

基于电阻率成像的灌浆工程对穿黄隧道的渗漏影响分析

郭涛¹, 蔡跃强¹, 许尚杰²

(1. 山东黄河顺成水利水电工程有限公司, 山东 济南 250032; 2. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250014)

【摘要】穿黄隧道工程下穿黄河大堤时会降低堤防土层的强度, 引发堤身开裂, 危及堤防正常运行, 灌浆技术可有效地解决隧道周围坝体因施工扰动诱发的渗漏隐患。基于电阻率成像技术可对穿黄隧道引起渗漏隐患处理进行检测, 通过切片处理直观反演了灌浆处理结果, 可为采取针对性坝体隐患处理措施提供依据。

【关键词】灌浆工程; 电阻率; 穿黄隧道; 渗漏影响

【中图分类号】TV543

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2025)-11-0038-03

Analysis of the Impact of Grouting Engineering on Leakage of the Yellow River-Crossing Tunnel Based on Electrical Resistivity Tomography

GUO Tao¹, QI Yueqiang¹, XU Shangjie²

(1. Shandong Yellow River Shuncheng Water Resources and Hydropower Co., Ltd., Jinan, Shandong 250032, China;

2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: When the Yellow River-Crossing Tunnel project passes under the Yellow River dyke, it will reduce the strength of the dyke soil layer, cause cracks in the dyke body, and endanger the normal operation of the dyke. Grouting technology can effectively solve the leakage induced by construction disturbance around the tunnel. Based on electrical resistivity tomography (ERT) technology, the treatment of leakage caused by the Yellow River-Crossing Tunnel can be detected. The grouting treatment results are intuitively inverted through slice processing, which can provide a basis for formulating targeted measures to address dyke hidden dangers.

Key words: Grouting engineering; Electrical resistivity; Yellow River-Crossing Tunnel; Leakage impact

随着城市的建设扩容, 海底隧道及穿堤工程层出不穷, 但由于当时建设条件所限, 坝体大多设计标准低、建设质量差, 经几十年的运行, 坝体老化现象十分普遍, 病险非常严重, 盲目施工会引发渗漏、溃堤等隐患事故, 因此, 现阶段工程措施通常采取灌浆进行隐患处理。黄河部分河段为地上河, 不同时段筑坝工艺材料差异性巨大, 坝体结构的多样性, 筑坝材料的非均质性, 荷载类型、组合以及施工方式多样性和随机性, 坝体施工、扩建、加固、运行、管理以及环境对结构和材料参数影响的复杂性等, 使其较一般堤坝工程更加复杂。此外, 黄河坝体原有的渗透路径受到其本身压实度、组分材料均匀性等多种因素作用基本固化平衡, 而隧道施工不可避免地对坝体产生扰动, 使渗漏影响因素发生改变, 后续灌浆处理

措施由于位置信息、注浆量控制等诸多因素导致穿黄带来的渗漏隐患难以根除, 给安全运维带来极大隐患。因此, 如何快速高效地明确隧道等穿堤工程诱发的渗漏隐患, 并判定采取针对性灌浆措施后隐患处理效果, 成为广大科技工作者及施工技术人员亟待解决的问题。此文依托济南市济泺路穿黄隧道工程, 研究高密度电法在灌浆工程中的诊断应用, 为工程措施效果判定提供依据。

1 工程概况

1.1 工程地点

济南市济泺路穿黄隧道工程位于济南市天桥区内, 含隧道(道路隧道和地铁隧道)及市政道

收稿日期: 2025-07-17

作者简介: 郭涛(1984—), 男, 高级工程师

路连接线部分。北岸隧道中心线在涿口基本断面下游约 430 m, 南岸隧道中心线在涿口基本断面下游约 106 m, 平均为 268 m。工程起点位于济涿路与涿安路交叉口, 沿济涿路向北延伸, 以隧道的方式穿过黄河堤坝及黄河河道。隧道工程穿黄线位走向与涿口基本断面夹角约 3° , 穿越左岸大堤桩号为 136+129, 右岸大堤桩号为 29+776。

