

运营高铁框架涵（桥）路桥过渡段病害整治 施工难点与工程实践

李文俊

（中国铁路上海局集团有限公司，上海 200071）

摘要：以沪宁城际铁路丹阳地区路基病害整治工程为背景，介绍了运营高速铁路框架涵（桥）路桥过渡段地基加固施工的难点和特点。遵循“隔离病害区域，加固病害路基”的治理思路，通过运营高铁框架涵（桥）路桥过渡段路基病害成套整治技术，采用低净空的地基加固施工技术、水泥注浆加固技术、基槽开挖支护技术和全自动变形监测等技术措施，顺利完成了地基加固和排水管道更换的目标。施工前后地质雷达和高密度面波物探检测显示，“隔离+加固”的治理方案实现了对疏松地基土的精准加固，管道机器人检测显示，施工后管道内水流无泥沙夹杂，场地水土流失情况明显改善。

关键词：低净空；高速铁路；路桥过渡段；地基加固；粉砂土；水泥注浆；无损检测

中图分类号：TU472

文献标识码：A

文章编号：2096-7195(2023)02-0159-08

Construction difficulties and engineering practice of disease treatment in road-bridge transition section of an operating high speed railway

LI Wen-jun

(China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: Based on a case of foundation diseases treatment in Danyang area of the Shanghai-Nanjing Intercity Railway, the difficulties and characteristics of the foundation improvement construction in the road-bridge transition section of the high-speed railway in operation are introduced. During the construction process, the strategy of ‘isolating diseased areas and improving diseased subgrades’ was followed. A complete set of treatment technology for subgrade disease in the transition section of the road-bridge transition section of the high-speed rail frame culvert (bridge) was proposed. The goal of foundation improvement and drainage pipeline replacement has been achieved through technical measures such as low clearance foundation improving construction technology, cement grouting technology, foundation trench excavation support technology, and fully automatic deformation monitoring. The results of ground penetrating radar (GPR) and high-density Rayleigh-wave exploration detection before and after construction show that the treatment scheme of ‘isolation and improvement’ has well improved the loose foundation soil. The results of pipe inspection robot detection shows that there is no sediment inclusion in the water flow after construction, and the soil erosion situation has been significantly improved.

Key words: low clearance; high speed railway; road-bridge transition section; foundation improvement; silty sand; cement grouting; nondestructive testing

0 引言

我国的高速铁路经过多年的运营和发展，路基病害逐渐凸显。在软土分布较为广泛的东部沿海地区新建高速铁路，常采用桩板（网）结构复合地基

应对深厚软土层可能引起的地基沉降问题，保证上部无砟轨道结构的平顺性和稳定性^[1-3]。经现场调研发现，高速铁路采用桩板（网）复合结构的深厚软土及粉砂土地基桩间土容易流失，从而出现地基沉降、路基陷穴、空洞等严重病害，主要分布在框架

收稿日期：2022-11-11

基金项目：中国铁路上海局集团有限公司科研项目（2022059）。

作者简介：李文俊（1990—），男，江苏南京人，工程师，主要从事高速铁路路基设备安全管理、养护维修等工作。E-mail: yxayu2017@163.com。

<https://www.academax.com/doi/10.3785/j.issn.2096-7195.2023.02.010>

涵（桥）路基结合部及桥隧、涵洞间的短路基等特殊地段，严重威胁高铁行车安全^[4]。

由于邻近既有运营高速铁路，施工环境复杂、施工扰动变形控制标准较高，目前通常采用施工快捷的水泥注浆工艺作为应急抢险措施对该类病害进行处理。但由于路基表观空洞、陷穴下附近的地基土密实情况不明确，浆液注入后存在流动范围大、不可控等问题，导致处理效果一般，治理后区域病害仍重复发生，不得不频繁维修。

为消除高铁特殊地段的路基病害，保障列车运行的安全，采用“隔离+加固”的治理思路对路基病害区域进行地基加固，以增强病害处理的耐久性。以某高速铁路路基加固与排水管涵更换工程为例，分析邻近运营高铁框架涵（桥）路桥过渡段加固工程的难点，提出相应的方案和技术措施，为类似的病害治理项目提供方案借鉴和解决思路。

