

海塘工程安全检测技术及应用实例

葛双成¹, 张 莎², 梁国钱³, 章晓桦¹, 刘超英¹

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省台州市椒江区水利局, 浙江 台州 318000;
3. 浙江水利水电专科学校, 浙江 杭州 310018)

摘要 在介绍探地雷达和瑞雷波探测方法原理和技术特点的基础上,通过浙江温岭东浦新塘和椒江外沙海塘工程检测实例分析表明,探地雷达法和瑞雷波法能较有效地探测堤身和堤基的结构与性质,以及堤身内部不均匀和面板脱空等可能的隐患性质及分布范围,查明海塘渗漏原因。探测结果与现场观察及钻探揭示等情况较符合,对渗漏堤段注浆处理深度的建议在工程实施中起到了较好的指导作用。

关键词 海塘 堤坝 质量检测 隐患探测 面板脱空 探地雷达 瑞雷波

中图分类号 P753 **文献标识码** B **文章编号** 1006-7647(2007)01-0064-04

Safety monitoring technology and its application to sea dyke projects//GE Shuang-cheng¹, ZHANG Sha², LIANG Guo-qian³, ZHANG Xiao-hua¹, LIU Chao-ying¹ (1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China; 2. Jiaojiang Water Conservancy Bureau of Taizhou City, Taizhou 318000, China; 3. Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, Hangzhou 310018, China)

Abstract : The principle and technical characteristics of GPR and Rayleigh wave methods for safety detection were introduced. Case studies on safety detection in the projects of Dongpu dyke in Wenling City and Waisha dyke in Jiaojiang County of Taizhou City of Zhejiang Province show that GPR and Rayleigh wave methods can effectively detect the structure and properties of dyke bodies and foundations, hidden troubles induced by internal non-uniformity of the dyke body, face slab dislocation, etc., and their distribution. Thus, the cause of leakage of sea dykes could be found. The result of detection accords with that from field observation and drilling. Moreover, the suggestion about grouting depth based on the detection mentioned above provides some guidance for treatment of leaky dyke sections in practical projects.

Key words : sea dyke ; levee ; quality monitoring ; hidden trouble detection ; face slab dislocation ; GPR ; Rayleigh wave

海塘工程是沿海地区经济社会发展的重要安全屏障。作为一种特殊的堤防工程,除了长期承受海浪冲击这一特点外,由于它往往建于软弱地基上,其含水量高、压缩性大、固结时间长,故建成后仍会产生沉降。后期海塘往往又建在早期堤身上,且早期堤身可能又几经修复加固,所以海塘工程结构本身及其运行环境都十分复杂。从一些海塘的安全状况调查和检测来看,常见堤顶沉陷和裂缝、护坡底部脱空、防浪墙和闸底板混凝土开裂等现象,以及早期施工和抢险加固留下的薄弱环节(如树枝、草包、棉絮等不利于海塘安全的物质)、排污涵管等等隐患。此外,地基本身的渗透性和不良地质作用也可能对海塘造成危害。因此,海塘工程质量现状和隐患的调查是确保海塘安全运行及充分发挥工程效能的重要环节。虽然海塘工程安全的物理检测方法^[1-4]与

河道堤防隐患探测相比,在原理上并没有本质区别,但由于工程本身和环境条件的特殊性,在现场测试技术和资料解释判断方面都有所差别。目前,很少见到海塘质量检测与隐患探测的文献报道。

在本文所述的浙江温岭东浦新塘隐患探测和椒江外沙海塘渗漏探测实例中,采用探地雷达法和瑞雷波法基本查明了海塘结构现状与隐患分布情况,以及导致或加剧海塘渗漏的主要原因,为工程加固处理提供了重要依据。

