维普资讯 http://www.cqvip.com

第37卷 第1期 吉林大学学报(地球科学版) Vol. 37 No. 1
2007年1月 Journal of Jilin University(Earth Science Edition) Jan. 2007

时间域反射法用于滑坡监测的试验研究

张 青[1,2],史彦新[2],林 君[1]

1. 吉林大学 智能仪器与测控技术研究所,长春 130026
2. 中国地质调查局 水文地质工程地质技术方法研究所,河北 保定 071051

摘要:依据时间域反射测试技术(TDR)的基本原理,提出了TDR技术在滑坡监测中的野外工作方法。为了更好地了解电缆的变化规律,进行了室内试验。结合实际应用,给出了TDR监测滑坡的野外应用实例。通过对室内模拟试验和野外应用试验数据的分析、对比,讨论了TDR监测滑坡的实际应用效果和有效性。研究结果表明,与传统的滑坡监测方法相比较,TDR用于滑坡监测的技术方法比较新颖,具有节省时间、成本低廉、定位准确等特点。由此可见,TDR用于滑坡监测,能够实现快速、实时、连续监测。

关键词:时间域反射测试技术;地质灾害;滑坡;滑坡监测

中图分类号:P642.22 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-5888(2007)01-0134-05

Landslide Monitor Technique Based on TDR

ZHANG Qing[1,2], SHI Yan-xin[2], LIN Jun[1]

1. *Institute of Intelligent Measurement & Control, Jilin University, Changchun* 130026, *China*
2. *Institute of Hydrogeology and Engineering Geologic Techniques, CGS, Baoding, Hebei* 071051, *China*

Abstract: According to the case of monitoring landslide, brings up the field method about the use of Time Domain Reflectometry (TDR) for monitoring landslide. In order to find out about the change rule of the cable fault, the test was carried on. On the basis of carrying on simulated test in the lab, an example of monitoring landslide was given based on TDR. Through to the analysis of the simulation test in the lab and the test data in the field, the authors discussed TDR monitoring landslide practical application effect and validity. The research material indicated that the landslide monitor technical method based on TDR is quite novel, compares with the traditional landslide monitor method. It has many characteristics such as saving the time, the cost inexpensively, the localization being accurate and so on. As a result, the TDR used for monitoring landslide, can fast realize, real-time, the continuous monitoring.

Key words: time domain reflectometry(TDR); geologic hazard; landslide; landslide monitor

0 引 言

我国的地质灾害种类繁多,突发性地质灾害事件发生比较频繁,已经造成了巨大的经济损失。在已经发生的地质灾害事件中,崩塌、滑坡和泥石流等灾害属于突发性地质灾害中最为严重的一类,这类地质灾害在全球发生的数量之多、危害之大、损失之重,已经引起了人们的极大重视。为了有效地预防、控制和治理地质灾害,必须对滑坡进行及时准确的监测和预报,达到减灾防灾的目的。在以往的滑坡

收稿日期:2006-06-15

基金项目:国土资源部科技专项(20001020305);中国地质调查局国土资源大调查项目(1212010340205)

作者简介:张青(1965-),男,湖北松滋人,博士研究生,教授级高级工程师,主要从事地质仪器和地质灾害监测系统的研究,Tel:0312-3107043,E-mail:ffszqing@cgs.gov.cn。

维普资讯 http://www.cqvip.com

监测中，对于滑坡体地表以下的深部变形监测，主要以钻孔倾斜仪为主[1]，最近几年滑坡监测技术的研究表明，时间域反射测试技术（Time domain reflecto metry，TDR）用于滑坡监测也是有效的[2]。