该工程河段为地上悬河, 两岸有标准化堤防, 下穿隧道对河道及两岸堤防具有一定的风险, 隧道在施工期及运行期会对防洪工程及河道整治工程产生影响, 工程建设有可能会造成沉降, 影响两岸堤防、险工等防洪工程。

在河道管理范围内建设非防洪项目必须符合国家规定的防洪标准和其他技术要求, 维护堤防安全, 保持河势稳定和行洪安全。因此, 根据《济南市济涿路穿黄隧道(道路+地铁)工程防洪评价报告》, 对隧道施工期及运行期所涉及的防洪工程进行补救措施及渗漏监测是非常必要的。

1.2 施工工艺

此次黄河堤防加固南岸相应大堤桩号为 29+576-29+976, 北岸相应大堤桩号为 135+929-136+329, 工程总长度为 800 m。制浆设备选用 ZJ-1000 型搅拌机, 灌浆设备采用 3SNS 高压灌浆泵, 能达到超过最大灌浆压力 1.5 倍的灌浆压力, 按先堤身两边、后中间的三序孔法分序加密。其中 10% 的 I 序孔作为先导孔。先导孔中选用 10% 的孔进行钻孔取样, 以探明堤身情况。灌浆时应先灌上游排孔, 再灌下游排孔, 后灌中游排孔。所有的孔均应复灌, 复灌间隔时间不宜少于 5 d。

钻孔孔径在 25~35 mm 之间, 锥探钻孔的开口位置与孔位误差一般不得大于 10 cm。造孔保持铅直, 孔深偏斜不得大于孔深的 2%, 灌浆孔布置呈梅花型, 采用干法造孔, 锥孔应当天锥, 当天灌。灌浆时, 为防止孔眼搁置时间长、空隙堵塞影响, 采取一次灌满措施保障灌浆效果。

每排每次平均灌浆量, 以孔深计, 每孔控制在 $0.5\sim 1.0\text{ m}^3$, 每孔灌浆次数宜在 5 次以上。灌浆中采用“少灌多复”“先稀后浓”的方法, 以减少渗水和加强堤身土质整体性。灌浆压力初拟 0.06~0.15 MPa, 根据现场施工情况随时调整, 当浆液升至孔口, 经连续复灌 3 次不再流动时, 即可终

灌。每孔灌完时, 将孔内表层稀浆液取出, 扫孔到底, 用含量适中的黏土分层回填振捣。

2 电阻率成像检测

2.1 仪器设备及测线布设

此次现场检测采用重庆奔腾 WGMD-9 超级高密度电法仪, 该系统以 WDA-1、1B 超级数字直流电法仪为测控主机, 可通过选配 WDZJ-4 多路电极转换器、集中式高密度电缆、电极, 实现集中式二维高密度电阻率测量, 也可选配分布式高密度电阻率或激电电缆、电极, 实现分布式二维、三维高密度电阻率测量、分布式二维高密度激电测量。

结合黄河隧道穿堤工程实际情况, 采用了 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的均匀电极网格, 供电和测量电极布设在大坝两侧坡面及其延伸方向 $110\text{ m}\times 145\text{ m}$ 的区域。采用同线和跨线四极梯度方式测量, 供电电压 288 V, 总测区面积约 $7\ 700\text{ m}^2$ 。

测量过程中严格按照规范要求进行观测、记录, 对出现的突变点和异常点进行重复观测、检查观测。此次高密度电法采集数据视电阻率相对均方误差的平均值最大为 2.47%, 均小于 $\pm 5\%$ 。