1 检测方法原理与技术特点

1.1 探地雷达法

探地雷达是利用高频电磁波(主频 10 ~ 10³ MHz)以宽频带短脉冲形式,由地面通过发射天线送入地下,经地下地层或目标体反射后返回地面,为接收天

线所接收。当地下介质的波速已知时,可根据测得的脉冲波旅行时间,求出反射体的深度。电磁波在介质中传播时,其电磁波强度与波形将随所通过介质的电性及几何形态而变化。因此,根据接收到波的旅行时间(亦称双程走时)、幅度及波形资料,可推断介质的结构。电磁波传播的速度可由 $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ 近似算出(当介质的导电率很低时),其中 c 为光速, ϵ_r 为地下介质的相对介电常数。后者可利用已知值或测量获得。在实际探测中,一般可利用已知目标体的反射时间求取,或根据钻孔揭示层位进行标定。

探地雷达技术的应用前提是目标体与周围介质之间具有明显的电性差异及目标体的适当深度和足够大小。其探测深度主要取决于天线的中心频率和介质的电导率。对于一定的介质和目标体深度,分辨率主要由天线中心频率 f_0 决定。因此,在实际探测工作中,应针对介质条件和目标体性质、深度和尺寸,选择合适的天线频率,在确保分辨率的前提下,一般尽量选择较低频的天线。

探地雷达法适用于隐患普查和详测^[5-8],可以探测洞穴、松软层、砂层、护坡或闸室底板脱空以及其他与堤身填筑材料有明显电性差异并具一定规模的异常体等。在隐患埋深小于 10 m 时,探测效果较好。

1.2 瑞雷波法

瑞雷波法是利用瑞雷波在层状介质中的传播速度随激发频率而变化的频散特性,对地下介质进行探测的一种地震勘探方法。它是 Rayleigh 于 1887 年研究发现的^[9]。直到 20 世纪 80 年代,日本 VIC 株式会社推出 GR-80 地下全自动勘探机,才开始瑞雷波法技术在工程勘探中的应用^[9],由于该设备质量大、价格高、速度慢而难以推广。到 20 世纪 90 年代,国内外开始研究瞬态瑞雷波法在工程勘察中的应用,并因其设备简单、工作方便而被广泛采用^[9]。

瑞雷波具有以下特征 ①波的水平振幅和垂直振幅从弹性介质的表面向内部呈指数规律快速衰减,能量主要集中在一个波长范围内 ②在自由表面测到的波速,大约等于半个波长以上介质的平均瑞雷波速度 ③同一波长的瞬态瑞雷波特性反映介质在水平方向上的变化,不同波长的瞬态瑞雷波特性反映介质在竖直方向上的变化 ④在层状介质条件下,瑞雷波在介质中的传播速度是频率的函数,即瑞雷波速度随激发频率的变化而变化 ⑤瑞雷波传播的速度约为同介质内横波速度的 0.952 倍,且与频率有关。

瑞雷波法主要就是利用瑞雷波在层状介质中的传播速度随频率变化的频散特性,来达到探测地下介质的目的。若在地面上施加不同激振频率的瞬时

冲击力,则不同频率的瑞雷波叠加在一起以脉冲形式传播,由距震源一定距离的多道检波器接收后,利用瑞雷波处理软件通过时间域开窗及 $f-k$ 域提取,将各个频率分离开来,从而获得瑞雷波速度随深度变化的曲线。即对某测点,可根据不同频率对应的波速绘制一条‘频散曲线’($v_R - H$ 曲线)。频散曲线的变化规律与地下介质条件有关,故通过频散曲线的解释,可获得地下某一深度范围内的介质性质及其深度和厚度分布。此外,可根据横波速度(据瑞雷波速度换算)、纵波速度及介质密度计算得到介质的动弹性模量、剪切模量、泊松比等有关的物理力学参数。瑞雷波法既利用了波的运动学特征,又利用了动力学特征,而常规地震折射波法和反射波法则主要利用波的运动学特征,且要求地下各介质有一定厚度及较大的波速或波阻抗差异,因此,其应用范围比折射波和反射波法更广,分层更细,精度更高。

