

软土地层框架桥施工变形特性与关键技术研究

高岩

(中铁十八局集团第五工程有限公司 天津 300451)

摘要: 框架桥顶进法是下穿既有铁路的一种高效、低扰动施工工艺。本文针对软土地层条件下的框架桥顶进施工,以三河市燕郊镇京哈铁路下穿工程为例,建立有限元模型,分析了施工过程中地表、围护结构及既有铁路的变形特性。结果表明:围护结构侧移与地表沉降均呈先增后减趋势,最大变形值均控制在规范允许范围内;既有铁路路基与轨道的累计沉降亦满足安全标准,验证了施工措施对线路安全的保障作用。文中进一步总结了既有线路安全架空、高精度顶控与纠偏、路基及轨道注浆加固等关键技术,为类似软土地区下穿工程提供参考。

关键词: 软土地层; 下穿; 框架桥; 围护结构; 既有铁路路基及铁轨; 变形

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

Study on Deformation Behavior and Key Technologies of Frame Bridge Construction in Soft Soil Strata

GAO Yan

(China Railway 18th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: The jacking method for frame bridges is an efficient and low-disturbance construction technique for underpassing existing railway lines. Focusing on frame bridge jacking construction under soft soil conditions, this study takes the undercrossing project of the Beijing-Harbin Railway at Yanjiao Town, Sanhe City, as a case study. A finite element model was established to analyze the deformation characteristics of the ground surface, retaining structures, and the existing railway during construction. The results indicate that both the lateral displacement of the retaining structures and ground surface settlement exhibit a trend of initial increase followed by decrease, with the maximum deformation values effectively controlled within the limits specified by relevant codes. The cumulative settlement of the existing railway subgrade and track also meets safety requirements, confirming the effectiveness of the adopted construction measures in ensuring railway operational safety. Furthermore, key technologies such as temporary overhead protection of the existing line, high-precision jacking control and deviation correction, and grouting reinforcement of the subgrade and track are summarized, providing a reference for similar undercrossing projects in soft soil areas.

Key words: soft soil strata; underneath passing; box jacking bridge; retaining structure; existing railway subgrade and tracks; deformation

1 引言

随着我国城市化进程的不断加快,城市轨道交通及铁路网络日益密集,交叉工程建设需求显著增加^[1]。在此类工程中,软土地层下穿既有铁

路的框架桥顶进施工是一种具有代表性的施工方式。其中,软土地层通常指天然含水量高、压缩性大、承载能力低的黏性土或淤泥质地层;框架桥为由顶板、底板及竖墙构成的矩形刚架结构,常用于下穿既有线路;而顶进施工指在工作坑中

收稿日期: 2025-07-08

作者简介: 高岩,高级工程师,硕士,研究方向为公路市政、铁路

预先制作桥体,再利用液压设备将其逐步顶推至设计位置的一种暗挖施工方法。该方法能够有效缩短施工周期,降低对铁路正常运营的影响,在实际工程中得到广泛应用^[2]。

众多学者针对框架桥顶进技术进行了研究。一方面,部分学者聚焦框架桥自身的结构力学性能。例如毕见山^[3]以若干实际工程为背景,比较分析了箱涵在单跨与多跨形式中二维与三维模型的计算结果差异,推导出箱涵纵横向内力关系及钢筋沿纵向的配置需求,并利用 ANAYS 有限元软件,分析了在箱涵顶进过程中,地基超挖与顶进方位变化对结构力学性能的影响;欧阳章智等^[5]为得到以箱体顶板和侧板为空心板的箱型框架桥的合理结构形式,利用 ANAYS 软件建立两种不同形式的框架桥与土体共同作用仿真模型,对框架桥顶进过程中的桥、土竖向位移及应力进行分析,得到了桥体与土体的位移及最大主应力出现位置的分布规律;聂细锋等^[6]以贵州省新建铁路瓮安至马场坪货运线瓮安车站与既有城市主干道交叉处设置 $2 \times 14.0 \text{ m}$ 双层双孔框架立交桥为背景,采用 MIDAS/Civil 软件建立空间有限元模型对框架桥中板设置方式和数量、斜交角度、顶板覆土厚度等力学性能影响因素进行数值分析,从而确定此类型框架桥的合理布置形式。

