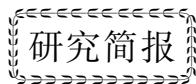


文章编号: 0253-3782(2001)06-0663-06



# 以地震动衰减关系为基础的设计谱研究\*

倪永军 朱 睦

(中国北京 100044 北方交通大学土建学院)

关键词 设计谱 烈度衰减关系 地震动衰减关系 动力放大系数 控制周期

中图分类号: P315.9 文献标识码: A

近十年来抗震设计主要研究的问题之一是从强调“强度”变为“表现”。人们已经注意到，用结构在地震作用下的变形(位移)来描述结构的破坏比用强度(力)更合适、更直接。基于此，研究者们提出了以位移为基础的抗震设计方法。这需要在较宽的周期和阻尼范围内建立位移设计谱，进行以位移为基础的抗震设计。

## 1 加速度设计谱

典型设计谱曲线的影响因素主要有结构的周期和阻尼、场地的类型、设计地震的震级及震中距等，决定设计谱曲线形状的主要参数为谱曲线的幅值、控制周期以及衰减指数等。

### 1.1 设计谱曲线的幅值讨论

我国的抗震设计规范中用动力放大系数  $\beta$  作为设计谱纵坐标的规范有：铁路工程抗震设计规范 (GBJ111-87)、公路工程抗震设计规范 (JTJ004-89)、水工建筑物抗震设计规范 (SL203-97) 等。在建筑工程抗震设计规范 GBJ11-89(修改稿) 和构筑物抗震设计规范 GB50191-93 中是用地震影响系数  $\alpha$  作为设计谱的纵坐标。

为了便于比较，把各规范的设计谱统一化为动力放大系数的形式，并采用统一的阻尼比  $\xi=5\%$ 。规范 GBJ111-87 和 JTJ004-89 的设计  $\beta$  谱的幅值  $\beta_{max}$  均为 2.25；在采用地震影响系数定义设计谱的规范 GBJ11-89(修改稿)<sup>①</sup> 及 GB50191-93 中，在近震条件下，不同设计烈度的  $\alpha_{max}$  对应的  $\beta_{max}$  值均为 2.25；取  $\beta_{max}$  为 2.25，综合反映了我国的地震动幅值情况以及经济上可以接受的抗震设防水准。在新修订的水工建筑物抗震设计规范 SL203-97 中，按照不同的建筑物类型， $\beta_{max}$  分别为：重力坝取 2.0，拱坝取 2.5，水闸等取为 2.25；对欧洲规范 EC8 的弹性谱，取  $\beta_{max}$  为场地参数 S 与谱加速度放大系数  $\beta_0$  的乘积，则 A, B, C 3 类场地所对应的  $\beta_{max}$  分别为 2.5, 2.5 和 2.25。

我国抗震设计规范中规定了设计谱的最小值  $\beta_{min}$ ，如 GBJ111-87 的最小值为 0.45、JTJ004-89 的最小值为 0.30、SL203-97 则取  $\beta$  谱最大值  $\beta_{max}$  的 20%，即  $\beta_{min}$  介于 0.40~0.50 之间；欧洲规范 EC8 也规定了加速度设计谱的下限，转化为动力放大系数时，其  $\beta_{min}$  为 0.20。相比之下，我国有些抗震设计规范对加速度谱曲线下限的规定比 EC8 更偏于保守，这就使得由设计加速度谱得出的位移谱随着周期的增加而迅速地增大，从而导致不合理的谱位移值。

\* 国家自然科学基金项目(59978001)资助。

2001-04-10 收到初稿，2001-09-20 收到修改稿并决定采用。

① 中国建筑科学研究院主编。2000. GBJ11-89(修改稿). 建筑工程抗震设计规范。

## 1.2 设计谱曲线的控制点周期

典型加速度设计谱曲线的控制点周期  $T_B$  和  $T_C$  分别表示加速度谱曲线平台的起点和终点,  $T_D$  则为加速度谱上最小取值点(即下平台)或常位移段的起点。

我国规范中, 不论何种场地类型, 除 GBJ111-87 保守地取  $T_B$  为 0 之外, 其余均取为 0.1 s; 而 EC8 则分硬、中等和软场分别取为 0.10, 0.15 和 0.20 s。EC8 的控制点周期  $T_C$  的取值均大于我国对应场地类型的取值, 这样, EC8 的上平台段宽于我国规范取值。倪永军和朱晞(2001)曾对我国规范设计谱的控制点周期与谱曲线的“胖瘦”进行过讨论。总体说来, 我国抗震设计规范设计谱曲线的上平台段短于 EC8, 谱曲线与 EC8 相比偏“瘦”。实际地震记录的检验也说明了这一点。

