

岩质地层超浅埋过街通道近距离上跨运营地铁隧道结构安全分析

刘诣轩

中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308

[摘要]在城市轨道交通密集建设的背景下, 岩质地层中超浅埋过街通道近距离上跨运营地铁隧道已成为地下工程中典型的高风险近接施工场景。此类工程普遍具有覆土厚度小、净距控制严格、围岩扰动敏感、运营安全要求高、施工风险集中等特点, 一旦控制不当极易引发既有运营隧道变形超限、结构开裂、轨道不平顺等问题, 严重威胁地铁运营安全。文章以重庆轨道交通某超浅埋暗挖过街通道为工程实例, 该通道正交近距离上跨既有运营地铁隧道, 埋深仅 2.75m, 最小竖向净距仅 3.89m, 施工安全控制难度突出。研究采用 MIDAS GTS NX 有限元分析软件, 建立三维精细化数值计算模型, 基于 Drucker-Prager 非线性本构模型与地层结构法, 按照实际施工工序开展动态施工全过程模拟, 重点分析新建过街通道开挖对下方运营地铁隧道的变形发展规律、锚杆受力状态、初期支护内力分布以及结构整体安全性的影响。计算结果表明, 在岩质地层条件下, 超浅埋上跨施工引起下方既有运营隧道最大竖向变形均远低于《城市轨道交通结构检测监测技术标准》规定的限值; 初期支护轴力、弯矩均处于合理受力区间, 结构承载力与裂缝宽度均满足原设计标准, 结构整体安全可控。研究成果可为岩质地层超浅埋、小净距、近距离上跨运营地铁类工程的风险识别、安全评估、施工控制及设计优化提供可靠的理论依据与技术参考。

[关键词]岩质地层; 过街通道; 近接施工; 上跨施工; 运营地铁; 数值模拟

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19553

中图分类号: U455.5

文献标识码: A

Safety Analysis of the Structure of a Subway Tunnel with Ultra Shallow Buried Pedestrian Crossings in Rock Formations and Close Range Operation

LIU Yixuan

China Railway Design Group Co., Ltd., Tianjin, 300308, China

Abstract: In the context of intensive construction of urban rail transit, ultra shallow buried pedestrian crossings in rock formations have become a typical high-risk construction scenario for operating subway tunnels in close proximity. This type of project generally has the characteristics of small soil cover thickness, strict control of clearance distance, sensitivity to surrounding rock disturbance, high operational safety requirements, and concentrated construction risks. Once not properly controlled, it can easily cause problems such as deformation exceeding the limit of existing operating tunnels, structural cracking, and uneven tracks, seriously threatening the safety of subway operation. The article takes a super shallow buried and excavated pedestrian crossing in Chongqing rail transit as an engineering example. The crossing crosses an existing operating subway tunnel at an orthogonal close distance, with a burial depth of only 2.75m and a minimum vertical clearance of only 3.89m. The difficulty of construction safety control is prominent. The study used MIDAS GTS NX finite element analysis software to establish a three-dimensional refined numerical calculation model. Based on the Drucker-Prager nonlinear constitutive model and geological structure method, dynamic construction process simulation was carried out according to the actual construction process. The focus was on analyzing the deformation development law, anchor rod stress state, initial support internal force distribution, and overall structural safety of the newly constructed pedestrian passage excavation on the operating subway tunnel below. The calculation results show that under the conditions of rock formations, the maximum vertical deformation of the existing operating tunnel caused by the construction of ultra shallow buried overpasses is much lower than the limit value specified in the "Technical Standards for Structural Inspection and Monitoring of Urban Rail Transit"; The initial support axial force and bending moment are within a reasonable stress range, and the structural bearing capacity and crack width meet the original design standards, making the overall structure safe and controllable. The research results can provide reliable theoretical basis and technical reference for risk identification, safety assessment, construction control, and design optimization of subway projects with

ultra shallow burial, small clearance, and close range operation in rock formations.

Keywords: rock formations; pedestrian crossing; close proximity construction; upside construction; operating the subway; numerical simulation

引言

随着我国城市轨道交通进入网络化运营与高密度建设并行阶段,新建地下通道、地铁出入口、附属结构近距离上跨、下穿、侧穿既有运营地铁隧道的工程越来越普遍。在山地城市中,岩质地层分布广泛,地下工程常面临超浅埋、小净距、复杂地质构造等多重约束,施工扰动对既有运营结构的影响更为显著。其中,岩质地层超浅埋过街通道近距离上跨运营地铁隧道,因覆土薄、洞室间距小、开挖卸荷效应强烈、运营安全零容忍等特点,成为地下工程施工风险控制的重点与难点。

超浅埋近接开挖会引发围岩应力场剧烈重分布、位移场持续发展,造成既有运营隧道产生不均匀沉降、横向收敛、竖向隆起、结构内力重分布等问题。在岩质地层中,岩体虽整体强度较高,但受节理裂隙、风化程度、地下水及施工扰动影响,局部易发生塑性区扩展、围岩强度劣化,进而威胁既有运营隧道结构安全与轨道平顺性。因此,开展岩质地层超浅埋上跨施工对运营隧道影响的定量分析、风险评价与安全控制研究,具有重要的工程价值与理论意义。