另一方面,部分学者关注顶进过程中诱发的环境变形规律及其控制,黄生根等^[4]针对设计和施工中关于如何在箱涵顶进过程中控制地层位移的主要问题,通过 FLAC 软件计算箱涵顶进对地层位移的影响规律,并结合现场监测数据得到路面最大沉降与水平位移出现的位置分布规律,验证了在顶进过程中,孔隙水压力对土层扰动影响的变化更为显著。还有部分学者对框架桥施工对既有线路特别是轨道结构的影响进行了评估研究。赖艺鹏^[7]以德州三八路框架桥下穿既有铁路线工程为研究背景,建立框架桥下穿既有线结构动力响应分析模型,结合现场实测数据对列车通过下穿工程线路加固区的不同阶段的轨道动力响应规律进行分析。朱兆斌等^[8]依托浙江省杭州市某下穿铁路框架桥工程,分别采用 DDQ 和 ANSYS 建模,并对斜交框架桥的斜交角度、长度等影响因素进行数值分析。

然而,位于软土地层的框架桥顶进施工因地层力学性能较差、变形敏感性高,常常面临地基沉降、结构失稳、既有铁路线路安全性差等多重施工风险。因此本文在上述研究基础上,以三河

市燕郊镇京哈铁路下穿框架桥工程为依托,建立了软土地层下框架桥顶进施工有限元分析模型,明确了施工过程中地表、围护结构、既有铁路轨道及路基的变形规律,总结了软土地层框架桥顶进施工关键技术,为类似地质条件下铁路下穿顶进工程的安全设计和施工提供了参考。

2 工程概况

2.1 工程位置

工程位于三河市燕郊镇,如图 1 所示。框架桥与京哈铁路的交叉里程为 $K0 + 431.190$,对应交点处京哈铁路的运营里程为 $K34 + 902.7$,两者交角为 86° 。框架桥总宽 14.8 m 、结构总高 9.2 m ,顶板厚度为 1 m 、边墙厚度为 1.1 m 、底板厚度为 1.2 m 、结构净高为 7 m 、上梗腋尺寸 $1.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 、下梗腋尺寸 $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 。其主体结构采用 C35 钢筋混凝土,抗渗等级不小于 P8,顶面防水层采用防水卷材,如图 2 所示。



图 1 工程场地位置

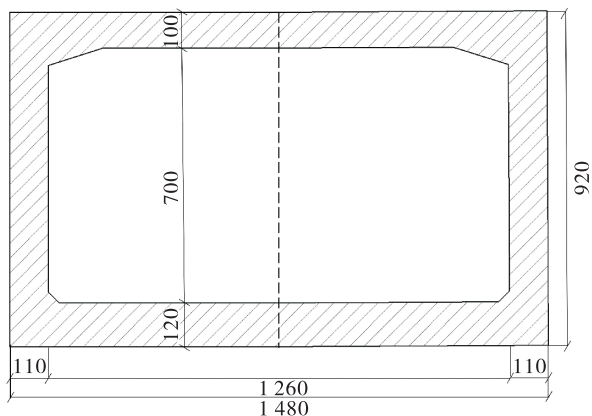


图 2 框架桥截面设计

2.2 地质条件

桥址范围下覆地层关系如图 3 所示,具体包括:素填土、黏土、粉质黏土。土体厚度依次为 5 m 、 3 m 、 15 m 。各地层物理力学参数如表 1 所示。考虑到工程沿线分布有厚层软黏土,地层条

