



基于探地雷达法的圆筒重力式码头 回填区病害探测

叶青¹, 王宾², 杨俊²

(1. 广西北部湾国际港务集团有限公司, 广西南宁 530021; 2. 广西交通集团有限公司, 广西南宁 530007)

摘要: 圆筒重力式码头后方回填区漏砂引起的空洞对码头的安全运营有着重大影响, 探地雷达法用于病害探测具有独特的优势。本文结合圆筒重力式码头工程特点, 基于探地雷达工作原理, 通过 matlab 编程计算对工程模型进行正演模拟, 并结合工程实例对水泥板、吹填砂 2 种介质漏砂异常区以及水泥板、吹填砂、碎石 3 种介质漏砂异常区进行探测, 通过分析电磁波响应特征并对病害异常区域进行圈定, 并采用钻孔及钻孔电视成像、地震映像法验证了探地雷达探测效果。实际应用表明探地雷达法可有效用于圆筒重力式码头后方回填区漏砂引起的病害异常区域圈定, 研究成果可为同类项目的病害探测及处治提供借鉴。

关键词: 探地雷达; 重力式码头; 回填区病害; matlab 正演模拟

中图分类号: U 656.1+11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0086-07

Disease detection in backfill area of cylinder gravity wharf based on ground penetrating radar method

YE Qing¹, WANG Bin², YANG Jun²

(1. Guangxi Beibu Gulf International Port Group Co., Ltd., Nanning 530021, China;

2. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: The void caused by sand leakage in the backfill area behind a cylindrical gravity wharf has a great influence on the safe operation of the wharf. The ground penetrating radar (GPR) method has unique advantages in disease detection. On the basis of the characteristics of cylindrical gravity wharf engineering and the working principle of GPR, this paper performs forward modeling of the engineering model by programming calculations on matlab. Then, it uses engineering examples to detect the abnormal areas of sand leakage with two media, i.e., cement slabs and hydraulic fill sand, and those of sand leakage with three media, i.e., cement slabs, hydraulic fill sand, and gravel. Moreover, the study analyzes the characteristics of the electromagnetic response to delineate abnormal disease areas and verifies the detection effect of GPR with borehole and borehole TV imaging and seismic imaging methods. Practical application shows that GPR can be effectively used for the delineation of abnormal disease areas caused by sand leakage in the backfill area of the cylindrical gravity wharf. The research results can provide a reference for disease detection and treatment of similar projects.

Keywords: ground penetrating radar (GPR); gravity wharf; backfill area disease; matlab forward modeling

自法国首次提出圆筒重力式码头以来, 因其具有施工简捷、造价低、适应性强等优点, 受到广泛关注和应用^[1]。圆筒重力式码头后方回填区

作为起重机运行轨道铺设地及堆场所在地, 其稳定性对码头施工作业安全至关重要。因漏砂引起的空洞、不密实及面板脱空等病害严重威胁着码

收稿日期: 2022-02-15

作者简介: 叶青(1967—), 男, 高级工程师, 从事船闸和水电站枢纽工程建设及运营管理工作。

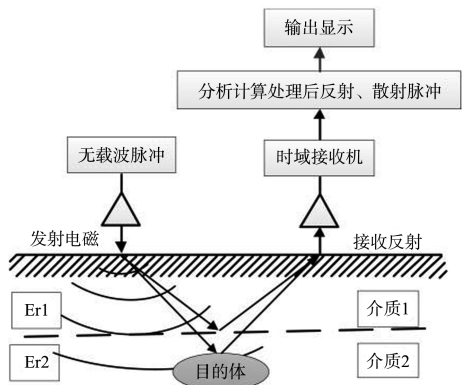
头施工作业安全^[2]。针对圆筒重力式码头回填区的质量检测, 吴友仁等^[3]进行了码头结构现场调查, 对筒体周围和基底土体物理力学性质及基床冲刷情况进行全面检测, 但缺乏快速、准确定位回填区空洞缺陷的方法; 郭玉彬^[4]应用探地雷达快速、全面检测遮帘式板桩码头后方陆域地基淘蚀区, 但缺乏进一步的开挖验证。因此, 针对码头回填区的病害探测问题, 有必要探索快速、准确、全面的检测方法。

