

地震动荷载作用下公路边坡永久位移

贾兴利¹,许金良¹,武丽娜²,韩跃杰¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064;

2. 林同棣国际工程咨询有限公司,重庆 401121)

摘要:针对地震动作用下影响公路边坡稳定性的关键因素,采用三维离散元动力响应分析方法,建立了公路边坡三维离散元模型,确定了动力计算的主要参数,选取不同坡高、坡度、岩层倾角以及不同地震波参数进行组合,研究了公路边坡在地震动荷载作用下永久动力位移的响应规律。研究表明:在坡高10~70 m范围内,边坡的永久动力位移随坡高的增大而单调增大;边坡坡度在50°左右时永久位移达到最大;边坡位移随着地震波频率增加而减少,当频率超过10 Hz时,边坡位移随频率的增加变化不大,趋于稳定;高烈度地震区路线边坡设计应控制边坡高度,避免50°左右的边坡坡度,宜选择小于30°的边坡设计;基于三维离散元的边坡永久动力位移分析方法计算结果准确可行。

关键词:道路工程;地震;边坡;永久位移;三维离散元

中图分类号:U416.14

文献标志码:A

Permanent displacement analysis of road slop under earthquake load

JIA Xing-li¹, XU Jin-liang¹, WU Li-na², HAN Yue-jie¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. T Y Lin International Engineering Consulting Co Ltd, Chongqing 401121, China)

Abstract: According to the key influencing factors of road slop stability under earthquake, the three-dimensional distinct element code model of road slop was set up by using dynamic response analysis method based on distinct element code, and the main parameters were defined. Different slope height, slope angle, rock inclination and seismic wave parameters were selected and combined, and the response disciplinarian of road slop permanent displacement under earthquake was studied. The results indicate that the permanent displacement of road slop increases with the increase slope height when the slope height is between 10 m and 70 m. The permanent displacement reaches the maximum while slope angle is about 50°. The larger seismic wave frequency is, the smaller slop displacement is. When the seismic wave frequency is larger than 10 Hz, slop displacement is stabilized. In high seismic intensity region, road slop height should be controlled, the slop angle smaller than 30° is appropriate. Therefore, the permanent displacement analysis method based on distinct element code is feasible. 6 tabs, 6 figs, 16 refs.

Key words: road engineering; earthquake; slop; permanent displacement; three-dimensional distinct element code

收稿日期:2014-06-10

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2009 318 000 102);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZD021,2013G1211003)

作者简介:贾兴利(1986-),男,山东济宁人,讲师,工学博士,E-mail:jxl0126@sina.com。

0 引言

地震诱发的滑坡、泥石流等地质灾害会引起大面积、大方量的边坡失稳,造成边坡下方道路的堵断、掩埋或路基滑移。地震动引起的边坡失稳,不仅给生命财产带来巨大的直接损失,而且阻断了救灾通道,加剧了震区灾情^[1]。公路边坡的永久位移作为边坡失稳的量化表征指标,可以为边坡稳定性评估和识别提供客观准确的可视化依据,成为震区公路抗震减灾的研究热点。

国外对边坡工程的研究主要集中在地震荷载作用下边坡的响应特征及稳定性分析上,主要分析方法包括拟静力法、New-mark 滑块分析法、数值模拟法^[2-3]。Gokmiza 在正常固结土边坡地震分析中应用拟静力法,采用参数分析确定了不同摩擦角的安全系数,并考虑了剪切强度降低的影响^[4];New-mark 法利用临界加速度来判断边坡稳定性,采用简单波形,发现滑块在矩形波、正弦波和三角形波作用下的永久位移与周期平方成比例^[5-6]。随着计算机技术的发展,多种数值模拟技术应运而生,其中有限单元法、离散单元法在边坡分析中应用最多。Seed 结合 San Fernando 地震期间大坝失稳的调查,结合线性和等级线性分析结果,提出了地震引发边坡变形的评估方法^[7];Li 等提出离散单元法,该法因适用于研究在准静力和动力条件下的节理系统或块体集合的力学分析,所以在边坡分析中应用最为普遍^[8];中国学者也展开了相应的研究,采用多种方法针对边坡稳定进行了建模仿真,取得了一定成果^[9-13]。总体来说,国内外早期的拟静力分析法将地震动荷载抽象成一个永久荷载,并不能反映地震作用的实际动力过程,缺乏针对边坡位移的考虑。后期发展的数值模拟方法很好地解决了拟静力法的缺点,但是已有研究在进行动力计算时未考虑公路边坡的工程特性,且多是基于二维离散元的稳定性分析。为此,本文采用三维离散元动力响应分析方法,研究地震动荷载作用下公路边坡的永久动力位移,分析边坡参数(坡高、坡角、岩层倾角)在地震动作用下对边坡永久动力位移的影响。根据永久动力位移响应规律提出震区公路合理的边坡坡度、高度值域。

