

Zonal Time History Analysis on Slope Stability under Seismic Excitation*

Zhenlin Chen[#], Nanqi Huang, Tingying Gou, Hongxin Wu, Ouling Tang, Laichao Luo

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu
Email: [#]hustchzl@hotmail.com

Received Mar. 22nd, 2013; revised: May. 9th, 2013; accepted: May. 23rd, 2013

Copyright © 2013 Zhenlin Chen et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This study discusses the propagation law of seismic wave propagating in the isotropic rock slope. In view of energy distribution, we can investigate the stability of slope carefully and comprehensively. But the computational cost is very high for analyzing the dynamic response of all the points of the whole slope based on the seismic wave theory. In order to reduce the difficulty, the rock slope can be divided into different region according to the propagation law of seismic wave; the displacement functions only for different regions are needed to be evaluated. The dangerous region and the potential sliding surface could be determined by the time-history analysis of displacement vector. The displacement response obtained by time-history analysis is consistent with the results observed from the experiment.

Keywords: Displacement Vector; Dynamic Response; Propagation Characteristics; Potential Sliding Surface

地震波作用下边坡稳定性的区域化时程分析*

陈臻林[#], 黄楠棋, 勾婷颖, 伍鸿兴, 唐鸣玲, 罗来超

地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都
Email: [#]hustchzl@hotmail.com

收稿日期: 2013年3月22日; 修回日期: 2013年5月9日; 录用日期: 2013年5月23日

摘要: 本文对地震波在均匀边坡内的传播规律进行了初步探讨。从地震波能量传播的角度, 对边坡的整体稳定性进行全面, 细致地分析。在实际工程中如果对整个边坡进行分析, 计算量过于庞大。因此, 本文通过地震波理论将边坡内部分成若干个影响区域, 推导出每个区域的位移函数, 可以有效降低理论分析的难度。通过位移矢量时程分析, 得出边坡危险区域和潜在的滑动面。采用位移矢量分析得到的结果和实验结果较为吻合。

关键词: 位移矢量; 动力响应; 传播特性; 潜在滑动面

1. 引言

斜坡稳定性分析是边坡工程和地震勘探中的一个重要方面。目前地震加速度响应也作为稳定性分析的一个指标。在地震波作用下引起的垂直运动对位移具有最大的影响。对某些地震引发的滑坡, 尤其是近

场情况下, 垂直加速度是一个影响滑坡萌生的相关因素^[1,2]。通过大型模拟振动台试验可以得到斜坡形状和加固措施对地震效应的影响^[3,4]。

基于地震波传播理论, 文献[5,6]研究了有关边坡倾角、高度、波型(P, SH 和 SV)、波长以及入射角对边坡的稳定性影响。之后, Scott et al.^[6]讨论了陡坡上的边坡地震效应。得到了一个关于边坡高度和地震波

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41002126); 成都理工大学大学生课外科技项目。

[#]通讯作者。

波长的比例函数。对于 SH 和 SV 波，尤其是在较高的频率下，斜坡顶部动力响应的大小随着阻尼的增加而减小。George 等^[7]通过数值分析研究了均匀粘弹性状土壤边坡在垂直入射 SV 地震波作用下的坡面振动效应。该研究强调在某些先决条件下，由于地震波在坡面的反射影响导致斜坡表面附近动力响应的垂直分量可能和水平分量一样大。前面提出的地形效应的研究工作将有助于确定地震作用下边坡内部的不稳定区域。对于含结构面的复杂地质边坡，部分学者采用动量守恒定律和离散位移模式^[8]研究斜射 P 波(或 S 波)对结构面的影响。文献^[9]提出了一种疲劳破坏结构面模型，得到应力波通过结构面的传递系数(反射和透射)的解析解。

目前大多数研究工作主要针对地震波在边坡内部的传播规律，总结了地震波在入射到自由表面或结构面处的传播规律。由于要确定整个斜坡的动力响应的分布情况比较困难，且计算成本较高，现阶段地震波理论分析主要应用于边坡内部局部特性的研究，对边坡整体稳定性的分析较少。因此，本文拟将地震波理论推广到边坡的整体稳定性研究。以弹性波在岩体介质中的传播规律为基础，通过将边坡内部划分出不同的区域，推导出边坡内部各个区域的位移时程函数，从而进一步计算出各点位移矢量，对均质边坡的整体稳定性做出较全面、细致地分析。

2. 弹性波在岩石边坡内的传播特征

地震波在弹性介质中的传播可以通过射线理论来分析。这里考虑的岩体为均匀连续的各向同性介质，地震波从底部向上传播。有两点需要注意：1) P 波(或 SV 波)如果以超过临界角入射到自由表面，将发生全反射；2) 垂直入射的 P 波，同样也会发生全反射。

