

doi: 10.3963/j.issn.1001-487X.2012.04.008

地质体结构探测中可控爆源实验研究及应用

田振农¹, 任宗富², 李世海³, 孟祥栋⁴

(1. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061; 2. 济南黄河路桥工程公司, 济南 250001;

3. 中科院 力学所, 北京 100080; 4. 重庆市爆破工程有限责任公司, 重庆 400020)

摘要: 为探测地质体的结构, 在分析一般爆破震源的优缺点的基础上, 通过实验研究了一种可以控制的爆破震源(简称可控爆源)。该震源利用水介质的均匀性及各向同性、不可压缩等特点, 保持了爆炸波功率大、能够提供尖锐的脉冲信号、频域范围广的优点; 同时利用水作为传递爆炸载荷的介质, 减少了爆炸冲击波对周围岩体介质的损坏, 使试验可以重复进行, 改变了爆破震源不能重复和难以总结试验规律的缺点, 也有助于可控爆源在地质勘探领域的推广应用。利用可控爆源, 对茅坪滑坡体进行了地质体结构探测分析, 结果显示滑坡体深约 50 m 处存在一大的结构面(滑带), 并得到了上覆岩层的一般力学性质。该结果与钻孔勘探和挖竖井探测结果吻合, 为该滑坡体的治理和预防提供了依据。

关键词: 爆炸力学; 可控爆源; 模型试验; 地震波

中图分类号: O382+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2012)04-0032-06

Experimental Research and Application of Controllable Blast Source on Surveying Geology Body Structure

TIAN Zhen-nong¹, REN Zong-fu², LI Shi-hai³, MENG Xiang-dong⁴

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Jinan Yellow River Bridge and Road Engineering Company, Jinan 250001, China;

3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

4. Chongqing Blasting Engineering Co., Chongqing 400020, China)

Abstract: To explore geology body structure, a blast seismic source producing controllable seismic wave was tested. The controllable blast seismic source made use of the homogenization, isotropy, incompressibility of water to keep the blast wave power strong enough, meanwhile the sharp pulsing signal and wide frequency domain were provided. Due to the action of water mass, the damage to rock induced by explosion load was reduced. Moreover this test could be repeated and the blast load was easy to be calculated. The blast seismic source changes the characteristic that common blast seismic source cannot be repeated and was difficult to sum up the rule of blast seismic wave. The controllable blast seismic source was used to study the geology body structure of Maoping landslide mass. Result shows that slide strip lies 50 meters under the surface at the middle of landslide. The mechanics properties overlying rock mass were also obtained. The analytical results fits the survey by drilling and sinking a shaft well.

Key words: explosive mechanics; controllable blast source; model experiment; seismic wave

地震波法仍然是物探中的主要方法, 它在应用

中占到一半以上的比例^[1]。产生地震波的方法有很多, 最常用的仍是爆破震源^[2], 利用爆破震源进行地质探测有以下优点^[3-5]:

(1) 功率大, 用很少的药量就会产生较高的振

收稿日期: 2012-06-03

作者简介: 田振农(1971-)男, 博士, 讲师, 从事岩土爆破方面的研究 (E-mail) zntian@sdu.edu.com。

幅,并且可以方便的调整药量来满足地层深度对能量要求。

(2) 能够提供尖锐的脉冲信号,在地震勘探中,需要准确地确定反射波到达的时刻,激发尖脉冲明显要比长持续时间的钝激发波形好。

(3) 频域范围大,不同波长的波可以识别不同尺度的地质体结构,足够的频域范围可以提高勘探的精度。

但是,爆破震源也存在一些缺点^[6],如:受钻孔条件的限制、爆炸对地下构筑物或滑坡体存在危害等,主要的还是爆炸对炮孔周围介质的损坏使爆破初始条件无法重复,在短距离地层中传播的应力波受初始条件的影响较大,很难总结其传播衰减规律^[7]给数据分析带来较大困难。

近年来可控震源发展比较快,如重锤震源、气动震源、液压驱动可控震源、电磁驱动可控震源等,这些可控震源虽然可以重复,但在功率、提供尖锐的脉冲信号和频域范围上比爆破震源差很多^[8],实际地质勘测中较难推广应用。

借鉴隧道施工中进行超前地质预报的 TSP 方法^[9],通过实验研究了一种可控爆源,使炸药在水桶中爆破,研究了初始爆炸载荷的特点及对爆破地震波的影响规律。该爆源不需要钻孔,适合在地面上进行地层结构探测。