件较差,同时需要下穿既有铁路,存在一定的施工安全风险。故需要对框架桥顶进施工期间地层变形及对既有铁路的影响程度进行分析。

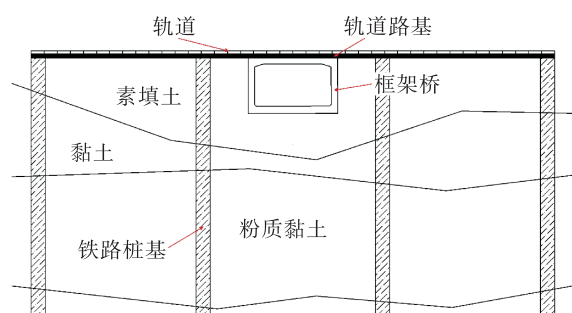


图3 地质情况

表1 地层物理力学性质

名称	弹性模量/ MPa	容重/ (kN/m ³)	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
素填土	6.8	7.6	0.43	22.8	24
黏土	7.9	21.4	0.24	21.6	26
粉质黏土	3.2	14.6	0.35	10.5	18

2.3 施工步骤

考虑到三河市燕郊镇工程所在区域地层主要为软土,且需下穿运营繁忙的京哈铁路干线。若采用传统的明挖现浇法,需长时间中断铁路运营,社会与经济成本高昂。为在最大限度减少对铁路行车干扰的前提下,安全、高效地完成下穿施工,工程采用框架桥顶进式施工法,施工布置剖面图如图4所示,主要步骤如下:

(1) 为确保施工期间铁路运营安全,通过挖孔施工支撑桩,锁死既有道岔并临时封闭线路后,开挖基坑。在基坑开挖过程中采用随挖随用有锚索分层加固的方式,并同步架设便梁;待便梁架设完成后,恢复线路运营。

(2) 基坑开挖完成后,对基底进行垫层浇筑,待基底层达到强度要求后,利用反力装置分三次将预制箱涵顶至框架桥设计位置,总顶程48.68 m,最大顶力2 869.5 t。

(3) 待箱身就位后,拆除多余支护结构,并对基坑及线下路基进行回填,最终拆除便梁,完成施工。

2.4 工程重难点

(1) 工程位于软土地层,土体力学性能差,易因施工扰动引发地基沉降或围护结构失稳。

(2) 框架桥需下穿繁忙的京哈铁路,施工中必须确保铁路路基和轨道变形在安全范围内。

(3) 本工程施工涉及基坑开挖、便梁架设、

顶进、回填等多个环节,施工步骤多、交叉性强,需要合理安排各施工环节的进度时间。

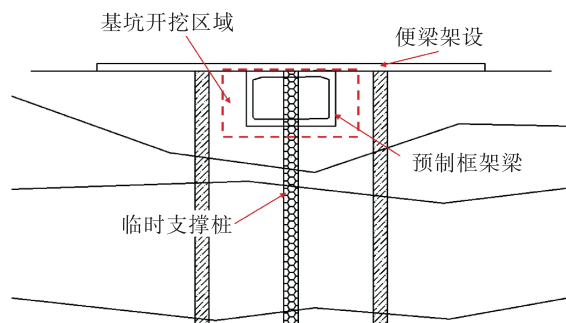


图4 框架桥顶进式施工布置剖面图

3 有限元模型建立

3.1 基本假定

本文基于工程地质特征及既有研究基础,为提高计算效率并满足工程适用性,对模型建立作如下理论简化^[9]:

①将岩土体简化为连续、均一且具有各向同性的弹性介质;②采用均质分层模型模拟岩层分布,仅考虑初始地应力由自重产生;③围护结构及其他工程材料被理想化为线弹性材料;④不考虑岩土体的时效效应和时间相关性对围岩稳定性的影响;⑤路堤土方开挖与框架桥顶进的各施工阶段在时间和空间上保持一致性,且每次开挖完成后会立刻开展下一次开挖,施工各环节之间不存在时间间隔;⑥利用等效刚度原则将围护桩等效为地下连续墙。

