

地铁隧道基底湿陷性黄土地层处置方案优化分析*

潘红伟¹ 吴友川² 段宇昕² 张玉伟^{2,3} 何十美⁴

(1. 中铁北京工程局集团第一工程有限公司, 710100, 西安; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 710055, 西安;

3. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 710055, 西安; 4. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 300300, 天津)

摘要 [目的] 为了研究处置湿陷性黄土地层的优化措施, 需要对黄土浸水湿陷后隧道结构的变形特性进行研究。

[方法] 介绍了湿陷性黄土隧道地基处置方法; 以穿越湿陷性黄土地层的盾构地铁隧道为例, 采用三轴搅拌桩法作为地基处置方法, 采用 MIDAS GTS 软件建立数值计算模型, 分析在不同处置深度及处置宽度情况下, 黄土地基浸水湿陷变形后对地铁隧道结构各部位的竖向位移和衬砌结构内力的影响。结合隧道结构各部位竖向位移和衬砌结构内力的变化趋势、施工经济性及相关要求对处置方案进行优化。在 3 种处置宽度和 7 种处置深度条件下, 分析隧道拱腰、拱顶、拱底处竖向位移、弯矩、主应力的变化规律, 给出最合适的处置建议。[结果及结论] 处置深度越大, 隧道结构各部位的竖向位移越小, 衬砌结构内力越大; 处置宽度越大, 隧道结构各部位的竖向位移与衬砌结构内力越小。本案例工程中, 最佳处置深度为 7 m, 最佳处置宽度为 16 m。

关键词 地铁; 隧道; 湿陷性黄土地层; 处置方案

中图分类号 U231; TU94

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.07.044

Optimization Analysis of Treatment Scheme for Metro Tunnel Base Waterlogged Collapsible Loess Formation

PAN Hongwei¹, WU Youchuan², DUAN Yuxin², ZHANG Yuwei^{2,3}, HE Shimei⁴

(1. China Railway Beijing Engineering Group First Engineering Co., Ltd., 710100, Xi'an, China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architectural Technology, 710055, Xi'an, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, 710055, Xi'an, China; 4. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., 300300, Tianjin, China)

Abstract [Objective] To study the optimization measures for treating waterlogged collapsible loess stratum, it is necessary to investigate the deformation characteristics of tunnel structures after loess collapse by waterlogging. [Method] The foundation treatment for the waterlogged collapsible loess tunnels is introduced. Taking a shield metro tunnel crossing through waterlogged collapsible loess stratum as example, the method of three-axis mixing pile is adopted as the foundation treatment method. By establishing a numerical calculation model using MIDAS GTS software, the influence of waterlogged deformation of loess foundation on the vertical displacement of various metro tunnel structure parts and the internal force of lining structure is analyzed under different treatment depths and treatment widths. The treatment scheme is optimized based on the changing trends of tunnel parts vertical displacement and lining structure internal force, the construction economy and relevant requirements. Under conditions of three treatment widths and seven treatment depths, variation laws of vertical displacement, bending moment, and principal stress at the tunnel arch waist, vault, and invert are analyzed for the most suitable treatment recommendation. [Result & Conclusion] The greater the treatment depth, the smaller the vertical displacement of tunnel structure parts and the larger the lining structure internal force; the larger the treatment width, the smaller the vertical displacement and the internal force mentioned above. In this case study engineering, the optimal treatment depth is 7 m, and the optimal treatment width is 16 m.

