

基于速度脉冲地震动的边坡地震位移统一预测模型

宋 健^{1, 2}, 高广运^{1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 采用基于小波变换的多向地震动速度脉冲特性鉴定方法, 从 NGA 数据库及汶川地震记录中提取出了 196 条速度脉冲地震动数据; 基于 Newmark 非耦合滑动模型, 考虑土体非线性特征。通过计算速度脉冲地震动作用下不同强度(k_y)及初始自振周期(T_s)边坡模型的地震位移, 对比分析了边坡地震位移与速度脉冲地震动参数之间的相关性, 并建立了适用于近断层速度脉冲地震动的边坡地震位移统一预测模型。结果表明: 既有边坡地震位移预测模型低估了近断层速度脉冲地震动引起的位移值, 而用于预测近断层非脉冲地震动引起的边坡地震位移离散较小; 近断层速度脉冲地震动引起的边坡地震位移与其速度脉冲特性密切相关, 地震位移与速度脉冲地震动参数(峰值速度 PGV)相关性最好; 采用 1.5 倍边坡自振周期对应的加速度反应谱($S_a(1.5T_s)$)和 PGV 分别代表速度脉冲地震动的频谱成分及速度脉冲特征, 能够综合反映速度脉冲地震动对边坡地震位移的影响; 建立了基于边坡参数(k_y, T_s)和脉冲地震动参数(PGV, $S_a(1.5T_s)$)的边坡地震位移预测模型, 为考虑近断层地震动速度脉冲特性影响的边坡地震位移概率灾害分析提供了基础。

关键词: 边坡; 近断层地震动; 速度脉冲; 地震位移; 预测模型

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)11-2009-09

作者简介: 宋 健(1988-), 男, 安徽滁州人, 博士研究生, 主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: songjian1988@gmail.com。

Empirical predictive model for seismic displacement of slopes under velocity pulse-like ground motions

SONG Jian^{1, 2}, GAO Guang-yun^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the procedure to identify the velocity pulse for multi-component ground motions, 196 ground motions from NGA database and Wenchuan Earthquake are selected as pulse-like ground motions. The newmark decoupled model considering the nonlinear properties of soils is used to calculate the seismic displacement of slopes with different parameters (k_y, T_s) subjected to near-fault pulse-like ground motions, and the efficiency of different pulse-like ground motion parameters for predicting the displacement is also investigated. A seismic displacement model for the slopes under near-fault pulse-like ground motions is developed. The results indicate that the existing empirical models for seismic displacement of slopes significantly underestimate the displacement value induced by near-fault pulse-like ground motions, while they can be used to predict the seismic displacement caused by near-fault non-pulse ground motions. A close relationship between the seismic displacement and the velocity pulse characteristics for the pulse-like ground motions is shown, and the peak ground velocity (PGV) is the most efficient parameter in terms of the seismic displacement. The spectral acceleration at a degrade period equals to $1.5T_s$ ($S_a(1.5T_s)$) and PGV can represent the frequency content and velocity pulse characteristics of the pulse-like ground motions, respectively. Thus, an empirical predictive model for seismic displacements is developed using the vector intensity measures of $S_a(1.5T_s)$ and PGV, which can be used in probabilistic seismic hazard analysis for the seismic displacement including the effects of near-fault pulse-like characteristics.

Key words: slope; near-fault ground motion; velocity pulse; seismic displacement; predictive model

0 引 言

地震引起的边坡永久位移是衡量边坡稳定性的重要参数。基于边坡地震位移的预测模型可用于具体边

坡工程地震稳定性的快速预估及边坡概率地震灾害性

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372271)

收稿日期: 2013-04-25

分析。Newmark 滑块模型^[1]作为目前预测边坡地震位移的主要简化方法,已从最初的刚性块体模型发展为考虑滑动体本身动力响应的非耦合模型及完全耦合模型^[2-5],后者可以同步考虑坡体动力响应和滑动的相互影响。基于 Newmark 滑块法,Ambraseys 等^[6]采用 11 次地震的 50 条强震记录,得到了基于峰值加速度 PGA 的回归方程;Jibson^[7]利用 30 次地震中的 2270 条地震记录,建立了基于 PGA、Arias 强度及震级的不同形式的预测模型;Saygili 等^[8]、Rathje 等^[9]基于 NGA 数据库的 2383 条地震记录,计算得到不同临界加速度刚性边坡的大约 14000 个非零地震位移值,分别建立了以多项式形式的地震位移预测模型;徐光兴等^[10]基于汶川强震记录得到了适用于中国西部山区的区域性边坡地震位移预测模型。

目前,国内外已有的边坡地震位移预测模型主要基于 Newmark 刚塑性模型,适用于滑动面较浅的边坡。对于深层滑动的坡体及软弱土体组成的边坡,需考虑土体变形对边坡地震位移的影响。Bray 等^[11]考虑土体变形的影响,计算了不同临界加速度及自振周期的边坡的地震位移,得到了边坡的地震位移统一预测模型。

然而,由于地震记录量的缺乏,目前的边坡地震位移预测模型均未区分近场和远场,脉冲和非脉冲地震动,从而增加了预测模型的离散性,降低了模型预测某些特定地震动引起边坡地震位移的准确性。随着地震记录数据量的增多,根据地震动主要特性分别建立不同的地震记录数据库成为可能,对研究不同地震动特性对工程结构的影响提供了条件。速度脉冲特性是近断层地震动的主要特征,主要由破裂向前方向性效应及滑冲效应引起,对结构破坏显著,尤其是对长周期结构非线性响应(Kalkan 等^[12])的影响。因此,速度脉冲地震动很可能对长周期边坡产生较大影响,既有的边坡预测模型可能会低估速度脉冲地震动引起的地震位移值,有必要对既有模型预测近断层脉冲地震动引起边坡地震位移的有效性进行分析并建立适用于脉冲地震动的边坡地震位移预测模型。本文采用选取的 196 条速度脉冲记录,基于 Newmark 非耦合模型,考虑土体非线性特征,对近断层速度脉冲地震动引起的不同参数边坡地震位移进行分析,比较了边坡地震位移与速度脉冲地震动参数之间的相关性,建立了适用于近断层速度脉冲地震动的边坡地震位移统一预测模型,最后对实际工程中模型的应用进行了相关阐述。