TDR 技术属于一种电子测量技术，许多年以来一直用于各种物体形态特征的检测和空间定位。早在 20 世纪 80 年代初期，美国等发达国家的研究人员将 TDR 技术开始用于地质勘查工作，针对煤田地质方面，TDR 技术用于监测地下煤层的变形位移[3]；在农业地质方面，TDR 技术可用于土壤湿度和含水量的测试[4,5]等；在矿业方面，有关研究人员将 TDR 技术应用于露天矿边坡的稳定性监测[6]。直到 90 年代中期，TDR 技术才开始用于地质灾害的监测工作。TDR 技术运用于崩塌、滑坡的监测尚属研究的探索阶段，国外的研究工作早于国内。国土资源部 2000 年科技专项计划《长江三峡库区地质灾害监测与预报》中，开展了基于 TDR 技术的滑坡监测系统研究，并取得了较好的成果。随后，在 2003 年的中国地质调查局地质调查计划项目《地质灾害预警关键技术研究与示范》中，进行了有关 TDR 技术监测滑坡的应用试验研究。

1　TDR 基本原理

同轴电缆中 TDR 与雷达技术的工作原理基本相同，其区别在于传播介质不同。在同轴电缆 TDR 测试过程中，采用同轴电缆作为传输具有一定能量的瞬时脉冲的传播介质，电脉冲信号在同轴电缆中传播的同时，能够反映同轴电缆的阻抗特性。当电缆发生变形时，它的特性阻抗将发生变化。当测试脉冲遇到电缆的特性阻抗变化时，就会产生反射波。对反射波信号的传播时间进行测量，就可以确定其传播时间和速度，由此可以推断出同轴电缆特性阻抗发生变化的位置；通过对反射信号振幅的分析，就可进一步推算电缆的状态等。因此同轴电缆的 TDR 技术被称之为“闭路雷达”[7]。

在进行 TDR 测试时，若发射信号为 V_t，反射信号为 V_r，则反射系数为

$$\rho = \frac{V_r}{V_t} 。 \tag{1}$$

由于反射系数能够反映同轴电缆中反射信号的变化情况，因此，可以采用反射系数来详细描述电缆的状态。当同轴电缆的末端处于开路状态时，电缆的反射信号与发射信号大小相等，但相位相同，则反射系数为＋1。与之相反，当同轴电缆的末端处于短路状态时，电缆中的反射信号与发射信号大小相等，但相位相反，则反射系数为－1。当电缆的特性阻抗发生变化时，其反射系数等于在＋1 与－1 之间的某个确定值。如果电缆阻抗变小，反射信号幅值减小，那么其反射系数为负值；相反，如果电缆阻抗变大，反射信号幅值增大，那么其反射系数为正值。

在实际工程应用中，若同轴电缆的长度为 d，电磁波在同轴电缆中的传播速度为 v_p，反射波与发射波的时间延迟为 t，则有如下关系式[8]：

$$t = \frac{2d}{v_p} 。 \tag{2}$$

通常情况下，电脉冲信号在同轴电缆中的传播速度 v_p 可以由下式表示：

$$v_p = \frac{C}{\sqrt{K^2}} 。 \tag{3}$$

其中：C 为光速（3×10^5 km/s）；K 为与同轴电缆特性有关的常数。

由此可见，对反射波信号与发射波信号之间的延迟时间进行检测，就可以准确计算出电缆发生故障的位置，达到利用同轴电缆中的 TDR 技术进行滑坡监测的目的。

从(1)式可以看出，反射系数表明了反射信号与发射信号之间的关系，同时能够描述同轴电缆变形故障的性质[9,10]，因此反射系数是用于描述 TDR 信号的主要参数之一。

根据对同轴电缆传输的理论分析[11]，反射系数也可以用电缆传输过程中的阻抗形式来表示，即

$$\rho = \frac{(R_t - R_0)}{(R_t + R_0)} 。 \tag{4}$$

其中：R_t 为等效电缆末端阻抗；R_0 为电缆的特性阻抗。

由(4)式可以推出

$$R_t = \frac{1+\rho}{1-\rho} R_0 。 \tag{5}$$

显而易见，可以得出以下认识：①当 $\rho=0$ 时，$R_t=R_0$，表示电缆的特性阻抗与电缆末端等效阻抗相匹配，发射信号得到了很好的传输，没有反射信号产生；②当 $\rho=+1$ 时，$R_t\to\infty$，表示电缆末端处于开路状态，发射信号完全被反射；③当 $\rho=-1$ 时，$R_t=0$，表示电缆末端处于短路状态，发射信号完全被吸收；④当 $-1<\rho<1$（$\rho\neq0$）时，表示电缆发生变形，并且产生反射波信号。

