

文章编号: 1005-0523(2024)05-0039-09



基于公路与城市桥梁抗震设计规范反应谱 的全非平稳地震动过程模拟

刘成清¹, 吴泽斌¹, 肖广才¹, 杨德磊²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 黄淮学院建筑工程学院, 河南 驻马店 463000)

摘要:【目的】生成拟合公路与城市桥梁抗震设计规范反应谱的全非平稳地震动过程代表性时程集合。【方法】首先, 结合非平稳地震动过程的强度-频率调制函数和平稳地震动过程的 Clough-Penzien 功率谱模型, 建立全非平稳地震动过程的演变功率谱模型; 其次, 依据相关规范确定演变功率谱模型参数取值; 然后, 根据全非平稳地震动过程模拟的谱表示方法, 编写 MATLAB 程序, 生成全非平稳地震动过程代表性时程集合, 计算其均值反应谱和规范反应谱拟合误差, 并进行迭代修正。【结果】依据公路与城市桥梁抗震设计规范给出了不同场地类别和设计地震分组的演变功率谱模型参数取值; 生成的代表性时程集合具有全非平稳地震动的典型特征, 其均值反应谱和规范反应谱整体拟合程度较好, 平均相对误差均在 5% 以内。【结论】基于演变功率谱模型, 通过编写全非平稳地震动过程模拟谱表示方法的 MATLAB 程序, 可生成满足公路与城市桥梁抗震设计规范要求的全非平稳地震动过程代表性时程集合, 其均值反应谱与规范反应谱拟合一致, 验证了所给方法和 MATLAB 程序的有效性, 可为桥梁结构抗震性能评估提供可靠的地震动输入。

关键词: 桥梁抗震设计; 抗震设计规范; 全非平稳地震动; 演变功率谱; 反应谱

中图分类号: U442.5; P315.9

文献标志码: A

本文引用格式: 刘成清, 吴泽斌, 肖广才, 等. 基于公路与城市桥梁抗震设计规范反应谱的全非平稳地震动过程模拟[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 39-47.

Simulation of Fully Non-stationary Ground Motion Processes Based on Response Spectrum of Codes for Seismic Design of Highway and Urban Bridges

Liu Chengqing¹, Wu Zebin¹, Xiao Guangcai¹, Yang Delei²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Architectural Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China)

Abstract: 【Objective】 To generate a representative time history set of entirely non-stationary seismic motion processes that adhere to the design response spectrum stipulated in the codes for seismic design of highway and urban bridges. 【Method】 An evolutionary power spectrum model for entirely non-stationary seismic motion processes was initially formulated by integrating the intensity-frequency modulation function, pertinent to non-stationary seismic motion processes, with the Clough-Penzien power spectrum model, applicable to stationary seismic motion processes. The parameters for this evolutionary power spectrum model were subsequently calibrated

收稿日期: 2024-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778538); 河南省国际科技合作项目(242102521034)

in accordance with relevant specifications. According to the spectral representation approach for the simulation of entirely non-stationary seismic motion processes, a MATLAB program was written to generate a representative time history set of the entirely non-stationary seismic motion processes. The fitting error between their mean response spectrum and the code response spectrum was calculated and iteratively corrected. **【Result】** The parameters of the evolutionary power spectral model for different site classifications and design earthquake groups were derived based on the codes for seismic design of highway and urban bridges. The generated representative seismic time history set exhibits the typical characteristics of entirely non-stationary seismic motion processes, demonstrating a satisfactory overall fit between its mean response spectrum and the code response spectrum, with an average relative error within 5%. **【Conclusion】** By employing the evolutionary power spectrum model, a MATLAB program can be devised to simulate the spectral representation method of entirely non-stationary seismic motion processes. It successfully generated a representative time history set that complied with the requirements of the codes for seismic design of highway and urban bridges. The mean response spectrum of the generated time histories is consistent with the code response spectrum, verifying the effectiveness of the given method and MATLAB program. This provides reliable seismic inputs essential for the seismic performance evaluation of bridge structures.

Key words: bridge seismic design; seismic design code; fully non-stationary ground motion; evolutionary power spectrum; response spectrum

Citation format: LIU C Q, WU Z B, XIAO G C, et al. Simulation of fully non-stationary ground motion processes based on response spectrum of codes for seismic design of highway and urban bridges[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 39–47.

