

电磁感应技术在堤坝隐患探测中的应用

聂 杰¹,刘广明²,杨劲松²,戴伟如¹,姜 艳³

(1.江苏省水利厅,江苏 南京 210029; 2.中国科学院南京土壤研究所,江苏 南京 210008;
3.江苏天水会计师事务所,江苏 南京 210029)

摘要:磁感式堤坝隐患探测技术应用电磁感应工作原理,根据大地电磁传导性能及其各相关影响要素可能的作用机制,利用探测获得的大地电导率空间分布特征对土坝安全进行较高精度评估.应用实践表明,该探测技术快速高效,可连续探测,操作简便,评估结果可靠.

关键词:电磁感应;堤坝隐患;隐患探测;堤坝安全

中图分类号:TV698.1+4 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-7647(2004)02-0044-03

磁感式堤坝隐患探测技术主要应用了电磁感应式土壤性质测定技术.电磁感应理论应用于土壤性质测定最早出现于 20 世纪 80 年代,近年来该理论在土壤性质测定方面的应用受到国际相关领域的普遍关注,得到了广泛研究和应用.目前电磁感应式土壤性质测定技术在澳大利亚、以色列等发达国家已有较多应用,技术比较成熟,已经成功应用于土体粘粒含量^[1]、土层埋深及厚度^[2]、土壤养分^[3]、土壤水分^[4,5]、土壤盐分^[6,7]及洪水灾害评估^[8]等方面.为了进一步提高数据采集的效率,人们利用由全球定位系统和电磁(electromagnetic, EM)感应装置组合而成了移动式电磁感应系统(Mobile Electromagnetic Sensing System, MESS)进行土壤性质测定,从而形成了移动式电磁感应土壤性质测定技术.

江苏省水利厅、中科院南京土壤研究所于 2001 年 6 月由澳大利亚引进了移动式电磁感应土壤性质测定技术,并把该技术成功应用于海堤隐患探测,形成了适合我国应用的磁感式堤坝隐患探测技术.

1 磁感式堤坝隐患探测技术的原理

磁感式堤坝隐患探测技术系统的关键设备是电磁感应仪.电磁感应仪具有信号发射及信号接收两个端子(见图 1),二者之间相隔一定距离 s .工作时,信号发射端的发射线圈激发交变电流产生磁场强度随大地深度增加而逐渐减弱的磁场——原生磁场^[3].原生磁场是随时间变化而动态变化的,该磁场使得大地中出现了非常微弱的交流感应电流,这种

电流又导致大地中产生了次生磁场.信号接收端子既接收原生磁场信息又接收次生磁场信息.

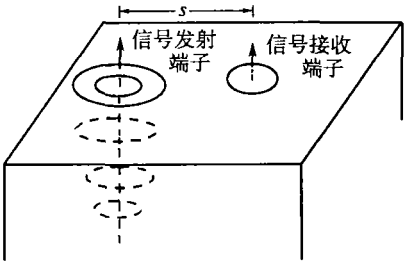


图 1 电磁感应仪工作原理

通常,次生磁场是两端子间距 s 、交流电频率及大地电导率的复杂函数;次生磁场也是这些变量的函数.大地电导率就是根据信号接收端子获得的原生、次生磁场强度的相对大小关系得到的.次生磁场强度与原生磁场强度的比值与大地电导率呈线性关系,可表示为

$$E_a = \frac{H_s}{H_p} \cdot \frac{4}{\omega \mu_0 s^2}$$

式中: H_s 为信号接收端子处次生磁场强度; H_p 为信号接收端子处原生磁场强度; μ_0 为空间磁场传导系数; $\omega = 2\pi f$, f 为交流电频率, Hz; E_a 为大地表面电导率, mS/m; s 为信号发射端子与接收端子的间距, m.

电磁感应仪的测定值即大地表面电导率,它综合反映了大地的电磁传导性能.由电磁感应仪产生的感应磁场在大地中传播时,受到多种因素的影响,这些因素通常包括粘粒含量、密度、结构性能、土体

基金项目:水利部“948”项目(995108);中国科学院知识创新工程领域前沿项目(ISSASIP0107)
作者简介:聂杰(1963—),男,安徽安庆人,高级工程师,硕士,主要从事农田水利工程研究.

盐分含量、水分含量、温度等.对于同一堤坝而言,由于不同坝体段分布空间的差异相对较小,并且受到水分浸润的程度以及浸润水体的含盐量的差异亦相对很微小,因此不同坝体段之间在坝体盐分、水分含量及温度方面的差异可以忽略不计.粘粒含量、密度、结构性能结合在一起能够综合反映堤坝结构及其组成是否一致,从而为堤坝隐患探测提供依据.由于不同介质中电磁场的传导性能存在差异,一般情况下,如果堤坝某处较别处的粘粒含量低、密度小,或者该处坝体中存在孔洞或裂隙,则此处电磁感应仪的测定值(即大地表面电导率)将比附近其他地方小.通常在存在安全隐患部位会形成一个相对明显的测定值分布低谷,该谷底位置即为存在安全隐患的部位.