维普资讯 http://www.cqvip.com

2 TDR法在滑坡监测中的应用

为了分析滑坡的形成机理、活动状态及其发展趋势,位移与变形的长期观测是滑坡动态监测的重要组成部分。采用TDR技术对滑坡进行监测,可以了解和掌握滑坡深部的位移与变形的动态变化过程,实现对滑坡变形的动态监测,并且为滑坡的监测、预警预报研究提供可靠的数据。

在滑坡的长期监测过程中,根据滑坡的实际情况,首先用钻打穿滑动面后直达稳定的地层,并且将同轴电缆放入监测孔内,然后回填钻孔,使同轴电缆与周围地层紧密结合,对滑坡进行深部定位监测,以确定滑动面的位置及其上部不同深度滑坡体的位移动态(图1)。

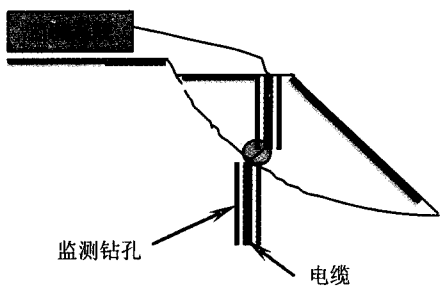


图1 TDR法监测滑坡示意图

Fig. 1 Sketch map of landslide monitoring on TDR

在安放好测试同轴电缆之后,滑坡体一旦产生滑移变形,其位移就会引起同轴电缆产生形变,电缆变形导致电缆阻抗特性的变化。这时,安装在地面上的滑坡监测系统对钻孔内的测试同轴电缆的形变进行监测。在监测过程中,首先向同轴电缆发射测试脉冲信号,同时,对反射信号进行数据自动采集。通过对监测数据(包括时间和幅度)进行分析和处理,就能得到同轴电缆变形处地层的变化趋势,实现对滑坡的动态监测,为滑坡预测、预报、评价以及防治研究提供可靠的数据。

3 应用试验

3.1 室内模拟试验

为了得到TDR特征信号与电缆变形量之间的对应关系,利用不同长度的同轴电缆进行了室内模拟试验,对同轴电缆进行了拉伸、剪切等变形试验,研究同轴电缆在拉伸、剪切作用下TDR波形变化规律。本次室内试验以测试SYWY－75－12型同轴电缆为重点,进行了多次剪切试验和拉伸试验。SYWY－75－12型同轴电缆的结构参数见表1。

在拉剪试验机上,对同轴电缆进行了剪切和拉伸,试验步骤如下:

(1)将同轴电缆放置于拉剪试验机的压块内,固定好。

(2)剥离待剪切、拉伸同轴电缆首端的电缆护套层,与TDR滑坡位移监测系统相连,同时连接监测系统的其他测试数据线。

(3)检查连接无误后,开启TDR监测系统。

(4)运行监测程序,对还未变形的同轴电缆进行测试,保存测试数据,同时进行记录。

(5)逐步压紧电缆压块,每压紧一步,记录电缆的变形量(垂直挤压变形量),同时保存TDR测试数据,直至电缆压紧为止。

(6)开启拉剪试验机的电源,对同轴电缆进行拉伸和剪切,同时记录电缆变形量(拉伸位移或剪切位移)及TDR测试数据,直至同轴电缆断开。

经过反复试验发现,电缆的拉伸或剪切的变形量不仅与电缆的直径及材料的强度等许多因素有关,而且还与电缆的拉伸或剪切带宽度有着密切的联系。对于同一类电缆来说,电缆的拉伸或剪切带宽度的大小就决定了这类电缆能够承受的最大变形

