

近断层速度脉冲对隧洞工程 动力响应的影响规律

白现军¹, 王太兴¹, 卫鑫¹, 赵武胜²

(1. 中国葛洲坝集团第三工程有限公司, 陕西 西安 710000;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 基于近断层速度脉冲与相位差谱的统计规律, 提出一种脉冲型地震动人工合成方法, 该方法能够确保合成地震波时域与频域的非平稳性。在此基础上, 依托巴基斯坦 N-J 水电站, 采用数值仿真方法研究方向性效应速度脉冲对引水隧洞的影响。结果表明: 低频速度脉冲更接近围岩的自振频率, 能够显著提高衬砌的内力, 具有较强的破坏性。在近断层隧洞等地下工程的抗震设计中需要考虑断层的速度脉冲分量。

关键词: 断层; 速度脉冲; 隧洞; 地震响应

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A

Effect of the velocity pulse on the seismic response of the tunnel

BAI Xianjun¹, WANG Taixing¹, WEI Xin¹, ZHAO Wusheng²

(1. No. 3 Engineering Co., Ltd., China Gezhouba Group, Xi'an 710000, Shaanxi, China;
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: Based on the statistical characteristics of the velocity pulse near the fault and the phase difference, a synthetic method of pulse-like ground motion was proposed. This method could ensure that the synthetic record was non-stationary both in time domain and frequency domain. Based on the N-J hydropower station in Pakistan, the effect of the velocity pulse on the seismic responses of the tunnel were studied by numerical simulation. The results showed that the seismic response of the tunnel was significantly influenced by the velocity pulse. When considering the velocity pulse, the internal forces in tunnel liner increased remarkably, and the damage to the tunnel liner became more serious. The velocity pulse should be considered in anti-seismic design for the tunnels near the faults.

Key words: fault; velocity pulse; tunnel; seismic response

0 引言

随着“一带一路”战略的不断推进, 将有一大批水电、交通等重大基础设施建设相继在喜马拉雅山脉兴建。而喜马拉雅山脉地质构造复杂, 地壳运动剧烈, 地震断裂带发育, 地震活动频发。水电引水隧洞、交通隧道等地下工程受到围岩强约束作用的影响, 抗

震性能优于地面结构, 但历次大地震中, 如 1995 年日本阪神地震^[1]、1999 年土耳其地震^[2]、1999 年台湾 Chi-Chi 大地震^[3]及 2008 年汶川地震^[4], 均有大量隧道等地下工程遭到严重破坏的实例。近场区存在发震断层时, 近断层区地震动强烈且带有明显速度脉冲, 是造成地下工程损坏的重要因素。因此, 开展近断层地震作用下地下工程的震害机理研究, 具有较高的理论与运用价值。

收稿日期: 2017-01-16; 网络出版时间: 2017-03-01 15:08:27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/37.1391.T.20170301.1508.006.html>

作者简介: 白现军(1969—)男, 重庆人, 高级工程师, 主要研究方向为水利水电工程和地下工程施工技术. E-mail: 643138994@qq.com

在近断层场区, 当断层破裂方向指向场区时, 该场区内的地震动会具有方向性效应; 同时, 断层破坏过程中, 断层两侧的构造运行会产生滑冲效应。方向性效应与滑冲效应均会产生大幅值、低频率的速度脉冲, 且滑冲效应产生的脉冲具有残余位移^[5]。由于速度脉冲对场区破坏性较大, 随着地震工程界对速度脉冲认识的不断深入, 许多学者针对脉冲信号的识别方法^[6-7]、脉冲特征^[8-11]进行了研究, 并提出相应的数学模型^[12-14], 进一步研究速度脉冲对地面结构的影响^[15-18]。但针对速度脉冲对地下工程地震响应影响的研究还很少, 为此, 本研究提出近断层速度脉冲的合成方法, 并在此基础上研究速度脉冲对引水隧洞动力响应的影响规律。相关研究成果将对近断层区引水隧洞的抗震设计起到一定指导作用。

