

复杂明挖异型隧道施工力学效应及控制措施研究*

阮孝辞¹, 杨艳红², 李富成¹, 余廷舜¹, 田丰铭³, 刘建松⁴

(1.云南交发公路工程有限公司, 云南 昆明 650100; 2.云南省普通国道公路建设指挥部, 云南 昆明 650100; 3.咸丰县
交通运输综合执法大队, 湖北 恩施 445000; 4.中铁二十四局集团西南建设有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 为了更深入的探究复杂异型明挖隧道施工力学特性, 以重庆金州大道与星光大道延伸段节点改造工程为工程背景, 在明确异型隧道各隧洞受力状态的差异性及受力特征的基础上, 提出具有针对性的喷锚支护和 C15 混凝土换填处理联合控制措施, 并对底部隧道两侧混凝土换填深度进行分析。研究结果表明: 通过一系列数值模拟分析, 复杂明挖异型隧道施工力学突出特征可凝练为剪切破坏大、应力集中现象突出、存在变形和应力突变关键点; 先建隧道受后建隧道和回填施工扰动的剧烈影响, 造成严重的剪切破坏, 因此破坏风险最高; 喷锚支护和 C15 混凝土换填联合控制措施对复杂异型隧道剪应力影响显著, 当混凝土换填深度为 11m 时, 各隧道剪应力得到有效控制, 分别减小 43.5%、27.5% 和 5.9%, 且最终满足极限抗剪强度要求, 有效的保证了隧道回填施工安全。

关键词: 明挖异型隧道; 施工力学效应; 喷锚支护; 数值模拟; 现场实测

中图分类号: U458.1

文献标志码: A

文章编号:

Study on the mechanical impacts and prevention strategies of building intricate cut-and-cover special-shaped tunnels

Ran Xiaoci¹, Yang Yanhong², Li Fucheng¹, Yu Tingshun¹, Tian Fengming³, Liu Jiansong⁴

(1. Yunnan Jiaofa Highway Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650100; 2. Headquarters for the construction
of general national highways in Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650100; 3. Xianfeng County Traffic and
Transportation Comprehensive Law Enforcement Brigade, Enshi, Hubei 445000; 4 Southwest Construction Co.,
Ltd., China Railway 24th Bureau Group, Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to further explore the mechanical characteristics of the construction of complex special-shaped open-cut tunnels, taking the reconstruction project of the extension section of Jinzhou Avenue and Xingguang Avenue in Chongqing as the engineering background, on the basis of clarifying the differences and stress characteristics of the stress states of each tunnel of the special-shaped tunnel, the joint control measures of targeted spraying anchor support and C15 concrete replacement treatment were proposed, and the concrete replacement depth on both sides of the bottom tunnel was analyzed. The findings reveal that by a series of numerical simulations, the noteworthy mechanical properties of complex open-cut special-shaped tunnels may be reduced to the critical areas of substantial shear failure, notable stress concentration, deformation, and stress abrupt change. The disturbance caused by the latter tunnel and backfill construction dramatically affects the first-built tunnel, resulting in serious shear failure, posing the greatest danger of damage. When the concrete replacement depth reaches 11m, the shear stress of each tunnel is efficiently managed, reducing it by 43.5%, 27.5%, and 5.9%, respectively, and eventually meeting the ultimate shear strength criteria, effectively ensuring the safety of tunnel backfill construction.

Key words: Cut-and-cover special-shaped tunnels; impacts of construction mechanics; Spray anchor assistance; Computer simulation; local measurement

0 引言

明挖隧道施工力学效应与施工工序、回填材料和隧道空间位置等密切相关, 直接对控制措施的设计与方案选取产生显著影响。由于隧道断面形式的多样性、回填材料的多样性、空间位置分布复杂性和加载效应的时空性等影响, 使其结构的力学特性和安全难以预测, 增加了施工风险的不可控性。

国内诸多学者通过数值模拟、室内试验、理论分析和现场原位试验等多种单一或组合研究方法对明挖隧道力学特性和控制方案进行研究。欧孝夺^[1]等基于大断面四孔箱型明挖隧道原位监测试验, 以结构应变为评价指标, 明确隧道两侧不对称回填及顶部不均匀覆土将导致墙体支座处混凝土拉压状况处于往复变化的不利状态, 阐明结构应变随回填施工工序时变规律。李丹妮^[2]等采用地层结构法

*中铁二十四局集团研究课题 (2020-JX-Q-006)

作者简介: 杨艳红, 高级工程师, E-mail: 491764259@qq.com

通信作者: 阮孝辞, 高级工程师, E-mail: 6814911@qq.com

投稿日期: 2023-11-16

和荷载结构法, 建立超大跨顶板折板底板错层明挖隧道结构模型, 给出支护结构受力分布特征, 并对结构进行优化设计。马相峰^[3]等通过设计模型试验研究开挖与回填过程中隧道结构与回填土的动态作用关系, 揭示了隧道受力规律与承载拱的产生。李明^[4]等基于等质量置换原则, 建立不同置换深度及角度下高填明洞模型, 得到合理置换范围及置换深度。张祖迪^[5]等通过数值法模拟复杂明挖并行隧道群回填施工全过程, 得出在复杂隧道上下交叠位置回填区域采用改良土或混凝土等材料替代普通土, 能有效的控制地表沉降。张民庆^[6]等基于明挖隧道衬砌裂缝形状、数量、宽度、长度与裂缝深度的关系, 研究衬砌破坏原因并提出合理预防措施。林永贵^[7]等借助有限元对深覆土超大跨明挖隧道力学行为、断面优化设计和施工工艺开展多方面分析, 提出了直墙折板式断面设计和隧道顶空心板设计方案。此外林永贵^[8]等还通过研究论证、模拟计算、方案比选等方法明确了超大断面明挖隧道施工方案, 并形成了一系列关键技术。