1 速度脉冲地震动记录

1.1 基于小波分析的多向地震动速度脉冲特性鉴定方法

小波分析是一种信号的时间-频率分析方法,适用

于分析地震动等非平稳信号的时频变化瞬态特征^[13]。Baker^[14]首次提出了一套基于连续小波变换的脉冲记录判定方法,从 NGA 数据库中得到了 91 条断层法向的速度脉冲地震动记录。谢俊举等^[15]基于 Baker 的脉冲记录的判定方法,研究表明汶川地震记录中也包含近断层速度脉冲的地震动,主要分布在沿断层破裂传播的方向上,由破裂传播的向前方向性效应引起。然而上述方法只鉴定出了垂直断层方向和平行断层方向分量的脉冲地震动。由于断层破裂方式的差异,脉冲地震动不仅仅只发生在断层法向分量^[16],且在缺少有限断层模型信息时,无法准确地判断断层的方向。由于大的小波系数意味着能量在某个时间及频率范围内的集中,这也正是脉冲信号的主要特征,因此小波系数的大小可作为判断脉冲特性的依据^[17]。基于此,本文采用多向地震动的脉冲特性鉴定方法,首先对水平正交的两个地震动分量进行连续小波变换,从而确定最有可能具有脉冲特性(小波系数最大)的方向分量;然后将原始地震动转至该方向,参考 Baker 的脉冲记录判定方法选取近断层速度脉冲地震动,如果最有可能产生脉冲特征的分量不具备脉冲特性,即判定为非脉冲地震动。小波函数可表示为

$$\Phi_{s,l} = \frac{1}{\sqrt{s}} \phi\left(\frac{t-l}{s}\right) \quad (1)$$

式中, ϕ 和 $\Phi_{s,l}$ 分别为基本小波以及由基本小波通过伸缩和平移后得到的小波函数, s 为伸缩因子(尺度因子), l 为平移因子。对实际地震动做小波函数为 $\Phi_{s,l}$ 的连续小波变换,得到不同位置(l)和尺度(s)对应的小波系数:

$$c(s, l) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt \quad (2)$$

对于水平正交的双向地震记录 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$, 与 $f_1(t)$ 成任意方向角 θ 的地震动 $f(t, \theta)$ 可表示为

$$f(t, \theta) = f_1(t) \cos(\theta) + f_2(t) \sin(\theta) \quad (3)$$

则对应于 $f(t, \theta)$ 的小波系数为

$$c(s, l, \theta) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t, \theta) \phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)得

$$\begin{aligned} c(s, l, \theta) &= \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} [f_1(t) \cos(\theta) + f_2(t) \sin(\theta)] \phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} [f_1(t) \cos(\theta)] \phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} [f_2(t) \sin(\theta)] \phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt \\ &= c_1(s, l) \cos(\theta) + c_2(s, l) \sin(\theta) \quad (5) \end{aligned}$$

式中, $c_1(s, l)$, $c_2(s, l)$ 分别为 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 对应的小波系数。

因此, 对应地震动小波系数最大值为

$$\sqrt{c_1^2(s, l) + c_2^2(s, l)}, \text{ 方向角 } \theta = \arctan^{-1} \left[\frac{c_2(s, l)}{c_1(s, l)} \right],$$

由此得到最有可能具有脉冲特性(小波系数最大)的方向分量。然后将地震动转至该方向, 参考 Baker 的脉冲记录判定方法即可进行近断层速度脉冲地震动的选取。

基于上述多向地震动的脉冲特性鉴定方法, 从 NGA 数据库的 3551 条地震记录及汶川地震的 64 组断层距小于 200 km 的地震动记录^[15]中选取出了 196 条速度脉冲地震动记录(均转成小波系数最大的方向), 为下一步建立适用于近断层脉冲地震动的边坡地震位移预测模型提供了条件。脉冲地震动分布如表 1 所示。限于篇幅, 具体的地震动记录未能在文中列出。

1.2 脉冲地震动参数分布

地震动特性是主导边坡地震位移量最关键的因素。因此, 基于大量地震动记录回归所得的边坡地震位移预测模型具有更高的准确性。速度脉冲特性是近断层地震动的主要特征之一, 也是近断层地震动引起结构强烈破坏的关键因素^[12]。然而由于速度脉冲记录有限, 对于近断层速度脉冲特性对边坡地震位移的影响及相应的地震位移预测模型的研究, 国内外一直未

见报道。本文 1.1 节采用基于小波变换的多向地震动的速度脉冲特性鉴定方法从 NGA 数据库及中国汶川地震记录中选取出的 196 条速度脉冲地震动为此方面的研究提供了条件。图 1 为脉冲地震动的震级-断层距分布关系。由图可知, 80% 以上的地震动断层距位于 30 km 以内, 95% 以上的地震动断层距小于 60 km。说明速度脉冲地震动基本发生在近断层区域, 是近断层地震动的主要特征。

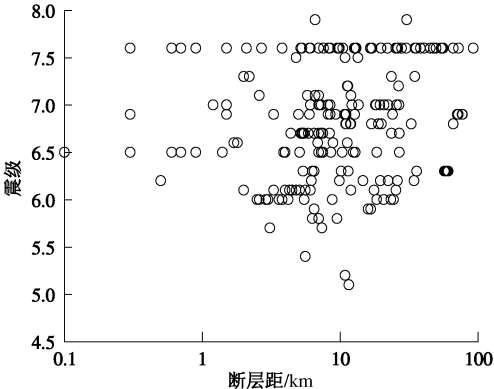


图 1 196 条速度脉冲地震动震级和断层距的分布关系

Fig. 1 Distribution of pulse-like ground motions in terms of magnitude and closest distance

