

三孔框构桥下穿高填方铁路路基变形控制研究

冯百喜¹ 张海行¹ 周 凯² 江益辉² 徐鑫洋³ 李 浪³

(1. 中铁隧道局集团三处有限公司, 广东深圳 518051; 2. 中铁南方投资集团有限公司, 广东深圳 518054; 3. 华东交通大学土木建筑学院, 江西南昌 330013)

【摘要】 下穿既有运营铁路路基建设框构桥会引发既有铁路变形,降低轨道的平顺性,严重时会导致线路运营中断。以深圳市五和站交通疏解道路下穿平南铁路工程为研究背景,建立框构桥下穿既有铁路线路模型,结合现场实测数据分析不同切桩施工顺序下现浇框构桥下穿对上覆既有线的扰动变形,提出了现浇框构箱涵下穿工程的关键控制技术。计算结果表明:在框构桥现浇下穿过程中,各工况对应下的轨道沉降曲线呈对称分布趋势,轨道在支撑桩位置的沉降最小,沉降最大值发生在 D 梁跨中位置;框构桥跨度的增大导致其范围内铁路轨道水平位移变化增大;进行切桩顺序优化后,SGC10 支撑桩位置范围轨道沉降值明显小于原方案轨道沉降值,沉降值减小 49%,使得整个下穿范围的既有铁轨沉降及水平位移减小;分阶段切割既有支撑桩,将既有铁路轨道荷载分阶段施加到各框构桥上,进行多次的受力转换,可显著降低既有铁路轨道的沉降,并且提升既有铁路的平顺性。各工况条件下得到的铁路轨道变形与实测结果规律一致,该模型工具可对立交道口下穿过程中既有铁路轨道变形进行预测,并为类似铁路立交道口工程的安全施工提供建设经验。

【关键词】 现浇框构桥;立交道口;下穿工程;轨道沉降;受力转换

【中图分类号】 U213.1; TU433

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0303

Deformation control of a high-fill railway subgrade undercrossed by a three-span frame bridge

FENG Baixi¹ ZHANG Haihang¹ ZHOU Kai² JIANG Yihui²
XU Xinyang³ LI Lang³

(1. China Railway Tunnel Group Third Division Co., Ltd., Shenzhen 518051, Guangdong, China; 2. China Railway South Investment Group Co., Ltd., Shenzhen 518054, Guangdong, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

【Abstract】 The construction of a box-frame culvert under an existing operational railway embankment may trigger deformation of the existing railway and compromise track smoothness, potentially resulting in operational disruptions in severe cases. This study takes the traffic diversion road beneath the Pingnan Railway at Wuhe Station in Shenzhen as the engineering background. A numerical model of a frame bridge underpassing an existing railway line was established. Based on field monitoring data, the disturbance-induced deformation of the overlying existing railway during cast-in-situ frame bridge construction was analyzed under different pile-cutting sequences. Key control techniques in cast-in-situ box-frame culvert underpass construction were then proposed. The calculation results show that, during the cast-in-situ underpass construction of the frame bridge, the track settlement curves under various construction conditions exhibit a generally symmetrical distribution. The minimum track settlement occurs at the supporting pile locations, whereas the maximum settlement appears at the mid-span of the D-beam. An increase in the span of the frame bridge leads to more pronounced horizontal displacement of the railway track within the bridge span. After optimization of the pile-cutting sequence, the track settlement within the area of the SGC10 supporting pile is significantly smaller than that obtained using the original scheme, with the settlement reduced by 49%. Consequently, both the settlement and horizontal displacement of the existing railway track within the entire underpass area are reduced. By cutting the existing supporting piles in stages, the railway track load can be progressively transferred to different frame bridges, enabling multiple stages of load redistribution. This staged load-transfer process can significantly reduce track settlement and improve the smoothness of the existing railway. The calculated deformation patterns of the railway track under different

基金项目: 江西省自然科学基金(20224BAB214033)

作者简介: 冯百喜,男,1993年生,大学本科,工程师,研究方向为城市轨道交通。E-mail: 2168793115@qq.com

construction conditions are consistent with the field monitoring results, indicating that the proposed modeling approach can be used to predict track deformation during railway underpass construction at grade-separated crossings and provide practical construction experience for the safe implementation of similar railway underpass projects.

【Key words】 cast-in-place frame bridge; grade-separated crossing ; underpass construction; track settlement; load transfer

0 引言

随着我国交通迅速发展,事故频发的平交道口现已被立交道口所取代^[1],城市中铁路大多以高填方路堤铺设为主,框构桥下穿成为新建公路与既有铁路之间贯通的常用方式,而框构桥下穿施工不可避免地导致铁路路基土体扰动,从而引起既有铁路轨道的变形^[2]。相比预制框构桥顶进下穿铁路,现浇框构桥制造方式更加灵活,能够适应各种复杂施工环境。虽然既有铁路下修建框构桥目前在技术上较为成熟,但对于大跨度、多座桥协同施工和受力承托转换等复杂立交下穿工程^[3],依旧面临着较大挑战。

