

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 29

超大跨双层初支拱盖法地铁隧道拆撑方案优化研究

宋汉峰¹, 尹学鑫², 贺贤群², 马龙祥³, 舒文韬³

(1. 广州地铁建设管理有限公司, 广州 510220; 2. 中铁三局集团广东建设工程有限公司, 广州 510000;
3. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘要: 目前, 大跨、超大跨地铁隧道修建呈现递增趋势。大跨、超大跨隧道常设计临时支撑以减小跨度, 但由于临时支撑与二次衬砌在空间上的相互干涉, 需在二衬施做前拆除临时支撑。拆撑会打破结构原有受力平衡, 是结构受力的薄弱环节, 施工不当极易造成隧道塌方等安全事故。鉴于国内外关于采用双层初支拱盖法修建的超大跨隧道拆撑的结构力学响应及安全性仍缺乏系统的研究, 以广州地铁 11 号线华华区段四线并行折返线区间隧道为依托工程, 通过理论分析与数值计算相结合的方式, 从横向和纵向两方面对隧道拆撑时结构的力学响应以及安全性进行分析, 最终确定了科学、合理、安全、高效、快速的拆撑施工方案, 并顺利通过了现场施工的检验。结果表明: 城市软弱地层超大跨隧道采用“横向先边后中、对称拆除, 纵向先隔三拆一、后隔一拆一”的拆撑方案是切实可行的, 可为后续工程提供借鉴与指导。

关键词: 超大跨地铁隧道; 拆撑; 双层初支拱盖法; 跳仓法; 数值模拟

中图分类号: U455.4 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2026)02-0673-12

Optimization Study on Temporary Support Removal Scheme for Super-Large-Span Metro Tunnel Constructed by Double-Layer Primary Arch Cover Method

Song Hanfeng¹, Yin Xuexin², He Xianqun², Ma Longxiang³, Shu Wentao³

(1. Guangzhou Metro Construction Management Co., Ltd., Guangzhou 510200, P. R. China; 2. China Railway No. 3 Engineering Group Guangdong Construction Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510000, P. R. China; 3. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: At present, the construction of large-span and super-large-span subway tunnels is increasing. Temporary support is often designed to reduce the span in the construction of those tunnels. However, temporary support needs to be removed before secondary lining is constructed due to the spatial overlap between them. The removal of temporary support is the weak situation, because the original stress balance of the structure will be broken. Improper construction can easily cause safety accidents such as tunnel collapse. In view of the lack of systematic research on the structural mechanical response and safety of the super-large-span tunnel constructed by the double-layer initial support arch-cover method at home and abroad, this paper takes the four-line parallel tunnel of Huahua section of Guangzhou Metro Line 11 as the basis project. Through the combination of theoretical analysis and numerical calculation, the mechanical response and safety of the structure during the dismantling of the tunnel are analyzed from both horizontal and vertical aspects. Finally, a scientific, reasonable, safe, efficient and rapid dismantling scheme was determined, and successfully passed the inspection of on-site construction. The results show that it is feasible to dismantle the super-large-span tunnel in urban soft stratum by using the scheme of ‘first

收稿日期: 2025-05-06(修改稿)

作者简介: 宋汉峰(1998—), 男, 湖南郴州人, 助理工程师, 主要从事地铁隧道施工及技术管理方向的研究。

E-mail: 1019325756@qq.com

通讯作者: 马龙祥(1988—), 男, 成都人, 工学博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程方向的研究。

E-mail: malongxiang_swjtu@163.com

edge and then middle, and symmetrical demolition in cross direction, first three demolition and one demolition, and then one demolition and one demolition in longitudinal direction', which can provide reference and guidance for subsequent projects.

Keywords: super-large-span metro tunnel; removal of temporary support; double-layer primary arch cover method; alternate bay construction method; numerical simulation

0 引言

随着城市的快速发展,交通压力陡增,地面交通已无法满足人们的出行要求,城市轨道交通在节能、环保等方面存在显著优势,被大规模采用^[1-2]。在地铁线路设计过程中,由于城市规划和周边环境限制,大跨、超大跨地铁隧道建设呈现递增趋势^[3]。大跨隧道常采用分步开挖法施工,并设置临时支撑结构以减小跨度,但是由于临时支撑与永久衬砌在空间上相互干涉,因此在进行二次衬砌模筑前需先拆除临时支撑,拆撑将使得衬砌支护再次形成大跨结构,打破开挖后支护与围岩形成的应力平衡,给施工安全带来一定的风险,为施工中的重要风险管控环节^[4-6]。