1 工程概况

沪宁城际铁路路基区段采用 CRTSI 型板式无砟轨道，经多年运营及立交桥抽排水作用，该高速铁路丹阳地区框架涵（桥）路桥过渡段出现路基整体下沉现象，路堤边坡出现陷穴，该区段路基的地基主要为粉砂土地基，结合线路附近出现土体塌陷、下穿立交挡墙沉降和变形开裂等病害，该区段存在影响路基稳定性的安全隐患。场地周边情况及病害情况见图 1。

经现场踏勘结合工程建设资料分析，该区段病害主要是由框架涵（桥）附近泵房长期抽排水加上排水管道渗漏导致的路基桩网结构桩间土流失造成的。为保证路基的稳定性，防止泵站抽水引起水土流失等病害的继续发展，确保铁路行车安全，遵循“隔离+加固+换管”的治理原则，拟采用低净空搅拌桩技术将病害区域路基与其他区域路基隔离，然后在运营高铁线路路基边坡外对病害区域进行路基注浆加固，最后对排水管进行基槽支护开挖和换管。



图 1 场地周边环境图

Fig. 1 Surrounding environment of the construction site

2 工程难点及特点

2.1 不利地质条件

根据勘察资料揭露，场地地貌类型属长江冲积平原，场地地下水位高，埋深 1.0~2.4 m，雨水较多，场地地层自上而下分别为粉土、粉砂、粉质黏土。路基 A、B 填料下为：第①层为粉土，褐色、褐黄色，稍密饱和，层厚 2.8~5.5 m；第②₁层为粉砂，深灰色、灰黑色，松散饱和。经判别①层粉土和②₁层粉砂均局部液化，层厚 3.1~5.9 m。由于这两层粉砂、粉土层较厚且广泛分布，含水量高，流动性强，容易引起地基变形，加之地下水位较高，泵房多年抽排水导致路基和挡墙沉降、排水管渗漏和抽水井泥沙淤积。

第②层为粉砂，深灰色、灰黑色，稍密饱和，为地基处理水泥粉煤灰碎石桩（CFG 桩）桩底标高所在土层。区间段 CFG 桩桩径为 0.5 m，桩长为 11.0~14.0 m，桩间距为 1.6~1.8 m，按正方形布置，桩顶设直径为 1.0 m 扩大桩头，桩顶上铺设 0.6 m 厚碎石垫层，垫层内铺设两层土工格栅，土工格栅的极限抗拉强度不小于 100 kN/m。典型地质剖面图见图 2。

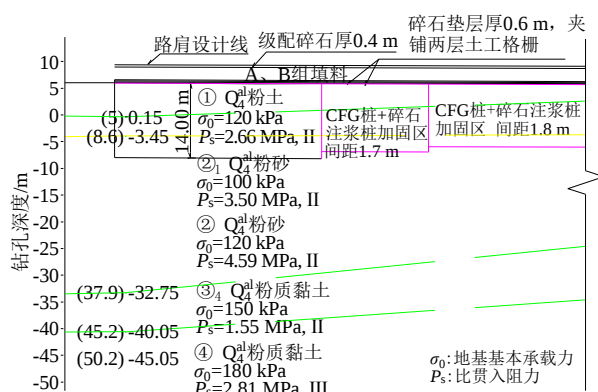


图 2 工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological profile

2.2 低净空狭小施工环境

铁路运营线附近施工风险大，施工面临许多复杂工况^[5-7]，如高压线下、隧道内部、桥涵下部、路基边坡下等，受施工净空和施工安全距离的限制，桩基的施工需要低净空施工方案和设备加以实现。本项目工点位于高铁框架涵（桥）路桥过渡段，与既有有砟铁路相邻，下行顺线路方向栅栏网外为既有铁路的自闭贯通线，净空高度约为 9 m，自闭贯通线覆盖栅栏网外整个施工区域以及部分基槽支护区域。施工场地狭小，基槽支护施工场地不足

100 m², 且内有排水泵房、铁路栅栏网、自闭贯通线电杆、过铁地下通信线等保护对象。

2.3 环境保护要求等级高

地下排水管涵连接框架涵(桥)洞口排水井与泵房深井, 对其开挖基槽势必会对泵房的稳定性产生影响。拟开挖基槽的灌注桩围护距离泵房最近约2 m, 距离涵洞口钢筋混凝土八字墙与高铁栅栏网最近约2 m。根据现场调查, 排水管底相对道路埋深约1.8~5.1 m, 相对挡墙后耕地覆土埋深约为4.1~7.4 m(计算基槽开挖深度)。现场施工场地狭小, 基槽窄而长, 且开挖深度较深, 需采取高标准保护措施以最大程度地减小基槽开挖对桥涵八字墙、栅栏网和泵房稳定性的影响。