【研究意义】交通运输作为国民经济的“大动脉”，对经济社会可持续发展意义重大。作为交通生命线工程关键节点的桥梁结构，其安全性是关键考量^[1-2]。近几十年的地震灾害资料显示，桥梁结构是地震灾害的薄弱环节，地震作用可能导致桥梁结构严重损伤甚至垮塌，因此采用动力分析方法来评估其抗震性能显得尤为重要。动力分析方法的可靠性不仅取决于结构计算模型的准确性和计算方法的精确性，还取决于所选地震动是否合理且符合规范要求^[3]。地震动样本可分为天然强震记录和人工模拟的地震动。由于天然强震记录数量有限且地震动不可重复，无法完全满足工程实际需求，因此人工模拟地震动成为结构抗震性能评估中常用的技术手段^[4-5]。

【研究进展】人工模拟地震动很重要的一环是确定能够全面反映随机地震动过程非平稳特性和典型特征（即幅值、频谱和持时特性）的地震动模型。1947年，Housner^[6]将功率谱假定为常值，提出了平稳白噪声模型来模拟地震动。随后，Kanai^[7]采

用平稳白噪声过程模拟基岩地震动，并通过场地土的过滤，提出了过滤白噪声模型，即Kanai-Tajimi谱。基于该谱，学者提出了多种地震动功率谱模型，如欧进萍模型、杜修力模型等^[8-9]。需要注意的是，这些功率谱模型均假设地震动具有平稳性和各态历经性，只能反映地震动的平稳特性^[10]。然而，地震动还具有强度非平稳性和频率非平稳性。大量研究表明，结构在进入非线性阶段后，地震动的非平稳性会影响其力学行为。

对于非平稳地震动过程的模拟，目前通常先采用地震动功率谱模型来模拟平稳地震动过程，再利用强度调制函数进行非平稳化。然而，这样得到的地震动过程虽然在强度上是非平稳的，但在频率上仍然是平稳的。目前用于地震动频率非平稳的方法有多种，如演变功率谱、希尔伯特-黄变换、小波变换^[11-14]等。其中Priestley^[11]提出的演变功率谱作为平稳随机地震动过程功率谱的推广，具有明确的物理意义，广泛应用于相关领域。在其基础上，梁建文^[15-16]引入随时间变化的演变功率谱来对非平稳

地震动过程进行人工模拟。张翠然等^[17]基于 Priestley 演变功率谱理论,提出了一种拟合目标演变功率谱,可考虑强度、频率非平稳性的人工模拟地震动方法。值得注意的是,这些方法均将地震动时程转换为随时间变化的频谱和幅值,计算难度较大。为解决这一问题,刘章军等^[18]通过将基本随机变量构造成正交函数形式,并给出了公式表达,显著降低了计算难度。随后,刘章军等^[19]基于强度调制函数,给出了强度-频率调制函数的计算式,并应用非平稳过程模拟的谱表示方法,生成了非平稳地震动过程代表性时程集合。

【创新特色】编写全非平稳地震动过程模拟的谱表示方法 MATLAB 程序。以《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)(下称“规范1”“Standard 1”)和《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)(下称“规范2”“Standard 2”)反应谱为目标反应谱,生成全非平稳地震动过程代表性时程集合,并计算其均值反应谱与规范反应谱拟合误差。**【关键问题】**依据“规范1”和“规范2”确定演变功率谱模型参数取值;编写全非平稳地震动过程模拟的谱表示方法 MATLAB 程序;生成拟合“规范1”和“规范2”反应谱的全非平稳地震动过程代表性时程集合;基于反应谱容许误差对演变功率谱模型进行迭代修正,以确保均值反应谱与规范反应谱的一致性。

1 全非平稳地震动过程的演变功率谱模型

结合功率谱模型和强度-频率调制函数,可以建立全面反映随机地震动过程的非平稳特性和典型特征(即幅值、频谱和持时特性)的演变功率谱模型。其表达式可依据文献[19]给出

$$G_{\dot{U}_g}(t, \omega) = |A(t, \omega)|^2 G(\omega) \quad (1)$$

式中: $G_{\dot{U}_g}(t, \omega)$ 为全非平稳地震动过程 \dot{U}_g 的演变功率谱; $A(t, \omega)$ 为强度-频率调制函数; $G(\omega)$ 为平稳地震动过程的功率谱模型; t 为地震动过程的任意时刻; ω 为地震动过程的频率。

$A(t, \omega)$ 采用文献[19]建议的一种强度-频率调制函数表达式

$$A(t, \omega) = \frac{\exp(-at) - \exp\left(-\left(c|\omega - \omega_g| + b\right)t\right)}{\exp(-at^*) - \exp\left(-\left(c|\omega - \omega_g| + b\right)t^*\right)} \quad (2)$$

其中:

$$t^* = \frac{\ln\left(c|\omega - \omega_g| + b\right) - \ln(a)}{c|\omega - \omega_g| + (b - a)} \quad (3)$$

式中: ω_g 为场地土的卓越圆频率;参数 a 、 b 、 c 的取值可以参照文献[19]给出; $\omega > 0$, $t > 0$ 。

功率谱模型 $G(\omega)$ 采用 Clough-Penzien 功率谱模型,表达式如下

$$G(\omega) = \frac{2\left(\omega_g^4 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2\right)}{\left(\omega_g^2 - \omega^2\right)^2 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2} \frac{\omega^4}{\left(\omega_f^2 - \omega^2\right)^2 + 4\xi_f^2\omega_f^2\omega^2} S_0 \quad (4)$$

