# 近断层地震动作用下土质边坡动力响应研究。

宋 健<sup>1,2</sup>, 高广运<sup>1,2</sup>, 陈青生<sup>3</sup>, 赵 宏<sup>1,2</sup>

 (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; 3.上海建工集团股份有限公司,上海 200050)

摘 要:根据汶川地震中滑坡多沿断层分布的特点,利用 FLAC 有限差分软件建立了一个土质边坡 动力数值分析模型,分别研究了具有向前方向性效应、滑冲效应和无速度脉冲的近断层地震动作用 下边坡的动力响应。结果表明:含速度脉冲地震动对边坡的破坏作用远强于无速度脉冲地震动,且 具有滑冲效应的地震动引起的边坡动力响应稍大于向前方向性效应地震动。近断层地震作用下, 边坡水平方向绝对峰值加速度分布存在沿高程放大效应。具有向前方向性效应的地震动会增强边 坡加速度的高程放大效应而具有滑冲效应的地震动则在一定程度上削弱了这种放大效应,且边坡 中下部绝对峰值加速度值相对于向前方向性效应地震动和无速度脉冲地震动引起的绝对峰值加速 度值较大。

关键词: 土质边坡; 近断层地震动; 向前方向性效应; 滑冲效应; 动力响应; FLAC 软件 中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2013)01-0062-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0062

### **Dynamic Response of Soil Slope under Near-fault Gound Motions**

SONG Jian<sup>1,2</sup>, GAO Guang-yun<sup>1,2</sup>, CHEN Qing-sheng<sup>3</sup>, ZHAO Hong<sup>1,2</sup>

(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; 3. Shanghai Construction Group, Shanghai 200050, China)

Abstract: On the basis of the distribution characteristics of landslides along the fault in the Wenchuan earthquake, the finite difference FLAC program was applied to analyze the dynamic response of the soil slope by using the nonlinear time-history method. Near-fault ground motions with the forward directivity effect, fling-step effect, and non-pulse were selected as seismic inputs. The results show that the potential damages to slopes caused by pulse-like ground motions are significantly greater than the cases with non-pulse ground motions, and the dynamic responses of slopes caused by fling-step pulses are slightly larger than those associated with forward directivity pulses. An amplification effect of the peak horizontal acceleration is apparent in the vertical direction of slope, and the amplification coefficient increases under forward directivity pulses and decreases under flin-step pulses. Furthermore, the peak horizontal acceleration at the bottom of slope induced by fling-step ground motions is larger than that of forward directivity or nonpulse ground motions.

Key words: Soil slope; Near-fault ground motions; Forward directivity effect; Fling-step effect; Dynamic response; FLAC

① 收稿日期:2012-03-20

基金项目:国家自然科学基金(51178342)

作者简介:宋 健(1988-),男(汉族),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方面的研究工作. E-mail: songjianhh1988@yahoo.com.cn

#### 0 引言

边坡工程具有高度大、坡度陡且大多位于多山 地带等特点。滑坡的发生会引起道路桥梁的掩埋、 建筑房屋的破坏等一系列工程灾害,对经济的建设、 人们的生命安全造成严重的影响。地震是引发边坡 失稳的重要原因之一,因此边坡的地震稳定性问题 受到普遍关注。