3.2 模型建立

3.2.1 模型尺寸及材料参数设置

考虑涉及普铁线的基坑工程影响区范围以及边界效应^[10],本次模型尺寸为120 m × 84 m × 50 m (长 × 宽 × 深)。基于本工程提供的地勘报告和土体物理力学参数,并结合本文以分析框架桥施工期结构变形为研究目标的定位,尽管修正剑桥模型能更准确地描述软黏土的流变与固结行为,但其参数标定复杂,且对计算资源要求较高,故选取摩尔-库仑模型作为土体的本构模型,具体参数参见表1。框架桥结构采用壳单元模拟,围护结构采用实体单元模拟,材料参数见表2。对模型侧面水平位移进行约束,底面设置为完全固定,上部自由。

3.2.2 轨道模型

轨道结构由上向下依次为钢轨、轨枕和道砟。既有线钢轨为60 kg/m型钢轨,采用实体单

元模拟；轨枕采用Ⅲ型混凝土枕，长2.6 m，纵向间距取0.6 m，采用实体单元模拟；钢轨与轨枕之间的接触采用弹簧-阻尼单元等效替代扣件系统，弹簧高度取3 cm，扣件系统的垂向刚度 $k = 60 \text{ kN/mm}$ ，垂向阻尼 $c = 75 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 。上部轨道结构与碎石道床、道床与路基填筑土之间采用绑定连接，其具体参数设置见表2。最终模型如图5所示。

表2 材料参数

名称	材料	密度/ (kg/m^3)	弹性 模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ ($^\circ$)
围护结构	C25 混凝土	2 350	27 900	0.2	—	—
框架桥结构	C40 混凝土	2 500	32 500	0.2	—	—
钢轨	60 kg/m	7 750	216 000	0.2	—	—
轨枕	Ⅲ型 混凝土枕	2 450	35 000	0.2	—	—
路基填筑土	—	1 750	55	0.3	26	32
碎石道床	—	1 800	135	0.3	0	50

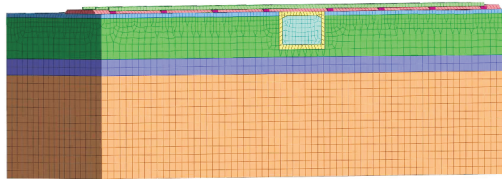


图5 模型网格图

3.3 施工步序设置

本文根据实际工程施工设置模型模拟工况，如表3所示。

表3 框架桥顶进模拟计算工况表

施工阶段	模拟工况
I	初始地应力平衡
II	围护结构施工
III	基坑开挖并施作便梁
IV	框架桥第一次推进
V	框架桥第二次推进
VI	框架桥第三次推进
VII	基坑回填

4 计算结果分析

4.1 地层变形分析

考虑到基坑开挖阶段及框架桥各施工阶段对

围护结构及地层的扰动较大，本文主要针对Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ这4个阶段进行分析，同时选取围护结构监测断面与地表沉降监测断面，如图6所示。

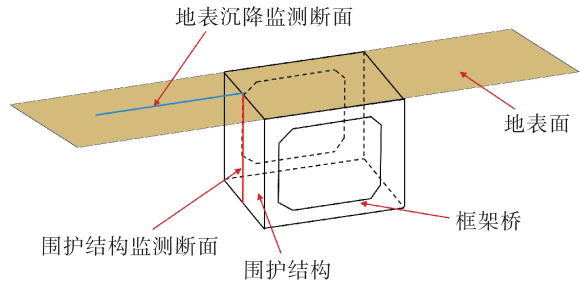


图6 监测断面示意图

4.1.1 围护结构侧移分析

不同施工阶段的地连墙侧移曲线如图7所示。整体而言，各施工阶段的地连墙侧向位移呈现先增大后减小的趋势。具体而言，当施工至Ⅲ阶段时，地连墙最大侧向位移为9.86 mm，最大侧移位置深度为6.02 m；当施工至Ⅳ阶段时，地连墙最大侧向位移为10.02 mm，较Ⅲ阶段增加0.16 mm；当施工至第Ⅴ阶段时，地连墙最大侧向位移为11.92 mm，较Ⅳ阶段增加1.9 mm；当施工至第Ⅵ阶段时，地连墙最大侧向位移为12.08 mm，较Ⅴ阶段增加0.16 mm。最终围护结构累计最大侧向位移为12.08 mm，该值在《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)限值内，说明围护结构在顶进施工中处于安全状态。