其中: S_0 为谱强度因子,取

$$S_0 = \frac{a_{\max}^2}{r^2 \left(\pi \omega_g \left(2\xi_g + \frac{1}{2\xi_g} \right) \right)} \quad (5)$$

式中: ω_g 、 ω_f 分别为场地土和第二过滤层(如基岩等)的卓越圆频率; ξ_g 、 ξ_f 分别为场地土和第二过滤层(如基岩等)的阻尼比,常取 $\omega_f = \omega_g$, $\xi_f = 0.1\xi_g$; a_{\max} 为规范规定的水平向设计地震加速度代表值, cm/s²; r 为等效峰值因子。

2 基于公路与城市桥梁抗震设计规范的演变功率谱模型参数取值

以某公路兼城市道路桥梁场地条件为背景,生成具有场地特性的全非平稳地震动过程。依据“规范1”和“规范2”,该桥梁地震参数及抗震设计要求如表1所示。

从表1中可以看出,该桥梁采用两水准抗震设防,E1、E2地震作用分别对应第一级、第二级设防水准。此外,该桥梁属于乙类桥梁,仅考虑水平向地震作用。参数 a_{\max} 取“规范1”和“规范2”规定的水平向设计地震加速度代表值。

对于强度-频率调制函数 $A(t, \omega)$ 参数,场地土卓越圆频率 ω_g 由式 $\omega_g = 2\pi/T_g$ 计算(T_g 为特征周期值); $b = a + 0.001$, $c = 0.005$,参数 a 取值见表2。

对于 Clough-Penzien 功率谱模型参数, ω_g 取值同上;场地土的阻尼比 ξ_g 取值可以参考文献[8]给出;第二过滤层(如基岩等) $\omega_f = \omega_g$, $\xi_f = 0.1\xi_g$;等效峰值因子 r 取值可以参考文献[19]给出。

依据“规范1”和“规范2”,给出了场地土参数 ω_g 和 ξ_g 的取值(见表3、表4),以及 a_{\max} 的取值(见表5、表6)。

表1 某公路兼城市道路桥梁地震参数及抗震设计要求
Tab.1 Seismic parameters and seismic design requirements of a highway and urban road bridge

Item	“ Standard 1 ”	“ Standard 2 ”
Road class	First-class highway	Urban expressway
Seismic fortification intensity	Seismic Intensity VII	—
Seismic basic intensity	—	7-degree
Peak ground acceleration	0.15g	
Seismic fortification category	Category B	Category B
Seismic measure grade	Grade three	8-degree
Seismic design methodology	Class 1	Category A
Site classification	Category II	
Design seismic group	Group two	
Characteristic period/s	0.40	
Damping ratio	0.05	

表2 参数 α 的取值

Tab.2 Values of the parameter α s⁻¹

Design earthquake groups	I ₀	I ₁	II	III	IV
Group one	0.40	0.30	0.25	0.20	0.15
Group two	0.30	0.25	0.20	0.15	0.12
Group three	0.25	0.20	0.15	0.12	0.10

表3 按“规范1”的场地土参数取值

Tab.3 “Standard 1” parameter values of site soil

Parameter	Design earthquake groups	Site classification				
		I ₀	I ₁	II	III	IV
ω_g/s^{-1}	Group one	31.42	25.13	17.95	13.96	9.67
	Group two	25.13	20.94	15.71	11.42	8.38
	Group three	20.94	17.95	13.96	9.67	6.98
ξ_g		0.64	0.64	0.72	0.80	0.90

表5、表6括号内数值分别对应7度0.15g和8度0.30g。等效峰值因子 r 的取值见表7。 g 为重力加速度； A 为地震动峰值加速度；A、B、C、D分别对应“规范1”中的A类、B类、C类、D类抗震设防，以及“规范2”中的甲类、乙类、丙类、丁类抗震设防。

根据桥梁地震参数及抗震设计要求，结合以上表格，可以给出基于“规范1”和“规范2”的演变功率谱模型参数取值，如表8所示。

表4 按“规范2”的场地土参数取值

Tab.4 “Standard 2” parameter values of site soil

Parameter	Design earthquake groups	Site classification			
		I	II	III	IV
ω_g/s^{-1}	Group one	25.13	17.95	13.96	9.67
	Group two	20.94	15.71	11.42	8.38
	Group three	17.95	13.96	9.67	6.98
ξ_g		0.64	0.72	0.80	0.90

表5 按“规范1”水平向设计地震加速度代表值 a_{max}

Tab.5 “Standard 1” representative value of horizontal design earthquake acceleration a_{max} cm/s²

Seismic fortification intensity	6-degree	7-degree	8-degree	9-degree
	A	49	98(147)	196(294)

表6 按“规范2”水平向设计地震加速度代表值 a_{max}

Tab.6 “Standard” representative value of horizontal design earthquake acceleration a_{max} cm/s²