电磁感应仪的工作原理决定了电磁感应仪不需要与大地接触就可以测定大地电导率,因此不需要配备任何探针,并且仅需要很少的电缆线,与其他方法相比,利用电磁感应仪进行大地电导率调查可以大大缩短所需时间,提高工作效率.用传统电极法进行大地电导率测定,其测定结果对电极附近的不规则物质的反应较为敏感;而用电磁感应仪进行大地电导率测定时,设备自动对其测定范围内的大地电导率进行平均,因此,电磁感应设备可以显著提高测定结果的精度(如 EM38 的测定精度可达 $\pm 5\%$),这也使得磁感式堤坝隐患探测技术替代其它传统评估方法成为可能.

与常规堤坝隐患探测方法相比,磁感式堤坝隐患探测技术主要具有以下优点:①评估调查信息量丰富.通过常规堤坝隐患探测方法取得大量调查样本需要较高的费用,有可能导致某些堤坝安全隐患被遗漏.应用磁感式堤坝隐患探测技术进行堤坝隐患探测调查,不需要采集样品就可以实现堤坝安全性能的连续测定,从而保障了评估的精度和全方位性.②工作效率高.评估调查速度与牵引机运行速度相一致,一般可以每小时调查 10 km 堤坝.③良好的实时性及重现性.应用该项技术可以在进行堤坝隐

患探测调查时实时地收集地理位置信息和堤坝质量信息,并且两者是完全一一对应的.这就充分保证了调查资料的重现性.④投资少.运用磁感式堤坝隐患探测技术进行堤坝安全调查及评估,尽管前期用于购买设备的投资较大,但设备可以长期重复利用,因而投资是很低的;而且作业时只要 1 人就可以进行操作.这与传统的堤坝隐患探测方法相比,无疑节省了大量的人力、物力.

2 调查结果的误差分析

为了充分获得 0~6 m 范围内堤坝性质信息,引进的堤坝隐患探测技术应用了 EM31 和 EM38 两种电磁感应仪,其最大有效测定深度分别为 6.0 m 和 1.5 m.进行堤坝隐患探测时,电磁感应仪 EM31 和 EM38 距地面的设定高度分别为 1.0 m 和 0.25 m;由于地面微地形等方面的差异,EM31 和 EM38 距设定高度的最大波动幅度相应分别为 10 cm 和 5 cm.电磁感应仪实际距地面高度与设定高度之间存在的这种差异,将导致调查结果出现一定误差.为了分析该误差的大小,对同位置的电磁感应仪测定值(即大地表面电导率)与其距地面高度之间的关系进行了分析,结果如图 2 所示.

分析结果表明,电磁感应仪 EM31 的测定值与其距地面高度呈极显著线性相关,垂直和水平模式相关系数的平方分别为 0.97 和 0.99.电磁感应仪 EM38 的测定值与其距地面高度呈极显著指数相关,其关系可表示为

$$Y_v = 120.49e^{-0.0117x}, R^2 = 0.9982$$

$$Y_h = 94.417e^{-0.0153x}, R^2 = 0.9981$$

式中: Y_v, Y_h 分别为电磁感应仪 EM38 在垂直和水平操作模式下测得的大地电导率, mS/m; x 为 EM38 距地面高度, cm, $0\text{ cm} < x < 180\text{ cm}$.

根据电磁感应仪测定值与其距地面高度之间的关系,以及磁感式堤坝隐患探测实际情况,得到磁感式堤坝隐患探测结果与电磁感应仪在设定高度位置时的测定值之间的误差如表 1 所示.

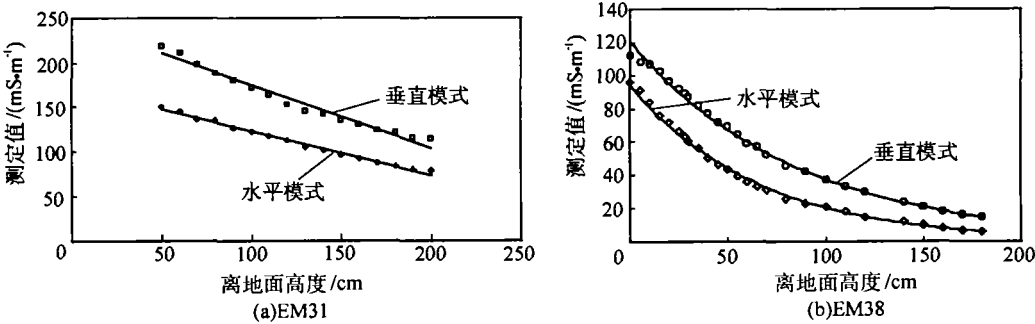


图 2 电磁感应仪测定值与其距地面高度的关系

表 1 电磁感应仪测定误差分析

电磁感应仪	测定模式	有效探测深度/m	设定距地面高度/cm	波动幅度/cm	测定误差/%
EM31	水平模式	3.0	100	10	3.4
EM31	垂直模式	6.0	100	10	4.7
EM38	水平模式	0.75	25	5	9.1
EM38	垂直模式	1.5	25	5	5.4

3 技术的应用

由于新、老海堤的坝体高度都小于 6 m(在电磁感应仪有效测定深度范围内,见表 1),在进行磁感式堤坝隐患探测调查时采用仅在堤顶调查测定的方式进行.对于坝高超过 6 m 的堤坝而言,可以采用首先在堤顶及在坝坡面各高度位置分别进行磁感式调查,再进行综合分析的方法开展堤坝全方位磁感式隐患探测.技术人员在熟练掌握磁感式堤坝隐患探测技术之后,应用该技术系统对海堤进行了隐患探测.

