

人工合成最不利地震动

王天利, 李青宁, 郭 昕

(西安建筑科技大学土木工程学院 陕西 西安 710055)

摘要: 输入地震动的选择和设计是应用时程分析法进行结构抗震研究至关重要的问题之一. 文中针对重要结构或地震高危地区结构, 提出一种考虑地震输入引起结构的地震反应或结构的地震性态趋于危险或最不利状态的地震动人工合成方法. 通过三个要素: 拟建场地天然地震动的相频特性; 现行规范设计反应谱的幅频特性; 拟建结构的卓越频率分量, 人工合成最不利地震动. 根据提出的数学模型编制了相应的计算程序. 最后通过对某立交枢纽工程中的一座曲线匝道桥梁结构, 人工合成其最不利地震动, 进行相应的时程分析对比计算, 例证了文中人工合成最不利地震动方法的有效性.

关键词: 最不利地震动; 人工合成; 时程分析

中图分类号: P315.9; U447

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)04-0523-06

经过近 30 年的研究, 人工合成地震动的理论和方法得到了快速发展^[1-5], 有力地支持了地震工程理论研究和工程抗震设计. 目前人工合成地震动的方法大体可分为以下两类: 一类是把地震波视为不同幅值频率且具有随机相角的信号的迭加; 另一类是把地震波视为具有一定幅值的随机脉冲(δ 函数)的迭加. 这些人工合成地震动的方法存在以下两个问题: ①采用随机相角使天然地震所具有的频域非平稳特性得不到反映, 所合成的地震动与实际天然地震记录差异较大; ②拟合规范设计反应谱人工合成地震动, 对一般的结构或地震危险性不是很高地区结构的抗震验算是合适的, 因为规范设计反应谱代表平均意义上的地震作用, 但对重要结构(如立交枢纽中的桥梁、大跨结构、高耸结构等)或地震高危地区结构的抗震验算是不安全、不可靠的.

文中提出一种针对重要结构或地震高危地区结构, 考虑地震输入引起结构最危险激励的最不利地震动的人工合成方法, 并编制了相应的计算程序. 通过对某立交枢纽工程中的一座曲线匝道桥人工合成其最不利地震动, 并进行相应的时程分析对比计算, 初步验证了方法的有效性.

1 最不利地震动的概念

最不利地震动是指在这样的地震输入下结构的反应处于最不利的状况. 最不利地震动具有两个特性: ①使结构处在高危状态; ②能够真实反映工程结构环境的地震动. 因此最不利地震动是相对于一定的环境而言, 能够对特定具体结构产生最大的地震作用. 对重要的结构物, 如: 不规则结构, 甲类结构, 超高、大跨、特长、异型结构等, 和地震高危地区的结构物, 在应用时程分析法进行抗震验算时, 应该在满足现行规范规定(峰值加速度和场地类别符合规范要求)的前提下, 选取能使结构的地震反应或结构的地震性态趋于最危险或最不利状态的地震动.

文献[6]利用估计地震动潜在破坏势的综合评定法, 首先按照地震动本身的参数和结构弹性反应的参数进行第一次排队, 组成最不利地震动备选数据库; 然后按照强震记录的位移延性和滞回耗能作第二次排队; 最后根据拟建项目场地条件、结构周期及规范有关规定等因素的影响, 最后选定给定场地条件及结构周期对应的最不利设计地震动. 可见最不利地震动是一个复杂的概念, 它既与地震本身特性有关, 又和结构所在场地、结构自振特征以及结构的破坏机理有关. 只有随着人类对地震破坏作用和结构地震破坏机理认识的加深, 特别是地震记录资料的积累增多, 选择的最不利地震动才会准确.

事实上, 工程设计或研究人员受现有地震记录资料的限制, 无法按文献[6]的方法给出最不利设计地震动, 因此文中提出基于最不利地震动的两个特性, 人工合成最不利地震动, 进行相应的抗震设防. 必须指出的是: 对那些重要性一般的结构或地震危险性较低地区的结构, 则无须输入这种最不利地震动, 因为地震是一种罕遇荷载, 如用最不利的抗震设计换取结构的极大安全, 必将造成资源的过度浪费.