Key words metro; tunnel; waterlogged collapsible loess stratum; treatment scheme

在我国西北部地区分布着大量的黄土地层, 该地区的地铁隧道建设不可避免地会穿越大厚度黄土地层。由于地下水位波动、水管破裂和地面水下渗等原因, 极易造成隧道周围黄土地层的浸水湿陷。大孔隙性和水敏性是黄土地层的显著特征, 其会导致黄土在浸水湿陷后的强度大幅下降并产生显著变形, 严重威胁地铁隧道的施工及运营安全^[1]。为了解决在湿陷性黄土地层出现的这种工程问题, 需对黄土浸水湿陷后隧道结构的变形特性进行研究。文献[2]结合试验研究, 深入分析了黄

* 陕西省自然科学基金计划项目(2019JQ762); 陕西省教育厅专项项目(20JK0709)

土地层湿陷变形对隧道衬砌结构产生的影响。文献[3]在非饱和土力学框架下,重点研究了黄土的增湿变形行为。文献[4-6]在研究黄土湿陷变形特性、水分运移规律的基础上,分析了隧道衬砌结构内部的力学响应机制。文献[7]研究了不同埋深下,黄土各项物理力学指标和湿陷等级的分布规律。文献[8]结合实际工程,分析了地铁隧道结构基底压力、隧道土压力的变化规律。

已有研究结果表明,黄土的增湿变形会对隧道结构造成极大的影响,因此如何治理黄土地层的湿陷性显得极为重要且关键。为了研究处置湿陷性黄土地层的优化措施,本文通过数值模拟方法分析不同黄土地层的处置情况,研究了在不同处置深度和处置宽度组合下,盾构开挖地铁隧道衬砌内力的变化情况。在数值模拟结果的基础上,提出了合适的隧道基底黄土湿陷处置方案。本文研究可为相关工程项目的施工与维护提供安全保障及参考案例。

1 湿陷性黄土隧道地基处置方法

1.1 地基处置原则

通过采取一定的措施可以消除黄土的湿陷性,这需结合施工场地的湿陷情况及上部建筑物的类型,同时考虑现场设备、施工条件、经济成本、材料供应等各方面因素综合确定。结合类似工程的处置措施及相关规范要求,提出湿陷性黄土地层的处置原则。湿陷性黄土地基处置判别流程示意图如图1所示。

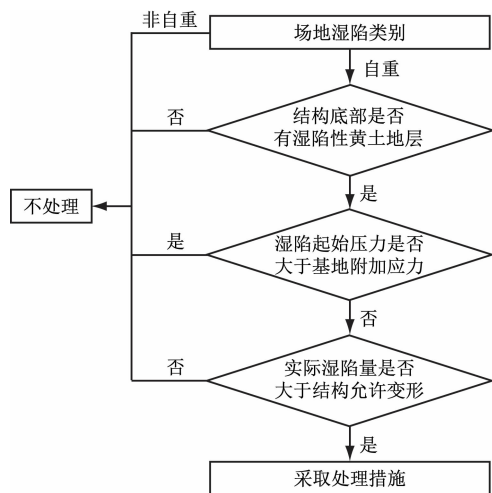


图1 湿陷性黄土地基处置判别流程示意图

Fig.1 Diagram of the treatment judgment process for waterlogged collapsible loess stratum

1.2 隧道基底处置建议方法

隧道与传统的地面建筑有显著差别,而传统的地基处置方法应用于隧道工程也具有较大的局限性。对于明挖施工的隧道,其仅受到施工场地的影响,故可根据现场实际情况,从常用的地基处置方法中选择经济适用的方法直接应用。对于暗挖隧道及盾构隧道,由于其受到施工场地、施工难度、振动限制、经济成本等因素的限制,地基处置方法选择的局限性也更大。在现场施工时,应结合现场实际情况及各种处置措施的特点,综合考虑后,选择最合适的处置方法。对于盾构隧道,常用地基处置方法的适用条件及其优缺点如表1所示。

表1 盾构隧道常用地基处置方法适用条件及其优缺点
Tab.1 Applicable conditions and advantage/disadvantages of commonly used shield tunnel foundation treatment methods

地基处置方法	适用条件	优点	缺点
注浆法	适用于黄土地层、软土地层等	灵活多变,适用范围广,处置效果较好	注浆过程不可控,成本较高
旋喷加固法	适用于一般湿陷性黄土地层、软土地层等	桩体布置灵活,适用范围广,加固强度高	造价高,可能影响地下管线
三轴搅拌桩法	适用于一般湿陷性黄土地层、软土地层等	加固效果良好,施工进度快,造价合理	场地要求高,设备大,可能影响地下管线