瞬态瑞雷波法适用于探测松软层、洞穴、护坡或闸室底板脱空以及堤身或堤基的加固效果评价等等,也可测定介质的动弹性力学参数,并对饱和砂土液化进行初步判断。该方法一般在检测松软层时效果较好。在洞穴、裂缝及渗水等隐患探测时,应加强频散曲线正演分析与反演解释研究^[10-13],并进行激发和接收条件的改进,以及检波距的试验选取。

1.3 常见介质物性特征

表 1 所示为常见介质物理参数。由表 1 可见,水、空气、混凝土、黏土、砂等介质之间具有较明显的力学和电磁性质差异,可以采用探地雷达法和瑞雷波法等方法及综合物探方法进行检测。

表 1 常见介质物理参数

介 质	介电常数 ϵ_r	电导率 $\sigma/(\text{ms}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	电磁波速度 $v/(\text{m}\cdot\text{ns}^{-1})$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	纵波速度 $v_p/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	横波速度 $v_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$
空 气	1	0	0.3			
淡 水	80	0.5	0.033		1.4 ~ 1.6	
海 水	80	1000 ~ 10000	0.01			
黏 土	5 ~ 40	2 ~ 1000	0.06	1.60 ~ 2.04	1.2 ~ 2.5	
泥 砂	5 ~ 30	1 ~ 100	0.07			
干 砂	3 ~ 6	0.01	0.15		0.2 ~ 0.8	
湿 砂	20 ~ 30	0.1 ~ 1.0	0.06		0.6 ~ 0.8	
混凝土	4 ~ 6		0.12	2.40 ~ 2.70	2.0 ~ 4.5	1.2 ~ 2.7

2 工程实例及分析

2.1 温岭东浦新塘结构现状与隐患探测

浙江省温岭市东浦新塘建于 1977 ~ 1979 年,后历经加固加高,于 1998 ~ 1999 年建成了高标准海塘。现堤身采用带平台的复式断面混合坝,堤顶高程(吴淞,下同)为 8.70 m,防浪墙顶高程为 9.30 m,堤顶面为宽

5.0 m 的混凝土护面。外坡护面为干砌石外贴 30 cm 厚的混凝土,内坡护面为 10 cm 厚的混凝土预制块。实测最高潮位 6.38 m,多年平均高潮位 4.00 m,多年平均低潮位 0.20 m,塘前平均波高为 3.5 m。

在桩号 0+990~1+030(堤段 1)和 6+840~6+880(堤段 2)等 2 个典型堤段,为了查明堤顶下 10 m 深度范围内的堤身和堤基结构与性质,以及堤身内部不均匀和面板脱空等可能的隐患性质及分布范围,开展了探地雷达和瑞雷波探测工作。雷达探测分 3 种频率的工作天线进行,其中,40 MHz 天线仅中心线 1 条,100 MHz 天线沿内、外坡肩和中心线各 1 条,400 MHz 天线在内坡边缘的肩上、坡上及防浪墙上各设 1 条。现场使用美国 SIR-20 型探地雷达进行单通道连续剖面测量,标记点 2 m 一个,增益为 5 级放大,采样率 512,时窗分别为 500 ns,200 ns 和 30 ns,带通分别为 15~90 MHz,50~250 MHz 和 150~1 000 MHz。瑞雷波测试主要在桩号 6+864 和 1+004 这 2 个断面进行,另在 1+004 处沿堤顶中心线布置 1 条测线。现场采用北京市水电物探研究所研制的 SWS-1G 型工程勘探与检测系统,道间距为 2 m,偏移距分别为 10 m,15 m,20 m。仪器参数选择:采集道数 12 道,全通滤波方式,采样间隔为 0.50 ms,采样点数为 1 024 个。检波器频率为 4 Hz。震源采用 24 磅大铁锤加铁垫板激震。