考虑最不利地震动的两个特性, 人工合成最不利地震动的三个要素为: 第一, 具有拟建结构建设场地

收稿日期: 2013-11-29

修改稿日期: 2014-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078306); 陕西省自然科学基金研究计划资助项目(2013JQ7007); 西安建筑科技大学基础研究基金项目(JC1203); 陕西省重点学科建设专项资金项目(E01004)

作者简介: 王天利(1975-), 女, 博士, 讲师, 主要从事桥梁结构抗震及分析等方面的研究. E-mail: wangtldq@xauat.edu.cn

天然地震动的性能;第二,满足现行规范设计反应谱的要求;第三,含有与结构自振特性接近的优势分量,激起结构产生共振加剧结构破坏。

2 最不利地震动的人工合成及程序设计

反应谱的实质是利用一个单自由度周期(或频率)过滤器的反应,间接反映地震的频谱特性(即用动力特性沿频率方向“滑动”的单质点体系动力最大反应来描述地震动特性)。对地震时程信号实施傅立叶变换,可获得信号的频谱特性,其幅频特性(幅值随频率的分布曲线)代表了时程信号中各个频率分量的幅值的比重和相对关系,其相频特性(相位随频率的分布曲线)代表了时程信号中各个频率分量的相位的相对关系。功率密度谱是在频域描述非周期平稳随机信号的一种方法,它只与幅值频谱有关,不含相位信息,在数学上是一个纯实数,因此不可能从给定的功率密度谱中恢复原始时程信号,但它对充分利用信号能量,确定信号有效带宽(信号的频率分量)起着非常重要的作用。采用以上三种形式描述同一地震动时,三者间存在着一定的相关性和转换关系。文中采用从目标反应谱生成幅频特性,从原始地震记录中提取相频特性,两者通过傅立叶逆变换生成地震时程曲线,并在其中叠加结构的卓越频率分量,人工合成特定地区拟建结构的最不利地震动。人工合成最不利地震动流程见图1。

2.1 由天然地震记录生成反应谱

单自由度振子的运动方程为:

$$m \times (\ddot{y}(t) + a(t)) + c \times \dot{y}(t) + k \times y(t) = 0 \quad (1)$$

用 Duhamel 积分公式表示的解为:

$$y(t) = \frac{1}{\omega_d} \int_0^t e^{-\xi \omega(t-\tau)} a(\tau) \sin[\omega_d(t-\tau)] d\tau; \quad \ddot{y}(t) = a(t) + \omega_d e^{\xi \omega(t)} a(\tau) \sin[\omega_d(t-\tau)] \tau \quad (2)$$

其中, m 为振子质量; c 为阻尼系数; k 为刚度系数; $a(t)$ 为输入加速度; $y(t)$ 为位移; ξ 为阻尼比, $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$; ω 为固有频率, $\omega = \sqrt{k/m}$; ω_d 为阻尼频率, $\omega_d = \omega\sqrt{1-\xi^2}$, 通常工程结构的阻尼比很小(混凝土结构为 0.05), 故 $\omega_d \approx \omega$ 。

由于地震输入加速度 $a(t)$ 是不规则的函数,而且多为地震加速度时程曲线的定周期采样数值序列,因此(2)式需通过数值积分的方法,计算反应的时间变化规律—时程响应曲线。但 Duhamel 积分公式存在计算量大,计算精度受采样周期影响大的问题。文中采用状态空间法建立式(1)运动方程的状态方程,利用四阶龙格-库塔算法求解状态变量,并通过速度状态变量微分获得加速度时程曲线。

单自由度振子的状态方程为:

$$\dot{X}(t) = A \times X(t) + B \times a(t), \quad y(t) = C \times X(t) \quad (3)$$

$$\text{其中: } X(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -2\xi\omega \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 1].$$

四阶龙格-库塔算法:

$$\left. \begin{aligned} y_{i+1} &= y_i + h \times (k_1 + 2 \times k_2 + 2 \times k_3 + k_4) / 6 \\ k_1 &= f(x_i, y_i); k_2 = f(x_i + h/2, y_i + h \times k_1 / 2) \\ k_3 &= f(x_i + h/2, y_i + h \times k_2 / 2); k_4 = f(x_i + h, y_i + h \times k_3) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