目前已有不少学者对地下大跨结构拆撑进行了研究。张建国等^[7]以厦门翔安隧道为工程背景,论证了 CRD 法纵向拆撑长度取 10 m 的可行性。孙克国等^[8]以青岛地铁 3 号线江西路站为例,通过数值模拟和现场监测两种方式,分析了导坑法施工隧道拆撑效应,确定了隧道单次拆撑长度及拆撑影响范围。王松周^[9]对长沙市营盘路湘江隧道 CRD 法拆撑施工过程进行数值计算,通过分析拆撑过程中的施工力学效应,进而确定了合理的拆撑方案。张社荣等^[10]以采用三台阶九洞六步法施工的深圳地铁 10 号线凉帽山站为工程背景,分析不同拆撑顺序下围岩和结构产生的位移,最终优化了拆撑方案并通过现场监测验证了方案的合理性。高鑫等^[11]对采用 CRD 法施工的青岛地铁 4 号线错埠岭站采用理论分析与数值模拟相结合的方式,确定了跳仓法施工合理的拆撑分区长度和隔仓分区长度。

现有文献对大跨隧道拆撑的研究成果往往集中在采用 CRD 法修建的隧道,且支护形式多为单层初期支护,鲜有文献对双层初支拱盖法修建的超大跨隧道拆撑效应进行研究。文献[12]虽然对超大跨隧道双层初支结构下拆撑效应进行了一定的理论分析和数值计算,但主要是对不同一次纵向拆撑长度的结构响应进行分析,并未考虑“隔仓长度”的影响,且施工工法显然与双层初支拱盖法存在较大差异。文献[13]仅对双层初支拱盖法拆撑施工过程进行了数值计算,并未对拆撑长度、拆撑

顺序、隔仓距离等因素开展研究。本文以广州地铁 11 号线华华区段四线并行折返线区间隧道为依托工程,通过理论分析与数值计算相结合的方式,对双层初支拱盖支护结构下,拆撑长度、拆撑顺序、隔仓距离等众多影响因素进行协同研究和分析,形成了适合于超大跨双层初支拱盖法暗挖隧道拆撑施工方案,以期为依托工程及后续类似工程安全、快速施工提供理论依据和技术指导。

1 工程概况

广州市轨道交通 11 号线华景路站—华师站四线并行折返线区间隧道(浅埋大跨段)位于中山大道下方,临近华景新城站人行天桥,地面交通流量大,地下管线繁多,周边建筑物主要有南方通信大厦、广东省邮电科研综合生产用房、广运楼、华港商务大厦等,如图 1 所示。

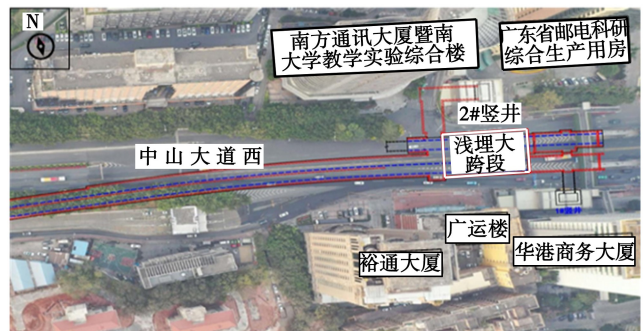


图 1 华华区间浅埋大跨段周边环境示意图

Fig. 1 Large-span tunnel surrounding environment diagram

折返线区段长 39.95 m,隧道开挖跨度和高度分别为 28.4 m、15.0 m,拱顶矢跨比为 0.331,为目前广州地铁断面跨度最大的隧道,结构标准横断面及其所处地层如图 2 所示。隧道平均埋深约 19 m,所处地层从上到下依次为人工填土、粉质黏土、淤泥质土、泥质粉砂岩强风化、泥质粉砂岩微风化、砾岩微风化,属于典型上软下硬地层,故采用双层初支拱盖法进行施工。在盾构隧道先行通过的情况下,大拱盖的施做通过 6 个导洞分步开挖提供建造空间。具体施工时,先在拱部打设超前大管棚,再进行导洞开挖,6 个导洞的开挖顺序依次为 3→4→1→2→5→6,错距为 5 m。导洞开挖后及时施做锚杆、一层初期支护及临时支撑,纵梁滞后一

层初期支护一定距离施做,待导洞贯通后施做二层初期支护。其中,大管棚布设范围为隧道拱顶 80°,直径 159 mm、壁厚 10 mm、长度 45 m、环向间距 350 mm;纵梁采用 C35 模筑混凝土;一层初期支护和临时支撑为在纵向间距 500 mm 工 25b 钢拱架外喷 C25P6 混凝土结构;二层初期支护为纵向间距 500 mm 的 I25 格栅钢架加 C35 模筑混凝土。最后,根据现场监测结果纵向分段拆除临时支撑,随后施做防水层和二衬,如此循环直至拱顶二次衬砌结构施工完成。