1 工程背景与数值模型

金州大道和星光大道延伸段节点改造工程是加快渝北星光大道南北向道路交通连通的关键性节点工程(见图1),其深厚区由上下、右侧三洞交叠组成地下三层复杂异型隧道。三洞叠交隧道埋深最深为34.3m,上下两隧道净距为10.8m,右侧

图 1 金州大道与星光大道节点改造工程平面

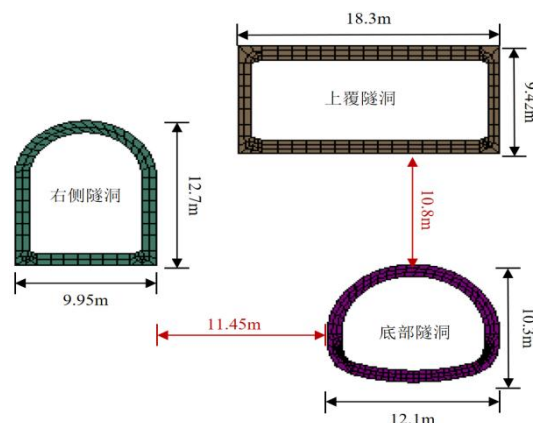


图 2 三洞叠交隧道几何尺寸 (单位: m)

隧道采用明挖顺做法进行施工,即先回填底部隧洞,次回填右侧隧洞,最后回填上部隧洞,且均采用分层对称回填,回填施工步序如图3所示。相较于不均匀及左右不对称回填施工,分层对称回填施工对隧道结构的扰动次数少,且有利于减少回填过程中不对称施工对隧道两侧产生的不均匀侧向压力,同时更有利于隧道回填过程中的稳定,因此最终实际采用分层对称回填法对各个隧洞进行施工。隧道衬砌采用现浇施工,待衬砌结构达到设计强度后即刻开始回填施工。

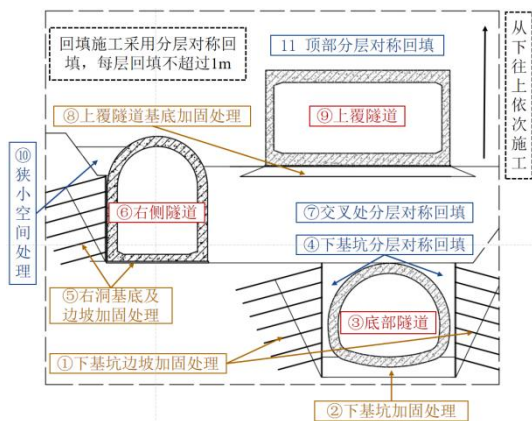


图 3 回填施工步骤

Fig.3 Backfilling construction process

三洞叠交隧道线路区域底层岩性主要以第四系松散性岩土和侏罗系基岩为主，可划分为素填土、中风化砂岩、和 中风化泥岩（见图 4）。隧道底层地下水主要以第四系孔隙水和基岩裂隙水为主，第四系孔隙水主要分布于局部地势较低地段，赋存于填土中，而基岩裂隙水主要赋存于基岩裂隙中，且含水量较少，在基坑开挖时已大量排出，因此不做考虑。

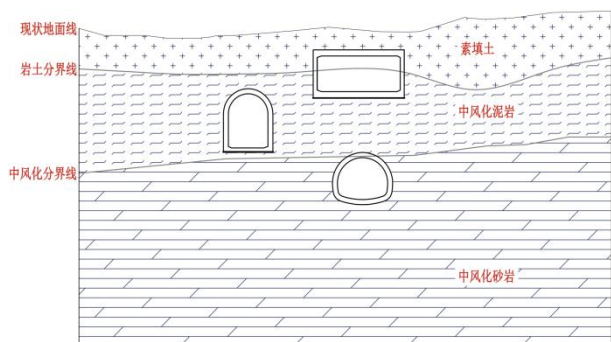


图 4 地层断面

Fig.4 Stratigraphic section

1.2 计算模型与基础算例

利用大型通用有限元模拟软件 ABAQUS, 对三洞复杂明挖异型隧道结构的回填施工过程进行模拟。为弱化边界效应的影响，整个数值模型左右宽度取 190m，上下高度取 78m 来体现回填施工过程中各隧道施工力学效应（见图 5），模型中岩体及回填土体采用遵从摩尔-库伦屈服准则的 shell 单元来模拟，结构主体及用于基底加固的 C15 混凝土材料采用弹性 shell 单元来模拟，模型共计 7621 个单元，7979 个节点。建模过程中将地表取为水平，且各岩层分布考虑为均匀分布，并将模型底部边界进行固定，左右两侧边界施加水平位移限制。这里需要指出的是，该模型本构关系及模拟方法的合理性

在文献[9]中以加已验证。

数值模型算例中，隧道埋深最深为 24m，各隧洞结构尺寸及间距见图 2。结合地质报告，回填土与结构间摩擦系数取 0.3。由于结构施做时，基坑变形和地层应力已大致稳定，因此模拟中主要考虑回填施工对结构变形和力学效应的影响。

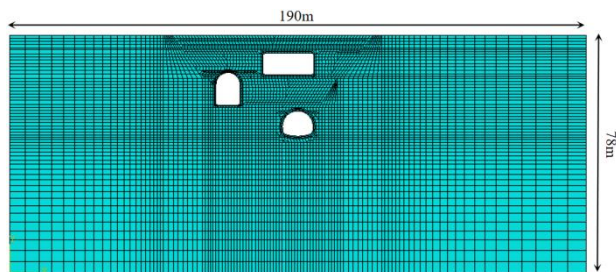


图 5 复杂明挖隧道数值计算模型

Fig.5 Complex cut-and-cover tunnels numerical computation model

岩层、衬砌及回填材料的物理力学参数依据《公路隧道设计规范》（JTG D70-2004）^[10]、《混凝土结构设计规范》（GB 50010-2010）^[11]以及工程地质报告（见表 1）。按实际的施工工法和回填顺序，每层填土高度取 1m，且均采用对称回填施工。底部隧道先回填，右侧隧道次回填，最后对上覆隧道进行回填。