1 模型与动力计算

1.1 三维离散元模型

参照公路工程常用的边坡参数取值范围,选取变化的坡高、坡度、岩层倾角,进行三维离散元公路

边坡地震动力响应分析,以求出边坡参数在地震动参数作用下对顺层岩体边坡地震永久位移的影响规律。考虑三维离散元理论要求和计算实际,本文假设研究边坡为单一不连续结构面(层面)的理想顺层岩质边坡,计算模型主剖面见图 1。根据公路边坡工程规定,最大边坡为 70 m,本文坡高 H 取值范围为 10~70 m,坡度 α 的取值范围为 $30^\circ \sim 80^\circ$,岩层倾角 β 的取值范围为 $20^\circ \sim 45^\circ (\alpha > \beta)$ 。

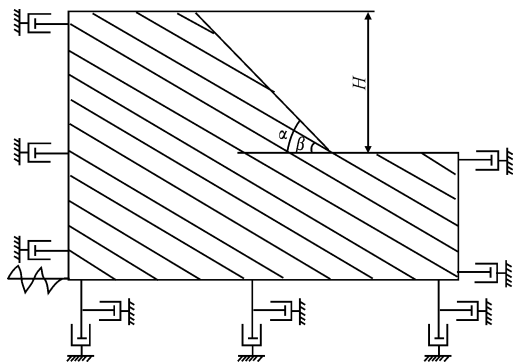


图 1 模型剖面

Fig. 1 Profile of model

离散单元法计算结果的精度与单元网格尺寸密不可分。原则上说,单元网格尺寸愈小,则离散单元法计算结果愈准确。可是,过小的单元网格尺寸会极大的影响计算速度,增加计算成本,延缓研究进度。因此,本文采用常用的有限差分三角形网格单元进行网格尺寸划分,即网格单元的尺寸 Δl 应不大于输入波的最短波长的 $1/10 \sim 1/8$,其计算如式(1)、式(2)所示。

$$\Delta l \leq 1/10\lambda \sim 1/8\lambda \quad (1)$$

$$l = \frac{c}{f} \quad (2)$$

式中: Δl 为沿着波传播方向差分网格单元的最大长度; λ 为最大频率下的波长; c 为波的传播速度; f 为波的频率。

在三维离散元中,网格尺寸允许输入波的最高频率 f_{\max} 满足式(3)才能保证在该系统中传播的波形不失真。

$$f = c/\lambda = c/10\Delta l \quad (3)$$

式中: c 值取 C_p 和 C_s 中的较小者,当无现场的实测波速值时, C_p 、 C_s 可以由式(4)、式(5)确定。

$$C_p = \sqrt{\frac{K+4G/3}{\rho}} \quad (4)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

式中: C_p 为纵波波速; C_s 为横波波速; K 为体积模

量; G 为剪切模量; ρ 为岩体密度。

按照上述网格尺寸划分计算模型中的参数要求,针对本文研究的离散单元网格尺寸进行计算,结果显示网格尺寸范围为 8~12 m,试算后以 8 m 为计算单元网格尺寸,网格划分如图 2 所示。