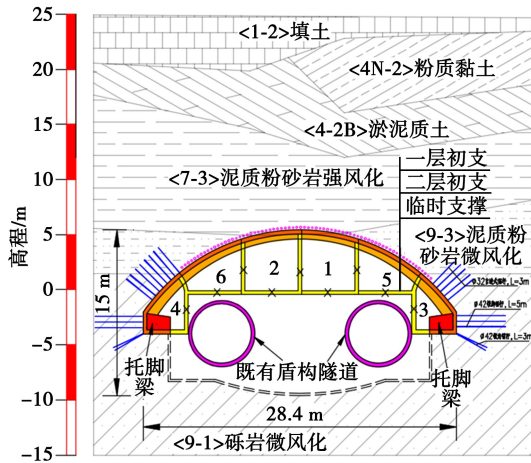


图 2 隧道结构标准横断面及其所处地层

Fig. 2 Standard cross section of tunnel structure and its stratum

隧道处于城市繁华区,埋深浅,跨度大,周边建筑物林立,环境影响及沉降控制要求严格,施工风险极大,而拆撑势必会打破结构与围岩间原有受力平衡,使得初期支护再次形成大跨结构,是整个施工过程的薄弱环节。鉴于此,有必要对该工程临时支撑拆除过程进行详细研究,优化拆除方案,从而降低隧道拆撑时的施工风险及对周围环境的影响。

2 隧道拆撑力学效应

对于跨度大、埋深浅、上部围岩较差、地面环境复杂的隧道结构,通常采用跳仓法拆撑。跳仓法拆撑是在导洞贯通后,将隧道结构沿纵向分成若干区域,在间隔一定距离(隔仓区段)的情况下对多个区域(拆撑区段)进行同时拆除^[11],如图 3 所示。

拆撑会打破支护与围岩间既有的力学平衡,导致结构间的力学状态及力学机制发生变化,从“支撑减跨效应”转变为大跨结构“空间棚护效应”。“空间棚护效应”可分为沿隧道横向的“成拱效应”和沿纵向的“成梁效应”。

2.1 横向成拱效应

从横向来看,临时支撑主要起到减跨作用,处

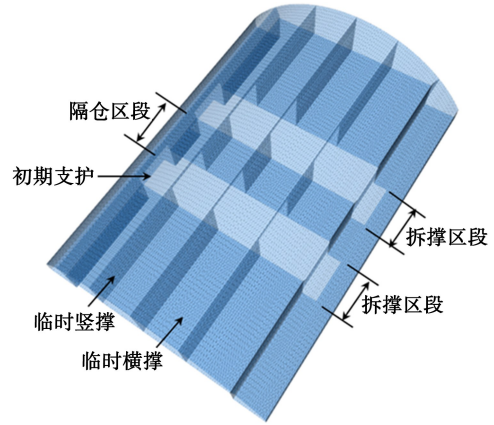


图 3 跳仓法示意图

于轴向受压状态,属于压弯构件。临时支撑拆除后,隧道变回大跨结构,临时支撑所承担的荷载通过受力、变形协调进行转移、传递,拆撑区段的初支发挥其横向成拱效应。横向成拱效应从拆撑区段中点沿纵向距隔仓区段距离的减小而逐渐减弱,转变为支撑减跨效应,如图 4 所示。

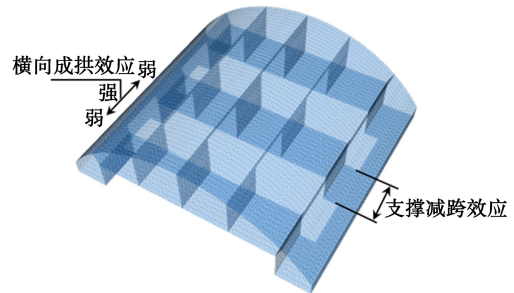


图 4 横向成拱效应示意图

Fig. 4 Schematic diagram of transverse arching effect

2.2 纵向成梁效应

从纵向来看,临时支撑拆除后,初期支护形成以两端隔仓区段为支座的纵向梁,临时支撑所承担的荷载以剪力形式通过纵向梁传递给相邻未拆撑区段。纵向梁的支座刚度在横向上随着与支撑节点距离的减小而增大,纵向成梁效应逐渐增强,如图 5 所示。