1 近断层脉冲型地震动的合成

近几十年以来, 全球范围内发生了数次破坏性极强的地震, 大量针对近场区地震动的研究成果表明: 近场地震动与远场地震动有显著的差异, 近场地震动表现出明显的方向性效应、滑冲效应、速度脉冲、上盘效应以及竖向地震动效应。这些特性使得近场地震动较远场地震动具有更强的破坏性。

方向性效应一般认为是由于断层破裂导致。由于断层破裂具有方向性, 在垂直破裂方向与平行破裂方向上地震动的频率将会产生显著差异, 多见于走滑断层地表破裂的两端; 而滑冲效应将会引起沿断层滑移方向的永久地面位移。方向性效应与滑冲效应直接的结果是引起速度脉冲, 导致近场地震动的破坏性大幅增加。

近断层地震动的速度脉冲效应引起了国际学者的广泛关注与重视, 对近场地震动的描述主要通过人工合成方法。近场地震动包含丰富的频谱成分, 与远场相比, 近场地震动中包含大量高频分量; 由于断层的方向性效应与滑冲效应, 近场地震动中又包含显著的低频长周期分量。

MAVROEIDIS G P 等人^[19]通过统计大量脉冲型地震动规律, 提出以下近场地震动的速度脉冲模型

$$v(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right) \right] \cos[2\pi f_p(t-t_0) + \nu], & t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p}; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 为主要控制脉冲的幅值; f_p 为脉冲的频率, 它与脉冲持时也有关系; ν 为脉冲信号的初相位; γ 为与脉冲振荡性有关的参数; t_0 为控制脉冲的发生时刻。

根据文献[13, 19]的研究成果, A 的取值范围较广, 从几十 cm 至几百 cm 不等; 而脉冲周期 $T_p = 1/f_p$, 取值范围一般小于 10 s, 且由滑冲效应引起的脉冲周期一般较方向性效应引起的脉冲周期大; γ 的取值范围一般为 1~3; 初相位在 $0 \sim 2\pi$ 均匀分布。

基于文献[19]中提出的近场地震动的速度脉冲模型, 考虑近断层速度脉冲的产生机理, 提出了下列近断层脉冲型地震动的合成方法:

(1) 根据文献[12, 20]对近场地震动频率的研究成果, 假定地震动的幅值谱服从对数正态分布, 基于震中距为 D , 震级 M_w , 通过编制程序得到地震动的幅值谱 $A(w)$ 。

(2) 为考虑地震动频域的非平稳性, 引入相位差谱。假定相位差谱服从对数正态分布, 通过编制程序得到地震动的相位差谱 dw 。

(3) 采用傅里叶反变换, 合成地震动的高频分量 a_h 。

(4) 采用 MAVROEIDIS G P 等人^[19]提出的近场地震动的速度脉冲模型, 采用工程类比法合成工程场区的速度脉冲, 并对速度脉冲进行求导得到地震动低频分量的时程 a_l 。

(5) 将(3)中得到的高频分量与(4)得到的低频分量叠加, 得到工程场区的地震动时程 $a = a_h + a_l$ 。

采用上述方法合成的高频率成分不仅在时域内是非平稳的, 在频域内也是非平稳的。该方法避免了传统三角级数法合成的信号需采用强度包络线进行二次校准的缺陷。

2 速度脉冲对隧洞动力响应的影响

2.1 依托工程简介

巴基斯坦 N-J 水电站地处克什米尔地区 Muzaffarabad 市附近, 上游大坝位于 Neelum 河上, 下游地下厂房位于 Jhelum 河畔。N-J 水电站最大输出功率为 963 MW, 标称最大流量为 $280 \text{ m}^3/\text{s}$, 年均发电量为 $5\,150 \text{ GW} \cdot \text{h}$ 。水电站建成后将极大缓解巴基斯坦用电紧张的局面。

水电站引水隧洞全长约 28.5 km, 其中, Nauseri 隧洞设计为双洞, 隧洞间距 25 m, 隧洞单条长度约 11.5 km, 输水隧洞开挖断面为圆形, $\varphi = 8.53 \text{ m}$ 。

