

近断层脉冲型地震动的降维模拟^{*}

贾路¹, 阮鑫鑫², 刘章军^{2, *}

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 武汉工程大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出一种近断层脉冲型地震动模拟的降维方法, 将近断层脉冲型地震动分解为高频和低频 2 个部分: 采用谱表示与随机函数方法生成高频加速度时程, 并转化为相应的速度时程; 采用 Gabor 小波模拟低频速度脉冲时程, 将高低频的速度时程叠加得到合成的地震动速度时程, 并转化得近断层脉冲型地震动的加速度和位移时程。结果表明: 用 3 个基本随机变量模拟的近断层脉冲型地震动时程, 可以反映近断层脉冲型地震动的方向性效应、速度大脉冲等特征, 进而可为近断层区域工程结构的随机地震反应和抗震可靠度分析提供合理的输入。

关键词: 脉冲型地震动; 速度脉冲; 高频加速度; 随机过程; 降维模拟

中图分类号: P315.914

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2019)04-0516-07

0 引言

近断层地震动的形成机理较为复杂, 它强烈地依赖于断层破裂机制 (如断层破裂过程以及断层面位错的发展过程、滑动方向、滑动速度等)。近断层地震动具有明显的向前方向性效应和滑冲效应, 这 2 种效应极易使得近断层地震动出现明显的长周期大脉冲和地面永久位移现象, 且一次地震动的大部分能量都集中在单个或少数几个频率的脉冲上 (刘启方等, 2006; 贺秋梅等, 2006)。Loma Prieta 地震、Landers 地震、集集地震等的近场台站记录到了地震动中伴有明显的低频速度脉冲 (Shrivastava *et al.*, 2015)。Bertero 等 (1978) 的研究表明, 低频速度脉冲对结构设计的影响很大, 不容忽视。

虽然在过去的几十年中地震台站记录到的地震动数量持续增加, 但记录中显示脉冲特性的近断层地震动数量依然匮乏。由于对具体地震环境和场地条件的限制, 现有的近场地震动记录难以满足近场工程结构抗震分析的需求。因此, 人工模拟近断层地震动成为了研究热点 (李启成等, 2013; 魏勇等, 2018)。Menun 和 Fu (2002) 提出

用一个包含 2 段的分段函数模型来模拟速度脉冲, 这 2 段分别表示成强度调制函数与正弦函数的乘积, 限定 2 个脉冲周期以外的值取为零。Mavroeidis (2003) 提出的分段速度脉冲模型能模拟单半波、两半波、三个及以上半波的脉冲形状。田玉基等 (2007) 提出了利用单一连续函数形式来表达速度脉冲时程。上述模型是确定性方法, 操作简便, 且能较好地反映近断层脉冲型地震的基本特征, 但是其模拟结果至多具有统计平均的意义, 不具有可靠度评估的能力。鉴于此, Yang 和 Zhou (2015) 基于近断层地震动形成的物理过程, 推导并建立了一种近断层地震动功率谱模型, 通过拟合 42 条实测近断层脉冲型地震记录的平均功率谱确定了功率谱模型参数, 最后用谱表达方法生成了具有脉冲特征的非平稳加速度时程样本。由于谱表达中相位角的随机性, 相邻频率段谐波叠加可能会导致速度时程的脉冲特性减弱甚至消失 (Luco, Bazzurro, 2007; Grigoriu, 2010)。

以往的对于近断层地震动的研究大多是用确定性方法来人工合成的, 本文建立一种随机模型, 分别用含 1 个随机变量的谱表示与随机函数模拟方法来对高频分量进行降维模拟, 用含 2 个随机变量的 Gabor 小波模型对低频脉冲分量进行模拟, 最后

^{*} 收稿日期: 2019-07-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778343) .

✉ 通讯作者: 刘章军 (1973-), 教授, 博士, 研究方向为工程结构抗灾。E-mail: liuzhangjun73@aliyun.com.