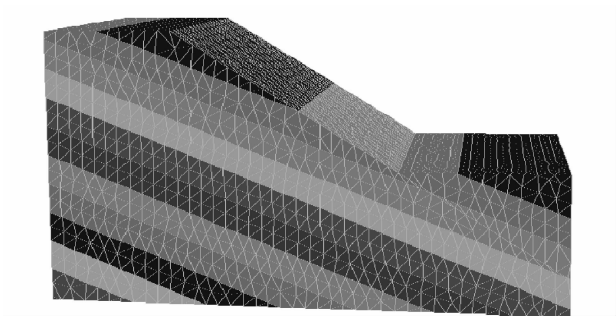


图 2 边坡网格划分
Fig. 2 Meshing of slope

1.2 模型约束条件的确定

三维离散元中求解力学问题的边界条件有远置人工边界、黏滞边界和自由边界 3 种类型^[14],一般采用黏滞边界或自由边界来解决因边界条件导致模拟结果失真的问题。边界上节点的不平衡力采用式(6)~式(8)计算。

$$F_x = -\rho C_p (v_x^m - v_x^{ff}) A + F_x^{ff} \tag{6}$$

$$F_y = -\rho C_s (v_y^m - v_y^{ff}) A + F_y^{ff} \tag{7}$$

$$F_z = -\rho C_s (v_z^m - v_z^{ff}) A + F_z^{ff} \tag{8}$$

式中: A 为自由场节点的影响面积; v_x^{ff} 、 v_y^{ff} 、 v_z^{ff} 分别为自由场节点 x 、 y 、 z 方向的速度; v_x^m 、 v_y^m 、 v_z^m 分别为边界变形块体节点 x 、 y 、 z 方向的速度; F_x^{ff} 、 F_y^{ff} 、 F_z^{ff} 分别为影响区节点的正应力和剪应力贡献的自由场节点。

经过这样的处理,竖直向上传播的剪切波在边界上就不会出现波形失真的现象。黏滞边界通过在边界上施加切向阻尼 T_n 和法向阻尼 T_s 来实现^[15-16],分别如式(9)、式(10)所示。

$$T_n = -\rho C_p v_n \tag{9}$$

$$T_s = -\rho C_s v_s \tag{10}$$

式中: v_n 、 v_s 分别为边界上质点振动速度的法向和切向分量。

在粘滞边界需要将中速度与加速度转换成力作用在模型上,转换公式为

$$\sigma_n = 2(\rho C_p) v_n \tag{11}$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_s) v_s \tag{12}$$

式中: σ_n 为施加的正应力; σ_s 为施加的剪应力。

将速度时程转化为相应的应力时程为

$$\sigma_n = 2(\rho C_p) v_n = 2 \sqrt{\rho(K+4G/3)} v_n \tag{13}$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_s) v_s = 2 \sqrt{(\rho G)} v_s \tag{14}$$

1.3 岩体力学指标的选取

在三维离散元中,需要确定完整的岩石材料密度 ρ 、粘聚力 c 、摩擦角、体积模量 K 、剪切模量 G 及节理的法向刚度 k_n 、切向刚度 k_s 等参数。根据工程经验,模型岩石材料和节理的物理力学指标如表 1、表 2 所示。

表 1 岩体力学指标
Tab. 1 Mechanical index of rock

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	摩擦 角/($^\circ$)	内聚 力/MPa
2 610	16.67	10.00	40	2.45

表 2 物理力学指标
Tab. 2 Physical and mechanical index

法向刚度/ ($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/ ($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	摩擦 角/($^\circ$)	粘聚 力/kPa	抗拉强 度/MPa
12	6	30.00	20	3

1.4 动荷载、阻尼系数的确定

1.4.1 动荷载的确定

模拟的地震波为施加在模型底面的余弦剪切应力波,其加速度时程 $a = \lambda \cos(2\pi ft)$,参数设置见表 3。对加速度时程进行积分转化为相应的速度时程,可以由式(13)、式(14)转化为相应的应力时程。