表1 同轴电缆型号与结构参数

Table 1 Coaxal type and structure parameter

型号	特性阻抗/Ω	内导体		填充介质	外导体		护套	
		直径/mm	材料		直径/mm	材料	直径/mm	材料
SYWY－75－12	75	2.5	铜	发泡聚乙烯	12	铝箔和铝镁合金线	14	聚氯乙烯

维普资讯 http://www.cqvip.com

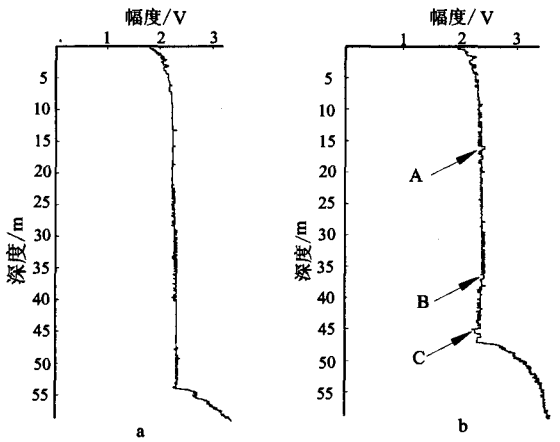


图 2　室内试验曲线

Fig. 2　Test curve in lab

量。由于不同电缆的特性阻抗不同，因此 TDR 信号幅度也不同。完好无损伤电缆的 TDR 信号为一平滑直线，如图 2a 所示。电缆受到外界挤压后产生变形，随电缆变形程度的不同，TDR 信号也随之有不同的异常出现，其 TDR 信号测试曲线如图 2b 所示，其中 A 点、B 点是两种不同电缆接头引起的 TDR 信号异常，C 点是电缆受外界挤压产生变形引起的 TDR 信号异常。

3.2　野外应用实例

本文的野外应用试验选择在三峡库区新铺滑坡，位于重庆市奉节县新铺村的滑坡面积大约为 0.48 km^2，有 3 个钻孔是用于安装钻孔倾斜仪的，为了进行 TDR 试验，同时安装 TDR 监测系统的电缆。这 3 个孔位呈三角形分布，涵盖整个滑坡体，#16孔位于滑坡体前部，距离长江江边大约 200 m；#19 孔、#32 孔位于滑坡体后部的山坡上，其中 #19孔位于滑坡体的西部区域，#32 孔位于滑坡体的东部区域。

各监测孔深度及 TDR 监测电缆长度见表 2。

表 2　监测孔情况

Table 2　Monitoring hole condition

孔号	终孔深度/m	TDR 监测电缆长度/m
#19	65.40	64
#32	58.74	56
#16	62.35	63

在进行 TDR 监测时，根据监测孔深度和所埋设电缆的长度，对于每个监测孔而言，分别采用 3 种不同的采样时间间隔（如 500 ps、1 ns、2 ns）进行数据采集。图 3a、3b、3c 分别是 #16 孔、#19 孔、#32 孔的 TDR 监测曲线，采样时间间隔 500 ps。

从图中看出，#19 孔的监测曲线在 48 m 处有向下弯曲的现象，推断可能是电缆中进水引起的，这一点在室内的模拟试验中得到验证。#16 孔的监测曲线从 52.4 m 处开始，曲线有一个小台阶，表示