Earthquake action	Intensity	Seismic fortification category		
		B	C	D
E1	6-degree	30	23	17
	7-degree	60(90)	45(68)	34(51)
	8-degree	120(179)	90(135)	69(103)
	9-degree	239	180	137
E2	6-degree	—	—	—
	7-degree	216(301)	216(301)	—
	8-degree	392(500)	392(500)	—
	9-degree	608	608	—

表7 等效峰值因子

Tab.7 Equivalent peak factor

Design earthquake groups	Site classification				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
Group one	3.07	3.00	2.88	2.79	2.60
Group two	3.10	2.97	2.88	2.83	2.63
Group three	3.14	3.02	3.00	2.88	2.61

3 基于公路与城市桥梁抗震设计规范反应谱的全非平稳地震动过程模拟

3.1 全非平稳地震动过程模拟的谱表示方法

对于全非平稳地震动过程 \ddot{U}_g ，可采用文献[20]

表8 演变功率谱模型参数取值

Parameter	Value
ω_g/s^{-1}	15.710
ω_f/s^{-1}	1.571
ζ_g	0.720
ζ_f	0.720
r	2.880
$\alpha_{max}/(cm/s^2)$	147("Standard 1", E1, E2) 90("Standard 2", E1) 301("Standard 2", E2)

表9 反应谱 S_{max} 取值

Parameter	"Standard 1"		"Standard 2"	
	E1	E2	E1	E2
S_{max}	0.188g	0.638g	0.206g	0.692g

建议的非平稳过程模拟的谱表示方法

$$\ddot{u}_g(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{G_{\ddot{u}_g}(t, \omega) \Delta\omega} \times [\cos(\omega_i t) X_i + \sin(\omega_i t) Y_i] \quad (6)$$

式中: $\omega_i = i\Delta\omega$, 频率间隔 $\Delta\omega$ 应足够小; $\{X_i, Y_i\}$ 为标准正交随机变量; N 为截断项数。

为确保标准正交随机变量 $\{X_i, Y_i\}$ 的随机函数表达式排列次序与功率谱密度函数所在频率区间内能量排列次序相一致, 可参考文献[21]先建立任意两组标准正交随机变量 \bar{X}_j 和 \bar{Y}_j , 见式(7), 然后采用 MATLAB 程序中的 `rng(seed)` 函数和 `sort(rand(), 1)` 函数将 $\{\bar{X}_j, \bar{Y}_j\}$ 映射为 $\{X_i, Y_i\}$, 以生成不重复随机排列的唯一确定的标准正交随机变量^[22]。

$$\begin{cases} \bar{X}_i = \sqrt{2} \cos(i\theta + \pi/4) & i = 1, 2, \dots, N \\ \bar{Y}_i = \sqrt{2} \sin(i\theta + \pi/4) & i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

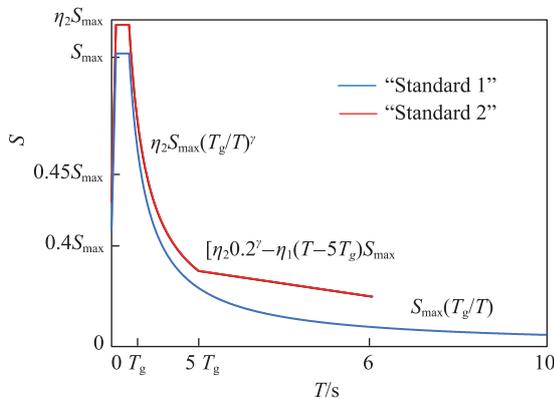


图1 设计加速度反应谱对比图

Fig. 1 Comparison of designed acceleration response spectrum

式中: 基本随机变量 θ 在区间 $[-\pi, \pi]$ 上服从均匀分布 ($\theta \propto 1$)。

3.2 公路与城市桥梁抗震设计规范反应谱

依据“规范1”和“规范2”, 绘制设计加速度反应谱函数 $S(T)$ 对比图, 如图1所示。计算相应的设计加速度反应谱最大值 S_{max} , 见表9。

结合表9和图1可以看出, “规范1”和“规范2”的设计加速度反应谱值 S 不同之处在于: ①周期 T 的取值范围不同, “规范1”规定 $T=0\sim 10$ s, 而“规范2”规定 $T=0\sim 6$ s; ②反应谱最大值 S_{max} 取值不同, 根据“规范2”计算得到的 E1、E2 地震作用设计加速度反应谱最大值 S_{max} 均比“规范1”的计算结果大; ③设计加速度反应谱 $S(T)$ 在周期 T 大于特征周期 T_g 后的曲线趋势不同, “规范1”设计加速度反应谱在 $T \geq T_g$ 后呈平滑衰减趋势, 逐渐趋近于0, 而“规范2”设计加速度反应谱在 $T \geq T_g$ 后呈两阶段下降趋势, 逐渐趋近于某一特定值。

