

文章编号: 0253-3782(2007)01-0077-08

# 近断层脉冲型地震动的模拟方法<sup>\*</sup>

田玉基<sup>\*</sup> 杨庆山 卢明奇

(中国北京 100044 北京交通大学土木与建筑工程学院)

**摘要** 近断层地震动的向前方向性效应和永久地面位移效应导致其速度时程表现为长周期、大峰值的速度脉冲,其位移时程表现为阶跃型脉冲.针对这些特点,同时考虑向前方向性效应和永久地面位移效应,提出了一种简单的、连续函数形式表达的等效速度脉冲模型.在该模型中,包含描述速度脉冲周期、峰值和形状的 5 个待定参数,方便了实际脉冲型地震记录的拟合及模拟.等效速度脉冲模型只包含单一的频率成分,不能反映脉冲型地震记录的高频成分.根据对 11 次地震 28 条地震记录的分析,速度脉冲的频率一般小于 1Hz.因此,在模拟脉冲型地震记录的方法中,分别模拟低频脉冲成分和高频成分,并将两者叠加生成近断层脉冲型地震动的模拟时程.

**关键词** 脉冲型地震动 等效速度脉冲 低频时程分量 高频时程分量

**中图分类号**: P315.9 **文献标识码**: A

## 引言

随着我国经济建设的逐步发展和综合国力的增强,在地震断裂带附近或者穿越断裂带修建大跨桥梁、输油管线、大坝等生命线工程的可能性越来越大;另外,在近断层地区,采用减震、耗能等措施已经修建了一些体育场馆以及多层、中高层民用建筑.在近断层地区,地震地面运动的特点与远场地面运动的特点存在比较显著的差别,因而了解、掌握这些差别对于近断层地区的结构抗震设计具有十分重大的意义.

大量的地震动观测资料(例如 Landers 地震、Northridge 地震、Kobe 地震、Chi-Chi 地震、Turkey 地震等)表明,近断层地区的地震地面运动明显不同于远离震源地区的地震地面运动.在近断层地区内,地面运动有两个重要特征:一是由断裂机制和断裂扩散方向决定的向前方向性效应和向后方向性效应;另一个是沿断层滑移方向引起的永久地面位移效应.

向前方向性效应引起的地面运动是一个双侧往复形式的动力振动过程,其速度时程表现为大幅值、长周期、短持时的强脉冲形式.这是近断层地面运动与远场地面运动最大的区别,也导致了近断层脉冲型地面运动的反应谱与远场地面运动反应谱之间存在着比较显著的差别.近断层脉冲型地面运动对中、长周期结构(例如大跨桥梁、减震结构、隔震结构等)可能会产生比较大的破坏.永久地面位移是由断层滑移造成的不可恢复的地面位移,其速度时程表现为单侧或者偏向单侧的脉冲形式,其位移时程表现为单侧阶跃型脉冲.一

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(50478063)资助.  
2006-05-12 收到初稿,2006-12-01 决定采用修改稿.  
<sup>†</sup> 通讯作者. e-mail: xiaotian1967@sina.com

般认为,永久地面位移运动是一个拟静力变形过程,其频率比向前方向性脉冲的频率要小得多;对1999年台湾Chi-Chi地震的震害调查结果表明,近断层地区有些大跨桥梁的破坏是由于永久地面位移的空间变异性引起的(Yen, 2002).

近年来,近断层地震动的脉冲效应引起了各国学者的广泛关注和重视,但由于实际的脉冲型地震记录数量有限以及对工程结构分析的需要,有必要建立一套针对工程设计人员的近断层脉冲型地震动的模拟方法,以便快速地得到能够应用于工程结构时程分析的脉冲型时程.

欲采用数学模型描述近断层脉冲型地震动的速度脉冲,需找到速度脉冲的周期、幅值、形状等参数与震级、断层距(震中距)、场地类别之间的关系.随着近断层脉冲型地震记录的逐渐增多(Abrahamson, 2000),许多地震工程研究者利用不同的地震记录给出了速度脉冲的周期(Bray, Rodriguez-Marek, 2004; Somerville, 2003; Mavroeidis, Papageorgiou, 2003; Alavi, Krawinkler, 2000)、峰值(Bray, Rodriguez-Marek, 2004; Alavi, Krawinkler, 2000; Somerville, 1998)的统计回归关系,为速度脉冲的模拟奠定了基础.对于速度脉冲的形状参数,目前还很难从已有的地震记录中得出统计公式,只能根据具体的脉冲型记录或工程需要确定其取值.