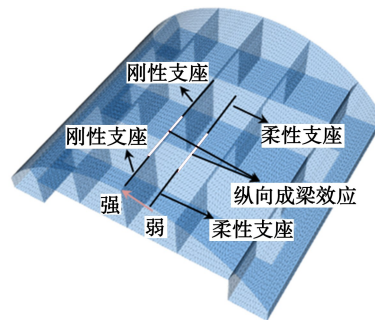


图 5 纵向成梁效应示意图

Fig. 5 Schematic diagram of longitudinal beam effect

3 拆撑方案研究

拆撑会引起结构形式和支护刚度发生剧变,属于典型的非线性静力问题,宜采用增量法^[14]进行研究分析,一个阶段的总量可通过对该阶段所有步骤增量进行叠加得到。本文根据现场实际地形及结构设计参数,建立有限元分析模型,分析拆撑过程中围岩-结构施工力学特性,以支护结构的安全性为评价指标,从拆撑长度、拆撑顺序、隔仓距离三方面对临时支撑拆除方案进行优化分析。

3.1 数值模型

采用有限差分软件 Flac3D 建立三维数值模型,模型长(Y)40 m,宽(X)200 m,高(Z)86.9 m,四周及底部设置垂直约束,上表面自由,如图 6 所示。地层考虑为均质理想弹塑性材料,服从 Mohr-Coulomb 屈服准则,并采用三维实体单元进行模拟;盾构管片、第一层初期支护、第二层初期支护、临时支撑和纵梁均考虑为弹性材料,其中第二层初支和纵梁采用实体单元模拟,其他结构采用壳单元模拟;锚杆采用软件内置结构单元——锚索单元进行模拟。

根据现场地勘报告,结合相关规范,隧道所处围岩及支护结构物理力学参数取值如表 1 所示。其中,超前支护通过提高等效加固区内岩土体参数进行模拟^[15],第一层初期支护及临时支撑分别按照抗弯、抗压刚度等效原理^[16-17],将钢拱架的弹性模量折算给相邻混凝土,进而计算出弹性模量。

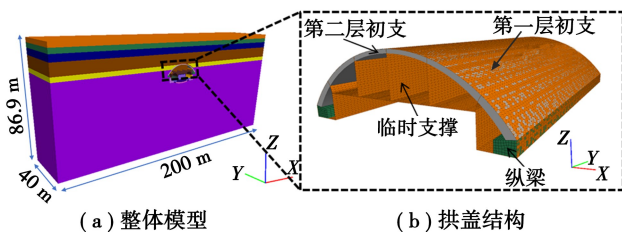


图 6 计算模型图

Fig. 6 Computational model diagram

3.2 支护结构安全性评价方法

为确保拆撑施工过程中支护结构的安全,需要针对支护结构的安全性进行量化的评价。本文依托工程中拆撑过程涉及到的支护结构主要包括临时支撑、第一层初期支护和第二层初期支护,下文将给出在基于数值计算得出结构内力的基础上,安全系数计算方法。

3.2.1 一层初期支护及临时支撑

一层初期支护及临时支撑均采用的是型钢钢

架+喷射混凝土的结构形式,相邻型钢钢架之间的纵向间距为 0.5 m,选取如图 7 所示的一个型钢钢架及其 0.5 倍间距范围内的喷射混凝土(红色虚线框内的部分)作为研究单元进行承载力计算。研究单元纵向长度为 0.5 m,厚度 0.35 m,型钢呈中心对称排布,其从受力上看属于偏心受压构件,受力示意图如图 8 所示,图中 t_w 为型钢腹板厚度, A_{af}, A'_{af} 分别为型钢受拉、受压翼缘的截面面积, f_{au}, f'_{au} 分别为型钢抗拉、抗压强度极限值,其余符号的含义参照《组合结构设计规范》^[18]。

表 1 岩土体材料物理力学参数及支护参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil and support parameters

名称	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松 比	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/($^\circ$)
<1-2>填土	1.9	8	0.35	15	18
<4N-2>粉质黏土	1.95	10	0.31	22	23
<4-2B>淤泥质土	1.76	4	0.42	7	6
<7-3>泥质粉砂岩强风化	2.1	85	0.25	54	32
<9-3>泥质粉砂岩微风化	2.71	6 000	0.15	480	40
<9-1>砾岩微风化	2.68	8 000	0.15	600	42
盾构衬砌	2.6	35 500	0.2	—	—
超前支护	2.5	10 000	0.2	800	45
第一层初期支护	2.2	31 900	0.2	—	—
临时支撑	2.2	31 800	0.2	—	—
纵梁	2.5	31 500	0.2	—	—

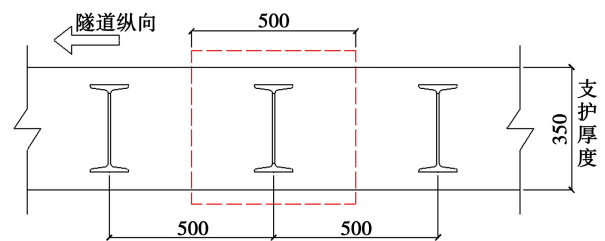


图 7 型钢钢架沿纵向分布示意图(单位:mm)