高铁邻近营业线施工要最大限度地减少扰动, 严禁大型施工设备侵入限界, 降低施工对列车运营的影响。高铁设备管理相关单位对邻近运营高铁施工地基变形和控制要求比较严格, 要求施工期间路基变形监测点累计沉降位移量小于2 mm。

2.4 分部分项工程和工艺多

为防止地下管道渗漏持续加剧场地的水土流失情况, 本工程的主要目的有两项: 地基加固和排水管更换。为达到施工目的, 保障施工安全, 综合考虑地质条件、场地周边环境及高铁施工环境保护要求, 为尽量遏制粉砂土的流失, 防止路基土体持续塌陷, 采用搅拌桩对施工区域与非施工区域进行隔离止水; 为减小注浆过程对路基的扰动, 采用常规的水泥注浆加固地基; 针对粉砂、粉土层流动性强、变形大的特点, 采用灌注桩和钢板桩进行管道基坑围护。

整治方案涉及的分部工程有地基加固工程(包括隔离搅拌桩、水泥注浆); 基坑支护工程(包括低净空灌注桩、钢板桩、搅拌桩止水帷幕); 排水管道工程; 边坡挡墙工程等。场地施工空间狭小, 施工环境限制较多, 对施工组织设计、场地部署和场内交通组织、工序安排和不同工艺作业面搭接管理要求高。应合理安排工序, 衔接作业, 对空闲场地加以利用, 尽可能地增加场地综合利用率, 从而达到方便施工、满足现实工作的基本需要。

3 病害整治系统解决方案

为科学精准地整治路基病害, 保证高速铁路的安全平稳运行, 根据现场踏勘情况和工程资料, 遵循病害原因分析-病害区域无损检测定位-施工环

境与工程难点分析-整治方案和工艺比选设计-施工组织设计与实施-施工后无损检测评价的全流程病害预防和整治恢复技术(见图3), 提供系统的解决方案。其中关键的技术有:

(1) 路基病害无损检测与工后评价技术: 施工前, 通过线上调查确定路基病害区间, 采用可检测出路基陷穴空洞病害及路基土体密实度的检测技术, 例如地质雷达及高密度面波等方法相结合, 定位病害位置, 评价病害地段路基健康状态, 提出合适的病害整治方案, 施工后, 采用同样的无损检测技术评价整治效果。

(2) 邻铁地基加固施工环境分析与技术比选: 对邻近运营高铁路基病害进行整治, 作业段往往存在铁路基础设施和设备净空限制(路桥过渡段作业、桥涵内作业、铁路沿线自闭贯通线等), 对受限的施工环境进行施工可行性分析, 采用适用于邻铁地基加固的低净空施工技术和设备。

(3) 路基病害隔离与加固技术: a) 病害路基隔离, 采用低净空灌注桩、搅拌桩、钢板桩等技术, 将病害区间路基与正常路基进行隔离, 减小施工对正常地段路基的扰动; b) 地基加固, 采用低净空搅拌桩、树根桩等技术, 对高铁路桥过渡段深厚软土及粉砂土地基进行围护加固整治, 保证地基稳定性, 保障高铁运行安全。

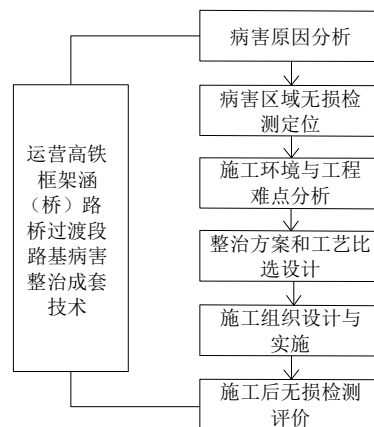


图3 病害整治系统方案流程图

Fig. 3 Flow chart of systematic disease treatment scheme

4 施工重点及技术措施

4.1 低净空下搅拌隔离桩施工

针对该场地粉砂土地层以及邻近运营高铁栅栏网和既有线自闭贯通线净空限制的施工条件, 在进行路基边坡空洞填充和地基注浆加固前, 采用低净空搅拌桩施工技术进行路基加固区域的隔离施工, 防止浆液在非病害区域扩散流动, 保证病害治