目前,国内外学者针对隧道近接施工已开展大量研究,主要采用数值模拟、模型试验、现场监测、理论解析等方法,分析不同地层、不同净距、不同工法下既有结构的变形与受力规律^[1-4]。黄松等通过工程实例分析了地下通道超近距上跨城市轨道交通隧道的施工影响,提出了针对性控制措施^[1];胡瑞青聚焦矿山法隧道超小净距穿越既有地铁结构的问题,开展了专项影响分析^[2];赵耀忠等则重点研究了矿山法隧道上跨既有地铁隧道的安全施工技术^[3];魏纲通过实测数据,分析了基坑开挖对下方既有盾构隧道的影响规律^[4]。但针对岩质地层+超浅埋+过街通道+近距离上跨运营地铁隧道这一组合工况的系统性研究仍相对不足,尤其在山地城市复杂地质条件下,施工扰动规律、风险等级划分、控制指标确定等仍需进一步完善,朱永全等人在隧道近接施工影响预测与控制研究中也指出,复杂地质条件下的近接施工需结合具体工况开展专项分析^[5]。但针对岩质地层+超浅埋过街通道+近距离上跨运营地铁隧道这一组合工况的系统性研究仍相对不足,尤其在山地城市复杂地质条件下,施工扰动规律、风险等级划分、控制指标确定等仍需进一步完善。

本文以重庆轨道交通某超浅埋暗挖过街通道为工程

背景,该通道为岩质地层超浅埋暗挖过街通道,近距离正交上跨既有1号线运营地铁隧道,竖向净距仅3.89m。研究依托MIDAS GTS NX有限元软件建立三维模型,还原真实施工工序与地质条件,系统计算分析施工全过程对既有运营隧道的变形、受力及结构安全影响,明确主要风险源与控制要点,提出针对性风险防控措施,为同类工程提供可复制、可推广的技术思路与分析方法。

1 工程概况与地质条件

1.1 工程概况

本工程为重庆轨道交通某换乘车站,位于重庆市主城区,为满足地面客流集散与过街需求,车站设置出入口暗挖通道,该通道采用暗挖法施工,通道埋深仅2.75m,拱顶位于杂填土中,下半断面位于中风化砂质泥岩与砂岩中。

新建过街通道开挖跨度6.08m,属于中等断面地下通道;既有运营地铁隧道,隧道跨度16.00m,两隧道空间呈正交上跨关系,竖向最小净距仅3.90m,属于典型小净距、近接、高风险施工工程。上跨既有运营地铁隧道,断面形式为马蹄形,开挖宽度为16.0m,开挖高度为11.17m,二次衬砌采用600mm厚C30(P10)防水钢筋混凝土,最小竖向净距仅3.89m,施工安全控制难度突出。同时,通道埋深浅、覆岩薄,属于超浅埋地下工程,开挖后围岩应力释放快、沉降发展迅速,对下方既有运营隧道的安全影响极为敏感,必须进行严格的风险分析与结构安全论证。

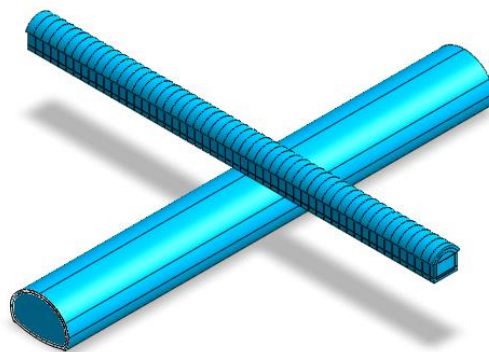


图1 暗挖过街通道上跨运营地铁隧道位置关系图

1.2 工程地质与水文条件

工程场地位于重庆主城区丘陵地带,地层自上而下依次为:素填土、中风化砂质泥岩、中风化砂岩。通道埋深仅2.75m,拱顶位于杂填土中,下半断面位于中风化砂质泥岩与砂岩中。隧道穿越及中夹岩主要为中风化砂质泥岩

与中风化砂岩，岩体完整性较好，强度较高，属于典型岩质地层。但在超浅埋与近距离上跨工况下，开挖卸荷仍会导致中夹岩产生一定的塑性区与位移，需重点关注。

水文地质条件相对简单，地下水位较深，施工期间以围岩裂隙水为主，对岩体强度影响有限。为安全考虑，数值计算中依据地勘报告与设计要求，对围岩弹性模量、粘聚力、内摩擦角等关键力学参数进行 80%折减，以考虑施工扰动、岩体卸荷及局部风化造成的围岩强度弱化效应，使计算模型更偏安全、更贴合工程实际。

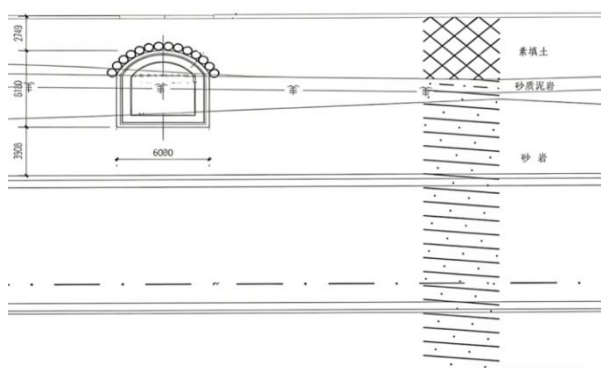


图2 拟建过街通道上跨运营地铁隧道剖面图

表1 数值模拟计算参数表

对象	类型	本构	弹性模量(kPa)	容重(KN/m ³)	泊松比	粘聚力(KPa)	摩擦角(°)
围岩	素填土	莫尔-库伦	1×10^4	20.5	0.45	5	25
	中风化砂质泥岩	莫尔-库伦	2.32×10^6	25.6	0.36	493	32
	中风化砂岩	莫尔-库伦	4.2×10^6	25	0.13	2154	42
轨道结构	二衬结构 C40	弹性	3.25×10^7	25	0.2	—	—
	二衬结构 C30	弹性	3.0×10^7	25	0.2	—	—
施工通道初支	C25 喷射混凝土	弹性	2.8×10^7	22	0.2	—	—
锚杆	锚杆	弹性	2.0×10^8	78.9	0.3	—	—