探地雷达法进行地球物理勘探的一种无损探测技术, 具有分辨率高、成果解释可靠、操作简便和自动化程度高等特点, 广泛应用于公路、岩土和考古工程探测等^[5]。本文基于探地雷达法的优势和工作特点, 将其应用于码头后方回填区漏砂空洞探测, 以保障码头运营安全。

1 探地雷达工作原理

介电常数 ϵ 和电导率 μ 是电磁波传播的两大电性影响因素, 分别影响电磁波的传播速度和探测深度^[6]。不同的地下介质具有不同的电学特性。探地雷达法可用于探明地下结构的分层, 其原理是由天线定向地下发射电磁波, 在介质介电常数改变的地方会发生折射与反射, 通过记录反射波便能确定各个结构层的交界位置, 运用该方法可

以探测地下结构病害的位置及其发育程度, 继而分析地质情况^[7]。探地雷达工作原理见图 1。



注: Er1、Er2 分别代表介质 1、介质 2。

图 1 探地雷达工作原理

探地雷达对介电常数差异明显的地质体具有较高的辨识能力, 因此, 用于辨识码头后方回填区填砂介质和空洞等介电常数差异明显的介质具有一定可行性。

2 正演

2.1 工程概况

钦州港某圆筒重力式码头结构见图 2, 其后方回填区场地表层为人行道块砖, 厚度 15~20 cm, 场地采用中粗砂回填, 局部出现沉降甚至存在明显可见的漏砂空洞, 见图 3。

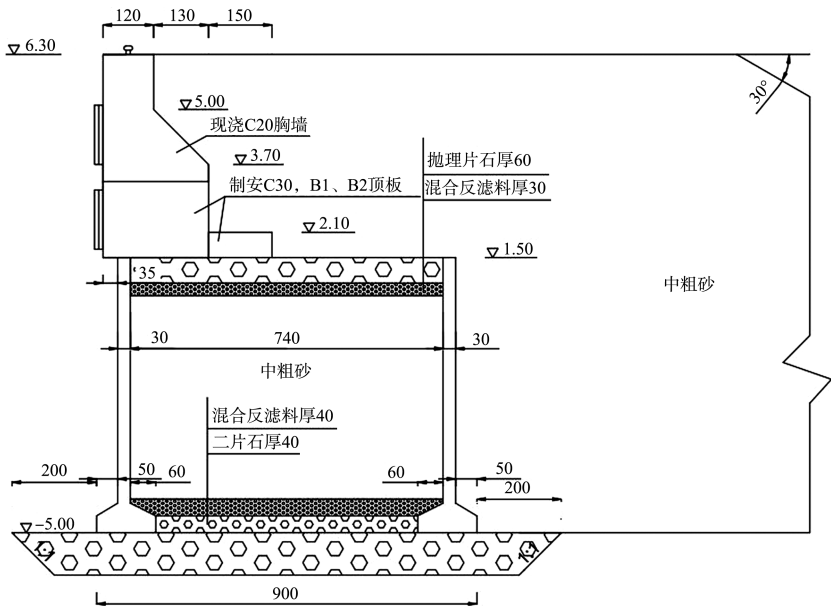


图 2 圆筒重力式码头结构剖面 (单位: m)