为 10 m, 坡高约为 1 m; 换管完成后, 重新砌筑恢复挡墙。

(6) 管道承插口管顺水流方向, 承口(既有混凝土管)逆水流方向。基槽回填时, 自上而下分别回填原状土(掺入 6% 砂浆)、级配砂砾或符合要求的原状土、中粗砂。槽底铺垫一层砂砾或碎石, 厚度为 150 mm, 碎石粒径为 5~40 mm, 上面再铺砂垫层(中、粗砂), 厚度为 100 mm。



图7 履带式低净空灌注桩机

Fig. 7 Low clearance cast-in-place pile driver

4.4 全自动路基变形监测

为保证整个施工过程中各种工艺的安全可靠, 主要对路基变形进行监测。施工前在下行线上加固区域内沿线混凝土硬化层上设置棱镜监测点, 间距为 10 m, 监测范围两端各延长 40 m, 按 20 m 间距设置棱镜监测点, 监测注浆作业中路基变形, 监测

点布置见图 8。

(1) 测量方式: 采用全自动全站仪机器人进行路基变形监测。

(2) 测量频率: 作业时每天测量 4 次, 其中施工前测量 1 次, 施工过程中测量 2 次, 作业结束后测量 1 次。

(3) 测量控制报警值: 根据相关管理文件要求, 施工期间混凝土支承层累计竖向沉降应小于 2 mm。若监测数据大于 2 mm, 应立即停止作业, 分析原因, 调整注浆参数。

施工全过程采用全自动全站仪机器人进行监测, 施工期间各监测点沉降曲线见图 9(根据每一天施工期间测量的累计变形平均值绘制), 其中累计沉降最大处为监测点 J8, 为 -1.87 mm, 小于规定的控制指标(2 mm)。在注浆加固、基槽支护、基槽开挖等风险较大阶段, 监测点累计沉降无显著变化, 可见各施工阶段对线路路基影响较小, 整体变形较为可控。

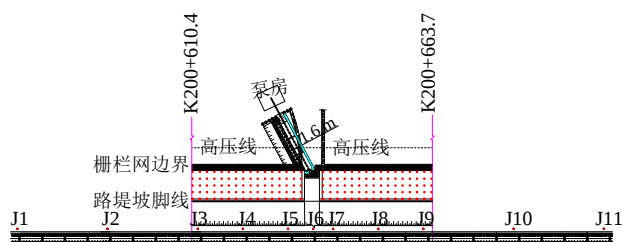


图8 沉降监测点布置图

Fig. 8 Layout of settlement monitoring points

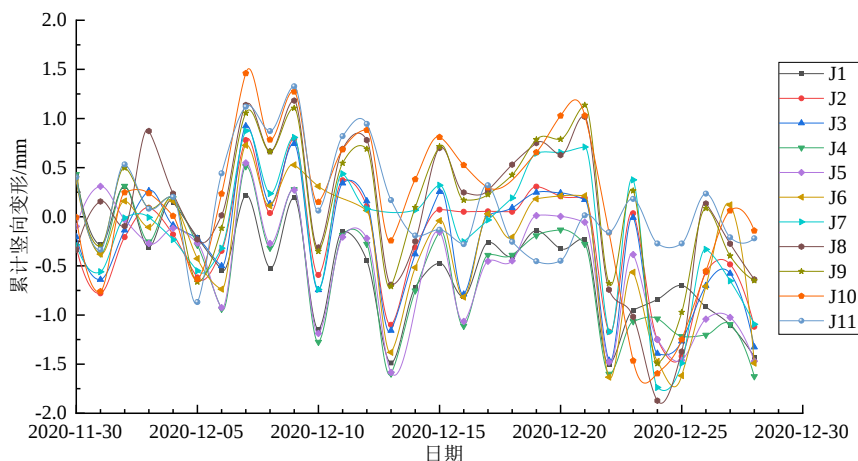


图9 累计沉降监测变形曲线

Fig. 9 Monitored cumulative settlement curves

5 实施效果

本次高速铁路桩网结构框架涵(桥)路桥过渡段病害整治施工历时 30 d, 安全、高效地完成了地基加固、泵房排水管开挖更换两项主要目标, 总体

整治效果符合预期。为检验加固效果, 注浆加固施工前后采用地质雷达和高密度面波无损检测技术对施工区间地基进行检测, 换管完成后, 利用管道 CCTV 检测机器人对排水管内进行检测, 确保施工后管道无渗漏, 防止后期由管道渗漏产生的水土流