2.1. 地震动合成算法

分析边坡内部某点的动力响应，可以采用合成地震动矢量来表示：

$$F(t) = \sum_{i=1}^N T_i \cdot f(t-t_i) \quad (1)$$

$F(t)$ 表示合成的动力响应； t_i 表示第 i 条射线的到达时间(或延迟时间)； N 表示射线条数(同时也是控

制精度的参数)； $f(t-t_i)$ 表示第 i 条到达某点的地震波射线； T_i 则是相应的第 i 条地震波射线的振幅系数，振幅系数的计算可参考文献^[10]。

2.2. 延时计算算法

图 1(a)和图 1(b)分别表示 P 波和 SV 波入射两种情况。根据图 1(a)，到达点 M 的有两条射线延迟时间 t_p (P 波)和 t_s (S 波)计算公式如下：

$$t_j = \frac{y_j}{c_p} + \frac{|y_j - y_M|}{\cos(\alpha + \beta_j) \cdot c_j}, \quad (j = p, s) \quad (1)$$

其中 c_p 和 c_s 为介质中的纵波和横波波速。

$$y_j = \frac{(y_c + k(x_M - x_c - \text{tg}(\alpha + \beta_j) \cdot y_M))}{(1 - k \cdot \text{tg}(\alpha + \beta_j))}, \quad (3)$$

$$k = \frac{(y_c - y_d)}{(x_c - x_d)} \quad (j = p, s)$$

图 1(b)中有两条射线(PP 和 PS)经过点 N，其延迟时间计算公式和方程(2)~(3)一样，仅仅只需要将点 M 的坐标(x_M, y_M)修改成点 N 的坐标(x_N, y_N)即可。

3. 边坡区域化时程分析

为便于对比，本文对均质边坡的动力理论分析实例参照文献^[11]中的 1:16 比尺的大型振动台模型试验，激励为竖直激振，如图 2。模型材料参数见表 1。相似系数的推导这里就不重复了。

3.1. 理论模型验证

本文理论分析参照原型尺寸及物理材料参数，采用斯奈尔定律可以得出各射线的入射角和反射角，推导出边坡内部的射线传播路径。根据地震波射线传播

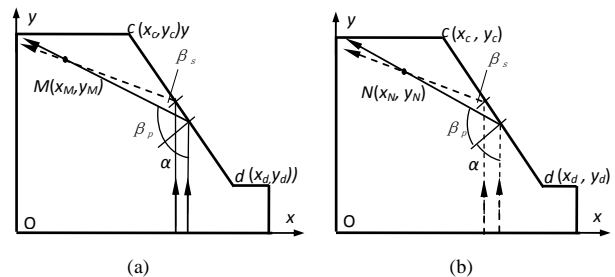


Figure 1. Access of seismic P and S-wave: (a) Incident P-wave; (b) Incident S-wave
图 1. 延迟时间计算示意图：(a) 入射 P 波；(b) 入射 S 波