2 计算模型与分析方法

2.1 计算软件与本构模型

本次研究采用 MIDAS GTS NX 有限元软件进行三维施工全过程数值模拟。该软件在岩土与地下工程领域应用广泛，能够较好地模拟岩土体材料非线性、初始地应力场、施工阶段激活与钝化、应力-位移耦合等关键问题，适用于岩质地层超浅埋近接施工复杂力学响应分析。

模型中围岩与地层采用 Drucker-Prager 本构模型，可以更准确地反映岩质地层在复杂应力状态下的非线性变形与屈服特性；素填土层采用 Mohr-Coulomb 模型。结构单元模拟方式如下：地层与二次衬砌采用三维实体单元，喷射混凝土初期支护采用板单元，系统锚杆与超前锚杆采用植入式桁架单元，能够真实反映支护结构与围岩共同作用的受力机制。

2.2 模型范围、边界条件与计算假定

计算模型按照地下工程常用的 3 倍洞跨原则确定计算范围，以消除边界效应对计算结果的影响；横向为隧道左右两侧各取 3 倍开挖宽度；竖向为底部取至隧道底板以下 3 倍开挖高度，上部取至地表。模型边界条件为底面约束竖向位移，四周约束水平位移，地表为自由面。

计算采用地层结构法与平面应变理论，按实际施工工序进行应力释放。根据设计与规范要求，开挖过程中应力释放 40%，剩余 60%由初期支护承担，以模拟“开挖-支护”协同工作体系。同时，考虑三维空间效应，建立完整的上跨洞室与既有运营隧道空间关系，提高计算精度。

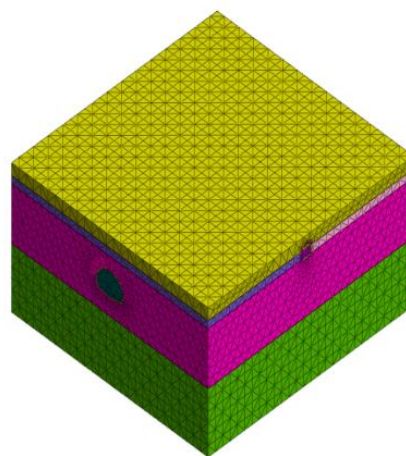


图3 计算模型网格图

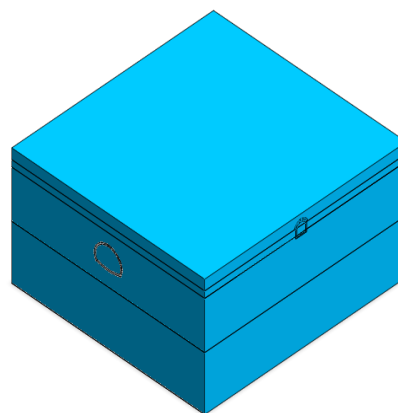


图4 过街通道上跨区间隧道三维模型图

2.3 计算工况与施工模拟步骤

本次计算核心控制工况为：新建岩质地层超浅埋过街通道，正交近距离上跨既有运营地铁隧道，两洞室竖向净距 3.89m，中夹岩为中风化砂质泥岩与中风化砂岩。

表 2 计算工况表

工况	场景	跨度	竖向距离	中夹岩
1	新建出入口通道上跨既有运营隧道	上行：6.08m 下行：16.00m	3.90m	为中风化砂质泥岩与中风化砂岩

为突出最不利风险状态，模拟中采用全断面开挖，不进行台阶划分，使计算结果偏于保守。施工模拟严格按照实际工程流程分为三大步骤：

(1) 初始地应力平衡：施加自重应力场，进行地应

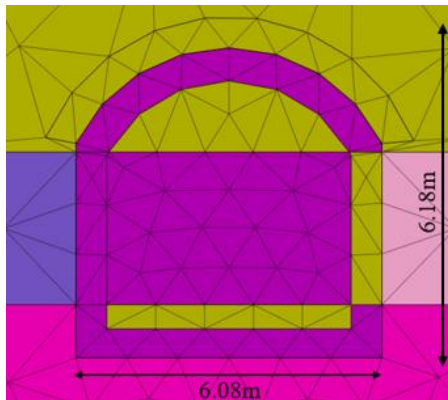


图 5 出入口通道开挖断面模型尺寸示意图

力平衡计算，位移场清零，保证后续开挖在真实初始应力状态下进行。

(2) 既有运营隧道施工模拟：模拟既有区间隧道开挖，依次施作系统锚杆、初期支护、二次衬砌，计算既有运营隧道初始位移与内力。

(3) 新建出入口通道施工：以 2m 为一个循环进尺，逐段进行岩体开挖、锚杆施作、初期支护喷射混凝土、二次衬砌浇筑，循环施工直至通道贯通，每一步均记录应力场与位移场变化。