失病害发生。

5.1 无损物探检测

整治区间布置地质雷达测线共 8 条（上行和下行路肩各 3 条，线间 2 条），单测线长 95 m，总长 760 m；布置高密度面波测线共 3 条（上行、下行路肩和线间各 1 条），单测线长 95 m，总长 190 m。基于勘察资料，结合《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）^[8] 和《道路塌陷隐患雷达检测技术导则》（RISN—TG024—2016）^[9]，本项目缺陷判定依据如表 1 所示。

整治施工前，选取下行路肩测线结果（距离施工区最近）进行分析发现：高密度面波法剖面图中（见图 10）有两处疏松区域，分别位于测线长 15～

24 m、深度 0.8～2.2 m 处和测线长 79～88 m、深度 1.1～2.0 m 处，这两处剪切波速度在 80～140 m/s 之间，判断为疏松区域。地质雷达剖面图中（图 11），测线长 15～24 m 处，深度 0.7 m 以下范围内，电磁波反射信号强，有不规则的双曲线波形特征，三振相明显，其下部仍有强反射面，时程差较大，判断为疏松区域。

整治施工后，选取下行路肩测线结果进行对比分析发现：高密度面波剖面图中（见图 10），原两处疏松区域剪切波速恢复至 200～250 m/s，且分布均匀。地质雷达剖面图中（见图 11），原疏松区域电磁波反射信号减弱，波形均匀。证明“隔离+加固”方案实现了对疏松地基土体的精准加固。

表 1 无损检测缺陷判定标准
Table 1 Standard for defect detection using non-destructive testing

检测方法	判定标准	缺陷	病害等级
地质雷达法	电磁波反射信号幅值较弱，波形均匀，甚至无界面反射	密实	—
	电磁波反射信号较强，一般以低频为主，多数伴随震荡现象	富水	I级
	电磁波反射信号较强，同相轴不连续，错断，一般呈区域状分布	疏松	II级
	电磁波反射信号较强，多呈近似水平带状分布，通长有多次反射信号	脱空	III级
	电磁波反射信号强，通长有规则或者不规则的双曲线波形特征，三振相明显，其下部仍有强反射面，时程差较大	空洞	IV级
高密度面波法	剪切波速度分布均匀，无“起伏状”区域，波速值符合当地土层相应深度的剪切波速值范围	密实	—
	剪切波速度介于 90～150 m/s，土体密度较低，孔隙率较大，呈局部区域分布状态，界面有起伏	疏松	II级
	剪切波速度小于 90 m/s，呈现圆弧状外形、局部分布，界面起伏大	空洞	IV级