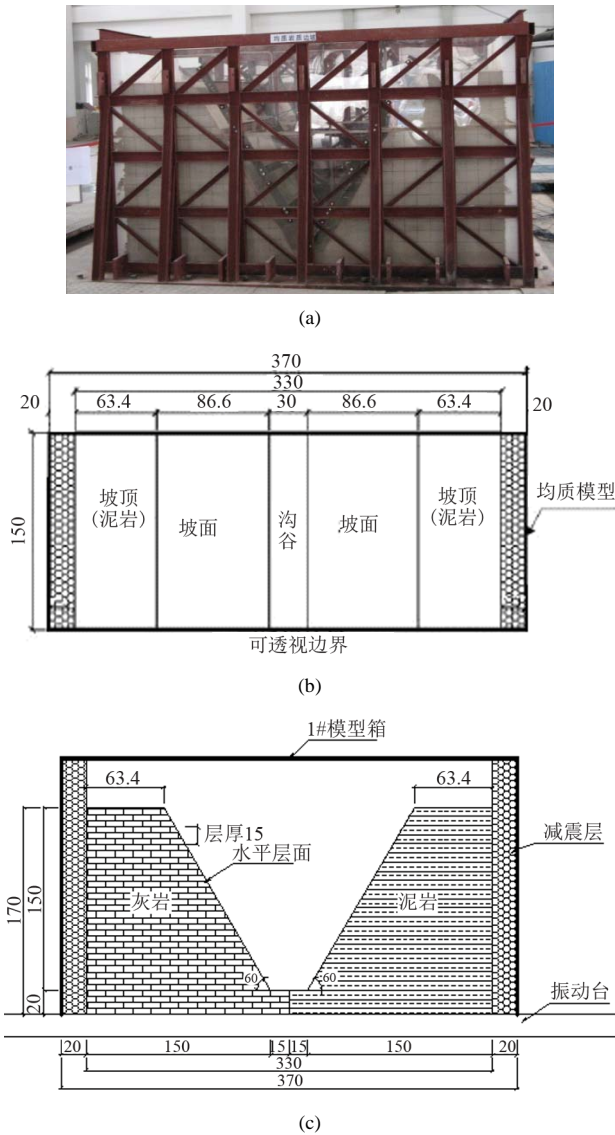


Figure 2. Experimental model. (a) Model box for shaking table test; (b) Plane arrangement chart of model (unit: cm); (c) Section of experimental slope model (unit: cm)

图 2. 振动台试验模型。(a) 振动台模型箱; (b) 模型平面布置图(单位:cm); (c) 均质斜坡模型剖面图(单位:cm)

Table 1. Material properties of prototype and model slope
表 1. 原型和试验模型材料的主要物理力学参数值

参数	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (MPa)	泊松比	摩擦角	粘聚力 (kPa)	
泥岩	原型	2480	0.3	33.8°	740	
	模型	2000	118.75	0.3	32.2°	46.3
灰岩	原型	2700	8940	0.2	39°	1600
	模型	2200	558.75	0.2	37.4°	100

的复杂程度将边坡划分出不同的影响区域, 并进一步划分出计算网格。通过各区域的位移时程函数计算出

边坡内各网格点的位移矢量, 再利用各点位移矢量来判定边坡的危险区域和潜在的滑动面。

以地震动输入幅值 0.3 g, 频率为 15 HZ 的 z 向正弦激励为例。根据前面提出的算法, 可以得出均质泥岩边坡内各区域的位移时程函数。图 3 给出了 $t = 1\text{ s}$, 2 s , 3 s , 5 s 时刻均质泥岩边坡内部各点的位移矢量图, 图中小箭头表示各点的位移, 并用虚线标出了位移较大的区域(靠近坡面)。位移较大的点构成边坡内部的危险区域, 潜在的滑动面一般均位于危险区域内。通过位移响应分析发现边坡内部位移较大的区域基本相同, 说明这些区域在整个震动过程中相对比较危险, 初始开裂和破坏可能出现在这些区域。图 3 表明了边坡坡面靠近坡脚的区域内部点的位移相对较大, 较易出现破坏。振动台实验中, 在接近坡脚位置(距离坡脚 20 厘米处)观察到贯穿裂纹, 如图 4(a)所示。该裂纹位于理论分析得出的危险区域, 和图 3 中最下方的滑动面位置基本吻合。

其次, 从顶面的位移矢量来看(图 3(d)中顶部点滑线区域), 在时间 $t = 5\text{ s}$ 时, 顶面靠近坡顶前缘区域内的点位移相对较大, 容易发生破坏。在振动台试验过程中, 坡顶中部首先出些细裂纹, 然后逐渐扩展, 最后在坡顶形成贯穿裂纹, 如图 4(b)中虚线所示。

综合比较图 3 和图 4, 发现理论分析的结论和实验结果基本一致, 说明本文采用弹性波动理论, 利用边坡内部各区域的位移时程函数计算各点的位移时程响应来分析边坡的稳定性和破坏机理是可靠的。

4. 结论

本文基于弹性波动理论, 对边坡内部破坏机理进行了初步探讨, 通过位移时程分析, 得到边坡内部不同区域的动力响应, 从而得到潜在的危险区域和滑动面。通过综合分析, 主要得出以下结论:

- 1) 从位移矢量图可以看出各个节点位移相对不大, 不足以使边坡发生整体破坏。随着时间的增加, 边坡内高程放大效应呈节律性变化, 节点位移逐渐增加, 在危险区域内开始出现裂纹。
- 2) 通过理论分析结果和实验分析得到的动力响应特征基本一致, 且能推广到成层边坡的动力响应计算, 对边坡工程的抗震设计具有一定的指导意义。
- 3) 相比实验研究, 该方法可能还存在一些缺陷