叠加得降维模拟的近断层地震动，这样做能较好地复现近场地震的脉冲特性。

1 近断层脉冲型地震动的随机建模

近断层脉冲型地震动时程包含低频脉冲成分和由地面随机振动引起的高频成分。杨庆山和田玉基(2014)对11次地震动28条地震记录分析后发现近断层脉冲成分的频率一般小于1 Hz,可以分别模拟低频脉冲成分和高频成分最后叠加得到近断层脉冲型地震动。Dickinson和Gavin(2010)把近断层脉冲型地震动的高低频成分的频率分界值确定为1.5 Hz,实现了对近断层脉冲型地震动的模拟。王宇航(2015)对国内外的17次地震124条地震记录进行脉冲识别并提取出了速度脉冲,接着计算得到了速度脉冲和残余部分的功率谱,研究发现这124条地震记录的脉冲功率谱和残余部分功率谱的界限频率与脉冲周期负相关,统计得到这一负相关关系为:

$$f_r = 2/T_p \quad (1)$$

式中: f_r 表示近断层脉冲型地震动的高低频分量的频率分界值; T_p 表示脉冲周期。

并非所有近场脉冲记录的高低频率分界值都是1 Hz或者1.5 Hz,原因在于不同脉冲具有不同的周期,具有不同周期的脉冲在频域上的能量分布会有所差异。而式(1)从源头上解释了为什么近断层脉冲型地震动可以分为高低频2部分模拟。本文拟采用式(1)来确定高低频分量的频率分界值,并分别模拟高低频分量叠加合成近断层脉冲型地震动。

1.1 高频分量的降维建模

长周期脉冲分量分离后的残余高频加速度分量与远场地震动加速度时程较为相似,可以用谱表示方法对其进行模拟。刘章军等(2015)和Liu等(2016, 2018)把随机函数引入到源谱表示方法中,实现了对高频加速度分量这一随机过程的降维模拟。

高频加速度时程 a_h 可表示为:

$$a_h \approx \sum_{k=1}^N \sqrt{2S(t, \omega_k) \Delta \omega} [X_k \cos(\omega_k t) + Y_k \sin(\omega_k t)] \quad (2)$$

式中: $S(t, \omega)$ 为非平稳地震动加速度时程的双边演变功率谱; $\Delta \omega$ 为频率离散步长; N 为频域离散点数; ω_1 和 ω_u 分别是下限截止频率和上限截止频率,且有 $\Delta \omega = (\omega_u - \omega_1)/N$; $\{X_k, Y_k\}$ 为一组标准正交随机变量,应满足如下基本条件:

$$\begin{aligned} E[X_k] &= E[Y_k] = 0, E[X_k Y_l] = 0 \\ E[X_k X_l] &= E[Y_k Y_l] = \delta_{kl} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $k, l = 1, 2, \dots, N$; δ_{kl} 为 Kronecker 符号; $E[\cdot]$ 为数学期望。应用随机函数的思想,可将标准正交随机变量 $\{X_k, Y_k\}$ 表达为基本随机变量 Θ_1 的函数,即:

$$\begin{aligned} X_k &= \sqrt{2} \cos(\bar{k} \Theta_1 + \pi/4) \\ Y_k &= \sqrt{2} \sin(\bar{k} \Theta_1 + \pi/4) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\bar{k}, k = 1, 2, \dots, N$, Θ_1 为在 $(0, 2\pi)$ 上服从均匀分布的随机变量。 \bar{k} 为 k 的某种确定性映射,笔者采用 Matlab 工具箱中自带的函数 `rand('state', 0)` 和 `temp = randperm(N)` 来实现,即 \bar{k} 和 k 之间一一对应的确定性关系可表示为 $\bar{k} = \text{temp}(k)$ 。可以证明,式(4)满足标准正交随机变量的基本条件式(3)。

式(2)中的演变功率谱 $S(t, \omega)$, 可由平稳功率谱与强度调制函数得到,即:

$$S(t, \omega) = |A(t)|^2 S(\omega) \quad (5)$$

式中: $S(\omega)$ 为平稳地震动过程的功率谱密度函数; $A(t)$ 为强度调制函数。

将式(4)带入式(2)中,即可得到基于谱表示与随机函数法的高频加速度时程的模拟公式:

$$a_h \approx \sum_{k=1}^N 2\sqrt{S(t, \omega_k) \Delta \omega} \cos(\omega_k t - \bar{k} \Theta_1 - \pi/4) \quad (6)$$

