

文章编号: 1000-7598-(2006)01-0102-05

# 爆破方法识别滑带试验研究

白金泽, 丁桦, 张均锋, 乔继延, 尚晓江

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 以往对滑坡体中软弱层与滑带的识别主要依赖于钻孔并辅之以工程师的经验。采用在钻孔中进行爆破的方法, 通过对地表接收信号的波形分析即可十分方便地识别出软弱层与滑带。简要阐述了该方法的理论依据, 通过对现场爆破实验测量信号的分析可以发现, 该方法可以减少钻孔数量以及提高滑带识别的精度与效率。

**关键词:** 爆破; 滑坡体; 滑带; 软弱层

**中图分类号:** P 642.22 **文献标识码:** A

## Study on identification of slip surfaces for landslides by blasting

BAI Jin-ze, DING Hua, ZHANG Jun-feng, QIAO Ji-yan, SHANG Xiao-jiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The identification of slip surface for a landslide is mainly based on drilling holes combining with experience of engineers. A brief method to identify weak layer or slip surface existing in a slope is presented by analyzing vibrating signals induced by blasting. The vibrating signals is collected from earth surface in the vicinity of blasting center. At first, the theoretical base of the method is briefly described. By analyzing the signals from in-situ testings, we conclude that the number of drilling holes can be reduced; and the precision for identification of slip surface of a slope can be improved by using this method.

**Key words:** blasting; sliding body; slip surface; weak layer

### 1 引 言

岩土边坡发生滑动或崩滑是经常遇到的灾害, 严重威胁着边坡附近的工程结构和人身安全。在三峡库区, 针对 175 m 水位蓄水后的滑坡灾害治理工作已经提到议事日程。作为滑坡灾害工程防治中重要的工作之一是滑坡体地质和力学参数的确定仍存在一系列没有很好解决的模糊经验科学难题。这直接影响人们获得可靠的工程设计、施工所需的分析结果, 影响对滑坡所带来的危害和工程防治效果的评估。

目前, 滑坡体中薄的软弱夹层或滑带的识别主要依靠探井和探洞, 探井给出的是一些局部分散点上的信息, 依靠工程师的经验将其连接成线与面, 在不能够确定的情况下通过探洞来寻找滑带面, 但结果的精度仍然不足。此外, 实际工程中还有其它原位测试方法, 如声波法<sup>[1~3]</sup>, 浅层地震反射波法<sup>[4, 5]</sup>

等, 但由于各种方法的识别精度和实用范围的限制, 还不能完全满足工程的需要。

爆破震动信号中, 包含有爆破区域临近地质结构的特征<sup>[6]</sup>。炸药爆破使邻近岩土介质产生破坏, 同时赋予周围介质一个初始运动, 远场的振动信号中所包含的主要震源信息就是爆破后初始运动引起的爆源附近地质结构的自振, 这种自振由于波的传出带来的能量耗散呈高阻尼振荡特征。这一振荡特征主要取决于爆破区的大小、形状以及周围介质的地质结构与性质<sup>[7, 8]</sup>。

因此, 在滑带或软弱层附近进行小药量爆破, 将激发地质结构的自振, 通过分析地表接收的振动信号, 即可以判断一定范围内滑带与软弱层的存在与否(如图 1 所示)。依据上述理论, 本文对一系列现场爆破试验的实测结果进行了分析。

收稿日期: 2004-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.10372104), 国家 973 项目(No.2002CB412706), 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(No.KJCX2-SW-L1)。

作者简介: 白金泽, 男, 1976 年生, 博士后, 主要从事爆破数值模拟工作。

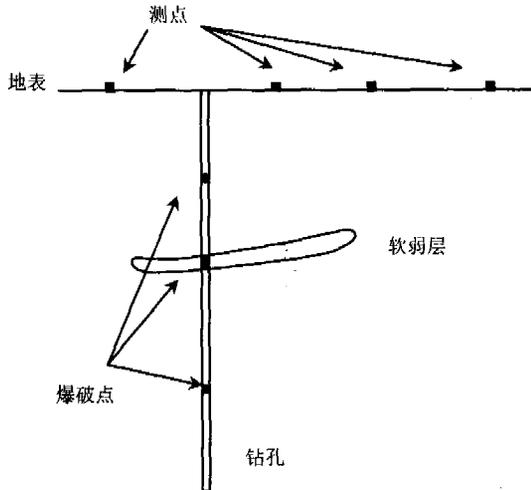


图 1 爆破方法识别软弱层原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of identification of weak layers by blasting