2.2 场区地震危险性评价

巴基斯坦 N-J 水电工程所在区域构造运动强

烈、地震活动频繁,2005-10-08发生7.6级的克什米尔大地震,震中位于克什米尔地区,发震断层距工程场区不足10 km。工程项目遭受强震的风险较大,根据设计报告,危险性级别被定为IV级(极高)。对于IV级建筑,须明确其加速时程并描绘其特定断层特征,如近场效应或方向性效应。

抗震设计的目的在于提出合理的工程抗震设防水准,确保在运行基准地震(operating basis earthquake, OBE)发生时,隧洞仍可继续运转且易于修复;同时,确保在最大可信地震(maximum credible earthquake, MCE)发生时不会造成灾难性损失。根据文献[15],采用具有200 a重现周期的地震动作为水电站的设计依据,200 a重现周期地震具有100 a内40%超越概率。对地下工程:运行基准地震动峰值加速取 $0.17g$ (g 为重力加速度),最大可信地震动峰值加速取 $0.4g$ 。

采用本研究中提出的近断层脉冲型地震动的合成方法,合成的高频与低频脉冲信号如图1与图2所示。

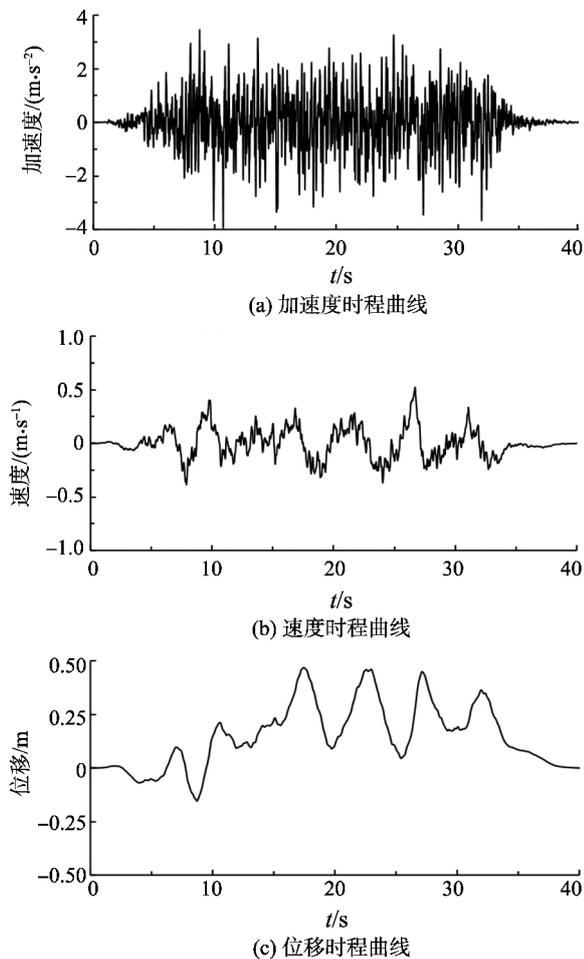


图1 合成的高频分量

Fig. 1 High-frequency content of synthetic record

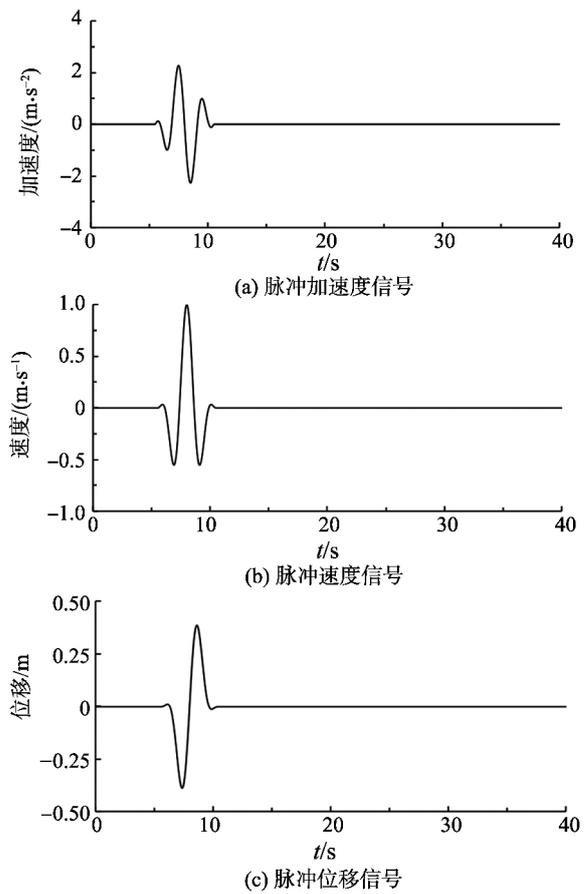


图2 合成的低频脉冲分量

Fig. 2 Low-frequency pulse of synthetic record

2.3 计算模型与参数

地下工程由于受到周围围岩的约束作用,其抗震性能随着埋深的增加而增强,以往地下结构的震害也表明,地下结构的震害主要发生在浅埋、破坏段的洞口及断层错动区。为此,本次分析选取埋深较浅部的洞口段(埋深取20 m)。采用大型通用有限元软件ABAQUS,建立的计算模型如图3所示,模型长×宽×高=400 m×2 m×200 m。