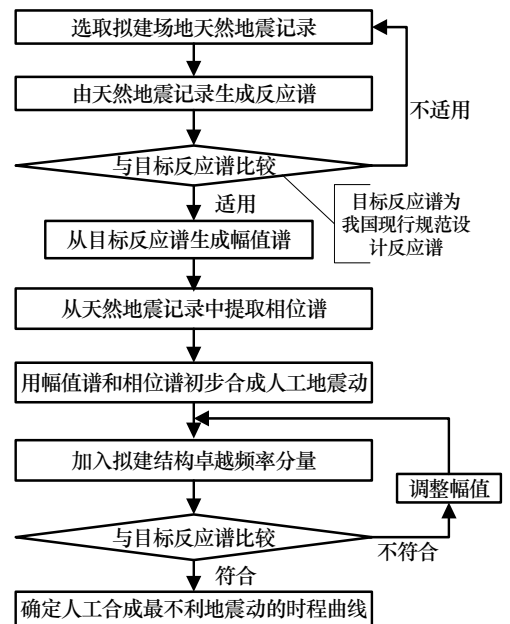


图1 人工合成最不利地震动流程图

Fig1. The flow chart of synthesizing the severest ground motion

其中: h 为采样间隔, 取采样周期的 2 倍; $f(x, y)$ 为状态方程; x 为输入加速度 $a(t)$; y 为状态方程的输出, 即地震动速度信号。

对地震动速度信号 y 求取数值微分, 即可获得地震动加速度信号。对不同周期和阻尼比的单自由度体系, 在选定的地震输入加速度 $a(t)$, 可以获得一组相对位移、相对速度和绝对加速度的反应时程曲线, 找出加速度最大值, 即可获得针对选定天然地震记录的加速度反应谱。

2.2 从目标反应谱生成幅值谱

规范中规定的加速度设计反应谱间接反映了地震的频谱特性, 但其在物理意义上与傅立叶变换给出的幅频特性有本质的不同。前者代表该周期下地震动加速度时程曲线的最大值, 说明信号在时间域的幅值, 其平方代表信号的能量; 后者代表某时程信号中各个频率分量的幅值的比重和相对关系, 其幅值与目标反应谱中的幅值没有直接对应关系。因此只能近似计算, 从目标反应谱中获得用于傅立叶逆变换的幅值谱。

能量有限的信号是能量信号, 遵循能量守恒定律, 由帕斯瓦尔公式:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |X(\omega)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(f)|^2 df \quad (5)$$

式中: $|X(f)|^2$ 表示单位带宽的能量, 反映信号的能量在各频率的相对大小, 称为信号 $x(t)$ 的能量密度谱。由于地震波信号 $x(t)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 区间内能量无限, 但在有限区间 $(-T, T)$ 内满足平均功率有限的原则, 根据帕斯瓦尔定律, 其平均功率公式为

$$S = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_T^2(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} |X_T(\omega)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X_T(\omega)|^2}{T} d\omega \quad (6)$$

令 $P_s(\omega) = |X_T(\omega)|^2 / T$, 称此为功率谱密度, 简称功率谱。

利用地震反应谱与功率谱近似转换关系^[7]: $S(\omega) = \frac{\xi}{\pi\omega} [S^T(\omega)]^2 / \ln[\frac{-\pi}{\omega T} \ln(1-P)]$ 。其中: $S^T(\omega)$ 为给定的目标反应; P 为反应超越概率。由此幅值谱可表示为:

$$C_j(\omega) = \sqrt{4 \times S(\omega_j) \times \Delta\omega} \quad (7)$$

式中: C_j 为第 j 个频率分量的幅值; ω_j 为第 j 个频率分量的频率; $\Delta\omega = 2\pi/T$, $\omega_j = 2\pi \cdot j/T$, T 为采样间隔。