表 3 动荷载条件
Tab. 3 Conditions of dynamic load

影响因素	条件设置
动力振幅 $\lambda/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.63、1.25、2.5、5、10(分别相当于 VI、VII、VIII、IX、X 烈度地震加速度幅值)
频率 f/Hz	0.5、1、2、5、10、15
持续时间 t/s	2、4、10、15、20、25

1.4.2 阻尼的确定

结构阻尼的确定是结构动力学分析的关键之一,用三维离散元解决动力问题时,阻尼常采用瑞利阻尼和局部阻尼。瑞利阻尼参数包括阻尼系数 ξ_{\min} 和频率 f_{\min} 、 f_{\min} 和 ξ_{\min} 计算式为

$$f_{\min} = \frac{\omega_{\min}}{2\pi} = \sqrt{\frac{\gamma}{\varphi}} / 2\pi \tag{15}$$

$$\xi_{\min} = \sqrt{\gamma \varphi} \tag{16}$$

式中: γ 为质量阻尼常数; φ 为刚度阻尼常数; ω_{\min} 为圆频率。

当速度改变符号时质量增加,当速度过了峰值点(最大值或最小值)后质量减少。局部阻尼系数 ϵ 计算式为

$$\epsilon = \pi D \tag{17}$$

式中: D 为关键阻尼比。

由于局部阻尼相对于瑞利阻尼更为简便,故本文数值模拟采用局部阻尼,局部阻尼系数 ϵ 为 0.13。

2 计算结果分析

选取不同的坡高、坡度、岩层倾角以及不同地震波参数进行组合,基于三维离散元数值模拟,研究边坡在地震动荷载作用下永久动力位移的变化规律。

2.1 坡高对边坡位移的影响

根据公路边坡工程规定,最大边坡为 70 m,同时考虑到坡高过小时,边坡失稳对公路影响有限,本文坡高 H 分别取 10、20、30、40、50、60、70 m 这 7 种情况。基于三维离散元,不同岩层倾角、不同坡脚、不同地震频率等参数下边坡永久动力位移如图 3~图 5 所示。

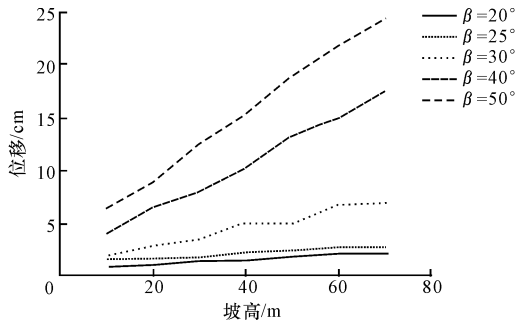


图 3 不同岩层倾角下坡高与位移的关系($\alpha=60^\circ, (\alpha>\beta)$)

Fig. 3 Relationship between slope height and displacement under different rock inclination($\alpha=60^\circ, (\alpha>\beta)$)

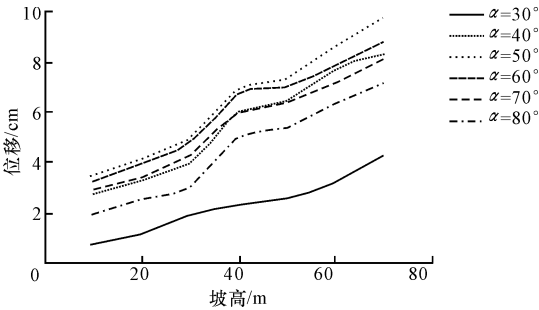


图 4 不同坡角下坡高与位移的关系($\beta=25^\circ, (\alpha>\beta)$)

Fig. 4 Relationship between slope height and displacement under different slope angles($\beta=25^\circ, (\alpha>\beta)$)

图 3 为岩层倾角 β 分别为 20° 、 25° 、 30° 、 40° 、 50° 时边坡位移随边坡高度的变化。图 4 为坡脚 α 分别为 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 时边坡位移随边坡高度的变化。图 5 中地震频率分别为 0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、15.0 Hz 时边坡位移与坡高关系的曲线。可以看出,在坡高 10~70 m 范围内,边坡在不同岩层倾角、不同坡脚、不同地震频率等参数条件下,边坡的永久动力位移随坡高的增大而单调增大。