以经验公式为基础的 Peck 法^[4],以理论解析法为代表的 Loganathan 公式^[5]以及现场监测^[6]与数值模拟^[7]等方法在箱涵下穿路基施工扰动影响分析方面取得了重要的研究成果。朱正国等^[8]采用数值模拟的方法,提出隧道下穿既有线路的地表沉降控制标准。王道远等^[9]基于下穿既有石太客运专线工程,采用有限元软件分析,提出了既有轨道变形的地表沉降控制基准。张超^[10]采取直角补齐异型正交设计,通过有限元软件 Midas 计算分析结构受力特性,进而总结出配筋特点,可为同类斜交框架桥的设计提供参考与指导。陈力等^[11]结合 10 个框构桥下穿既有线路工程的案例,针对框构桥下穿既有铁路对路基的沉降影响问题,分析不同框构桥高宽比和不同埋深下的地表沉降规律,提出铁路路基沉降控制标准。岳仁辉等^[12]针对矩形箱涵下穿既有高速公路施工引起路面沉降控制的问题,采用 Midas 有限元分析软件分析不同箱涵埋深、土体泊松比、黏聚力、内摩擦角等因素对路面沉降的影响规律,构建了矩形箱涵下穿高速公路路面沉降控制基准。石文阳^[13]依托西安市经九路下穿陇海铁路立交桥工程项目,采用理论计算、数值模拟和现场监测相结合的方法,对施工中不同工

况下箱涵的稳定性进行研究,证明了框构箱涵在顶力以及列车行驶产生的竖向动荷载作用下稳定性良好。既有铁路的列车荷载对线路的作用明显,对于下部基础要求更为严格^[14-15],因此,如何在保证在既有铁路安全运营的情况下,降低施工对线路的不利影响,是亟待解决的问题。

上述研究中,针对现浇多孔框构桥下穿过程中既有铁路轨道位移变化规律的研究较少。因此,本文以新建三孔框构桥下穿平南铁路为例,结合实际工况,借助 Midas GTS 有限元分析软件建立三维数值模型,开展大跨度现浇三孔框构桥下穿施工过程中既有铁路限速运营下线路的变形控制研究,进一步分析提出控制既有线路沉降的施工措施及建议。研究成果可为铁路立交道口工程的安全施工提供建设经验。

1 工程概况

1.1 工程概述

既有平南铁路东起广深铁路平湖南站,西至深圳西站,线路全长 31 km,以地面路堤铺设为主。由于深大、深惠城际五和站在平南铁路下方铺设,施工场坪受限,为保证布龙路交通通行,采用现浇框构箱涵下穿既有平南铁路供交通疏解使用。疏解框构为平行四边形钢筋混凝土框架结构,总体宽 65.60 m、高 9.55 m、长 22.63 m,为三孔分整体式结构,净跨分别为 10.4、15.0、14.0 m。框构轴线与平南铁路轴线呈 45°夹角。钢便梁架空采用 10 根直径 1.5 m、长度 25 m 支撑桩+钢便梁(3×24.5 m+2×16.4 m)+2 个混凝土支墩架空加固轨道,然后挖除铁路路基施工框构。15 m 的主跨顶板厚 1.10 m,边墙正尺寸厚 1.20 m,底板厚度 1.30 m,结构净高 7.15 m。具体框架桥如图 1、图 2 所示。

1.2 现场加固概况

本工程采用 3-5-3 扣轨配合横抬纵挑法布置工

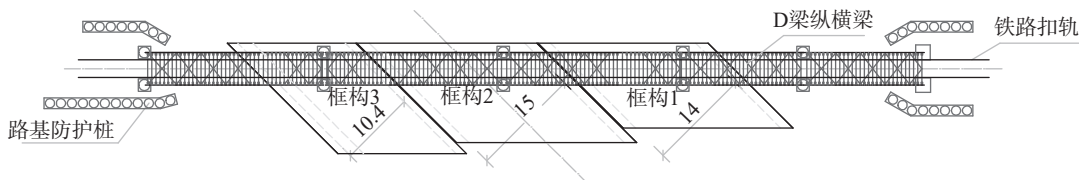


图 1 三孔框构桥平面图(单位:m)
Fig. 1 Plan of the three-span frame bridge (Unit: m)

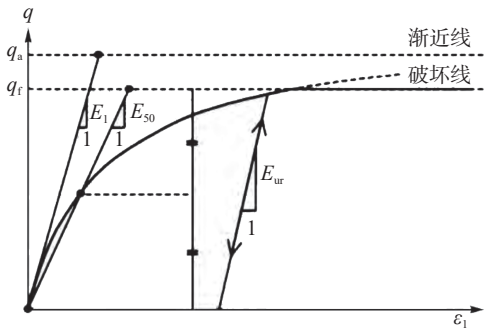


图 4 MMC 模型三轴试验应力应变关系曲线
Fig. 4 Stress-strain relationship curve of the MMC model under triaxial test

岩风化层的变形模量,计算公式见式(1):

$$E_0 = \alpha N \tag{1}$$

式中: α 为经验参数; N 为未修正的标贯击数。

模型中的 $E_{\text{oe}}^{\text{ref}}$ 和 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 一般通过取其与 E_{50}^{ref} 对应的比例关系确定。对于深圳地区花岗岩残积土,参考切线模量 $E_{\text{oe}}^{\text{ref}}=0.5E_{50}^{\text{ref}}$ 时反演出的最优 E_{50}^{ref} 值整体大于 $E_{\text{oe}}^{\text{ref}}=E_{50}^{\text{ref}}$ 的情况;随着 $E_{50}^{\text{ref}}:E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 从 1:3 变化到 1:5,最优 E_{50}^{ref} 值逐渐减小^[18],故该工程所采取关键参数比值为: $E_{50}^{\text{ref}}:E_{\text{oe}}^{\text{ref}}:E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=1:1:3$,其余参数按工程地质勘察报告选取。