2.3 天然地震记录时程曲线的傅立叶变换

傅立叶变换是一种信号分析工具, 对于任意时程信号都可以获得其频谱特性, 而不论它是确定信号还是随机信号、是平稳过程和非平稳过程, 它和时程信号是一一对应的, 对其频谱特性进行傅立叶逆变换就可获得时程信号。其频谱特性包括幅频特性和相频特性。幅频特性反映了地震动幅值在频率域上的分布, 显示了不同频率的正弦波所携带能量的相对关系。幅频特性与时程信号的幅值和反应谱的幅值有一定的对应关系, 但其物理意义又明显不同。相频特性在地震动研究中很少受到关注, 一直以来, 人工合成地震动中相频特性被简单地假定为 $[0, 2\pi]$ 内均匀随机分布。日本学者大崎顺彦^[8]最早强调了相频特性对时程的影响。文中采用从天然地震记录时程曲线中通过傅立叶变换提取其相频特性, 用于人工地震动合成。

由于地震时程曲线 $a(t)$ 为不规则信号, 实际记录数据为离散时间序列, 且时间长度有限, 为了便于编程实现和说明参数选取, 采用离散傅立叶变换:

$$DFT[a(t_n)] = A(k) = N \cdot X(k\Omega_0) = \sum_{n=0}^{N-1} a(t_n) \times e^{-j2\pi kn/N}, k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (8)$$

$$IDFT[A(k)] = a(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \times e^{j2\pi kn/N}, n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (9)$$

式中: $\Omega_0 = 2\pi/N$, 为频域取样间隔; N 为一个序列的样点数。傅立叶变换的结果是频率变量的复函数, 表示为:

$$A(k) = R(k) + I(k) = |A(k)| \cdot e^{j\theta(k)} \quad (10)$$

式中： $R(k)$ 和 $I(k)$ 分别为地震时程曲线 $a(t)$ 离散傅立叶变换结果 $A(k)$ 的实部和虚部， $|A(k)|$ 和 $\theta(k)$ 分别为傅立叶变换的幅值谱和相位谱，即：

$$|A(k)| = \sqrt{R^2(k) + I^2(k)}$$

(11)

$$\theta(k) = \text{tg}^{-1}(I(k)/R(k))$$

(12)

2.4 人工合成最不利地震动

人工合成地震动，采用式(7)和式(12)按照式(10)合成，对其进行(9)式变换即可获得具有天然地震特性的人工合成地震时程曲线 $a^*(t)$ 。

利用式(13)向 $a^*(t)$ 中加入结构卓越频率分量，生成最不利地震动 $a^{**}(t)$ ，即：

$$a^{**}(t) = a^*(t) + A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$$

(13)

其中： ω_1 、 ω_2 为拟建结构的两阶卓越频率分量。

3 人工合成最不利地震动的实例

以八度抗震区、II 类场地，某大型立交枢纽工程中的一座曲线匝道桥梁为例，依据上述方法和编制的程序人工合成最不利地震动，并进行时程分析对比计算，验证最不利地震动输入下结构的最不利地震响应效应。匝道 1 桥位于曲率半径 $R=280\text{ m}$ 的同向弯曲曲线段上，桥面宽 8 m ；单跨跨径 25 m ；全桥长 775 m ，共 9 联；梁高 1.2 m ，C50 预应力钢筋混凝土；该匝道连接两条主线，桥梁纵坡为 1% ，墩高取 $15\text{ m}\sim 8\text{ m}$ ，墩柱直径 1.8 m ，单支，C30 钢筋混凝土；桩基础，肋板式桥台；墩、台径向布设；普通墩上支座为 GYZ(900×207)，桥台和过渡墩上支座为 GJZF4(400×650×107)；FM-80 型伸缩缝；挡块高 50 cm ，厚 30 cm ，与墩、台帽同宽，间隙 5 cm 。全桥有限元计算模型见图 2。