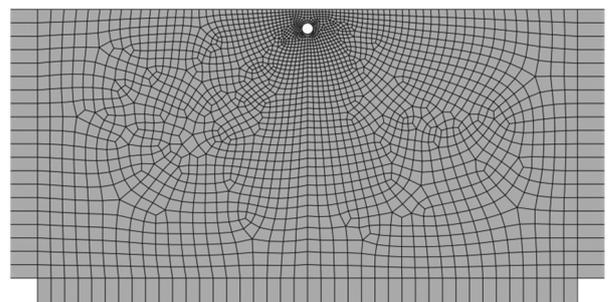


图3 计算模型

Fig. 3 Simulation model

围岩与衬砌均采用4节点线性单元,为模拟远场地基的辐射阻尼,在模型外侧施加了无限元人工边界。围岩采用Mohr-Coulomb理想弹塑性本构关系,衬砌采用混凝土损伤塑性模型^[21-23],围岩与衬

砌的物理力学参数见表 1。

表 1 围岩及衬砌力学参数

Table 1 Parameters of the surrounding rock and liner

类型	弹性模量/ GPa	泊松比	粘聚力/ MPa	摩擦角/ (°)	剪胀角/ (°)
衬砌	25	0.20	1.5	50	20
围岩	5	0.27	1.3	38	4

模拟计算过程分为 3 步。(1) 初始地应力平衡分析: 通过对单元施加初始应力, 使整个模型范围内围岩的应力达到原岩应力。(2) 开挖与支护分析: 模拟隧洞施工过程中围岩的应力释放及变形、衬砌的施工。(3) 遭受地震作用分析: 在底边界处输入地震时程, 分析地震作用下围岩与衬砌的响应。

为考虑地震作用下有限域—无限域的动力相互作用, 防止地表反射波在底边界处再次反射影响分析区域, 本次模拟采用等效荷载输入方法^[24]。

2.3.1 衬砌内力

脉冲与非脉冲两类地震动作用下隧洞衬砌不同位置处的轴力与剪力如图 4、5 所示。从图 4、5 中可以看出, 拱肩与拱脚两位置的轴力、剪力明显大于其它位置, 这是由于在剪切地震作用下, 圆形隧洞变形成为卵形, 拱肩与拱脚受力最大。同时, 脉冲型地面作用下衬砌的内力明显大于无脉冲的情况, 最大增幅约为 20%, 证明低频速度脉冲对衬砌具有重要影响。

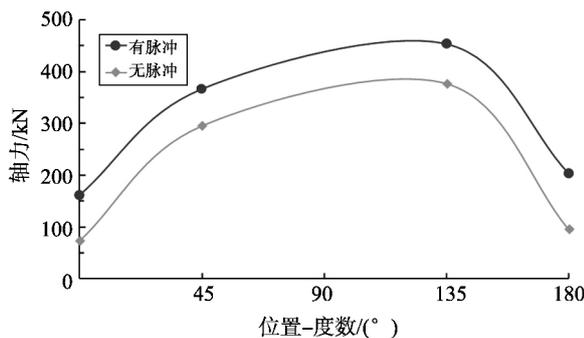


图 4 脉冲与非脉冲地震动作用下衬砌轴力对比
Fig. 4 Axial forces of tunnel liner under pulse-like and none-pulse ground motions