国内外学者对地震作用下边坡动力响应特征和 变化规律进行了深入研究,整体而言,主要以边坡动 力加速度、最终位移、动应力和动应变的大小和分布 作为评价边坡地震响应的参数。徐光兴等[1]利用 FLAC 3D 分析了地震作用下边坡的动力响应规律 以及地震动参数的影响,并与振动台模型试验进行 了对比;言志信等[2]分析了黄土边坡的地震响应;杨 庆华等[3] 对汶川地震中岩土体边坡的崩塌模式及机 理进行了总结;倪振强等<sup>[4]</sup>采用模型试验的方法研 究了地震作用下非贯通节理岩体斜坡的动力反应; 杨国香等<sup>[5]</sup>采用室内振动台模型试验研究了顺层及 均质结构岩质边坡在地震作用下的动力加速度响 应;郑颖人等<sup>[6]</sup>采用 FLAC 动力强度折减法,结合 具有拉和剪切破坏分析功能的 FLAC 3D 软件对地 震边坡破坏机制进行数值分析,结果表明边坡在地 震作用下破坏机制表现在边坡体的上部拉破坏和下 部的剪切破坏。然而,以上研究成果均未涉及近断 层地震动特性对边坡破坏的影响;刘红帅和薄景 山[7]以及祁生文[8]都曾指出边坡地震反应与输入地 震动的特性密切相关;Rodriguez-Marek<sup>[9]</sup>研究了 近断层地震动向前方向性效应对多层框架结构动力 响应的影响,证明了含向前方向性效应的近断层地 震动脉冲使结构产生更大的延展性需求;Kalkan 和 Kunnath<sup>[10]</sup>;杨迪雄等<sup>[11]</sup>通过对近断层向前方向性 与滑冲效应地震动作用下框架结构动力响应研究发 现近断层地震动对结构的破坏作用更强,其产生地 震危害性更大;张鹏等[12]通过对汶川地震中滑坡灾 害的现场测绘、图像采集,认为灾区滑坡破坏特征与 近断层地震动效应存在密切联系,且近断层地震滑 坡与远震滑坡在灾害机理与破坏形式上明显不同。 因此,研究近断层地震动作用下边坡的动力响应问 题具有重要的理论价值和工程意义。

本文利用 FLAC 有限差分软件建立了一个简 化的土质边坡模型,对边坡在近断层地震动作用下 的动力响应(剪应变增量、位移、加速度)进行了非线 性分析,得出了近断层地震动向前方向性效应及滑 冲效应对边坡动力响应参数的分布及变化规律的影响,为进一步研究近断层区域边坡的失稳破坏及近断层附近边坡抗震指标的完善提供了一定的参考性结论。

#### 1 汶川地震中滑坡分布调查

近年来国内外边坡地震破坏调查表明,近断层 地震动对边坡工程的破坏尤为明显,滑坡的分布与 发震断层密切相关。图1为2008年汶川地震中滑 坡数与断层距的关系<sup>[13]</sup>。由图可知,80%以上的滑 坡发生在断层距小于15 km的区域,且滑坡整体上 沿龙门山逆冲断层呈带状分布,位于断层上盘的边 坡破坏程度远大于下盘场地。这说明边坡的失稳破 坏与近断层地震动存在密切联系。近断层地震动由 于其低频成份丰富、特征周期长,具有向前方向性速 度脉冲效应和滑冲效应,在振幅、频谱和持时等方面 与远场地震动有明显的差别,对结构的破坏作用也 更强。因此,近断层区域边坡工程的地震响应与远 场地区差别很大,破坏结果也可能更为显著。



图1 滑坡比例与断层距的关系[11]



#### 2 边坡地震响应数值模拟

#### 2.1 计算模型及参数选取

为了研究近断层地震动作用下边坡动力响应的



一般规律,采用一个简化边坡模型<sup>[1]</sup>,坡高 H=20 m,坡角  $\alpha = 34^{\circ}$ , 坡顶后缘长度 B = 80 m。采用 FLAC 5.0 建立边坡动力数值模型,如图 2 所示。 对模型进行静力计算获得自重应力场后,进行边坡 时域地震响应计算。为防止固定边界导致的地震波 在边界处的反射,且允许必要的能量耗散,模型底部 采用静态边界,两侧采用自由场边界。表1为边坡 土体的初始物理力学参数,施加荷载后土体服从理 想弹塑性本构关系,屈服函数为 Mohr-Coulomb 强度准则,并采用相关联流动法则。至于土体的非 线性,是基于 Idriss 和 Seed<sup>[14]</sup>提出的等效线性方 法。本文采用的是 FLAC 5.0 提供的 Default 模型 确定剪切模量随剪应变的变化关系,具体内容可见 参考文献[15]。由于本文重点是分析近断层地震动 特性对边坡动力响应的影响,因此模型简化为均质 土体。为了得到近断层地震动作用引起的边坡动力 响应分布及变化规律,在坡面及坡体中部 B/2 处沿 竖直方向设置计算控制点。

表1 边坡土体参数

Table 1	Parameters	of s	slope soi	i.
---------	------------	------	-----------	----

幺粉	密度/	体积模量	剪切模量	34 <del>1</del> 0 LV	粘聚力/	内摩擦
奓奴	[kg. m <sup>-3</sup> ]	/MPa	/MPa	阳松比	kPa	角/°
数值	1 900	120	49.4	0.32	13.1	28