表 1 NGA 数据库及汶川地震中的速度脉冲记录

Table 1 Pulse-like records from NGA database and Wenchuan Earthquake

地震编号	地震名称	发生年份	震级 M_w	断层类型*	脉冲记录条数
1	San Fernando	1971	6.6	R	1
2	Tabas, Iran	1978	7.4	R	1
3	Coyote Lake	1979	5.7	SS	4
4	Imperial Valley-06	1979	6.5	SS	16
5	Imperial Valley-07	1979	5.0	SS	1
6	Mammoth Lakes-06	1980	5.9	SS	1
7	Irpinia, Italy-01	1980	6.9	N	2
8	Westmorland	1981	5.9	SS	2
9	Coalinga-02	1983	5.1	R	2
10	Coalinga-05	1983	5.8	R	1
11	Coalinga-07	1983	5.2	R	1
12	Morgan Hill	1984	6.2	SS	2
13	Taiwan SMART1(40)	1986	6.3	R	28
14	N. Palm Springs	1986	6.1	OB	1
15	San Salvador	1986	5.8	SS	2
16	Whittier Narrows-01	1987	6.0	OB	7
17	Superstition Hills-02	1987	6.5	SS	3
18	Loma Prieta	1989	6.9	OB	12
19	Erzican, Turkey	1992	6.7	SS	1
20	Cape Mendocino	1992	7.0	R	4
21	Landers	1992	7.3	SS	3
22	Northridge-01	1994	6.7	R	17
23	Kobe, Japan	1995	6.9	SS	5
24	Kocaeli, Turkey	1999	7.5	SS	4
25	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.6	R	53
26	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	6.2	R	5
27	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	6.2	SS	1
28	Chi-Chi, Taiwan-06	1999	6.3	R	3
29	Duzce, Turkey	1999	7.1	SS	4
30	Yountville	2000	5.0	SS	1
31	Denali, Alaska	2002	7.9	SS	1
32	Wenchuan	2008	7.9	R	7

*注: 断层类型, R 为逆断层, SS 为走滑断层, N 为正断层, OB 为斜滑断层。

2 近断层脉冲及非脉冲地震动引起的边坡地震位移

2.1 考虑土体非线性的 Newmark 非耦合模型

本文采用 Newmark 非耦合模型分析近断层地震动引起的边坡地震位移,同时考虑边坡滑移过程中两种非线性的影响:坡体滑动导致的非线性(理想刚塑性模型)和土体的非线性动力响应(等效线性模型)。首先进行场地地震响应分析得出等效地震加速度 k_{\max} 。本文基于 Strata 程序^[19],采用 Darendeli 等^[20]提出的模型确定土体剪切模量和阻尼比随剪应变的变化曲线,塑性指数 $I_p=0$,围压值由场地厚度确定。基于得出的等效地震加速度 k_{\max} ,采用 Newmark 理想刚塑性滑块模型计算地震引起的边坡地震位移值。

2.2 近断层脉冲与非脉冲地震动引起边坡地震位移的对比分析

基于 2.1 节考虑土体动力非线性的 Newmark 非耦合模型,选取 32 条近断层速度脉冲地震动和 32 条近断层非速度脉冲地震动(断层距均在 30 km 以内)作为输入,计算得到了不同强度($k_y=0.05g, 0.1g$)及刚度($T_s=0.2, 1.0$ s)边坡的地震位移。限于篇幅,具

体的地震动记录未能在文中列出。图 2 为 4 种不同参数边坡的地震位移时程。可以看出,近断层速度脉冲地震动引起的地震位移值均大于近断层非脉冲地震动。随着边坡自振周期的增加,非脉冲地震动引起的地震位移值减小,而脉冲地震动引起的地震位移值则显著增加。这是因为脉冲地震动的主要能量集中在速度脉冲段,包含丰富的长周期成分,因此对长周期边坡的影响较大。

目前国内外学者建立边坡地震位移预测模型时均未区分近场和远场、脉冲和非脉冲地震动,从而增加了预测模型的离散型,降低了模型预测某些特定地震动引起边坡地震位移的准确性。由上述分析可知,脉冲地震动较非脉冲地震动将引起较大的边坡地震位移值。因此,既有的预测模型很可能会低估脉冲地震动引起的地震位移值,有必要对既有模型预测近断层脉冲地震动引起边坡地震位移的有效性进行深入探讨。