值得指出的是,若用式(2)来模拟高频加速度时程这一随机过程,需要利用 Monte Carlo 模拟方法进行大量的随机抽样以获取 $2 \times N$ (N 通常大于1 000)个基本随机变量的代表性点集,并且由于 Monte Carlo 模拟方法无法在全概率信息上描述非平稳地震动随机过程的概率特性,这为复杂工程

的随机动力响应和动力可靠度的精细化分析带来了困难。而应用随机函数法的降维思想,将模拟高频加速度时程所需的随机变量的数量降低至 1 个,从而可以采用数论方法对基本随机变量选取概率信息完备的代表性点集,极大地降低了随机模拟的计算量,也为结合概率密度演化理论对复杂工程结构的随机地震反应和抗震可靠度分析奠定了基础。

1.2 低频脉冲分量的随机建模

近断层脉冲型地震动的典型特征主要包含方向性效应和滑冲效应,本文仅对其方向性效应产生的速度大脉冲进行模拟研究。

采用由 Dickinson 和 Gavin (2010) 建议的 Gabor 小波对低频脉冲速度时程 v_p 进行模拟:

$$v_p(t; V_p, T_p, T_{pk}, N_c, \varphi) = V_p \times \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} \left(\frac{t - T_{pk}}{N_c T_p} \right)^2 \right] \cos \left(2\pi \frac{t - T_{pk}}{T_p} - \varphi \right) \quad (7)$$

式中: V_p , T_p , T_{pk} , N_c 和 φ 分别表示脉冲峰值速度、脉冲周期、脉冲峰值时刻、脉冲循环数和脉冲相位角,其中, N_c 和 φ 为随机变量; T_{pk} 为高频分量速度时程的峰值时刻的均值;本文拟用地震动峰值速度 PGV 代替脉冲峰值速度 V_p ,即:

$$v_p(t; PGV, T_p, T_{pk}, N_c, \varphi) = PGV \times \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} \left(\frac{t - T_{pk}}{N_c T_p} \right)^2 \right] \cos \left(2\pi \frac{t - T_{pk}}{T_p} - \varphi \right) \quad (8)$$

已有研究 (Mavroeidis, 2003; Bray, Rodriguez, 2004; Psycharis *et al.*, 2013) 表明,这样做可以保证地震响应分析和抗震设计偏于安全;其余参数可以通过以下方法确定。

地震动峰值速度 PGV 可采用 Somerville (1997) 建议的经验公式确定:

$$\ln(PGV) = -2.31 + 1.15M_w - 0.5\ln R \quad (9)$$

式中: M_w 是断层处可能发生的矩震级; R 表示断层距。

速度脉冲周期 T_p 可采用 Somerville (2003) 建议的经验公式确定:

$$\lg T_p = -2.02 + 0.346M_w \quad (10)$$

采用 Gabor 小波对低频脉冲速度时程进行模拟。其中半波数 N_c 和相位角 φ 作为随机变量处理,该模型可以模拟不同脉冲数且脉冲峰值不等的速度脉冲,可以方便地生成特定地震动。

通过式 (4) 的引入,并采用数论方法选取基本随机变量的代表性点集,模拟高频加速度时程所需的随机变量数量由 $2 \times N$ 个降低至 1 个,极大地减少了生成代表性样本的计算量,实现了随机过程的高效降维。再加上模拟低频速度时程所需的 2 个随机变量,本文方法仅需 3 个随机变量就可对近断层脉冲型地震动进行降维模拟。

2 近断层脉冲型地震动的合成

2.1 近断层脉冲型地震动的合成方法

前面提及的 2 个随机模型分别模拟的是近断层脉冲型地震动的高频加速度时程和低频速度时程,首先需要将降维模拟的高频加速度时程转化为对应的速度时程。假定在 t_i 到 t_{i+1} 的时间间隔内,近断层地震动加速度为 $[a(t_i) + a(t_{i+1})]/2$,对降维模拟的近断层地震动高频加速度时程 $a_h(t)$ 进行积分得到高频速度时程 $v_h(t)$ 。然后利用残余速度峰值 v_{res} 对 $v_h(t)$ 进行调幅得到标准化的高频速度时程 (Dickinson, Gavin, 2010):