3 计算结果与施工风险分析

3.1 对既有运营隧道变形影响分析

变形是反映近接施工风险最直观的指标，也是运营地铁安全控制的核心内容。本次计算从竖向沉降、水平位移、周边收敛、地表沉降等多个角度进行分析。

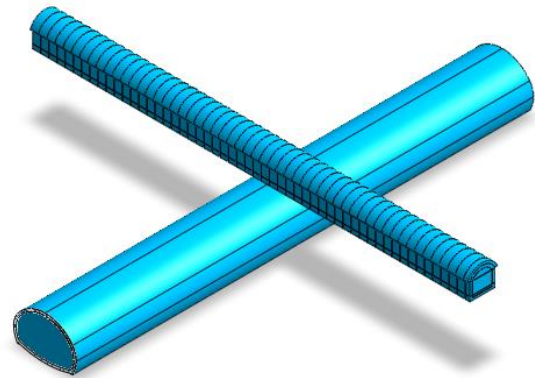


图 6 过街通道正交上跨既有区间隧道模型图

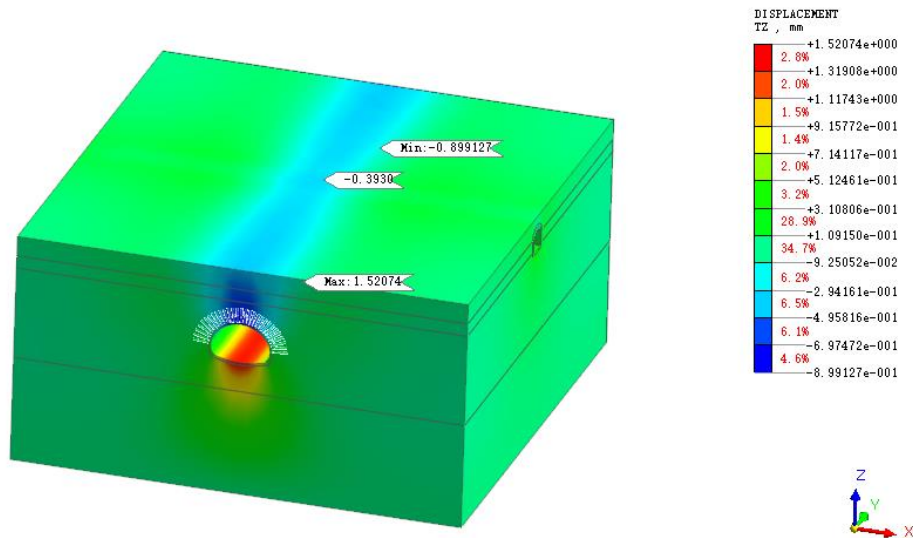


图 7 拟建过街通道对运营地铁隧道及地层竖向位移影响（单位：mm）

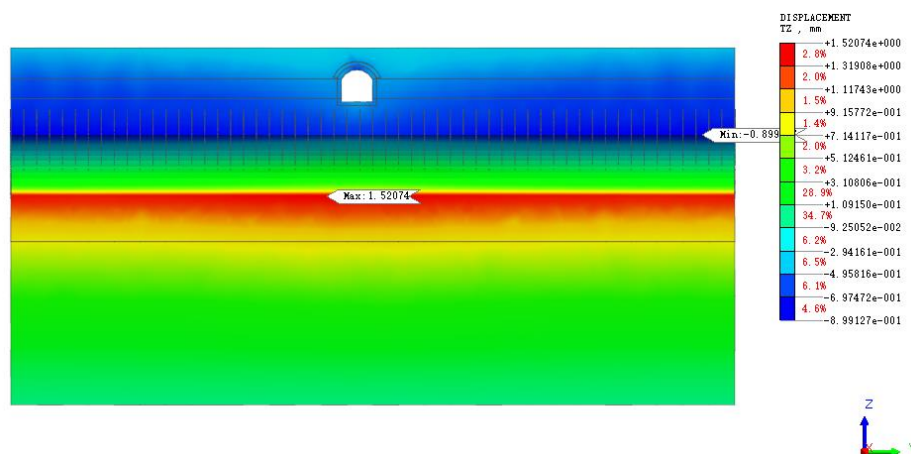


图8 运营地铁隧道纵向剖面竖向位移沉降图 (单位: mm)

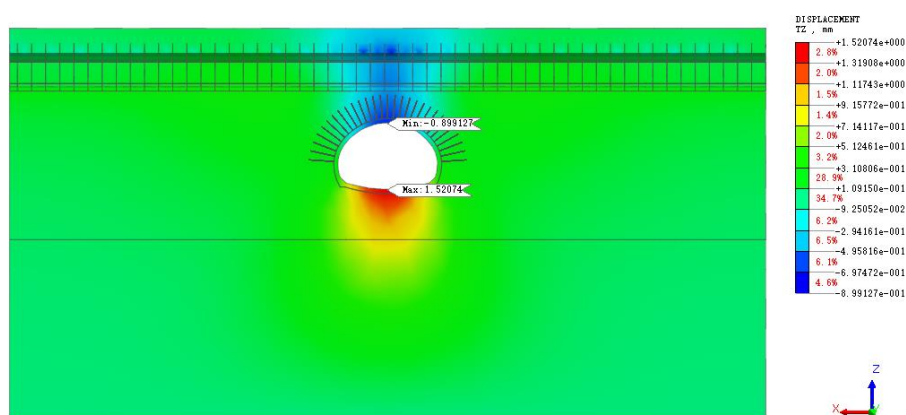


图9 运营地铁隧道横向剖面竖向位移沉降图 (单位: mm)

