

DOI: 10.11779/CJGE20220518

# 跨孔电法探测地下连续墙渗漏隐患的应用研究

陈亮<sup>1,2</sup>, 颜书法<sup>\*1,2</sup>, 万昱<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤防工程教育部重点实验室, 江苏南京 210024; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏南京 210024)

**摘要:** 为了定位地下连续墙的渗漏隐患, 以跨孔四极法和三极法对地下连续墙进行渗漏缺陷探测的数值模拟研究。研究结果表明: 视电阻率变化率曲线比视电阻率曲线更能有效地分辨渗漏隐患位置; 提出了四极法能够精确地探测渗漏隐患的极限供电极距和测量极距, 当供电极距超过一定距离时, 四极法不能再感知渗漏隐患; 提出了三极法能够精确地探测渗漏隐患的极限供电极距和测量极距, 当供电极距变大时, 三极法虽然能够感知渗漏隐患位置, 但三极法的测量精度逐渐降低。最后经过室内试验验证了跨孔电法能够精确地定位地下连续墙渗漏隐患的可行性, 为后续同类工程提供有效参考和借鉴。

**关键词:** 地下连续墙; 跨孔电法; 精确定位; 极限极距

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)07-1605-10

作者简介: 陈亮(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事渗流理论与探测技术方面的研究工作。E-mail: chenliang@hhu.edu.cn。

## Application of cross-hole electrical method to detection of the hidden leakage of diaphragm walls

CHEN Liang<sup>1,2</sup>, YAN Shufa<sup>1,2</sup>, WAN Yu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Ministry of Education, Nanjing 210024, China;

2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** In order to locate the hidden leakage of underground diaphragm walls, the numerical simulation studies on the detection of leakage defects of underground diaphragm walls are carried out by using the cross-hole quadrupole method and the tripole method. The results show that the curve of change rate of the apparent resistivity is more effective than that of the apparent resistivity to identify the location of the hidden leakage. A quadrupole method is proposed to accurately detect the limit power supply pole distance and measuring pole distance of hidden leakage. When the power supply pole distance exceeds a certain distance, the quadrupole method can no longer detect hidden leakage. The tripole method can accurately detect the limit power supply distance and measuring distance of the hidden leakage. When the power supply distance increases, the tripole method can perceive the location of the hidden leakage, but the measuring accuracy of the tripole method decreases gradually. Finally, the feasibility of the cross-hole electrical method to accurately locate the leakage hidden danger of underground diaphragm walls is verified through the laboratory tests, which provides the effective reference for the subsequent similar projects.

**Key words:** diaphragm wall; cross-hole electrical method; precise positioning; limit polar distance

## 0 引言

地下连续墙由于具有较高的强度和刚度, 加上安装时安静、无振动, 常用于人口密集地区的深层地下建筑。已经证明, 实际施工过程中, 地连墙的水密性的质量控制很难把握<sup>[1-3]</sup>。一旦地连墙渗漏, 容易引起基坑围护结构发生位移和变形, 造成基坑失稳破坏, 对周边环境产生严重影响<sup>[4-5]</sup>。因此基坑开挖前对地连墙的水密性进行检测具有重要意义。目前一些常规的检测方法主要有抽水试验、微测井电法和高密度电法

等, 这些方法在设备安装或者测试过程中易受干扰, 导致分辨率降低, 无法精确定位异常位置, 亟待一种易操作、干扰小, 能够解决地连墙深部精细渗漏探测问题的技术。

跨孔电法利用钻孔布设探测装备, 对目标体施加

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1510802); 国家自然科学基金项目(51778210)

收稿日期: 2022-04-28

\*通信作者(E-mail: shufayan@hhu.edu.cn)

电场，通过测量不同深度的电势反映目标体的异常。跨孔电法最早由 Daily 等<sup>[6]</sup>提出，Bing 等<sup>[7-8]</sup>对跨孔电法各种装置敏感性进行了详细分析，开展了数值模拟试验验证了跨孔三极法和四极法在精细化探测目标体方面的有效性。近年来跨孔电法在地表精细探测方面应用广泛<sup>[9-12]</sup>。目前在地连墙渗漏探测方面，张再源等<sup>[13]</sup>利用跨孔电法开展地连墙隐患电阻率非线性反演研究，取得了不错的效果，同时提出供电极距和测量极距对异常体的分辨有一定的影响。He 等<sup>[14]</sup>基于跨孔电法开展地连墙渗漏可视化研究，发现利用不同时刻电压可以评价渗流速度和渗漏位置，综上所述，利用钻孔电法开展地下连续墙隐患探测是一种行之有效的技术，然而现有的研究比较初步，缺少供电极距和测量极距对异常体分辨率具体的影响规律。

针对上述问题，本文开展跨孔电法探测地下连续墙渗漏异常的可行性研究。首先基于 MATLAB 开发环境利用数值模拟研究渗漏深度、渗漏尺寸、供电极距对视电阻率曲线的影响，在此基础上，提出利用视电阻率变化率曲线能够更加精确科学地判定渗漏位置，接着研究了供电极距、测量极距对跨孔电法测量地连墙缺陷精度的影响机制，给出了精确测量地连墙缺陷的极限供电极距和极限测量极距。最终，利用室内模型试验验证了方法的有效性。

## 1 理论基础

数值模拟技术是认识复杂介质中电场分布规律的理论基础。本文基于三维稳定电流场点电源电势的偏微分方程，采用面积离散有限差分法<sup>[15]</sup>对地下连续墙渗漏引起的异常进行数值模拟，分析四极法和三极法对渗漏异常的反馈效果，讨论影响渗漏探测精度的影响因素。

### 1.1 二维点源控制方程及其边界条件

三维点源激励下稳定电流场的控制方程：

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla U(x, y, z)] = I \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0) \quad (1)$$

式中： $\sigma$  为介质的电导率，是电阻率的倒数； $U$  为地面或介质中任意点的电势； $I$  为供电电流强度； $(x_0, y_0, z_0)$  为供电点的位置坐标； $\delta$  为狄拉克函数。

地下连续墙的长度远远大于厚度，因此将地下连续墙结构简化为二维平面结构进行研究。 $y$  轴设为地下连续墙的走向，地下连续墙沿走向均匀分布，因此，

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

此外电势函数  $U(x, y, z)$  是  $y$  轴对称分布的函数，电源所在的平面是  $x-z$  主平面，因此令  $y_0 = 0$ ，利用傅立叶变换：

$$\phi(x, k, z) = 2 \int_0^\infty U(x, y, z) \cos(ky) dy \quad , \quad (3)$$

$$F[\delta(y - y_0)] = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(y - y_0) e^{-iky} dy = 1 \quad , \quad (4)$$

将  $(x, y, z)$  空间中的电势  $U$  变成  $(x, k, z)$  空间中的电势  $\phi$ ，此时三维稳定电流场点电源电势满足的偏微分方程变成富氏空间的二维偏微分方程：