$$v_s(t) = v_h(t) \frac{v_{res}}{\max |v_h(t)|} \quad (11)$$

式中: $v_{res} = 0.509 \times PGV$ (Yang, Zhou, 2015) 是对实测地震动记录进行脉冲识别并提取后的残余速度峰值。

由标准化高频速度时程 $v_s(t)$ 与低频速度脉冲时程 $v_p(t)$ 进行叠加得到降维模拟的近断层脉冲型地震动速度时程:

$$v(t) = v_h(t) + v_p(t) \quad (12)$$

同理,在 Δt 的时间间隔内,假定近断层地震动速度线性变化,对合成的近断层脉冲型地震动速度时程 $v(t)$ 进行微分得到降维模拟的近断层脉冲型地震动的加速度时程 $a(t)$;同样可以对降维模拟的近

断层脉冲型地震动速度时程 $v(t)$ 积分得到降维模拟的近断层脉冲型地震动的位移时程 $u(t)$ 。

2.2 算法步骤

近断层脉冲型地震动的随机模拟可以分解为高频分量和低频分量 2 个随机过程的模拟，其中高频分量采用含 1 个基本随机变量的谱表示与随机函数方法来模拟，低频分量采用含 2 个基本随机变量的 Gabor 小波来模拟。

首先，利用数论方法（Li, Chen, 2007）在区间上均匀分布的三维空间选取一组含有 n_{sel} 个点的代表性点集 $\{\theta_{1,m}, \theta_{2,m}, \theta_{3,m}\}_{m=1}^{n_{\text{sel}}}$ ，每一个代表性点的赋得概率 $P_m = 1/n_{\text{sel}}$ 。其次，将第一维度的点集 $\{\theta_{1,m}\}_{m=1}^{n_{\text{sel}}}$ 一一映射到区间 $(0, 2\pi)$ 上，得到基本随机变量 Θ 的代表性点集。同时，利用等概率反变换方法将第二维度的点集 $\{\theta_{2,m}\}_{m=1}^{n_{\text{sel}}}$ 和第三维度的点集 $\{\theta_{3,m}\}_{m=1}^{n_{\text{sel}}}$ 分别映射到指定的对数正态分布和正态分布（Yang, Zhou, 2015），得到基本随机变量 N_c 和 φ 的代表性点集。因此，三维随机变量 $\{\Theta, N_c, \varphi\}$ 的代表性点集就可以唯一确定，每个代表性点的赋得概率仍为 P_m 。最后，选取基本随机变量 Θ 的代表性点集用于生成近断层脉冲型地震动高频加速度时程集合，取基本随机变量 N_c 和 φ 的代表性点集用于生成近断层脉冲型地震动低频速度脉冲时程集合。从而，可生成近断层脉冲型地震动加速度、速度和位移时程。

需要指出的是，利用数论方法选出 3 个基本随机变量的代表性点集，使其具有赋得概率 P_m ，且所有代表性点构成了完备的概率集合，便于在进一步的研究中结合概率密度演化理论（Li, Chen, 2006）对结构的动力反应及抗震可靠度进行分析。

3 数值算例

3.1 模型参数

假设断层所在场地为第 II 类场地，选用第一组设计地震参数。假设断层处可能发生 $M_w 7.0$ 地震，工程场址的断层距 $R = 40$ km；根据式（9）和式（10）分别计算得到 $PGV = 49.18$ cm/s， $T_p = 2.52$ s。

对于近断层地震动高频加速度过程对应的平稳功率谱密度函数 $S(\omega)$ ，本文采用 Clough - Penzien 谱，即

$$S(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \times \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_f^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \times S_0 \quad (13)$$

式中： ω_g 和 ζ_g 分别是场地土的卓越圆频率和阻尼比； ω_f 和 ζ_f 分别是基岩的卓越圆频率和阻尼比； S_0 表示谱强度因子：

$$S_0 = \frac{\bar{a}_{\max}^2}{r^2 \pi \omega_g \left(2\zeta_g + \frac{1}{2\zeta_g} \right)} \quad (14)$$

式中： \bar{a}_{\max} 是地震动峰值加速度的均值，根据地震动的能量衰减关系（张齐等，2013），本文取为 240 cm/s²； r 是峰值因子。因为近断层脉冲型地震动具有脉冲幅值大、持时短的特点，本文采用欧进萍和王光远（1998）提出的强度包络函数：

$$A(t) = \left[\frac{t}{c} \exp \left(1 - \frac{t}{c} \right) \right]^d; \quad c > 0, d \geq 1 \quad (15)$$