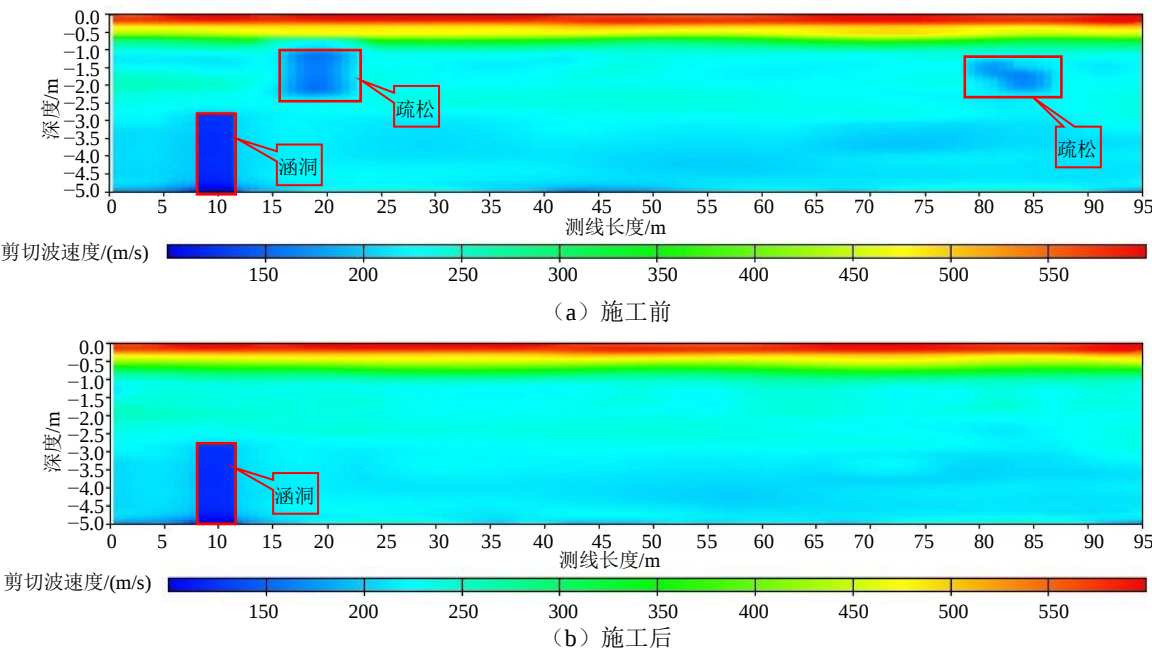


图 10 施工前后测线 1 高密度面波成果图

Fig. 10 Results of high-density surface wave of survey line 1 before and after construction