## 2 爆破试验

爆破试验在三峡库区中的重庆市奉节县白衣庵古滑坡上进行。白衣庵滑坡位于长江三峡西端左岸奉节老县城上游约 1 km 处, 是一个集古、老、新滑坡于一体的滑坡群体<sup>[9]</sup>。滑坡群主要包括白衣庵古崩滑体、二道沟老滑坡、钟家沟老滑坡、幸福沟老滑坡、李家湾新滑坡、柑子林新滑坡和鸡公梁新滑坡等组成。分布标高 160~430 m, 面积约 0.8 km<sup>2</sup>, 总体积约  $3\ 600 \times 10^4$  m<sup>3</sup>。2003 年 7 月 22 日在白衣庵古滑坡坡体的中部、老苍屋正前方又发生了一次新滑坡<sup>[10]</sup>, 本文试验的一部分即在新滑坡上进行。

本文选择数处岩质滑坡与土质滑坡进行钻孔爆破试验, 钻孔深度一般在滑带以下 5~10 m, 试验累计钻孔 11 个, 进尺 205 m, 爆破使用 2# 岩石炸药, 共爆破 37 次, 每次爆破药量均为 300 g。

由于试验场地多为山体斜坡, 地形复杂且多树木和建筑物, 因此通过无线遥控的方式对现场测点的监测要比采用有线方式具有更大的优越性。本文试验中, 数据采集设备为无线网络控制的爆破震动信号测量系统, 该系统由力学所工程科学部固体力学组主持开发, 不仅能够用于科学实验, 同时也能够用于对实际滑坡现场的勘探和检测。该系统集成了目前先进的无线网络技术、GPS 技术、多波测量和独特的系统集成设计, 其功能强大, 目前还未见任何同等功能的设备被开发使用的报道。

三向加速度传感器布置在地表, 传感器的  $x$  轴指向爆源,  $z$  方向垂直向上。传感器数据采集时间为 15 s, 采样频率 4 335 Hz。图 2 为传感器与无线采集放大器。

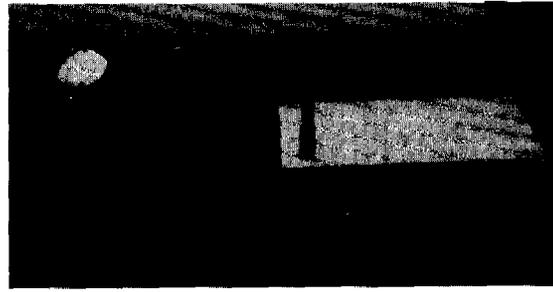
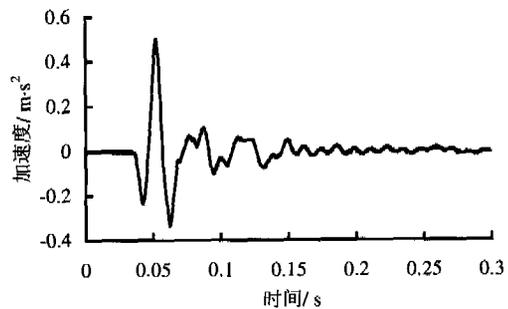


图 2 单点测量系统 (左侧为罗盘与加速度传感器, 右侧为无线采集放大器)