2.3 既有模型对近断层脉冲地震动及近断层非脉冲地震动的有效性

目前,国内外已有的边坡地震位移预测模型主要基于 Newmark 刚塑性模型,适用于滑动面较浅的边坡。对于深层滑动的坡体及软弱土体组成的边坡,需

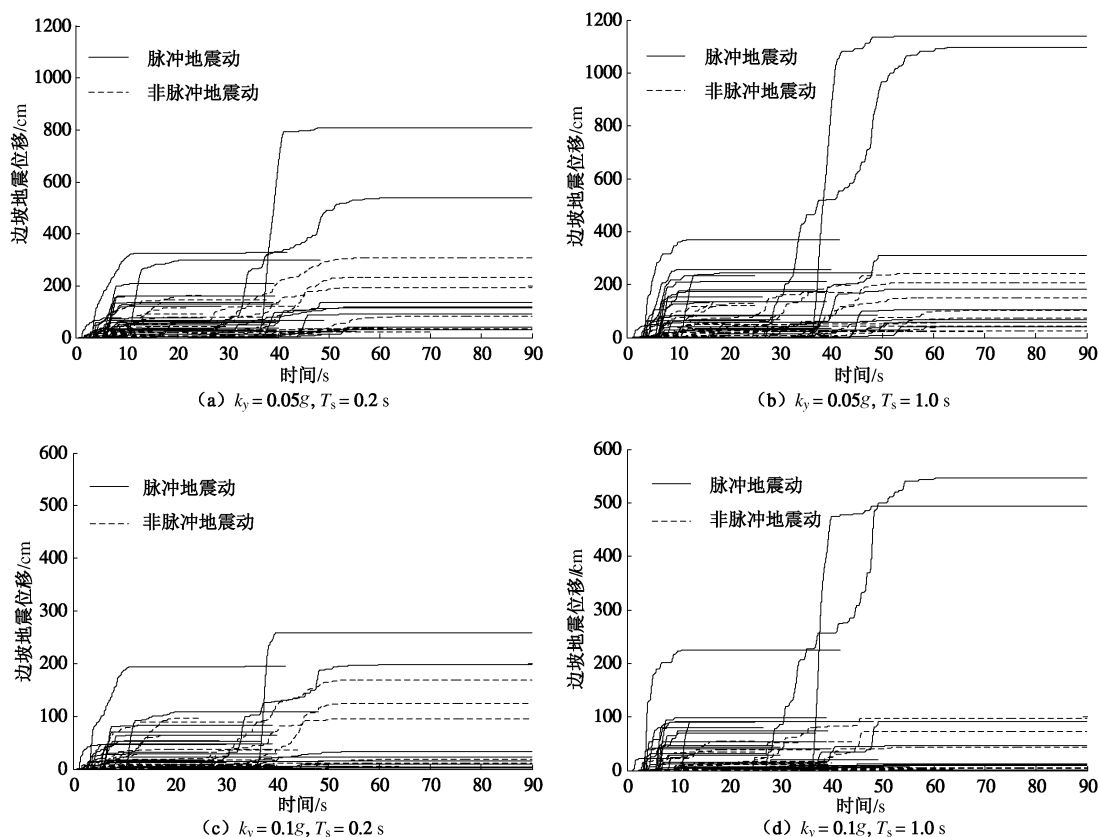


图 2 32 条近断层脉冲地震动与 32 条近断层非脉冲地震动引起的不同强度(k_y)和刚度(T_s)边坡的地震位移时程曲线

Fig. 2 Time-histories of seismic displacement for slopes with different values of yield acceleration and initial fundamental period subjected to 32 near-fault pulse-like ground motions and 32 near-fault non-pulse-like ground motions

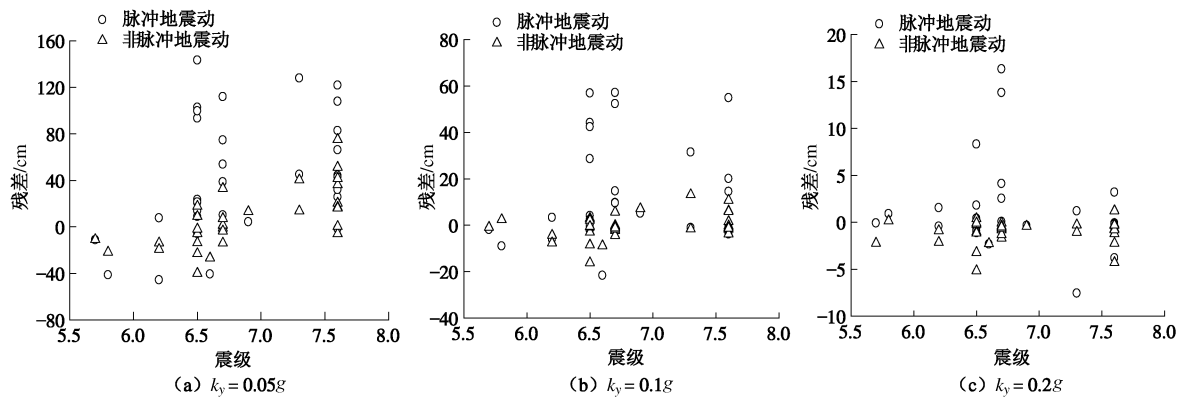


图 3 近断层脉冲与非脉冲地震动引起的 Bray 模型^[11]的地震位移残差($T_s=0.2$ s)

Fig. 3 Residuals of seismic displacement for slopes with different values of yield acceleration subjected to near-fault pulse-like ground motions and non-pulse-like ground motions using Bray model^[11] ($T_s=0.2$ s)

考虑土体变形对边坡地震位移的影响。Bray 等^[11]考虑土体变形, 计算了不同临界加速度及自振周期的边坡的地震位移, 得到了边坡的地震位移统一预测模型。由上节分析可知, 速度脉冲地震动对长周期边坡的影响尤为明显, 因此有必要建立适用于脉冲地震动的边坡地震位移预测模型。这里以 Bray 模型^[11]为例, 以 2.2 节的 32 条近断层速度脉冲地震动和 32 条近断层非速度脉冲地震动作为输入, 采用 Newmark 非耦合模型及 Bray 预测模型计算得到的不同临界加速度地震位移残差($\ln D_{\text{计算值}} - \ln D_{\text{预测值}}$)如图 3 所示, 坡体初始自振周期取 0.2 s。由图 3 可知, 脉冲地震动对应的地震位移残差基本均大于零, 且数值远超过非脉冲地震动, 对于 k_y 较小的边坡尤为显著, 而近断层非脉冲地震动对应的地震位移残差数量较小, 且基本分布在零位置附近。因此, Bray 模型低估了近断层速度脉冲地震动引起的边坡地震位移值, 而用于预测近断层非脉冲地震动引起的边坡地震位移离散较小, 可适用。这也说明了速度脉冲特性是近断层地震动区别于远场地震动的主要特征, 也是导致边坡较大地震位移的主要因素。

3 近断层速度脉冲地震动引起的边坡地震位移预测模型

由上述分析可知, 近断层速度脉冲地震动引起的边坡地震位移值远大于非脉冲地震动, 对长周期边坡尤为明显。既有 Bray 模型低估了近断层速度脉冲地震动引起的边坡地震位移值。因此, 需要考虑近断层脉冲地震动特性, 选取合适的地震动参数, 建立脉冲地震动引起的边坡地震位移预测模型。本文基于 196 条速度脉冲地震动记录, 取临界加速度 $k_y=0.02g, 0.05g, 0.1g, 0.2g, 0.3g$ 和初始自振周期 T_s ($T_s=4H/v_s$, H 为边坡高度, v_s 为土体剪切波速) $=0.1, 0.2, 0.5, 1.0$,