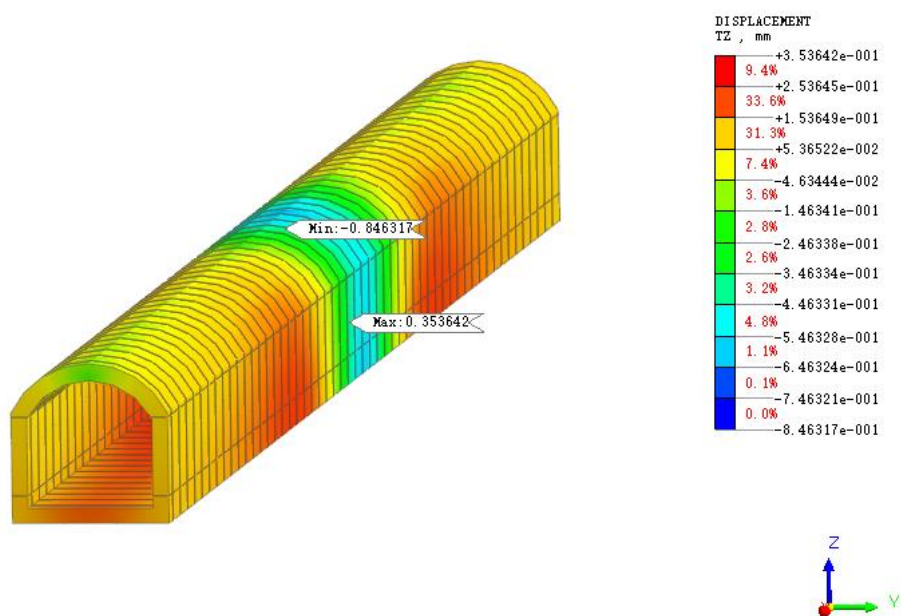


图10 过街通道开挖后竖向位移 (单位: mm)

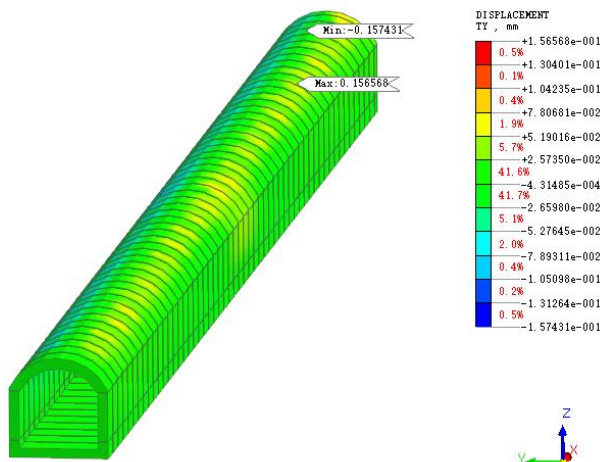


图 11 过街通道开挖后周边收敛 (单位: mm)

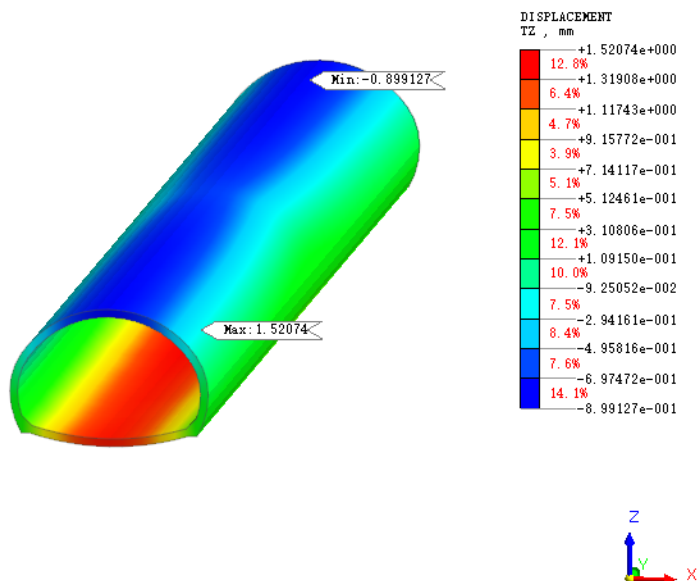


图 12 拟建过街通道开挖后运营地铁隧道竖向位移 (单位: mm)

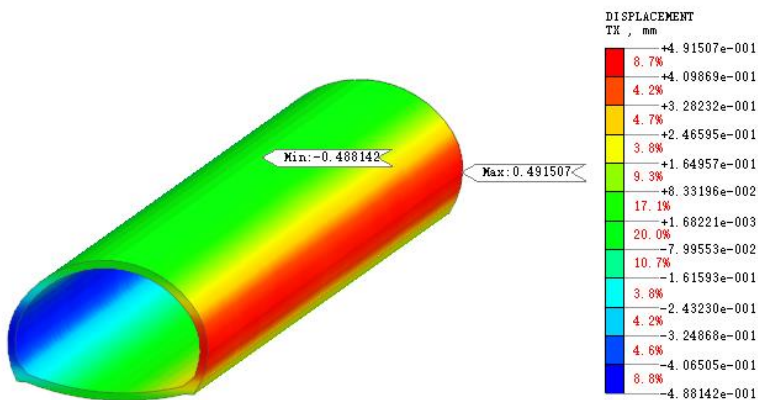


图 13 拟建过街通道开挖后运营地铁隧道水平 (x 方向) 位移 (单位: mm)