2.2 注浆检测结果分析

坝体土体的电阻率可有效反映土体含水率的分布情况。根据坝体材料常见电阻率响应特征推断灌浆后坝体含水量, 进而评估灌浆隐患处理情况。

此次灌浆电法检测中, 首先将整个测区的三维高密度电法勘查数据拼接在一起, 采用 64 位三维软件进行反演计算, 得到整个测区的电阻率立体分布图像。再对整个灌浆处理黄河堤坝的电阻率进行横断面切片处理, 按照 5 m 间距切片, 形成视电阻率切片图, 如图 1~图 12 所示。

对反演成像数据进行分析, 结果表明: 电阻

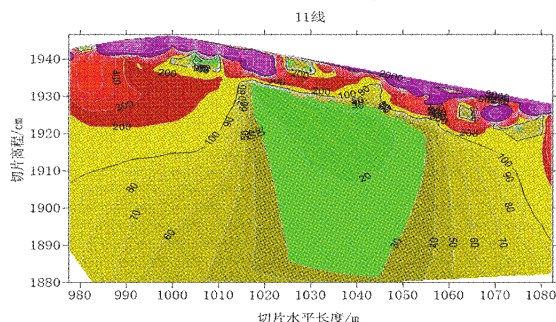


图 1 11 线反演切片图

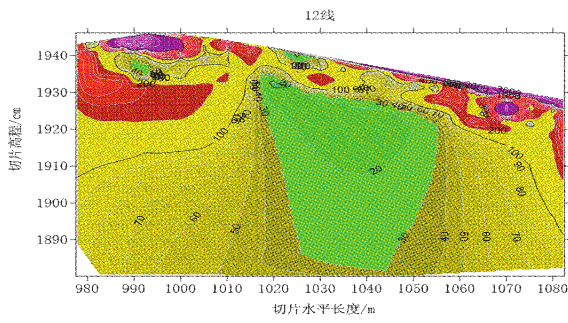


图 2 12线反演切片图

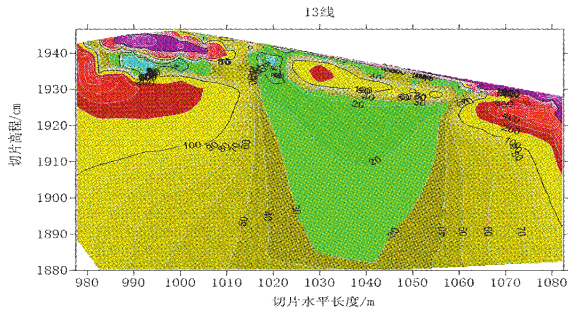


图 3 13线反演切片图

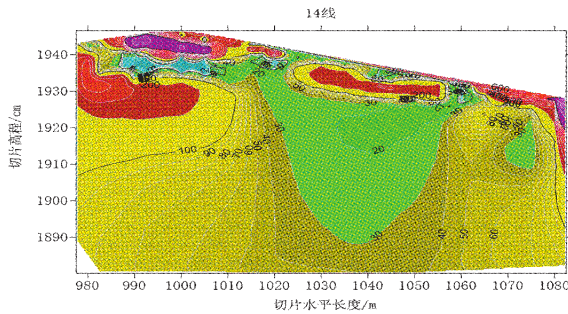


图 4 14线反演切片图