盾构隧道由于其施工的特殊性,因此可以选择的地基处置方法相对来说较为有限。由表1可知:三轴搅拌桩法具有适用性强、效果好、施工进度快、造价合理等优点。因此,本文选择三轴搅拌桩法对湿陷性黄土隧道地基处置方法进行研究。

2 盾构地铁隧道数值模拟方案

2.1 数值计算模型

本文以穿越湿陷性黄土地铁隧道为例,采用MIDAS GTS软件建立数值计算模型,对盾构地铁隧道基底湿陷性黄土地基处置方案进行研究。根据已有研究经验,本文选择摩尔-库伦模型作为湿陷性黄土本构模型,并结合密模修正法来模拟黄土浸水后的湿陷性。该方法通过修正系数来折减土体的密度和弹性模量,以实现模拟黄土浸水湿陷变形的行为,本文的折减系数取为0.3。浸水饱和导致黄土土体密度增大,其重度也随之增大。假定隧道

基底厚为 9 m 的湿陷性黄土全幅浸水湿陷,数值模拟模型通过对隧道周围的岩土体进行区域划分来模拟不同的浸水工况。通过改变网格属性的边界条件来模拟黄土浸水湿陷的影响。

为了便于模拟计算,将采用三轴搅拌桩处置后的湿陷性黄土地基看作均匀的复合地基,仅考虑其压缩模量的变化。桩间距一般取为 2 m。复合地基的弹性模量 E_{sp} 可以表示为:

$$E_{sp} = mE_p + (1 - m)E_s \quad (1)$$

式中:

E_p ——桩体弹性模量;

E_s ——地基土压缩模量;

m ——面积置换率。

所建立的数值计算模型尺寸为 54 m(长)×18 m(宽)×30 m(高)。模型的侧边界施加水平位移约束;底部约束其水平与竖向位移;顶部则不施加约束,为自由面。该盾构地铁隧道埋深为 15 m,洞径为 6 m,衬砌设计为 30 cm 厚的 C50 混凝土管片。建模时,隧道围岩采用各向同性的摩尔-库伦弹塑性模型,通过 3D 实体单元模拟;隧道衬砌采用不考虑材料非线性的各向同性弹性模型,通过 2D 板单元模拟。建立不同处置深度和处置宽度的数值计算模型,如图 2 所示。数值模拟计算参数如表 2 所示。

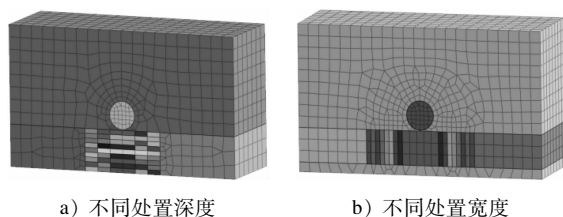


图 2 数值计算模型示意图

Fig. 2 Diagram of numerical calculation model

表 2 数值模拟计算参数

Tab. 2 Numerical simulation calculation parameters

名称	弹性模量/ MPa	泊松比	重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
黄土	25.20	0.38	15.20	30.66	28.2
湿陷黄土	7.56	0.38	17.65	30.66	28.2
衬砌管片	35 000.00	0.20	25.00	—	—
复合地基	35.15	0.38	17.65	30.66	28.2

2.2 数值模拟方案

地基处置深度和处置宽度是影响黄土隧道基底湿陷性最终处置效果的两个最主要因素。在不同处置深度和处置宽度条件下,对地铁隧道结构各部位的竖向位移和衬砌结构内力进行分析,研究这

两种影响因素对地基处置效果的影响。

将处置宽度设为 1 倍洞径(6 m)、2 倍洞径(12 m)和 3 倍洞径(18 m),分别分析 3 种处置宽度下,不同处置深度(1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m、7 m、8 m 和 9 m)下,隧道拱腰、拱顶、拱底处的竖向位移和内力(弯矩和主应力)的变化情况。通过分析上述 3 种不同工况下的数值模拟结果,评价不同处置方案的处置效果,提出本工程最合适的处置深度建议。