在近断层脉冲型地震动模拟方面,国外学者提出了多种脉冲型函数来模拟速度时程(Makris, Black, 2003; Mavroeidis, Papageorgiou, 2003; Menun, Fu, 2002; Alavi, Krawinkler, 2000),并利用这些等效脉冲模型研究工程结构的响应特点.在这几种速度脉冲模型中,有的只采用了脉冲周期和速度峰值两个参数,有的模型则考虑了脉冲的形状调整参数;在函数形式方面,一般采用分段函数表达速度时程.

已有等效速度脉冲模型采用分段函数表示等效速度时程,给实际脉冲型速度时程的曲线拟合带来极大的不便;另外,有的等效脉冲模型形状单一,不能模拟某些特殊形状的实际脉冲记录.针对这些问题,本文提出了一种采用单一连续函数形式表示脉冲型速度时程的模拟公式.为了描述速度脉冲的周期、峰值和形状,模拟公式中采用了具有明确意义的5个待定参数.

等效速度脉冲的频率成分比较单一,而实际脉冲型地震记录包含多种频率成分.因此,本文在模拟近断层脉冲型地震动时程过程中,分别模拟低频脉冲分量 and 高频分量,然后将两个分量叠加在一起得到近断层地震动的模拟时程.

## 1 等效速度脉冲的模拟方法

### 1.1 等效速度脉冲模型

如果采用连续的单一函数形式表达速度时程,将极大地方便速度脉冲的曲线拟合及其参数的确定.由随机振动理论可知,非平稳过程可以采用平稳过程乘以包络函数的方法得到.类似于此,本文提出如下形式的等效速度脉冲模型:

$$v(t) = v_p \cdot \omega(t) \cdot \cos[2\pi f_p(t - t_1)] \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

式中,  $v_p$  是速度脉冲的峰值,  $f_p$  是速度脉冲的频率(速度脉冲的周期是  $T_p = 1/f_p$ ),  $(-2\pi f_p t_1)$  是速度脉冲的相位角,  $T$  是速度时程的持续时间,速度时程的包络函数  $\omega(t)$  按下式取值:

$$\omega(t) = \exp\left[-\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right)^2\right] \quad (2)$$

式中,  $t_0$  是包络函数的峰值发生时刻,  $\gamma$  表示峰值衰减速率. 图 1 给出了不同  $\gamma$  值对应的包络函数的形状.

式(1)中, 速度脉冲的周期、峰值可按照已有的统计回归公式确定其取值. 其中脉冲周期可按照 Bray, Rodriguez-Marek (2004)、Somerville (2003)、Mavroeidis, Papageorgiou (2003)、Alavi, Krawinkler (2000)取值; 脉冲峰值可按照 Bray and Rodriguez-Marek (2004)、Somerville (1998)、Alavi, Krawinkler (2000)取值.