式中：参数 c 是控制地震动加速度的到达时刻，参数 d 是控制强度包络函数 $A(t)$ 形状的参数，取 Liu 等（2018）的建议值。

高频分量的计算参数及其取值见表 1，低频脉冲分量随机建模的统计参数见表 2。

表 1 高频分量参数

Tab. 1 Parameters of high-frequency component

参数	取值	参数	取值
频率离散点数 N	1 600	地震动峰值加速度 \bar{a}_{\max}	240 cm/s ²
上截止频率 ω_u	50π rad/s	峰值因子 r	3
下截止频率 ω_l	1.6π rad/s	场地土的卓越圆频率 ω_g	17.95 rad/s
频率离散步长 $\Delta\omega$	0.095 rad/s	场地土的阻尼比 ζ_g	0.72
高低频分界值 f_c	0.8 Hz	基岩的卓越圆频率 ω_f	1.795 rad/s
地震动持时 T	30 s	基岩的阻尼比 ζ_f	0.72
时间步长 Δt	0.02 s	峰值时刻 c	5.5 s
样本数量 n_{sel}	185	形状参数 d	1.8

表 2 低频脉冲分量随机参数

Tab. 2 Random parameters of low-frequency pulse component

参数	分布类型	均值	标准差
N_c	对数正态分布	0.02	0.3
φ	正态分布	3.04	1.70

3.2 结果分析

图 1a 为本文方法生成的 185 条代表性样本的高频加速度时程。由图可知,生成的代表性样本时程曲线具有地震动加速度时程的非平稳特性。图 1b 为本文方法生成的代表性样本的低频速度时程。从图中可以看出,本文方法模拟的是单一成分的速度脉冲。

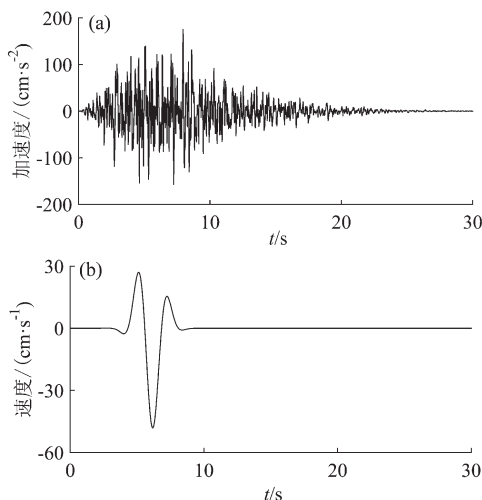


图 1 高频加速度(a)、低频速度(b)代表性时程
Fig. 1 Representative time-series of high-frequency acceleration(a) and low-frequency velocity(b)

图 2 为对随机变量进行标准化处理后生成的 185 条代表性样本的高频加速度时程集合的均值、标准差和目标值。均值相对误差为 7.6×10^{-10} , 标准差相对误差为 4.2%, 均小于误差限值 5%, 满足误差要求。其中, 均值误差无限趋近于零, 可以将模拟值近似看作是一个零均值的随机过程。

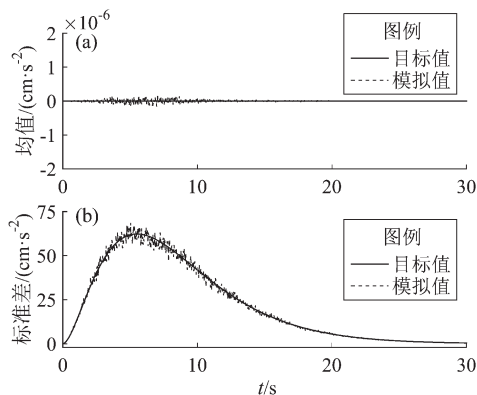


图 2 高频加速度时程的均值(a)和标准差(b)
Fig. 2 Mean and standard deviation of high-frequency acceleration time-series