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, z) \nabla \phi(x, k, z)] + \sigma(x, z) k^2 \phi(x, k, z) = I \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \quad , \quad (5)$$

式中， $\phi$  为富氏空间的电势。

想要唯一确定微分方程（5）的解，还需要特定的边界条件。目前存在 3 类边界条件<sup>[13]</sup>。

第一类边界条件（狄里希莱条件）：

$$U = U_1 \quad , \quad (6a)$$

式中， $U_1$  为已知值，可以是 0 也可以设定为均匀介质场下的无穷远处的电势值。

第二类边界条件（诺伊曼条件）：在地面边界上，由于地表是绝缘面，电流沿着地表流动，所以电流密度法向分量为零，

$$\frac{\partial(\sigma \nabla U)}{\partial n} = 0 \quad . \quad (6b)$$

第三类边界条件（混合边界条件）：离点电源较远之外的地下某点，其电势应是不为零的非常小的值。利用保持电位连续性的混合边界条件可解决这一问题：

$$\frac{\partial U}{\partial n} = -\frac{c}{r^3} \vec{r} \cdot \vec{n} = -\frac{c}{r^2} \cos \theta \quad . \quad (6c)$$

式中： $c$  为常数； $r = \sqrt{x^2 + z^2}$ ； $\theta$  为偶极源中心到计算点的径向矢量  $\vec{r}$  与外法线矢量  $\vec{n}$  之间的夹角。

又因为

$$\begin{aligned} \phi(x, k, z) &= \int_0^\infty \frac{A dz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \\ &= A K_0 \left( k \sqrt{x^2 + z^2} \right) = A K_0(kr) \quad , \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -A k K_1(kr) \cos \theta \quad , \quad (7b)$$

式中， $K_0$ ， $K_1$  分别为第二类 0 阶、1 阶修正贝塞尔函数， $A$  为常数。

因此混合边界条件可以写为

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} + k \frac{K_1(kr)}{K_0(kr)} \phi \cos \theta = 0 \quad . \quad (7c)$$

这种混合边界条件利用了无穷远界面上电势的物理特性，并且不需要先验假设一个“正常”电场的分布来计算  $U$ 。混合边界条件可以减少边界附近网格的数量，同时消除了边界虚源所引起的反射作用。

### 1.2 求解富氏电势

采用直接显式面积离散有限差分技术，求解三维

点源激励下具有任意二维电导率分布的半空间上的电势分布。

针对点源二维控制方程生成区域差分方程:

$$-\iint_{\Delta A_{ij}} \nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) ds + \sigma k^2 \phi = \iint_{\Delta A_{ij}} I \delta(x - x_0) \delta(y - y_0), \quad (8)$$

式中,  $\Delta A_{ij}$  为图 1 虚线段包围的面积。

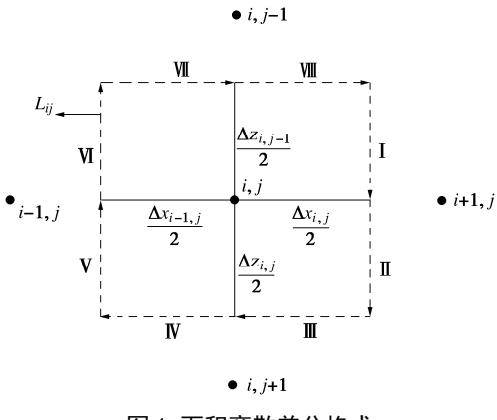


图 1 面积离散差分格式

Fig. 1 Discrete difference scheme for area

针对左式第一项, 利用格林公式:

$$\iint_{\Delta A_{ij}} \nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) ds = \oint_{L_{ij}} \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} dl, \quad (9)$$

式中,  $\oint_{L_{ij}}$  为图 1 虚线组成的闭合路径。用中心差分

近似  $\nabla \phi$ , 则式 (9) 的差分形式:

$$\oint_{L_{ij}} \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} dl = c_l \phi_{i-1,j} + c_t \phi_{i,j-1} + c_m \phi_{i,j} + c_b \phi_{i,j+1} + c_r \phi_{i+1,j}. \quad (10a)$$

其中:

$$c_l = \frac{\sigma_{i-1,j} \Delta z_j + \sigma_{i-1,j-1} \Delta z_{j-1}}{2 \Delta x_{i-1}}, \quad (10b)$$

$$c_t = \frac{\sigma_{i-1,j-1} \Delta x_{i-1} + \sigma_{i,j-1} \Delta x_i}{2 \Delta z_{j-1}}, \quad (10c)$$

$$c_b = \frac{\sigma_{i,j} \Delta x_i + \sigma_{i-1,j} \Delta x_{i-1}}{2 \Delta z_j}, \quad (10d)$$

$$c_r = \frac{\sigma_{i,j-1}}{2 \Delta x_i} \Delta z_{j-1} + \frac{\sigma_{i,j}}{2 \Delta x_i} \Delta z_j, \quad (10e)$$

$$c_m = B - (c_l + c_t + c_b + c_r). \quad (10f)$$

其中  $B$  与式 (8) 左式第二项有关, 第二项利用面积离散有限差分表示为

$$\begin{aligned} & \iint_{\Delta A_{ij}} \sigma(x, z) k^2 \phi(x, k, z) \\ &= k^2 \phi_{i,j} \left[ \frac{\sigma_{i,j-1}}{4} (\Delta x_i \Delta z_{j-1}) + \frac{\sigma_{i,j}}{4} (\Delta x_i \Delta z_j) + \right. \\ & \quad \left. \frac{\sigma_{i-1,j}}{4} (\Delta x_{i-1} \Delta z_j) + \frac{\sigma_{i-1,j-1}}{4} (\Delta x_{i-1} \Delta z_{j-1}) \right] \end{aligned}$$

$$= B \cdot \phi_{i,j}. \quad (11)$$

得到内部节点的差分方程组之后, 再对上边界使用第二类边界条件, 对左边界、右边界和底边界使用第三类边界条件, 得到上边界、左边界、右边界和底边界的有限差分方程组, 最终得到一个与网格数量相等的方程组成的方程组, 可表示为

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{f} = \mathbf{S}. \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{C}$  为系数矩阵;  $\mathbf{f}$  为各节点的电势组成的列向量;  $\mathbf{S}$  为式 (8) 中等式右边组成的列向量, 只有在点电源处取值为 0.5 I, 其他各点均为 0。

利用 MATLAB 编制相应的程序可以求得式 (12) 中对应的  $\mathbf{f}$ 。

### 1.3 富氏电势反变换

对差分方程式 (12) 进行求解可以得到各个节点上的变换电势  $\phi$ 。选用若干个不同的波数  $k$  时, 就得到了若干组  $\phi$ , 将它们作富氏反变换即可获得  $U$  的分布;

$$U(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \phi(x, k, z) \cos ky dk. \quad (13)$$

