

垂直防渗墙横剖面电阻率数值与物理模拟研究

朱德兵,任青文

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 就防渗墙这一特定结构和所处地球物理环境,进行了电场有限元数值模拟和物理模拟,基于模拟结果,论证了横剖面电阻率法在防渗墙质量检测中应用的可行性、应用特点和应用条件.结果表明:垂直于防渗墙走向的平行测深剖面构成了防渗墙墙体的似电阻率测深数据,该数据能够反映截渗墙的漏点分布情况;与周围土介质有较大电阻率差异的高阻截渗墙可以用电阻率横剖面法进行普查,若有必要,可用弹性波 CT 等勘探技术进行详查工作.

关键词 防渗墙;电阻率法;有限元数值模拟;物理模拟

中图分类号 :TV543.82 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2004)04-0410-05

堤坝的垂直防渗墙改善了大堤的渗流状况,增强了堤坝的抗滑稳定性,降低了浸润线的高度,是防渗处理中最为有效的一种措施.20 世纪 90 年代以后,垂直防渗技术在堤防加固工程中得到了广泛应用^[1].

从原理上说,修建防渗墙是一种“堵”的技术,洪水时期防渗墙内外有较大的水头差,如果墙体存在局部的缺陷,它便成了水头压力释放的一个特殊通道,给大堤安全带来严重隐患.垂直防渗墙施工工艺和施工环境的特殊性,可能会导致墙体局部缺陷.这些缺陷既可能是由分段施工的墙体接缝造成,也可能是由施工过程中塌槽或施工槽护壁问题造成.不论何种结构形式的防渗墙,其特殊介质结构和地质环境,均会给局部缺陷检测工作带来困难.

防渗墙最有效的检测方法是高频弹性波 CT 成像技术.由于 CT 成像技术检测质量依赖于钻孔和钻孔质量,因此检测成本较高,检测工期较长,故难以广泛应用.其他检测方法,如浅层地震勘探、地质雷达、瑞利面波、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、瞬变电磁法(TEM)等,都有尝试性的应用,并在特定环境中取得了一定效果.但这几种方法都没有得到工程物探界的认同.肖柏勋等^[2]针对长江堤防防渗墙质量无损检测工作的迫切需要,在新的地球物理探测技术一时难以面世的情况下,开展了多种现有地球物理方法在堤防防渗墙质量检测中的有效性现场试验研究,并在此基础上提出了以 CSAMT 法为主、多波地震映像法或垂直声波反射法为辅的检测方案.

到目前为止,还未见关于对防渗墙这一特定介质结构进行系统数值模拟正演计算和物理模型试验模拟的报道.为此,本文基于垂直截渗墙走向的电场数值模拟和物理模型试验论证了横剖面电阻率法在防渗墙质量检测中应用的可行性、应用特点和应用条件.但将该技术应用于实践还需与弹性波 CT 技术相结合并做进一步试验研究.

1 垂直防渗墙电阻率有限元数值模拟

基于 Maxwell 方程编制二维电场有限元分析软件,有限单元节点为磁势和电势,约束类边界条件为给定节点磁势或电势,载荷类边界条件为给定节点电流、电荷或分布的电流或电荷.分析时还需给定各向同性或正交各向异性介质的磁导率、电导率、介电常数的大小.

1.1 瞬态电磁分析的基本原理

麦克斯韦方程组为

$$\nabla \times E + \dot{B} = 0 \tag{1-a}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} - \epsilon \dot{\boldsymbol{E}} - \sigma \boldsymbol{E} = 0$$

(1-b)

$$\nabla \cdot (\epsilon \dot{\boldsymbol{E}} + \sigma \boldsymbol{E}) = 0$$

(1-c)

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$$

(1-d)

其中本构方程为

$$\boldsymbol{D} = \epsilon \boldsymbol{E} \quad \boldsymbol{B} = \mu_0 (\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M}) \quad \boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E}$$

(2)

式中: $\boldsymbol{E}$ ——电场强度; $\boldsymbol{D}$ ——电位移强度; $\boldsymbol{H}$ ——磁场强度; $\boldsymbol{B}$ ——磁感应强度; $\boldsymbol{J}$ ——电流密度; $\boldsymbol{M}$ ——磁化强度; ϵ ——介电常数; σ ——电导率; μ_0 ——自由空间磁导率。