根据雷达反射图像,结合瑞雷波测试的综合解释结果表明,堤身沉降明显,其底部已深入涂面以下地基中,形成了“混合层”。该“混合层”的上下界面深度分别为 5.0~5.8 m 和 6.2~6.8 m,其中含有较多的淤泥质成分。堤身内部 2.0~5.0 m 深度范围内多处夹有碎块石或草根等杂物。堤段 2 桩号 6+842~6+859 位置约 4.0~10.5 m 深度范围内有一个大范围的严重不均匀区,可能与早期施工或抢险留存物有关。在 0+990~1+030 堤段有多处面板脱空现象,脱空高度约 0.10~0.15 m。此外,2 个堤段的防浪墙墙体质量均较好,堤段 1 墙体质量更好。

本次探测时在每个探测段的堤顶和内坡脚各设 1 个钻孔。钻探编录资料表明,堤段 1 在 0~1.8 m 为混凝土路面、碎石垫层、素混凝土和碎石垫层,1.8~5.6 m 为黏土夹块石和少量腐殖物,5.6~6.8 m 为淤泥质粉质土夹薄层粉细砂,6.8~27.8 m 为淤泥质土夹腐殖物、贝壳。堤段 2 在 0~1.2 m 为混凝土路面、路基、碎石夹黏土,1.2~7.3 m 为黏土夹碎石、块石和腐殖物,7.3~27.8 m 为淤泥夹块石、贝壳和粉砂。可见 2 个堤段均有垂向层状性,堤段 1 更甚。堤身内主要夹有碎石、块石和腐殖物等,堤基内主要夹有贝壳和粉砂等。

此外,现场观察发现堤段 1 的内坡边缘处面板有更多的凹凸起翘现象,堤段 2 的防浪墙可见更多的裂缝,或直立墙伸缩缝扩张且偏位。

可见,探测结果与现场观察及钻探揭示等情况具有较好的相应性。

图 1 和图 2 所示分别为桩号 6+840~6+880 堤顶中心线的雷达探测图像和瑞雷波频散曲线。据综合解释判断,约 6.8 m 和 5.4 m 深度各存在一个界面,6.8 m 界面即堤身底界,6.8 m 和 5.4 m 之间的堤身部分即是“混合层”。堤身内 2.2 m 界面上下差异明显,下部为黏土。桩号 6+840~6+846 位置约 2.0~2.7 m 深处可能夹碎块石和草根等杂物,桩号 6+843~6+859 位置约 4.5~10.5 m 深处可能夹块石、粉砂和草根等杂物。



图 1 温岭东浦新塘桩号 6+840~6+880 雷达图像

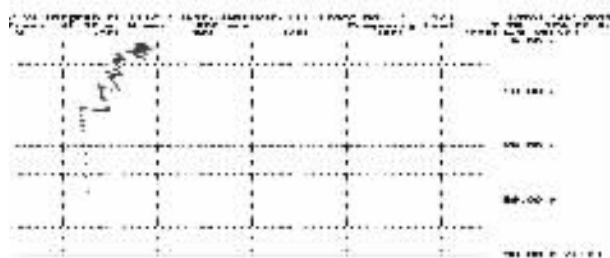


图 2 温岭东浦新塘桩号 1+864 瑞雷波频散曲线图像

图 3 所示为桩号 0+990~1+030 堤段的堤顶、距防浪墙 4.8 m 的内坡边缘纵测线的雷达探测图像,图中 0+992~0+998,1+004~1+007,1+017~1+026 等处有面板脱空现象,脱空高度 0.10~0.15 m。