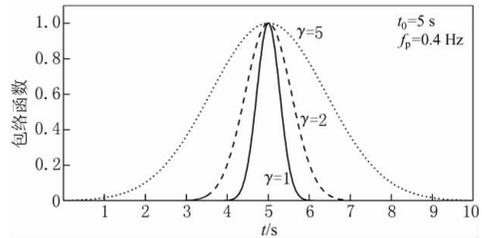


图 1 等效速度脉冲时程的包络函数

式(2)中, 包络函数  $\omega(t)$  以  $t = t_0$  为对称轴, 向两侧对称衰减; 当  $t = t_0$  时, 包络函数达到峰值 1.0. 式(1)中, 余弦函数的对称轴是  $t = t_1$ ,  $t_1 \pm T_p/2$ ,  $t_1 \pm T_p$ ,  $\dots$ , 余弦函数的反对称轴是  $t = t_1 \pm T_p/4$ ,  $t_1 \pm 3T_p/4$ ,  $\dots$ . 因此, 当  $t_0 = t_1$ ,  $t_1 \pm T_p/2$  时, 脉冲形状以  $t = t_0$  为对称轴, 速度脉冲的最大值是  $v_p$ ; 当  $t_0 = t_1 \pm T_p/4$ ,  $t_1 \pm 3T_p/4$  时, 脉冲形状以  $t = t_0$  为反对称轴, 速度脉冲的最大值小于  $v_p$ ; 当  $t_0$  与  $t_1$  具有其它关系时, 脉冲形状没有对称轴, 速度脉冲的最大值小于  $v_p$ . 因此, 适当确定  $t_0$  和  $t_1$  的关系, 可模拟对称形状、反对称形状以及非对称形状的脉冲; 适当确定  $\gamma$  的取值, 可得到不同半波个数的脉冲. 由此可知, 式(1)可以模拟多种形状的脉冲, 并且适用性广泛. 参数  $\gamma$ ,  $t_0$  和  $t_1$  均对脉冲的形状具有控制作用. 其中参数  $t_0$  确定脉冲发生的中心时刻,  $\gamma$  确定脉冲发生的时间范围,  $t_1$  与  $t_0$  之间的差值控制脉冲的半波个数以及脉冲幅值.

在式(1)中, 假设  $f_p = 0.4$  Hz、 $v_p = 1$  cm/s、 $t_0 = 5$  s. 图 2 给出了  $\gamma = 1, 2, 5, 10$ ;  $t_0 = 5, 5.2, 5.5, 6$  s 和  $6.2$  s 共 20 种情况下的等效速度脉冲的形状. 可以看出, 式(1)可以模拟多种波形的脉冲. 图 2 中, 双侧往复振动的速度脉冲反映了向前方向性效应; 单侧或偏于单侧振动的速度脉冲(对应的位移时程是单侧阶跃形状)则同时反映了向前方向性效应和永久地面位移效应.

## 1.2 速度脉冲时程的曲线拟合

利用式(1)所示的等效脉冲模型对实际的脉冲型地震记录的速度时程进行曲线拟合, 不仅可以确定实际地震记录的脉冲周期、峰值、形状参数, 而且可以检验等效脉冲模型的合理性和有效性. 本文采用多元非线性最小二乘拟合方法, 对实际的速度脉冲记录进行曲线拟合.

本文拟合了 11 次地震、28 个速度脉冲型记录(表 1)的速度时程, 确定了这些速度脉冲的周期、峰值和形状参数, 验证了本文提出的等效速度脉冲可模拟多种形状的速度脉冲. 从速度脉冲的拟合结果可知, 本文提出的等效脉冲模型能够很好地反映速度时程、位移时程中的脉冲特性, 能够很方便地确定脉冲模型的周期、峰值和形状参数; 等效脉冲的速度反应谱和位移反应谱与实际地震记录的速度反应谱和位移反应谱的形状相似甚至重合, 拟合速度脉冲的速度反应谱与实际记录的速度反应谱的相关系数绝大部分大于 0.7, 有的记录甚至达到 0.98 以上, 速度反应谱的峰值也大致相等.