设 $\boldsymbol{A}$ 为矢量磁势, V 为标量磁势,则

$$\boldsymbol{B} = \nabla \times \boldsymbol{A}$$

(3)

$$\boldsymbol{E} = -(\nabla V + \dot{\boldsymbol{A}})$$

(4)

库仑标尺引入

$$\nabla \cdot \boldsymbol{A} = 0$$

(5)

代入麦克斯韦方程组中,有

$$\nabla \times [\mu^{-1}(\nabla \times \boldsymbol{A} - \mu_0 \boldsymbol{M}_0)] + \epsilon(\nabla \dot{V} + \ddot{\boldsymbol{A}}) + \sigma(\nabla V + \dot{\boldsymbol{A}}) = 0$$

(7)

$$-\nabla[\epsilon(\nabla \dot{V} + \ddot{\boldsymbol{A}})] + \sigma(\nabla V + \dot{\boldsymbol{A}}) = 0$$

(8)

假设 $\epsilon = 0$,即电容率对时间的导数为零。

依据上述系统的椭圆性质,可用 Newmark 法离散方程(7)(8)。

离散后的一般形式为

$$\boldsymbol{A}^{n+1} = \boldsymbol{A}^n + \Delta t \dot{\boldsymbol{A}}^n + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t^2 \ddot{\boldsymbol{A}}^n + \beta \Delta t^2 \ddot{\boldsymbol{A}}^{n+1}$$

(9)

$$\dot{\boldsymbol{A}}^{n+1} = \dot{\boldsymbol{A}}^n + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{\boldsymbol{A}}^n + \gamma \Delta t \ddot{\boldsymbol{A}}^{n+1}$$

(10)

取 $\gamma = 1/2$, $\beta = 1/4$ 则将导致对称列式。这对线性系统来说,是无条件稳定的。

1.2 有限元电场计算

截渗墙二维有限元分析的相关参数为:截渗墙厚度 0.5 m;墙体埋深 30 m;墙顶中心点坐标(200,0)。介质参数设计以野外原位测试电阻率数据为参考,具体参数见表 1。

表 1 防渗墙及周围土的原电介质参数

Table 1 Electric parameters of cut-off wall and surrounding soil

介质	磁导率 ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)	介电参数 ($\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$)	电导率 ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	自由空间磁导率 ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
土	1.2566×10^{-6}	2.2125×10^{10}	0.020	1.2566×10^{-6}
防渗墙	1.2566×10^{-6}	1.3275×10^{10}	0.002	1.2566×10^{-6}

边界条件:地表电流密度法向分量为零;各边界按实际位置给定电位。初始条件: $\boldsymbol{A}$ (180,0)电流 $i|_A = 1 \text{ A}$; $\boldsymbol{B}$ (220,0)电流 $i|_B = -1 \text{ A}$ 。