式 (13) 中的  $k$  是从 0 积分到  $\infty$ , 然而在实际求解过程中无法做到从 0 积分到  $\infty$ , 一般考虑的是利用有限个波数做近似的数值积分。在数值模拟过程中考虑到无穷远边界上的电位只与正常介质有关, 不考虑异常介质产生的二次场, 二维剖面选择主观测剖面, 即  $y=0$ , 因此无穷远边界上的电位满足

$$u = \frac{A}{\sqrt{x^2 + z^2}}. \quad (14)$$

将式 (14), (7a) 代入式 (13) 可以得到

$$\frac{1}{r} = \sum_{j=1}^n K_0(k_j r) g_j. \quad (15)$$

式中:  $r$  为偶极源中心到边界的距离;  $k_j$  为波数;  $g_j$  为步长;  $j=1, 2, 3, \dots, 6$ 。

根据式 (15), 只需要在研究范围内选取一系列的  $k$  和  $g$ , 使得其反变换得到的电势误差在允许范围内即可。

前人通过选择一系列  $r$ , 利用式 (15) 构成计算矩阵, 结合最小二乘法对参数  $k$  和  $g$  进行优化, 此过程中需要反复对  $g$  进行求导, 工作量偏大。本文利用粒子群优化算法<sup>[16]</sup>在一个  $d$  维的搜索空间中初始化一群规模为  $N$  的随机粒子, 通过每个粒子的自身更新和所有粒子的全局更新, 快速、准确地找到满足要求的  $k$  和  $g$ 。每个粒子  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ ) 带有两个属性: 速度  $v_i$  ( $v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{id}$ ) 和位置  $x_i$  ( $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{id}$ )。根据要求构造适应度函数, 每次根据粒子对搜索空间适应度值的大小对粒子的优劣进行评价, 以及迭代。具体过程表现为在每一次迭代过程中, 粒子通过两个极值更新自己的位置, 一个是粒子  $i$  自身所找到的当前最优解, 称为个体极值, 另一个是整

个群体当前找到的最优解，称为全局解。粒子群的进化方程描述如下：

$$\begin{aligned} v_i(t+1) = & wv_i(t) + c_1 \text{rand}_1(p_i(t) - x_i(t)) + \\ & c_2 \text{rand}_2(p_{\text{gd}}(t) - x_i(t)) \quad . \end{aligned} \quad (16)$$

式中： $t$  为当前迭代次数； $w$  为惯性权重； $c_1$ ,  $c_2$  为学习因子； $\text{rand}_1$  和  $\text{rand}_2$  为取值 0~1 之间的随机数； $p_i(t)$  为当前粒子  $i$  的个体极值； $p_{\text{gd}}(t)$  为当前的全局极值； $v_i(t)$  表示当前粒子  $i$  的速度； $x_i(t)$  为当前粒子  $i$  的位置。

位置更新公式为

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad , \quad (17)$$

式中， $x_i(t+1)$  为第  $t+1$  次迭代开始时粒子  $i$  的位置。

本次优化过程中，为了避免陷入局部最小，同时加快收敛，动态调整加速度因子和惯性权重。每次迭代后  $w$ ,  $c_1$  和  $c_2$  可表示为

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \cdot t / t_{\max} \quad . \quad (18)$$

式中： $w_{\max}$  为迭代过程中惯性权重的最大值，取  $w_{\max}=1.4$ ； $w_{\min}$  为迭代过程中惯性权重的最小值，取  $w_{\min}=0.7$ ； $t_{\max}$  为迭代最大次数，取  $t_{\max}=500$ 。

$$c_1 = c_{1\max} - (c_{1\max} - c_{1\min}) \cdot t / t_{\max} \quad , \quad (19)$$

式中： $c_{1\max}$  为迭代过程中学习因子的最大值，取  $c_{1\max}=2.5$ ； $c_{1\min}$  为迭代过程中惯性权重的最小值，其取  $c_{1\min}=0.7$ 。

$$c_2 = c_1 \quad . \quad (20)$$

本文选取的  $r$  值分别为左边界 12.25 m, 左下角边界 27.84 m 和底边界的中点 25 m, 适应度函数为

$$F_{\text{un}} = \sum_{m=1}^3 (r_m - K_0(k_i \cdot r_m)g_i)^2 \quad . \quad (21)$$

根据前人的计算经验，一般选取 5~7 个波数即可满足精度要求，为此本文取  $i=6$ ，因此本次优化过程中  $d=12$ ，通过迭代优化得到的  $k_i$  分别为 0.01, 0.019, 0.1, 0.131, 0.204, 0.654； $g_i$  分别为 0.01, 0.021, 0.04, 0.043, 0.069, 0.6。

为了验证优化得到的波数的精确性，利用有限差分模拟半无限空间均匀电阻情况下偶极源在地表的电势，相应的解析解与数值解见图 2。

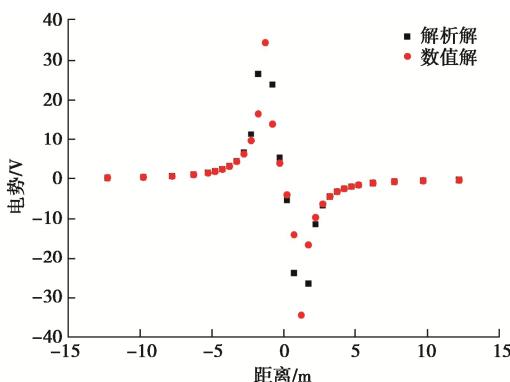


图 2 地表电势解析解与数值解

Fig. 2 Analytical and numerical solutions of surface potential

从图 2 可以发现数值模拟的结果在点源 1.0 m 范围内模拟的误差较大，这是由于源汇项附近网格稀疏导致的模拟效果较不理想，但在大于源汇项 1.0 m 后，模拟效果理想，误差小于 5%。因此可以利用此模拟手段研究地连墙渗漏异常视电阻率分布规律，研究结果同样适用于地连墙的浅部位置。