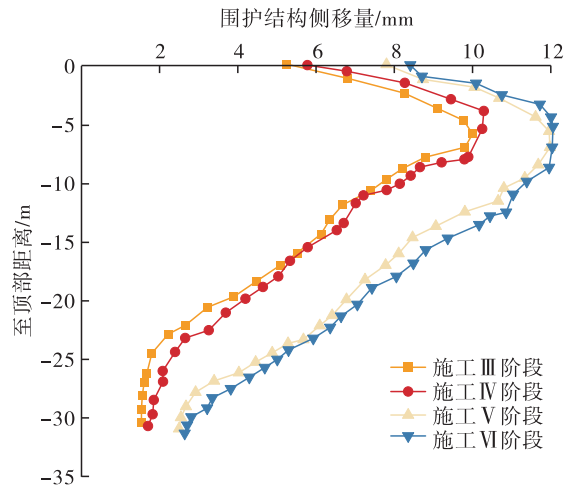


图7 围护结构侧移变形曲线

同时可以发现，各施工阶段最大侧向位移变化差值呈现先平缓、再增大、再平缓的规律。经分析可知，Ⅳ阶段施工时框架桥处于初步顶进时期，其推进力较小，围护结构主要受土压力和局

部施工扰动影响,同时顶进阶段距离观测截面较远,故而Ⅲ阶段和Ⅳ阶段之间的地连墙最大侧移量差值较小,而当施工进入Ⅴ阶段后,随着框架桥的不断前进,桥体顶进面距离观测截面越来越近,其围护结构会因土体被顶起和扰动引起侧压力重分布,故而较Ⅳ阶段地连墙侧移量产生较大增幅。最终当施工至第Ⅵ阶段时,顶进基本结束,桥体与周边土体逐步恢复稳定状态,坑内土体逐渐沉降和固结,因此围护结构侧移量不会产生较大变化^[11]。

4.1.2 地表沉降分析

不同施工阶段地表沉降量曲线如图8所示。可以发现,地表土体沉降随着至基坑边缘的距离增大而呈现先增大后减小的趋势,最大沉降区域大概位于距基坑边缘5.3~7.9 m处。在Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ阶段,地表最大沉降量分别对应8.04 mm、8.16 mm、10.11 mm、10.24 mm,均在《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497—2019)规范限值内,表明施工处于安全范围内。同时相邻施工阶段最大沉降量差值分别为0.12 mm、1.95 mm、0.13 mm,其最大沉降量差值变化规律与4.1.1节地连墙侧移最大沉降量差值变化规律相似,故不在此赘述。

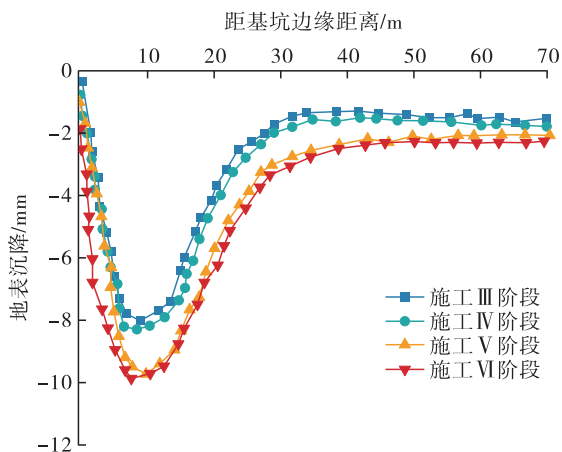


图8 地表沉降曲线

4.2 对既有铁路的影响分析

图9表示不同施工阶段既有铁路轨道和路基的最大沉降量变化曲线。总体而言,随着施工阶段的不断进行,既有铁路轨道和路基最大沉降量呈现先增大后减小的趋势。具体而言,在Ⅲ阶段至Ⅴ阶段,由于顶进过程框架桥挤压前方土体,使得既有铁路轨道和路基最大沉降量持续增大,并在第Ⅴ阶段达到峰值,既有铁路路基和轨道累计最大沉降量为4.69 mm、5.87 mm,当施工至