有限元网格剖分和电位计算结果等势云图如图 1 所示。

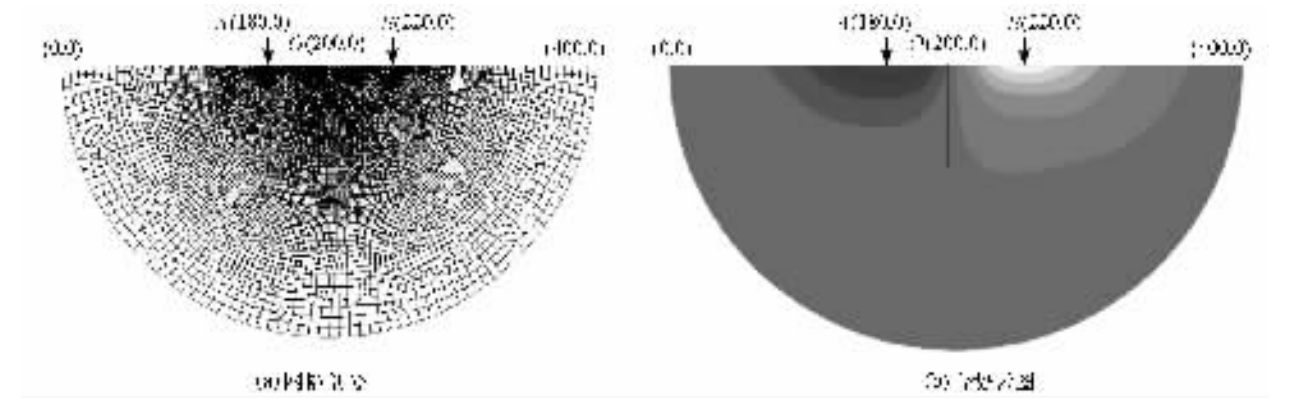


图 1 二维有限元网格剖分及节点电位等势云图

Fig.1 2-D finite element grids and nephogram of nodal potential

1.3 异常对比计算

应用二维有限元对比计算了截渗墙体异常存在与否两种情况的电位分布,地表 0~400 m 剖面的电位曲线和相对异常曲线如图 2 所示。计算边界条件和初始条件同图 1。在定义介质电导率参数时,分别定义了 3 种

介质结构特征 (a) 墙体完整无孔洞异常 (b) 墙体地表中心以下 10 m 深处设定了一个 2 m 高度的模拟通道 ; (c) 墙体上 5 m 深处设定了一个 2 m 高度的模拟通道. 通道介质电导率与防渗墙周围介质相同 , 为 $0.01(\Omega \cdot m)^{-1}$.

二维有限元分析计算中 , 点电源实际上为线元 , 二维板体中的模拟通道实际上为三维空间中的一个沿墙体走向无限长的渗流通道 , 因此其计算结果在数值上与实际情况有较大差异. 但传统的电阻率法模拟试验结果在很大程度上能给物理模型试验提供参考依据. 计算结果中典型地表电位如图 2 所示 ; 不同渗流模拟通道时的地表电位相对异常百分比如图 3 所示. 图中相对电位异常现象为有孔洞异常时的计算电位与防渗墙完整时的电位之比较结果. 从计算结果看 , 深径比为 10/2 的孔洞异常 , 与防渗墙完整时的电位相比 , 相对异常幅度可达到 10% 左右 ; 深径比为 5/2 时 , 相对异常幅度则超过 20%. 这说明 , 高阻板体上的低阻渗流通道本身就是一个电流集中的通道 , 它对地表电位的影响相当明显.

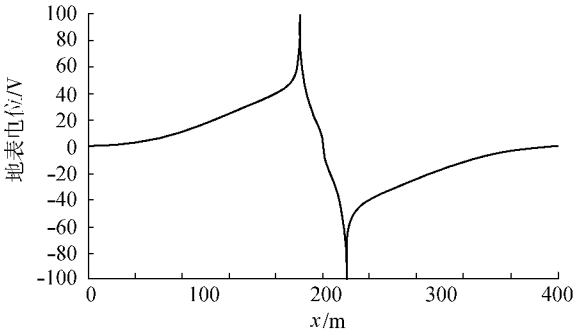


图 2 二维有限元模拟计算地表电位

Fig.2 Potential of earth surface calculated by 2-D finite element model

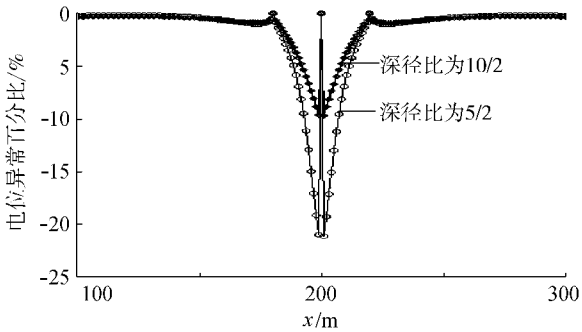


图 3 地表电位相对异常百分比

Fig.3 Percentage of relative abnormality of surface potential

二维有限元理论模型分析说明 , 若墙体为高阻薄板 , 当墙体存在渗流通道时 , 在垂直于其走向的电阻率测深剖面上存在较明显的电位相对异常 , 在满足截渗墙相对高阻的条件下 , 可以尝试用电阻率测深的方法进行截渗墙的隐患检测试验.