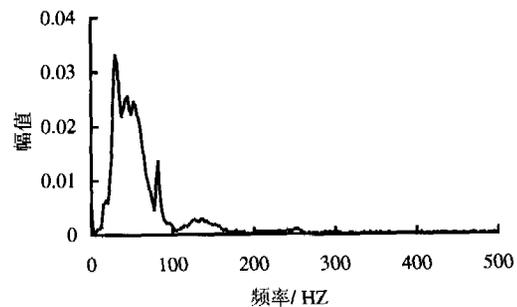
Fig.2 Measuring system for a single point (left: compass and acceleration sensor; right: wireless signal collector)

## 3 试验测量信号

本文选择的岩质滑坡位于白衣庵古滑坡中部, 通过实地观察可以明显看到滑坡中的软弱层。软弱层位于孔深 8 m 处, 厚度约为 0.5 m; 试验中钻孔深度 10 m, 并分别在 3.8 m、8 m 以及 10 m 深度进行爆破; 地面测点 9 个, 选取距离钻孔口 10 m 处的一个测点进行分析, 测量得到的  $Z$  向加速度信号及其 FFT 变换后的曲线如图 3~5 所示。



(a) 深度 3.8 m 处 (软弱层上方) 爆破测量信号曲线



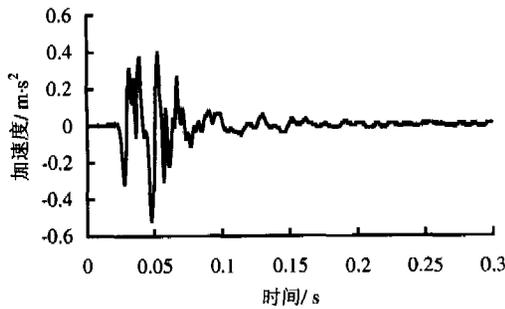
(b) 测量信号的 FFT 变换曲线

图 3 爆破测量信号及 FFT 变换在 3.8 m 深处变化曲线 (软弱层上方)

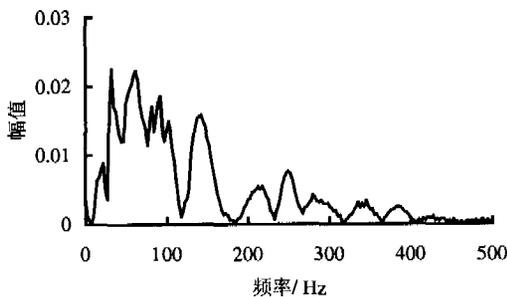
Fig.3 Measured vibration signal and its FFT transform with depth of blasting center at 3.8 m (above the weak layer)

由上图可以看出, 在软弱层上方进行的爆破, 加速度信号时域曲线比较规整, 在频域曲线上主峰反映非常明显。爆破主要振动能量分布在 100 Hz

频率以内。



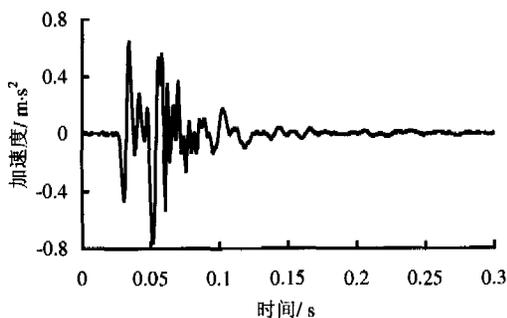
(a) 深度 8 m 处 ( 软弱层位置 ) 爆破测量信号曲线



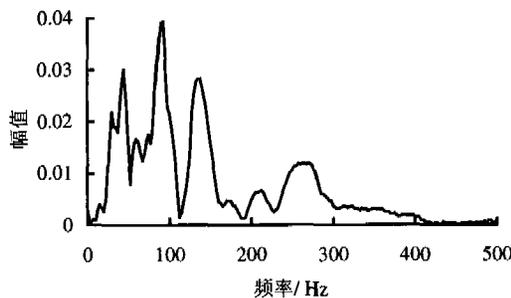
(b) 测量信号的 FFT 变换曲线

图 4 爆破测量信号及 FFT 变换在 8 m 深处变化曲线 ( 软弱层位置 )

Fig.4 Measured vibration signal and its FFT transform with depth of blasting center at 8 m ( just at the weak layer)