表 1 基本材料计算参数

Table 1 Fundamental material calculation criteria

材料	$\gamma/(\text{KN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 C/kPa	$\phi/(\text{°})$
中风化泥岩	24	750	0.15	276	33
中风化砂岩	25.1	3760	0.2	1094	37
土石混合回填土	20	90	0.4	14.5	20
C40 混凝土	24	33 500	0.2		
C15 混凝土	23.7	22 000	0.2		

2 复杂明挖隧道施工力学效应分析

既有研究^[12-13]表明位移和应力是反映隧道安全的主要指标，因此本文将从隧道变形和应力两个方面对复杂明挖隧道施工力学效应系统地进行数值模拟，凝练复杂明挖隧道施工力学效应的特点。并通过相关变形、应力控制值对回填方案进行优化，得出最佳控制方案。

2.1 隧道回填施工变形分析

在回填施工过程中，各隧道受到回填施工扰动的影响，不同回填施工步骤产生的加载效应持续向

下传递，引起各隧道结构较大的变形。以3洞复杂明挖异型隧道算例为研究对象，得出各洞结构竖向位移及水平收敛的位移云图（见图6）和位移增量的时程变化曲线（见图7，8）。

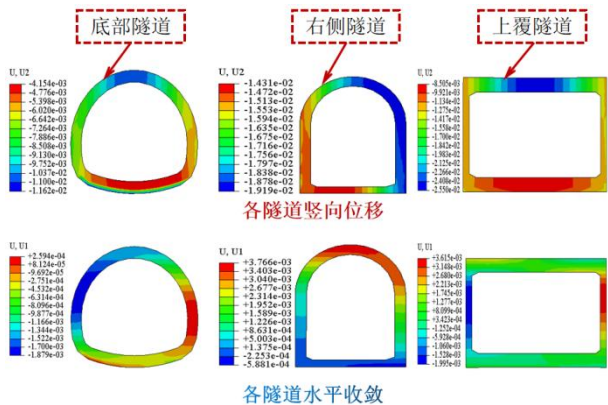


图6 各隧道位移云图

Fig.6 Each tunnel's displacement cloud

在回填施工加载效应的影响下，各隧道主要以竖向沉降为主（以隧道顶部沉降最大），底部隧道、右侧隧道和上覆隧道的沉降终值分别为11.6、19.2和25.5mm（见图6），且沉降终值最小值发生在底部隧道，这主要由于下基坑基底采用C15混凝土进行改善，使下基坑基底刚度得到一定程度的提升，除此之外也使得底部隧道竖向约束变得更强，意味着底部隧道与地层接触面发生协同变形时，基底改善所引起的强约束作用，导致底部隧道沉降减小。

由各隧道竖向位移和水平收敛增量时程曲线可知，研究断面底部隧道位移增量均经历了平稳、沉降突变（下基坑回填结束）、平稳、沉降突变（上覆隧道施工）和平稳等5个发展阶段；而右侧隧道和上覆隧道位移增量则经历了平稳、沉降突变和平稳3个发展阶段，且各隧道位移增量发展趋势均随施工步序的转换而相互转换。

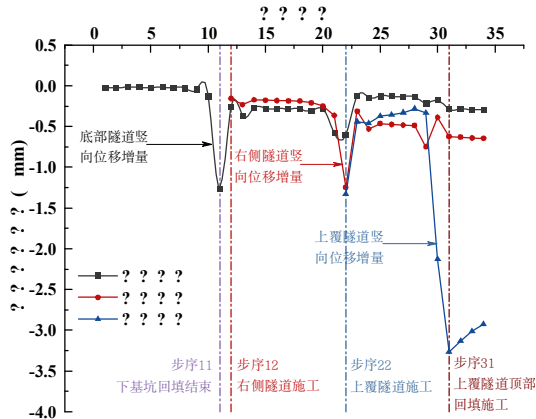


图7 各隧道竖向位移增量时程曲线

Fig.7 shows the vertical displacement increment over time for each tunnel

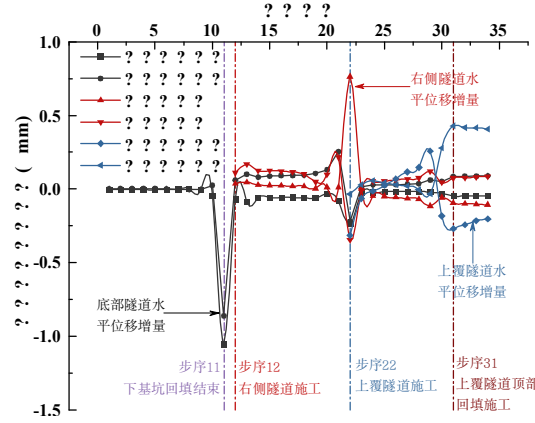


图8 各隧道水平收敛增量时程曲线

Fig.8 Each tunnel's horizontal convergence increment time history curve

这一发展历程意味着，底、右、上三洞在回填施工过程中受加载效应的影响较大，尤其是先建隧道在后建隧道施工时受后建隧道施工的强烈扰动影响，使其变形在该施工步序发生突变，表明临近隧道之间的施工扰动作用非常显著。位移突变是诱发隧道结构开裂、失稳甚至发生破坏的主要原因，也是施工过程中结构产生应力集中的主要表现，导致隧道结构承载能力大幅降低，进而引发结构产生较大的变形且容易开裂、失稳，这与常规明挖隧道施工力学状态具有显著差异。