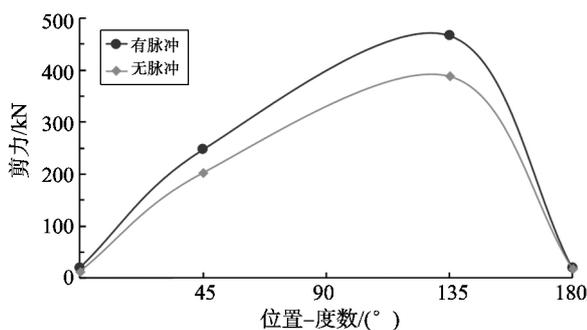


图 5 脉冲与非脉冲地震动作用下衬砌剪力对比
Fig. 5 Shear forces of tunnel liner under pulse-like and none-pulse ground motions

取拱肩与拱脚两处为监测位置分析地震过程中衬砌内力的变化规律。图 6~9 给出了这两个位置的单元应力时程曲线。对比图 6、8 可以看出: 尽管两类地震作用下衬砌的剪应力时程曲线较为类似, 但最大值及最大值的发生时刻均不相同, 拱肩处最大剪应力增加约 40%, 而最大值发生的时刻受到脉冲影响也发生了变化, 不考虑速度脉冲时, 最大值发生时刻为 15.2 s, 而考虑速度脉冲后, 最大值发生时刻为 8.8 s。对比图 7、9 可以发现, 考虑速度脉冲后拱脚处单元剪应力增加约 46%。

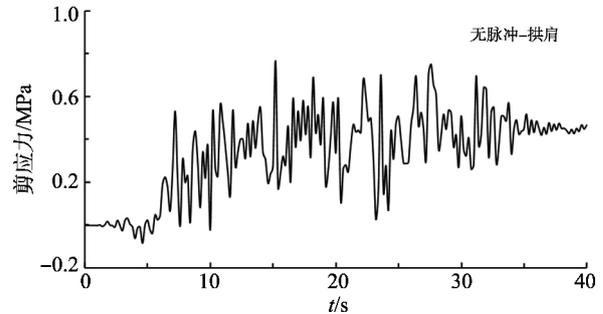


图 6 无脉冲地震动作用下衬砌拱肩单元应力时程
Fig. 6 Shear stress-time history at the shoulder of the tunnel liner under the none-pulse ground motion

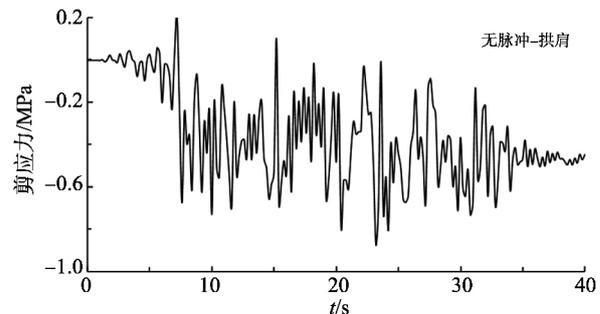


图 7 无脉冲地震动作用下衬砌拱脚单元应力时程
Fig. 7 Shear stress-time history at the knee of the tunnel liner under the none-pulse ground motion

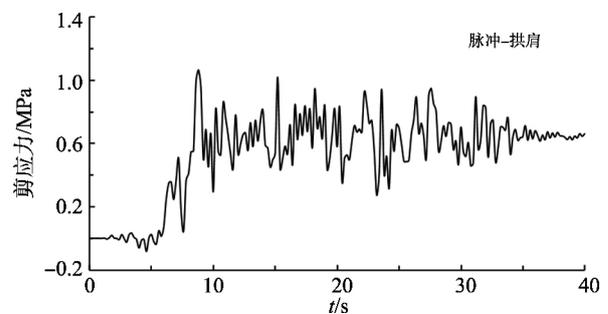


图 8 脉冲地震动作用下衬砌拱脚单元应力时程
Fig. 8 Shear stress-time history at the shoulder of the tunnel liner under the pulse-like ground motion