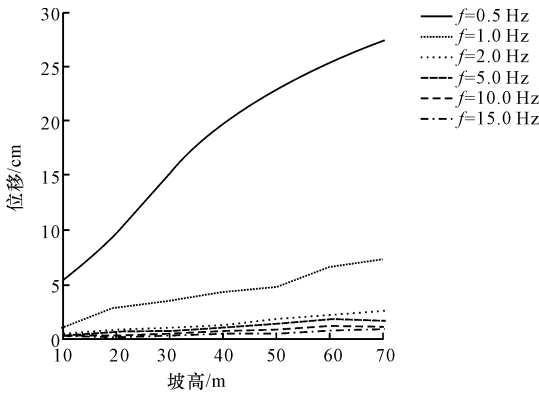


图 5 不同地震频率下坡高与位移的关系($\beta=25^\circ, \alpha=60^\circ$)

Fig. 5 Relationship between slope height and displacement under different seismic wave frequency($\beta=25^\circ, \alpha=60^\circ$)

2.2 坡角对边坡位移的影响

边坡坡脚 α 分别取 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 和 80° 。计算结果如表 4 所示。

表 4 坡角对永久位移的影响

Tab. 4 Effect of slope angle on permanent displacement

坡脚/ $^\circ$	不同坡高 H (m) 的位移/cm						
	10	20	30	40	50	60	70
30	0.784	1.241	1.963	2.376	2.654	3.231	4.367
40	2.763	3.391	4.086	5.997	6.473	7.694	8.335
50	3.506	4.183	5.027	6.881	7.322	8.536	9.764
60	3.281	3.995	4.853	6.719	7.078	7.890	8.793
70	2.922	3.432	4.375	5.971	6.405	7.215	8.137
80	1.976	2.606	3.102	4.991	5.507	6.437	7.134

由表 4 可以看出,在其他条件相同时,边坡坡度与边坡位移关系密切。当边坡小于 50° 时,边坡位移与坡度正相关;当边坡在 50° 左右时,边坡位移达到最大;当边坡超过 50° 后,边坡位移随着坡度增大反而减小。

2.3 岩层倾角对边坡位移的影响

边坡岩层倾角 β 分别取 20° 、 25° 、 30° 、 40° 及 50° 。计算结果如图 6 所示。

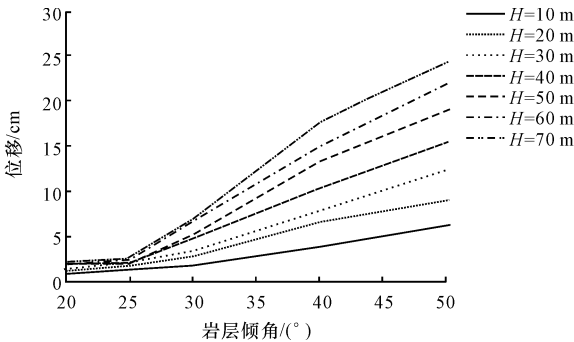


图 6 不同坡高下岩层倾角对位移的影响($\alpha=60^\circ (\alpha>\beta)$)

Fig. 6 Effect of rock inclination on displacement($\alpha=60^\circ (\alpha>\beta)$)

由图 6 可知,坡脚小于 50°时,地震荷载作用下边坡位移与岩层倾角正相关。但是当边坡岩层倾角小于层面摩擦角(34°)时,边坡位移与岩层倾角关系不明显,随着岩层倾角增大,边坡位移无明显增加。