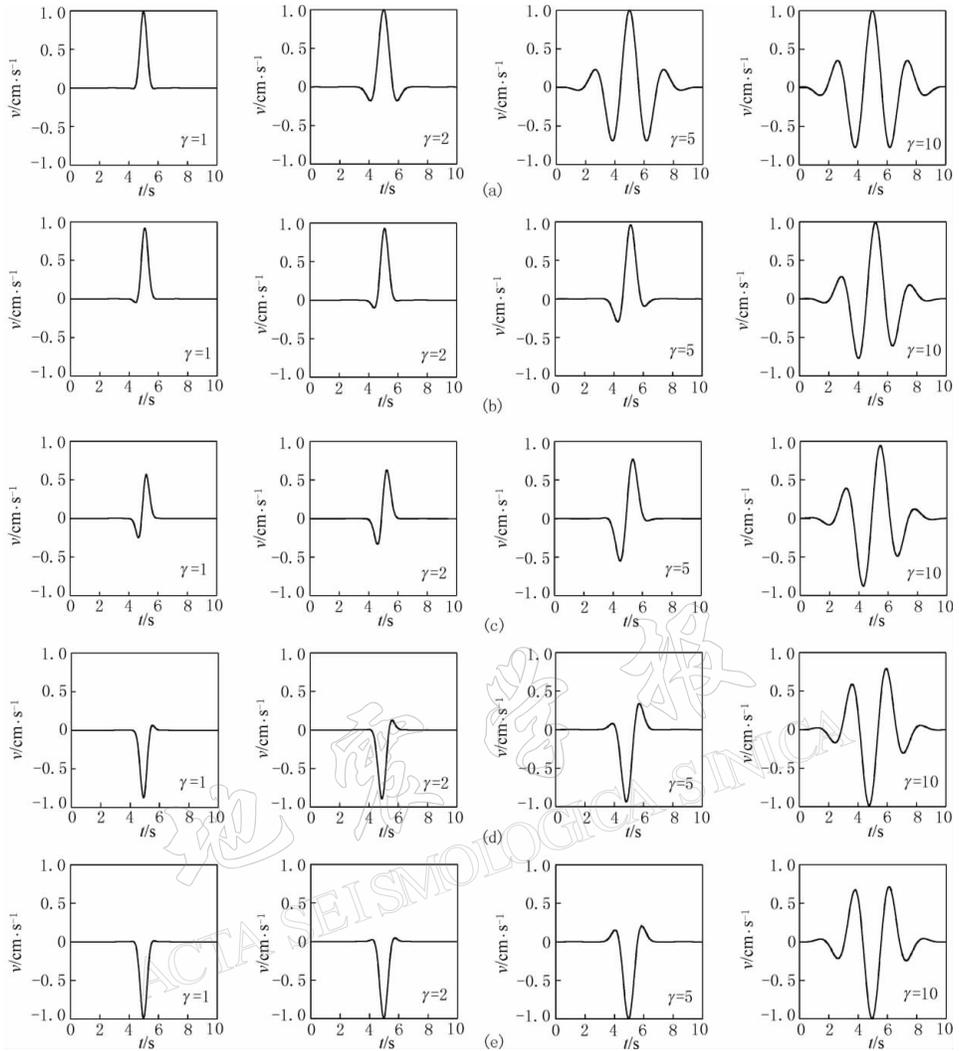


图 2 等效速度脉冲时程的部分形状

(a)  $t_1=5$  s, (b)  $t_1=5.2$  s, (c)  $t_1=5.5$  s, (d)  $t_1=6.2$  s; (e)  $t_1=6.2$  s

表 1 11 次地震 28 个脉冲型地震记录的名称

序号	地震名称	记录名称	序号	地震名称	记录名称
1	Chi-Chi 1999	CHY101-N, TCU052-N, TCU052-W, TCU068-N, TCU075-W	7	Northridge 1994	JEN022, NWH360, RRS228, SCE018, SCS142, SKR090, SPV270, SYL360
2	Kocaeli, Turkey 1999	DZC270, GBZ000	8	Superstitt Hills(B)1987	B-PTS225
3	Kobe 1995	TAK000, TAZ000, TAZ090	9	Imperial Valley 1979	HE05230, HE06230, HE07230
4	Erzincan, Turkey 1992	ERZ-NS	10	Iran 1978	TAB-LN, TAB-TR
5	Landers 1992	LCN275	11	San Fernando 1971	PCD164
6	Loma Prieta 1989	LGP000			

注: Landers/LCN275 地震波数据引自 <http://db.cosmos-eq.org>, 其它地震波数据均引自 <http://peer.berkeley.edu>.

等效脉冲模型的频率成分比较单一, 不能反映地震记录中的高频成分. 因此, 由拟合速度时程求导数得到的加速度时程不能反映地震加速度记录的特性, 其加速度反应谱的高频区域不能与地震记录的加速度反应谱的高频区域相吻合, 但其加速度反应谱的低频区域能够与地震记录的加速度反应谱的低频区域相吻合.

实际的近断层脉冲型地震记录可能含有不同周期的两个或两个以上速度脉冲, 这种情况下可以分别对每个速度脉冲进行拟合, 然后将拟合结果相加, 得到最终拟合结果(例如 Northridge/NWH360, SCE018, SCS142, Chi-Chi/TCU052-N, TCU052-W).