图 3 漏砂空洞

2.2 数值模拟

建立模型模拟数据是探地雷达法解译的重要步骤。根据目标探测区实际情况，构建了 2 种二维介质模型，见图 4。

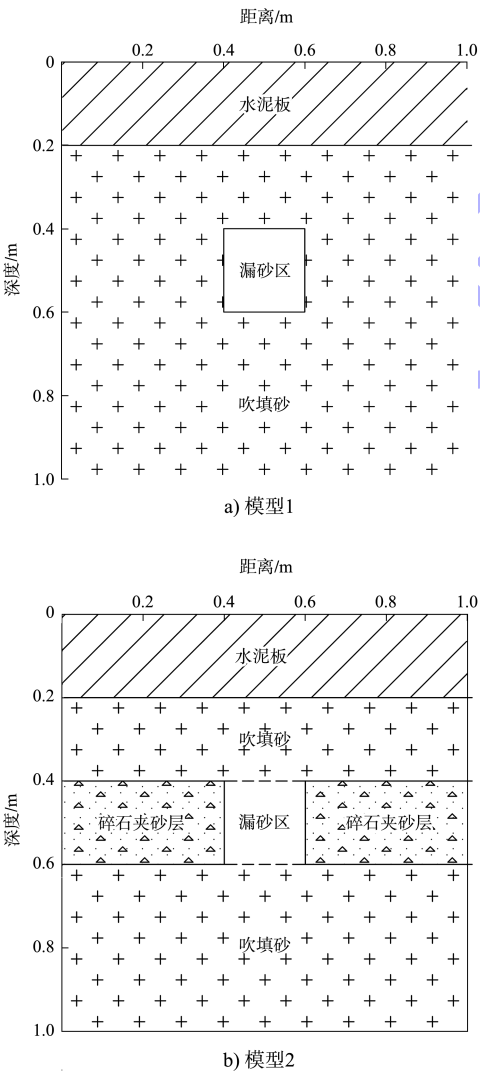


图 4 正演模型

砂、漏砂区、碎石等共同组成，为保持模型与实际探测的一致性，计算采用中心频率 400 MHz、采样点数 512 个。根据李大心^[8]与姜洪亮等^[9]的研究成果，各结构层介质相对介电常数及电磁波传播速度设置见表 1。利用 matlab 正演计算所得探地雷达合成影像见图 5。

表 1 介质相对介电常数与电磁波传播速度

介质	相对介电常数 ϵ_r	速度 $v/(m \cdot ns^{-1})$
水泥板	6.4	0.12
吹填砂	19.0	0.07
空气	1.0	0.30
碎石	6.0	0.11

