

TDR 技术在公路边坡监测中的应用试验

谭捍华^{1,2}, 傅鹤林³

(1.重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2.贵州省交通规划勘察设计研究院, 贵阳 550001; 3.中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

摘 要: 针对时域反射法 (TDR) 在边坡工程监测中的应用, 在简要阐述 TDR 技术基本原理的基础上, 通过对几种不同型号同轴电缆进行室内剪切试验和在实际工程的施工过程中监测系统中进行应用试验, 研究了不同型号同轴电缆在相同剪切变形条件下 TDR 波形的不同反映, 对比分析了 TDR 技术与钻孔测斜技术的监测结果, 得出了 TDR 技术能快速、经济、安全、准确确定边坡滑动面位置的结论, 并提出了应根据监测目的选择不同型号同轴电缆的应用准则。研究表明, TDR 技术非常适用于边坡勘察。

关 键 词: 边坡监测; 时域反射法; 剪切试验; 对比试验; 边坡勘察

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

Testing study of application of time domain reflectometry to highway slope monitoring

TAN Han-hua^{1,2}, FU He-lin³

(1.College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2.Guizhou Provincial Institute of Planning, Prospecting and Designing of Communications Infrastructures, Guiyang 550001, China; 3.School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: To apply the time domain reflectometry (TDR) to slope monitoring, on the base of brief summary of principle of TDR, and with types of indoor shear tests and situ construction of different cables, reflection waves of types of different cables are studied. Compared with the monitor results by TDR and oblique monitoring result by drilling hole, the following conclusions can be drawn, i.e. TDR can be fast applied to determining the sliding plane, economically, safely, and precisely. By the research results, to satisfy different monitoring goal, the application rules of types of TDR are put forward; and TDR is a very useful tool for slope survey.

Key words: slope monitoring; time domain reflectometry; shear test; comparative test; slope survey

1 引 言

边坡工程是山区高速公路建设的主要工程之一, 边坡监测及分析是边坡勘察、评价边坡稳定性、调整施工、保证施工安全的重要手段, 采用测斜仪进行深部位移监测, 是一种常用的监测手段, 但监测数据的采集需要人工定期到现场进行, 工作量大, 自动化程度不高, 监测缺乏实时性。而在存在危险性的边坡上进行监测, 监测人员的安全也存在问题。

时域反射法 (TDR) 是一种电子测量技术, 多年来, 一直被用于各种物体形态特征的测量和空间定位^[1], 国外早在 20 世纪 30 年代就被用于确定通信电缆和输电线路的故障与断裂, 80 年代在农业、矿山领域得到应用, 90 年代美国交通部门开始研究

该项技术在滑坡监测中的应用^[2-5], 进入 21 世纪, 该技术因方便、安全、经济、数值化以及可远程控制等优点已在欧美等发达国家广泛应用^[6]。国内研究 TDR 技术在滑坡监测中的应用始于本世纪初, 张青、陈云敏等学者从测试理论、室内模拟试验和野外应用试验等方面进行了较为深入的研究^[1, 6], 也进行了少量应用^[7-10]。但因研究时间短、应用资料少、加上岩土体材料极其复杂, 实际的工程应用还需要进一步研究。

2、TDR 技术监测滑坡的原理

一个完整的 TDR 滑坡监测系统一般由同轴电缆、TDR 时域反射仪、数据记录仪、远程通讯设备以及数据分析软件等几部分组成。TDR 的原理与雷

达相似。在待监测的边坡上钻孔,并将同轴电缆安放在钻孔中,在钻孔中灌注水泥砂浆,使同轴电缆与周围岩土体紧密结合。由 TDR 时域反射仪激发电脉冲信号沿着同轴电缆从地表向下传播,边坡的位移和变形将使同轴电缆断裂或变形,从而引起同轴电缆阻抗发生变化,产生反射脉冲信号,反射信号在电缆的特性信号曲线上显示为一个脉冲峰尖^[5],边坡变形的位罝就能精确地确定下来。