第Ⅵ阶段即土体回填阶段,回填土体的压实作用对路基和周围土体产生附加约束,部分抵消了前期顶进引起的塑性变形,导致沉降曲线呈现弹性回弹特征。最终施工结束后,既有铁路路基和轨道累计最大沉降量为3.72 mm、4.74 mm,符合《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》(TB 10314—2021)限定标准。

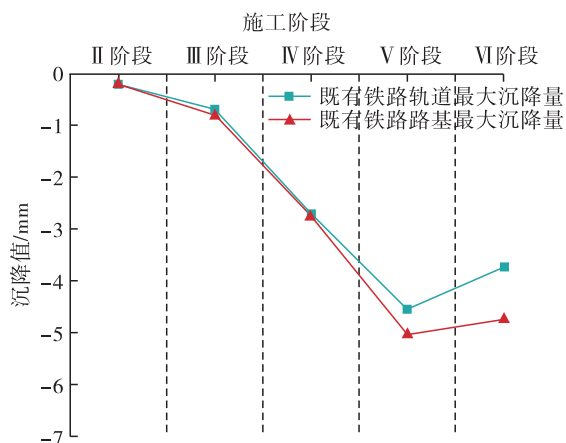


图9 既有铁路轨道和路基的最大沉降量变化曲线

整体而言,在软土地层条件下进行的框架桥顶进施工,会引起地层与既有结构变形,主要表现为围护结构侧移与地表沉降,二者发展趋势一致,均为初期快速增长而后渐趋稳定。最为重要的是,无论是围护结构还是铁路路基及轨道,其在各阶段所产生的累积变形均能满足现行规范的要求,这既验证了有限元模型分析的可靠性,也反映出所采用施工方案的合理性及有效性,尤其在保障既有铁路安全运营方面表现良好。

5 关键施工技术

尽管数值模拟结果显示地层与既有铁路的各项变形均在规范限值内,但由于软土地层自身的不确定性,如土质分布不均、局部软弱夹层等偶发性因素的影响不容忽视。因此,为提高工程施工的安全裕度,在本项目的实际施工过程中,有针对性地采用了多项施工技术,以保障工程的顺利进行。

5.1 既有线路安全架空技术

在框架桥顶进施工过程中,确保铁路营业线的结构稳定和行车安全至关重要。本工程采用D型便梁多跨连续架空方案,即通过纵梁与横梁组合以及高强度钢枕支承,将列车荷载安全传递并隔离至下部结构,避免施工扰动对轨道几何精度和轨道电路绝缘性的影响。架空前,实施钢轨应

力分散,确保施工造成的温度变化和力学扰动不会引发胀轨、断轨等问题。对架空区段实行动态巡检与养护,并加强限界管理,在慢行区域内分阶段开展道床开挖、道碴袋封堆、纵横梁穿设、铺设橡胶垫层等工序,确保限界尺寸满足列车通行要求,同时预防短路及线路变形风险。架空作业期间,工程方对加固线路的扣件状态、轨温、轨缝及道床密实度进行高频次检查,对异常形变及时处理,切实保障架空区段在施工期间及恢复运营后运行平稳。

5.2 框架桥顶进的高精度顶控与纠偏技术

考虑到框架桥顶进受结构自重、土体侧阻、活载叠加等多重因素影响,其顶进精度直接影响既有线路的安全及结构建成后的使用性能。在背景工程施工中,顶进控制与纠偏技术以液压千斤顶为核心,按照对称布置原则,合理布设于框架桥底板侧肋。通过钢制顶铁、顶柱、横梁,将顶力均匀传递至结构底板与后背梁,防止结构局部受压破坏。顶进全过程依据中线、高程、油压、顶力等多维数据,结合全站仪、水准仪等测量仪器,动态监控水平位移与高程变化。当顶进过程中出现结构“抬头”“扎头”或偏斜等异常状态时,需通过差异调节千斤顶顶力、增减顶铁垫块、切换油泵,或调整挖土厚度与坡度等方式进行主动纠偏。工程采用吃土顶进、滑板隔离润滑层、箱端船头坡等设计工艺,有效减缓摩擦及控制端部沉降,确保结构平稳推进。同时,顶进全过程严格执行“少挖多顶”,每次顶程控制在合理范围内,并细致记录施工参数,为持续纠偏和精细管控提供数据支撑。