2.2 隧道回填施工力学效应分析

图9呈现了回填施工结束后各洞室最大主应力和剪应力分布状态，且结构部分部位剪应力超过C40混凝土极限抗剪强度1.35MPa（见表2）。

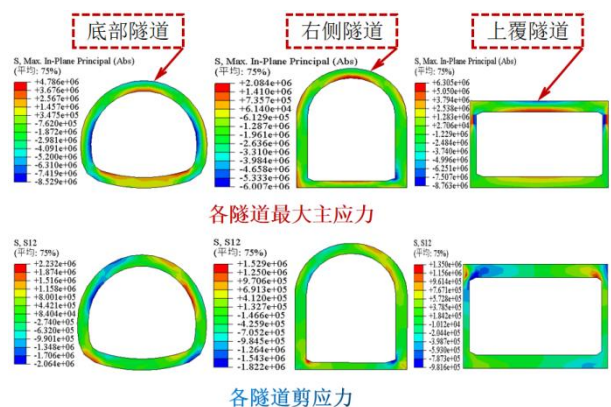


图9 各隧道应力云图

Fig.9 Each tunnel's stress cloud plot

表2 基础算例剪应力超限及最大剪应力统计

Table 2 provides statistics on the maximum shear stress and shear stress overflow in the basic research scenario

三洞最大剪应力	底部隧道	右侧隧道	上覆隧道	平均值
---------	------	------	------	-----

限值 (MPa)	1.35			
终值 (MPa)	2.23	1.82	1.35	1.8
剪应力超限率	65.2%	34.8%	0%	33.33%

从图表易得，在回填施工扰动作用和加载效应的影响下，底、右和上三洞拱腰、拱脚和侧墙部位为应力主要集中区域，且底洞、右洞和上覆隧道的最大剪应力终值分别为 2.23，1.82，1.35MPa，剪应力超限率（剪应力超限值（终值与限值的差）占 C40 混凝土极限抗剪强度限值的比率）分别为 65.2%，34.8%和 0。三洞的平均剪应力超限率为 33.33%，表明三洞拱腰、拱脚和侧墙部位力学性能大幅降低，且承载性能较薄弱，安全风险也随之增加。

复杂明挖异型隧道 3 洞剪应力均超过极限抗剪强度，意味着隧道结构受回填施工扰动过大，回填施工产生剧烈加载变形，导致结构应力集中现象非常严重，特别是底部隧道的应力集中现象最为显著，因此底洞发生破坏的风险最大，安全状态最差。基于参考文献[6]明挖法隧道衬砌开裂原因分析与预防措施研究，可知施工工序是影响结构力学响应的重要因素，因此能够预测在复杂明挖异型隧道回填施工时，其结构力学响应机制变得更为复杂，结构发生破坏的可能性急剧增加，必须采取有效控制措施进行控制。

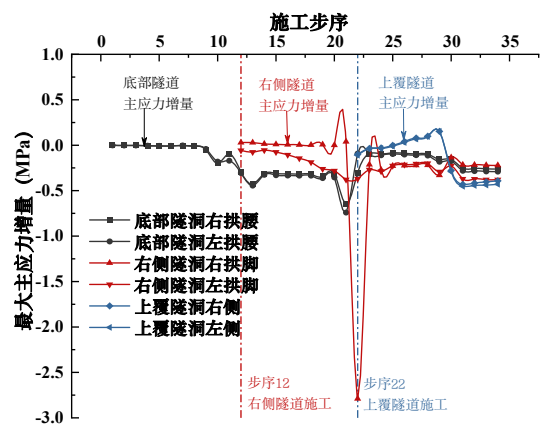


图 10 各隧道最大主应力增量时程曲线 (MPa)

Fig.10 Time history curve of each tunnel's greatest primary stress increase (unit: MPa)

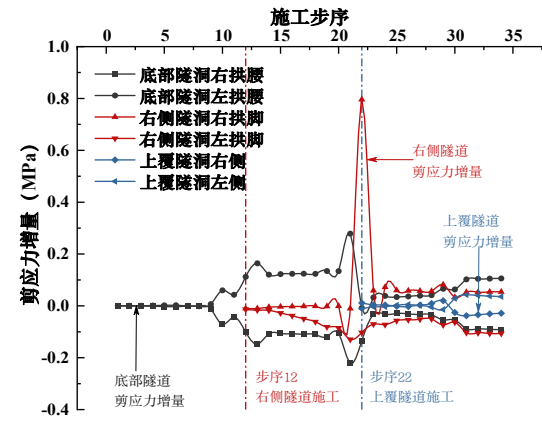


图 11 各隧道剪应力增量时程曲线 (单位: MPa)

Fig.11 Time history curve for each tunnel's shear stress increment (unit: MPa)

应力增量变化一定程度上能有效的展现隧道结构在回填施工过程中受力状态随施工步序转换的特征，也能进一步量化每一施工步对隧道结构所引起的加载效应。图 10 反映了回填施工过程中各隧洞最大主应力增量变化规律。对于底部隧道和上覆隧道而言，整体上最大主应力增量较稳定发展，最大应力增量仅有-0.65MPa 和-0.45MPa；对于右侧隧道而言，在上覆隧道施工时拱脚处最大主应力增量急剧升高至 2.79MPa，说明这一施工步序引起的加载效应非常剧烈，对右侧隧道拱脚处受力极为不利，结构破坏风险也急剧增加。

图 11 表征了回填施工步序转换对各隧道剪应力增量的影响规律。整体上来说，在回填加载效应影响下，各隧道剪应力呈对称分布且仅在回填步序 9~22 阶段增量较大，其余回填步序剪应力增量变化较平稳；对于右侧隧道而言，在上覆隧道施工时拱脚处剪应力增量升高到 0.8MPa，这意味着此时右侧隧道拱脚处剪切破坏风险急剧增大，承载能力也随之减小。复杂明挖异型结构空间位置和回填材料普遍较复杂，施工工序较繁琐，较大的应力集中现象说明隧道结构受多次施工扰动和回填材料的不均匀沉降会对结构局部产生较大的剪应力，结构强度随之急剧降低，也容易诱发结构剪切破坏，因此给工程建设带来了巨大挑战。

3 复杂异型明挖隧道结构安全控制手段

不同于普通明挖单（双）洞隧道，复杂异型明挖隧道存在上覆、下穿等复杂结构空间位置，回填材料和施工工序也极为复杂，隧道结构的安全风险更为突出，必须有针对性的采取相应措施加以解决。