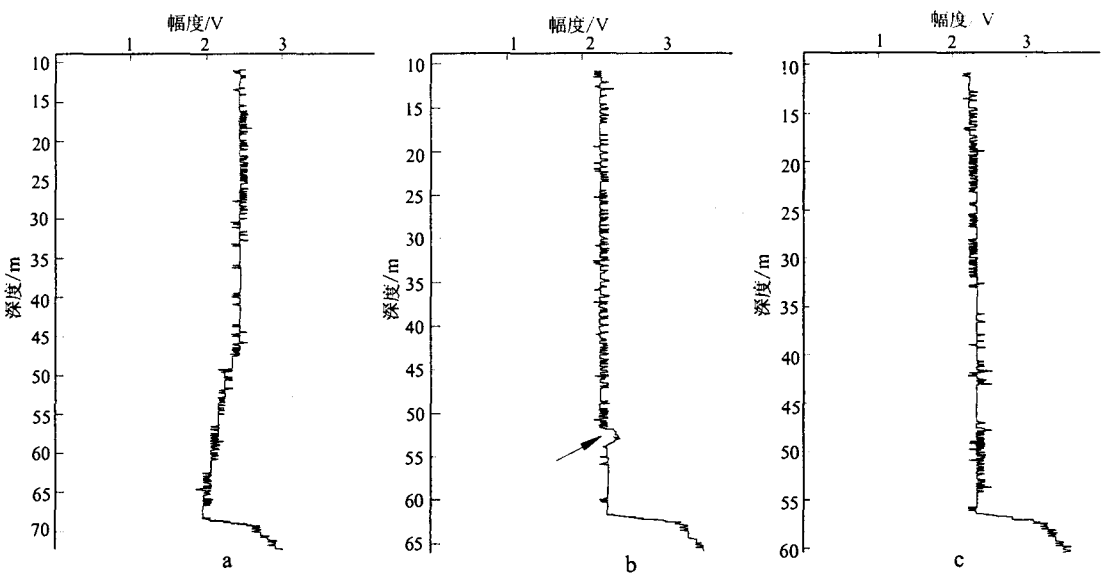


图 3　新铺滑坡监测曲线

Fig. 3　Monitoring curve in Xinpu landslide

维普资讯 http://www.cqvip.com

该处电缆的阻抗变大,可能是电缆变形引起的。#32孔的监测曲线形态完全是一致的,未见有异常出现,说明电缆没有产生变形。

由野外监测结果可以看出:

(1)电缆的TDR信号能够反映地下变形情况;

(2)#19孔的现象表明,井中的电缆可能进水,能够反映地下水位情况,这一点与室内试验的现象基本一致,如图4所示。

为了验证#19孔的现象,在室内模拟地下水位试验过程中,将同轴电缆的末端8 m放入水中,几小时后进行测量,得到图4(a)所示的室内模拟试验水位监测曲线。图4(b)表示#19孔TDR监测曲线。从图中可以看出,图4(a)中的曲线在66.4 m处开始向下弯曲,表示电缆已经充水至66.4 m,与放入水中的电缆长度基本相符。而图4(b)的曲线在48 m处开始向下弯曲,这正好与室内模拟试验的现象相吻合。

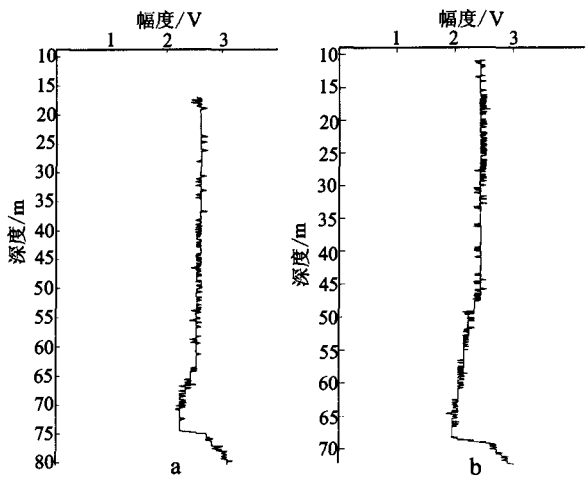


图4 TDR水位监测曲线

Fig. 4 Monitoring curve of groundwater level

从试验结果看,TDR监测系统不仅能够进行变形监测,而且,只要选择适宜的电缆,TDR监测系统还可以同时进行地下水位监测。在此基础上,可以建立起多参数一条电缆就能解决的方案;也可以多条电缆与测斜管同时放入井中,与钻孔倾斜仪同时观测。

4 结束语

通过进行室内模拟试验和野外监测试验,并对试验的结果加以分析和总结,可以看出TDR用于滑坡监测具有以下优点:

(1)节省时间:在很短的时间(几秒钟)内完成全孔不间断(连续)观测。

(2)成本低廉:埋入的孔中电缆成本较低。

(3)定位准确:一次数据采集即可获得全孔的观测数据,并且由于采集点密集,大大提高了定位精度。

由此可见,针对滑坡体深部的变形和位移,采用TDR技术进行动态监测,不仅能够减轻监测工作劳动强度,而且还能够提供一种简单而实用的监测新技术方法。

参考文献(References):

[1] 刘传正. 地质灾害勘查指南[M]. 北京:地质出版社,2000.
LIU Chuan-zheng. The guide in geological hazard survey[M]. Beijing:Geological Publishing House,2000.