2.3.2 衬砌塑性区

图 10、11 分别给出了两类地震动作用下衬砌的塑性区分布。从图 10、11 中可以看出: 在非脉冲型地震作用下, 衬砌仅两侧拱脚处出现塑性区, 塑性区

面积较小。而考虑了速度脉冲后,两侧拱脚处塑性区范围增大,且两侧拱肩也出现了塑性破坏区。上述结果表明,速度脉冲对衬砌具有较强的破坏性。

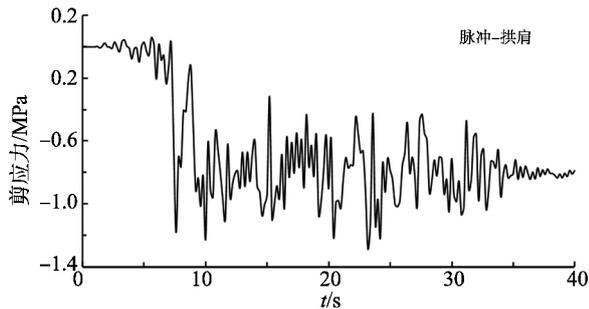


图9 脉冲地震动作用下衬砌拱脚单元应力时程
Fig. 9 Shear stress-time history at the knee of the tunnel liner under the pulse-like ground motion

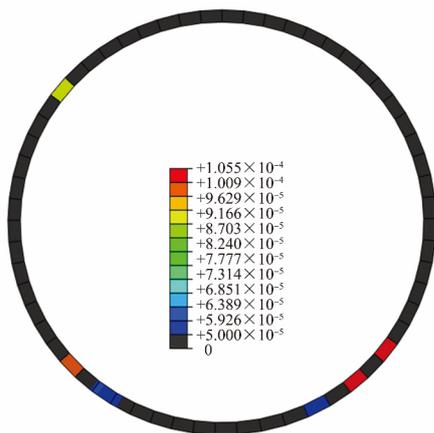


图10 非脉冲地震动作用下衬砌塑性区分布
Fig. 10 Plastic zone of the tunnel liner under the none-pulse ground motion

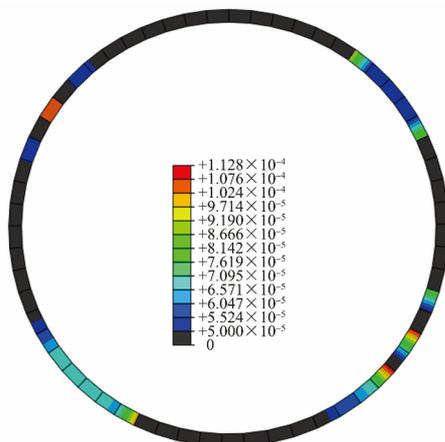


图11 脉冲地震动作用下衬砌塑性区分布
Fig. 11 Plastic zone of the tunnel liner under the pulse-like ground motion

3 结论

提出了近断层脉冲型地震动的人工合成方法,该方法引入了相位差谱的概念,不仅能够保证全成

信号时域的非平稳性,还能保证频域的非平稳性。由于低频脉冲信号更接近于场地的特征频率,近断层速度脉冲对隧洞地震响应的影响较大。考虑速度脉冲后,隧道衬砌的轴力、剪力及不同位置处应力均明显增加,从而导致衬砌塑性区面积大幅增加,衬砌破坏更严重。因此,对于近断层区隧洞的抗震设计,需要分析隧洞与发震断层之间位置关系,确定场区地震动是否会受方向性效应影响;同时还需考虑发震断层的特征,确定隧洞是否会受到滑冲效应的影响。

参考文献:

- [1] HUO H, BOBET A, FERNÁNDEZ G, et al. Load transfer mechanism between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the Daikai station[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(12): 1522-1533.
- [2] KONTOS S K, ZDRAVKOVIC L Z, POTTS DM P M, et al. Case study on seismic tunnel response[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 45(12): 1743-1764.
- [3] 陈正勋, 王泰典, 黄灿辉. 山岭隧道受震损害类型与原因之案例研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(1): 45-57.
CHEN Chengsun, WANG Taitien, HUANG Tsanhwei. Case study of earthquake-induced damage patterns of rock tunnel and associated reason[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(1): 45-57.
- [4] LI T. Damage to mountain tunnels related to the Wenchuan earthquake and some suggestions for aseismic tunnel construction[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, 71(2): 297-308.
- [5] TAHHIGHI H. Earthquake fault-induced surface rupture—a hybrid strong ground motion simulation technique and discussion for structural design[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011, 40(14): 1591-1608.
- [6] MUKHOPADHYAY S, GUPTA V K. Directivity pulses in near-fault ground motions—II: estimation of pulse parameters[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2013, 50(7): 38-52.
- [7] 李明, 谢礼立, 翟长海. 近断层脉冲型地震动重要参数的识别方法[J]. *世界地震工程*, 2009, 25(4): 1-6.
LI Ming, XIE Lili, ZHAI Changhai. Identification methods of important parameters for nearfault pulse type ground motions [J]. *World Earthquake Engineering*, 2009, 25(4): 1-6.
- [8] MUKHOPADHYAY S, GUPTA V K. Directivity pulses in near-fault ground motions—I: identification, extraction and modeling[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2013, 50(6): 1-15.

- [9] RODRIGUEZ-MAREK A, BRAY J D. Seismic site response for near-fault forward directivity ground motions [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(12): 1611-1620.
- [10] YAGHMAEI-SABEGH S, TSANG H H. An updated study on near-fault ground motions of the 1978 Tabas, Iran, earthquake ($w = 7.4$) [J]. *Scientia Iranica*, 2011, 18(4): 895-905.
- [11] WANG G Q, ZHOU X Y, ZHANG P Z, et al. Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2002, 22(1): 73-96.
- [12] VAEZ S R H, SHARBATDAR M K, AMIRI G G, et al. Dominant pulse simulation of near fault ground motions [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 12(2): 267-278.
- [13] 田玉基, 杨庆山, 卢明奇. 近断层脉冲型地震动的模拟方法 [J]. *地震学报*, 2007, 29(1): 77-84.
TIAN Yuji, YANG Qingshan, LU Mingqi. Simulation method of near-fault pulse-type ground motion [J]. *Acta seismologica sinica*, 2007, 29(1): 77-84.
- [14] SOKOLOV V, LOH C, WEN K. Empirical model for estimating Fourier amplitude spectra of ground acceleration in Taiwan region [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2000, 29(3): 339-357.
- [15] KALKAN E, KUNNATH S K. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings [J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(2): 367-390.
- [16] YOUSEFI M, TAGHIKHANY T. Incorporation of directivity effect in probabilistic seismic hazard analysis and disaggregation of Tabriz city [J]. *Natural Hazards*, 2014, 73(2): 277-301.
- [17] SEHHATI R, RODRIGUEZ-MAREK A, ELGAWADYI M, et al. Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(3): 767-779.
- [18] GHAHARI S F, JAHANKHAH H, GHANNAD M A. Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2010, 30(7): 536-546.
- [19] MAVROEIDIS G P. A mathematical representation of near-fault ground motions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(3): 1099-1131.
- [20] THRÁINSSON H, KIREMIDJIAN A S. Simulation of digital earthquake accelerograms using the inverse discrete Fourier transform [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 31(12): 2023-2048.
- [21] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. *Cement & Concrete Research*, 2008, 6(6): 773-781.
- [22] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.
- [23] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A Plastic-damage model for concrete [J]. *International Journal of Solids & Structures*, 1989, 25(3): 299-326.
- [24] 赵武胜, 陈卫忠, 郑朋强, 等. 地下工程数值计算中地震动输入方法选择及实现 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(8): 1579-1587.
ZHAO Wusheng, CHEN Weizhong, ZHENG Pengqiang, et al. Choice and implementation of seismic wave input method in numerical calculation for underground engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(8): 1579-1587.

(编辑: 章乐)