2.0 s, 代表不同特性的边坡, 同时考虑土体非线性, 建立适用于近断层速度脉冲地震动的边坡地震位移预测模型。

3.1 脉冲地震动参数的选取

选取不同的地震动参数 PGV, PGA, T_p , D_{5-95} , Arias 强度, PGD (地震动峰值位移), S_a (地震动加速度反应谱) 和 S_v (地震动速度反应谱), 对不同地震动参数与边坡地震位移的相关性进行了对比分析。采用的回归方程形式为

$$\ln D = a + b \ln(IM) + c(\ln(IM))^2 + \varepsilon, \quad (6)$$

式中, D 为边坡地震位移, IM 为地震动强度参数, ε 为标准偏差, a, b, c 为方程回归系数。图 4 表示不同参数边坡地震位移与不同地震动参数的相关性, 纵坐标即为标准偏差。可以看出, PGV 与边坡地震位移具有良好相关性, 对 k_y 较小的边坡尤为显著。表明边坡地震位移与近断层脉冲地震动的速度脉冲特性密切相关。由于速度脉冲地震动主要能量集中在峰值较大的速度脉冲段, 因此峰值速度 PGV 作为脉冲段的主要参数, 直接反映了脉冲段对边坡地震位移的影响。但由于 PGV 仅是速度幅值参数, 不能反映频域特征, 当边坡自振周期较大时, 预测地震位移的偏差也越大。加速度 (速度) 反应谱与长周期边坡的相关性较高, 主要是因为反应谱同时包含地震动的幅值和频域信息, 而 1.5 倍边坡自振周期对应的加速度反应谱 ($S_a(1.5T_s)$) 预测边坡地震位移的有效性最好, 主要是由于土体非线性影响, 导致 $S_a(1.5T_s)$ 较 $S_a(1.0T_s)$ 有更好的预测能力。

3.2 基于速度脉冲地震动的边坡地震位移预测模型的建立

考虑土体非线性的边坡模型较刚性边坡模型更复杂, 很难找到单一地震动参数用于建立边坡地震位移模型, 并得到工程应用所能接受的离散值。由 3.1 节

分析可知,峰值速度 PGV 与边坡地震位移的相关性较好。但由于 PGV 仅是速度幅值参数,不能反映频域特征。而 1.5 倍边坡自振周期对应的加速度反应谱 ($S_a(1.5T_s)$) 同时包含地震动的幅值和频域信息,预测边坡地震位移的有效性较好,尤其是长周期边坡。由于速度脉冲地震动引起的边坡地震位移值一般较大,且较小的地震位移不会对工程产生影响,因此参考文献[11],本文仅取大于 1 cm 的地震位移用于模型回归,可在保证模型工程应用的前提下减小模型的离散性。图 5 为本文基于 196 条速度脉冲地震动和不同边坡参数 (k_y, T_s) 计算得到的所有大于 1 cm 的边坡地震位

移与 $S_a(1.5T_s)$ 和 PGV 的分布关系,图 6 为所有大于 1 cm 的边坡地震位移与 $k_y/S_a(1.5T_s)$ 和 k_y/PGV 的分布关系, R^2 为判定系数,反映变量之间的相关性。可以看出,即使不包含地震动频域特征信息,PGV 仍是预测速度脉冲地震动引起边坡地震位移最有效的参数,主要是由于速度脉冲地震动主要能量集中在峰值较大的速度脉冲段,而峰值速度 PGV 作为脉冲段的主要参数,直接反映了脉冲段对边坡地震位移的影响。因此,采用 $S_a(1.5T_s)$ 和 PGV 分别代表速度脉冲地震动的频谱成分及速度脉冲特征,能够综合反映速度脉冲地震动对边坡地震位移的影响。

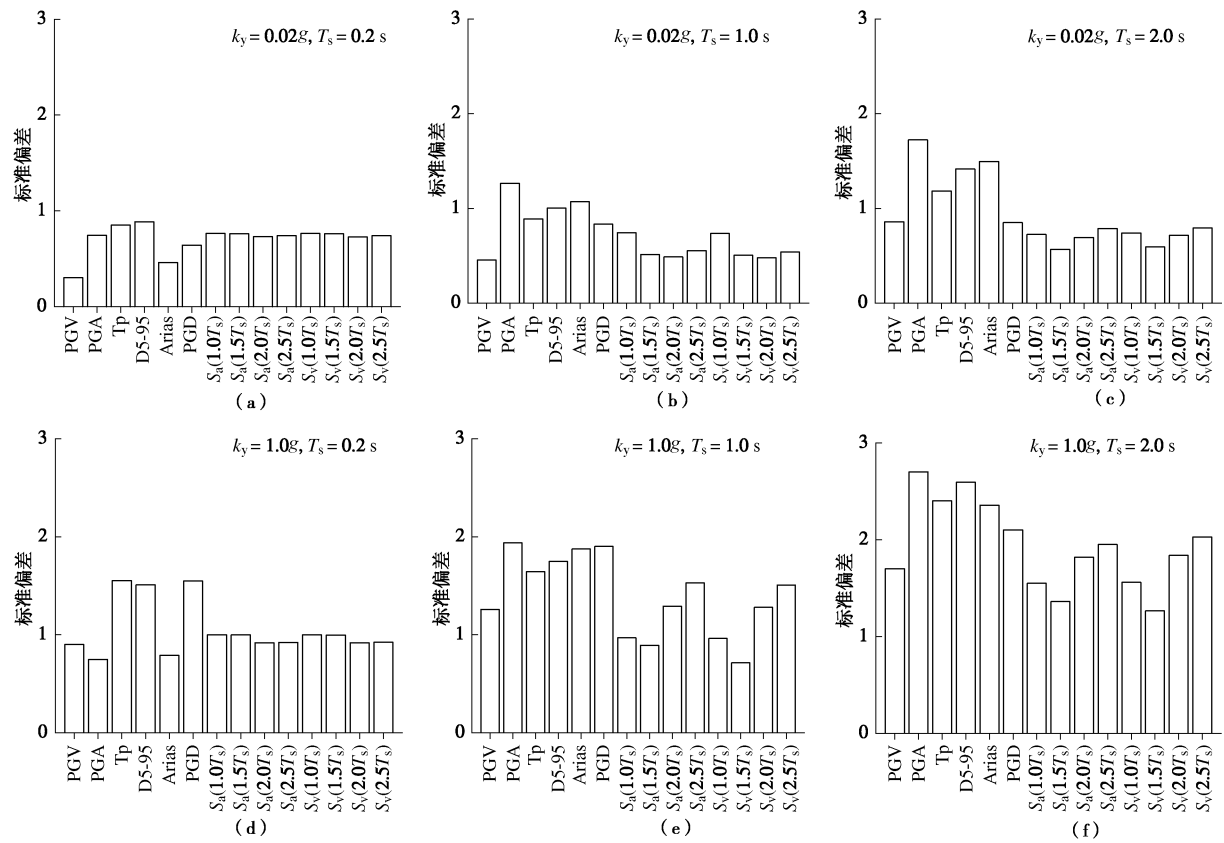


图 4 利用回归方程(8)比较脉冲地震动的不同地震动参数与边坡地震位移值的相关性

Fig. 4 Relative efficiency of different intensity parameters of pulse-like ground motions for predicting seismic displacement using Eq. (8)