## 2 数值模拟研究

在数值模拟过程中，网格的划分见图 3。

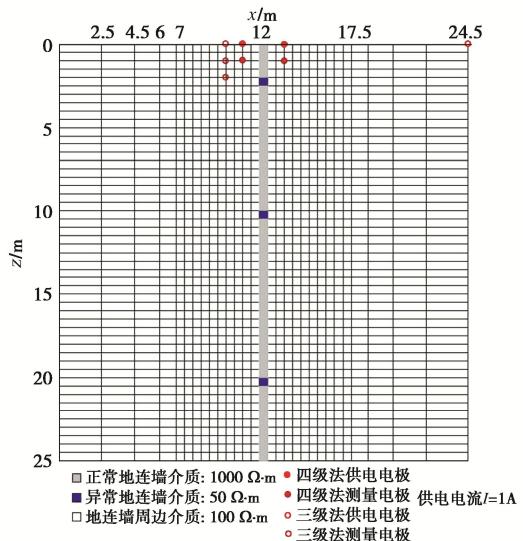


图 3 数值模型离散网格示意图

Fig. 3 Discrete grid diagram of numerical model

网格在深度方向（ $z$  轴正向）采取等密分布，单个网格大小为 0.5 m，在水平方向（ $x$  轴正向）网格采取中间密两边稀疏分布，整个模型长 24.5 m, 深 25 m。模拟过程中介质分为 3 种：①地连墙周边介质；②正常地连墙介质；③异常地连墙介质。地连墙周边介质一般都是饱和软土或者砂土，电阻率一般在 100~200  $\Omega \cdot \text{m}$ <sup>[17-18]</sup>，地下连续墙是由钢筋混凝土制成，正常的地连墙电阻率较大，模拟过程中取 1000  $\Omega \cdot \text{m}$ <sup>[19]</sup>，地连墙发生缺陷时，缺陷部位一般是水或者饱和泥砂，为此缺陷处的电阻率设置为 50  $\Omega \cdot \text{m}$ ，整个模拟过程中电流保持恒定为 1 A。

### 2.1 地下连续墙渗漏异常视电阻率分布规律研究

四极法是将供电电极 A 和 B 等间距地固定在地连墙的两侧地表，测量电极 M 和 N 沿着地连墙的深度方向等间距的向下测量。三极法是将供电电极 B 置于无穷远，供电点击 A、测量电极 M 和 N 放置在同一竖轴上，测量时 M 和 N 沿着地连墙深度方向向下移动，四极法和三极法的装置示意图见图 3。由于地下存在多种介质，通过电压和电流测得的电阻率是各种介质的平均电阻率也称为视电阻率。

地连墙不存在渗漏，通过模拟利用四极法和三极

法测得的视电阻率曲线如图4所示, 图中的供电极距是指A/B极到地连墙的距离。从图4中发现采用四极法测得的视电阻率在0~10.0 m内快速增加, 深度超过10 m后视电阻率缓慢增长, 同一深度的视电阻率随着电极距的增大而成指数下降; 采用三极法测得的视电阻率在5.0 m范围内时快速增加, 当深度超过5 m之后, 视电阻率趋于平稳。

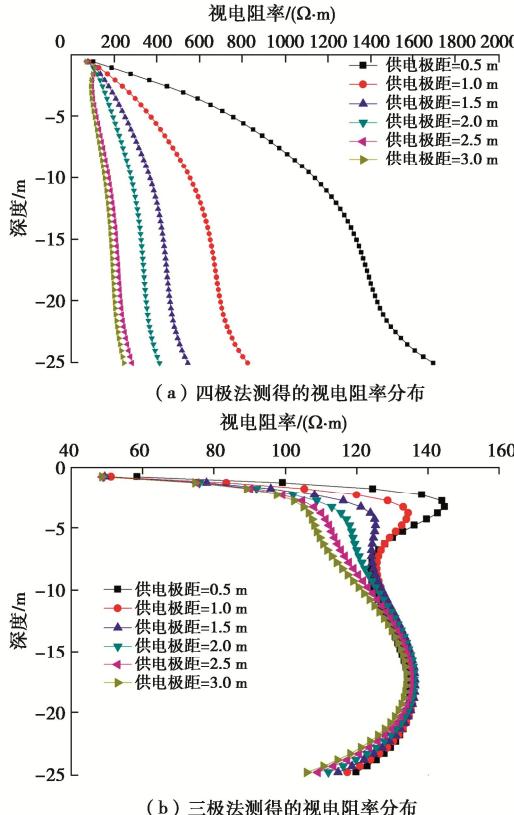


图4 地下连续墙无异常时视电阻率曲线

Fig. 4 Curves under of apparent resistivity normal diaphragm wall

地下连续墙一般在接头处容易产生渗漏缺陷, 因此工程上比较关注渗漏缺陷的位置和尺寸即渗漏缺陷的大小。地连墙发生渗漏时, 四极法和三极法测得的视电阻率曲线如图5所示。其中5(a)和5(b)对应的工况是地连墙发生3处渗漏, 渗漏的范围: -2.0~-2.5, -10.0~-10.5, -20.0~-20.5 m; 5(c)和5(d)对应的工况是地连墙发生3处渗漏, 渗漏的范围: -2.0~-3.0, -10.0~-11.0, -20.0~-21.0 m。

通过图5(a), (b)可以发现: ①当供电极距为0.5 m时, 会在模拟的中部和深部渗漏异常处产生明显的低阻区, 渗漏尺寸越大, 低阻区的范围越大, 此外随着供电极距的增大, 低阻现象逐渐消失; ②对于浅部的渗漏异常, 由于模拟过程中在点电源附近模拟误差较大的缘故, 很难发现视电阻率曲线中相对应的低阻区, 但通过中部和深部的渗漏异常处的视电阻率分布规律可以推断实测过程中在浅部的渗漏异常处的视电阻率分布规律与中部和深部的相同。

通过图5(c), (d)发现利用三极法测得的视电阻率曲线在中部和深部的渗漏异常处存在明显的曲线震荡, 渗漏尺寸越大, 振荡的区域越大, 此外随着供电极距的增大, 振幅逐渐减小。