1 可控爆源试验

1.1 实验仪器与方案

可控爆源将炸药放在水容器中起爆,如图 1 所示,铁笼子直径 0.6 m,高 0.8 m,为了装水,外面套 1 层塑料薄膜,炸药悬挂在距地面 0.2 m 的位置。数据采集系统为工控机、CM4016 多功能信号调理模板、LC01 系列压电加速度传感器。现场传感器布设如图 2 所示,信号线接头处为防止其触地,用塑料管套住。

1.2 测试结果与分析

为了分析可控爆源的性质,先在渔峡口镇选择的试验场地上进行试验。该场地岩体的完整性较好。在距震源装置 5 m 和 25 m 的地方测得的质点振动加速度如图 3 和图 4 所示。

对比这 2 次实验结果,可以看出 2 次试验测得振动的初始相位、波形非常相似,如果不是其振动幅值上略有差别和 2 次试验的采样时间不一样,几乎很难判断这是 2 次实验的结果。通过傅立叶变换把时域内的加速度信号转换为频域内的加速度信号,如图 5 和图 6 所示,可以看出它们的频谱图也基本一致,第 1 个测点离爆源较近,主振频率以 300 Hz

为中心,带宽为 200 ~ 400 Hz;第 2 个测点的主振频率分别为 40 Hz 和 300 Hz,2 次试验的频谱图也非常接近。

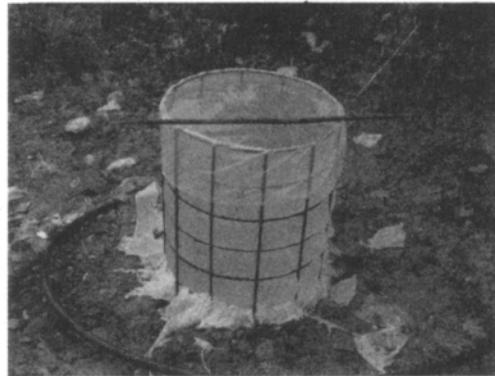


图 1 震源装置图

Fig. 1 Experiment device

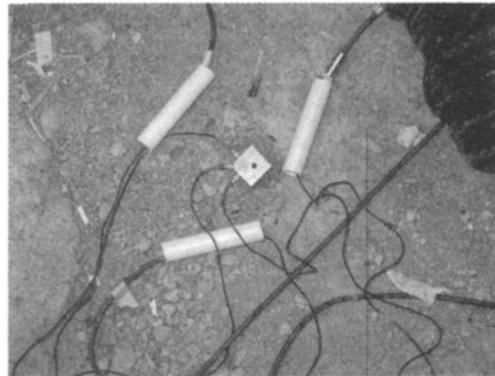


图 2 传感器布设图

Fig. 2 Sensor install

多次同样的实验均可以得出:这种装置下的实验有很好的重复性,它们的初始相位、振动幅值、波形、频谱图都基本一致,这是可控爆源最主要的一个特点;另外该震源具有冲击特性,在震源附近形成一定频域宽度的激振源,在距离 1 m 处测得该激振源振动持续时间仅有 0.02 s,比一般岩土爆破中提供的激振源持续时间短,这样容易区分和直达波和反射波;并且爆源载荷容易计算。

1.3 可控爆源载荷形式

根据 Robert H Cole 的研究^[10],球形装药在无限水域中爆炸时,水中任一点的最大超压可表示为

$$\text{当 } 0.05 \leq \bar{R} \leq 10 \text{ 时 } \Delta p_{\phi} = \frac{355}{\bar{R}} + \frac{115}{\bar{R}^2} - \frac{2.44}{\bar{R}^3} \quad (1)$$

$$\text{当 } 10 < \bar{R} \leq 50 \text{ 时 } \Delta p_{\phi} = \frac{294}{\bar{R}} + \frac{1387}{\bar{R}^2} - \frac{1783}{\bar{R}^3} \quad (2)$$

式中: $\bar{R} = R/\sqrt[3]{W}$, R 代表到爆源的距离, W 代表化学爆炸的 TNT 当量, \bar{R} 的单位是 $\text{m}/\text{kg}^{1/3}$; Δp_{ϕ} 的单位是 kg/cm^2 , 把它换算成国际制单位约为 98 kPa。