2.2 计算模型及参数

计算模型中土体、框构、平南铁路路基、D 梁支撑桩采用三维四面体网格模拟;D 梁、扣轨采用梁单元模拟;防护桩采用桩单元模拟。具体物理力学参数见表 3。

表 2 土体物理力学参数指标
Tab. 2 Physical and mechanical parameters of soil

土层	土层厚度 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{oe}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m·d ⁻¹)
素填土	3	17.1	2.7	2.7	8.1	12.0	10.0	0.5
砾质黏性土	5.7	17.58	5.0	5.0	15	26.0	24.0	0.8
全风化花岗岩	2.3	17.89	10	10	30	28.0	26.5	0.5
强风化花岗岩	31.8	18.74	15	15	45	32.0	28.5	0.5
微风化花岗岩	43.7	26.50	250.0	250.0	1250	2000	40.0	0.3

表 3 模型中结构的物理力学参数
Tab. 3 Physical and mechanical parameters of the structure in the model

项目	重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
框构	25.0	3.25×10 ⁴	0.2
铁路路基	17.0	2.50×10 ⁴	0.2
D梁支撑桩	25.0	3.35×10 ⁴	0.3
防护桩	25.0	3.35×10 ⁴	0.3
钢材	78.5	2.00×10 ⁵	0.3

模型顶面取为自由边界,底面采用竖向约束,其他面均采用法向约束。为消除计算边界效应的影响,同时考虑施工过程中的空间效应,计算模型取其有效影响范围,即模型沿 X 方向取 200 m,沿 Y 方向取 120 m,土层总深度 50 m。考虑到土体计算模型的网格划分与计算结果的收敛性密切相关,在划分土体网格时,对框架桥周围部分的土体需要加密划分网格,而对于远离框架桥区域可粗略划分网格,既保证计算收敛性,又可提高了计算效率。计算模型网格单元数量为 139972,节点数量为 182684。数值计算模型如图 5 所示,框构桥穿越平南铁路相对位置示意图见图 6。

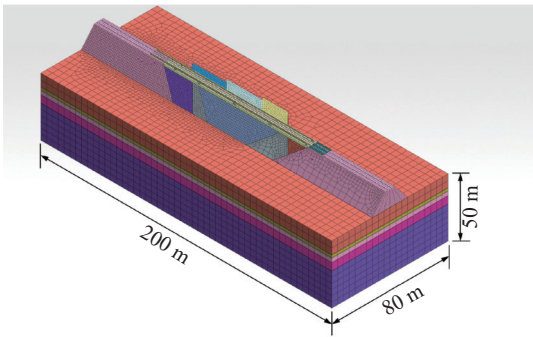


图 5 框构桥穿越平南铁路数值计算模型
Fig. 5 Numerical calculation model of the frame bridge underpassing Pingnan Railway

2.3 列车荷载施加

本工程中平南铁路为客货共线,铁路级别为国铁Ⅲ级,属于单线非电气化线路,列车通过速度为 45 km/h,模型计算采用 ZKH 活载。根据《铁路桥涵设计规范》^[19],桥顶上填土厚度 $h \geq 1$ m(从轨底算起)时不计列车竖向动力作用,由于轨底至框构顶板间填土实际高度为 1.728 m,故 ZKH 活载不考虑列车的动力作用。

平南铁路有砟列车荷载分布宽度为 2.6 m,将列车恒载及土压力恒载施加至框构顶板,得到框构顶板

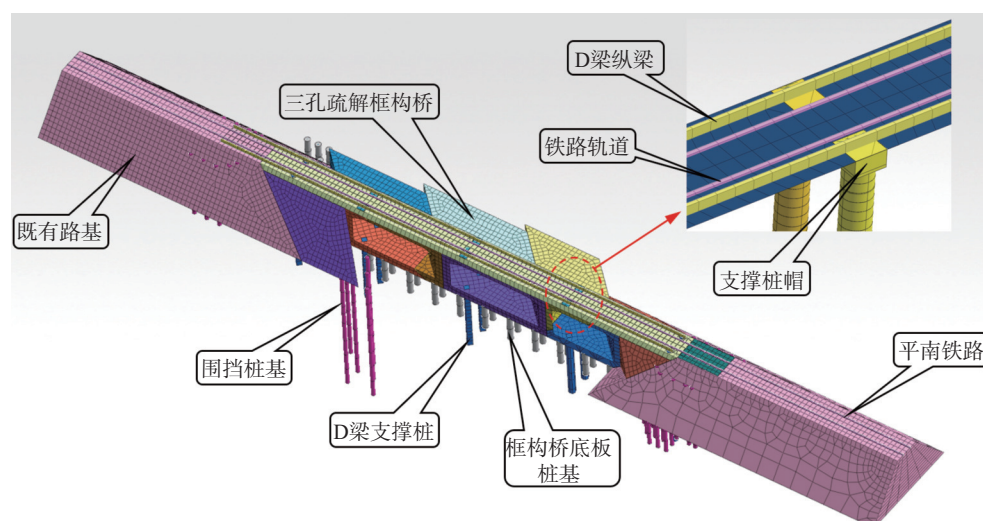


图 6 框构桥穿越平南铁路相对位置

Fig. 6 Relative position of the frame bridge when underpassing Pingnan Railway

轴线活载竖向压力强度大小为 38.124 kPa。

2.4 具体施工步骤

考虑到既有路基是在铁路长期运营下发生的固结沉降,因此在框构顶板上施加 ZKH 活载进行地应力平衡计算,将位移重置为零后再进行新建框构桥下穿施工的模式。具体施工步骤如表 4 所示。