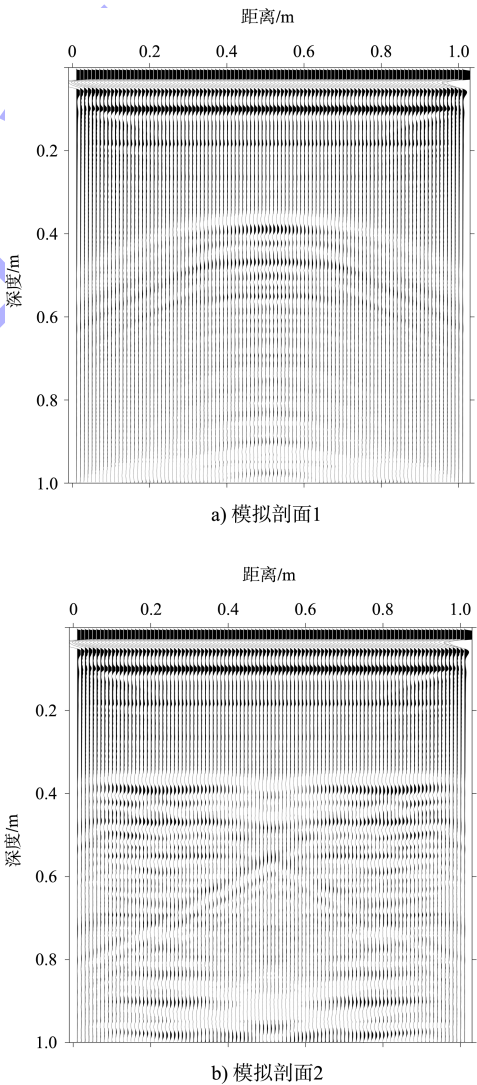


图 5 正演计算

图 5 计算结果显示，对于电磁波衰减较快、背景介质相对介电常数较大、地质条件复杂的码头后方回填区，利用 400 MHz 天线探地雷达对其

模型长度和深度均为 1.0 m，由水泥板、吹填

进行探测, 雷达图像能清楚地反映每个目标的现状。图 5a) 是水泥板-吹填砂双介质正演模拟剖面: 波幅强且同相轴连续是各结构面的特征, 双曲线反射是漏砂区空洞特征, 多次强反射信号存在于漏砂区下方; 图 5b) 是水泥板-吹填砂-碎石三介质正演模拟剖面: 波幅强且同相轴连续是各结构面的特征, 结构面错段处波形相应错段, 双曲线反射是漏砂区空洞特征, 多次强反射信号同时存在于漏砂区与碎石层下方。模型模拟结果表明, 采用 400 MHz 天线探地雷达进行码头后方回填区内

吹砂填海区域路基病害探测是可行的。

3 现场检测与验证

3.1 数据采集与处理

为有效检测码头泊位后方回填区场地, 需预先在检测区域布置好测线, 测线布置应充分考虑码头结构, 布置在回填砂上方, 避开轨道等金属物体, 测线间距不宜大于预测漏砂区直径。用地面喷漆标记桩号, 以便确定异常区域位置。各码头泊位测线布置见图 6。

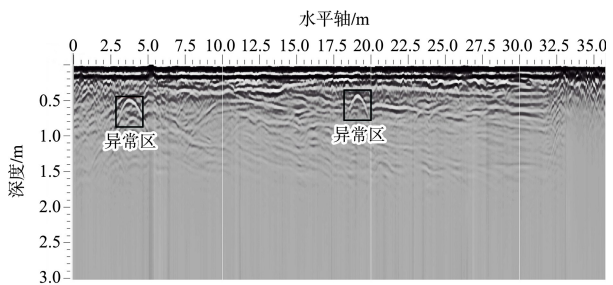


图 6 探地雷达测线布置 (单位: m)

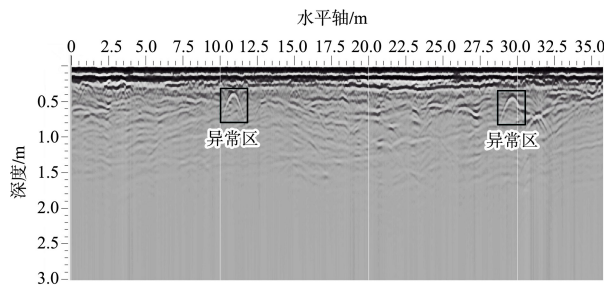
探测采用美国劳雷公司生产的 SIR-4000 型探地雷达, 整套系统由雷达主机、天线、信号线缆 3 部分组成, 仪器主要技术指标如下: 扫描率 400 道/s, 发射率 800 kHz, 采样点数 256~16 384 个; 发射频率 400 MHz。根据段毅等^[10]的研究成果进行数据处理。

代表性检测点见图 7。图 7a) 为 1#泊位测线 3 探地雷达剖面数据, 水平轴 3.0~4.0 m、深度 0.5 m 范围内、水平轴 18.0~19.0 m 深度 0.5 m 范围内存在明显的弧形异常区。图 7b)、c) 分别为 2#泊位测线 3、4 的探地雷达剖面数据, 从两条测线剖面数据中可明显看出存在 2 个地层反射, 局部存在 3 层反射信号, 两者均在水平轴 10.0、30.0 m、深度 0.5 m 位置存在弧形信号, 表明异常区具有一定的连续性。众异常区所呈现的波形错段、双曲线波形特征更接近于正演模拟剖面 5b),