图 3 为 185 条代表性样本的低频速度时程集合的均值、标准差和目标值。可以看出,模拟值与目标值拟合较好,这证明了本文降维模拟方法的正确性。

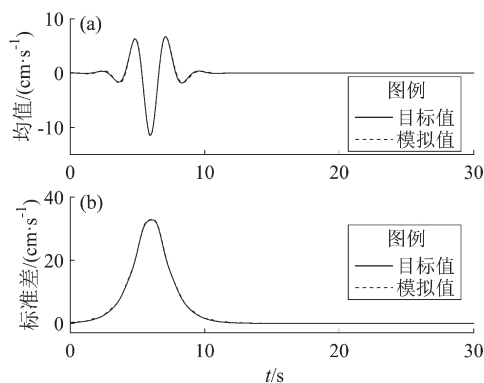


图 3 低频速度时程的均值(a)和标准差(b)
Fig. 3 Mean(a) and standard(b) deviation of low-frequency velocity time-series

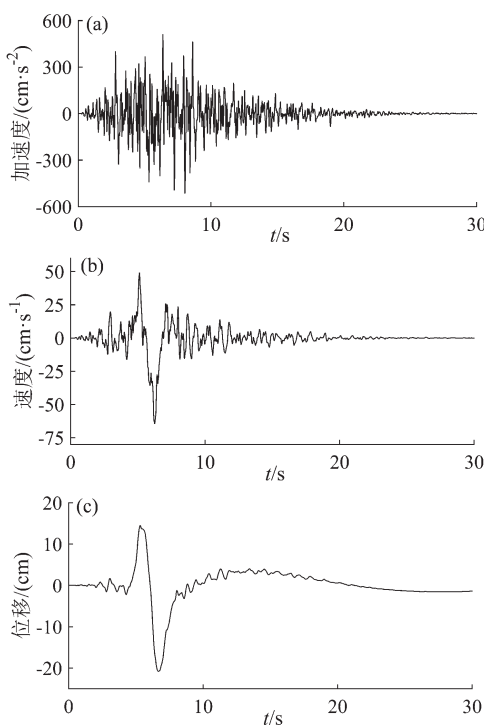


图 4 降维模拟加速度(a)、速度(b)、位移(c)代表性时程
Fig. 4 Acceleration, velocity and displacement Representative time-series by dimension reduction simulation

图 4 为本文方法降维模拟的近断层脉冲型地震动时程,图 4a 是降维模拟的加速度代表性时程,体

现出了近断层脉冲型地震动明显的强度非平稳特性和脉冲特性;图4b是降维模拟的速度代表性时程,表现为少数时间节点上的速度跳跃性,更为明显地体现出了降维模拟的近断层脉冲型地震动的速度大脉冲特性和向前方向性效应;图4c是降维模拟的位移代表性时程,同样体现出了该类地震动的脉冲特性。

4 结论

本文提出了一种参数化的近断层脉冲型地震动模拟的降维方法,将地震动分成高频分量和低频分量2部分模拟。高频分量的模拟中,采用了谱表示与随机函数方法,极大地降低了随机过程的随机度,提高了模拟效率;低频分量的模拟中,采用了Gabor小波模型对低频脉冲速度时程进行模拟,其中半波数 N_c 和相位角 φ 作为随机变量处理,该模型可以模拟不同脉冲数且脉冲峰值不等的速度脉冲。本文方法的高低频模型中都引入了随机参数,可以方便地模拟生成不同地震环境和不同场地条件下的近断层脉冲型地震动。

本文方法合成的地震动包含了近断层地震动的主要特征,如向前方向性效应,速度大脉冲等。通过分别模拟高频和低频时程然后叠加合成近断层脉冲型地震动时程,可以方便地为近断层地区的工程结构随机地震反应分析和抗震设防研究提供合理的地震动输入。

本文在撰写过程中得到三峡大学张齐博士及大连理工大学陈国海博士后的帮助,在此向他们表示感谢。

参考文献:

- 贺秋梅,闫维明,董娣,等. 2006. 震源机制和场地条件对近场强震地面运动特性的影响[J]. 地震研究,29(3):256-263.
- 李启成,杜玉春,严冬冬,等. 2013. 基于改进的经验格林函数方法的地震动模拟[J]. 地震研究,36(1):74-80.
- 刘启方,袁一凡,金星,等. 2006. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动,26(1):1-10.
- 刘章军,曾波,吴林强. 2015. 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,28(3):411-417.
- 欧进萍,王光远. 1998. 结构随机振动[M]. 北京:高等教育出版社.
- 田玉基,杨庆山,卢明奇. 2007. 近断层脉冲型地震动的模拟方法[J]. 地震学报,29(1):77-84.
- 王宇航. 2015. 近断层区域划分及近断层速度脉冲型地震动模拟[D]. 成都:西南交通大学.
- 魏勇,崔建文,王秋良,等. 2018. 基于合成地震动的2014年鲁甸 $M_s6.5$ 地震场地效应分析[J]. 地震研究,41(1):32-37.
- 杨庆山,田玉基. 2014. 地震地面运动及其人工合成[M]. 北京:科学出版社.
- 张齐,胡进军,谢礼立,等. 2013. 中国西部地区新一代地震动衰减模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),46(12):1079-1088.
- Bertero V V, Mahin S A, Herrera R A. 1978. Aseismic design implications of near-fault san fernando earthquake records[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,6(1):31-42.
- Bray J D, Rodriguez M A. 2004. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering,24(11):815-828.
- Dickinson B W, Gavin H P. 2010. Parametric statistical generalization of uniform-hazard earthquake ground motions[J]. Journal of Structural Engineering,137(3):410-422.
- Grigoriu M. 2010. To scale or not to scale seismic ground-acceleration records[J]. Journal of Engineering Mechanics,137(4):284-293.
- Li J, Chen J B. 2006. The probability density evolution method for dynamic response analysis of non-linear stochastic structures[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,65(6):882-903.
- Li J, Chen J B. 2007. The number theoretical method in response analysis of nonlinear stochastic structures[J]. Computational Mechanics,39(6):693-708.
- Liu Z J, Liu W, Peng Y B. 2016. Random function based spectral representation of stationary and non-stationary stochastic processes[J]. Probabilistic Engineering Mechanics,45:115-126.
- Liu Z J, Liu Z X, Chen D H. 2018. Probability density evolution of nonlinear concrete gravity dam subjected to non-stationary seismic ground motion[J]. Journal of Engineering Mechanics,144(1):04017157.
- Luco N, Bazzurro P. 2007. Does amplitude scaling of ground motion records result in biased nonlinear drift responses? [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,36(13):1813-1835.
- Mavroeidis G P. 2003. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,93(3):1099-1131.
- Menun C, Fu Q. 2002. An analytical model for near-fault ground motions and the response of SDOF systems[C]. London: The 12th European Conference of Earthquake Engineering.
- Psycharis I N, Fragiadakis M, Stefanou I. 2013. Seismic reliability assessment of classical columns subjected to near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,42(14):2061-2079.
- Shrivastava H, Ramana G V, Nagpal A K. 2015. Simulation of near fault

- ground motion in Delhi region[C]. Advances in Structural Engineering, New Delhi, 779 – 788.
- Somerville P G. 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity[J]. Seismological Research Letters, 68 (1) : 199 – 222.
- Somerville P G. 2003. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 137 (1 – 4) : 201 – 212.
- Yang D X, Zhou J L. 2015. A stochastic model and synthesis for near – fault impulsive ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 44 (2) : 243 – 264.

Dimension Reduction Simulation for Near – field Fault Pulse – like Ground Motion

JIA Lu¹, RUAN Xinxin², LIU Zhangjun²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

(2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract

A dimension reduction method for the simulation of near – field fault pulse – like ground motions is proposed. The near – field fault pulse – like ground motions are decomposed into two parts, including high – frequency component and low – frequency component. The spectral representation – random function method is used to generate the time – series of high – frequency acceleration, which is then converted to the corresponding velocity time – series. The Gabor wavelet is used to simulate the time – series of low – frequency velocity pulse. And the time – series of high and low frequency velocity are superposed to get the synthetic velocity time – series of ground motion, which are then transformed to obtain the acceleration, displacement time – series of near – field fault pulse – like ground motion. The calculating example shows that the time – series simulated by this method with only three basic random variables can reflect the characteristics of the near – fault pulse – like ground motion, such as directivity effect and large velocity pulse, and thus can provide reasonable input for the random seismic response and aseismic reliability analysis of engineering structures in the near – field fault region.

Keywords: pulse – like ground motion; velocity pulse; high – frequency acceleration; random process; dimension reduction simulation