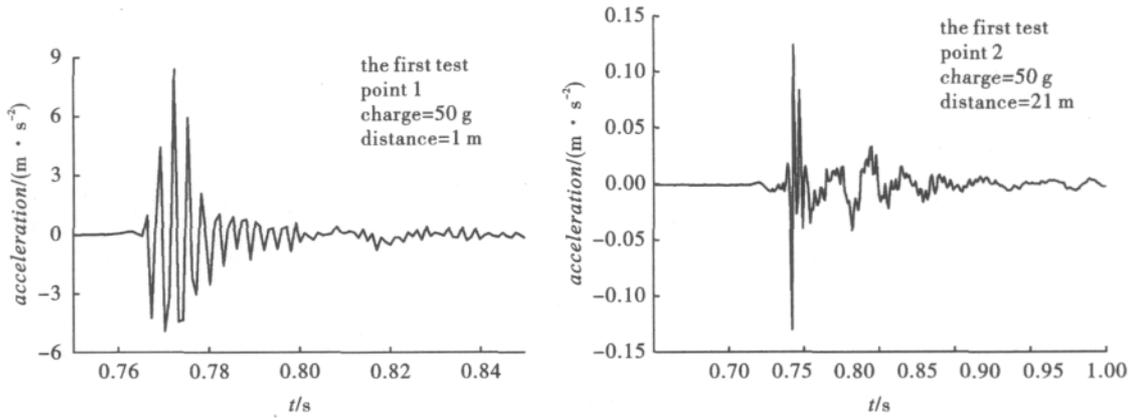


图 3 第 1 次试验相距 20 m 两个测点的振动加速度

Fig. 3 The acceleration of two points between 20 m on the first test

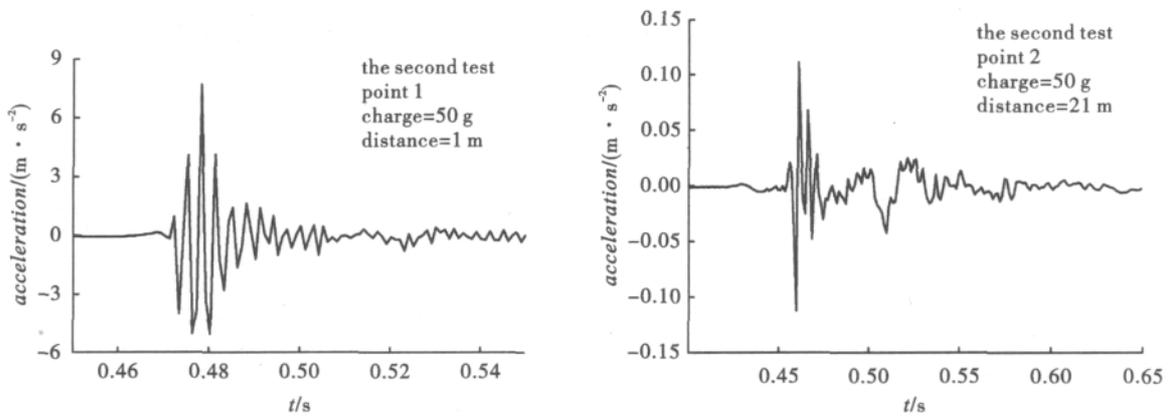


图 4 第 2 次试验相距 20 m 两个测点的振动加速度

Fig. 4 The acceleration of two points between 20 m on the second test

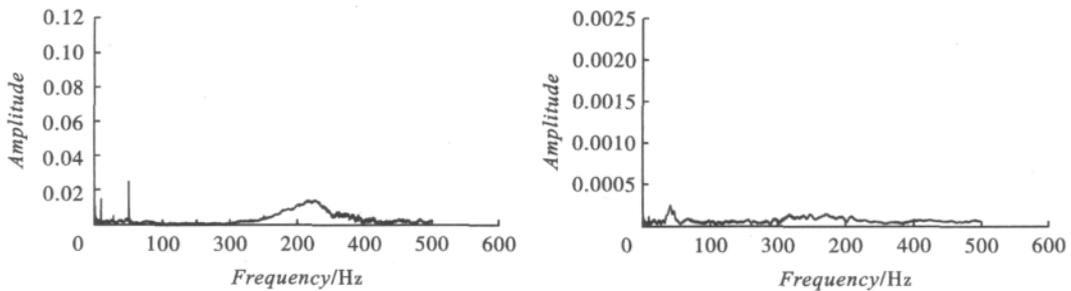


图 5 第 1 次试验相距 20 m 两个测点的振动频谱图

Fig. 5 The spectrum graph of two points between 20 m on the first test

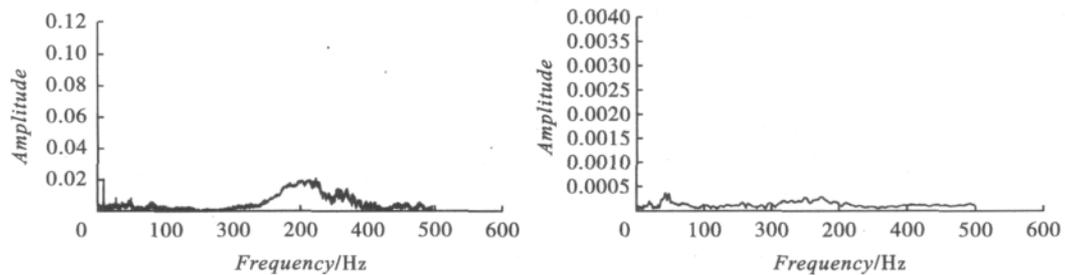


图 6 第 2 次试验相距 20 m 两个测点的振动频谱图

Fig. 6 The spectrum graph of two points between 20 m on the second test

有限水域中关于爆炸冲击载荷的研究较少,一般采用类别和近似计算的方法获得。根据文献

[11] ,用 $\bar{R} = R/\sqrt[3]{2W}$ 代替 $\bar{R} = R/\sqrt[3]{W}$ 时 ,原来用于无限水域中计算最大超压的公式、计算超压持续时间的公式也适合于接触爆炸。