## 1.3 建议的设计 $\beta$ 谱

典型设计谱曲线中的控制点周期  $T_C$ ,  $T_B$  和  $T_D$ , 可按 Bommer 等(2000)建议的关系式, 由地震动峰值的衰减关系得出:

$$T_C = 5 \frac{\nu_{g,\max}}{\alpha_{g,\max}} \quad T_B = 5 \frac{T_C}{4} \quad T_D = 8 \frac{d_{g,\max}}{\nu_{g,\max}} \quad (1)$$

王亚勇和李虹(1986)采用 133 条国内外地震的地面运动记录得出了衰减关系式

$$\lg Y = a + bM + c\lg(R + 30) + dT \quad (2)$$

可用来计算地震动峰值参数。式中,  $Y$  是地震动峰值参数, 可以是加速度峰值、速度峰值或位移峰值等;  $M$  为震级;  $R$  为震中距(单位 km);  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  为回归参数;  $T$  为场地的特征周期(单位 s), 可根据层状场地的覆盖土层厚度和实测的场地土平均剪切波速来确定, 也可按我国某些规范(如 GB50191-93 或 JTJ004-89)所规定的场地指数法来确定。王亚勇和李虹(1986)所得到的水平加速度的回归分析结果见表 1。表 1 中,  $\sigma$  和  $\rho$  分别为统计回归分析的方差和总体相关系数。

表 1 回归分析结果(水平加速度)

	$a$	$b$	$c$	$d$	$\sigma$	$\rho$
$d_{g,\max}$	-1.422	0.600	-1.054	0.329	0.386	0.805
$\nu_{g,\max}$	1.049	0.386	-1.386	0.263	0.279	0.748
$a_{g,\max}$	3.226	0.219	-1.377	0.100	0.218	0.645

为使建立的设计谱与我国采用烈度区划进行的设计相适应, 引入我国第三代烈度区划图(1990)所采用的椭圆形地震烈度衰减关系

中国东部

$$I_a = 6.046 + 1.048M - 2.081\ln(R + 25) \quad \epsilon = 0.49 \quad (\text{沿长轴方向}) \quad (3)$$

$$I_b = 2.617 + 1.435M - 1.441\ln(R + 7) \quad \epsilon = 0.56 \quad (\text{沿短轴方向}) \quad (4)$$

中国西部

$$I_a = 5.643 + 1.538M - 2.109\ln(R + 25) \quad \epsilon = 0.64 \quad (\text{沿长轴方向}) \quad (5)$$

$$I_b = 2.941 + 1.363M - 1.494\ln(R + 7) \quad \epsilon = 0.61 \quad (\text{沿短轴方向}) \quad (6)$$

表 2 与地震烈度相对应的震级和震中距

烈度	中国东部		中国西部	
	$M$	震中距/km	$M$	震中距/km
VI	5.60	24.06	5.60	19.75
VII	6.26	23.30	6.26	19.23
VIII	6.92	22.56	6.92	18.76
IX	7.58	21.84	7.58	18.34

式(3)~(6)中,  $I_a$  和  $I_b$  分别为长轴和短轴方向的计算烈度,  $\epsilon$  为剩余误差。为了计算方便, 本文取长轴和短轴方向计算的震中距  $R_a$  和  $R_b$  的平均值作为震中距  $R$ , 得出我国东部和西部地区与地震烈度相对应的震级和震中距(表 2)。

I 类、II 类、III 类和IV 类场地的特征周期参照规范 SL203-97 分别取为 0.20, 0.30, 0.40 和 0.65 s。参照表 2 给出的与烈度相对应的震级和震中距, 由式(1)和(2)可以计算出不同场地类型的不同地震烈度所对应的控制周期(表 3)。由表 3 可以看出, 我国东部和西部谱曲线的控制周期  $T_B$ ,  $T_C$  基本相同, 仅是  $T_D$  略有差异。