表 4 施工阶段计算
Tab. 4 Calculation of construction stages

工序	说明
工序1	初始地应力平衡阶段
工序2	施作D梁支撑桩及路基防护桩
工序3	施作D梁纵向支撑梁
工序4	放坡开挖中间孔框构基坑
工序5	浇筑中间孔框构桥下素混凝土桩及框构桥主体
工序6	放坡开挖两侧孔框构基坑
工序7	浇筑两侧孔框构桥下素混凝土桩及框构桥主体
工序8	框构两侧回填
工序9	对框构顶部进行回填并切除框构桥内支撑桩

2.5 位移变形控制标准

在进行施工控制分析时,按照《铁路路基设计规

范》及《普速铁路线路修理规则》规定的线路轨道静态几何尺寸容许偏差管理值作为控制标准,在有砟轨道列车限速 45 km/h 的情况下,相邻 10 m 的任意两测点实际矢度差与设计矢度差的偏差(高低)为 22 mm,在有砟轨道计划维修无列车运行情况下,相邻 10 m 的任意两测点实际矢度差与设计矢度差的偏差(高低)为 6 mm。

3 轨道沉降变形结果分析及措施研究

根据现场所布置铁路轨道竖向位移监测点,对框构桥基坑施工范围内的轨面每隔 5 m 设置轨道位移监测点(SGC01—SGC20),监测点具体布置如图 7 所示。

3.1 框构桥下穿对铁路轨道的影响分析

3.1.1 轨道沉降位移

经计算,现浇框构桥下穿施工引起的铁路轨道各主要阶段累计附加沉降变形结果如图 8 所示。

由图 8 可知,工况 2 与工况 4 所对应的开挖中间孔及两侧孔基坑施工时,铁路轨道竖向位移表征为隆起,最大隆起位置对应于支撑桩附近,最大隆起值分别为 2.72, 2.04 mm;工况 3 在中间孔框构桥浇筑时沉降峰值为-3.78 mm,较工况 2 沉降变化达到-6

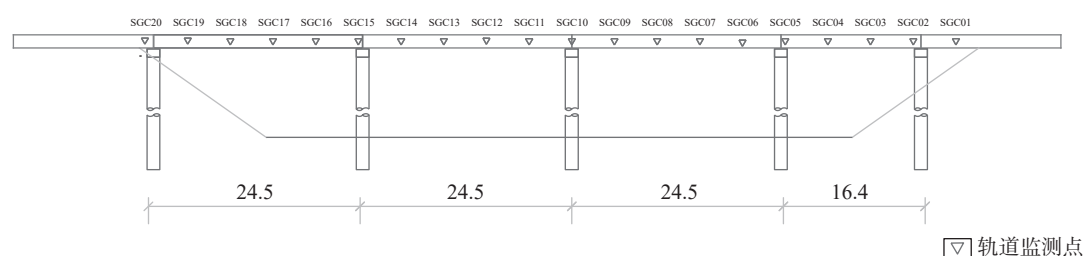


图 7 铁路轨道各关键阶段累计附加沉降变形(单位:m)

Fig. 7 Cumulative induced settlement deformation of railway track at key stages (Unit: m)

mm, 现浇框构桥在其养护期间, 受其自重影响, 使得框构桥底板及支撑桩整体下沉, 导致铁路轨道发生较大沉降; 工况 5 同理, 轨道最大沉降值为 -3.34 mm, 较工况 4 沉降变化达到 -5.3 mm; 工况 6 在对中间 6 根支撑桩切除时, 铁路轨道整体发生沉降, 沉降峰值达到 -6.12 mm, 沉降趋势与工况 5 基本一致。可发现, 各工况对应下的轨道沉降曲线呈对称分布趋势, 轨道在支撑桩位置的沉降最小, 沉降最大值发生在 D 梁跨中位置。

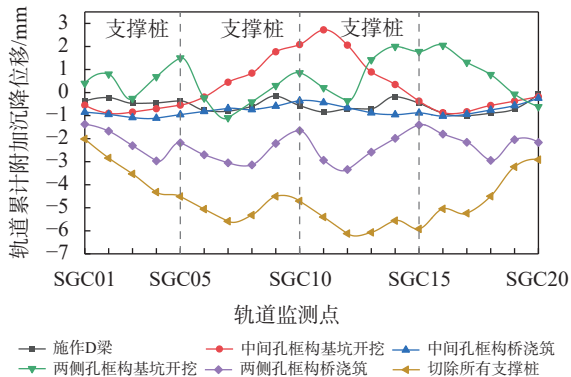


图 8 铁路轨道各关键阶段累计附加沉降变形
Fig. 8 Cumulative additional settlement deformation of the railway track at various key stages