Fig. 7 Diagram of longitudinal distribution of steel frame (Unit : mm)

型钢钢架混凝土构件的轴力 N 和弯矩 M 可通过数值计算结构进行提取,基于《组合结构设计规范》^[18]中组合结构偏心受压构件正截面承载力计

算公式,利用轴力 N 便可算出与之相对应的极限抗弯承载力 M_u ,进而求得抗弯安全系数 $K_1 = M_u/M$ 。同样地,利用弯矩 M 便可求得极限抗压承载力 N_u 和抗压安全系数 $K_2 = N_u/N$,最终结构的安全系数取两者之中的较小值,即 $K = \min(K_1, K_2)$ 。

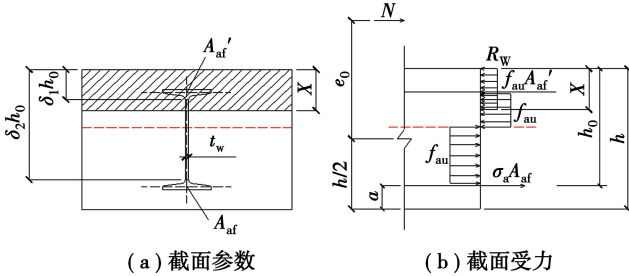


图 8 偏心受压型钢架混凝土正截面受力示意图

Fig. 8 Steel frame concrete normal section stress diagram

3.2.2 二层初期支护

二层初期支护采用格栅钢架+模筑混凝土的结构形式,其中格栅钢架由主筋、形筋、斜筋和箍筋构成,但在计算中仅考虑主筋承载作用,这样不仅能大幅度地简化计算,而且计算结果偏于安全。相邻格栅钢架间的纵向间距为 0.5 m,选取如图 9 所示的一个格栅钢架及其 0.5 倍间距范围内的混凝土(红色虚线框内的部分)作为研究单元进行承载力计算,研究单元从受力上看属于偏心受力构件。

数值模拟中二层初支(格栅钢架混凝土)采用实体单元模拟,研究单元内力须通过对实体单元 3 个方向的应力(xx 方向、 zz 方向和 xz 方向)进行换算得出^[19]。进而基于《铁路隧道设计规范》^[20] 偏心受力承载力相关计算公式,判断结构受力类型,最终求得结构安全系数。

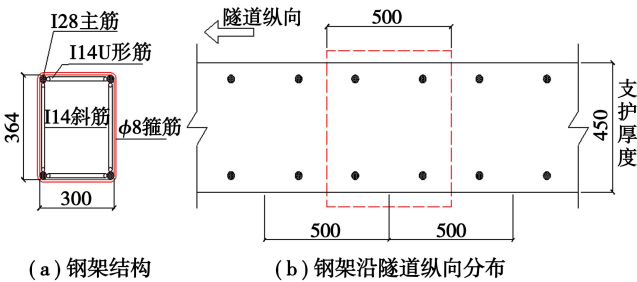


图 9 格栅钢架沿纵向分布示意图(单位:mm)

Fig. 9 Diagram of longitudinal distribution of grid steel frame(Unit : mm)

3.3 拆撑前围岩变形与结构受力

按照前述导洞施工工序进行数值模拟,计算至导洞全部贯通并二层初期支护施做完成,提取此时围岩位移和结构受力进行分析。由于结构具有明显对称性,因此取 1/4 模型作为分析对象,绘制围

岩应力云图如图 10 所示。从图中可以看出,拆撑前围岩竖向位移及水平位移最大值均发生在导洞 1、2 拱顶位置,最大竖向位移为 11.72 mm,最大水平位移为 2.07 mm,均远小于拱顶沉降 30 mm 和水平收敛 10 mm 的控制要求。由于围岩变形量值较小,因此后文只对支护结构的受力及安全性进行分析。

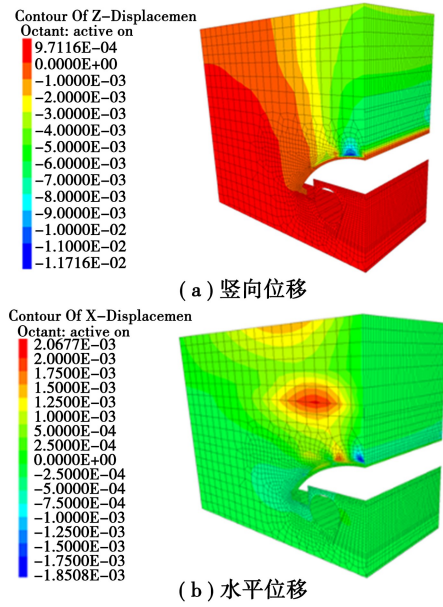


图 10 拆撑前围岩位移云图(单位:m)