吴德义等人圆柱状容器水压爆破压力进行了试验研究^[12] ,认为在爆源附近 ,取 $\bar{R} = R/\sqrt[3]{2W}$ 时 ,用式(1) ~ 式(2) 计算结果接近实测值 ,在距爆源远的地方 ,计算结果与实测值差别较大 ,并用镜像法推导了相应的计算公式。

为了验证以上理论 ,确定爆炸载荷 ,用 LS—DYNA 程序对可控爆源的爆炸压力进行了模拟。由于上表面为自由面 ,四周为塑料薄膜 ,可设应力波遇到它们的反射系数为 1.0 ,水桶底面为地面(密实土) 根据应力波传播衰减理论 ,应力波在它上面的反射系数约为 0.6 ,模拟计算尺寸如图 7 所示 ,空气采用多项式状态方程 ,水体采用格林尼森状态方程 ,炸药采用 JWL 状态方程。当乳化炸药药量为 50 g 时 ,其 TNT 当量约为 42 g ,底面上质点的应力分布如图 8 所示。图 7 中 d 为底面上质点到底面中心的距离。

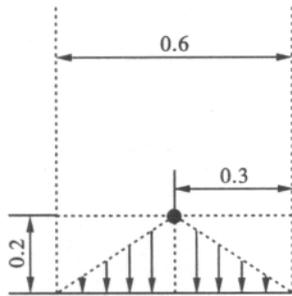


图 7 可控爆源计算模型(单位:m)

Fig. 7 Calculation model of controllable blasting source(unit:m)

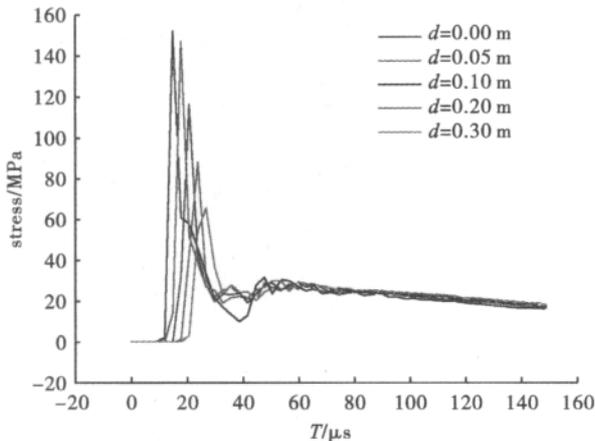


图 8 底面上质点应力分布

Fig. 8 Stress distribution on bottom

根据前面的分析 ,底面上各质点载荷应具有如下形式

$$p(R,t) = \Delta p_\phi e^{-\frac{t-R/c_0}{\theta}} \sigma\left(t - \frac{R}{c_0}\right) \quad (3)$$