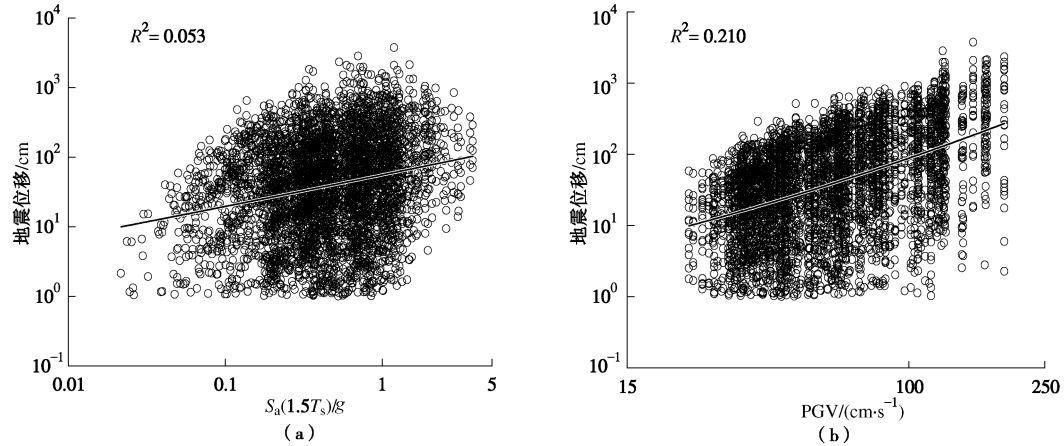


图 5 大于 1 cm 的边坡地震位移与 $S_a(1.5T_s)$ 和 PGV 的分布关系

Fig. 5 Distribution of seismic displacement for $D > 1$ cm with $S_a(1.5T_s)$ and PGV

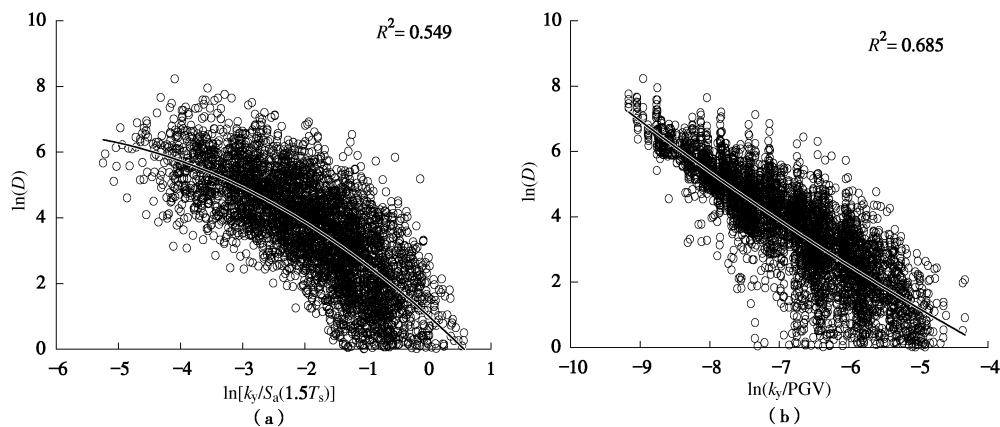


图 6 大于 1 cm 的边坡地震位移与 $k_y/S_a(1.5T_s)$ 和 k_y/PGV 的分布关系

Fig. 6 Distribution of seismic displacement for $D>1\text{cm}$ with $k_y/S_a(1.5T_s)$ and k_y/PGV

基于不同边坡参数 (k_y , T_s) 计算得到的 4380 个大于 1 cm 的地震位移数据, 利用统计分析软件 (R2.15.2) 进行混合非线性回归, 同时考虑地震事件与地震事件之间的不确定性和随机性特征及同一地震事件中不同地震动之间的不确定性和随机性特征, 且不会受到各个地震事件所含地震动数据大小的影响。选取 $S_a(1.5T_s)$ 和 PGV 两个地震动参数以及 k_y 和 T_s 两个边坡参数, 采用极大似然法确定模型系数, 回归得预测模型如下:

$$\ln D = -7.140 - 2.614 \ln k_y - 0.260 (\ln k_y)^2 + 1.503 \ln(S_a(1.5T_s)) + 0.415 \ln(k_y) \ln(S_a(1.5T_s)) - 0.344 \ln[S_a(1.5T_s)]^2 + 1.475 \ln(PGV) + 0.741 T_s \quad (7)$$

表 2 为回归模型的参数, τ 为不同地震事件之间的离散值, σ 为同一地震事件内部的离散值, R^2 为判定系数, σ_{total} 为总的离散值, $\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\tau^2 + \sigma^2}$ 。

图 7 为边坡地震位移预测方程 (7) 的残差 ($\ln D_{\text{计算值}} - \ln D_{\text{预测值}}$) 与震级、断层距、边坡临界加速度 k_y 及边坡初始自振周期 T_s 的分布关系。由图可知, 残差基本沿零位置呈对称分布, 表明模型预测值与计算值拟合较好。通过对比加入震级项后及无震级项模型 (式 (7)) 的离散值, 二者较为接近。主要由于峰值速度 PGV 很好地反映了地震动所包含的信息, 因此模型对震级敏感性较小。

为建立统一的边坡地震位移预测模型, 并减小模型的离散性, 对 $T_s < 0.05$ s 的边坡采用 Newmark 刚塑性滑块模型计算地震位移, 对模型方程重新回归得到 $\ln(D) = -8.859 - 3.107 \ln(k_y) - 0.401 (\ln(k_y))^2 + 2.110 \ln(PGA) + 0.772 \ln(k_y) \ln(PGA) - 0.372 (\ln(PGA))^2 + 1.817 \ln(PGV)$ 。