在确定最合适的处置深度情况下,当处置宽度为 8 m、10 m、12 m、14 m、16 m、18 m、20 m、22 m 和 24 m 时,分析各隧道结构竖向位移及衬砌结构内力的变化情况,并根据分析结果提出最合适的处置宽度建议。

3 数值模拟结果及分析

3.1 考虑处置宽度的地基处置效果分析

假定地铁隧道基底下部 9 m 深度范围内全部为湿陷性黄土且均发生了浸水湿陷,对隧道基底的湿陷性黄土进行处置。当处置宽度为 6 m、12 m、18 m 时,不同处置深度下,隧道结构各部位的竖向位移如图 3 所示。当处置宽度为 6 m、12 m、18 m 时,不同处置深度的衬砌结构内力如图 4 所示。

由图 3 a)可知:随着地基处置深度的增加,隧道结构各部位处的竖向位移均逐渐减小,且变化较为均匀,说明地基处置效果明显;隧道结构各部位中,拱顶处的竖向位移最大,拱底处的竖向位移最小,左、右两侧拱腰处的竖向位移相同,隧道结构整体各处的竖向位移相差不大。由此可知,地基的处置深度越大,湿陷性黄土地层浸水湿陷后对隧道结构的影响越小。

由图 3 b)可知:随着地基处置深度的增加,隧道各结构部位处的竖向位移均逐渐减小,且各部位之间位移的差值也有所减小;当处置深度为 7 m 时,竖向位移已达到一个较小值;随着处置深度的增加,隧道各结构部位处的竖向位移减小速率不断降低。这就说明当处置深度达到 7 m 时,继续增加处置深度对处置效果的提升已趋于减弱。

由图 3 c)可知:当处置宽度为 18 m 时,隧道各结构部位处的竖向位移变化规律与图 3 b)类似。因此,建议本工程案例的处置深度取为 7 m。

由图 4 可知:随着处置深度的增加,隧道衬砌结构的正、负弯矩极值和主应力极值均有所增加;最大正弯矩极值的增加幅度最大,其余极值的增加幅

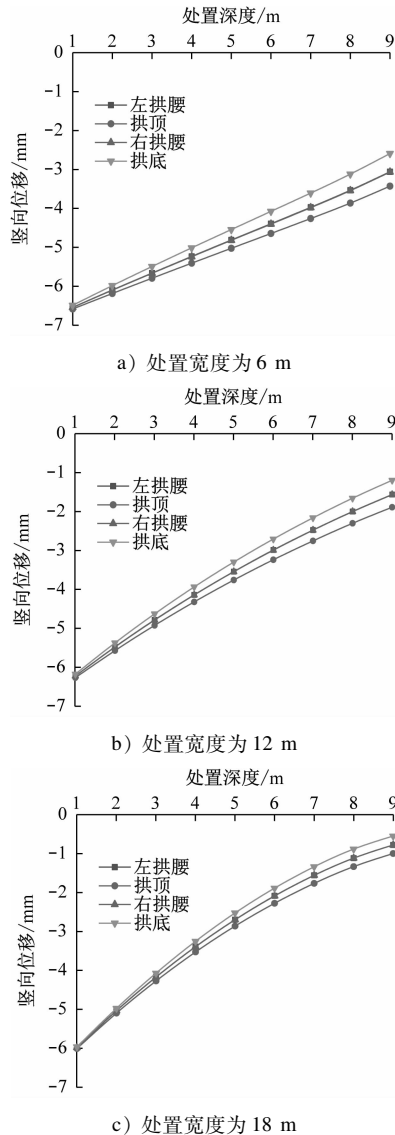


图3 3种处置宽度下不同处置深度的隧道结构各部位竖向位移

Fig. 3 Vertical displacement of each tunnel structural part with different treatment depths under three treatment widths