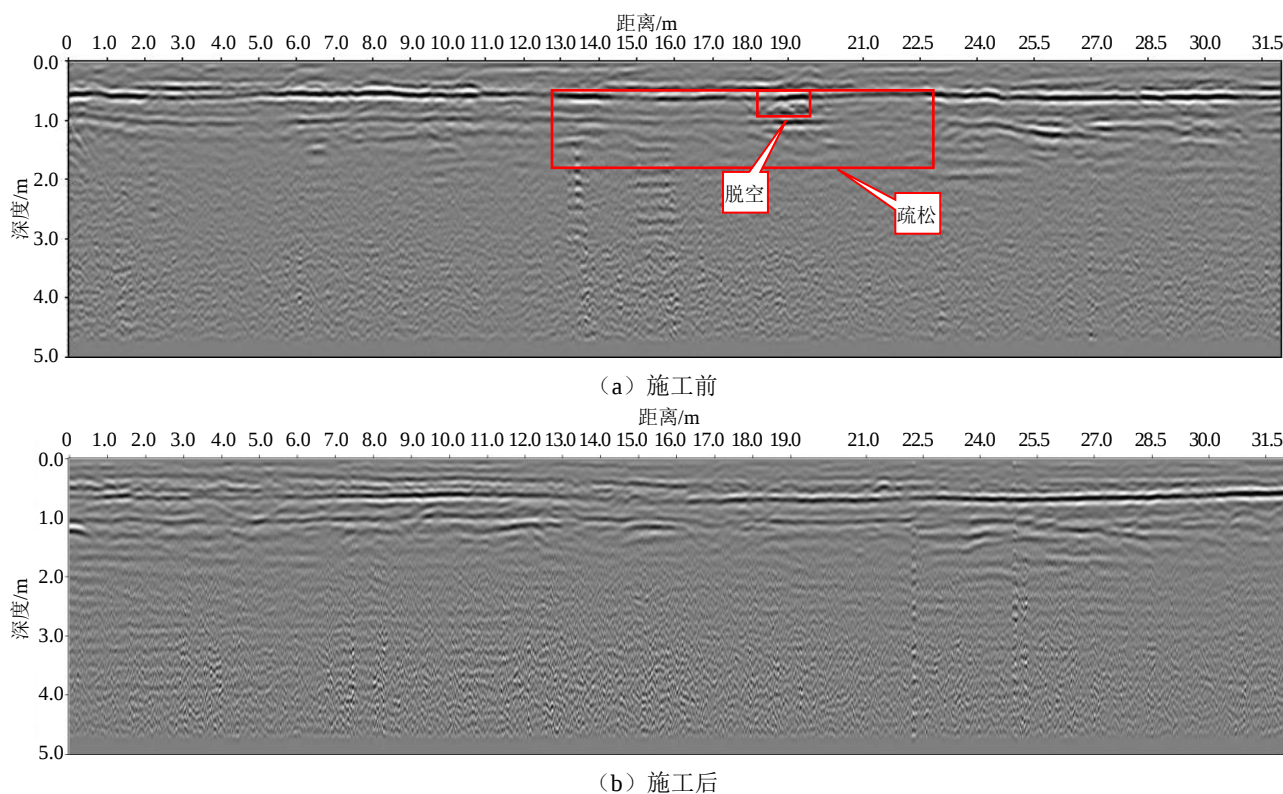


图 11 施工前后测线 1 地质雷达成果图

Fig. 11 Geological radar result of survey line 1 before and after construction

5.2 管道机器人检测

采用管道CCTV检测机器人对新换排水管道进行结构安全性检测,及时发现排水管道的破裂、错口、脱节等结构性缺陷,以便配合施工进行缺陷治理^[10-11]。

管道CCTV检测机器人具有对排水管道内部快速、全方位视频检测和诊断的特点,主体为搭载360°高清摄像头的轮式管道爬行小车,结合操作和图像平台进行管道内视频拍摄探查。施工前管道内泥沙淤积、多处渗漏,说明水土流失情况严重。施工后检测结果显示,管道内水流未夹带泥沙,管道整体完整,无缺口、渗漏,水土流失病害得到成功治理。管道机器人检测图见图12。



图 12 管道机器人视频检测

Fig. 12 Video detection using pipeline robot

6 结 论

以沪宁城际铁路丹阳地区路基病害整治工程为例,整治总体方案遵循病害原因分析-病害区域无损检测定位-施工环境与工程难点分析-整治方案和工艺比选设计-施工组织设计与实施-施工后无损检测评价的流程,对粉砂土地区高速铁路路桥过渡段地基水土流失病害整治难点问题和施工特点进行分析探讨;结合现场实际施工情况,优化了低净空狭小施工环境下施工方案及专项技术措施;经过地基无损物探检测和管道机器人检测验证,采用“隔离病害区域,加固病害路基”的治理思路,可精准有效治理框架涵(桥)路桥过渡段路基水土流失病害,为类似工程提供借鉴。

参考文献

- [1] 周凯. 桩板结构在高速铁路深厚软土地层中的应用[J]. 铁道勘察, 2019, 45(6): 36-40.
ZHOU Kai. Application of pile slab structure in deep soft soil layer of high speed railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2019, 45(6): 36-40.
- [2] 雷长顺. 桩板结构在松软土地区高速铁路路基中的应用分析[J]. 铁道勘察, 2017, 43(1): 45-49.

- LEI Chang-shun. Application of the pile-plank structure of high-speed railway subgrade in soft soil area[J]. Railway Investigation and Surveying, 2017, 43(1): 45-49.
- [3] 赵新益, 李时亮, 汪莹鹤. 铁路软土地基路基沉降控制技术[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(5): 18-22.
- ZHAO Xin-yi, LI Shi-liang, WANG Ying-he. Settlement control technology of railway subgrade on soft soil foundation[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(5): 18-22.
- [4] 邓逆涛. 高速铁路桩网结构路基沉降原因分析[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.
- DENG Ni-tao. Analysis on the settlement reasons of high-speed railway subgrade with pile-net structure[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2018.
- [5] 宗维凯. 邻近营业线施工高铁桥梁监测方法探讨[J]. 上海铁道科技, 2016(4): 121-122.
- ZONG Wei-kai. Discussion on monitoring method of high speed railway bridge construction[J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2016(4): 121-122.
- [6] 富志根, 时洪斌, 毛忠良. 接杆搅拌桩在低净空条件下铁路软土地基加固中的应用研究[J]. 路基工程, 2020(2): 114-118.
- FU Zhi-gen, SHI Hong-bin, MAO Zhong-liang. Study on application of extension-rod mixing pile in railway soft soil foundation reinforcement under low clearance condition[J]. Subgrade Engineering, 2020(2): 114-118.
- [7] 梁芝梁. 铁路跨线桥有限净空施工方案优选方法研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
- LIANG Zhi-liang. Study on selecting methods about limited clearance railway bridge across the existing line construction program[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2014.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2016 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010[S]. 2016 Edition. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.
- [9] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 道路塌陷隐患雷达检测技术导则: RISN—TG024—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Research Institute of Standards and Norms Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical Guideline for Radar Detection of Road Collapse Vulnerabilities: RISN—TG024—2016[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.
- [10] 蔡辉. 排水管道检测机器人的设计及应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- CAI Hui. The design and application of pipeline inspection robot[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [11] 毛柳伟, 王国庆. 小口径管道自适应内检测机器人研究[J]. 机械设计与制造, 2021(10): 229-232.
- MAO Liu-wei, WANG Guo-qing. The study on self-adaptive internal testing robot for small diameter pipeline[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(10): 229-232.