Fig. 10 Displacement cloud diagram of surrounding rock before dismantling(Unit:m)

选取计算模型纵向中间断面为研究目标面,将该断面一层初期支护和临时支撑(由于二层初期支护在导洞贯通后施做,拆撑前结构受力较小,为节省文章篇幅,本处不对其进行分析)内力及安全系数结果绘至于图 11—图 12。

在图 11 中,由于临时支撑横撑受力很小,按数值比例绘制得到的内力轮廓线基本与直线重合,故未绘出。从图 11(a)中可以看出,拆撑前各导洞拱顶位置处一层初期支护承受正弯矩(内侧受拉),一层初期支护与临时支撑接头处承受负弯矩(外侧受拉),这主要是因为临时支撑竖撑刚性支点的存在,即“竖撑减跨效应”使得横向上导洞拱部一层初支相当于两端固端的简支梁;临时支撑所受弯矩均较小,最大值发生在隧道拱顶一层初期支护与临时支撑相交位置,量值为 57 kN · m。从图 11(b)中可以看出,一层初期支护和临时支撑竖撑均处于受压状态,且竖撑的轴力明显大于一层初期支护,说明临时支撑竖撑主要承担外荷载产生的轴力,给一层初支提供了刚性竖向支撑,起到了很好

的减跨作用。综上,一层初支主要承担外荷载产生的弯矩,临时支撑主要承担外荷载产生的轴力。

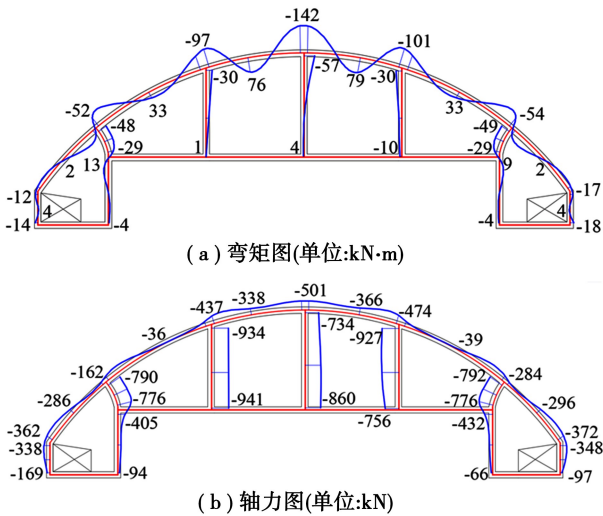


图 11 拆撑前第一层初支及临时支撑内力图

Fig. 11 Internal force diagram of first layer initial support and temporary support before dismantling

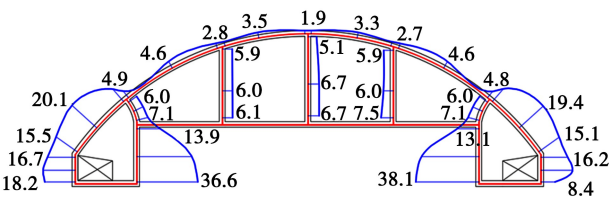


图 12 拆撑前第一层初支及临时支撑安全系数

Fig. 12 Safety factor of the first layer initial support and temporary support before dismantling

从图 12 中可以看出,拆撑前中间导洞拱部安全系数较小,控制点为竖撑与一层初支交点位置,最小安全系数为 1.9,稍大于《铁路隧道设计规范》中规定的施工阶段安全系数下限值 1.8。

3.4 拆撑方案横向优化分析

为了研究同一横断面内不同横向拆撑(图 13)顺序下结构的受力规律,选取如表 2 所示的 7 种工况进行计算,各工况拆撑长度 L 均为 1.5 m(纵向方向 19~20.5 m 范围)。

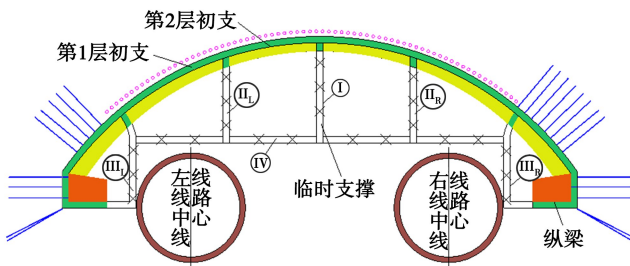


图 13 临时支撑编号示意图

Fig. 13 Temporary support number diagram

表 2 横向拆撑顺序

Table 2 Horizontal disassembly sequence

计算工况	拆撑顺序
1-1	全断面一次拆除
1-2	III _L 、III _R →I→III _L 、II _R 、IV
1-3	III _L 、III _R →III _L 、II _R →I、IV
1-4	I→III _L 、II _R →III _L 、III _R 、IV
1-5	I→III _L 、III _R →III _L 、II _R 、IV
1-6	III _L 、II _R →I→III _L 、III _R 、IV
1-7	III _L 、II _R →III _L 、III _R →I、IV