假如 TDR 时域反射仪激发电脉冲信号在同轴电缆中的传播速度为 V_p ,发射信号与反射信号的时间间隔为 T_d ,则电缆测试端头至变形处的距离 D 为

$$D = V_p T_d / 2 \quad (1)$$

假定激发电脉冲信号为 $v_0(f)$,反射脉冲信号为 $v_r(f)$,则其反射系数:

$$\rho = v_r(f) / v_0(f) \quad (2)$$

根据线性传输理论,可知:

$$\rho = (Z_t - Z_0) / (Z_t + Z_0) \quad (3)$$

$$\text{则:} \quad Z_t = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} Z_0 \quad (4)$$

式中: Z_0 、 Z_t 为变形前、后电缆的阻抗。

由式 (4) 可知:反射系数 ρ 为 +1,表示电缆中产生了断路; ρ 为 -1,表示电缆短路;反射系数为 -1~+1 ($\rho \neq 0$),表示电缆发生变形,这样,通过测量反射系数 ρ ,就可以判断电缆变形量的大小。

3 剪切模拟试验

同轴电缆的型号多种多样,要将 TDR 技术应用于边坡工程监测,选择合适的同轴电缆必然是一个值得研究的问题。为接近实际工程,试验模拟浇筑于水泥砂浆中两种不同型号同轴电缆的剪切变形反应。所采用的设备和材料为: TDR100 测试仪、直剪仪、SYWV-75-7、SYWV-75-9 两种型号同轴电缆、测斜管、32.5R 级普通硅酸盐水泥、普通砂、电脑。不同型号同轴电缆结构参数见表 1。

表 1 不同型号同轴电缆结构参数

Table 1 Structural parameters of different coaxial cables

型号	特性阻抗 / Ω	内导体直径 /mm	外导体直径 /mm	护套直径 /mm
SYWV-75-5	75	1.00	4.80	7.2
SYWV-75-7	75	1.66	7.25	10.0
SYWV-75-9	75	2.15	9.00	12.0

3.1 试件制备

(1) 采用 32.5R 级普通硅酸盐水泥、普通砂,配制水泥:砂为 1:2、水灰比为 0.6 的水泥砂浆。在水泥砂浆拌制过程中要使砂浆拌制均匀,这是保证砂浆能够均匀充填测斜管内部的前提条件。

(2) 以测斜管模拟钻孔,将同轴电缆置于测斜管中沿轴线方向拉直,将拌制均匀的水泥砂浆填充密实管中空隙,并捣实均匀,在受到剪切力时使电缆能够与水泥砂浆同步产生变形。剪切试件长 20 cm,同轴电缆穿出试件两端一定长度,以便与 TDR 测试仪连接。

(3) 试件在室温条件下养护至 7 d 龄期,同步可制备 6 个 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 试块以测定水泥砂浆 7 d 及 28 d 的抗压强度。

3.2 试验步骤

(1) 将剪切试件置于剪切仪中,连接同轴电缆与 TDR100 测试仪,用数据线将测试仪与电脑连接起来,测力计调 0,记录初始 TDR 信号;

(2) 摇动手轮,用百分表控制剪切位移量,每 1 mm 记录一次 TDR 信号、量力环读数,直至同轴电缆被剪断。据此分析 SYWV-75-7、SYWV-75-9 两种型号同轴电缆的剪切面处剪切位移与 TDR 反射系数关系。同轴电缆剪切变形见图 1。

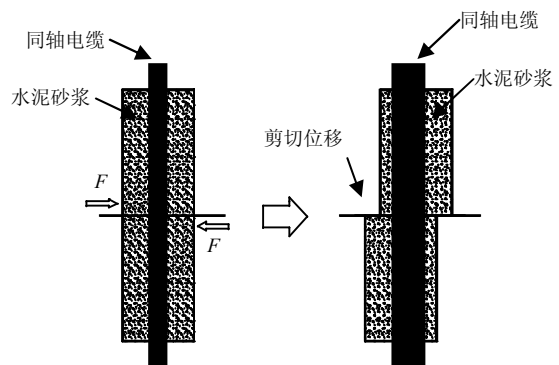


图 1 同轴电缆剪切变形示意图

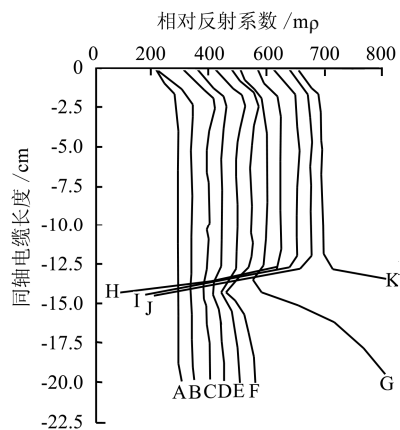
Fig.1 Shearing deformation of coaxial cable