根据《普速铁路线路修理规则》，在进行立交下穿铁路施工时将轨道平顺性作为控制标准，本项目主要控制指标为轨道高低平顺性，相邻 10 m 的任意两测点实际矢度差与设计矢度差的偏差限值为 22 mm（限速 45 km/h）。根据上述计算结果，取相隔 10 m 的 10 个测点计算，框构桥施工对铁路轨道平顺性的影响结果见图 9。

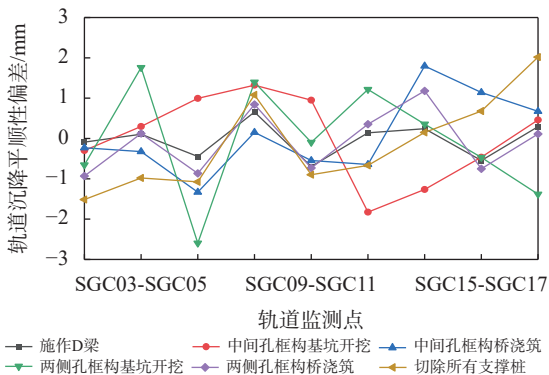


图 9 各工况下轨道高低平顺性变形曲线
Fig. 9 Track profile deformation curves under various working conditions

由上述变形曲线图可知，平南铁路框构桥施工过程中，各关键施工阶段引起的最大轨道高低平顺性偏差为 2.6 mm，满足《普速铁路线路修理规则》中规定高低平顺性 22 mm 的限值要求。最大平顺性偏差

发生于工况 4，该施工阶段土方开挖量最大，支撑桩受到土体卸荷影响最甚，导致铁路轨道沉降不一，高低平顺性波动较大。

3.1.2 轨道水平位移

现浇框构桥下穿施工引起的铁路轨道各主要阶段累计水平位移结果如图 10 所示。

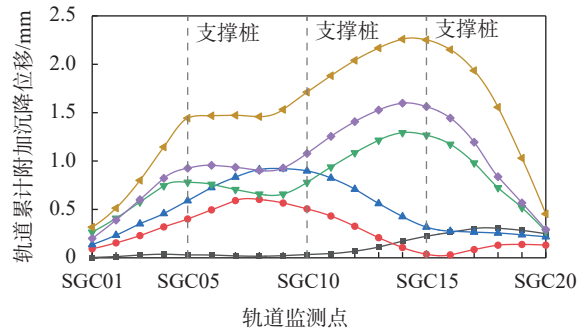


图 10 铁路轨道各关键阶段累计附加水平位移
Fig. 10 Cumulative additional horizontal displacement of the railway track at various key stages

由图 10 可知，相较于铁路轨道的附加沉降变形，其水平位移变化范围较小，且测点间位移变化均匀，在工况 2、工况 3 对中间孔框构桥范围进行施工时，水平位移峰值发生在中间支撑桩附近，达到 1 mm；在工况 4、工况 5 对两侧孔框构桥范围进行施工时，水平位移峰值发生在两侧框构对应的支撑桩位置，为 1.8 mm；切桩后最大水平位移达到 2.26 mm。由此发现，各工况对应下的轨道沉降曲线大致呈对称分布趋势，工况 4、工况 5、工况 6 对应的轨道最大水平位移发生在测点 SGC15 位置，由于两侧框构宽度不一，框构 1 较框构 3 宽 5 m，随着各工况施工的进行，框构桥跨度的增大导致其范围内铁路轨道水平位移变化更大。

从图 11 的轨道横向平顺性变形曲线可知，在框构桥施工过程中，各关键施工阶段引起的轨道横向平顺性偏差最大值为 -0.905 mm；满足《普速铁路线路修理规则》中规定高低平顺性 20 mm 的限值要求。相较于轨道高低平顺性，轨道横向平顺性更佳。

3.2 切桩顺序优化对铁路轨道变形控制分析

3.2.1 轨道沉降位移

根据上文分析，最后切除支撑桩施工对铁路沉降变形影响较大，达到 -5.18 mm，且变形趋势为整体沉降。虽然切桩前对框构桥面与轨枕间进行了回填，但此时荷载并未转移，回填材料还未起承托作用，此时切除所有支撑桩，道砟及铁轨重量由支撑桩一次性转移至框构桥上，使得在此阶段钢轨整体沉降较大，

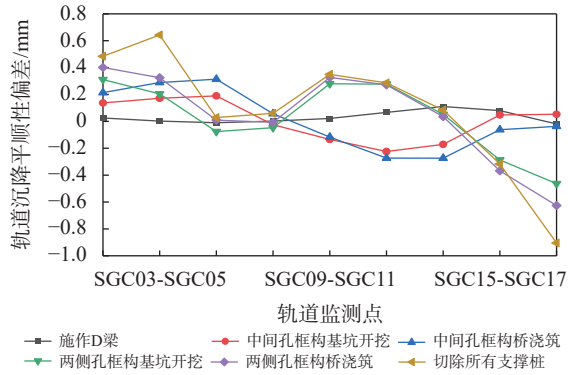


图 11 各工况下轨道横向平顺性变形曲线
Fig. 11 Track alignment deformation curves under various working conditions