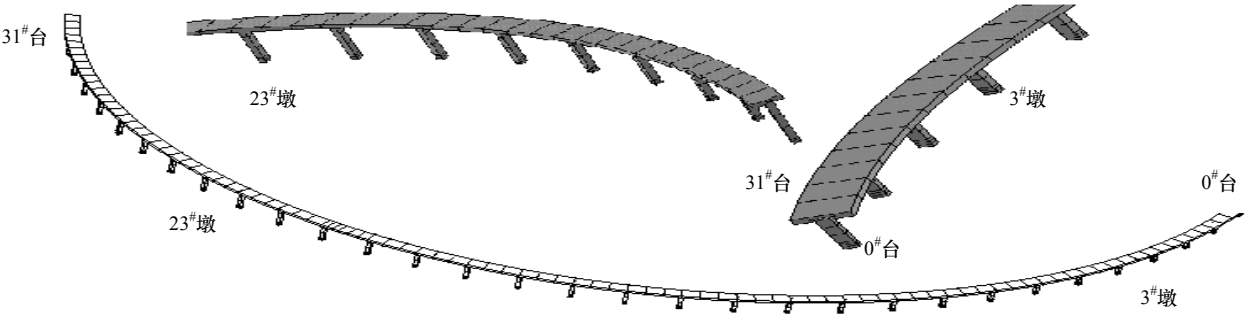


图 2 有限元计算模型
Fig2. The finite element calculation model

3.1 人工合成最不利地震动选择的历史天然地震记录

最不利地震动的第一个要素“具有拟建结构建设场地天然地震动的性能”，是通过选择一组与拟建结构的现场地震动参数尽量符合的天然地震记录来保证的。限于地震数据资料的制约，此处采用的天然地震记录为：II 类场地，1940 年 EL Centro 地震的水平向地震记录，其基本参数见表 1，加速度时程曲线见图 3 中(a)、(b)。

表 1 EL Centro 地震记录参数
Tab1. The parameter of EL Centro seismic record

方向	加速度峰值/cm·s ⁻² (地震记录)	E2 加速度峰值/cm·s ⁻² (八度抗震区)	E2 调幅 系数
x	342	0.3g	0.860
y	210	0.3g	1.400

3.2 现行公路/城市桥梁抗震设计细则/规范^[9-10]规定的设计反应谱

按照文献[9-10]，八度抗震区，II 类场地，规范设计反应谱按 E2 地震作用下，水平向设计加速度反应谱为式(14)。

$$S_{\text{水平}} = \begin{cases} 1.1475g(5.5T + 0.45) & T < 0.1s \\ 1.1475g & 0.1s \leq T \leq 0.4s \\ 1.1475g(0.4/T) & T > 0.4s \end{cases}$$

(14)

3.3 人工合成最不利地震动

对 1940 年 EL Centro 地震的水平向地震记录，提取相位谱 $\theta(k)$ ；由八度抗震区、II 类场地的(14)式规

范设计反应谱生成幅值谱 C_j ; 加入匝道 1 桥的两阶卓越频率分量, 人工合成最不利地震动见图 3 中(a₂)、(b₂). 图 3 中(a₁)、(b₁)为 1940 年 EL Centro 地震记录, 按照表 1 中 E2 调幅系数, 调幅后的地震动时程曲线.