在控制周期确定以后, 参照 EC8 弹性谱表达式, 结合我国的具体情况, 建议采用如下形式的动力放大系数  $\beta$  设计谱:

$$\beta(T) = 1 + \frac{T}{T_B}(\beta_{\max}\eta - 1) \quad 0 \leq T \leq T_B \quad (7)$$

$$\beta(T) = \beta_{\max}\eta \quad T_B < T \leq T_C \quad (8)$$

$$\beta(T) = \beta_{\max}\eta \left( \frac{T_C}{T} \right)^{k_d} \quad T_C < T \leq T_D \quad (9)$$

$$\beta(T) = \beta_{\max}\eta \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)^{k_d} \quad T_C > T_D \quad (10)$$

式(7)~(10)中,  $k_d$  为指数, 在本研究中采用 GB5019-93 的取值, 即  $k_d=0.9$ ;  $\beta_{\max}$  为设计谱的幅值, 我国多数规范取值为 2.25;  $\eta$  为阻尼修正系数, 如 GB50191-93 中给出了如下的阻尼修正:

1) 当  $T \geq 0.10$  s 时,

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + 15(\xi - 0.05)e^{-0.09T}}} \quad (11a)$$

2) 当  $T=0.02$  s 时,

$$\eta = 1.0 \quad (11b)$$

3) 当结构自振周期在 0.02~0.01 s 范围内时, 阻尼修正系数可按线性内插法确定。

表 3 计算的控制周期

场地 类型	烈度	中国东部			中国西部		
		$T_B$ /s	$T_C$ /s	$T_D$ /s	$T_B$ /s	$T_C$ /s	$T_D$ /s
I 类	VII	0.074	0.298	1.656	0.075	0.298	1.611
	VIII	0.096	0.384	2.292	0.096	0.384	2.230
	IX	0.124	0.495	3.173	0.124	0.495	3.087
	X	0.160	0.638	4.393	0.160	0.638	4.273
II 类	VII	0.077	0.309	1.673	0.077	0.310	1.630
	VIII	0.100	0.399	2.316	0.100	0.399	2.256
	IX	0.129	0.514	3.207	0.129	0.514	3.123
	X	0.166	0.663	4.439	0.166	0.663	4.323
III类	VII	0.080	0.321	1.691	0.080	0.321	1.649
	VIII	0.104	0.414	2.341	0.104	0.414	2.283
	IX	0.133	0.534	3.241	0.134	0.534	3.161
	X	0.172	0.688	4.486	0.172	0.688	4.376
IV类	VII	0.088	0.353	1.748	0.088	0.353	1.708
	VIII	0.114	0.455	2.420	0.114	0.445	2.365
	IX	0.147	0.586	3.351	0.147	0.587	3.274
	X	0.189	0.756	4.639	0.189	0.756	4.532

根据表 3 给出的控制点周期, 即可由式(7)~(10)得出不同场地类型不同烈度下动力放大系数  $\beta$  的设

计谱。限于篇幅,本文仅列出我国东部地区的 $\beta$ 谱(图1)。作为比较,图1中还画出了由EC8规范弹性谱得出的 $\beta$ 谱。为检验建议的 $\beta$ 谱的合理性,分别采用了硬场、中等场和软场的各30条美国地震记录,分别计算出其动力放大系数谱曲线,进而做出该类场地的动力放大系数包络曲线,并画于图1相应场地的 $\beta$ 谱中。