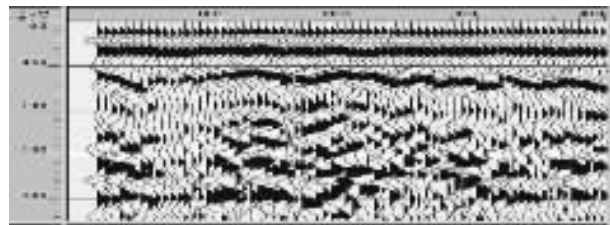


图 3 温岭东浦新塘桩号 0+990~1+030 雷达图像

图 4 所示为桩号 0+990~1+030 堤段防浪墙中心线的雷达探测图像。由图 4 可见防浪墙墙体混凝土均匀致密,质量较好。

2.2 椒江外沙海塘渗漏探测

浙江省台州市椒江区外沙海塘始建于 20 世纪 60 年代,历经修复加固后,现堤身基本沿老塘线外



图4 温岭东浦新塘桩号0+990~1+030防浪墙雷达图像
坡加固,采用带平台的复式断面混合坝,坝顶高程8.60m,坝顶为20cm厚200号混凝土路面+30cm厚块石垫层,顶宽5.50m(不含防浪墙)。防浪墙为200号混凝土,顶高程9.50m,顶宽0.8m,底宽1.0m,墙高0.8m,墙基与陡墙连成整体。陡墙(外坡)为200号埋石混凝土,顶高程8.70m,顶宽1.0m,底宽2.1m。消浪平台为200号埋石混凝土,平台护面顶高程5.50~6.00m,宽3.9m,厚度0.4m。外镇压层为干砌石结构。内坡护坡为0.3m厚干砌石+0.3m厚塘渣垫层,坡脚处高程4.50~5.50m。堤身采用纯塘渣,其下老堤身的塘渣实际为泥加石成分。施工中无闭气土方或混凝土防渗墙。设计50年一遇高潮位7.00m,最高潮位7.90m,平均年最高潮位5.78m,平均高潮位4.24m。最低潮位-0.90m,平均最低潮位1.76m。平均低潮位0.25m,平均潮位2.09m。内河控制水位5.00m。

该海塘建成运行至今,一直存在渗漏现象,尤其是Ⅲ标段及其与Ⅱ,Ⅳ标段连接处渗漏最为集中和严重,堤身不均匀沉降和裂损较严重。Ⅲ标段全长约0.8km,沿线工矿企业集聚,是当地的重要化工区。为了解渗漏情况及原因,曾于2003年进行过钻探勘察,钻孔揭示①人工填土,全场分布,厚度悬殊,一般为1.70~7.10m,平均4.49m。上部0.80m为埋石混凝土(厚0.40m左右)及块石垫层,其下为石渣混块石,强透水性,块石大小悬殊,分布极不均匀,底部混有淤泥。②淤泥质粉质黏土夹不规则团状粉细砂,全场分布,顶深变化较大,标高2.80~2.60m,未穿透,最大控制厚度9.60m。粉细砂一般呈不规则团状(直径一般为3~11mm)不均匀分布。该层透水性总体微弱,但粉细砂含量较高的部位水析现象较明显,震动易液化。现因维护和修复加固需要,于2005年进行了探地雷达和瑞雷波探测,以进一步了解和掌握堤顶下10m深度范围内的堤身和堤基状况,为内坡脚及附近地面渗水原因分析提供依据。

通过外沙海塘Ⅰ标段和Ⅲ标段桩号0+660~0+700,1+400~1+600,1+800~1+850等3个堤段13小段各2条测线、2种频率的1.984km雷达剖面连续探测,以及16个点的瑞雷波探测,结合地质地貌、现场观察等情况进行综合解释推断,堤身底界

面深度在3.6~5.3m之间起伏变化。绝大多数堤段的堤基存在1处或2处不均匀区,其深度一般不小于8.0~10.0m,局部可达12.0~15.0m,其中1+930~1+952堤段5.5~10.0深处可能存在1条约2m宽的斜向不均匀带。所测堤段的堤身分别在深浅部存在63处不同程度的不均匀区(带),浅部主要分布在0.5~1.6m之间,深部主要分布在2.0~4.0m之间。正是内部松软等不均匀性导致或加剧了海塘的渗漏。根据探测结果,建议加固处理深度一般不小于8.0~10.0m,局部不小于12.0~15.0m,为工程实施起了明显的指导作用。从实际注浆情况看,不均匀处的注浆量明显较大。