3.3 试验结果及分析

用 PCTDR 软件收集 TDR 试验数据,然后用 TDRPlot 软件对 TDR 试验数据进行自动分析,得到 TDR 测试电缆相对反射系数变化情况—TDR 波形图 (图 2、3)。图中 A~G 剪切面相对位移每次增加 5 mm,累计 30 mm。对比图 2、3 可以看出:

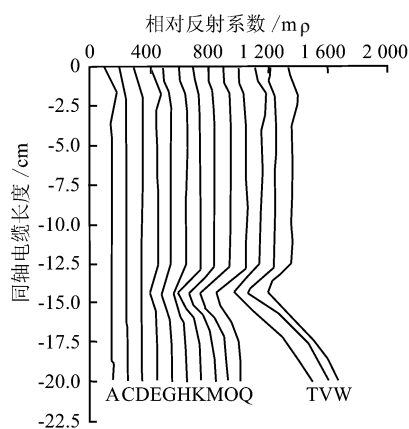
(1) 两种型号同轴电缆对剪切位移的反应均很明显,当剪切位移很小时电缆的信号均没有发生很大的变化,随着剪切位移的增长,TDR 波形在剪切

位置处逐渐出现一峰尖信号,在剪断之前,剪切位移越大,峰尖信号的幅度也越大。说明周围介质的变形能通过同轴电缆得到很好反应,通过测量同轴电缆的相对反射系数的变化可判断介质变形情况。



剪切位移/mm: A-0; B-5; C-10; D-15; E-20;
F-25; G-30; H-35; I-40; J-45; K-50

图2 SYWV-75-7同轴电缆剪切试验TDR波形图
Fig.2 Shearing deformation of coaxial cable SYWV-75-7 on TDR signal



剪切位移/mm: A-0; C-10; D-15; E-20; G-30; H-35;
K-50; M-60; O-70; Q-80; T-95; V-105; W-110

图3 SYWV-75-9同轴电缆剪切试验TDR波形图
Fig.3 Shearing deformation of coaxial cable SYWV-75-9 on TDR signal

(2) SYWV-75-7同轴电缆的相对反射系数在剪切面相对位移为10 mm时就有明显变化(图2C线14 cm处),与其对应的相对反射系数值为367 mp,相对系数变化值为14 mp,而SYWV-75-9同轴电缆的相对反射系数在剪切面相对位移20 mm时才出现明显变化(图3E线14 cm处),其相对应的相对反射系数值为405 mp,相对系数变化值为53 mp。因此,从首次出现尖峰信号的剪切面相对

位移、相对反射系数值和相对反射系数最大差值可以看出,直径小的同轴电缆对较小的剪切变形较为灵敏,而直径大的同轴电缆对较小的剪切变形响应较慢。需要指出的是,对同轴电缆灵敏度影响因素较多,其中主要影响因素有剪切面大小、水泥砂浆的强度等,在本部分试验中剪切面大小及水泥砂浆强度均相同。根据相关文献^[6]报道,配合比小的水泥砂浆灵敏度高,配合比大的水泥砂浆能够达到的相对位移较大。

(3) SYWV-75-7同轴电缆在剪切变形超过30 mm后发生短路,而SYWV-75-9同轴电缆在剪切变形超过110 mm后才发生短路,不同型号同轴电缆剪断时的极值位移不同,直径大的同轴电缆所能承受的剪切位移也大,说明同轴电缆的直径越大,能测的变形也越大。