3.1 控制措施分析

根据数值模拟分析，对于复杂异型明挖隧道而言，变形和应力突变现象十分严重，如果仅采用简单材料换填处理措施，难以控制结构施工过程中的稳定性和安全性，需要增强支护措施，特别要注重基坑的稳定性和回填材料的沉降控制，来减少回填过程中差异沉降所引起的应力集中现象。

根据明挖隧道明洞-填土-地基及基础作用机理[14]，隧道结构与基底、回填土形成一个共同作用结构体系，在回填过程中填土以及基底的不均匀沉降会诱发结构产生不均匀沉降，也容易引起结构应力集中，且对于多结构的异型明挖隧道结构，在施工过程中结构的变形和受力具有明显的阶段性，结构的应力集中现象也越发明显。

在回填施工过程中，结构、填土和原岩层力学状态存在承载和加载 2 种状态相互转变，是一种动态发展的过程，如果对基底以及异型结构空间交叉位置提前进行加固处理，可以有效提升结构承载力，对其结构安全起到很好的控制效果，降低施工风险。

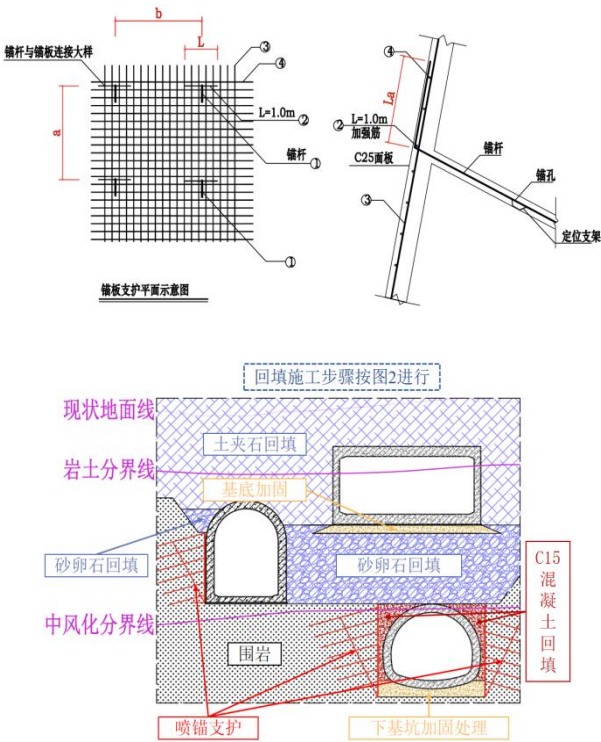


图 12 喷锚支护与 C15 混凝土换填处理

Fig.12 Spray anchor support and C15 concrete replacement technique

为此，能够通过锚喷支护（见图 12）和 C15 混凝土换填等控制措施，来有效支护结构免于剪切破坏，可以对异型结构应力集中现象起到削弱效果，最终对隧道结构局部剪应力过大的严重问题起到控制作用。

3.2 复杂明挖异型隧道结构参数优化

为提高复杂明挖异型隧道结构安全性及基坑稳定性，对底部隧道基坑采用喷锚支护和隧道两侧换填 C15 混凝土 2 种控制措施进行加固处理，并通过数值模拟验证其控制措施的合理性。选定各洞室最大沉降及剪应力作为评定指标，通过对比优化前后各洞室沉降及剪应力的变化来判断控制措施是否合理。

根据重庆金州大道与星光大道延伸段节点改造过程实际工况，3 洞室的几何尺寸参照图 1，注浆和换填材料和锚喷参数按表 3、表 4 取，其余施工参数参照 1.2 小节基础算例参数。

表 3 复杂明挖异型隧道围岩及支护参数

Table 3 Complex cut-and-cover tunnel supporting characteristics and surrounding rock

材料	$\gamma/(\text{KN.m}^3)$	E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 C/kPa	$\varphi/ (^{\circ})$
砂卵石	18.9	20000	0.3	0	12
C40 混凝土	24	33500	0.2	/	/
C15 混凝土	23.7	22000	0.2	/	/
C25 混凝土	24	28000	0.2	/	/