[2] 张青,史彦新,朱汝列,等. TDR滑坡监测技术的研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2001,**12**(2):64-66.
ZHANG Qing, SHI Yan-xin, ZHU Ru-lie, et al. The study on landslide monitoring with TDR technology [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2001,**12**(2):64-66.

[3] Hasenfus G J, Johnson K L, Su D W H. A hydrogeomechanical study of overburden aquifer response to longwall mining[C]//Proceedings, Seventh International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown:West Virginia University,1988:149-162.

[4] Topp G C,Davis J L,Annan A P. Electromagnetic determination of water content using TDR: II Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines[J]. Soil Sci Soc Amer J, 1982,**46**:678-684.

[5] Dowding C H,Pierce C E. Measurement of localized failure planes in soil with time domain reflectometry [C]//Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Application. Evanston:Northwestern University, 1994.

[6] Connor K M O. Applications of time domain reflectometry in the mining industry[C]//Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications. Evanston: Northwestern University, 1994.

(下转143页)

维普资讯 http://www.cqvip.com

Tech，1998，**38**(3)：43－49.

[5] 齐兵强，王占生. 曝气生物滤池在污水处理中的应用[J]. 给水排水，2000，**26**(10)：4－8.
QI Bing-qiang，WANG Zhan-sheng. The application of BAF for wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering，2000，**26**(10)：4－8.

[6] 王毓仁. 提高废水生物反硝化效果的理论和实践[J]. 石油化工环境保护，1995(2)：1－7.
WANG Yu-ren. The principle and practice of the increase of denitrification rate for wastewater treatment [J]. Oil Chemical Environmental Protection，1995(2)：1－7.

[7] 徐亚同. 废水反硝化除氮[J]. 上海环境科学，1994，**13**(10)：8－13.
XU Ya-tong. Denitrification for wastewater treatment [J]. Shanghai Environmental Science，1994，**13**(10)：8－13.

[8] 杨殿海，章非娟. 碳源和碳氮比对焦化废水反硝化工艺的影响[J]. 同济大学学报，1995，**23**(4)：413－416.
YANG Dian-hai，ZHANG Fei-juan. The effect on the denitrification of the carbonization wastewater for carbon resources and C/N[J]. Journal of Tongji University，1995，**23**(4)：413－416.

[9] 章非娟，杨殿海，傅威. 碳源对生物反硝化的影响[J]. 给水排水，1996，**22**(7)：26－28.
ZHANG Fei-juan，YANG Dian-hai，FU Wei. The effect on the denitrification of the wastewater for carbon resources[J]. Water & Wastewater Engineering，1996，**22**(7)：26－28.

（上接 138 页）

[7] Andrews. Time domain reflectometry[C]//Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental，Infrastructure，and Mining Applications. Evanston：Northwestern University，1994.

[8] Kong J A. 电磁波理论[M]. 吴季译. 北京：电子工业出版社，2003.
Kong J A. Electromagnetic wave theory[M]. Translated by Wu Ji. Beijing：Publishing House of Elctronics Industry，2003.

[9] Topp G C. Electromagnetic determination of soil water content：Measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resour Res，1980，**16**：574－582.

[10] Heimovaara T J. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms：Measurement of the complex dielectric permittivty of soil[J]. Water Resour Res，1994，**30**：189－199.

[11] Chih Ping Lin. Full waveform analysis of a non-uniform and dispersive TDR measurement system[C]// Proceedings，Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications. Evanston：Northwestern University，2001.