3.3 全非平稳地震动过程模拟 MATLAB 实现

应用全非平稳地震动过程模拟的谱表示方法, 以“规范1”和“规范2”反应谱作为目标反应谱, 生成 E1、E2 地震作用下代表性时程集合及其对应的均值反应谱 $S_m(T, \xi)$ 。其中 T 为结构自振周期; ξ 为结构阻尼比, 本文取 $\xi=0.5$ 。

首先, 需要选取 $[-\pi, \pi]$ 上随机变量 θ 的代表性离散点 $\theta_k = -\pi + 2(k - 0.5)\pi/s, 0 \leq k \leq s$ 。其中 θ 服从均匀分布 ($\theta \propto 1$); s 为代表性离散点的个数。

其次, 将选取的代表性离散点 θ_k 代入式(7), 得到 $\{\bar{X}_j^{(k)}, \bar{Y}_j^{(k)}\}, j = 1, 2, \dots, N$ 。采用 MATLAB 程序中的 `rng(seed)` 和 `sort(rand(), 1)` 函数将 $\{\bar{X}_j^{(k)}, \bar{Y}_j^{(k)}\}$ 进行唯一确定性映射, 得到一组标准正交随机变量 $\{X_i^{(k)}, Y_i^{(k)}\}, (i = 1, 2, \dots, N)$ 。

然后, 分别计算强度-频率调制函数 $A(t, \omega)$ 和功率谱密度函数 $G(\omega)$, 得到演变功率谱 $G_{\ddot{u}_g}(t, \omega)$ 。之后, 将 $G_{\ddot{u}_g}(t, \omega)$ 代入式(6), 即可生成第 k 条代表性时程。

按照上述流程,依次计算就可以获得 s 条全非平稳地震动过程代表性时程,即代表性时程集合。

需要注意的是,代表性时程集合 $\ddot{u}_g(t)$ 的均值反应谱 $S_m(T, \zeta)$ 与规范反应谱 $S_c(T, \zeta)$ 存在不一致性。按“规范1”,生成的代表性时程集合的均值反应谱,在每个周期值上的幅值与规范反应谱幅值的平均相对误差应小于5%。平均相对误差表达式如下

$$\varepsilon_{\text{mean}} = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} \left| \frac{S_c(T_n, \zeta) - S_m(T_n, \zeta)}{S_c(T_n, \zeta)} \right| \leq [\varepsilon_{\text{mean}}] \quad (10)$$

式中: N_s, T_n 分别为结构自振周期 T 内离散点的个数和第 n 个离散点对应的周期值;按“规范1”取 $N_s = 10/\Delta T$,按“规范2”取 $N_s = 6/\Delta T$; ΔT 为离散点之间的时间间隔,取为 0.01 s;容许误差 $[\varepsilon_{\text{mean}}]$ 取 5%; $n = 1, 2, \dots, N_s$ 。

当 $\varepsilon_{\text{mean}} > [\varepsilon_{\text{mean}}]$ 时,需要对演变功率谱 $G_{\ddot{u}_g}(t, \omega)$ 进行迭代修正

$$G_{\ddot{u}_g}(t, \omega) \Big|_{h+1} = \begin{cases} G_{\ddot{u}_g}(t, \omega) & 0 < \omega \leq \omega_c \\ G_{\ddot{u}_g}(t, \omega) \Big|_h \frac{S_c(\omega, \zeta)^2}{(S_m(\omega, \zeta) \Big|_h)^2} & \omega > \omega_c \end{cases} \quad (11)$$

式中: $G_{\ddot{u}_g}(t, \omega) \Big|_h$ 和 $G_{\ddot{u}_g}(t, \omega) \Big|_{h+1}$ 分别为第 h 次迭代和第 $h+1$ 次迭代后生成的演变功率谱, $h \geq 0$; $S_m(\omega, \zeta) \Big|_h$ 是第 h 次迭代后生成的均值反应谱, $\omega = 2\pi/T$; ω_c 为截止频率,按“规范1”取 0.628 rad/s,按“规范2”取 1.050 rad/s。

将式(11)代入到式(6)中,生成代表性时程集合 $\{\ddot{u}_g^{(h+1)}(t)\}$ 及其均值反应谱 $S_m(\omega, \zeta) \Big|_{h+1}$,并计算平均相对误差 $\varepsilon_{\text{mean}}$,循环迭代直至 $\varepsilon_{\text{mean}} \leq [\varepsilon_{\text{mean}}]$ 。在迭代修正时,为简便计算,可根据规范反应谱,采用 MATLAB 程序中的 polyfit() 函数和 polyval() 函数将均值反应谱进行分段,并对每一段分别进行多项式拟合。

3.4 模拟与验证

按照上述步骤,编写 MATLAB 程序,生成了 E1、E2 地震作用下 $s=200$ 条的代表性时程,截断频率 $\omega_u=180$ rad/s;截断项数 $N=1800$;频率间隔 $\Delta\omega=0.1$ rad/s;代表性地震动持时 T_0 取 20 s;代表性时程的时间步长 Δt 取 0.01 s。