表 4 基坑边坡支护参数

Table 4 shows the foundation pit's slope support characteristics

结构名称	混凝土	几何尺寸/cm
	锚杆型号	
锚杆	HRB400	22 格栅钢架@200×200，孔径 7.5
锚板	C25	厚 10

锚杆采用线单元模拟，孔径 7.5mm，锚板及隧道结构弹性模量采用折算法计算（如式 1），数值模型图如图 13 所示。

$$E = E_0 + \frac{S_g \times E_g}{S_c} \quad (1)$$

式中： E_0 为原混凝土弹性模量； S_c 为混凝土截面积； S_g 为钢筋截面积； E_g 为钢筋弹性模量。

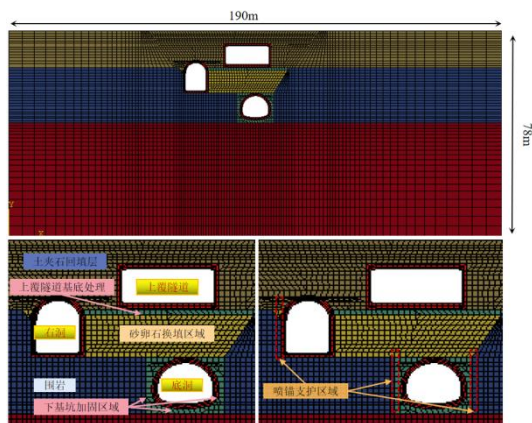


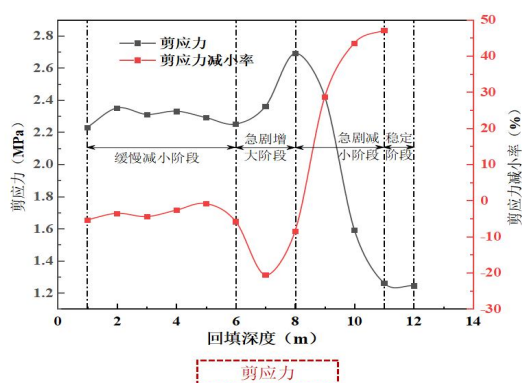
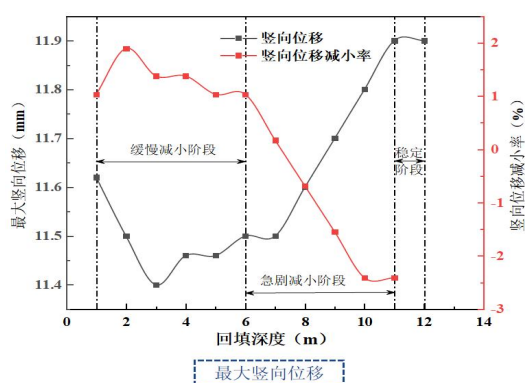
图 13 复杂明挖异型结构喷锚和 C15 混凝土换填联合控制

Fig.13 shows joint management of spray anchor and C15 concrete replacement in a complex open-cut special-shaped structure

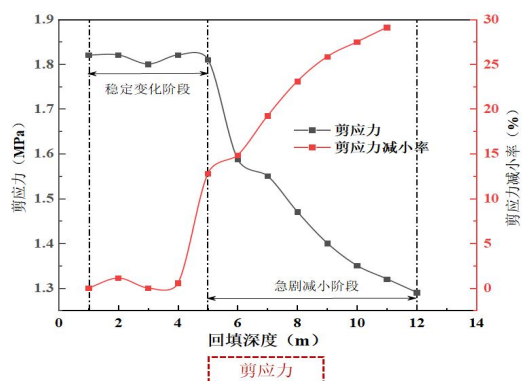
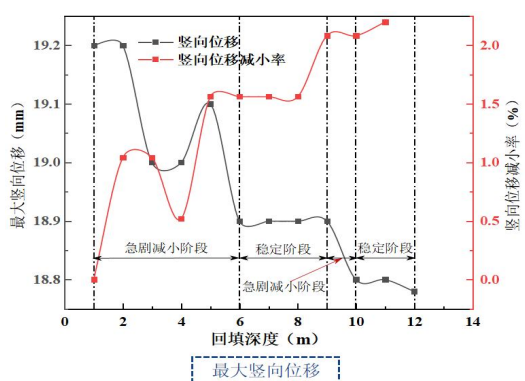
随着底部隧道两侧回填 C15 混凝土从 0m 增加至 11m，底部隧道拱顶沉降小幅增加 2.59%，右侧隧道和上覆隧道拱顶沉降小幅减小了 2.1%和 4.7%，

而剪应力均值则显著降低了 43.5%、27.5%和 5.9%

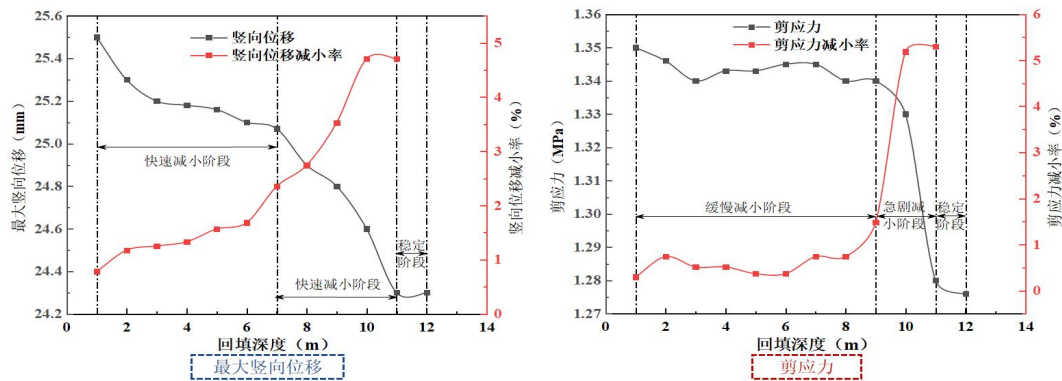
(图 14)。这意味着控制措施对各隧道结构的应力控制效果要优于对拱顶沉降的控制效果。这主要是由于喷锚支护和换填处理在于对边坡进行加固处理，并使回填层与结构间形成牢固的绑架体系，主动承担施工扰动引起的加载效应，从而达到减小回填土不均匀沉降引起剪切应力的效果。同时可以看出，当底部隧道两侧混凝土回填深度超过 11m 时，各隧道结构剪应力和拱顶沉降速率趋于平缓，进而确定底部隧道两侧混凝土最优回填深度为 11m，且最终剪应力均小于极限抗剪强度（1.35MPa），即可认为控制措施可达到预期加固目标。



(a) 底部隧道



(b) 右侧隧道



(c) 上覆隧道

图 14 竖向位移与剪应力受底部隧道两侧 C15 混凝土回填深度的影响

Fig.14 The influence of vertical displacement and shear stress on the depth of C15 concrete backfill on both sides of the bottom tunnel

3.3 复杂明挖异型隧道结构安全控制效果

通过对比控制前后隧道结构力学特性，来直观地反映 C15 混凝土换填和喷锚支护的联合控制效果。

由复杂明挖异型隧道竖向变形云图 (图 15) 可知，当未采取 C15 混凝土换填及喷锚支护措施时，底部隧道、右侧隧道和上覆隧道的最大竖向位移分别为 11.6, 19.2, 25.5mm，采取控制措施后，右侧隧道和上覆隧道的最大竖向位移分别下降至 18.8mm 和 24.3mm，而底部隧道增至 11.9mm，表明联合控制使得右侧隧道和上覆隧道最大变形减小 2.1%和 4.7%，底洞增大 2.59%，平均减小 1.4% (见表 5)，此外喷锚支护和 C15 混凝土换填处理作为永久支护，在后期运营期间对结构变形控制仍发挥重要保护作用。