度相差不大;处置宽度越大,衬砌结构内力的增幅越小;随着隧道处置深度的增加,隧道衬砌结构的内力有所增大,且处置宽度的增加对衬砌结构内力的增大有一定的控制效果。

综上所述,隧道结构各部位的竖向位移对黄土隧道基底处置深度的变化更为敏感,处置深度的增加对隧道竖向位移的控制效果较好,但同时也会引起衬砌结构内力在一定程度上有所增加。综合考虑各种影响因素后,本文将处置深度取为 7 m,下文将在此基础上研究隧道基底黄土地基处置宽度对处置效果的影响。

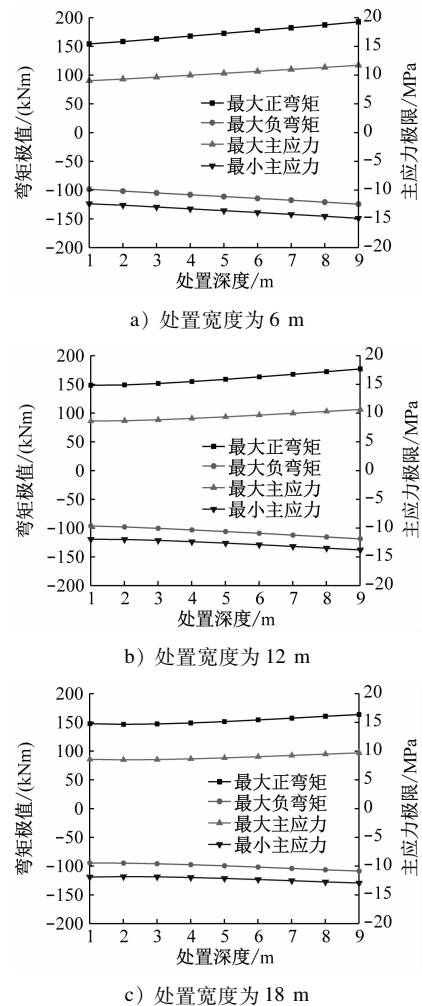


图4 不同处置宽度下不同处置深度的衬砌结构内力

Fig. 4 Internal force of the lining structure with different treatment depths under different treatment widths

3.2 考虑处置深度的地基处置效果分析

当处置深度为 7 m 时,分析不同处置宽度下隧道结构各部位的竖向位移及衬砌结构内力,如图 5 所示。由图 5 可知:①隧道结构各部位处的竖向位移及衬砌结构内力均随着处置宽度的增加而逐渐减小,说明地基处置取得了较好的成效。由此可知,地基处置的范围越大,所取得的处置效果越好,隧道基底黄土地层的浸水湿陷造成的不良影响越小。②当处置宽度达到 16 m 时,隧道结构各部位的竖向位移均较小,且随着处置宽度的继续增加,隧道结构各部位的竖向位移减小量有所减缓,说明继续增加处置宽度对处置效果的增加已趋于减弱。隧道处置宽度的增加,对衬砌结构内力有一定的控制效果,但作用较小,因此,应在考虑隧道竖向位移变形情况的基础上选择处置宽度。

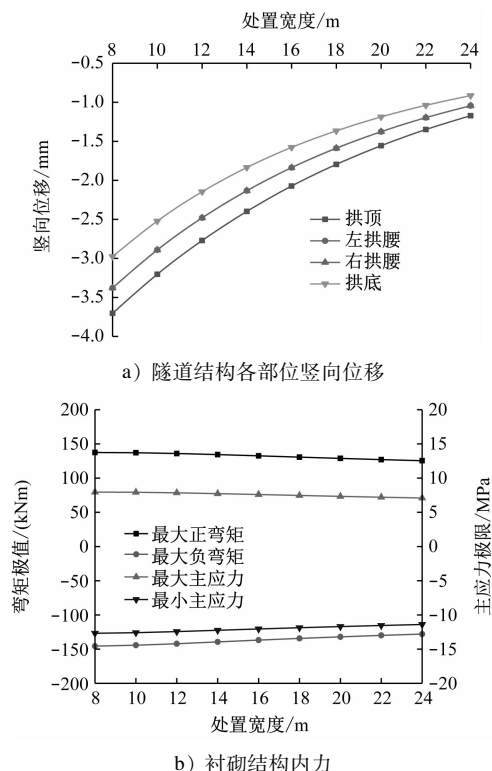


图5 不同处置宽度下隧道结构各部位的竖向位移及衬砌结构内力(处置深度为7 m)