推测由于漏砂造成了碎石混砂层的缺失。



a) 1#泊位测线3



b) 2#泊位测线3

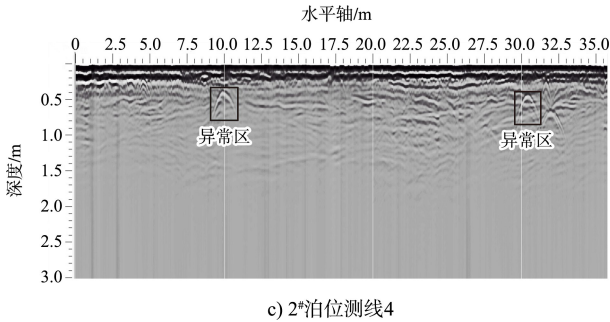


图 7 探地雷达剖面数据

3.2 验证

3.2.1 验证方法

针对上文探地雷达指出的异常区，采用钻孔及钻孔电视成像、地震映像法进行验证性检测。钻孔是最为直观的验证手段；地震映像是以地下不均匀介质的地震波传播速度差异变化为基础的勘探方法^[11]。钻孔及钻孔电视成像法先用金刚钻头钻破地表混凝土砖，再用抽砂筒进一步钻进，然后采用钻孔电视采集钻孔彩照。地震映像法采用锤击砖块的激震方式。钻孔位置选在图 7 所示探地雷达数据异常区正中心，距中心检测孔 0.5 m 或 1.0 m 前、左、右位置处各布置 1 个加密孔，见图 8；地震映像布线原则与探地雷达测线布孔点重合，见图 9。根据王兆宁^[12]的研究成果进行数据处理。



图 8 钻孔加密布置



图 9 地震映像现场布线

3.2.2 验证结果

钻孔电视成像在钻孔结束后进行，由于塌孔较快，仅能在 1.0 m 深度范围采集成像，钻孔电视成像结果见图 10。

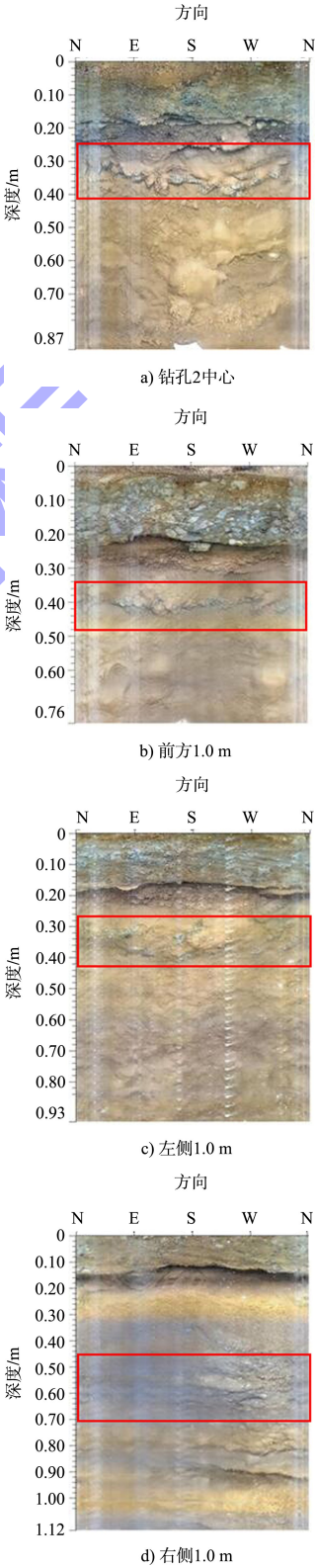


图 10 钻孔电视成像

图 10a)~d) 为 1[#]泊位钻孔电视成像成果, 其中图 10a) 为钻孔 2 中心孔成像, 从图中可以看出, 0~0.20 m 为混凝土砖块, 0.30~0.40 m 为含有碎石的砂层, 0.40~0.87 m 为砂层; 图 10b)~d) 分别为距钻孔 2 中心孔前方、左侧、右侧 1.0 m 处的成像图, 均可以明显看到含有碎石的砂层下降 0.10 m。从钻孔钻进情况和钻孔电视成像成果推测探地雷达异常区与现场碎石层的层位变化存在一定的联系。

地震映像布置测线起始点位于 2[#]泊位测线 3 钻孔 4, 终点位于 1[#]泊位测线 3 钻孔 2, 全长共 25 m, 获得的地震映像剖面数据及其加密剖面数据见图 11、12。