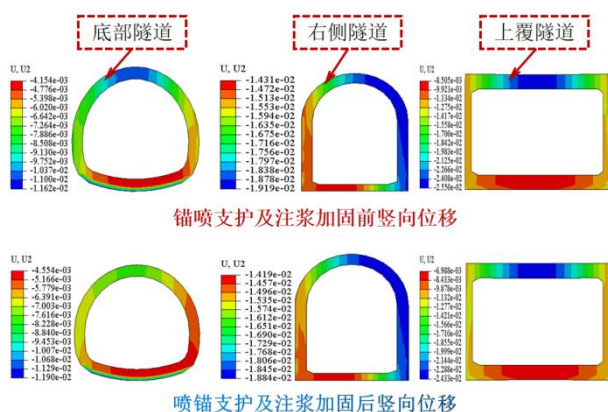


图 15 控制前后隧道结构竖向变形云图

Fig.15 regulates the vertical deformation cloud of the front and rear tunnel structures

表 5 加固前后结构最大竖向位移变化率

Table 5 compares the structure's maximum vertical displacement change rate before and after strengthening

三洞最大竖向位移	底洞	右洞	上覆隧道	平均值
加固控制前/mm	11.6	19.2	25.5	18.8
加固控制后/mm	11.9	18.8	24.3	18.3
减小率	-2.59%	2.1%	4.7%	1.4%

由复杂明挖异型隧道剪应力云图 (见图 16) 可知，底部隧道、右侧隧道和上覆隧道最大剪应力由加固前 2.23, 1.82 和 1.35MPa 减小至加固后 1.26, 1.32 和 1.27MPa，平均减小 25.6% (见表 6)。各洞室结构剪应力大幅减小，右洞拱脚处剪应力减小最为明显，说明其受力改善效果最为显著，且对底部隧道改善效果最佳。

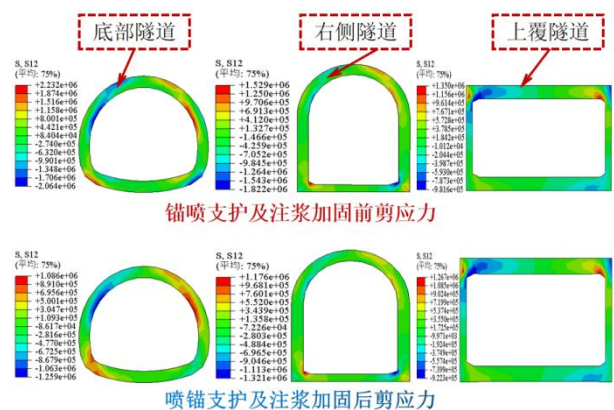


图 16 控制前后隧道结构剪应力云图

Fig.16 shows the front and rear tunnel structures under control for shear stress

表 6 加固前后结构最大剪应力变化率

Table 6 compares the structure's maximum shear stress change rate before and after strengthening

三洞最大剪应力	底洞	右洞	上覆隧道	平均值
加固控制前/MPa	2.23	1.82	1.35	1.80
加固控制后/MPa	1.26	1.32	1.27	1.28

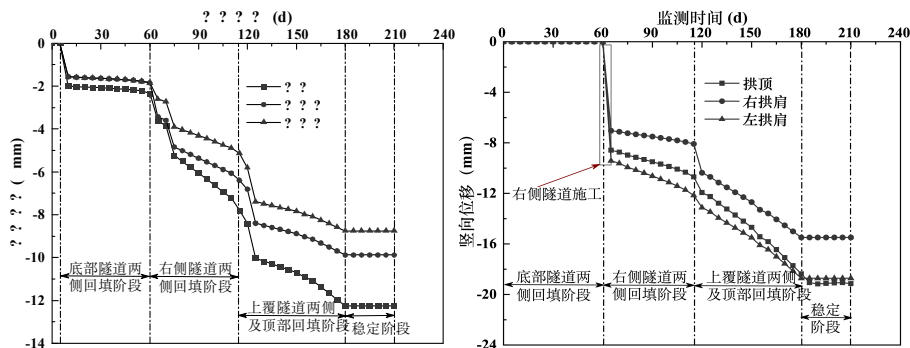
4 现场监控分析

4.1 控制手段

金州大道与星光大道延伸段节点改造工程复杂异型隧道结构设置了长为 24m 的砂卵石沉降试验段，结果发现该段不均匀沉降量较小且具有足够承载力。基于数值模拟分析，为确保异型结构施工的安全，对底部隧道基坑边坡采用喷锚支护，底部隧道基底及两侧采用 C15 混凝土进行换填处理（图 17），隧道基底及基坑边坡喷锚支护施工顺序依次为基底铺设 20cm 厚 C15 混凝土→边坡钻孔→清理钻孔孔渣→顶进锚杆→注浆→锚板钢筋绑扎→喷射 10cm 厚 C25 混凝土。在后续回填施工中，对狭小空间和上下交错隧道间采用砂卵石进行换填处理，上覆隧道顶部采用土夹石回填（见图 18）。



图 17 隧道基底及基坑喷锚支护和混凝土换填施工



(a) 底部隧道位移监测

(b) 右侧隧道位移监测

(c) 上覆隧道位移监测

图 19 复杂异型隧道各隧洞位移监测

Fig.17 Tunnel foundation and foundation pit spraying anchor support and concrete replacement construction



图 18 砂卵石换填施工

Fig.18 Sand and pebble replacement construction

4.2 控制效果分析

根据以上研究结论，现场以下基坑基底为原始回填底面，回填高度 34.3m，对复杂异型隧道进行对称分层回填施工。通过分析采取控制措施后复杂异型隧道各洞竖向位移现场实测数值时间曲线图（见图 19），能够直接反映采取控制措施的控制效果。控制断面各隧道最大竖向位移均以拱顶最大，分别为 12.2、18.7 和 25mm。通过对比采取加固措施后数值模拟与实测结果（见图 20），各隧道竖向位移差异率分别为-2.52%、0.53%和-2.9%，可以直观的看出模拟结果与实测结果相近，说明该控制措施对异型结构安全控制具有明显效果。