不利于铁路的长期运营。本文在上述施工基础上进行切桩方案优化, 将支撑桩分两阶段进行切除: 第一阶段于中间孔框构桥浇筑养护完成后切除中间支撑桩, 第二阶段于两侧孔框构桥浇筑养护完成后切除两侧支撑桩。切桩方案优化前后的位移计算云图如图 12 所示, 对比可见, 切桩方案优化后框构桥及铁路轨道沉降情况均有所改善。

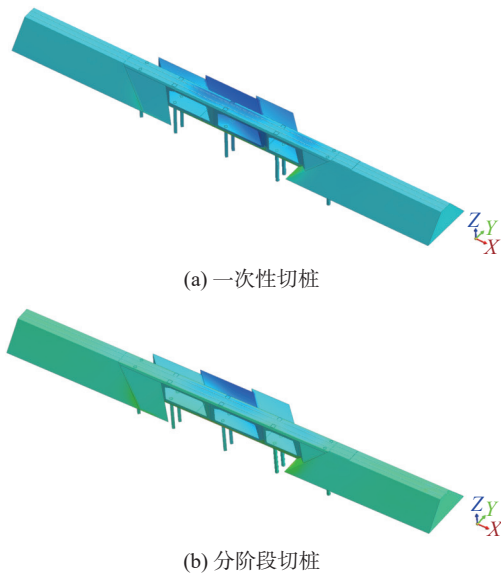


图 12 切桩方案优化前后框构桥下穿既有铁路沉降云图
Fig. 12 Contour maps of settlement induced by the frame bridge underpassing the existing railway before and after pile-cutting scheme optimization

图 13 为切桩顺序优化后的沉降变形图, 铁轨最终沉降峰值为 -5.02 mm, 相较于原方案的最终沉降峰值降低了 1.1 mm, 沉降减小的关键在于工况 4, 优先切除中间支撑桩, 虽然切除中间支撑桩后, SGC10 位置沉降增大了 2.24 mm, 较原方案工况 5 的沉降峰值更大, 但此时轨道及列车的荷载已由支撑桩承担转变为中间框构及剩余支撑桩承担, 得益于框构与轨道轨枕的接触受力面积增大, 荷载更均匀地分布到框构

及支撑桩上, 当后续进行两侧孔框构基坑开挖与框构桥浇筑时, 土体卸荷与框构桥自重所造成的土体变形对轨道支撑体系的外力作用减弱, 使得在 SGC10 位置附近的沉降减小。且各关键施工阶段引起的轨道高低平顺性偏差相较不大, 如图 14 所示, 切桩顺序优化后各关键施工阶段引起的最大轨道高低平顺性偏差为 2.48 mm, 同样满足《普速铁路线路修理规则》中规定高低平顺性 22 mm 的限值要求。

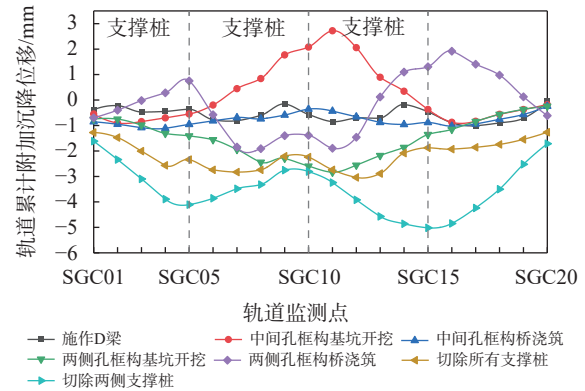


图 13 方案优化铁路轨道各关键阶段累计附加沉降变形
Fig. 13 Cumulative additional settlement deformation of the railway track at various key stages under the optimized scheme

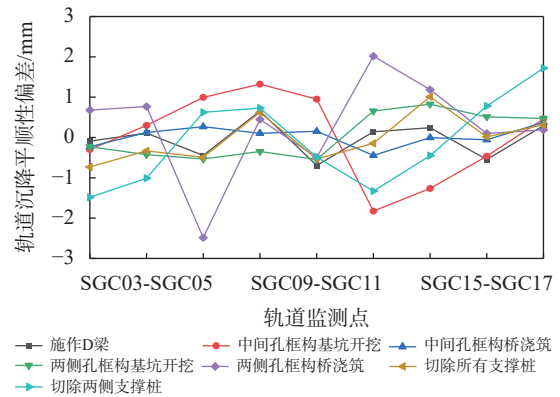


图 14 方案优化各工况下轨道高低平顺性变形曲线
Fig. 14 Track profile deformation curves under various working conditions with the optimized scheme

3.2.2 轨道水平位移

如图 15 和图 16 所示, 各关键施工阶段铁路轨道累计附加水平位移变化趋势大致相同, 由于先切割中间支撑桩, 中间框构桥承托部分轨道荷载进行受力转换, 中将框构桥范围内的轨道水平位移变化减小。最终工况下最大水平位移达到 1.93 mm, 较原方案变化不大。在轨道横向平顺性方面, 各关键施工阶段引起的最大轨道横向平顺性偏差为 -0.781 mm, 较原方案小 0.124 mm, 完全满足《普速铁路线路修理规则》中规定高低平顺性 20 mm 的限值要求。