式中: θ 称为时间常数;令 $\bar{R} = R/\sqrt[3]{2W}$,超压 Δp_ϕ 按式(1) ~ 式(2) 计算合适。

$$\text{当 } t \geq R/c_0 \text{ 时 } \sigma\left(t - \frac{R}{c_0}\right) = 1 \quad (4)$$

$$\text{当 } t < R/c_0 \text{ 时 } \sigma\left(t - \frac{R}{c_0}\right) = 0 \quad (5)$$

根据文献[11] 超压持续时间按下式计算

$$\tau = 2 \times 10^{-4} (2WR)^{1/4} \quad (6)$$

另外 ,由于在水中爆炸 ,此装置提供的冲击载荷是垂直于地面向下的 ,如图 7 所示 ,这样在确定的爆源载荷形式下容易借助计算机进行分析。

2 茅坪滑坡体地质性质测试与分析

茅坪滑坡体位于清江中下游 ,在隔河岩和水布垭 2 个水利枢纽之间 ,属于复活的古滑坡体 ,上覆岩体为土石混合体。2001 年以来该滑坡体连续发生几次大的滑动 ,有时伴随岩体崩塌 ,严重影响当地居民安全 ,及清江航运和隔河岩水电站的安全 ,探测其特性工程意义重大。而且它与三峡大坝较近 ,属于同一地层系 ,研究它的滑坡机理对三峡库岸滑坡也有很强的借鉴意义^[12-15]。利用可控爆源对该滑坡体地质性质进行了探测 ,由于该可控爆源试验具有很好的重复性 ,可以在同一地点进行多次试验 ,以代替一般爆破震源需要同时布置多个测点。探测采用 5 只 LC01 系列加速度传感器 ,进行 7 次重复试验 ,在距爆源 9 ~ 65 m 的范围内以 2.0 m 的间隔布置测点 ,示意图如图 9 所示。

每次爆破试验 ,所有测点同步采集信号 ,测点 1 距离爆源很近 ,主要用来记录可控爆源每次爆炸的时间。其它测点与爆源的相对位置、各测点振动的起跳时间如表 1 所示。

假设测点布置平面与结构面不平行 ,其夹角为 θ ,可控爆源垂直向下到结构面的距离为 y ,如图 9 所示 ,地质体内的应力波速度为 c ,利用图 9 和表 1 的条件 ,通过回归和数值分析 ,每 3 个测点可以求出一组地质体波速 c_1 、 y_i 和 θ_i ,共有 C_{28}^3 组数据 ,去除离散值较大的前 10 组和后 10 组数据 ,取其数据的平均值得 $\bar{y} = 47.2 \text{ m}$, $\bar{\theta} = 68.3^\circ$, $\bar{c} = 1351.6 \text{ m/s}$ 。根据振幅和相位的差别 ,可以判定测点振动的起始时间为纵波到达的时间 ,因此该波速为纵波波速 ,即 $c_p = 1351.6 \text{ m/s}$ 。通过极化滤波把纵波和横波分

离 得到横波引起质点振动起始时间,采用相同的分析技术得到横波的波速为 $c_s = 810.7 \text{ m/s}$ 。经过称重测量该岩土体的平均密度为 $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$,再根

据波速计算公式,可以得到该滑坡体的一般物理性质:弹性模量为 $E = 3.04 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.26$ 。

表 1 各个测点振动的起始时间(单位: ms)

Table 1 Initial vibration time of every test point(unit: ms)

测点距离/m	$N_1 = 1$	$N_2 = 2$	$N_3 = 3$	$N_4 = 4$	$N_5 = 5$	$N_6 = 6$	$N_7 = 7$
$2: 8 + 2N_i$	83.48	85.53	87.62	89.72	91.86	94.02	96.20
$3: 22 + 2N_i$	98.40	100.62	102.86	105.11	107.38	109.67	111.97
$4: 36 + 2N_i$	114.29	116.61	118.95	121.30	123.66	126.03	128.41
$5: 50 + 2N_i$	130.80	133.20	135.60	1380.00	140.42	142.85	145.23