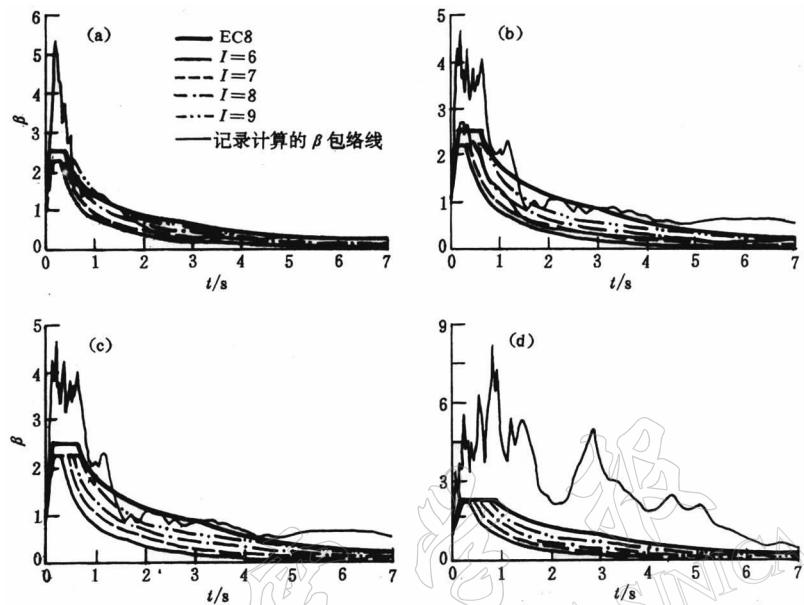


图1 建议的我国东部地区 $\beta$ 谱

由图1可以看出,所建议的动力放大系数谱曲线随设计烈度的增大,控制周期 $T_C$ 和 $T_D$ 逐渐增大,谱曲线逐渐变“胖”,除硬场烈度为Ⅸ的谱曲线外,其余均比EC8建议的相应场地的动力放大系数谱曲线“瘦”,且硬场与中等场 $\beta$ 谱的峰值大于本文建议的设计谱曲线。与美国地震记录计算的动力放大系数的包络曲线的比较表明,在硬场与中等场情况下,所建议的动力放大系数谱在烈度为Ⅸ时,基本上与地震记录的计算结果相近。

## 2 位移设计谱

合理的位移设计谱应该与加速度设计谱满足一致性要求。用与设计烈度相应的设计峰值加速度乘以图1的动力放大系数谱,就可以按式

$$S_D(T) = a_g \cdot \beta(T) \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \quad (12)$$

得出不同场地的不同设计烈度下的设计位移谱。式中,  $a_g$  为设计峰值加速度,与设计烈度相对应。我国的抗震设计规范都规定了与设计烈度相对应的设计地震加速度峰值,与设计烈度Ⅵ, Ⅶ, Ⅷ和Ⅸ相对应的设计地震加速度峰值为 0.05 g, 0.10 g, 0.20 g 和 0.40 g。需要指出的是,按式(12)计算的位移谱也是随着周期的延长而逐渐增大的,还需要进行修正。出于对结构的位移响应不应大于地面运动峰值位移的考虑,在位移谱的长周期段,用峰值地面位移作为位移谱的限值。对地面运动最大位移的估计,由于国内鲜有资料涉及,仍然采用EC8的计算式

$$d_{g, \max} = 0.05 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \quad (13)$$

式中,  $a_g$  为设计地震加速度,  $S$  为场地类型参数,  $T_c$  为加速度设计谱曲线上平台末端处的周期,  $T_d$  为常位移段周期的开始处, 规定取为 3 s. 计算出的各类场地的位移设计谱见图 2~5.