图5和图6所示分别为桩号1+920~1+960堤顶中心线的雷达探测图像和瑞雷波频散曲线。据综合解释判断,堤身底界深度4.0~4.8m。在堤基内部,桩号1+930~1+942(10~22m)堤段5.5~10.0m深处有一宽2m左右的斜向不均匀带,在堤身内部,桩号1+920~1+925(0~5m)等堤段的1.7~3.3m深处相对不均匀。

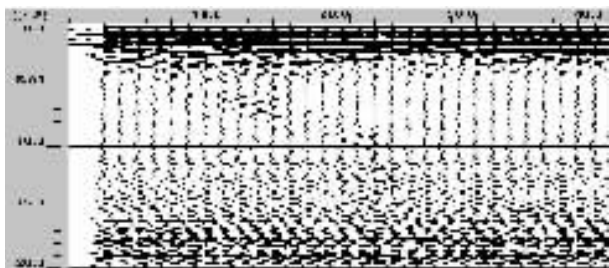


图5 椒江外沙海塘桩号1+920~1+960雷达图像

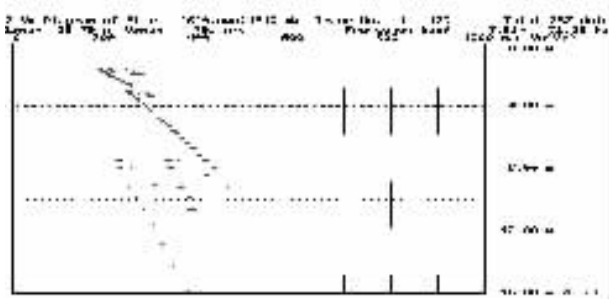


图6 椒江外沙海塘桩号1+950瑞雷波频散曲线图像

在上述两个探测实例中,瑞雷波法主要通过瑞雷波速度随深度的变化特征,确定测试点附近堤基和堤身介质在垂直方向上的相对软硬程度及深度范围,同时,也为雷达探测资料的解释起到了深度标定和反射图像分析的标志层作用。探地雷达法则通过雷达反射图像中的运动学和动力学特征,分析堤基和堤身介质在垂直和水平方向上的分层变化及局部不均匀性。从而综合解释判断海塘结构现状与隐患分布特征,因此,两种方法起到了互补和综合作用。

(下转第70页)

大一级孔径的偏心跟管钻进、后用正常孔径的同心跟管钻进方法施工,最大的跟管深度超过了 70 m,极大地提高了成孔的效率和速度。

同心跟管钻进同样有不足之处,主要是如果一次跟管深度达不到设计基岩面深度而发生套管、管靴或同心钻具某部位断裂事故时,处理事故的难度比采用偏心钻具大,发生事故后会经常造成钻孔报废和冲击器等埋于孔内,加大了施工物资材料的消耗。

3 钻孔效率分析

小湾堆积体锚索加固工程主要制约因素是工期,缩短钻孔时间是主要目标,在施工完成后,通过分析,按堆积体锚索的平均钻孔深度 60 m 计,同心跟管钻进施工方法的钻孔效率最高,平均约 3.7 d/孔,平均孔内事故率最低,约 1.5 次/孔,见表 2。同心跟管钻进的施工方法为小湾堆积体加固节约了工期,保证了堆积体的稳定。

表 2 不同钻孔施工方法的平均工效及平均孔内事故率

钻孔方法	平均工效/(d·孔 ⁻¹)	平均孔内事故率/(次·孔 ⁻¹)
偏心跟管钻进	20	8
套管变径偏心跟管钻进	7	2.5
同心跟管钻进	3.7	1.5

(上接第 67 页)