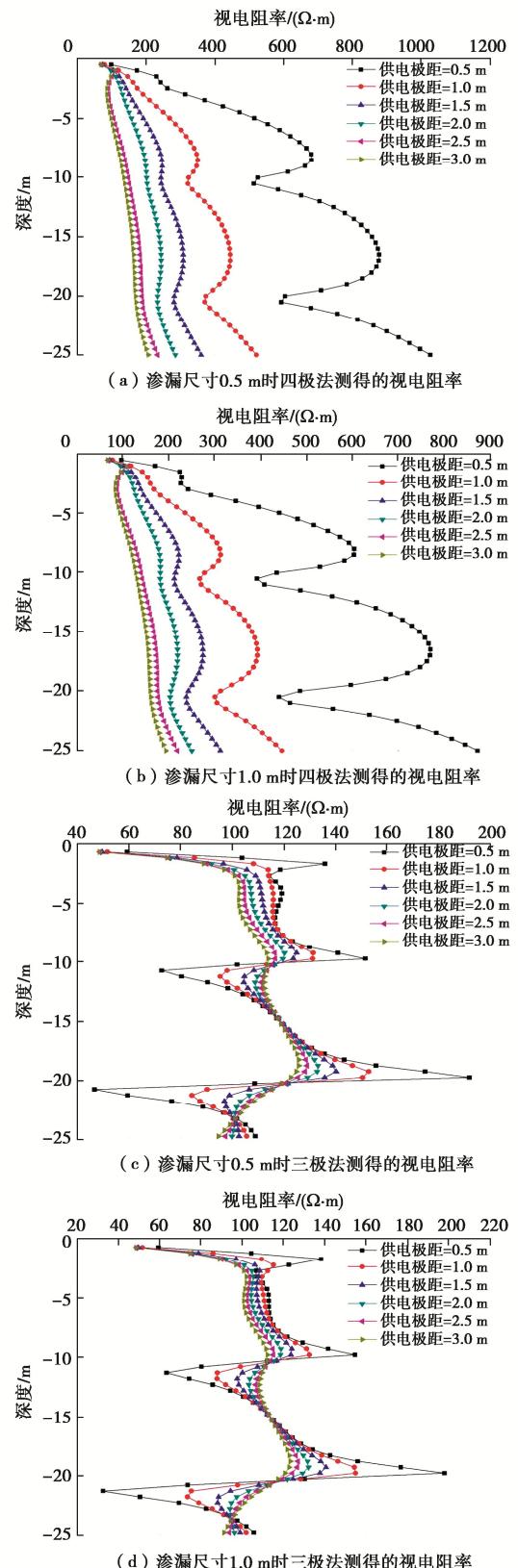


图5 地下连续墙存在异常时视电阻率分布图

Fig. 5 Curves of apparent resistivity under anomalous diaphragm wall

## 2.2 测量精度的影响因素研究

此次研究旨在定位渗漏缺陷的位置。地连墙产生渗漏缺陷后，在墙内外水头差的驱使下，水流通过地连墙的渗漏缺陷流进墙内。因此探测过程中在渗漏缺陷区域会产生明显的低阻区，通过低阻区可以推断渗漏异常的位置和尺寸。当推断的渗漏异常位置和尺寸与假设的渗漏异常位置和尺寸完全重合时即为精确定位，当不能精确定位时，通过两者的重合范围与推断的渗漏位置的尺寸的比值作为测量精度的评估标准。

通过 2.1 节发现，利用视电阻率曲线发现四极法在供电极距为 0.5 m 时可精确定位渗漏缺陷的范围，供电极距大于 0.5 m 时，曲线的尖端变得平滑对推断渗漏位置造成困扰；使用三极法时供电极距超过 1.0 m 后推断的渗漏异常尺寸与实际假设的渗漏异常尺寸存在差距。在实际运用中有时候由于条件的限制，很难在距离地连墙 1.0 m 的范围内进行钻孔，防止破坏地连墙，同时亟待一种方法来定量直观判定视电阻率曲线中渗漏异常位置的截取范围。为此需要对视电阻率曲线进行数学处理，更加高效、科学和广泛地利用视电阻率值。考虑到视电阻率只有在渗漏异常处才会发生突变，为此提出视电阻率变化率，通过比较相邻两点视电阻率的变化程度，确定渗漏异常位置和尺寸，具体表达式为

$$P_i = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_i} \quad . \quad (22)$$

式中： $P_i$  为  $i$  点的视电阻率变化率； $\rho_{i+1}$  为  $i+1$  点的视电阻率； $\rho_i$  为  $i$  点的视电阻率。

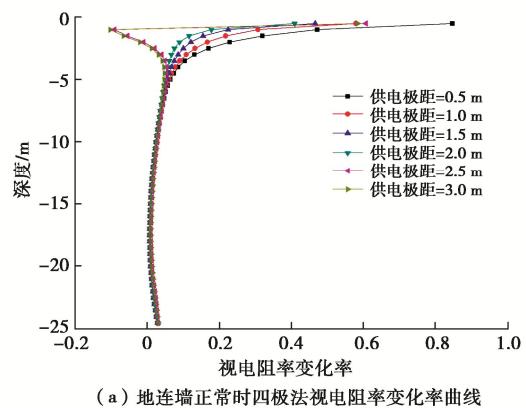
接下来探究利用视电阻率变化率曲线定位地连墙渗漏异常位置和尺寸的效果并对测量精度进行分析。此外，通过图 5 发现利用有限差分进行模拟时，浅部网格由于离点电源较近，模拟结果产生的误差会对渗漏异常处的视电阻率造成干扰，因此，为了避免模拟误差的干扰，选择 5.0 m 以下的视电阻率变化率进行分析。

通过图 6 (a), (b) 可以发现，当地下连续墙不存在渗漏时，四极法和三极法的任意供电极距的视电阻率变化率曲线在 5.0 m 以下范围内保持平稳，在 0.0 附近无明显波动。

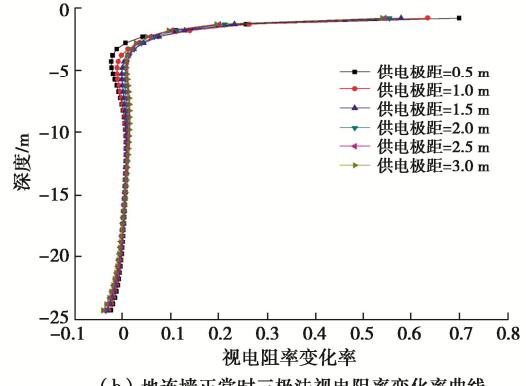
通过图 6 (c), (d) 发现在使用四极法时，当供电极距固定，视电阻率变化率曲线会在渗漏异常部位产生明显的极小值和极大值，推断的渗漏异常范围在极小值和极大值范围内。以供电极距 0.5 m 的测线为例，在图 6 (c) 中视电阻率变化率曲线在 9.5 m 处取得极小值，在 10.5 m 处取得极大值，二者范围内存在的点有 10.0 m，根据推断渗漏位置为 10.0~10.5 m，

同样在 19.5 m 的位置取得极小值，在 20.5 m 的位置取得极大值，二者范围内存在的点有 20.0 m，根据推断渗漏位置为 20.0~20.5 m；随着供电极距的增大，渗漏异常处的极小值和极大值呈指数型变化，曲线突变程度逐渐趋于平缓，推断的渗漏位置区域逐渐变大。图 6 (c) 中供电极距小于等于 1.0 m 时，推断的渗漏范围为 10.0~10.5 m，测量精度为 100%；电极距为 1.5 m 时根据规律推断的渗漏位置为 10.0~11.5 m，测量精度为 33%；当供电极距大于 2.0 m 后曲线不再有明显的极值，因此很难确定渗漏位置。