计算结果显示:新建超浅埋过街通道自身拱顶最大沉降 0.85mm, 周边最大收敛 0.16mm, 远小于设计控制值; 地表最大沉降 0.39mm, 岩质地层超浅埋开挖引起的地表沉降整体较小; 下方既有运营地铁隧道, 隧道最大竖向变形 1.52mm, 最大横向位移 0.49mm, 纵向位移仅 0.01mm, 差异沉降最大值 0.51mm。

根据《城市轨道交通结构检测监测技术标准》(DBJ50/T-271-2017), 运营地铁隧道结构累计变形控制值为 10mm。对比可知, 本次上跨施工引起的各项变形值均远低于规范限值, 变形发展平稳、无突变, 说明在岩质地层条件下, 围岩自稳能力强, 超浅埋近距离上跨施工对既有运营隧道变形影响可控。

从空间影响范围来看, 新建通道开挖对既有运营隧道纵向沉降影响较小; 横向影响范围相对明显, 塌落漏斗大致覆盖约 10 个循环施工段。因此, 在实际施工中, 应对该范围围岩及既有运营隧道结构进行重点监测与防护, 防止局部扰动过大引发风险。

3.2 对既有运营隧道锚杆受力影响分析

锚杆是隧道支护体系的关键受力构件, 其受力状态直接反映围岩与支护的协同工作性能。计算结果表明, 在新建通道开挖卸荷作用下, 下方既有运营隧道锚杆受力整体平稳: 拱顶部位锚杆以受拉力为主, 拱腰及边墙部位锚杆以受压为主, 受力分布符合隧道典型受力规律。

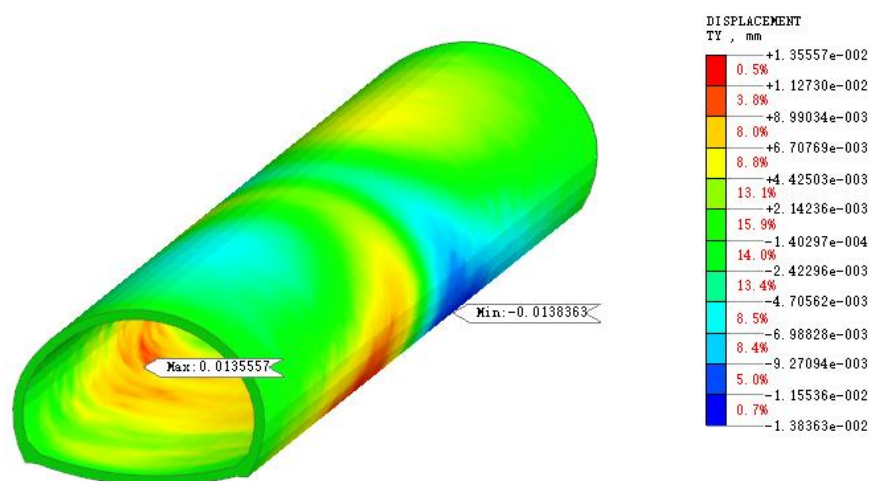


图 14 拟建过街通道开挖后运营地铁隧道水平 (y 方向) 位移 (单位: mm)

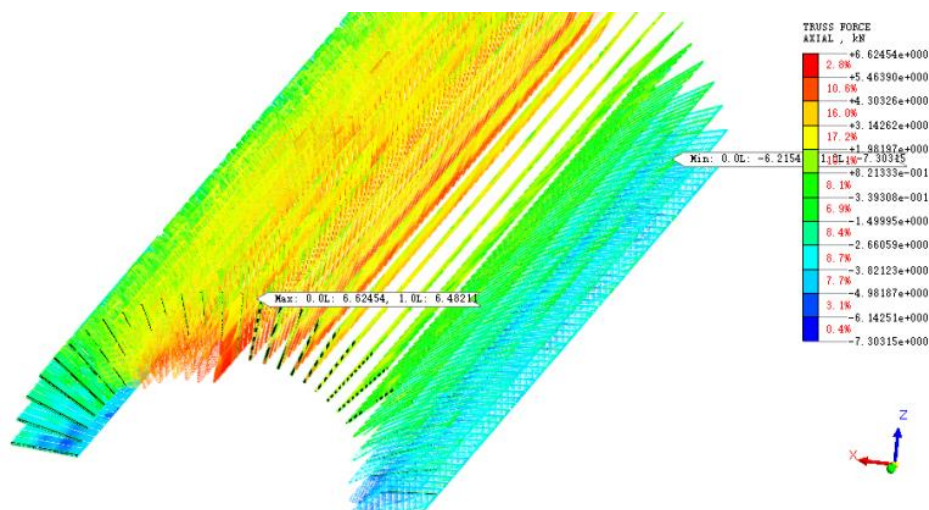


图 15 拟建过街通道对运营地铁隧道锚杆受力影响

既有运营隧道锚杆最大拉力约 6.62kN，最大压力约 7.30kN，数值均处于较低水平。依据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086-2015)相关要求，锚杆承载力与拉拔性能均满足规定，安全储备充足，在施工扰动下不会发生屈服、断裂或失效，锚杆体系安全可靠。

3.3 对既有运营隧道初期支护受力影响分析

初期支护承担主要施工荷载，其轴力与弯矩是判断结构安全的重要依据。计算给出了既有运营隧道初期支护横

向与纵向的轴力、弯矩最大值：横向最大受拉 59.09kN，最大受压 567.11kN；最大正弯矩 5.29kN·m，最大负弯矩 9.84kN·m；纵向最大受拉 53.41kN，最大受压 545.60kN；最大正弯矩 5.21kN·m，最大负弯矩 7.06kN·m。