## 2 近断层脉冲型地震动的模拟方法

从 28 个速度脉冲型地震记录的拟合结果可以看出, 绝大多数速度脉冲的周期大于 1 s, 即速度脉冲是小于 1 Hz 的低频成分; 等效脉冲的加速度反应谱在短周期区域不能与实际地震记录的加速度反应谱相符合. 针对这种情况, 在模拟近断层脉冲型地震动加速度时程时, 可将小于 1 Hz 的低频脉冲成分与大于 1 Hz 的高频成分分开模拟, 然后将二者叠加在一起, 生成包含多种频率成分并且能够反映近断层脉冲型地震动特点的时程.

本文提出的近断层脉冲型地震动时程的模拟方法如下:

1) 高频时程分量的模拟. 根据潜在的矩震级  $M_w$  和场地条件, 按照 Boore (2003) 或者 Thráinsson 和 Kiremidjian (2002) 等方法模拟大于 1 Hz 频率成分的加速度时程. 此时, 在模拟时程的傅里叶幅值谱中, 频率小于 1 Hz 的幅值设定为零.

2) 低频脉冲型速度时程的模拟. 根据脉冲周期的统计公式确定脉冲周期  $T_p$ ; 根据脉冲峰值的统计回归公式确定脉冲峰值  $v_p$ ; 根据具体的脉冲型记录确定式(1)中的 3 个形状参数  $\gamma$ ,  $t_0$  和  $t_1$  的取值, 或者根据工程需要人为确定其取值. 由式(1)可生成等效速度脉冲时程, 对等效速度时程求导数得到等效加速度时程.

3) 低频脉冲时程的平移. 实际地震动的各频率成分的传播速度是不相同的. 由于在近断层地区, 传播距离短, 高频成分与低频成分到达工程场址的时间差很小, 因此本文近似认为低频脉冲加速度峰值的到达时刻与高频加速度峰值的到达时刻相同. 根据这一假设, 在时间轴上平行移动低频加速度时程, 使得高频时程的峰值时刻与低频加速度时程的峰值时刻相重合. 假定高频加速度时程的峰值时刻为  $t_h$ , 低频加速度时程的峰值时刻是  $t_l$ , 则速度脉冲的形状参数  $t_0$  和  $t_1$  更新为  $t_0 + t_h - t_l$  和  $t_1 + t_h - t_l$ , 速度脉冲的其它 3 个参数  $f_p$ ,  $v_p$  和  $\gamma$  不变, 重新生成速度脉冲时程及加速度时程.

4) 高频时程与低频时程叠加. 将第 1 步、第 3 步得到的高频加速度时程、低频加速度时程叠加在一起, 得到近断层脉冲型地震动的加速度模拟时程.

## 3 数值算例

假设断层的潜在矩震级是  $M_w 7.0$ , 工程场址的震中距是 5 km, 场地土质是软土. 试模拟该场址的脉冲型地震动加速度时程.

假设地面运动加速度的功率谱密度函数采用 Clough-Penzien 谱(Clough, Penzien, 1993), 即

$$S(\omega) = S_0 \frac{1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} \frac{(\omega/\omega_f)^4}{[1 - (\omega/\omega_f)^2]^2 + 4\xi_f^2(\omega/\omega_f)^2} \quad (3)$$

式中,  $S_0$  是由加速度强度确定的常数;  $\omega_g$  和  $\zeta_g$  分别是单自由度土体的自振圆频率和阻尼比;  $\omega_f$  和  $\zeta_f$  是滤波参数. 软土地场情况下,  $S_0 = 0.018 \text{ m}^2/\text{s}^3$ ;  $\omega_g = 2.4\pi \text{ rad/s}$  和  $\zeta_g = 0.85$ ;  $\omega_f = 0.24\pi \text{ rad/s}$ ,  $\zeta_f = 0.85$ . 当  $\omega \leq 2\pi \text{ rad/s}$  时, 取  $S(\omega) = 0$ . 高频成分的相位谱由 Thráinsson, Kiremidjian (2002) 提出的相位差谱模型得到. 高频成分的加速度模拟时程及速度时程如图 3 所示.