通过图 6 (e), (f) 发现，三极法的视电阻率变化率曲线与四极法的视电阻率变化率曲线存在明显差异。推断的渗漏异常范围在视电阻率变化率突变点之间，以供电极距 0.5 m 的测线为例，图 6 (e) 中第一处突变点的纵坐标为 9.75, 10.25 m，推断的渗漏位置为 10.0~10.5 m，第二处突变点的纵坐标为 19.75~20.25 m，推断的渗漏位置为 20.0~20.5 m。随着供电极距的增加，渗漏异常范围内的视电阻率变化率的值呈指数型变化，突变点的值和位置产生变化，对渗漏位置的判断产生的干扰变大，图 6 (e) 中，供电极距小于 1.5 m 时，推断的渗漏位置为 10.0~10.5 m，测量精度为 100%，当供电极距为 3.0 m 时，推断的渗漏位置为 10~11.5 m，测量精度为 33.3%。利用三极法的视电阻率变化率曲线分析渗漏异常范围时比视电阻率曲线效果更加明显。



(a) 地连墙正常时四极法视电阻率变化率曲线



(b) 地连墙正常时三极法视电阻率变化率曲线

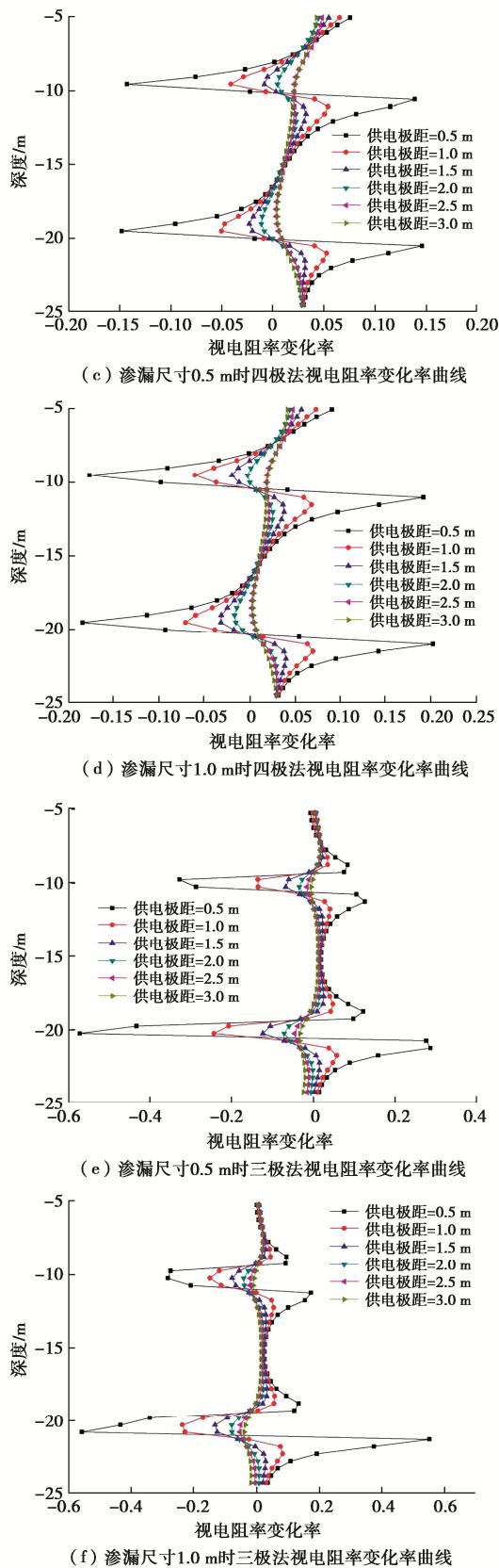


图6 视电阻率变化率曲线

Fig. 6 Curves of change rate of apparent resistivity

接着考虑测量极距对于渗漏体探测精度的影响规律。试验过程中供电极距为0.5 m, 选择3种测量极距, 分别为0.5, 1.0, 1.5 m。将1.0, 1.5 m测得的

视电阻率进行三次样条插值, 然后从中按0.5 m的间隔提取视电阻率值, 再利用视电阻率值得到3条相应的视电阻率变化率曲线如图7(a), (b)所示。从图7中可以发现利用不同的测量极距得到的视电阻率变化率曲线图形形状接近, 测量极距为1.0 m的视电阻率变化率曲线与实际视电阻率变化率曲线(测量极距为0.5 m)吻合度较高, 推断的渗漏位置与测量极距为0.5 m的视电阻率变化率曲线推断的位置一致, 能够精确定位渗漏位置, 测量精度100%, 当测量极距为1.5 m时, 利用三次样条插值求得的视电阻率变化率曲线与实际曲线误差较大, 在四极法中当测量极距为1.5 m时, 推断的底部渗漏位置为19.0~21.5 m, 测量精度为20%; 在三极法中当测量极距为1.5 m时, 推断的底部渗漏位置为19.5~20.5 m, 测量精度为50%。

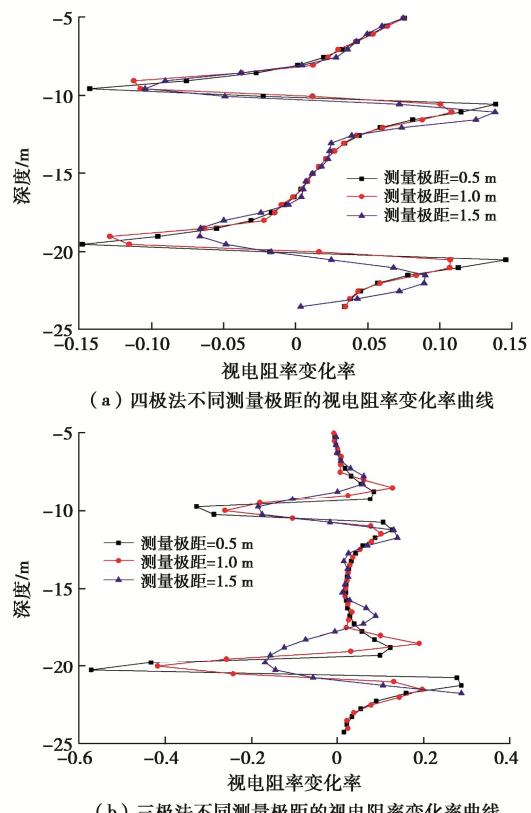


图7 不同测量极距的视电阻率变化率曲线

Fig. 7 Curves of change rate of apparent resistivity under different measuring pole distances

### 3 室内模型验证

通过数值模拟发现供电极距和测量极距对地连墙渗漏异常的推断影响十分显著, 其中供电极距的影响尤为显著。为了验证数值模拟得到的结果, 利用实验室现有的模型槽, 按照1:50的比尺开展室内模型试验, 模拟两幅地下连续墙35 m深度范围的渗漏异常, 其中#1渗漏点在水位以下10 cm, 渗漏点的直径