从图 11 地震映像波形剖面数据同相轴可看出有 4 层反射信号, 根据钻孔电视成像图可以明确得到第 1 层同相轴为初至波 (10 ms), 第 2 层为砖块与砂层界面 (15 ms), 第 3 层为含碎石砂层界面 (20 ms), 最后一层极可能为含水砂层 (40 ms)。在水平轴 20 m (A 区) 和 23~25 m 范围 (B 区) 波形的同相轴明显错动, A 区向上错动, B 区向上拱起, 结合钻孔电视成像结果与钻机钻进情况, 推测此现象均与含碎石砂层的埋深有关。

为了进一步验证含碎石砂层的缺失或埋深特点, 对 2 号钻孔 A、B 区进行加密观测, 见图 12。从图 12a) 地震映像波形加密剖面数据同相轴可看出有 4 层反射信号, 根据钻孔电视成像图可以明确得到第 1 层同相轴为初至波 (15 ms), 第 2 层为砖块与砂层界面 (18 ms), 第 3 层为含碎石砂层界面 (23 ms), 最后一层极可能为含水砂层 (45 ms)。在水平轴 30~60 cm 波形的同相轴明显缺失, 结合钻孔电视成像结果与钻机钻进情况, 推测此现象均与含碎石砂层的缺失有关。

从图 12b) 地震映像波形加密剖面数据同相轴可看出有 4 层反射信号, 根据钻孔电视成像图可以明确得到第 1 层同相轴为初至波 (10 ms), 第 2 层为砖块与砂层界面 (18 ms), 第 3 层为含碎石砂层界面 (23 ms), 最后一层极可能为含水砂层 (45 ms)。在水平轴 30~40 cm 波形的同相轴明显缺失, 结合钻孔电视成像结果与钻机钻进情况, 推测此现象均与含碎石砂层的缺失有关。

钻孔电视成像和地震映像法的结果表明: 雷达异常区源自含碎石层的缺失, 该现象与漏砂存在一定的联系。

3.2.3 验证小结

在探地雷达异常区分别采用钻孔及钻孔电视、地震映像法进行验证, 结果吻合, 表明探地雷达法用于圆筒重力式码头后方回填区漏砂探测是可行的。钻孔及钻孔电视直观反映了雷达异常区中心的垂直地层分布情况和含碎石砂层的缺失情况; 地震映像法显示了地层错动。两者在本次验证性检测中起到了良好的辅助作用, 体现出探地雷达

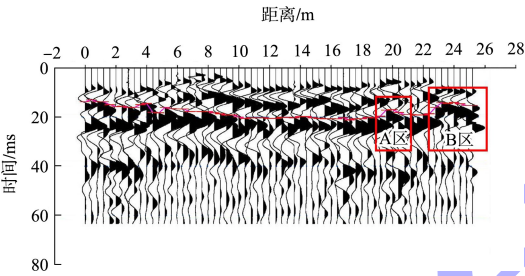
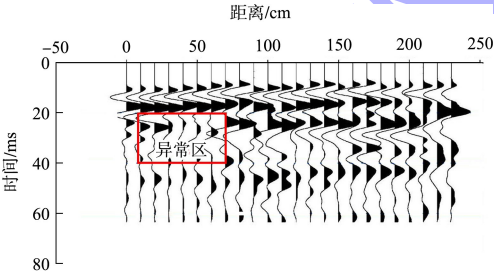
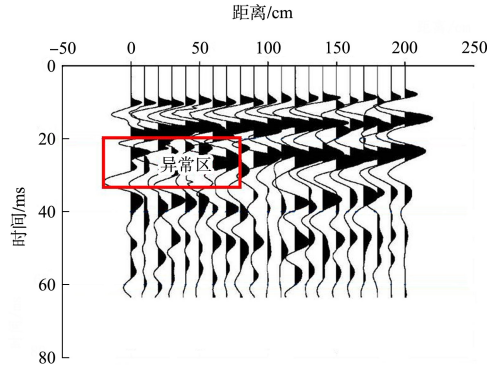