限于文章篇幅,以工况 1-3(III_L、III_R→II_L、II_R→I、IV)为例,分别绘制经过拆撑区域中点及边界两条横向测线(如图 14 中的测线 1 和测线 2)的横截面的内力分布曲线,如图 15—图 18 所示。

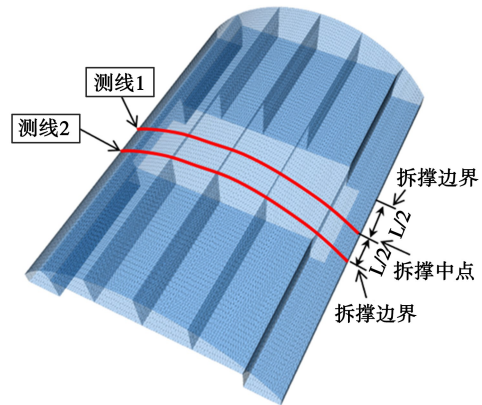


图 14 支护结构内力测线布置图

Fig. 14 Internal force measuring line layout of supporting structure

从图 15 可以看出,相较于拆撑前,第一层初期支护的弯矩与轴力均有不同程度的减小,第一层初期支护的弯矩最大值由 142 kN·m 减小为 126.1 kN·m,轴力最大值由 501 kN 减小为 489.3 kN;而第二层初期支护的轴力增大,弯矩略有减小,其中二层初支与临时支撑相交位置由负弯矩(外侧受拉)转变为正弯矩(内侧受拉),这是因为拆撑打破了原有的结构受力平衡,导致应力发生重分配,但其影响范围仅限于拆撑节点附近。从图 16 可以看出,拆撑后一层初支安全系数有所增加,但最小值任在竖撑 I 接头处,最小值由 1.9 增加至 2.2,二次衬砌的安全系数则有所减小,但整体值任然较大,较小值在二层初期支护与竖撑交叉点位置,说明拆撑会引起双层初支间的协调变形和内力重新分配,有利于提高一层初期支护结构的安全性,充分发挥二层初期支护承载性能。

从图 17 可以看出,相较于拆撑前,第一层初期支护的弯矩与轴力变化程度较小,但竖撑的轴力显

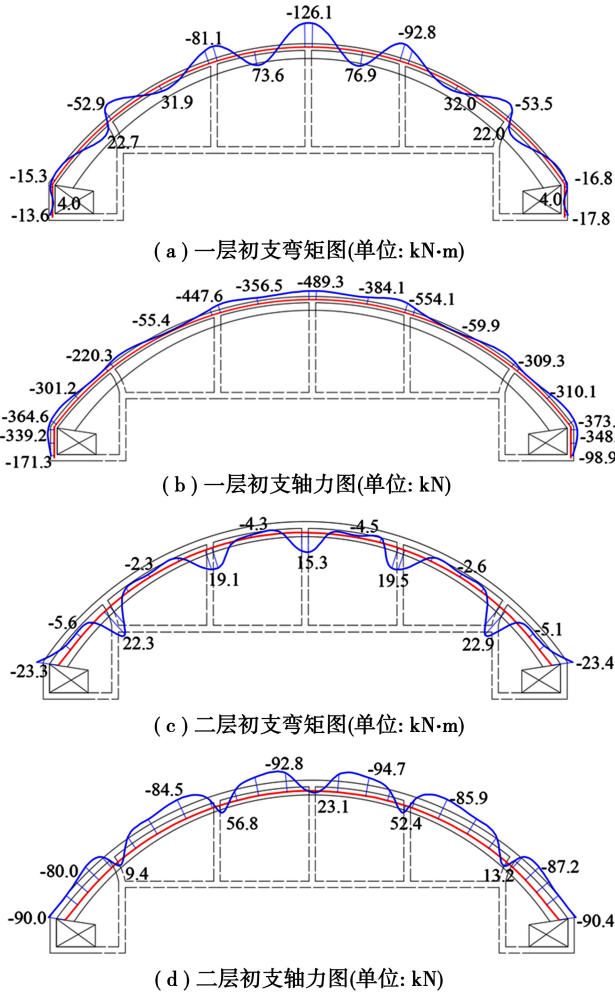


图 15 工况 1-3 拆撑后测线 1 处支护结构内力图
 Fig. 15 Internal force diagram of supporting structure under working condition 1-3 at measuring line 1