#### 2.2 近断层地震动参数

由于汶川地震与台湾集集地震均为挤压推覆构 造环境下发生的逆断层型地震<sup>[16]</sup>。因此,本文选取 台湾集集地震(1999年9月21日,震级 $M_w$ =7.6) 的近断层地震动记录 TCU051-EW、TCU052-EW、TCU054-EW、TCU068-EW、TCU068NS, TCU071 – EW, TCU078 – EW, TCU082 – EW、TCU089 - EW 作为地震动输入。其中, TCU051-EW、TCU054-EW、TCU082-EW 为 具有 向 前 方 向 性 脉 冲 地 震 动, TCU052 - EW、 TCU068-EW、TCU068-NS 为具有滑冲效应脉 冲地震动,TCU071-EW、TCU078-EW、TCU089 -EW 为无速度脉冲地震动。表 2 列出了三组近断 层地震动的特性参数。其中 PGA、PGV 和 PGD 分 别为峰值地面加速度、峰值地面速度及峰值地面位 移。图 3 分别描述了典型的含向前方向性效应、滑 冲效应以及无速度脉冲效应的地震动加速度、速度 及位移时程曲线。由图可知,图 3(a)以 TCU051-EW 为代表的含破裂向前方向性脉冲,具有明显的 速度和位移脉冲,而目脉冲曲线呈双向往复形式,双 向振动幅值基本一致,地震动最终位移趋向于0;图 3(b)以 TCU052-EW 为代表的含滑冲效应脉冲, 具有明显的速度脉冲,且脉冲曲线呈单向运动形式, 地震动最终位移趋于某一定值,即产生了永久地面 变形。

为了分析近断层地震动对边坡动力响应的影 响,同时保留三组地震动各自原有的特性,动力数值 计算时将输入地震波峰值加速度均调整为统一值。 考虑到过大的地震动将直接导致边坡模型失稳破 坏,图 4 为滑冲效应 TCU052-EW 原始的地震动 作用下边坡的动力计算结果,在计算到 40 s 左右时 已发生滑坡。因此,为了更细致地研究近断层地震 动特性对边坡动力响应分布及变化规律的影响,本 文计算时取统一调整峰值加速度为 0.2 g。

表 2 三组近断层地震动的特性参数

Table 2	Property parameters	of near-fault	ground motions	included in t	ha dynamic	analycie	of elo	no
Table 2	roperty parameters	s of near-raun	, ground motions	s included in t	ne dynamic	anaiysis	OL SIU	pe

地震动特征	台站及分量	断层距/km	PGA/g	$PGV/[\text{cm. s}^{-1}]$	PGD/cm	PGV/PGA/s
	TCU051-EW	6.95	0.160	51.53	124.52	0.27
向前方向任 效应脉冲	TCU054 - EW	4.64	0.146	45.69	121.47	0.32
	TCU082-EW	4.47	0.226	51.54	152.35	0.23
滑冲效应脉冲	TCU052 - EW	1.84	0.356	182.96	506.73	0.52
	TCU068-EW	3.01	0.505	279.88	709.11	0.57
	TCU068-NS	3.01	0.365	291.94	867.76	0.82
无速度脉冲	TCU071-EW	4.88	0.528	69,83	170,60	0.08
	TCU078-EW	8.27	0.442	42.14	98.88	0.10
	TCU089-EW	8.33	0.354	45.43	194.62	0.13

#### 3 近断层地震动作用下边坡动力响应分析

将选定的三组近断层地震动作为输入对边坡模 型进行地震响应分析,主要探讨不同近断层地震动特 性对坡体剪应变增量、坡体位移响应以及坡体加速度 响应分布及变化规律的影响。

#### 3.1 坡体剪应变增量

图 5 为三种近断层地震动作用下边坡最终剪应 变增量云图。由图可知,地震初始阶段剪应变增量最 大区域主要集中在坡脚附近,随着地震的持续该区域 逐渐向坡体内部发展,最终在坡面内形成一条剪应变



图 3 输入三种典型近断层地震动时的加速度、速度及位移时程曲线

Fig. 3 Acceleration, velocity and displacement time histories for inputing three different near-fault ground motions.