实际计算中 , 由于截渗墙深厚比较大 , 在剖面上存在一定难度 , 因此会影响数值模拟结果的精度.

总的来说 , 由于二维有限元模拟与实际三维异常情况存在较大差异 , 因此模拟结果仅能作为一种理论上的参考 , 在实际应用本文提出的方法之前 , 应做相应的物理模型试验.

2 物理模型试验

试验场地 : 水槽长 5 m、宽 3.8 m、深 2 m , 蓄水深度为 1.7 m , 蓄水电阻率为 $63 \Omega \cdot m$. 截渗墙用绝缘薄板模拟 , 薄板厚 2 mm、长 2.5 m、高 2 m. 测量仪器为中南大学 SQ—1 型双频激电仪.

2.1 截渗墙深度对垂直墙体方向电流场的影响

取 $AB = 4 m$, $MN = 0.5 m$, 绝缘板体从水面向下垂直浸入 , 浸润深度从 0 cm 至 120 cm , 测试结果为不同浸润深度的 V_{MN}/I 相对于零浸润深度时的 V_{MN}/I 之百分比 , 如图 4 所示. 试验结果表明 , 理想高阻绝缘薄板对电流场的影响十分明显 , 即形成了“阻断”效果. 随着板体浸入深度的加大 , V_{MN}/I 会迅速增大 , 浸深 60 cm 时增大 1 倍. 由此可知 , 当绝缘薄板上存在空洞时 , 必然会形成电流集中通道 , 此时 , 水面上的电场会发生一定的变化. 这一变化能否被检测 , 变化的幅度能否支撑一定的分辨率 , 值得研究.

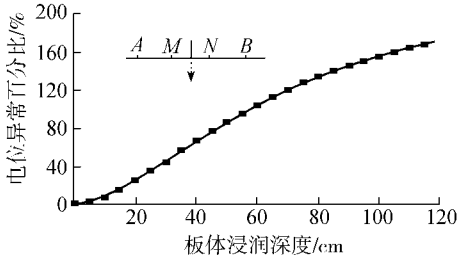


图 4 截渗墙深度对电位异常的影响

Fig.4 Potential abnormality induced by embedded depth of cut-off wall

2.2 空洞对垂直墙体方向电流场的影响

模拟渗流通道直径为 2 cm , 距水面深度 20 cm 和 10 cm 两种情况测试对比结果如图 5 所示. 同时 , 测线平行偏移 10 cm 后的测试结果也一并绘制在图 5 上. 相对于无渗流通道条件下截渗墙测深电阻率相对异常百分比如图 6 所示.

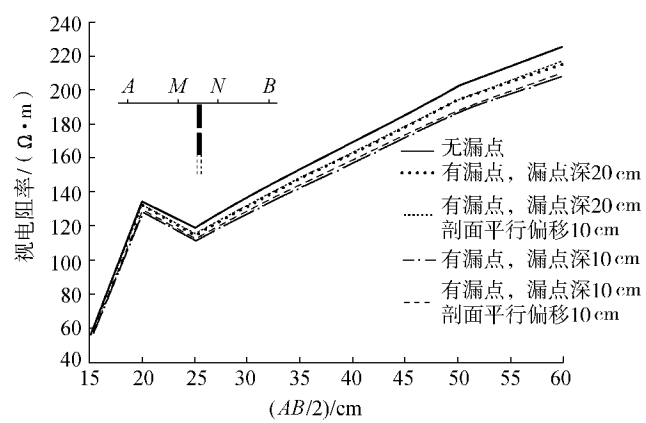


图 5 漏点于不同深度时的测深视电阻率

Fig.5 Sounding apparent resistivity with leakage points occurring at different depths