从数值上看，支护结构以受压为主，符合隧道支护典型受力特征，未出现拉应力过大或弯矩超限情况，结构处于弹性受力阶段，无塑性损伤风险，能够保证既有运营隧道在施工全过程中的安全与稳定。

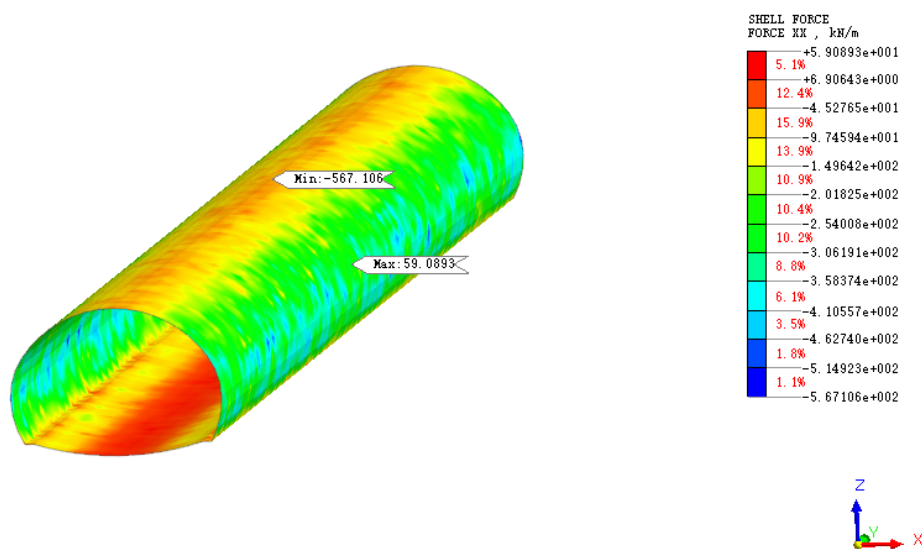


图 16 拟建过街通道对运营地铁隧道初期支护横向轴力影响

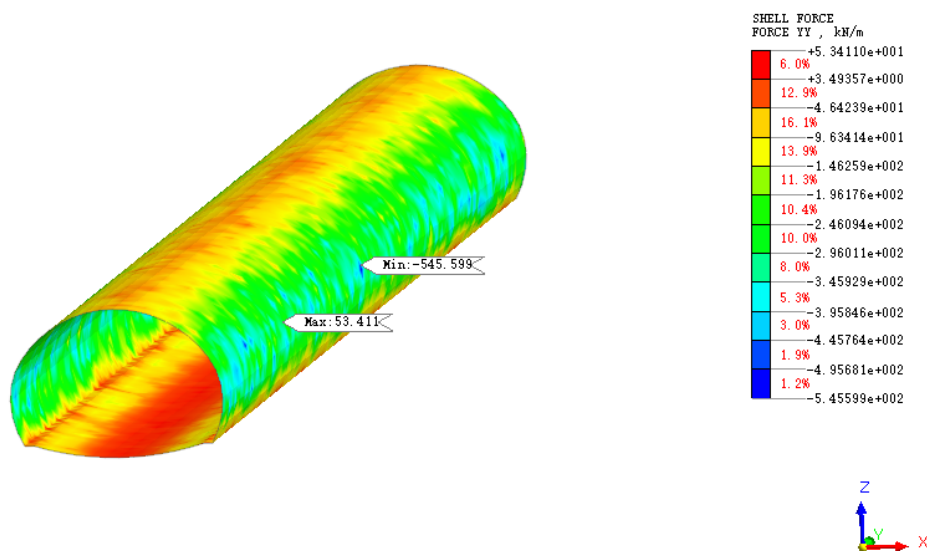


图 17 拟建过街通道对运营地铁隧道初期支护纵向轴力影响

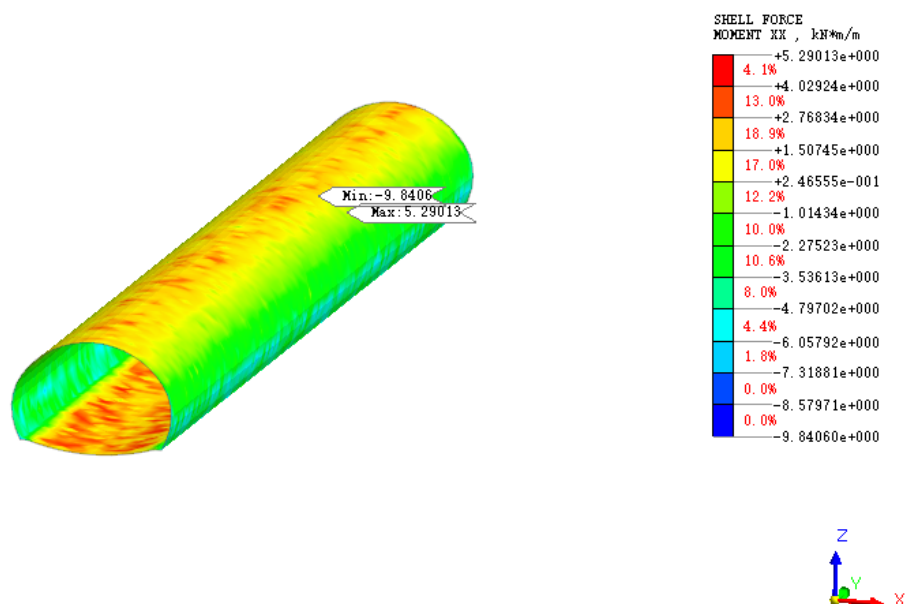


图 18 拟建过街通道对运营地铁隧道初期支护横向弯矩影响

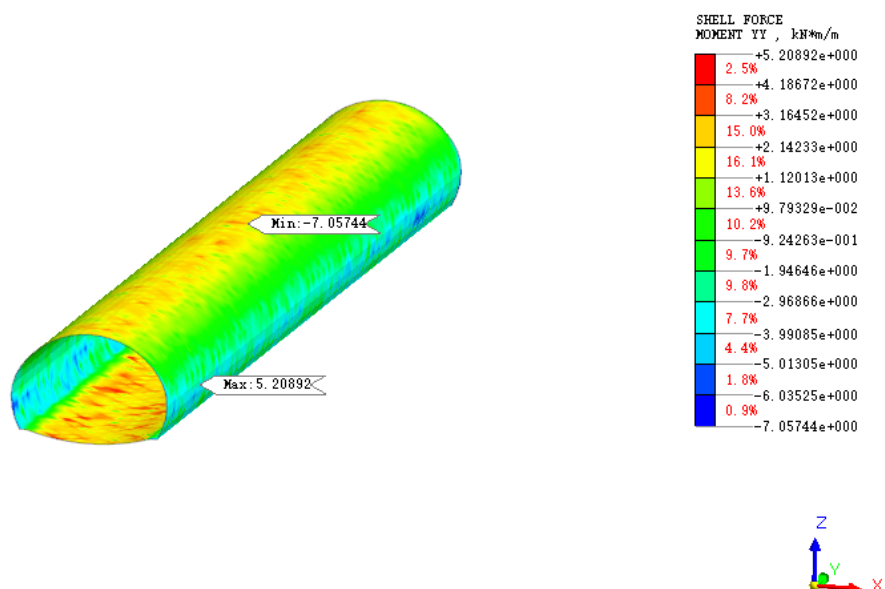


图 19 拟建过街通道对运营地铁隧道初期支护纵向弯矩影响

表 3 运营地铁隧道初期支护内力表

受力最值	初期支护 横向轴力 (N)	初期支护 纵向轴力 (N)	初期支护 横向弯矩 (N*m)	初期支护 纵向弯矩 (N*m)
受拉	59089.3	53411	5290.13	5208.92
受压	567106	545599	9840.6	7057.44

4 施工风险控制措施与建议

结合岩质地层、超浅埋、近距离上跨、运营地铁四大特点，在本工程及同类项目中应采取以下风险控制措施：

(1) 强化全过程监控量测：以既有运营隧道拱顶沉降、隧底隆起、结构收敛、轨道高差、地表沉降为核心监测项目，制定分级预警阈值，实现 24 小时自动监测与数据反馈，做到风险早识别、早预警、早处置。

(2) 严格控制开挖工序与扰动强度：采用短进尺、弱爆破、弱扰动、快封闭、强支护的施工原则，控制单循环进尺不超过 2m，减少一次开挖卸荷量，降低对中夹岩与既有运营隧道的瞬时冲击。

(3) 加强预支护与围岩加固：对通道拱部及中夹岩

采取超前小导管、超前注浆或超前管棚进行预加固,提高岩质地层整体性与自稳能力,抑制沉降发展,减小施工扰动范围。