图 11 地震映像剖面



a) A区



b) B区

图 12 加密测线地震映像剖面

法效率高、分辨率高、异常特征明显的优点，但同时具有易受电磁干扰、吸收衰减后探测距离较小的缺点。探地雷达法适用于与周围电性差异明显的目标体探测。

4 结 论

- 1) 正演模拟良好地展现了雷达信号在漏砂区的传播规律，依据正演模拟图像特征可以提高雷达图像解译的准确性。
- 2) 中频地面耦合屏蔽天线用于圆筒重力式码头后方回填区漏砂探测是可行的。
- 3) 钻孔及钻孔电视对场地虽有一定程度的破坏，但作为最直接、较直观的探测方法，在验证探地雷达结果时可给出定性评价。
- 4) 地震映像法在局部异常区域检测方面具有巨大优势，可直观显示探地雷达异常区域纵向范围，用于验证探地雷达结果。
- 5) 本文给出了确定浅部漏砂区位置的方法，但漏砂往往是由更深处的反滤层、土工织物以及基床抛石缺陷引起的，如何提高探测深度、查明漏砂通道尚需进一步研究。

参考文献：

[1] 段爱华, 刘庆茶, 曾健. 钢筋混凝土大圆筒的内力分析与应用[J]. 中国水运(下半月), 2011, 11(4): 208-209.

[2] 王成福, 李敬达, 毛海峰. 大圆筒重力式码头防漏砂结

构探讨[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(9): 58-61.

[3] 吴友仁, 赵娟, 陈文敏, 等. 典型圆筒码头结构安全性检测评估研究[J]. 海洋工程, 2013, 31(4): 95-99.

[4] 郭玉彬. 地质雷达在板桩码头后方回填砂地基病害检测中的应用[J]. 工程质量, 2017, 35(11): 62-64.

[5] 覃谭, 赵永辉, 林国聪, 等. 探地雷达在上林湖越窑遗址水下考古中的应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(3): 624-630.

[6] 蒋建国, 刘程, 陈媛, 等. 地质雷达正演模拟及在断层富水带超前地质预报的应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(11): 2801-2808.

[7] 王成青, 孔纲强, 吴跃东, 等. 既有公路路基工程检测方法 with 工程实例分析[J]. 水利水电科技进步, 2016, 36(2): 69-73.

[8] 李大心. 探地雷达的方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.

[9] 姜洪亮, 杨庭伟, 卢超波, 等. 钦州保税港区吹填陆域路面塌陷探测研究与成因分析[J]. 矿产与地质, 2018, 32(3): 570-576.

[10] 段毅, 许献磊. 地质雷达超前探测在常村煤矿的应用研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(8): 150-153.

[11] 吴教兵, 黎峻良, 江兰, 等. 综合物探方法在广西罗城县活动断裂鉴定中的应用[J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 346-354.

[12] 王兆宁. 地震映像法在铁路隧道隧底岩溶探测中的应用[J]. 铁道建筑, 2018, 58(6): 80-82.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 85 页)

参考文献：

[1] 黄侨, 张树仁, 苗栓明. 桥梁体外索加固体系的力学分析[J]. 东北公路, 1994(1): 60-66.

[2] 王宗林, 王彤, 张树仁. 体外预应力混凝土简支梁的极限强度分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(1): 114-118.

[3] 黄侨, 张树仁, 苗栓明. 桥梁预应力体外索加固设计方法[J]. 中国公路学报. 1993(1): 47-54.

[4] 黄侨, 张树仁. 公路钢筋混凝土简支梁桥的体外预应力加固技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

[5] 张俊, 赵泽俊, 邓朗妮, 等. 预应力碳纤维板加固混凝土

梁抗弯承载力设计计算方法[J]. 桂林理工大学学报, 2011, 30(1): 73-76.

[6] 刘杰. 预应力碳纤维板加固大比例 T 梁抗弯性能试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.

[7] 余舒宇. 表层嵌贴预应力 CFRP 板条加固 RC 梁抗弯性能影响因素研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.

[8] KESSE G, LEES J M. Experimental behavior of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP shear straps[J]. Journal of composites for construction, 2007, 11(4): 375-383.

(本文编辑 王璵)