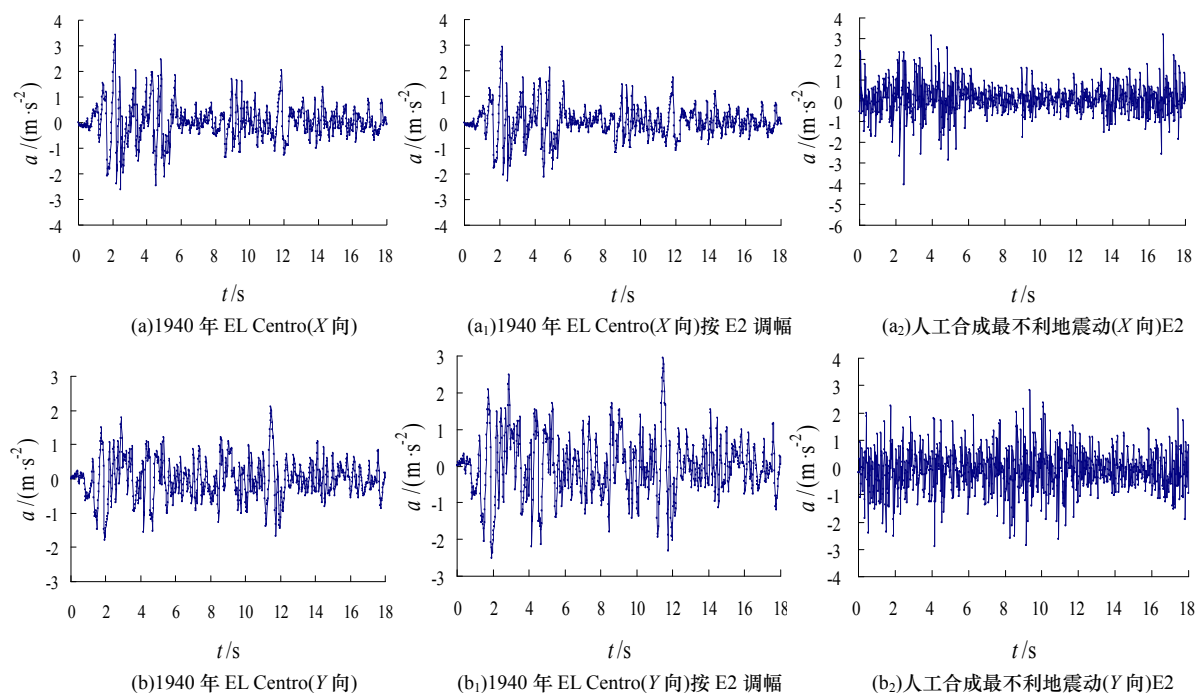


图3 地震动时程曲线

Fig3. The time-history curves of the ground motion

分析图 3 可得: (1)取规范设计反应谱的 E2 幅值谱与 1940 年 EL Centro 地震记录的相位谱, 人工合成最不利地震动的加速度幅值接近 0.3g, 与 1940 年 EL Centro 地震记录按照 E2 进行调幅后的幅值基本一致; (2)通过在人工合成地震动中加入被研究结构的两阶卓越频率分量 (幅值为该频率在规范加速度反应谱上的对应值, 相位采用随机相位), 使得人工合成的地震动中这两个频率的分量得到强化, 使结构在地震响应分析中强化基频共振, 图 3 中(a₂)、(b₂)可以看出人工合成最不利地震动的加速度时程曲线中有该分量被强化的迹象, 同时地震动的幅值也产生了小幅的增加.

3.4 人工合成最不利地震动作用下结构的地震响应

为了验证文中人工合成地震动的最不利地震响应效应, 同步建立了用规范设计反应谱的 E2 幅值谱 C_j 与 1940 年 EL Centro 地震记录的相位谱 $\theta(k)$, 人工合成地震动, 将此人工合成的地震动定义为 2' 组 (包括 X 向 a_{2'} 和 Y 向 b_{2'} 两个地震动时程曲线), 图 3 中人工合成的最不利地震动(a₂)、(b₂)定义为 2 组. 此两组地震动分别输入图 2 中匝道 1 桥的有限元计算模型中进行时程分析对比计算.

时程分析对比结果: (1)在 2 组地震动作用下使匝道 1 桥产生的地震响应, 比在 2' 组地震动作用下产生的地震响应 (力响应和位移响应), 大 10%~150%; (2)在 2 组地震动作用下, 桥跨结构的很多构件, 达到/超过了极限状态而发生破坏. 表明 2 组人工合成的地震动的破坏性大于 2' 组的. 可见尽管两组人工合成地震动的幅值基本相当 (因为两组人工合成地震动的幅频特性均满足规范设计反应谱), 但是由于 2 组地震动中加入了使结构产生共振作用的结构卓越基频分量, 导致在 2 组地震动下匝道 1 桥产生非常不利 (或者危险) 的地震响应.

证明文中提出的人工合成地震动的方法既符合天然地震动的随机非平稳特性, 又符合现行规范设计反应谱的目标, 同时又能激起结构的最不利地震响应, 因此是一种人工合成的最不利地震动.