(a) 深度 10 m 处 ( 软弱层下方 ) 爆破测量信号曲线



(b) 测量信号的 FFT 变换曲线

图 5 爆破测量信号及 FFT 变换在 10 m 深处变化曲线 ( 软弱层下方 )

Fig.5 Measured vibration signal and its FFT transform with depth of blasting center at 10 m ( beneath the weak layer)

由图 4 可以看出, 在软弱层处进行爆破, 测量信号叠加了较多的高频成分, 时域曲线比较复杂, 频域曲线中呈现多峰特性, 振动能量分布的频率范围明显宽于图 3(b)所示的在软弱层上方爆破所测得频域范围。

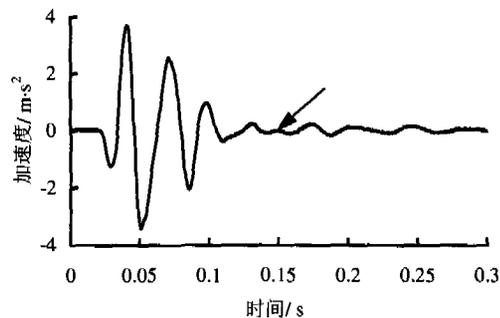
图 5 表明, 在软弱层下方进行的爆破测量得到的时域信号仍然比较复杂, 振动能量分布 0~400 Hz 范围内, 曲线规律与软弱层中的爆破相似。

通过对上述不同位置爆破的实测结果分析可以得出: 在软弱层上方爆破得到的加速度曲线频域主峰明显, 而在软弱层中以及软弱层下方爆破测量曲线频域分布较宽。产生这一现象的原因在于: 由于软弱层上方的岩土介质相对比较均匀, 因而爆破产生的空腔规则, 爆破引起的地质结构自振范围狭窄, 所以传播到地面的爆破信号比较规整, 信号频域主峰明显; 而在软弱层中进行爆破时, 爆破产生的空腔形状受到周围较硬的岩石与较软的软弱层影响, 使得局部的地质结构复杂, 自振频率范围较宽, 因此地面接收的信号曲线复杂。在软弱层下方的爆破信号在向地表传播的过程中, 经过了软弱层的过滤, 同时由于本文试验软弱层下方爆破点选择距离软弱层过近, 因而使得两次爆破信号相似。

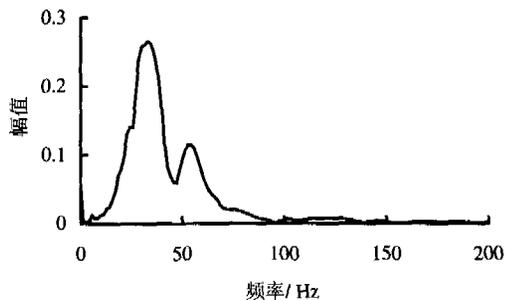
利用爆破测量信号的波形变化特性, 可以在岩质滑坡上进行钻孔, 从上至下依次爆破, 当信号波形发生重大变化时即可认为存在一定范围的软弱层。

土质滑坡试验场地位于老苍屋正前方的新滑坡上。2003 年 7 月 22 日发生在新滑坡上进行钻孔, 在 21 m 孔深处发现人工活动遗迹, 通过实际地质调查, 可以断定此深度即为新滑坡的滑带位置。在土质边坡的爆破试验中, 钻孔深度达到滑带以下 10 m, 并分别在 5, 10, 15, 21 m ( 滑带位置 )、26 与 31 m 进行爆破。以下选取其中的 3 次爆破数据曲线, 见图 6~8。

由图可以看出, 在土质滑坡中爆破, 实测曲线受高频成分干扰较少, 从爆破深度 5 m 到深度 31 m, 测量曲线的频域峰值都非常明显, 主要振动能量分布在 0~100 Hz 之间。产生这一现象的原因, 在于土质滑坡结构均匀性好, 虽然存在明显的滑带, 但是滑带上下介质属性相差较小, 爆破产生的空腔规则且相似, 因而滑带存在的明显信号差异没有出现在爆破时域信号的初期, 而是出现在主振动结束后的后续振动中, 如图 6(a)~8(a)所示的箭头所指位置, 在滑带以上爆破时, 后续振动较弱; 而在滑带位置与滑带下方的爆破, 后续振动强烈。据此即可识别出一定范围内的滑带位置。