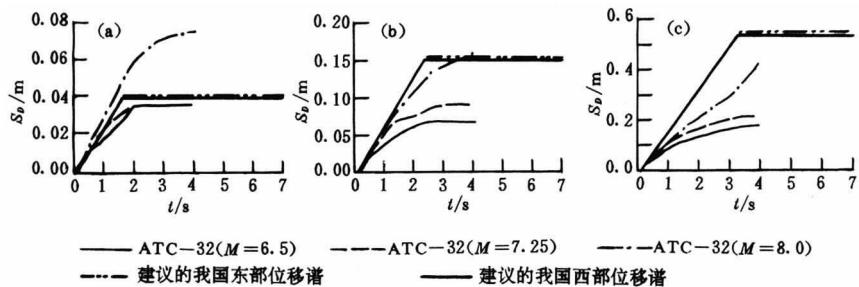


图 2 I 类场地(对应 ATC-32 的 B 类场地)位移设计谱

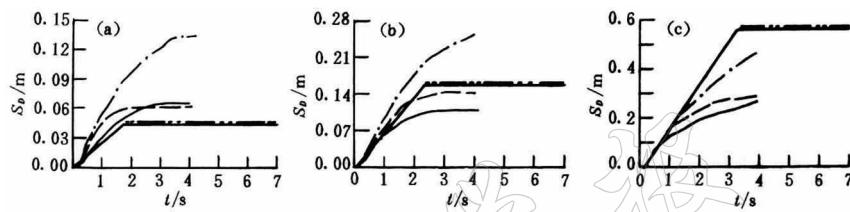


图 3 II 类场地(对应 ATC-32 的 C 类场地)位移设计谱. 图例同图 2

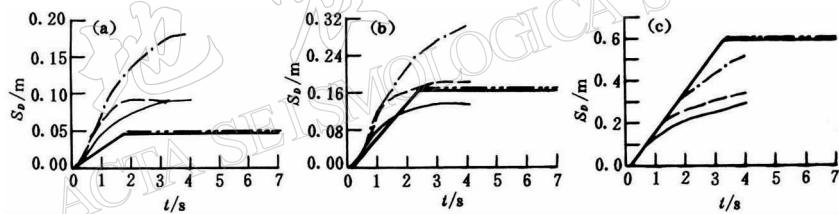


图 4 III 类场地(对应 ATC-32 的 D 类场地)位移设计谱. 图例同图 2

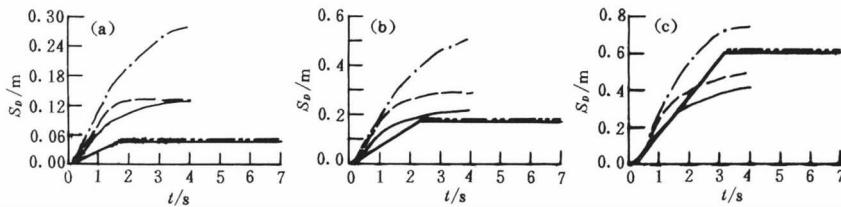


图 5 IV 类场地(对应 ATC-32 的 E 类场地)位移设计谱. 图例同图 2

图 2~5 按照场地类别, 分别给出了我国东部与西部地区的不同设计烈度下的设计位移谱. 由图 2~5 可以看出, 随着设计烈度的增大, 位移谱的幅值很快地增大, 控制周期逐渐后延, 谱曲线上升段的斜率逐渐增大; 所建议的我国东部与西部的位移谱曲线仅在平台段(幅值以及平台的开始点)略有差异. 与美国规范 ATC-32 的不同设计峰值地震加速度下的设计位移谱的比较可以看出, 本文所建议的设计位移谱与 ATC-32 的设计位移谱存在很大的差异. ATC-32 的设计位移谱中仅考虑了不同震级对设计位移谱的影响, 而没有体现震中距的影响.

### 3 结论

用本文提出的方法可以建立与加速度谱部分相容的位移设计谱，与我国的第三代地震烈度区划图相适应，对我国东部和西部按不同的场地类型和设计烈度分别给出的位移设计谱，具有统一的表达式，有较宽的阻尼修正范围，可以适应我国抗震设防思想的要求。

目前国内外以位移为基础的抗震设计方法正在研究发展中，并已经开始用于结构的抗震设计，迫切要求在较宽的阻尼与周期范围内建立合理的位移设计谱。本文首先探讨了相对成熟的加速度设计谱曲线的主要影响因素，用我国第三代烈度区划图与地震动衰减关系，来确定典型加速度的设计谱曲线的控制周期，并进而讨论了建立动力放大系数谱的一般步骤。在此基础上，按照不同的场地条件和设计烈度，探讨了与建议的动力放大系数谱相容的位移设计谱，以用于研究不同极限状态下的结构进行以位移为基础的抗震设计方法。

### 参 考 文 献

- 国家地震局. 1996. 中国地震烈度区划图(1990)概论[M]. 北京: 地震出版社, 140~144.
- 倪永军, 朱晞. 2001. 规范设计谱曲线的实际地震波检验[J]. 铁道学报, 23(2): 86~91.
- 王亚勇, 李虹. 1986. 考虑场地特征的强震地面运动参数的统计分析[J]. 地震工程与工程振动, 6(3): 67~77.
- GB50191-93. 构筑物抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社.
- GBJ111-87. 铁路工程抗震设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社.
- JTJ004-89. 公路工程抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社.
- SL203-97. 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社.
- ATC-32. 1996. Improved Seismic Design Guidelines for Bridges[S]. Applied Technology Council, Redwood City,
- Bommer J J, Elnashai A S, Weir A G. 2000. Compatible acceleration and displacement spectra for seismic design codes [A]. *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan. No. 0207.
- Eurocode 8. 1996. Design provisions for earthquake resistance of structures, Part 1.1: General Rules —— Seismic Actions and General Requirements for Structures[S].

## A STUDY OF DESIGN SPECTRA BASED ON ATTENUATION RELATIONSHIP OF GROUND MOTION

Ni Yongjun Zhu Xi

*College of Civil Engineering and Architecture, Northern Jiaotong University, Beijing, 100044*

**Key words:** design spectra; intensity attenuation relationship; attenuation relationship of ground motion; dynamical amplification factor; control period