回归模型的参数如表 2 所示。

表 2 回归模型的参数

Table 2 Regression parameters for predictive model

模型	τ	σ	σ_{total}	R^2
式(7)	0.208	0.594	0.629	0.852
式(8)	0.206	0.449	0.494	0.907

3.3 模型的应用

上述边坡地震位移预测模型可用于分析确定地震动及边坡参数的近断层速度脉冲地震动引起的地震位移值, 也可用于考虑近断层地震动速度脉冲特性影响的边坡地震位移概率灾害分析。Shahi 等^[17]指出在进行概率地震灾害分析时, 考虑速度脉冲地震动对结构的影响, 将对灾害的贡献分为速度脉冲地震动和无脉冲地震动, 用于边坡地震位移时可表示为

$$\lambda_D(d) = \lambda_{D, \text{pulse}}(d) + \lambda_{D, \text{non-pulse}}(d) = \iint P(D > d | IM_1, IM_2, \text{pulse}) \cdot P(\text{pulse}) \cdot P(IM_1, IM_2) + \iint P(D > d | IM_1, IM_2, \text{no pulse}) \cdot [1 - P(\text{pulse})] \cdot P(IM_1, IM_2) \quad (9)$$

式中 $\lambda_D(d)$ 为地震位移值超过 d 的年平均概率; $P(D > d | IM_1, IM_2)$ 为确定的地震动强度参数 IM_1 和 IM_2 引起的地震位移值超过 d 的概率, 表示为

$$P(D > d) = [1 - P(D = 0)]P(D > d | D > 0), \\ P(D > d | D > 0) = 1 - P(D \leq d | D > 0) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln d - \ln \mu_d}{\sigma_d}\right) \quad (10)$$

式中 $P(D = 0)$ 为“零”位移 ($D \leq 1$ cm) 发生概率^[11]; μ_d 和 σ_d 是采用回归模型计算出的地震位移均值和离散值, 对于脉冲地震动, 可通过上述回归模型得到, 而对于一般的非脉冲地震动, 可基于传统边坡地震位移预测模型, 如 Bray 模型求出; $P(\text{pulse})$ 为脉冲发生的概率; $P(IM_1, IM_2)$ 为地震动参数 IM_1 和 IM_2 的联合年发生概率, 而 IM_1 和 IM_2 的相关系数是求出 $P(IM_1, IM_2)$ 的前提。对于脉冲地震动,

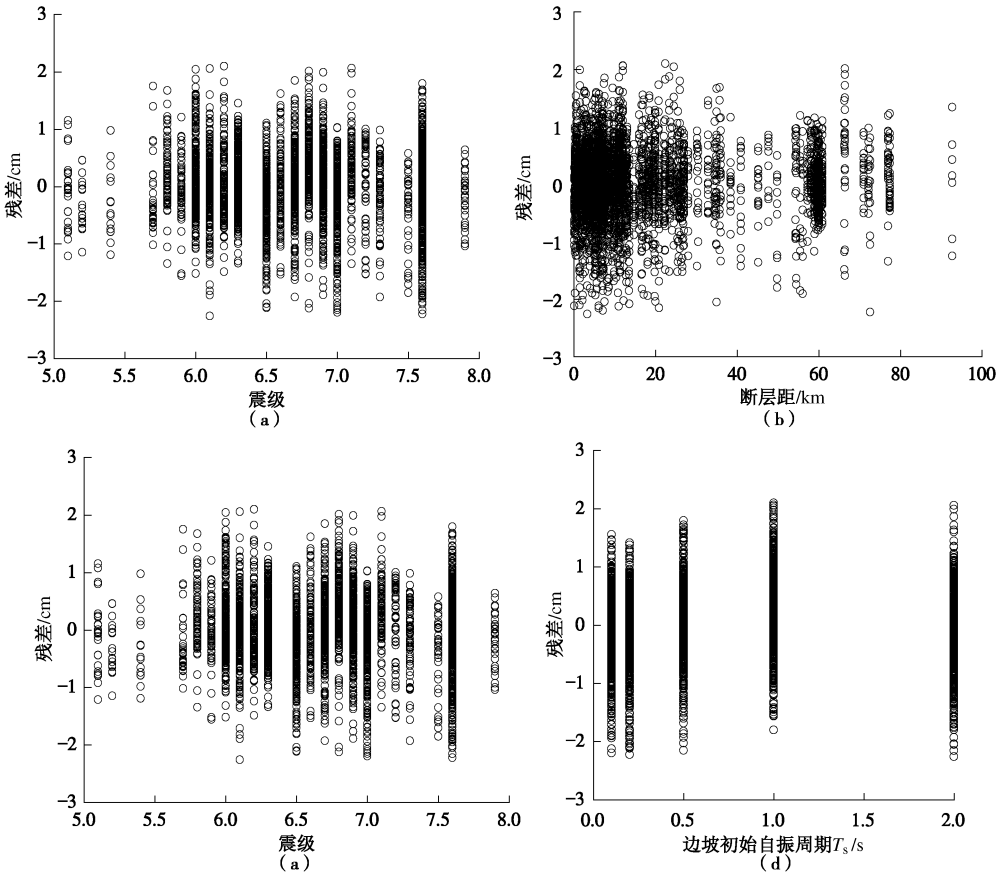


图 7 预测方程 (7) 的残差分布

Fig.7 Residuals of Eq. (7) plotted versus magnitude, closest distance, yield acceleration and initial fundamental period
IM₁=PGV, IM₂=S_a(1.5T_s), 相关系数为

$$\rho = \frac{\sum (PGV_i - \overline{PGV})(S_{ai} - \overline{S_a})}{\sqrt{\sum (PGV_i - \overline{PGV})^2} \sqrt{\sum (S_{ai} - \overline{S_a})^2}} \quad , \quad (11)$$