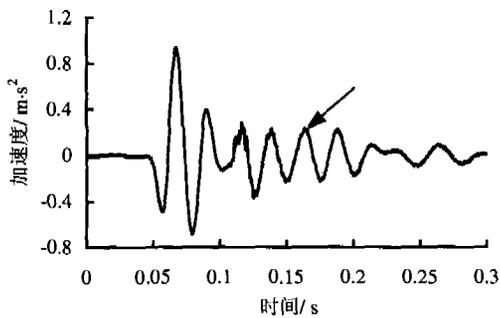
(a) 深度 10 m 处 (滑带上方) 爆破测量信号曲线



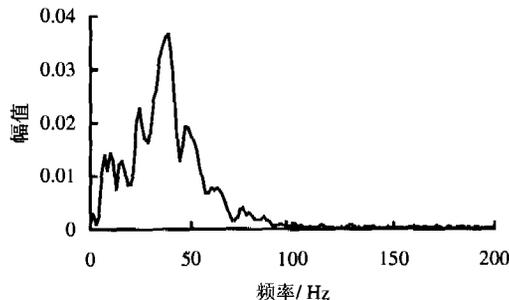
(b) 测量信号的 FFT 变换曲线

图 6 爆破测量信号及 FFT 变换在 10 m 深处变化曲线 (滑带上方)

Fig.6 Measured vibration signal and its FFT transform with depth of blasting center at 10 m (above the sliding surface)



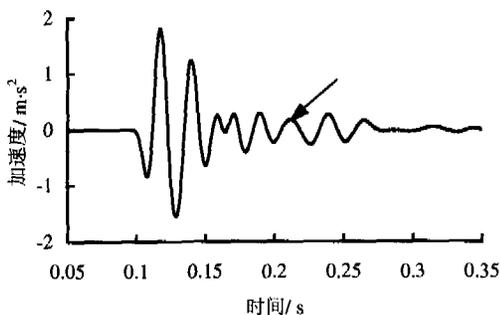
(a) 深度 31 m 处 (滑带下方) 爆破测量信号曲线



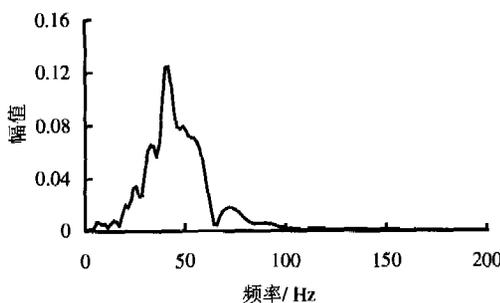
(b) 测量信号的 FFT 变换曲线

图 8 爆破测量信号及 FFT 变换在 31 m 深处变化曲线 (滑带下方)

Fig.8 Measured vibration signal and its FFT transform with depth of blasting center at 31 m (beneath the sliding surface)



(a) 深度 21 m 处 (滑带位置) 爆破测量信号曲线



(b) 测量信号的 FFT 变换曲线

图 7 爆破测量信号及 FFT 变换在 21 m 深处变化曲线 (滑带位置)

Fig.7 Measured vibration signal and its FFT transform with depth of blasting center at 21 m (just at the sliding surface)

## 4 结 论

通过爆破试验测量得到地表的加速度信号,对曲线进行时域与频域的波形分析,可以比较清晰地识别出滑带与软弱层的位置。在工程实践中,只需要在滑坡上钻孔,孔深超过疑似滑带以下,然后顺次在不同深度进行爆破试验,即可以定性获得一定范围内的滑带分布。下一步的工作,是通过这种爆破方式定量识别软弱层的厚度、展布与方向,进一步减少钻孔数量以及提高滑带识别的精度与效率。