为 1 cm, #2 渗漏点在水位以下 40 cm, 渗漏点直径为 1 cm, #3 渗漏点在水位以下 70 cm, 渗漏点直径为 1 cm, #1 渗漏点, #2 渗漏点和#3 渗漏点分别模拟实际情况条件下地连墙在 5, 20, 35 m 的位置存在 0.5 m 的渗漏点, #4 渗漏点在水下 40 cm 的位置, 渗漏点直径为 1 cm, #4 渗漏点模拟实际情况条件下地连墙在 20 m 的位置存在 0.5 m 的渗漏点。不存在渗漏时钢筋混凝土的电阻率远远大于土体介质的电阻率, 此外钢筋混凝土的渗透系数在  $10^{-7}$  cm/s, 因此地连墙采用有机玻璃板进行模拟, 在有机玻璃板上开孔模拟渗漏异常。在试验模型槽的#1 和#2 防渗墙左右按照设置的间距埋入直径 1 cm, 侧壁开孔的有机玻璃管, 模拟实际的钻孔, 用直径 0.5 cm 的电缆线模拟电极, 测量时将电缆线置于有机玻璃管中按照设置的测量极距向下移动。在#1 地连墙开展四极法和三极法不同供电极距对测量结果的影响研究, 测试过程中测量极距保持不变为 1 cm, 供电极距分别为 1, 2, 3 cm; 在#2 地连墙开展四极法和三极法不同测量极距对测量结果的影响研究, 测量过程中供电极距保持不变为 1 cm, 测量极距分别为 1, 2, 3 cm。

**测量步骤:**首先接通稳压电源, 给 dzd-6A 直流电法仪提供 20 V 的恒压, 四极法测量时将 AB 两极按照要求的供电极距固定布置在防渗墙的两侧, 接着按着设计的测量电极距平行移动 MN, 扫描整个防渗墙; 三极法测量时将 B 极固定在防渗墙的中间位置, 将 A 极按照设计的供电极距固定在防渗墙的外侧, 测量电极 MN 按照设计的测量极距向下移动; 四极法和三极法的装置示意图见图 8。

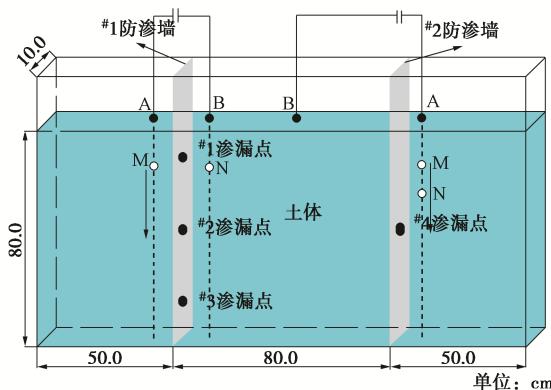


图 8 试验模型

Fig. 8 Test model

通过图 9 (a) 发现当四极法供电极距不超过 2 cm 时, 通过视电阻率变化率曲线可以精确地推断出渗漏位置, 当供电极距大于 2 cm 时, 利用视电阻率变化率曲线得出的渗漏位置分别为 10~11, 40~41 和 70~72 cm, 其中上层的推断位置与实际位置相符, 中层和底层推断的渗漏位置与实际位置存在偏差; 由图 9(b)

发现三极法供电极距为 1, 2 和 3 cm 的测线都能精确判定渗漏位置; 这与数值模拟得到的规律相一致。通过图 9 (c) 和 9 (d) 发现, 测量极距为 1, 2 cm 时, 四极法和三极法可以精确推断出渗漏位置, 当测量极

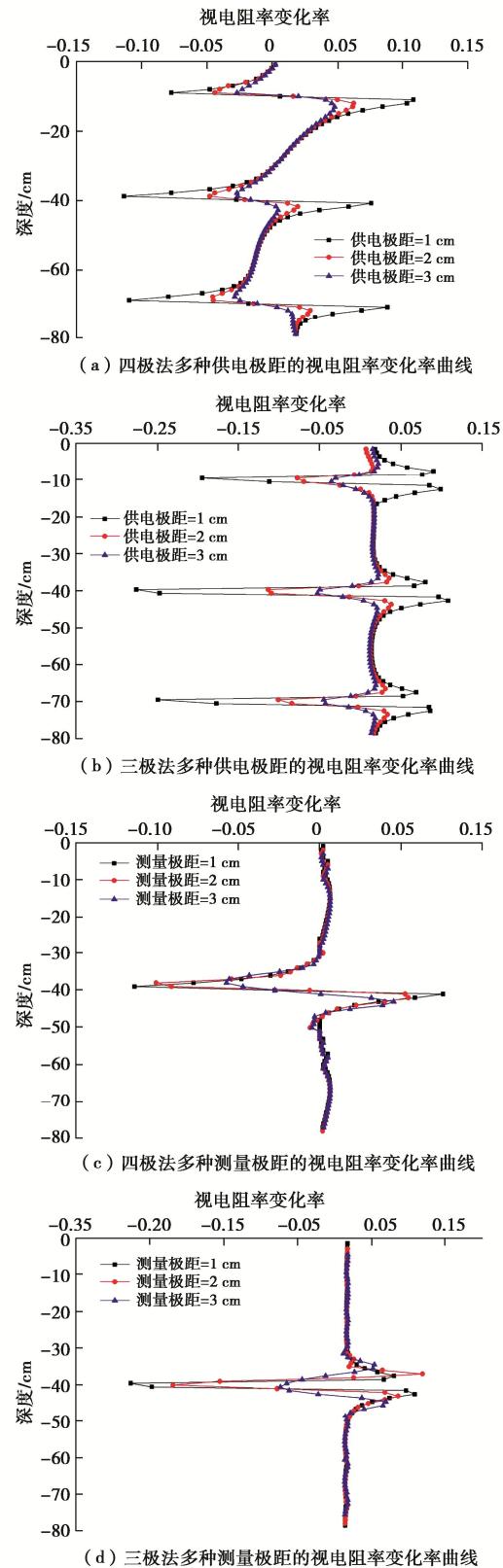


图 9 室内试验视电阻率变化率曲线图

Fig. 9 Curves of apparent resistivity rate of laboratory tests

距大于 2 cm 时, 视电阻率变化率曲线出现误差, 测量精度下降, 与数值模拟得到的规律同样吻合。因此基于室内模型模拟地连墙的渗漏异常工况, 通过跨孔四极法和三极法得到了与数值模拟工况下的相同规律, 验证了规律的可靠性和合理性。

## 4 结 论

为掌握地下连续墙中渗漏异常部位视电阻率变化规律以更好地指导渗漏探测, 本文利用面积离散有限差分法得到了地连墙发生渗漏时跨孔四极法和三极法的视电阻率响应曲线。在此基础上, 为了更加精确、直观地判定渗漏位置, 提出了视电阻率变化率响应曲线, 探讨了供电极距和测量极距对视电阻率变化率响应曲线的影响, 并进一步给出了精确定位渗漏位置的极限供电极距和测量极距, 最终通过室内试验验证了该方法的有效性。