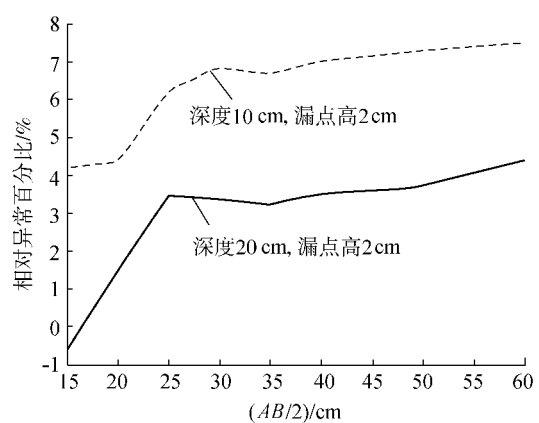


图 6 漏点于不同深度时视电阻率异常百分比

Fig.6 Abnormity percentage of apparent resistivity with the leakage points occurring at different depths

由测试结果可以看出:当渗流通道深 10 cm 时,截渗墙上横剖面测深异常达到 7%,当渗流通道深 20 cm 时,截渗墙上横剖面测深异常达 4% 左右.这一探测能力比半无限介质中的水平理想低阻通道的探测能力^[3]有了很大改进.这是高阻截渗墙“阻流”和渗流通道“集流”的共同作用效果,也是横剖面异常之所以突出的根本原因.由此可以推断,对于截渗墙这一特殊介质,当其为相对高阻而周围介质为相对低阻时,电阻率横剖面测深能够取得较高的探测分辨率.从图 5 可以看出,偏移 10 cm 后的旁侧线测深数据与零偏移的数据差别甚小.这说明,通过横剖面测深获得的截渗墙视电阻率剖面的横向分辨能力可能有限.

2.3 局部低阻体对异常的影响

在实际原位测试中,截渗墙周围介质的电阻率是随机变化的,而且变化幅度可能很大,所以模拟防渗墙周围介质中低阻体存在时的测试结果对检验电阻率法的有效性相当关键.

模拟截渗墙 20 cm 深处有一直径为 2 cm 的空洞,模拟局部低阻体为一直径为 18 cm 的铅球,铅球入水深度为 16 cm.测试数据通过视电阻率公式进行转换,转换结果如图 7 所示.

模拟试验表明,单侧局部低阻体的存在对垂直墙体测深剖面视电阻率结果影响极小.这从一定程度上说明,如果截渗墙一侧存在局部低阻体,则不会对横剖面电阻率测深数据形成明显的干扰.由此进一步证明了电阻率横剖面法用于截渗墙隐患检测的可行性.

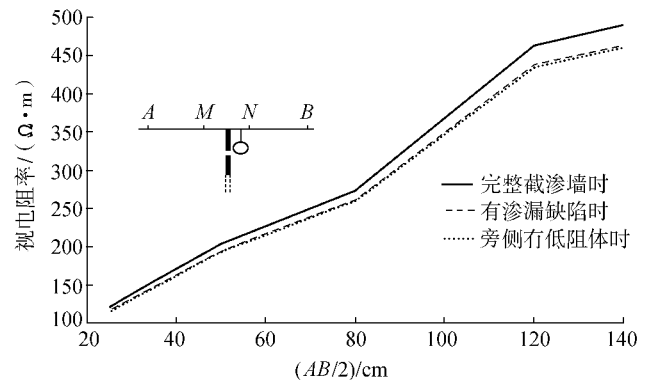


图 7 近旁侧低阻体对横剖面测深数据的影响

Fig.7 Influence of vicinal low-resistivity body on sounding profile data

3 实践中的应用地球物理条件

电阻率剖面法对隐伏直立高阻薄板有较强的分辨能力,这是电法勘探的特点之一.但从上述模拟试验可以看出,如果高阻薄板上存在局部低阻,则在地表跨高阻薄板电阻率测深剖面上也能得到较为明显的异常反应.这便从理论上支持了横剖面电阻率法在截渗墙隐患检测中应用的可行性.这种垂直于截渗墙走向的测深方法,不仅对被测截渗墙的墙体深度有明显反应,而且对墙体隐患有较好的探测深径比.

垂直于防渗墙走向的平行测深剖面可构成防渗墙的拟电阻率测深数据,且该数据能反映截渗墙的漏点分布情况.要获得剖面数据,需进行现场测试.为此,给出了一种现场测试工作布置方式(见图 8),并按这种方式进行了深径比为 10/1 的水槽物理模型试验,获得了视电阻率测试成果,如图 9 所示.