表 5 地震频率对永久位移的影响

Tab. 5 Effect of seismic wave frequency on permanent displacement

频率/Hz	不同坡度(°)下 H 为 30 m 时边坡位移/cm						不同坡度(°)下 H 为 50 m 时边坡位移/cm					
	30	40	50	60	70	80	30	40	50	60	70	80
0.5	5.49	8.91	10.87	10.33	9.28	7.53	7.53	11.22	11.23	10.83	9.28	9.03
1.0	3.98	7.36	9.52	8.64	7.52	6.08	5.38	9.76	10.07	9.64	8.51	8.26
2.0	2.37	5.79	7.34	6.78	5.61	4.36	3.25	8.06	8.74	8.31	7.94	7.31
5.0	1.96	4.08	5.03	4.85	4.38	3.10	2.65	6.47	7.32	7.08	6.41	5.51
10.0	1.06	3.47	4.51	3.54	3.34	2.72	2.06	4.74	5.33	5.06	4.63	4.22
15.0	0.87	2.69	3.21	2.91	2.56	1.93	1.51	3.36	4.64	3.91	3.21	2.93
20.0	0.65	1.18	2.56	1.69	2.13	0.85	1.17	2.15	3.17	2.71	2.28	1.78

由表 5 可以看出,在坡度、坡高及其他参数相同的条件下,边坡位移与频率密切相关,前期随着地震波频率增加,边坡位移反而减少,当频率超过 10 Hz 时,边坡位移随频率的增加变化不大,趋于稳定。同时,在相同边坡坡度、岩层倾角、频率、振幅和持续时间作用下,

2.4 地震频率及振幅对边坡位移的影响

分别选取坡高 30 m 和 50 m 时,研究不同地震频率对岩体边坡位移的影响,频率分别为 0.5、1.0、2.0、5.0、15.0、20.0 Hz,动力振幅为 1.25 m/s²、持续时间 10 s,计算结果如表 5 所示。

坡高为 50 m 时的位移大于 30 m 时的位移。

分别选取坡高为 30 m 和 50 m,研究不同动力振幅对边坡位移的影响,振幅值分别为 0.63、1.25、2.5、5 m、10 m/s²,动力输入频率为 5 Hz,持续时间为 10 s,计算结果见表 6。

表 6 振幅对永久位移的影响

Tab. 6 Effect of seismic amplitude on permanent displacement

动力振幅/ (m·s ⁻²)	不同坡度(°)下 H 为 30 m 时边坡位移/cm						不同坡度(°)下 H 为 50 m 时边坡位移/cm					
	30	40	50	60	70	80	30	40	50	60	70	80
0.63	1.32	2.57	3.87	3.33	2.76	1.95	1.52	4.34	5.87	4.93	3.76	3.01
1.25	1.96	4.09	5.03	4.85	4.38	3.10	2.65	6.47	7.32	7.08	6.41	5.51
2.50	3.41	5.88	7.25	5.27	5.91	4.37	4.31	7.88	9.65	8.66	7.79	6.71
5.00	4.92	7.13	8.96	6.81	7.34	6.08	5.98	9.56	11.96	10.81	9.85	8.54
10.00	6.08	9.47	11.25	8.69	9.86	7.59	8.25	11.23	14.37	13.48	12.34	10.21

由表 6 可以看出,岩体边坡位移随地震荷载振幅增大而单调增加,并且在相同边坡坡度、岩层倾角、频率、振幅和持续时间作用下,坡高为 50 m 时的位移大于 30 m 时的位移。

3 结 语

(1)基于三维离散元,分析了地震动荷载作用下边坡永久位移响应,研究了不同坡高、坡度、岩层倾角以及不同地震波参数条件下边坡永久动力位移的响应规律,分析结果准确,可操作性强。

(2)在坡高 10~70 m 范围内,不同岩层倾角、不同坡脚、不同地震频率等参数条件下,边坡的永久动力位移随坡高的增大而单调增大。坡度小于 50°时,边坡位移与坡度正相关,并在 50°左右时边坡位

移达到最大,而后边坡位移随着坡度增大而减小。边坡位移与地震频率密切相关,前期边坡位移随着地震波频率增加而减少,当频率超过 10 Hz 时,边坡位移随频率的增加变化不大,趋于稳定。