式中， \overline{PGV} 和 $\overline{S_a}$ 为峰值速度和加速度反应谱的均值。
由于近断层脉冲地震动会引起较大的边坡地震位移值，因此对位于近断层区域的边坡，在进行边坡地震灾害评估时应单独考虑，否则将可能低估边坡地震灾害水平。基于所得的近断层脉冲地震动引起的边坡地震位移预测模型，即可进行考虑近断层地震动速度脉冲特性影响的边坡地震位移概率灾害分析，对近断层区域边坡工程的地震防灾减灾具有重要意义。

4 结 论

本文基于考虑土体动力非线性的 Newmark 非耦合滑动模型，采用基于多向地震动速度脉冲特性鉴定方法选取出的 196 条速度脉冲地震动，对近断层速度脉冲地震动引起的不同参数边坡地震位移进行分析，建立了适用于近断层速度脉冲地震动的边坡地震位移预测模型，并对实际工程中模型的应用进行了阐述。得到以下 6 点结论。

(1) 采用基于小波变换的多向地震动速度脉冲

特性鉴定方法，从 NGA 数据库及汶川地震动记录中选取出了 196 条速度脉冲地震动记录。统计分析表明，速度脉冲地震动基本发生在近断层区域（断层距小于 30 km），是近断层地震动的主要特征。

(2) 近断层速度脉冲地震动引起的边坡地震位移值远大于近断层非脉冲地震动，长周期边坡尤为明显，且近断层速度脉冲地震动引起的边坡地震位移与其速度脉冲特性密切相关。

(3) 既有边坡地震位移预测模型低估了近断层速度脉冲地震动引起的位移值，而用于预测近断层非脉冲地震动引起的边坡地震位移离散较小。说明速度脉冲特性是近断层地震动区别于远场地震动的主要特征，也是导致边坡较大地震位移的主要因素。

(4) 通过对比分析近断层速度脉冲地震动参数与边坡地震位移值的相关性，表明 PGV 能够反映地震动的速度脉冲特征，是预测速度脉冲地震动引起边坡地震位移最有效的参数，而 S_a(1.5T_s) 能够较好地反映速度脉冲地震动的频谱成分对地震位移的影响。

(5) 采用混合非线性回归方法，建立了基于速度脉冲地震动参数 (S_a(1.5T_s), PGV) 及边坡参数 (k_y, T_s) 的边坡地震位移预测模型，适用于预测近断层速度脉冲地震动引起的边坡地震位移。模型预测值与计

算值拟合较好。

(6) 目前国内外的边坡地震位移预测模型很可能会低估位于近断层区域边坡的地震灾害水平。本文提出的预测模型可用于近断层区域的边坡的地震位移概率灾害分析, 对近断层区域边坡工程的地震防灾减灾具有重要价值。

致 谢: 本文所用的地震动记录由国家强震动台网中心及美国 PEER 中心提供数据支持, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. *Géotechnique*, 1965, **15**(2): 139 - 160.
- [2] MAKDISI F I, SEED H B. Simplified procedure for estimation dam and embankment earthquake induced deformations[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1978, **104**(GT7): 849 - 868.
- [3] RATHJE E M, BRAY J D. An examination of simplified earthquake induced displacement procedures for earth structures[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, **36**(1): 72 - 87.
- [4] RATHJE E M, BRAY J D. Nonlinear coupled seismic analysis of earth structure[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, **126**(11): 1002 - 1215.
- [5] 李红军, 迟世春, 林 皋. 基于黏着滑动耦合动力分析的 Newmark 滑块位移法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(9): 1787 - 1793. (LI Hong-jun, CHI Shi-chun, LIN Gao. An improved Newmark sliding block method based on stick-slip coupled dynamic response[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(9): 1787 - 1793. (in Chinese))
- [6] AMBRASEYS N N, MENU J M. Earthquake-induced ground displacements[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1988, **16**(7): 985 - 1006.
- [7] JIBSON R W. Regression models for estimating coseismic landslide displacement[J]. *Engineering Geology*, 2007, **91**(2/3/4): 209 - 218.
- [8] SAYGILI G, RATHJE E M. Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, **134**(6): 790 - 803.
- [9] RATHJE E M, SAYGILI G. Probabilistic assessment of earthquake-induced sliding displacements of natural slopes[J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 2009, **42**(1): 18 - 27.
- [10] 徐光兴, 姚令侃, 李朝红, 等. 基于汶川地震强震动记录的边坡永久位移预测模型[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(6): 1131 - 1136. (XU Guang-xing, YAO Ling-kan, LI Chao-hong, et al. Predictive models for permanent displacement of slopes based on recorded strong-motion data of Wenchuan Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(6): 1131 - 1136. (in Chinese))
- [11] BRAY J D, TRAVASAROU T. Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133**(4): 381 - 392.
- [12] KALKAN E, KUNNATH S K. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of building[J]. *Earthquake Spectra*, 2006, **22**(2): 367 - 390.
- [13] MALLAT S G. A wavelet tour of signal processing[M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- [14] BAKER J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, **97**(5): 1486 - 1501.
- [15] 谢俊举, 温增平, 李小军, 等. 基于小波方法分析汶川地震近断层地震动的速度脉冲特性[J]. *地球物理学报*, 2012, **55**(6): 1963 - 1972. (XIE Jun-ju, WEN Zeng-ping, LI Xiao-jun, et al. Analysis of velocity pulses for near-fault strong motions from the Wenchuan earthquake based on wavelet method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, **55**(6): 1963 - 1972. (in Chinese))
- [16] HOWARD J K, TRACY C A, BURNS R G. Comparing observed and predicted directivity in near-source ground motion[J]. *Earthquake Spectra*, 2005, **21**(4): 1063 - 1092.
- [17] SHAHI S K, BAKER J W. An empirically calibrated framework for including the effects of near-fault directivity in probabilistic seismic hazard analysis[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, **101**(2): 742 - 755.
- [18] RATHJE E M, FARAJ F, RUSSELL S, et al. Empirical relationship for frequency content parameters of earthquake ground motions[J]. *Earthquake Spectra*, 2004, **20**(1): 119 - 144.
- [19] KOTTKE A R, RATHJE E M. Technical manual for strata[R]. Berkeley: University of California, 2008.
- [20] DARENDELI M B, STOKOE K H. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves[R]. Austin: University of Texas, 2001.