(4) 实施信息化动态施工:建立“监测—分析—反馈—调整”一体化机制,根据实时监测结果动态调整支护参数、开挖步序与施工进度,实现风险可控、施工有序、运营安全。

(5) 完善应急预案与运营协同:制定针对沉降超限、变形突变、局部掉块、涌水等突发事件的应急预案,与运营单位建立实时沟通机制,必要时采取限速、临时封闭等措施,最大限度保障运营安全。

5 结论

(1) 在岩质地层条件下,超浅埋过街通道近距离上跨运营地铁隧道施工,对下方既有运营隧道变形影响显著小于软土地层,施工风险整体可控,不影响既有线路正常运营。

(2) 新建通道施工后,既有运营隧道锚杆受力、初期支护轴力与弯矩均处于安全合理范围,岩质地层应力传递平稳,未出现应力集中与结构损伤,结构整体安全储备充足。

(3) 超浅埋小净距上跨施工的主要影响区域为横向塌落漏斗范围,应将该区域作为施工与监测重点,通过预支护、弱扰动、强监测实现风险闭环控制。

(4) 本研究形成的“建模—计算—分析—防控”成套方法,适用于山地城市岩质地层中超浅埋、小净距、近距离上跨运营地铁的附属工程施工安全分析,具有较强的工程推广价值。

【参考文献】

- [1]黄松.地下通道超近距上跨城市轨道交通隧道结构施工影响分析[J].城市轨道交通研究,2023,26(9):100-104.
- [2]胡瑞青.矿山法隧道超小净距穿越既有地铁结构影响分析[J].铁道标准设计,2025,69(3):112-117.
- [3]赵耀忠,张益,韩龙伟.矿山法隧道上跨既有地铁隧道安全施工分析[J].交通工程,2024(6):78-83.
- [4]魏纲.基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J].岩土力学,2013,34(5):1421-1428.
- [5]朱永全,张素敏,王道远.隧道近接施工影响预测与控制[M].北京:中国铁道出版社,2019.

作者简介:刘诣轩(1990.09—),现就职于中国铁路设计集团有限公司,毕业于西南交通大学 建筑与土木工程。