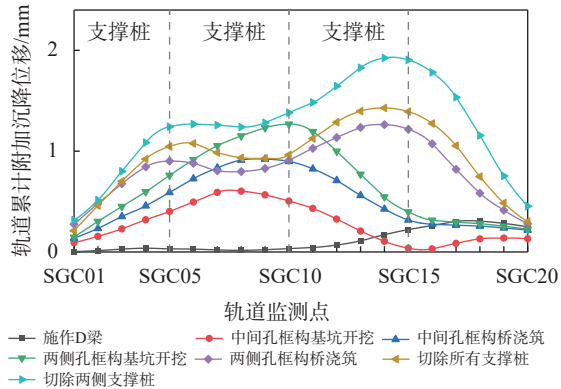


图 15 铁路轨道各关键阶段累计附加水平位移

Fig. 15 Cumulative additional horizontal displacement of the railway track at various key stages

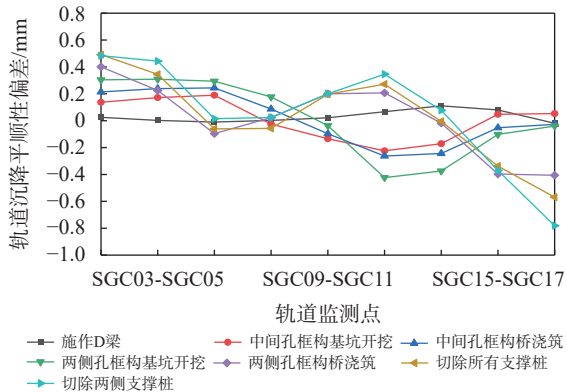


图 16 各工况下轨道横向平顺性变形曲线

Fig. 16 Track alignment deformation curves under various working conditions

3.3 基于数值模拟分析的施工建议

在下穿施工阶段,通过变形监测系统对铁路轨道的沉降进行实时监控。图 17 为现场施工监测及数值模拟最终结果对比图,由图可见,现场实测沉降值与模拟值变化规律相近,除 SGC10 位置二者相对误差(18%)稍大外,其余区段实测与模拟得到的各工况轨道沉降值较为接近,表明该模型能较好体现框构桥现浇下穿过程中既有铁路轨道的变形特征。

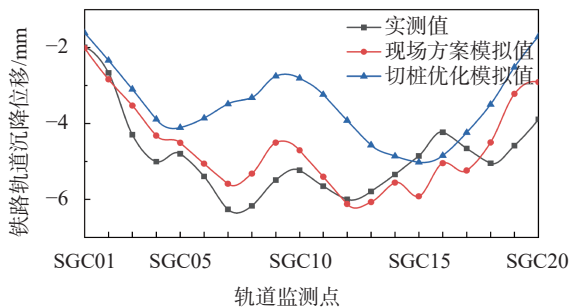


图 17 实测与数值模拟优化前后最终沉降位移对比

Fig. 17 Comparison of final settlement displacement between field measurements and numerical simulations before and after optimization

对于切桩方案优化后的铁路轨道变化曲线,可以明显看到在 SGC05 及 SGC15 支撑桩位置附近的轨道沉降值无明显差距,而在 SGC10 支撑桩位置处轨道沉降值明显小于原方案轨道沉降值,沉降值减小 49%。优先将中间支撑桩切除,使得中间范围内的既有轨道系统荷载施加在中间框构桥上,在后续两侧孔基坑开挖及框构桥浇筑工况下,因框构桥抗土体变形作用能力强,中间框构桥范围的轨道沉降发展缓慢,使得整个下穿范围的既有铁轨变形减小,并且在高低、横向平顺性上有一定提升。

随着交通流量的与日俱增,立交道口规模不断增大,当前已经出现由五至六座框构桥组成的超大立交道口,而多座框构桥的施工顺序及其顶托受力转换对上覆既有铁路轨道变形及平顺性具有至关重要的影响。基于本文研究,分阶段切割既有支撑桩,将既有铁路轨道荷载分阶段施加到各框构桥上,进行多次的受力转换,可显著降低既有铁路轨道的沉降,减小对既有铁路平顺性的不利影响。

既有铁路轨道沉降实测值与数值模拟值的对比表明,二者沉降数据差异较小,处于可接受范围,且二者数据变化规律基本一致,验证了此数值模型的合理性及可靠性。本文所建立的数值分析模型为未来类似工程提供了一个可靠的模型分析工具,可对铁路立交道口下穿过程中既有铁路轨道变形进行预测,配合现场实测为下穿施工提供指导。

4 结论

结合现场实测,应用 Midas GTS 有限元软件对框构桥下穿施工对铁路轨道沉降变形的影响进行分析,得到以下结论:

(1)各工况下的轨道沉降曲线呈对称分布趋势,轨道在支撑桩位置的沉降最小,沉降最大值发生在 D 梁跨中位置,最大沉降值为-3.45 mm,轨道最大水平位移发生在测点 SGC15 支撑桩位置,最大水平位移为 2.26 mm。框构桥施工过程中所引起的轨道高低平顺性偏差与横向平顺性偏差最大值分别为-3.45, 0.626 mm,满足规定限速条件下高低平顺性 22 mm 及水平平顺性 20 mm 的限值要求。

(2)随着各工况施工的进行,框构桥跨度的增大导致其范围内铁路轨道水平位移变化增大。

(3)进行切桩顺序优化后,SGC10 支撑桩位置范围轨道沉降值明显小于原方案轨道沉降值,沉降值减小 49%,使得整个下穿范围的既有铁轨沉降及水平位移减小,平顺性略有提升。