Fig. 5 Vertical displacement of each tunnel structural part and internal force of lining structure under different treatment widths (treatment depth as 7 m)

综上所述,对于隧道基底存在9 m厚的湿陷性黄土层,采用三轴搅拌桩进行地基处置时,处置深度可取为7 m,处置宽度可取为16 m,即隧道两侧各超出5 m范围,该方案同时具备安全性和经济性。

4 结语

本文分析了盾构地铁隧道基底湿陷性黄土层的地基处置方案,对隧道基底湿陷性黄土层不同处置深度和不同处置宽度下的处置方案进行了数值模拟,对比分析了不同条件下地铁隧道结构各部位处的竖向位移和衬砌结构内力,主要获得以下几点结论:

1) 结合目前施工中常用的黄土地基处置方法的适用性和优缺点,提出三轴搅拌桩法更适用于盾构地铁隧道的湿陷性黄土层处置。

2) 随着处置深度的增加,隧道结构各部位处竖向位移的控制效果越好,但会引起隧道衬砌结构内力的增大。假定地铁隧道结构下部土层9 m深度

范围内全部为湿陷性黄土土层,当处置深度达到7 m时,继续增加处置深度对隧道竖向位移的控制效果提升较小,因此建议在该案例施工背景下,地基处置深度可取为7 m。

3) 地基处置宽度越大,隧道结构各部位处的竖向位移与衬砌结构内力的控制效果越好。处置宽度的变化对处置效果的影响主要表现在隧道竖向位移方面。因此建议在该案例施工背景下,处置宽度可取为16 m。

参考文献

- [1] 来弘鹏, 赵鑫, 康佐. 黄土地区新建地铁隧道下穿时既有地铁线路沉降控制标准[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(4): 63.
LAI Hongpeng, ZHAO Xin, KANG Zuo. Settlement control standard of existing metro line undercrossed by new metro tunnel in loess area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(4): 63.
- [2] 翁效林, 王俊, 王立新, 等. 黄土层浸水湿陷对地铁隧道影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1374.
WENG Xiaolin, WANG Jun, WANG Lixin, et al. Experimental research on influence of loess collapsibility on subway tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1374.
- [3] 周凤玺, 周志雄, 邵生俊. 非饱和黄土的增湿湿陷变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊1): 36.
ZHOU Fengxi, ZHOU Zhixiong, SHAO Shengjun. Analysis of wetting and collapsibility deformation characteristics of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 36.
- [4] 邵生俊, 陈菲, 邵帅. 黄土隧道地基湿陷变形评价方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1289.
SHAO Shengjun, CHEN Fei, SHAO Shuai. Collapse deformation evaluation method of loess tunnel foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1289.
- [5] 邵生俊, 李骏, 李国良, 等. 大厚度湿陷性黄土隧道现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1395.
SHAO Shengjun, LI Jun, LI Guoliang, et al. Field immersion tests on tunnel in large-thickness collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1395.
- [6] 苗贺朝, 邵生俊, 李骏, 等. 隧道穿越非饱和黄土地带浸水试验初探[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1066.
MIAO Hechao, SHAO Shengjun, LI Jun, et al. Primary investigation of infiltration field tests on unsaturated loess tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4): 1066.
- [7] 张瑜, 张兴明, 周志军. 黄土湿陷性及其影响因素分析[J]. 公路, 2020, 65(8): 69.