增量较明显的弧形带状分布区域。说明在近断层地 震动作用下,均质土体边坡破坏形态仍是沿着某一潜 在的弧形滑动面失稳。

对比含向前方向性效应脉冲、滑冲效应脉冲以及 无速度脉冲型近断层地震动作用下坡体的终态剪应 变增量可以看出,相同峰值加速度的地震动作用下, 两种速度脉冲型地震动引起的坡体剪应变增量远大 于无速度脉冲型地震动,且前者已形成完整的滑动 面,延伸至坡顶附近,而后者剪应变增量幅值仍集中 在坡脚附近处,尚未形成明显的滑动面。说明脉冲型 地震动对边坡的破坏作用远大于非脉冲型地震动。 由滑冲效应地震动引起的坡体剪应变增量幅值大于 由向前方向性效应引起的坡体剪应变幅值,滑动面的 位置基本一致。

#### 3.2 坡体位移响应

跟踪坡面各计算控制点的水平位移时程,可以发

震工程学报

2013 年



现,地震动结束时坡面各点产生了永久位移。图6为 不同地震动作用下坡面最终水平位移随高度的变化 规律。由图可知,三组地震动作用下坡体最大位移均 发生在坡脚附近。速度脉冲型地震动引起的坡面永 久位移远大于无速度脉冲型地震动;而滑冲效应地震 动引起的坡面位移略大于由向前方向性效应引起的 坡面位移。对比三组地震动引起的坡面位移随高度 的变化规律可以发现,滑冲效应脉冲作用下位移随高 度的增大而减小的幅度要大于向前方向性效应脉冲, 且坡脚的位移较大,TCU068-EW 滑冲效应脉冲引

起的坡脚永久位移甚至大于坡肩处位移。无速度脉 冲地震动引起的坡面位移沿坡体高度先增大,然后基 本保持不变,这主要是因为无速度脉冲地震动尚不能 使坡体产生完整的破裂带,坡体永久位移最大值分布 也没有速度脉冲型地震动明显。

#### 3.3 坡体加速度响应

图 7 和图 8 分别给出了坡面和坡体 B/2 处各监 测点的水平方向绝对峰值加速度随高度的变化曲线。 可以看出,三组近断层地震动作用下边坡对输入地震 波存在垂直放大和临空面放大效应的规律[1-2]。但坡 体峰值加速度沿高度的变化规律存在明显差异:向前 方向性效应脉冲作用下,坡面及坡体内峰值加速度沿 高度增加趋势较明显;而滑冲效应脉冲作用下,峰值 加速度沿高程的变化幅度较小,坡体中下部的峰值加 速度值也较大;无速度脉冲地震动引起的坡体峰值加 速度随坡体高度的增加先减小后增大,这可能与无速 度脉冲地震动的频谱特征有关。因此,具有向前方向 性效应的地震动会增大边坡加速度沿高程的放大效 应;而具有滑冲效应的地震动则在一定程度上削弱了 这种放大效应,且边坡中下部峰值加速度值相对于向 前方向性效应地震动和无速度脉冲地震动引起的峰 值加速度值较大。图 6 的坡体水平位移响应分析也 说明了这一点。

为了更清晰地了解三组近断层地震动作用下坡 体峰值加速度的分布规律,表3和表4分别列出了不 同地震动引起的边坡坡面及 B/2 处水平加速度峰值 的放大系数,即坡顶加速度峰值与坡底加速度峰值的 比值。可以看出,向前方向性效应脉冲引起的坡体峰 值加速度放大系数远大于滑冲效应脉冲及无速度脉

> 表 3 不同近断层地震动输入时坡面水平 加速度峰值放大系数

Table 3 Amplification coefficient of peak horizontal acceleration at slope surface for different input near-fault ground motions

地震动特征	台站及分量	加速度放 大系数	加速度放大 系数平均值
	TCU051-EW	1.327	
句前方向性效应脉冲	TCU054-EW	1.203	1.315
	TCU082-EW	1.414	
	TCU052-EW	1.027	
滑冲效应脉冲	TCU068-EW	1.091	.097
	TCU068-NS	1.175	
	TCU071-EW	1.100	
无速度脉冲	TCU078-EW	1.106	.105
	TCU089-EW	1.109	



不同近断层地震动输入时坡面最终水平位移随高度的变化 图 6

Fig. 6 Variation of permanent horizontal displacements along the slope surface for three input near-fault ground motions.



不同近断层地震动输入时坡面水平方向绝对峰值加速度随高度的变化 图 7

Fig. 7 Variation of peak horizontal acceleration along the slope surface for different input near-fault ground motions.