(3)在高烈度地震区进行路线边坡设计时,应控制边坡高度,尽量避免高边坡,无法避免时应布设边坡防护措施。应避免 50°左右的边坡坡度,宜选择小于 30°的边坡设计。

参考文献:

References:

[1] 贾兴利.高烈度地震峡谷区公路选线理论与方法研究[D].西安:长安大学,2013.
JIA Xing-li. Study on theory and method of highway

- alignment selection in high seismic intensity canyon region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [2] Chen S G, Cai J G, Zhao J, et al. Discrete element modeling of an underground explosion in a jointed rock mass[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2000, 18(2): 59-78.
- [3] Kokusho T, Ishizawa T. Energy approach for earthquake induced slope failure evaluation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(2/4): 221-230.
- [4] Gokmiza S B. Pseudo-static stability analysis in normally consolidated soil slopes subjected to earthquakes[J]. *Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, 1998, 9(9): 457-461.
- [5] Al-Homoud A S, Tahtamoni W. Comparison between predictions using different simplified Newmarks' block-on-plane models and field values of earthquake induced displacements[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2000, 19(2): 73-90.
- [6] Kokusho T, Ishizawa T, Nishida K. Travel distance of failed slopes during 2004 Chuetsu earthquake and its evaluation in terms of energy[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(7): 1159-1169.
- [7] Seed H B. Consideration in the earthquake design of earth and rockfill dams[J]. *Geotechnique*, 1979, 29(3): 215-263.
- [8] Li X P, He S M. Seismically induced slope instabilities and the corresponding treatments; the case of a road in the Wenchuan earthquake hit region[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 6(1): 96-100.
- [9] 郑颖人, 肖强, 叶海林, 等. 地震隧洞稳定性分析探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(6): 1081-1088.
ZHENG Ying-ren, XIAO Qiang, YE Hai-lin, et al. Study of tunnel stability analysis with seismic load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(6): 1081-1088. (in Chinese)
- [10] 王根龙, 伍法权, 李巨文. 岩质边坡稳定塑性极限分析方法—斜分条法[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(12): 1767-1771.
WANG Gen-long, WU Fa-quan, LI Ju-wen. Rock slope stability analysis based on plasticity limit theory-method of slices with inclined interfaces[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(12): 1767-1771. (in Chinese)
- [11] 赵炼恒, 李亮, 杨峰, 等. 加筋土坡动态稳定性拟静力分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(9): 1904-1917.
ZHAO Lian-heng, LI Liang, YANG Feng, et al. Dynamic stability pseudo-static analysis of reinforcement soil slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(9): 1904-1917. (in Chinese)
- [12] 熊炜, 范文, 邓龙胜, 等. 基于有限元修正节理岩质边坡稳定性计算的解析解[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(3): 306-310.
XIONG Wei, FAN Wen, DENG Long-sheng, et al. Amendment of analytical solution on stability of joint rock slope based on finite element method[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(3): 306-310. (in Chinese)
- [13] 张常亮, 李同录, 李萍. 三维极限平衡法通用形式的建立及应用[J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(1): 98-105.
ZHANG Chang-liang, LI Tong-lu, LI Ping. Constitution and application of three-dimensional limit equilibrium general form[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2010, 32(1): 98-105. (in Chinese)
- [14] 雷远见, 王水林. 基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性[J]. *岩土力学*, 2006, 27(10): 1693-1698.
LEI Yuan-jian, WANG Shui-lin. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction method based on UDEC[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(10): 1693-1698. (in Chinese)
- [15] 吴琼. 复杂节理岩体力学参数尺寸效应及工程应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
WU Qiong. The mechanical parameters of jointed rock mass: scale-effect research and its engineering application[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012. (in Chinese)
- [16] 李海波, 肖克强, 刘亚群. 地震首载作用下顺层岩质边坡安全系数分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(12): 2385-2398.
LI Hai-bo, XIAO Ke-qiang, LIU Ya-qun. Factor of safety analysis of bedding rock slope under seismic load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(12): 2385-2398. (in Chinese)