(下转第274页)

并形成了示范工程效应。主要获得以下结论:

1) 基于 Autodesk、Bentley 等三维设计软件开发的 12 项智能设计智慧建模插件能大幅提高模型质量和建模效率,且能够较好地解决图模一致性的问题。同时,平台基于 IFC(工程数据交换)标准打通了设计信息向施工管理、数字化移交的全过程信息继承、传递、共享的链路。

2) 基于数据迭代的动态施工组织模拟技术能够充分利用实际数据来预测工程进度趋势,提前采取纠偏措施,实现对整体工期目标的有效控制。对移动终端实时数据进行采集,同时向管理层提供可视化进度数据,能够快速找出进度偏差,确保执行机制的有效性 & 信息传递的可靠性。

3) 利用派工单对现场作业进行许可审批管理,综合利用物联网等技术手段规范施工人员、材料、机械设备及验收管理流程,约束参建各方正确履行监督管理程序,降低安全风险,确保执行机制的有效性 & 信息传递的可靠性。

4) 利用机器视觉测量技术和图像 AI 识别等技术手段规范参建各方的质量验收行为,通过双重验证机制确保参建各方正确履行监督管理程序,真实开展现场实测实量,并填报量测数据,避免质量验收流于形式,提高数字化交付的效率。

参考文献

- [1] 周红, 成虎. 工程总承包项目管理研究[J]. 施工技术, 2004, 33(12): 4.
ZHOU Hong, CHENG Hu. Study of general contract project management[J]. Construction Technology, 2004, 33(12): 4.
- [2] 蔡绍宽. 水电工程 EPC 总承包项目管理的理论与实践[J].

- 天津大学学报, 2008, 41(9): 1091.
- CAI Shaokuan. Theory and practice of EPC project management in hydropower engineering[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(9): 1091.
- [3] 刘坤弘, 庞佳丽. 基于 BIM-5D 平台的施工总承包管理: 以中建八局汉峪金融商务中心项目为例[J]. 价值工程, 2018, 37(2): 38.
- LIU Kunhong, PANG Jiali. Construction contract management based on BIM-5D platform: taking the project of Hanyu Financial Business Center of China Construction Eighth Engineering Division as an example[J]. Value Engineering, 2018, 37(2): 38.
- [4] 徐博. 基于 BIM 技术的铁路工程正向设计方法研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(4): 35.
- XU Bo. Research on forward design method of railway engineering based on BIM technology[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(4): 35.
- [5] 冯洁, 查红彬. 大型三维网格模型的简化及基于视点的 LOD 控制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(2): 186.
- FENG Jie, ZHA Hongbin. Simplification and view-dependent LOD control for large 3D mesh models[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(2): 186.
- [6] 李红波, 刘昱晟, 吴渝, 等. 基于二次误差度量的大型网格模型简化算法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(9): 3158.
- LI Hongbo, LIU Yusheng, WU Yu, et al. Simplification algorithm for large mesh models based on quadric error metrics[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(9): 3158.

· 收稿日期:2022-09-13 修回日期:2022-10-13 出版日期:2024-07-10
Received:2022-09-13 Revised:2022-10-13 Published:2024-07-10

· 第一作者:徐加兵,高级工程师,ercchnjsjgb@163.com
通信作者:陈前,工程师,914780456@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 265 页)

- ZHANG Yu, ZHANG Xingming, ZHOU Zhijun. Analysis of loess collapsibility and the influence factors[J]. Highway, 2020, 65(8): 69.
- [8] 王立新, 刘保健, 白阳阳. 湿陷性黄土与地铁地下结构相互作用机理研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(1): 72.
- WANG Lixin, LIU Baojian, BAI Yangyang. Study on interaction mechanism between collapsible loess and the subway underground structure[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(1): 72.

· 收稿日期:2022-01-13 修回日期:2022-03-13 出版日期:2024-07-10
Received:2022-01-13 Revised:2022-03-13 Published:2024-07-10

· 第一作者:潘红伟,高级工程师,279677908@qq.com
通信作者:吴友川,硕士研究生,xauatwyc@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821