3 结 语

通过海塘结构特点和相关介质物理性质分析,以及实际工程检测表明,探地雷达和瑞雷波法等技术可以有效地用于探测海塘结构现状及其内部不均匀性和护坡面板脱空等隐性性质及分布,查明海塘渗漏原因。温岭东浦新塘和椒江外沙海塘工程实例的探测成果与现场观察及钻探揭示等情况具有较好的相应性,针对渗漏情况,对加固处理的注浆深度提出了建议,实际表明不均匀处的注浆量明显较大,为工程实施起了明显的指导作用。

参考文献:

[1] 冷元宝,黄建通,张震夏,等.堤坝隐患探测技术研究进展[J].地球物理学进展,2003,18(3):370-379.
[2] 冷元宝,朱仲文,何剑,等.我国堤坝隐患及渗漏探测技术现状及展望[J].水利水电科技进展,2002,22(2):59-62.
[3] 肖柏勋,何继善,刘光鼎,等.我国堤防隐患快速无损探测技术的现状与思考[G]//肖柏勋.工程地球物理学进

4 结 语

在松散堆积体中钻孔采用先大一级孔径、后改为正常孔径的偏心跟管钻进方法,减少了套管与孔壁之间二次跟管钻进时的摩擦力,为在松散堆积体中加大钻孔深度提供了一种好的方法。

同心跟管钻具采用跟管钻进工艺,在一定程度上解决了在松散堆积体中遇到孤石跟管钻进效率低的难题,为在地质条件复杂的松散地层中的钻孔提供了可靠的保障。

同心跟管钻具的加工耗材比偏心跟管钻具高,又由于终孔后,同心套无法取出而留在孔内,增加了同心跟管钻进的成本。因此应研究改进同心套与管脚的连接方式,通过轴承连接的形式使同心套与管靴连接起来,以便在钻孔结束、拔管时连同同心套一起拔出。

参考文献:

[1] 刘红宝,李占省,李志强.小湾水电站饮水沟堆积体失稳加固措施[J].水利水电科技进展,2006,26(3):45-48.
[2] 邓文明.同心跟管成孔工艺的应用与研究[J].湖南水利水电,2005(4):26-27.

(收稿日期 2005-09-01 编辑 熊水斌)

展.武汉:武汉水利电力大学出版社,2000 9-16.

[4] 朱德兵.工程地球物理方法技术研究现状综述[J].地球物理学进展,2002,17(1):163-170.
[5] 曾昭发,田钢,丁凯.宽带探地雷达系统研究及在工程检测中的应用[J].地球物理学进展,2003,18(3):455-459.
[6] 邓世坤.地质雷达在水利设施现状及隐患探测中的应用[J].物探与化探,2000,24(4):296-301.
[7] 吴相安,李栋.水利隐患 GPR 探测方法研究[J].地质与勘探,1998,34(3):47-51.
[8] 薛建,王者江,曾昭发,等.地质雷达方法在水坝渗漏检测中的应用[J].长春科技大学学报,2001,31(1):89-91.
[9] 祁生文,孙进忠,何华,等.瑞雷波勘探的研究现状及展望[J].地球物理学进展,2002,17(4):630-635.
[10] 张碧星,鲁来玉,鲍光淑,等.瑞利波勘探中“之”字形频散曲线研究[J].地球物理学报,2002,45(2):263-274.
[11] 张碧星,肖柏勋,杨文杰,等.瑞利波勘探中“之”形频散曲线的形成机理及反演研究[J].地球物理学报,2000,43(4):557-567.
[12] 陈祥,孙进忠,刘景儒,等.瑞雷波“之”形速度-深度曲线的成因[J].地球物理学进展,2004,19(4):860-863.
[13] 王书增,谭春,陈刚,等.瑞雷波法在堤坝隐患勘查中的应用[J].地球物理学进展,2005,20(1):262-266.

(收稿日期 2005-03-01 编辑 熊水斌)