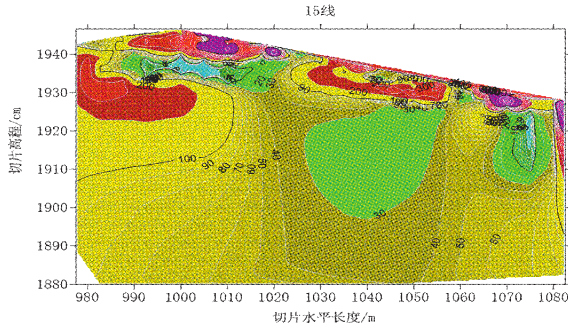


图 5 15线反演切片图

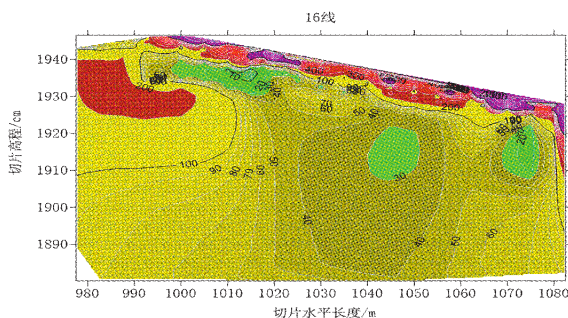


图 6 16线反演切片图

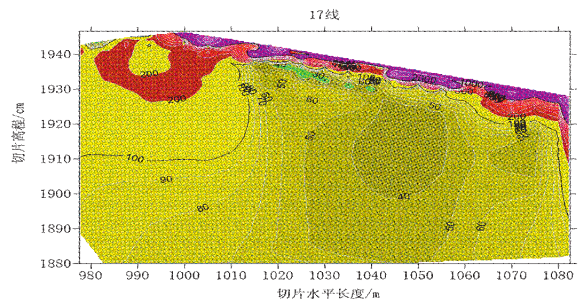


图 7 17线反演切片图

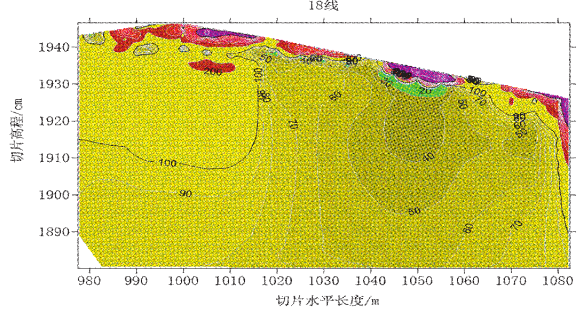


图 8 18线反演切片图

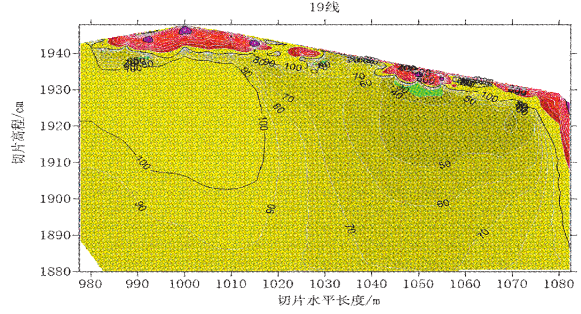


图 9 19线反演切片图

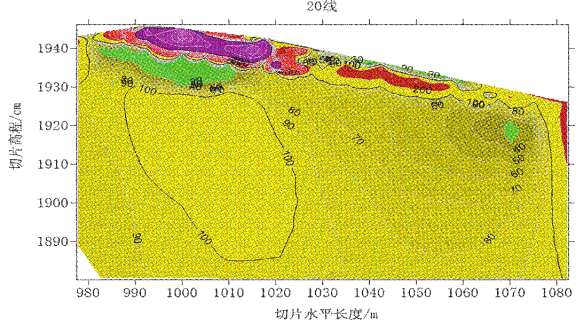


图 10 20线反演切片图

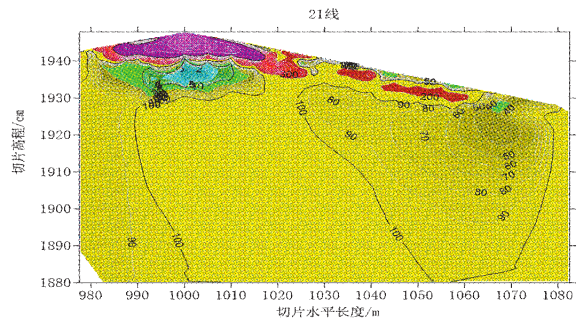


图 11 21线反演切片图

率 $>100\Omega\cdot m$ 的高阻区基本反映了灌浆填充料、

较干燥的黏土、防渗墙及其附近(下转第 60 页)