(1) 对于地下连续墙, 跨孔四极法只有在供电极距小于等于 0.5 m 时, 视电阻率曲线才可以精确推断渗漏位置, 三极法只有在供电极距小于等于 1.0 m 时, 视电阻率曲线才可以精确推断渗漏位置。

(2) 相较于视电阻率曲线, 利用视电阻率变化率曲线分析渗漏位置效果更明显。对于跨孔四极法, 当供电极距小于等于 1.0 m 时, 可以精确定位任意深度的渗漏范围, 当供电极距大于 1.0 m 时, 视电阻率变化率曲线在渗漏异常处的畸变状态逐渐消失, 测量精度下降, 当供电极距大于 2.0 m 时, 视电阻率变化率曲线趋于平稳, 不再能够分辨渗漏异常部位; 对于跨孔三极法, 当供电极距小于 1.5 m 时, 可以精确定位任意深度的渗漏, 当供电极距大于 1.5 m 时, 利用视电阻率变化率曲线定位渗漏的精度下降, 但仍有一定的探测效果。

(3) 测量极距对于四极法和三极法的影响规律相似: 当测量极距小于等于 1.0 m 时不会对探测精度造成影响, 当测量极距大于 1.0 m 时, 测量精度开始下降。

(4) 本文对跨孔四极法和三极法在地下连续墙渗漏探测中的应用进行了基础性的研究, 文中结果可为探测渗漏隐患识别问题提供参考。

## 参 考 文 献:

- [1] 徐杨青, 刘国锋, 盛永清. 深基坑嵌岩地下连续墙隔渗效果分析与评价方法研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(10): 2905-2910. (XU Yangqing, LIU Guofeng, SHENG Yongqing. Analysis and evaluation of sealing effect of rock-socketed underground diaphragm in deep foundation pit[J]. Rock and

Soil Mechanics, 2013, **34**(10): 2905-2910. (in Chinese))

- [2] 张思源, 童立元, 朱文骏, 等. 常州地铁车站基坑地下连续墙不同接头型式分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 2): 240-243, 248. (ZHANG Siyuan, TONG Liyuan, ZHU Wenjun, et al. Different mechanical modes of diaphragm wall joints for foundation pit of subway station in Changzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S2): 240-243, 248. (in Chinese))
- [3] SPRUIT R, VAN TOL F, BROERE W, et al. Distributed temperature sensing applied during diaphragm wall construction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(2): 219-233.
- [4] 蒋锋平, 刘国彬. 深基坑地下墙漏水引起地面沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 574-577. (JIANG Fengping, LIU Guobin. Surface subsidence caused by water seeping through diaphragm wall of deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 574-577. (in Chinese))
- [5] 张玉成, 杨光华, 钟志辉, 等. 软土基坑设计若干关键问题探讨及基坑设计实例应用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(11): 2334-2343. (ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, ZHONG Zhihui, et al. Discussion on some key problems in soft soil foundation pit design and application analysis of design examples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(11): 2334-2343. (in Chinese))
- [6] DAILY W, OWEN E. Cross-borehole resistivity tomography[J]. Geophysics, 1991, **56**(8): 1228-1235.
- [7] BING Z, GREENHALGH S A. A synthetic study on crosshole resistivity imaging using different electrode arrays[J]. Exploration Geophysics, 1997, **28**(1/2): 1-5.
- [8] BING Z, GREENHALGH S A. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations[J]. Geophysical Prospecting, 2000, **48**(5): 887-912.
- [9] LEONTARAKIS K, APOSTOLOPOULOS G V. Model Stacking (MOST) technique applied in cross-hole ERT field data for the detection of Thessaloniki ancient walls' depth[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, **93**: 101-113.
- [10] 刘征宇, 李术才, 刘斌, 等. 基于距离加权约束算法的围岩三维电阻率 CT 反演成像研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(4): 652-661. (LIU Zhengyu, LI Shucai, LIU Bin, et al. 3D cross-hole resistivity inversion imaging of surrounding rock based on distance weighting constraint algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(4):

- 652-661. (in Chinese))
- [11] NIE L C, SHEN J F, ZHOU P F, et al. Cross-hole ERT configuration assessment for boulder detection: a full-scale physical model test[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2020, **25**(4): 569-579.
- [12] LIU B, PANG Y H, MAO D Q, et al. A rapid four-dimensional resistivity data inversion method using temporal segmentation[J]. Geophysical Journal International, 2020, **221**(1): 586-602.
- [13] 张再源, 赵永辉, 葛双成. 基于贝叶斯二维反演的地下连续墙隐患电阻率成像[J]. 地球物理学进展, 2017, **32**(4): 1868-1874. (ZHANG Zaiyuan, ZHAO Yonghui, GE Shuangcheng. Electrical resistance tomography for underground diaphragm wall defect based on Bayesian inversion[J]. Progress in Geophysics, 2017, **32**(4): 1868-1874. (in Chinese))
- [14] HE J Z, LIAO S M, LIU M B, et al. Seepage visualization and detection of diaphragm wall leakage with electrical potential method: an experimental investigation[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2022, **19**(5): 1082-1094.
- [15] 周熙襄, 钟本善, 江玉乐. 点源二维电阻率法有限差分法正演计算[J]. 物化探电子计算技术, 1983, **5**(2): 1-9. (ZHOU Xixiang, ZHONG Benshan, JIANG Yule. Forward calculation of point source two-dimensional resistivity method by finite difference method[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1983, **5**(2): 1-9. (in Chinese))
- [16] 张 倩, 王 玲, 江沸波. 电阻率层析成像的二维改进粒子群优化算法反演[J]. 物探与化探, 2015, **39**(5): 1047-1052. (ZHANG Qian, WANG Ling, JIANG Feibo. 2-D Improved particle swarm optimization algorithm for electrical resistance tomography inversion[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, **39**(5): 1047-1052. (in Chinese))
- [17] 王炳辉, 王志华, 姜朋明, 等. 饱和砂土不同孔隙率的电阻率特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(9): 1739-1745. (WANG Binghui, WANG Zhihua, JIANG Pengming, et al. Electrical resistivity characteristics of saturated sand with varied porosities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(9): 1739-1745. (in Chinese))
- [18] 林 杰. 基于电阻率法的黏性土地工程性质评价[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊 2): 685-689. (LIN Jie. Evaluation of cohesive soil ground engineering properties based on resistivity method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S2): 685-689. (in Chinese))
- [19] 张 琪, 刘 涛, 王旭春, 等. 微测井电法在基坑围护防渗检测中可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(10): 2591-2600. (ZHANG Jin, LIU Tao, WANG Xuchun, et al. Feasibility study on micro-well logging method in impervious testing of foundation pit retaining structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(10): 2591-2600. (in Chinese))