图2和图3分别给出了以“规范1”和“规范2”反

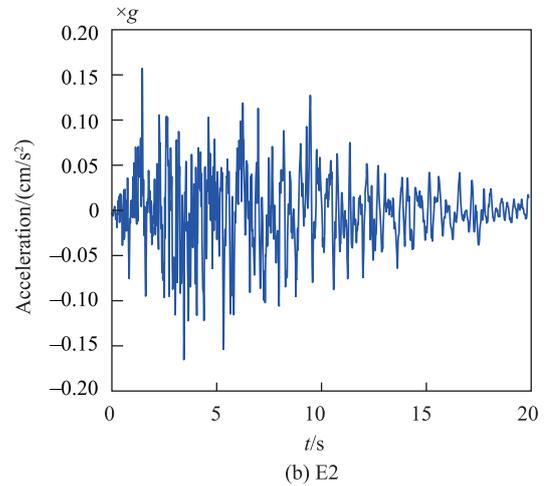
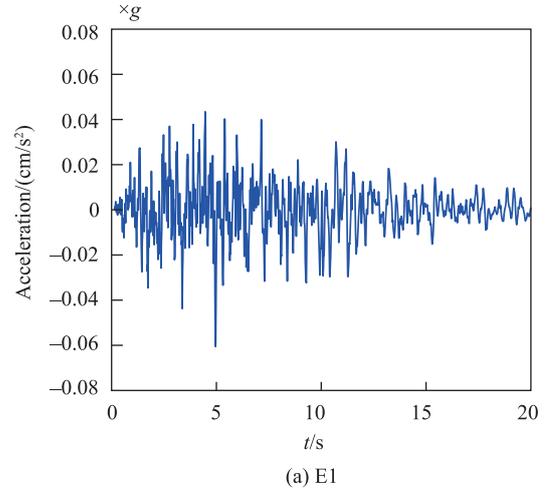


图2 按“规范1”200条代表性均值时程
Fig. 2 “Standard 1” 200 representative average time-histories

应谱为目标反应谱的 E1、E2 地震作用下,具有幅值、频谱、持时这些典型地震动特征的 200 条代表性均值时程曲线。

图4和图5分别给出了 E1、E2 地震作用下代表性时程集合的均值反应谱与“规范1”和“规范2”反应谱的对比图,整体拟合程度较好。经计算,平均相对误差 $\varepsilon_{\text{mean}}$ 均小于容许误差 $[\varepsilon_{\text{mean}}]$,具体数值见表10。验证了全非平稳地震动过程模拟的谱表示方法和基于此方法编写的 MATLAB 程序的有效性。此外,对比图4和图5可以看出,在周期 $T=5T_g$, 2.0 s 附近,相较于“规范1”反应谱,“规范2”反应谱由于在长周期部分经过了人为修正,使得均值反应谱在迭代修正过程中,其与规范反应谱之间的拟合程度较差,但仍满足容许误差要求。