因此,在实际工程中要根据前期的一些工程地质资料等对不同边坡变形情况进行分析后选择合适的同轴电缆进行测试。

4 工程应用试验

4.1 工程概况

应用试验工程位于贵州省镇宁至胜境关高速公路YK85+420~YK85+750段,全长为330 m,路线走向为208°,场区附近海拔高程为1 590.5~1 300.6 m,相对高差289.9 m。路基设计为深挖路堑段,位于一坡体中部的坡残积层、全风化层内,其中坡残积层厚为1.5~12.5 m,全风化层厚为2.0~17.5 m,坡残积层和全风化层总厚10~30 m、平均20 m深,为碎石、角砾、砂砾和粉质黏土的混合物,碎石、角砾基本为泥岩和砂岩。强风化层厚为1.0~18.50 m。风化层的母岩为上二叠系龙潭组(P_{2l})煤系地层,由泥质粉砂岩、炭质泥岩、粉砂质泥岩组成。下伏地层岩层产状为335°~350°∠21°~25°,右坡反倾。

路基左、右分幅,路基宽为12.5 m,右幅中心最大挖深为19.7 m,该路段原设计采用不同坡比分级开挖,路基以上第1级边坡高为8 m,设计坡比分别为1:1.25、1:1.5,坡面采用锚杆框格植草防护,每级边坡间设宽1.5 m平台。右边坡比左边坡高,右侧边坡最大开挖高度为32 m。施工开始后,开挖便道就发现边坡稳定性差,原设计不能满足工程要求,根据实际情况进行第1次设计变更,在路基右边沟右侧1.5 m处的平台边缘设置了桩板墙,在右侧边坡上设置了边坡监测系统,后根据施工过程中的边坡监测数据,又进行了第2次设计变更,在桩

板墙顶的坡面上设置了框架板预应力锚索(图4)。经过两年多的施工,工程得以顺利完成。该边坡工程的监测系统分为人工监测和自动监测两个部分,自动监测就试验性的应用了 TDR 技术。

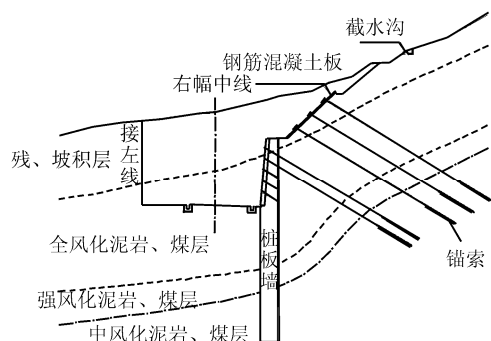


图4 边坡工程加固断面设计图

Fig.4 Design drawing for slope reinforcement

4.2 试验过程

在应用 TDR 技术之前,首先采用常规方法监测边坡,以判断边坡是否在发生明显变形,同时确定边坡滑动面的位置。为此,从 2005 年 6 月 1 日起在 YK85+420~YK85+750 右侧边坡上布置了 6 个监测孔埋设测斜管,从 2005 年 8 月 2 日起采用钻孔测斜仪进行深部位移监测。从监测情况看, YK85+420~YK85+750 右侧边坡已发生破坏,产生了明显的滑动面。其中 CK6 是设置在 YK85+661 右 45 m 处的一个监测孔, 9 月 13 日发现测斜管断裂,从其位移-深度曲线看(见图 5): 10~11.5 m 有一明显台阶,判断为滑面位置。

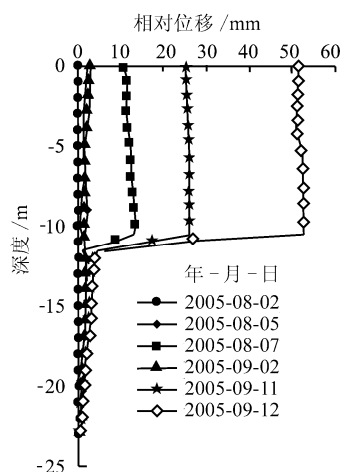


图5 CK6 深度-位移曲线

Fig.5 Curves of displacement vs. depth at CK6

2006 年 1 月起在 CK6 附近设置钻孔 IN6,在钻孔内埋置 SYWV-75-5、SYWV-75-7、SYWV-75-93 种不同型号的同轴电缆,进行同轴电缆在实际边坡

工程监测中的试验研究。

安装同轴电缆的具体实施步骤如下:

- (1) 对测试的同轴电缆末端进行防水处理;
- (2) 在埋设过程中,将测试同轴电缆绑附在钻孔倾斜仪测斜套管迎着滑坡方向的一面(绑附时要注意同轴电缆不能弯曲),与测斜套管同时下放到孔中,至钻孔底部(稳定层);
- (3) 用 C25 水泥砂浆灌注、回填钻孔,使测试同轴电缆与周围地层紧密结合;
- (4) 灌注完毕后,将地面所留出的同轴电缆盘在测斜套管的外面,以备监测时与监测系统相连接;测试同轴电缆留出适当的长度,并做好孔口保护装置及测试平台。

3 种同轴电缆在钻孔内的长度均为 19 m,孔外预留 10 m 用于与 TDR 时域反射仪相连,通过 DT615dataTaker 数据采集仪,根据用户设定频率自动采集监测数据之后,存储于数采仪的存储单元内,数据采集仪与 DTU 传输单元连接后借助于 GSM 卡 GPRS 功能将存储单元内的监测数据通过 Internet 网络远程传输到室内的数据处理中心并存入计算机内,这个过程通过计算机借助相关软件进行远程操作完成。该系统于 2006 年 4 月 15 日起开始采集数据。

在同一位置附近同期建设监测孔 CK6-1,埋设测斜管,采用钻孔测斜仪进行深部位移监测,从 2006 年 1 月 11 日起开始采集数据,2006 年 6 月 4 日发现测斜管断裂,从其位移-深度曲线看(见图 6): 10~11 m 有一明显台阶,判断为滑面位置。之后,又同一位置附近补孔 CK6-3,2006 年 7 月 23 日起开始监测,从其位移-深度曲线看(见图 7): 10.5~11.5 m 仍有一明显台阶。

各个不同时间监测的深度-位移曲线见图 5~7。

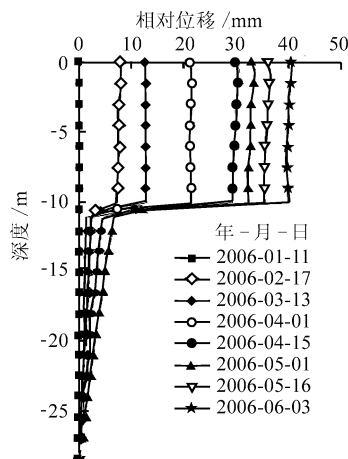


图6 CK6-1 深度-位移曲线

Fig.6 CurveS of displacement vs. depth at CK6-1

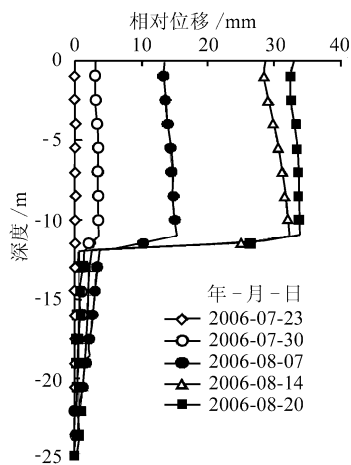


图7 CK6-3 深度-位移曲线
Fig.7 Curves of displacement vs. depth at CK6-3

4.3 TDR 监测数据采集与分析

用 PCTDR 软件收集 TDR 监测数据, 然后用 TDRPlot 软件对 TDR 监测数据进行自动分析, 得到 TDR 测试电缆相对反射系数随孔深变化的特征曲线 (TDR 波形图), 特征曲线上尖峰信号所对应的深度即为滑面所处位置。

图8是IN6号孔的TDR测试电缆特征曲线。图8显示, 3种型号的测试电缆在11.5 m处都存在明显的尖峰信号和开路信号, 说明IN6孔的滑动面距孔口11.5 m, 这与同一位置附近的CK6、CK6-1、CK6-3号孔深部位移监测得到的结果吻合。

图8 (a) 为SYWV-75-5型同轴电缆TDR测试特征曲线, 可以看出, 测试电缆在A、B、C、D时均在11.5 m处均有较小的尖峰信号, D时相对反射系数变化量最大为9.5 mp, E在11.5 m处相对反射系数急