### 参 考 文 献

- [1] 赵根模,王大宏,任峰,等. 声波方法在城市活断层探查与评价中的应用[J]. 中国地震, 2003, 19(3): 217—224.
- ZHAO Gen-mo, WANG Da-hong, REN Feng, et al. The application of the acoustic method to the exploration of urban active fault: comparing with the artificial earthquake, radar and acoustic method[J]. *Earthquake Research in China*, 2003, 19(3): 217—224.
- [2] 席道英,黄理兴. 岩芯声学特性与原位测井参数对比研究[J]. 岩土力学, 1995, 16(2): 52—56.

- XI Dao-ying, HUANG Li-xing, Comparative research of the acoustic characters of rock core samples with the graph of well-logging in site[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(2): 53—56.
- [3] 张杰. 声波法桩基质量无损检测中的波形分析[J]. 岩土力学, 1990, 11(2): 59—65.  
ZHANG Jie. Waveform analysis in sonic method to NDI of pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1990, 11(2): 59—65.
- [4] 薛亚东, 张长根, 李兴宏, 等. 采区断层探测与分布规律研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5): 513—516.  
XUE Ya-dong, ZHANG Chang-gen, LI Xing-hong, et al. Seismic exploration of fault in mining area and study on its distribution law[J]. **Journal of China Coal Society**, 2003, 28(5): 513—516.
- [5] 许昭永, 段永康, 许峻, 等. 桩位下浅层基岩内洞穴的高频震波勘探研究[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 384—390.  
XU Zhao-yong, DUAN Yong-kang, XU Jun, et al. High-frequency seismic prospecting used to find caves in the rock-mass below stakes[J]. **Progress in Geophysics**, 2003, 18(3): 384—390.
- [6] Ding H. Study on Blasting Vibration, Proceedings of The 7th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting[C]. Beijing: [s.n.], 2002. 11—15.
- [7] Ding H, Zheng Z M. Source Model for Blasting Vibration and Tentative Application to Engineering Geophysics[A]. **Proceedings of the 9th International Congress on Sound and Vibration**[C]. Florida: Orlando, 2002. 8—11.
- [8] Ding H, Zheng Z M. Source model of blasting vibration[J]. **Science in China**, Series E, 2002, 45(4): 395—407.
- [9] 刘传正, 李瑞敏, 李铁锋, 等. 三峡库区白衣庵滑坡防治工程研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 48—54.  
LIU Chuan-zheng, LI Rui-min, LI Tie-feng, et al. Study on Baiyi'an landslide control engineering in the Three Gorges Reservoir area[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2003, 14(1): 48—54.
- [10] 张均锋, 丁桦, 白金泽. 奉节白衣庵老仓屋新滑坡成因分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1 841—1 844.  
ZHANG Jun-feng, DING Hua, BAI Jin-ze. Analysis of the mechanism for a new landslide in Fengjie[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(11): 1 841—1 844.

### 上接第 101 页

- LEI Hua-yang. Study on elastoplasticity of structural marine soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002. 23(6): 721—724.
- [4] Dafalias Y F, Herrmann L R, Denatale J S. The bounding surface plasticity model for isotropic cohesive soils and its application at grenoble workshop[A]. Ed., G.Ghudeus, F. Darve, I.Vardoulakis, **Constitutive Laws for Soils**. Brookfield: A.A Balkema, 1984, 273—87.
- [5] kavvasdas M, Amorosi A. A constitutive model for structured soils[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(3): 263—273.
- [6] Gajo A, Wood D M, A new approach to an anisotropic, bounding surface plasticity and simulations of natural and reconstituted clay behaviour[J]. **Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.**, 2001, 25: 207—241.
- [7] 吕海波. 琼州海峡软土结构性的工程效应及损伤模型研究[博士学位论文 D]. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002.
- [8] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002, (9): 82—88.  
KONG Ling-wei, LU Hai-bo, WANG Ren, et al. Engineering properties and micro-mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, (9): 82—88.