冲,而滑冲效应脉冲作用下的坡体峰值加速度放大 系数最小。

结论

4

## 冲型近断层地震动作用下,坡体剪应变增量远大于 无速度脉冲型地震动,且前者已形成清晰完整的滑 动面,延伸至坡顶附近,而后者剪应变增量幅值仍集 中在坡脚附近处,尚未形成明显的滑动面。

#### (1) 具有向前方向性效应和滑冲效应的速度脉

(2) 速度脉冲型地震动引起的坡面永久位移远

大于无速度脉冲型地震动,而滑冲效应地震动引起的坡面位移略大于由向前方向性效应引起的坡面位移。滑冲效应脉冲作用下,位移随高度的增大而减小的幅度也要大于向前方向性效应脉冲,且坡脚的位移较大。

(3)具有向前方向性效应的地震动会增强边坡 加速度沿高程的放大效应;而具有滑冲效应的地震 动则在一定程度上削弱了这种放大效应,且边坡中 下部峰值加速度值相对于向前方向性效应地震动和 无速度脉冲地震动引起的峰值加速度值较大。

- 表 4 不同近断层地震动输入时坡体 B/2 处水平加速度 峰值放大系数
- Table 4Amplification coefficient of peak horizontal<br/>acceleration in vertical direction at the position<br/>of B/2 of slope for different input near-fault<br/>ground motions

山骨山林行		加速度放大加速度放大			
地展动符征	百站及分重	系数	系数平均值		
	TCU051-EW	1.569			
向前方向性效应脉冲	TCU054-EW	1.402	1.550		
	TCU082-EW	1.698			
	TCU052-EW	1.024			
滑冲效应脉冲	TCU068-EW	1.186	.124		
	TCU068-NS	1.163			
	TCU071-EW	1.092			
无速度脉冲	TCU078-EW	1,227	.148		
	TCU089-EW	1.125			

(4)整体而言,含速度脉冲地震动对边坡的破坏作用远强于无速度脉冲地震动,在边坡抗震分析和设计中应将近断层地震动与一般的远场地震动区分对待。

值得指出的是,本文的结论仅仅针对一个均质 土层边坡简化模型,而实际工程中边坡的形态和坡 体材料是很复杂的,因此近断层地震动特性对边坡 动力响应的影响还需要针对具体工程进一步分析。

#### [参考文献]

- 徐光兴,姚令侃,李朝红,等.边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J].岩土工程学报,2008,30(6):918-923.
   XU Guang-xing, YAO Ling-kan, LI Zha-hong, et al. Dynamic Response of Slopes under Earthquakes and Influence of Ground Motion Parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 918-923.
- [2] 言志信,曹小红,张刘平,等. 地震作用下黄土边坡动力响应 数值分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(Supp. 2): 610-614.

YAN Zhi-xin, CAO Xiao-hong, ZHANG Liu-ping, et al. Numerical Analysis of Loess Slope Dynamic Response under Earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp. 2): 610-614.

- [3] 杨庆华,姚令侃,邱燕玲,等. 高烈度地震区岩土体边坡崩塌动 力学特性研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1): 33-39. YANG Qing-hua, YAO Ling-kan, QIU Yan-ling, et al. Research on Dynamical Characteristics of Collapse of Rock and Soil Slope in High Seismic Intensity Areas[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1): 33-39.
- [4] 倪振强,孔纪名,阿发友. 地震作用下非贯通节理岩体斜坡破 坏的物理模型试验研究[J]. 西北地震学报,2012,34(3): 209-214.

NI Zhen-qiang, KONG Ji-ming, A Fa-you. Physical Model Test of Rocky Slope Failure Containing Intermittent Joints under Earthquake action[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3): 209-214.

[5] 杨国香,伍法权,董金玉,等.地震作用下岩质边坡动力响应 特性及变形破坏机制研究[J].岩石力学与工程学报,2012, 31(4):696-702.

YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, DONG Jin-yu, et al. Study of Dynamic Response Characters and Failure Mechanism of Rock Slope under Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 696-702.