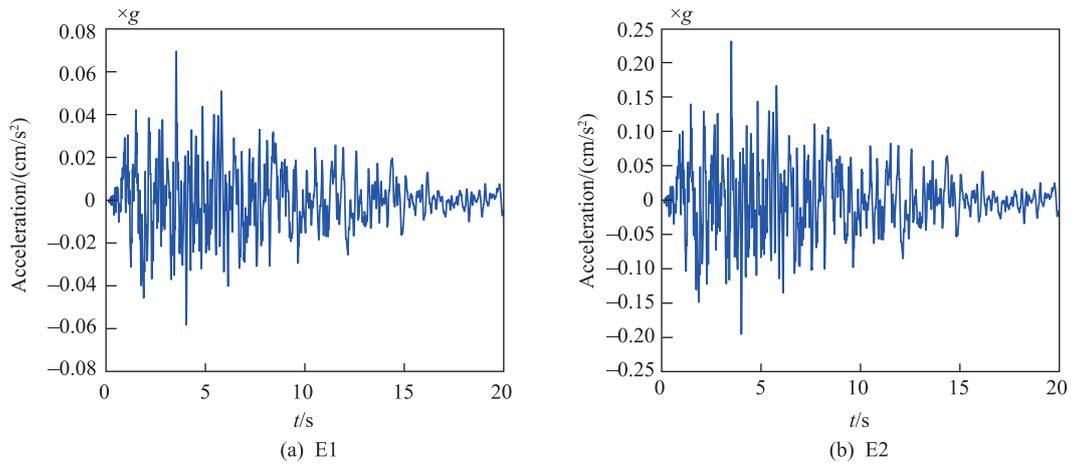


图3 按“规范2”200条代表性均值时程

Fig. 3 “Standard 2” 200 representative average time-histories

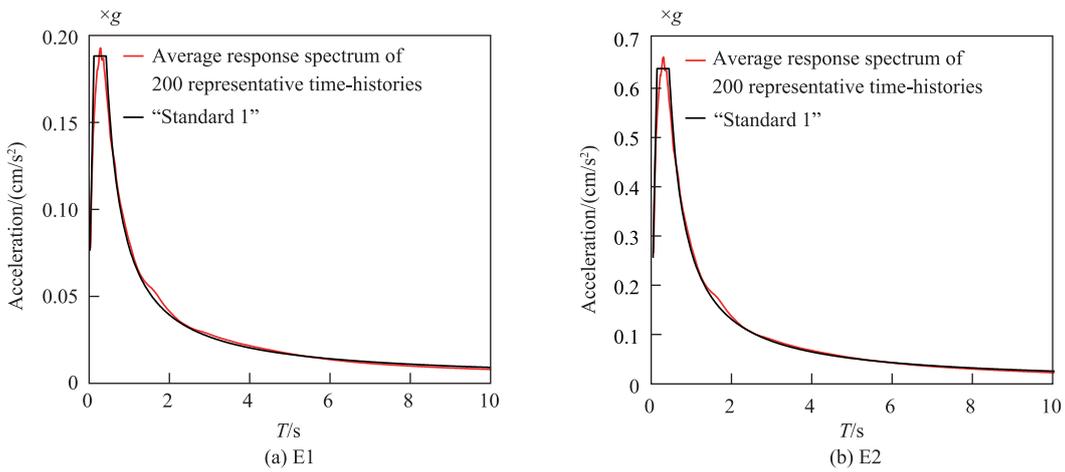


图4 均值反应谱与“规范1”反应谱

Fig. 4 Average response spectrum and response spectrum of “Standard 1”

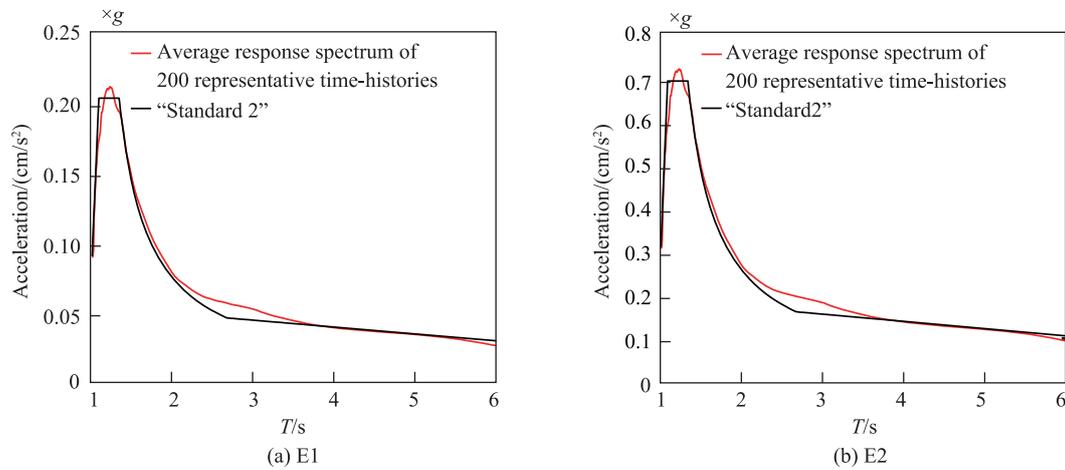


图5 均值反应谱与“规范2”反应谱

Fig. 5 Average response spectrum and response spectrum of “Standard 2”

表10 反应谱平均相对误差

Tab.10 Average relative error of response spectrum %

Parameter	“Standard 1”		“Standard 2”	
	E1	E2	E1	E2
$\varepsilon_{\text{mean}}$	3.14	3.69	4.85	4.89

4 结论

1) 依据“规范1”和“规范2”,给出了不同场地类别、不同设计地震分组下的全非平稳地震动过程的演变功率谱模型参数取值,可为桥梁抗震性能评估提供参考。

2) 基于演变功率谱模型,编写全非平稳地震动过程模拟的谱表示方法 MATLAB 程序,可生成满足“规范1”和“规范2”要求的具有强度非平稳性和频率非平稳性的全非平稳地震动过程代表性时程集合,为桥梁抗震性能评估提供可靠的地震动输入。

3) 全非平稳地震动过程代表性时程集合的均值反应谱与“规范1”和“规范2”反应谱的整体拟合程度较好,平均相对误差均在容许误差5%以内,验证了所给方法和 MATLAB 程序的有效性。其中均值反应谱与“规范2”反应谱局部拟合程度较差,是由于“规范2”反应谱在长周期部分经过了人为修正的原因。

参考文献:

- [1] 赵灿晖,贾宏宇,岳伟勤,等.桥梁抗震2020年度研究进展[J].土木与环境工程学报,2021,43(S1):91-99.
ZHAO C H, JIA H Y, YUE W Q, et al. State-of-the-art review of seismic design of bridge in 2020[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(S1): 91-99.
- [2] 陈华鹏,刘维刚,江钰,等.混凝土桥梁服役性能退化及预防性维护综述[J].华东交通大学学报,2024,41(2):1-24.
CHEN H P, LIU W G, JIANG Y, et al. Review of performance deterioration and preventive maintenance of in-service concrete bridges[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(2): 1-24.
- [3] 梁意,肖承波,吴体,等.基于建筑规范反应谱的人工地震波合成及其应用[J].四川理工学院学报(自然科学版),2016,29(5):83-87.
LIANG Y, XIAO C B, WU T, et al. Synthesis and application of simulated earthquake waves based on building design response spectrum[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2016, 29(5): 83-87.
- [4] ARORA S, JOSHI A, KUMARI P, et al. Strong ground motion simulation techniques[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(14): 673.
- [5] 丁佳伟,吕大刚,曹正罡. Clough-Penzien 功率谱模型参数的识别与统计建模及应用[J]. 振动工程学报, 2023, 36(5): 1204-1215.
DING J W, LYU D G, CAO Z G. Identification and statistical modeling with applications of Clough-Penzien power spectrum model parameters[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(5): 1204-1215.
- [6] HOUSNER G W. Characteristics of strong-motion earthquakes[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1947, 37(1): 19-31.
- [7] KANAI K. Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground motion[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 1957, 35(2): 309-325.
- [8] 欧进萍,牛荻涛,杜修力.设计用随机地震动的模型及其参数确定[J].地震工程与工程振动,1991,11(3):45-54.
OU J P, NIU D T, DU X L. Random earthquake ground motion model and its parameter determination used in aseismic design[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(3): 45-54.
- [9] 杜修力,陈厚群.地震动随机模拟及其参数确定方法[J].地震工程与工程振动,1994,14(4):1-5.
DU X L, CHEN H Q. Random simulation and its parameter determination method of earthquake ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(4): 1-5.
- [10] 王鼎,李杰.工程地震动的物理随机函数模型[J].中国科学:技术科学,2011,41(3):356-364.
WANG D, LI J. Physical random function model of ground motions for engineering purposes[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2011, 41(3): 356-364.
- [11] PRIESTLEY M B. Evolutionary spectra and non-stationary random process[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 1965, 28(2): 204-230.
- [12] PRIESTLEY M B. Power spectral analysis of non-stationary random processes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1967, 6(1): 86-97.
- [13] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1998, 454: 903-995.

- [14] MONTEJO L S, SUAREZ L E. Wavelete-based identification of site frequencies from earthquake records[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2006, 10(4): 565-594.
- [15] 梁建文. 非平稳地震动过程模拟方法(I)[J]. *地震学报*, 2005 (2): 213-224.
LIANG J W. Simulation of non stationary ground motion processes(I)[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2005(2): 213-224.
- [16] 梁建文. 非平稳地震动过程模拟方法(II)[J]. *地震学报*, 2005(3): 346-351.
LIANG J W. Simulation of non-stationary ground motion processes(II)[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2005(3): 346-351.
- [17] 张翠然, 陈厚群. 基于渐进谱的幅值和频率非平稳人造地震动拟合[J]. *地震工程与工程振动*, 2008(3): 24-32.
ZHANG C R, CHEN H Q. Prediction of non-stationary earthquake accelerograms compatible with design evolutionary spectra[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2008(3): 24-32.
- [18] 刘章军, 曾波, 吴林强. 非平稳地震动过程模拟的谱表示: 随机函数方法[J]. *振动工程学报*, 2015, 28(3): 411-417.
LIU Z J, ZENG B, WU L Q. Simulation of non-stationary ground motion by spectral representation and random functions[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2015, 28(3): 411-417.
- [19] 刘章军, 刘增辉, 刘威. 全非平稳地震动过程的概率模型及反应谱拟合[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(2): 32-38.
LIU Z J, LIU Z H, LIU W. Probability model of fully non-stationary ground motion with the target response spectrum compatible[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(2): 32-38.
- [20] LIU Z J, LIU W, PENG Y B. Random function based spectral representation of stationary and non-stationary stochastic processes[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2016, 45: 115-126.
- [21] 刘章军, 王磊, 但庆文, 等. 非平稳地震动的广义演变谱模型及在水工抗震中的应用[J]. *水利学报*, 2015, 46(9): 1028-1036.
LIU Z J, WANG L, DAN Q W, et al. Generalized evolutionary spectrum of non-stationary ground motion and its applications in seismic design of hydraulic structures[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(9): 1028-1036.
- [22] 刘章军, 刘玲. 随机海浪过程模拟的随机函数方法[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(20): 1-6.
LIU Z J, LIU L. Simulation of stochastic ocean states by random function methods[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(20): 1-6.



通信作者:刘成清(1976—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为工程抗震和抗冲击。E-mail:lcqjd@swjtu.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)