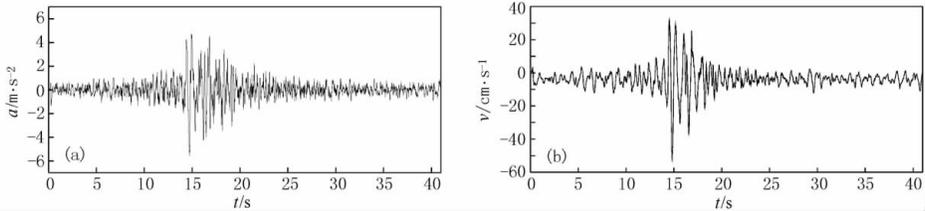


图 3 高频成分速度时程及加速度时程模拟. (a) 加速度时程; (b) 速度时程

根据 Mavroudis, Papageorgiou (2003) 提出的速度脉冲周期的统计公式, 得到速度脉冲的周期  $T_p = 4 \text{ s}$ , 频率  $f_p = 0.25 \text{ Hz}$ ; 根据 Somerville (1998) 的速度脉冲峰值的统计公式, 得到速度脉冲的峰值  $v_p = 139 \text{ cm/s}$ ; 选择  $\gamma = 2$ ,  $t_0 = 10 \text{ s}$ ,  $t_1 = 11.6 \text{ s}$ ; 将上述参数代入式(1), 得到低频速度脉冲时程及加速度时程, 如图 4 所示.

低频加速度时程的峰值时刻是  $10.34 \text{ s}$ , 高频加速度时程的峰值时刻是  $14.74 \text{ s}$ . 因此, 将低频加速度时程平移  $14.74 - 10.34 = 4.4 \text{ s}$ , 低频脉冲时程的  $t_0$  和  $t_1$  更新为  $t_0 = 10 + 4.4 = 14.4 \text{ s}$ ,  $t_1 = 11.6 + 4.4 = 16 \text{ s}$ ; 重新生成低频脉冲速度时程及加速度时程, 并且与高频速度时程、加速度时程相加得到模拟加速度时程及速度时程, 如图 5 所示.

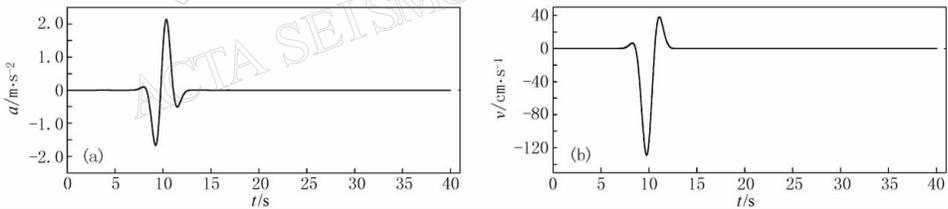


图 4 低频速度脉冲时程及加速度时程模拟. (a) 加速度时程; (b) 速度时程

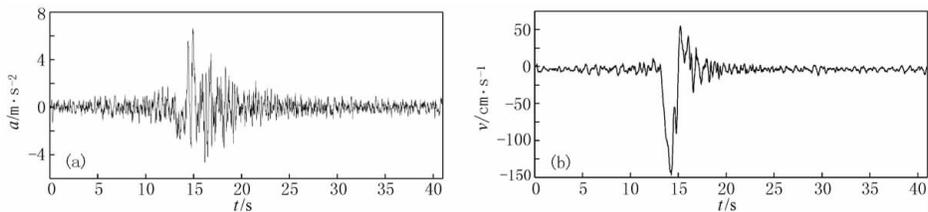


图 5 速度时程及加速度时程模拟. (a) 加速度时程; (b) 速度时程

## 4 结论

近断层脉冲型地震动与远场地震动相比较具有两个明显的特点: 其一是速度时程包含长周期、大峰值的向前方向性脉冲; 其二是位移时程中可能包含永久地面位移引起的阶跃

型脉冲. 在已有脉冲型地震记录参数统计结果和等效速度脉冲模型的基础上, 同时考虑向前方向性脉冲和阶跃型脉冲, 本文提出了采用单一函数形式表达的等效速度脉冲模型. 在该模型中, 包含描述速度脉冲周期、峰值和形状的 5 个待定参数; 模拟公式采用包络函数与余弦函数乘积的形式, 其中调整包络函数中的参数可确定脉冲的发生时刻和结束时刻; 这一模拟公式大大方便了实际脉冲型地震记录速度时程的拟合, 根据拟合结果可得到速度脉冲的周期、峰值等参数. 实际脉冲型地震记录的拟合结果表明, 速度时程、位移时程、速度反应谱和位移反应谱能够较好地与实际地震记录相符合; 由于等效速度脉冲只包含单一的频率成分, 故加速度时程和加速度反应谱的拟合结果与实际记录相差较大.