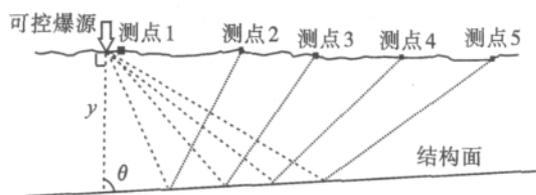


图 9 可控爆源与测点布置示意图

Fig. 9 The layout sketch between control blast source and test points

各测点上典型的振动如图 10 和图 11 所示,图 10 中容易看出在初至波引起的质点振动之后,还有 2~3 反射波引起的震动,说明测点以下存在明显的几个结构面。图 11 反映了地表下第 1 个大的结构面反射波引起的震动和初至波引起的质点振动,根据前面的分析得到的波速,和通过发射波和初至波之间的时间差,容易计算出该结构面的位置大约在

地表下 50~60 m。

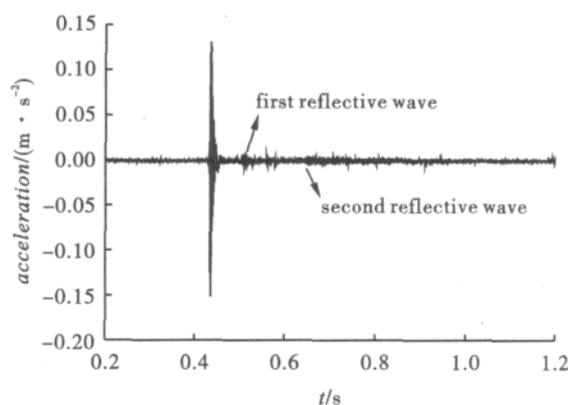


图 10 直达波与不同地层结构面的反射波引起的测点振动图

Fig. 10 Vibration of test point induced by direct stress wave and reflective stress waves on different structural planes

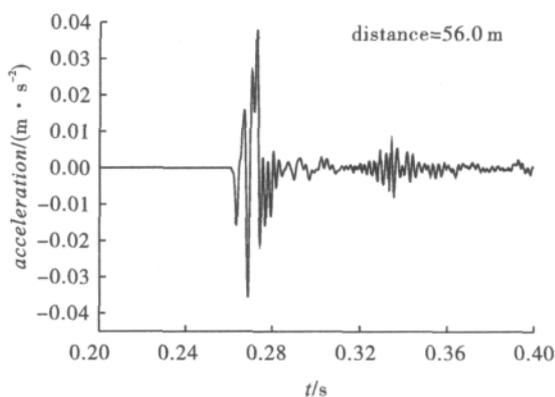
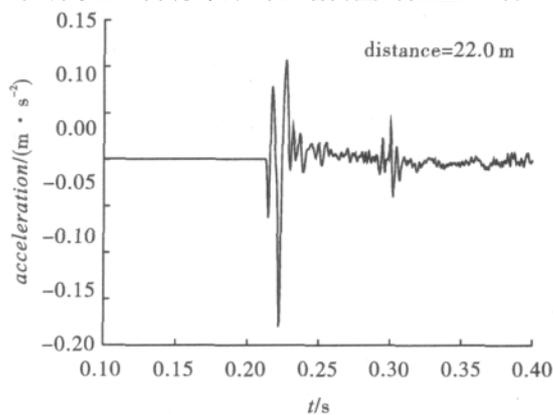


图 11 直达波与可能的滑带上的反射波引起的测点振动图

Fig. 11 Vibration of test point induced by direct stress wave and reflective stress waves on slide zone

改变可控爆源的位置在该滑坡体上进行其它地质结构探测试验,认为该滑坡体岩体结构具有分层性质,坡面以下 50 m 左右结构面明显,可能为滑带。随后的钻孔勘探和竖井开挖证实了可控爆源的探测结果,为滑坡体治理和预防提供了依据。

3 结论

通过模型试验得到了一种可用于地质勘测的可控爆源,并在茅坪古滑坡体地层结构探测中进行了应用,可以得出以下结论:

(1) 可控爆源具有一般爆破震源的优点,如能够提供较大的脉冲激励,使震源特征容易控制。

(2) 由于可控震源不损害周围岩体介质,因此可以在同一地点进行多次试验。

(3) 由于不涉及固体材料破坏的难题,因此便于利用计算机进行分析。

(4) 该装置实际操作简单,有利于进行在地面上对地层结构进行探测,通过进一步的研究改进,该装置有望成为声波法探测地质体结构的理想激励震源。

(5) 用该装置对复活的茅坪古滑坡体岩土性质和地质结构进行了探测,显示该滑坡体的滑带处于地表下约 50 m 处,该结果与钻孔勘探和竖井开挖揭示的结果一致。

参考文献(References)

- [1] 陈颢,黄庭芳 编著. 岩石物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 41-67.
- [2] 韩学军. 地震探测震源药柱技术进展[J]. 爆破, 2002, 13(4): 83-85.
- [2] HAN Xue-jun. The latest progresses in seismic explosive columns technology used for seismic prospecting [J]. Blasting, 2002, 13(4): 83-85. (in Chinese)
- [3] KING M S. Elastic wave propagation in and permeability for rocks with multiple parallel fractures [J]. International Journal of Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39: 1033-1043.
- [4] KNOPOFF L. A matrix method for elastic wave problems [J]. Bull Seism Soc Am, 1964, 54: 431-438.
- [5] THROWER E N. The computation of dispersion of in layered elastic media [M]. F App1 Phys, 1965.
- [6] ABO-ZENA A. Dispersion function computation for unlimited frequency value [J]. Geophys J R Astr Soc, 1979, 10: 5891.
- [7] CHARLES H Dowing. Blast vibration monitoring and control [Z]. [S. l.]: [s. n.], 1985: 24-52.
- [8] 林君, 著. 电磁驱动可控震源地震勘探原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 2-19.
- [9] SHI Bai-sheng. TSP203 geologic advance prediction system and its application [J]. Journal of Rail Way Engineering Society, 2004, 84(4): 27-30.
- [10] ROBERT H Cole. Underwater explosion [M]. USA: Princeton University Press, 1948.
- [11] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用 [M]. 熊建国, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1987: 504-508.
- [12] 吴德义, 李辉煌, 杨基明. 不同条件下圆柱状容器水压爆破压力测试及其分析 [J]. 流体力学实验与测量, 2002, 16(4): 81-86.
- [12] WU De-yi, LI Hui-huang, YANG Ji-ming. Pressure measurement and analysis of a liquid cylinder under different blasting conditions [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2002, 16(4): 81-86. (in Chinese)
- [13] 严福章, 王思敬, 徐瑞春. 清江隔河岩水库蓄水后茅坪滑坡的变形机理及其发展趋势研究 [J]. 工程地质学报, 2003, 11(1): 15-23.
- [13] YAN Fu-zhang, WANG Si-jing, XU Rui-chun. Deformation mechanism and development tendency of Maoping landslide after impounding of Geheyan reservoir on Qingjiang river [J]. China Journal of Engineering Geology, 2003, 11(1): 15-23. (in Chinese)
- [14] 柳丙善, 李世海, 赵卿. 清江隔河岩水库茅坪滑坡的主要影响因素分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 36-43.
- [14] LIU Bing-shan, LI Shi-hai, ZHAO Qing. Research on the main factors causing Maoping landslide based upon the insitu investigation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 36-43. (in Chinese)
- [15] 邓建辉, 马水山, 张保军, 等. 清江隔河岩水库茅坪滑坡复活机理初探 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1730-1737.
- [15] Deng Jian-hui, MA Shui-shan, ZHANG Bao-jun, et al. Preliminary investigation on the reactivation of Maoping landslide Geheyan reservoir on Qingjiang river [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1730-1737. (in Chinese)
- (上接第 31 页)
- [9] XIAO Ming-kui, LIU Gang, BAI Shao-liang, et al. The hysteretic energy spectra of seismic structures [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2002, 18(3): 110-115. (in Chinese)
- [10] 郭子雄, 杨勇. 恢复力模型研究现状及存在问题 [J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 47-51.
- [10] GUO Zi-xiong, YANG Yong. State-of-the-art of restoring force models for RC structures [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2004, 20(4): 47-51. (in Chinese)
- [11] 徐建. 建筑结构设计常见及疑难问题解析 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [12] 肖明葵. 基于性能的抗震结构位移及能量反应分析方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [13] 徐赵东, 郭迎庆. MATLAB 语言在建筑抗震工程中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [14] 盛明强. 基于滞回耗能的结构抗震性能评价方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008.