海堤可能由于新成陆滩涂的不断围垦而不再直接受到海潮的侵蚀,在没有特大暴雨或海啸等特殊情况下,一般不具有可能造成重大损失的隐患.但是长期以来一直受到海潮侵蚀的老海堤或其部分地段,以及因为船闸的存在而间接受到海潮侵蚀影响的老海堤地段,则可能存在安全隐患.如果不对这些老海堤进行隐患探测,就有可能造成难以弥补的损失.

技术人员选择了江苏省东台市粮垛船闸处的老海堤并应用电磁感应仪对其进行隐患探测.该海堤于 1982 年与粮垛船闸同期建成,属东北—西南走向.在进行隐患探测调查的过程中仍然采用了 EM31 和 EM38 的垂直测定模式两种测定位,以便能够获得 0~1.5 m 以及 0~6.0 m 深度范围的海堤性质.总计获得老海堤隐患探测调查数据记录 2000 余条,调查海堤长度约 5.5 km,分析结果如图 3 所示.由图 3 可见,0~6.0 m 深度海堤的大地电导率平均值保持了基本恒定,波动幅度很小.据此可以判断出该段老海堤 0~6.0 m 深度的平均结构性能比较均一.沿调

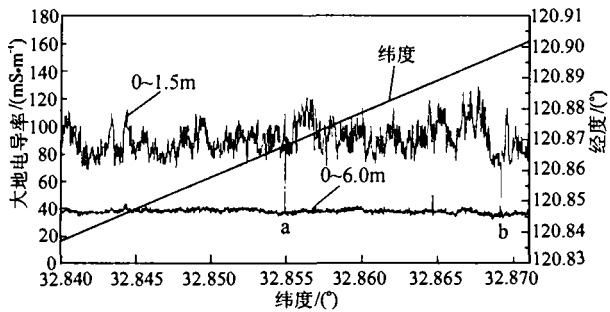


图 3 老海堤大地电导率分布

查路径,海堤 0~1.5 m 深度的平均大地电导率值波动幅度比较大,这可能与堤顶微地形差异有关.0~1.5 m 深度海堤大地电导率分布中出现了两个谷,分别位于断面 a(N32.854 889 67°,E120.878 588 4°),b(N32.869 194 97°,E120.901 058 0°).此两断面位置应当存在孔洞或质地相对非常疏散,系潜在危害存在部位.应当对潜在危害存在部位(a,b 两断面)进行持续监测,必要时进行加固处理.

4 结 论

磁感式堤坝隐患探测技术应用了电磁感应原理,适用于对土质堤坝进行隐患探测.该项技术与其它堤坝隐患探测方法相比,具有明显的优点.本项新技术的广泛应用,对于充分保障我国土坝安全性能具有深远意义及重要实用价值.目前已经具备应用磁感式堤坝隐患探测技术进行堤坝隐患探测的各项条件,相关人员应当积极推广应用本项先进技术进行堤坝隐患探测.

参考文献:

[1] Williams B G, Hoey D. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils [J]. Aus J Soil Res, 1987, 25: 21 ~ 27.

[2] Doolittle J A, Sudduth K A, Kitchen N R, et al. Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods[J]. J Soil Water Cons, 1994, 49(6): 572 ~ 575.

[3] Davis J G, Kitchen N R, Sudduth K A, et al. Using electromagnetic induction to characterize soils[J]. Better Crops with Plant Food, 1997(4): 108 ~ 113.

[4] Sheets K R, Hendrickx J M H. Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction [J]. Water Resources Research, 1995, 31(10): 2401 ~ 2409.

[5] Hendrickx J M H, Baerends B, Raza Z I, et al. Soil salinity assessment by electromagnetic induction of irrigated land[J]. Soil Sci Soc Am J, 1992, 56: 1933 ~ 1941.

[6] Triantafilis J, Laslett G M, McBratney A B. Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity in soil under irrigated cotton[J]. The Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 1009 ~ 1017.

[7] Bennett D K, George R J, Whitfield B. The use of ground EM system to accurately assess salt store and help define land management options for salinity management[J]. Exploration Geophysics, 2000, 31(1): 249 ~ 254.

[8] Kitchen N R, Sudduth K A, Drummond S T. Mapping of sand deposition from 1993 midwest floods with electromagnetic induction measurements[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(4): 336 ~ 340.

(收稿日期:2003-07-29 编辑:熊水斌)