4 结论

反应谱理论为地震工程和工程抗震奠定了理论基础, 但随着强震地面运动观测的发展和工程结构日益向超高、超大型方向发展, 现行的设计反应谱和振型分解反应谱方法显得力不从心, 时程分析方法成为抗震研究新的出路. 但结构动力时程分析计算准确/可靠与否的关键是输入地震动的确定, 虽然随着地震/强震记录的日益积累, 以及人们对地震动认识的不断深入, 但对地震这样一种复杂随机过程的确定性描述是

十分困难或者是完全不可能的,因此利用计算机数值模拟人工合成已成为时程分析计算输入地震动的一个重要补充。

文中对于重要结构或地震高危地区的结构,为获得能使结构的地震反应或结构的地震性态趋于最危险或最不利状态的地震动,基于最不利地震动的概念和最不利地震动的两个特性,通过三个要素:拟建场地天然地震动的相频特性;现行规范设计反应谱的幅频特性;拟建结构的卓越频率分量,建立了一种人工合成最不利地震动的方法,并为其编制了相应的计算程序。最后通过对某大型立交枢纽工程中的一座曲线匝道桥梁进行时程分析对比计算,例证了文中提出的人工合成最不利地震动的不利地震响应效应。

参考文献 References

- [1] 陈永祁,刘锡芸,龚思礼.拟合标准反应谱的人工地震波[J].建筑结构学报,1981(4):34-43.
CHEN Yongqi, LIU Xihui, GONG Sili. The artificial earthquake ground motions compatible with standard response spectra[J]. Journal of Building Structures, 1981(4):34-43.
- [2] 项海帆,陈国强.规范化的人工地震波[J].同济大学学报,1985(4):1-12.
XIANG Haifan, CHEN Guoqiang. Normalized synthetic accelerograms[J]. Journal of Tongji University, 1985(4):1-12.
- [3] TRIFUNAC M D. A method for synthesizing realistic strong ground motion[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1971,61(5):92-103.
- [4] 黄朝光,彭大文.人工合成地震波的研究[J].福州大学学报:自然科学版,1996,24(4):82-88.
HUANG Chaoguang, PENG Dawen. A study of artificial combination earthquake waves[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 1996,24(4):82-88.
- [5] 杨庆山,姜海鹏,陈英俊.基于相位差谱的时-频非平稳人造地震动的生成[J].地震工程与工程振动,2001,21(3):10-16.
YANG Qingshan, JIANG Haipeng, CHEN Yingjun. Generation of ground motion non-stationary both in time and frequency domains based on phase difference spectrum[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001,21(3):10-16.
- [6] 翟长海,谢礼立.抗震结构最不利设计地震动研究[J].土木工程学报,2005,38(12):51-58.
ZHAI Changhai, XIE Lili. The severest design ground motions for seismic design and analysis of structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2005,38(12):51-58.
- [7] 程伟.地震加速度反应谱拟合的直接法研究[J].工程力学,2000,17(1):83-87.
CHENG Wei. Direct method of simulating response spectrum of earthquake acceleration[J]. Engineering Mechanics, 2000,17(1):83-87.
- [8] OHSAKI Y. On the significance of phase content in earthquake of ground motions[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1979,17(5):427-439.
- [9] JTG/T B2-01-2008 公路桥梁抗震设计细则[S].北京:人民交通出版社,2008.
JTG/T B2-01-2008 Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges[S]. Beijing:China Communications Press, 2008.
- [10] CJJ 166-2011 城市桥梁抗震设计规范[S].北京:建筑工业出版社,2012.
CJJ 166-2011 Code for Seismic Design of Urban Bridges[S]. Beijing: Building Industry Press, 2012.

Synthesis of the severest ground motion

WANG Tianli, LI Qingning, GUO Xin

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech, Xi'an 710055, China)

Abstract: When time history analysis is used in seismic research, how to choose and design the adequate ground motion inputs becomes one of the extremely important issues. The paper built a new synthesizing method suitable for a very important structure or structure in seismic high-risk areas. It considered the multiple factors that are severest or most dangerous to the structure, such as the structure resonance, phase-frequency characteristic of natural earthquake record and amplitude frequency characteristic of response spectrum accorded with the current specification. Based on the model and algorithm, the severest ground motion was synthesized and its corresponding program was developed. Finally, by using a single curved ramp bridge in interchange system as the example, the validity of the new synthesizing method was verified by contrasting its response with that of other synthesizing method.

Key words: the severest ground motion; synthesizing; time-history analysis

(本文编辑 沈波)