剧增大, 这是由于电缆随着位移的增大发生变形进而发生开路而造成。

图8 (b) 为SYWV-75-7型同轴电缆TDR测试特征曲线, 与SYWV-75-5型同轴电缆相比相对反射系数的幅值有所增大, D时相对反射系数变化量最大为48.2 mp, 随后电缆由于变形的增加而开路。

图8 (c) 为SYWV-75-9型同轴电缆TDR测试特征曲线, 与SYWV-75-5、SYWV-75-7型同轴电缆相比, 其在E时的相对反射系数变化量最大为62.7 mp。因此可以看出, SYWV-75-5同轴电缆对剪切变形的灵敏度高于SYWV-75-7、SYWV-75-9同轴电缆, 而SYWV-75-7、SYWV-75-9同轴电缆灵敏度较低, 但能承受的最大剪切变形量较大, 其中SYWV-75-9同轴电缆灵敏度最低能承受的最大剪切变形量最大。

综合室内及现场试验可以得出: 对不同直径电缆对不同剪切应变的灵敏度结论是一致的, 即随着电缆直径的增加其灵敏度不同程度有所降低。对比分析现场试验中SYWV-75-7与SYWV-75-9同轴电缆的特征曲线, 可以得出两种类型同轴电缆能承受的最大剪切变形量基本相同, SYWV-75-9同轴电缆略大于SYWV-75-7同轴电缆, 而在室内试验中SYWV-75-9同轴电缆最大剪切位移为110 mm, SYWV-75-5同轴电缆最大剪切位移为30 mm, SYWV-75-9同轴电缆最大剪切位移为SYWV-75-5同轴电缆的3.7倍。这就说明现场与室内试验存在一定差异, 同轴电缆在实际工程应用中其尖峰信号幅度大小影响因素较为复杂, 不仅与同轴电缆的型号有关, 还与其他因素有关。

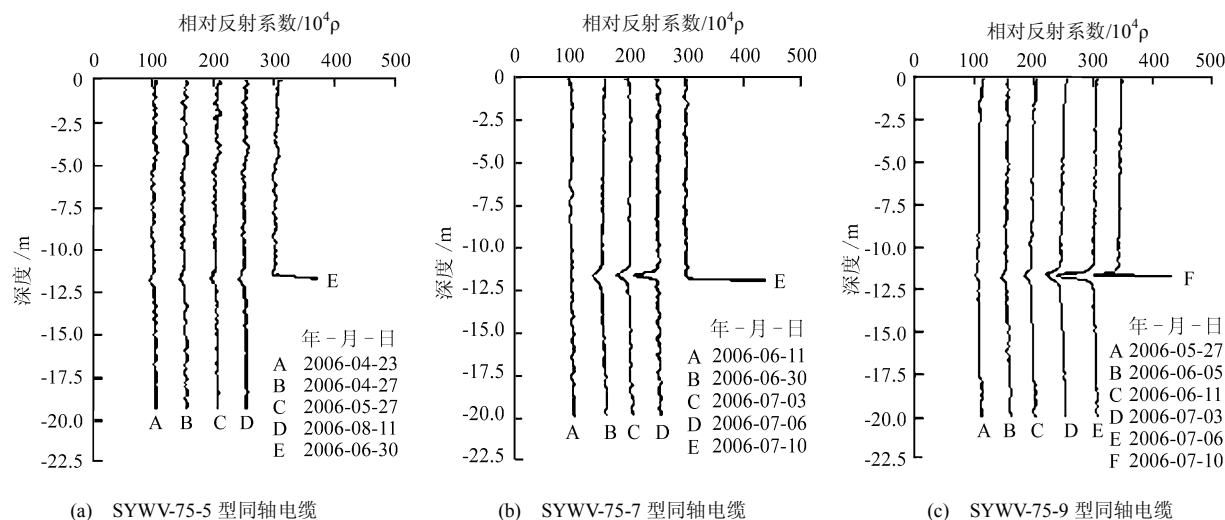


图8 IN6 监测孔 TDR 测试电缆特征曲线
Fig.8 TDR signal at monitoring hole drilling IN6

5 结 论

(1) 同轴电缆对剪切变形比较敏感, 剪切变形能及时地被反应到 TDR 波形图上, 同轴电缆的灵敏度随着电缆直径的增加而在不同程度上降低。

(2) 直径大的同轴电缆能承受的剪切变形较大, 室内试验时, 直径大的同轴电缆所能承受的最大剪切变形要明显大于直径小的同轴电缆, 现场试验时, 不同直径所能承受的最大剪切应变相差不大, 这主要是由于实际工程中影响受到诸多因素的影响而造成的。