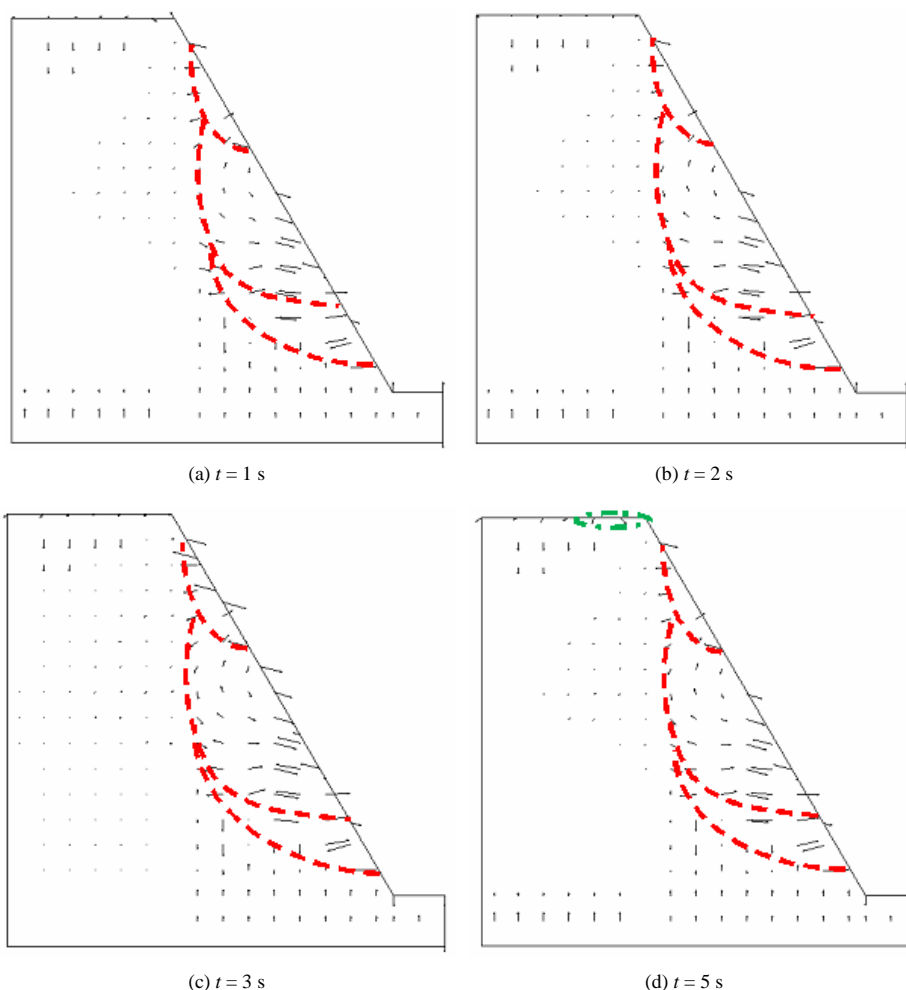


Figure 3. Distribution of displacement vector in slope at $t = 1$ s, 2 s, 3 s, 5 s (see Figure 2(c))
 图 3. 均质泥岩边坡内部各区域内点在时刻的位移矢量图(模型尺寸参看图 2(c))



Figure 4. Cracks in model mudstone slope (a) toe of slope (b) crest of slope
 图 4. 均质泥岩边坡裂纹分布 (a) 均质泥岩边坡底部裂纹 (b) 均质泥岩边坡顶部裂纹

(比如对模型几何形状和内部介质均匀性要求过高等),但是能够较为全面地反映边坡内部各个区域的动力响应变化规律,对于定性分析边坡整体稳定性具有一定的参考价值。

参考文献 (References)

- [1] J. Ingles, J. Darrozes and J. C. Soula. Effects of the vertical component of ground shaking on earthquake-induced landslide displacements using generalized Newmark analysis. *Engineering Geology*, 2006, 86: 134-147.

- [2] T. Neesemann. Positive nonlinear difference equations: Some results and applications. *Nonlinear Analysis*, 2001, 47(7): 4707-4717.
- [3] 吴伟, 姚令侃, 陈强. 坡形和加筋措施对地震响应影响的振动台模型实验研究[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2008, 27(5): 689-694.
- [4] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 李朝红. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3): 624-632.
- [5] S. Ashford, N. Sitar. Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87(3): 692-700.
- [6] S. Ashford, N. Sitar, J. Lysmer and N. Deng. Topographic effects on the seismic response of steep slopes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87(3): 701-709.
- [7] G. D. Bouckovalas, A. G. Papadimitriou. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25: 547-558.
- [8] J. C. Li, G. W. Ma and J. Zhao. Stress wave interaction with a nonlinear and slippery rock joint. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2011, 44: 85-92.
- [9] Y. X. Li, Z. M. Zhu, B. X. Li, J. H. Deng and H. P. Xie. Study on the transmission and reflection of stress waves across joints. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2011, 1: 1-8.
- [10] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [11] 邹威, 许强, 刘汉香. 强震作用下岩质斜坡动力响应特性的大型振动台试验方案设计[J]. *地质灾害与环境保护*, 2011, 22(1): 87-91.