- [6] 郑颖人,叶海林,黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分 析探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(8):1714-1723. ZHENG Ying-ren, YE Hai-lin, HUANG Run-qiu. Analysis and Discussion of Failure Mechanism and Fracture Surface of Slope under Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1714-1723.
- [7] 刘红帅,薄景山,刘德东. 岩土边坡地震稳定性分析研究评述
  [J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1): 164-171.
  LIU Hong-shuai, BO Jing-shan, LIU De-dong. Review on Study of Seismic Stability Analysis of Rock-soil Slopes[J].
  Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25 (1): 164-171.
- [8] 祁生文.单面边坡的两种动力反应形式及其临界高度[J].地 球物理学报,2006,49(2):518-523.
   QI Sheng-wen. Two Patterns of Dynamic Responses of Singlefree-surface Slopes and Their Threshold Height[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2):518-523.
- [9] Reza Sehhati, Adrian Rodriguez-Marek, Mohamed ElGawady, et al. Effects of Near-fault Ground Motions and Equivalent Pulses on Multi-story Structures[J]. Engineering Structures, 2011, 33(3): 767-779.
- [10] 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.

- [10] Lysmer J, Kulemeyer R. Finite Dynamic Model for Infinite Media[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1969, 95: 759-877.
- [11] LIU Jing-bo, LÜ Yan-dong. A Direct Method for Analysis of Dynamic Soil-structure Interaction Based on Interface Idea [A]// Proceedings of the Chinese-Swiss Workshop on Dynamic Soil-Structure Interaction[C]. Beijing: International Academic Publishers, 1997.
- [12] 杜修力,赵密,王进廷.近场波动模拟的人工应力边界条件
  [J].力学学报,2006,38(1):49-56.
  DU Xiu-li, ZHAO Mi, WANG Jin-ting. A Stress Artificial Boundary in FEA for Near-field Wave Problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 49-56.
- [13] 廖振鹏. 工程波动理论导论(第二版)[M]. 北京:科学出版 社,2002.
   LIAO Zhen-peng. Introduction to Wave Motion Theories for Engineering (Second Edition)[M]. Beijing: Science Press,
- [14] DU Xiu-li, ZHAO Mi, A local Time-domain Transmitting Boundary for Simulating Cylindrical Elastic Wave Propagation in Infinite Media[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(10): 937-946.
- [15] ZHAO Mi, DU Xiu-li, LIU Jing-bo, et al. Explicit Finite Element Artificial Boundary Scheme for Transient Scalar Waves in Two-dimensional Unbounded Waveguide[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2011, 87 (11): 1074-1104.

# (上接 68 页)

[11] 江义,杨迪雄,李刚. 近断层地震动向前方向性效应和滑冲 效应对高层钢结构地震反应的影响[J]. 建筑结构学报, 2010,31(9);103-110.

> JIANG Yi, YANG Di-xiong, LI Gang. Effects of Forward Directivity and Fling Step of Near-fault Ground Motions on Seismic Responses of High-rise Steel Structure[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 103-110.

- [12] 张鹏,陈新民,王旭东. 近断层地震动与汶川地震灾区滑坡 破坏特征分析[J]. 南京工业大学学报, 2009, 31(1): 55-59. ZHANG Peng, CHEN Xin-in, WANG Xun-dong. Analysis of Near-fault Ground Motion and Seismic Landslide Failure Mode in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Najing University of Technology, 2009, 31(1): 55-59.
- [13] 袁一凡,孙柏海. 汶川 8.0 级地震工程震害概览[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(增刊): 1-118.
   YUAN Yi-fan, SUN Bai-tao. General Introduction of Engineering Damage of Wenchuan M<sub>S</sub> 8.0 Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28

(Supp): 1-118.

2002.

- Idriss I M, Seed H B. Seismic Response of Horizontal Soil Layers[J]]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(SM4): 1003-1029.
- [15] 刘波,韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
   LIU Bo, HAN Yan-hui. FLAC Principle Instanxes and Application Guide[M]. Beijing, China Communication Press, 2005.
- [16] 刁桂苓,徐锡伟,陈于高,等. 汶川 Mw7.9 和集集 Mw7.6 地震前应力场转换现象及其可能的前兆意义[J]. 地球物理 学报, 2011, 1(54): 128-136.
  DIAO Gui-ling, XU Xi-wei, CHEN Yue-gao, et al. The Precursory Significance of Tectonic Stress Field Transformation before the Wenchuan Mw7.9 Earthquake and the Chi-Chi Mw7.6 Earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 1(54): 128-136.