等效速度脉冲模型只包含单一的频率成分, 不能完全反映脉冲型地震记录的高频成分. 本文提出的模拟脉冲型地震动方法中, 将低频脉冲成分和高频成分分开模拟, 然后将速度脉冲模拟时程求导数得到脉冲加速度时程. 根据高频加速度模拟时程的峰值发生时刻, 对脉冲加速度时程进行时间平移, 并将高频加速度时程和低频脉冲加速度时程进行叠加, 生成近断层脉冲型地震动的模拟时程.

### 参 考 文 献

- Abrahamson N. 2000. Near-fault ground motions from the 1999 Chi-Chi earthquake[R]//*US Japan Workshop on the Effects of Near-Field Earthquake Shaking*. San Francisco, California; Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2002/02; 11-14.
- Alavi B, Krawinkler H. 2000. Design considerations for near-fault ground motions[R]//*US Japan Workshop on the Effects of Near-Field Earthquake Shaking*. San Francisco, California; Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2002/02; 55-63.
- Boore D M. 2003. Simulation of ground motion using the stochastic method[J]. *Pure Appl Geophy*, **160**: 635-676.
- Bray J D, Rodriguez-Marek A. 2004. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **24**: 815-828.
- Clough R, Penzien J. 1993. *Dynamics of Structures*, 2nd edition[M]. New York; McGraw-Hill, Inc; 598-609.
- Makris N, Black B. 2003. *Dimensional Analysis of Inelastic Structures Subjected to Near Fault Ground Motions*[R]. Berkeley, California; Earthquake Engineering Research Center, University of California, UCB/EERC 2003-05; 7-15.
- Mavroeidis G P, Papageorgiou A S. 2003. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **93**(3): 1 099-1 131.
- Menun C, Fu Q. 2002. An analytical model for near-fault ground motions and the response of SDOF systems[C]//Earthquake Engineering Research Institute eds. *Seventh US National Conference on Earthquake Engineering*. Boston, Massachusetts; Mira Digital Publishing, Paper No. 00011.
- Somerville P G. 2003. Magnitude scaling of the near-fault rupture directivity pulse[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **137**: 201-212.
- Somerville P G. 1998. Development of an improved ground motion representation for near-fault ground motions[C]//*Proceedings SMIP 98 Seminar on Utilization of Strong Motion Data*. Oakland, California; California Division of Mines and Geology; 1-20.
- Thráinsson H, Kiremidjian A S. 2002. Simulation of digital earthquake accelerograms using the inverse discrete Fourier transform[J]. *Earthquake Engng Struct Dyn*, **31**: 2 023-2 048.
- Yen W H. 2002. Lessons learned about bridges from earthquake in Taiwan[J]. *Public Roads*, **65**(4): 20-23.

## SIMULATION METHOD OF NEAR-FAULT PULSE-TYPE GROUND MOTION

Tian Yuji Yang Qingshan Lu Mingqi

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The two characteristics of near-fault ground motions, *i.e.*, the forward directivity effect and permanent displacement effect, result in long period and large velocity pulse in the velocity time history and large step pulse in the displacement time history. Considering the two effects, a simple expression of continuous function for equivalent velocity pulse time history is presented in this paper. The equivalent pulse model, in which the pulse period, peak velocity and pulse shape are described by five parameters, is highly advantageous to fit and simulate the pulse-type velocity time history. The equivalent pulse model comprises only one low-frequency component while the high-frequency component of a pulse-type earthquake record cannot be considered. Based on 28 records of 11 earthquakes, the pulse frequency of pulse-type records is generally less than 1 Hz. Therefore the low-frequency component and high-frequency component are simulated respectively and combined them together to generate a pulse-type ground motion.

**Key words:** pulse-type ground motion; equivalent velocity pulse; low-frequency component; high-frequency component