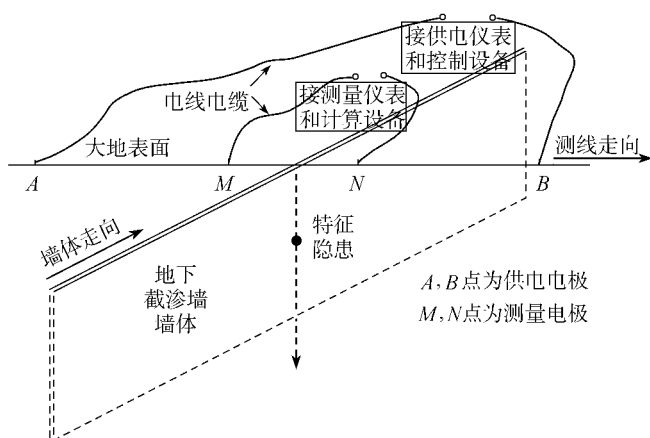


图8 截渗墙电法测试工作布置示意图

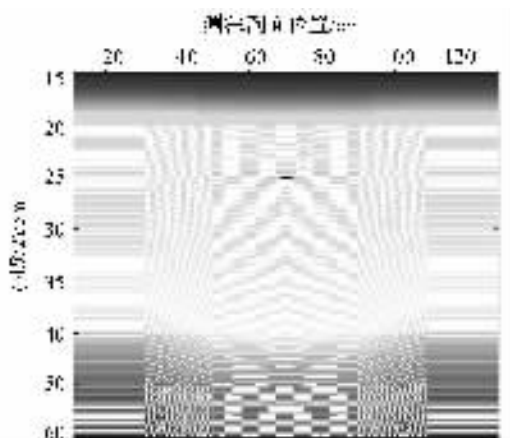
Fig.8 Sketch map of electric sounding
for cut-off wall

图9 水槽模型试验视电阻率等值线

Fig.9 Isoline map of apparent resistivity
by physical model sounding in the flume

4 结 语

横剖面电阻率法对防渗墙渗漏异常有较大的探测深径比,对于跨防渗墙的多点平行测深剖面数据可形成截渗墙测深剖面,且该剖面能反映一定规模的墙体隐患。但应注意的是:防渗墙几何形状不规则,会导致有限元数值模拟的局限性;对应于工作方式的视电阻率转换方式应做系统调整;仅以常规电阻率法工作方式和计算方法来完成模拟试验,对成果解释有其不利一面;精确反演需考虑地形影响;最佳极距、应用条件和分辨率等参数的量化问题需进一步研究。

虽然电阻率法对隐患的探测和识别有一定的局限性,但与高频弹性波CT方法相结合进行局部详查,则可达到进一步了解隐患特征和评价防渗墙安全程度的目的。

参考文献:

- [1] 张家发,李思慎,王文新.长江重要堤防垂直防渗工程[J].人民长江,2002,33(8):37—39.
- [2] 肖柏勋,余才盛,宋先海,等.堤防防渗墙质量无损检测试验研究最新进展[J].中国水利,2002,34(12):63—66.
- [3] 何继善,朱自强.论直流电阻率法探测堤坝隐患能力[A].见:温佩琳主编.湖南省地球物理论文集[C].长沙:中南大学出版社,2001.1—6.

Numerical and physical simulation of resistivity of transverse profiles of vertical cut-off walls

ZHU De-bing, REN Qing-wen

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: In consideration of the special structure of cut-off walls and their typical geophysical environment, the finite element simulation and physical model test were performed on their electric field to verify the feasibility of the transverse profile resistivity method applied to the inspection of the quality of cut-off walls and the characteristics of and condition for its application. The research shows that the parallel resistivity sounding profiles perpendicular to cut-off walls provide the data of pseudo conductivity of the walls, which can reflect the distribution of leakage points in cut-off walls, and that the cut-off wall with high-resistivity, significantly different to that of the surrounding soil, can be generally inspected by the transverse profile resistivity method, and if necessary, other precise methods, such as the high-frequency elastic wave-based CT technology can also be taken for further inspection.

Key words: cut-off wall; resistivity method; finite element simulation; physical simulation