5.3 路基及轨道注浆加固技术

虽然通过有限元分析明确了现有顶进施工中既有路基和轨道变形均在规范限值内,但为了进一步减小施工对既有路基和轨道的影响,实际施工中在顶进及回填阶段,采用水灰比为0.8的水泥浆与35°Bé水玻璃混合的双液浆水泥-水玻璃浆液进行注浆施工,注浆区域为框架桥两侧14.5 m范围内,注浆孔间隔1 m直斜交错布置。为了避免压力过高引发路基隆起,注浆压力分级控制为0.3~0.5 MPa。同时采用“跳孔间隔、先外围后内部”的注浆顺序,分两步施工以减少串浆风险。在注浆过程中,工程实时监测压力与流量:初始压力为0.3 MPa,逐级提升至终压0.5 MPa。单孔终注标准为注浆量小于5 L/min且稳压持续3分钟,同步利用全站仪监测轨面高程,将轨道

抬升量控制在3 mm以内,确保路基及轨道沉降注浆加固施工顺利完成。

6 结论

(1) 框架桥施工期间,围护结构侧向位移和地表沉降均呈先增大后减小的变化趋势,围护结构施工完成后累计最大位移为12.08 mm、地表沉降最大位移为10.24 mm,均控制在规范限值以内,表明背景工程框架桥顶进施工期间的沉降处于安全可控范围内。

(2) 顶进施工过程中既有铁路路基和轨道的最大累计沉降量分别为3.72 mm和4.74 mm,均满足规范限值要求,表明所采用的框架桥施工方法合理,可有效保障既有线路的稳定性与安全性。

(3) 既有线路的架空、路基的加固、框架桥顶控和纠偏是下穿既有铁路框架桥顶进施工的关键,本文从上述三方面总结了软土地层框架桥顶进施工关键技术,为类似工况下框架桥顶进施工提供了实际参考。

参考文献:

- [1] 许飞. 新建框架桥下穿既有铁路施工安全与控制研究[D]. 南昌:华东交通大学,2024.
- [2] 沈志文,孟超,李嘉成. 联李大道顶进框架桥下穿铁路咽喉区方案设计与施工技术[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(S1):87-91.
- [3] 毕见山. 大型顶进箱涵施工技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.
- [4] 黄生根,张健,张晓炜. 超大型箱涵顶进引起的地层位移规律研究[J]. 岩土力学,2009,30(2):387-392.
- [5] 欧阳章智,王东权,于广云,等. 空心型箱型框架桥力学特性有限元分析[J]. 铁道建筑,2011(4):9-12.
- [6] 聂细锋,刘志军,黄树强. 高填方段大跨度双孔铁路框架桥的力学性能[J]. 铁道建筑,2020,60(11):26-28.
- [7] 赖艺鹏,韩语,郭帅杰,等. 框架桥下穿既有有线有砟轨道结构动力响应分析[J]. 铁道科学与工程学报,2025.
- [8] 朱兆斌,马文龙,周啸. 斜交铁路框架桥力学性能分析[J]. 浙江建筑,2025,42(2):1-5.
- [9] 陈俊伟,陈树义. 土岩组合深基坑变形影响因素敏感性分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2023,56(S1):337-341.
- [10] 刘喆,倪光斌,林传年,霍建勋. TB 10314-2021《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》内容解析[J]. 铁道标准设计,2022,66(6):184-189.
- [11] 董晓娟. 框架桥顶进施工对既有高速公路路基沉降影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.