Fig.19 Displacement monitoring of various tunnels in complex and irregular tunnels

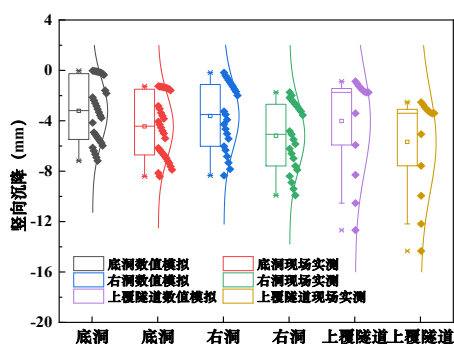


图 20 加固后数值模拟与现场实测对比

Fig.20 Comparison of the field measurement following reinforcing with the numerical simulation

5 结语

本文依托重庆金州大道与星光大道延伸段节点改造工程复杂明挖异型隧道结构,通过数值模拟研究,凝练了隧道结构施工力学特性,提出了相应控制措施,并采用工程实践加以验证控制措施的可行性,得出以下结论。

1) 复杂明挖异型隧道结构施工力学特性突出特征是剪切破坏大且在施工过程中存在突变关键点,前者具体表现为各隧道结构剪应力超限占比大和回填土不均匀沉降值大;后者表现为应力集中现象严重与回填施工引起的加载效应异常剧烈。

2) 由于施工顺序不同、隧道结构空间位置效应、回填材料多样性及施工繁琐等因素的影响,复杂异型隧道的各洞室施工力学效应存在较大差异,底部隧道的安全风险明显高于右侧隧道和上覆隧道,这主要是由于底部隧道受后续施工扰动和加载效应影响严重,造成底部隧道剪切破坏病害突出。

3) 为解决复杂异型隧道剪切破坏风险,提出喷锚支护和 C15 混凝土换填处理联合控制措施。借助数值模拟手段对混凝土回填深度进行分析,并与实测数值进行比较分析,得出控制措施具有可行性。

4) 在金州大道与星光大道延伸段改造工程复杂异型隧道回填施工中应用了控制措施,控制后各隧道结构剪应力分别减小了 43.5%, 27.5%和 5.9%,且均在极限抗剪强度控制范围内,施工安全得到有效保障。

参考文献

- [1]. 欧孝夺,吴红营,黄颂扬等.超大断面箱形明挖隧道施工监测与力学特性分析[J].土木工程学报,2013,46(07):133-140.
- [2]. 李丹妮,梅雨潭.超大跨顶板折板底板错层明挖隧道结构受力特征分析[J].现代隧道技术,2022,59(S1):267-27

- 5.
- [3]. 马相峰,龚伦,张致心等.开挖与回填过程中隧道受力和承载拱效应研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(S2):185-191.
- [4]. 李明,严松宏,李盛等.采用泡沫轻质土对高填明洞二次回填的结构受力特性研究[J].铁道学报,2022,44(02):135-142.
- [5]. 张祖迪,王玉锁,姚庆晨等.复杂明挖并行隧道群施工沉降控制技术研究[J].现代隧道技术,2021,58(S1):319-325.
- [6]. 张民庆,吕刚,王文科.明挖法隧道衬砌开裂原因分析与预防措施研究[J].铁道工程学报,2019,36(05):41-46.
- [7]. 林永贵,马辉,杨春山.高速公路深覆土超大跨明挖隧道断面形式研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(S1):303-309.
- [8]. 林永贵,陈文明,汪传智.浅淡深覆土超大断面明挖隧道关键技术[J].公路,2019,64(08):235-241.
- [9]. 李然,陈平,张顶立等.大断面三孔小净距隧道围岩稳定性数值研究及工程实践[J].土木工程学报,2022,55(11):83-95.
- [10]. JTG D70-2004. 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
- [11]. GB 50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑业出版社, 2010.
- [12]. 张铁柱.四车道特大断面小净距公路隧道力学响应分析[J].土木工程学报,2015,48(S1):302-305.
- [13]. 李松涛,谭忠盛,杜文涛.特大断面小净距公路隧道力学效应分析[J].土木工程学报,2017,50(S2):292-296.
- [14]. 唐援彬. 高填方明挖隧道土压力计算理论及加筋减载研究[D].兰州: 兰州交通大学,2013.
- [15]. 张俊儒,徐剑,龚彦峰等.单跨 5 车道公路隧道工法优化及施工力学特性研究[J].隧道建设(中英文),2021,41(05):831-840.
- [16]. 安永林,李佳豪,周进等.上下立交隧道施工优化与动态近接分区[J].铁道科学与工程学报,2022,19(02):470-479.
- [17]. 燕波,张俊儒,张新锦等.基于围岩径向位移释放率的超大断面隧道下穿施工围岩稳定性研究[J/OL].现代隧道技术:1-9[2023-05-06].
- [18]. Jianxiu W ,Ansheng C ,Zonghai L , et al. Mechanical Behavior and Excavation Optimization of a Small Clear-Distance Tunnel in an Urban Super Large and Complex Underground Interchange Hub[J]. Applied Sciences,2022,13(1).
- [19]. Shiding C ,Shusen H ,Aipeng G , et al. Numerical Simulation Research on the Stability of Urban Under

ground Interchange Tunnel Group[J]. Mathematical Problems in Engineering,2021,2021.

- [20]. Technology - Underground Space Technology; Studies from Central South University Have Provided New Data on Underground Space Technology (Construction technology for a shallow-buried underwater interchange tunnel with a large span)[J]. Journal of Engineering,2017.
- [21]. 杨三资,张顶立,苏洁.基于数值模拟的北京地区地下道路立交隧道围岩变形分析[J].土木工程学报,2016,49(S2):103-106.
- [22]. 刘建生.大跨度偏压连拱隧道洞口段施工力学性能研究[J].公路,2023,68(04):423-428.