(4)模拟结果揭示,分阶段切割既有支撑桩,将既

有铁路轨道荷载分阶段施加到各框构桥上, 进行多次的受力转换, 可显著降低既有铁路轨道的沉降, 减小对既有铁路平顺性的不利影响。

参 考 文 献

- [1] 吴程程. 大跨度箱涵斜交下穿铁路轨道变形控制及安全施工技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2023. (WU C C. Research on deformation control and safe construction technology of long-span box culvert diagonal crossing railway track [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023. (in Chinese))
- [2] 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, 22(12): 5314-5327. (LAI Y P, HAN Y, GUO S J, et al. Analysis of the dynamic response of the existing line ballasted track structure under the frame bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(12): 5314-5327. (in Chinese))
- [3] 王 鹏, 陈晓静. 复杂环境下铁路下穿立交施工关键技术研究 [J]. 铁道工务, 2024, 2(6): 64-67. (WANG P, CHEN X J. Research on key construction technologies of railway underpass interchange in complex environment [J]. Railway Maintenance, 2024, 2(6): 64-67. (in Chinese))
- [4] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, 1969.
- [5] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846-856.
- [6] 覃卫民, 楚 斌, 龙立志. 大断面箱涵下穿高速公路过程的施工监测分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1790-1797. (QIN W M, CHU B, LONG L Z. Analysis of construction monitoring of large-section box culvert jacking process underpass expressway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1790-1797. (in Chinese))
- [7] 林强强. 矩形顶管引起地面变形的实测分析与控制研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008. (LIN Q Q. Analysis and control of the surface deformation caused by rectangular pipe jacking construction [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [8] 朱正国, 李兵兵, 李文江, 等. 新建铁路隧道下穿既有铁路施工引起的地表沉降控制标准研究 [J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 78-82. (ZHU Z G, LI B B, LI W J, et al. Study on ground surface settlement control standard induced by construction of new-built railway tunnel under-passing existing railway [J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 78-82. (in Chinese))
- [9] 王道远, 袁金秀, 朱永全, 等. 铁路隧道下穿既有专线地表沉降控制基准研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S2): 1945-1950. (WANG D Y, YUAN J X, ZHU Y Q, et al. Study on surface settlement control criterion of railway tunnel crossing under the existing railway line [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S2): 1945-1950. (in Chinese))
- [10] 张 超. 下穿铁路斜交框架桥受力分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2016, 39(11): 80-81. (ZHANG C. Mechanical analysis of skew frame bridge underpassing railway [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2016, 39(11): 80-81. (in Chinese))
- [11] 陈 力, 刁心宏, 杨守兴, 等. 框架桥下穿既有铁路路基沉降控制标准研究 [J]. 现代隧道技术, 2019, 56(2): 111-118. (CHEN L, DIAO X H, YANG S X, et al. Research on subgrade settlement control criterion for a frame bridge passing underneath a existing railway [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(2): 111-118. (in Chinese))
- [12] 岳仁辉, 马 野, 黄从俊, 等. 矩形箱涵下穿公路引起路面沉降控制基准研究 [J]. 公路, 2023, 68(6): 204-209. (YUE R H, MA Y, HUANG C J, et al. Research on control benchmark for pavement settlement induced by rectangular box culvert underpassing highway [J]. Highway, 2023, 68(6): 204-209. (in Chinese))
- [13] 石文阳. 下穿运营铁路大断面框构箱涵施工稳定性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021. (SHI W Y. Study on construction stability of large section box culvert under running railway [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021. (in Chinese))
- [14] 尚培培. 双孔框构桥下穿重载铁路顶进施工条件下线路加固技术研究 [J]. 铁道建筑, 2021, 61(4): 39-43. (SHANG P P. Study on railway reinforcement technology of double-span frame bridge undercrossing heavy haul railway during jacking construction [J]. Railway Engineering, 2021, 61(4): 39-43. (in Chinese))
- [15] 巨高权, 邱玉兴, 杨 毅. 下穿营业线重载铁路框构桥顶进及线路加固施工关键技术研究 [J]. 建筑机械, 2025(4): 259-264. (JU G Q, QIU Y X, YANG Y. Research on key technologies for top entry and line reinforcement construction of heavy duty railway frame bridges underpassing business lines [J]. Construction Machinery, 2025(4): 259-264. (in Chinese))
- [16] 中国铁路总公司. 普速铁路线路修理规则 [M]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019. (China Railway

- Corporation. Rules for maintenance of conventional speed railway lines[M]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2019. (in Chinese))
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering: GB 50911—2013[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [18] 朱 旻, 陈湘生, 张国涛, 等. 花岗岩残积土硬化土模型参数反演及工程应用 [J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1061-1072. (ZHU M, CHEN X S, ZHANG G T, et al. Parameter back-analysis of hardening soil model for granite residual soil and its engineering applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1061-1072. (in Chinese (in Chinese))
- [19] 国家铁路局. 铁路桥涵设计规范: TB 10002—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017. (National Railway Administration. Code for design on railway bridge and culvert: TB 10002—2017[S]. Beijing: China Railway Press, 2017. (in Chinese))

收稿日期: 2025-07-11