(3) 通过与测斜仪数据的对比可得出通过单个 TDR 检测孔可以快速方便地反应出边坡在这一钻孔处的滑动变形趋势, 通过多个点的数据综合分析便可反应边坡的滑动面位置。

(4) 同轴电缆与测斜管一样易被剪断, 使得监测点的监测数据不易连续, 因此, 在实际施工中要根据具体情况选用合适的同轴电缆。

(5) TDR 技术应用于实际工程, 同轴电缆尖峰信号的变化幅度并不一定能准确反映边坡岩土体位移量的大小, 这与室内试验存在差异。

(6) TDR 系统与钻孔倾斜仪等传统监测仪器相比具有价格低、检测时间短、安全性高等优点。

(7) 与传统监测仪器相比, TDR 系统也存在不足之处。主要是无法确定滑坡移动的方向, 也难以准确测量边坡移动量。

研究表明, TDR 系统用于边坡监测, 能快速、经济、准确确定滑面位置, 非常适应于边坡勘察, 可以在以确定滑面位置为主要目的的高速公路边坡勘察中得到广泛应用。在实际应用过程中不宜选用 SYWV-75-5 同轴电缆, 宜选用 SYWV-75-7、SYWV-75-9 同轴电缆。

TDR 系统监测边坡不能确定滑动方向、位移量难以测量, 因此, 不宜用于以边坡稳定性预测为主要目的的监测。要扩大 TDR 系统在边坡监测的应用范围, 如何确定滑动方向、如何测量边坡位移量等问题需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 张青, 史彦新, 朱汝烈. 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—65.
ZHANG Qing, SHI Yan-xin, ZHU Ru-lie. The study on landslide monitoring with TDR technology[J]. *Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2001, 12(2): 64—65.
- [2] MCALISTER C M, PIERCE C E. Calibration of small-diameter TDR cables for measuring displacement in physical soil models[C]//Proceedings of Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications, Evanston: [s. n.], 2001.
- [3] Andrews. Time domain reflectometry[C]//Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Evanston, Illionis: Northwestern University, 1994.
- [4] DOWDING C H, PIERCE C E. Measurement of localized failure planes in soil with time domain reflectometry[C]//Proceedings of Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Evanston: [s. n.], 1994: 569—578.
- [5] 郭晓岚, 涂亚庆. 滑坡监测的一种新方法——TDR 技术探析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(05): 740—744.
WU Xiao-lan, TU Ya-qing. New approach of landslide activity monitoring——probing into TDR technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(05): 740—744.
- [6] 陈云敏, 陈赞, 陈仁朋, 等. 滑坡监测 TDR 技术的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2748—2755.
CHEN Yun-min, CHEN Yun, CHEN Ren-peng, et al. Testing study on applications of time domain reflectometry to slope monitoring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2748—2755.
- [7] 史彦新, 张青. TDR 技术在雅安峡口滑坡监测中的应用[J]. 勘察科学技术, 2005, (1): 34—39.
SHI Yan-xin, ZHANG Qing. Application of TDR technique in Yaan Xiakou landslide monitoring[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2005, (1): 34—39.
- [8] 唐然, 汪家, 范宣梅. TDR 技术在滑坡监测中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2007, 18(1): 105—110.
- [9] 张青, 史彦新, 林君. 时间域反射法用于滑坡监测的试验研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(1): 134—138.
ZHANG Qing, SHI Yan-xin, LIN Jun. Landslide monitor technique based on TDR[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(1): 134—138.
- [10] 陈云敏, 梁志刚, 陈仁朋, 等. 有缺陷同轴电缆的时域反射特性及应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(1): 51—56.
CHEN Yun-min, LIANG Zhi-gang, CHEN Ren-peng, et al. Time domain reflectometry property of defective coaxial cable and its applications[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, 39(1): 51—56.