分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(3): 82-88. (Lou Menglin, Yang Yan, Pan Xiaozhang, et al. Dynamic response analysis of high-rise buildings in Shanghai during Wenchuan earthquake [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(3): 82-88. (in Chinese))
- [5] Takewaki I, Murakami S, Fujita K, et al. The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and response of high-rise buildings under long-period ground motions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(11): 1511-1528.
- [6] 谢礼立, 周雍年, 胡成祥, 于海英. 地震动反应谱的长周期特性[J]. 地震工程与工程振动, 1990, 10(1): 1-20. (Xie Lili, Zhou Yongnian, Hu Chengxiang, Yu Haiying. Characteristics of response spectra of long-period earthquake ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1990, 10(1): 1-20. (in Chinese))
- [7] 曹加良, 施卫星, 刘文光, 等. 长周期结构相对位移反应谱研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7): 63-70. (Cao Jialiang, Shi Weixing, Liu Wenguang, et al. Relative displacement response spectrum of a long-period structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 63-70. (in Chinese))
- [8] Faccioli E, Roberto P, Julien R. Displacement spectra for long periods [J]. Earthquake Spectra, 2004, 20(2): 347-376.
- [9] Koketsu K, Miyake H. A seismological overview of long-period ground motion [J]. Journal of Seismology, 2008, 12(2): 133-143.
- [10] Olsen A H, Aagaard B T, Heaton T H. Long-period building response to earthquakes in the San Francisco bay area [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(2): 1047-1065.
- [11] GB 18306—2001 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001. (GB 18306—2001 The China seismic ground motion parameter zonation map [S]. Beijing: China Standards Press, 2001. (in Chinese))
- [12] 张小平, 刘溯, 刘超, 等. 设计地震动反应谱长周期区段确定方法的探讨[J]. 防灾减灾学报, 2011, 27(4): 14-19. (Zhang Xiao-ping, Liu Su, Liu Chao, et al. Discussion of the method determining long-period range in the designing spectrum of seismic ground motion [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2011, 27(4): 14-19. (in Chinese))
- [13] 方小丹, 魏琰. 关于建筑结构抗震设计若干问题的讨论[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 46-51. (FANG Xiaodan, WEI Lian. Discuss on issues of seismic design of building structures [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 46-51. (in Chinese))
- [14] ASCE 7-2010 Minimum design loads for buildings and other structures [S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [15] 方小丹, 韦宏, 江毅, 等. 广州西塔结构抗震设计[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(1): 47-55. (FANG Xiaodan, WEI Hong, JIANG Yi, et al. Seismic design of the Guangzhou West Tower [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(1): 47-55. (in Chinese))