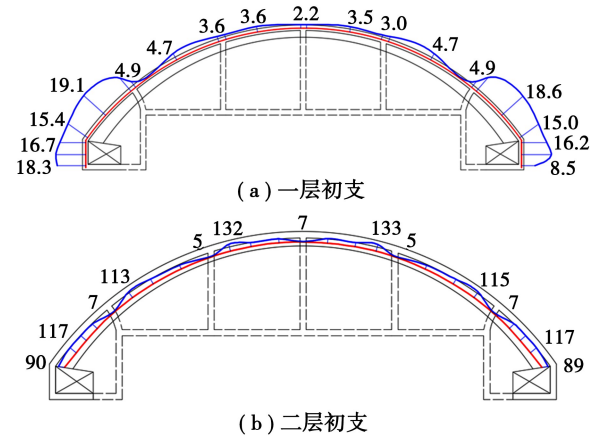


图 16 工况 1-3 拆撑后测线 1 处支护结构安全系数
 Fig. 16 Safety factor of supporting structure under working condition 1-3 at measuring line 1

著增大,最大值由 941 kN 增加至 1316.8 kN,这是因为一层初支的“纵向成梁效应”,使得拆撑引起的荷载增量以剪力的形式传递给两端未拆撑区域,进而转化为竖撑轴力;二层初期支护弯矩变化较

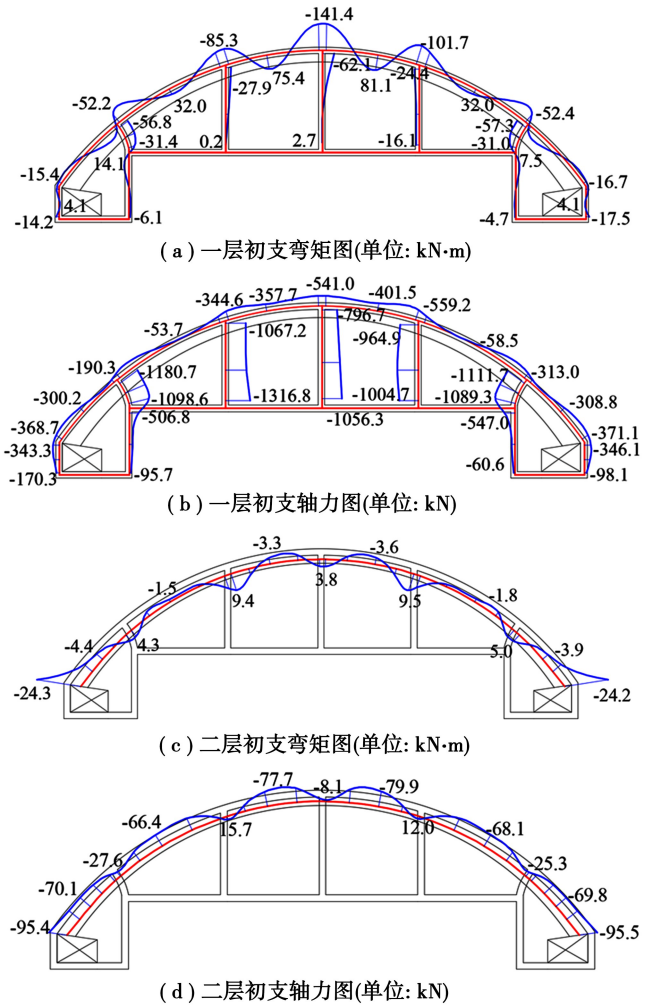


图 17 工况 1-3 拆撑后测线 2 处支护结构内力图
 Fig. 17 The internal force diagram of supporting structures under working condition 1-3 at measuring line 2

小,轴力显著增大,最大值由 7.2 kN 增加至 95.4 kN,说明一层初期支护传递给二层初支的力变大;相较于测线 1 和未拆撑区域,测线 2 支护结构受力可看作由未拆撑到拆撑中间的过渡阶段。从图 18 可以看出,一层初支安全系数与拆撑前几乎一致,竖撑的安全系数略有减小,但受力最不利点依旧为与竖撑交点位置;二层初期支护安全系数任然远大于规范要求。

基于上述分析,从结构安全性角度而言,临时支撑拆除对拆撑中点及边界支护结构受力的薄弱点主要集中于竖撑与支护结构相交位置,因此布置如图 19 所示测点。结构及受力具有明显对称性,因此选一半结构进行监测,图中 A 为一层初期支护上测点,B1、B2、B3 为竖撑上测点。由于二层初期支护安全系数较大,非大跨结构安全控制部件,因此后续不对其进行分析。绘制测线 1、2 处测点安全系数如图 19—20 所示。

从图 19 可以看出,测线 1 处一层初期支护的

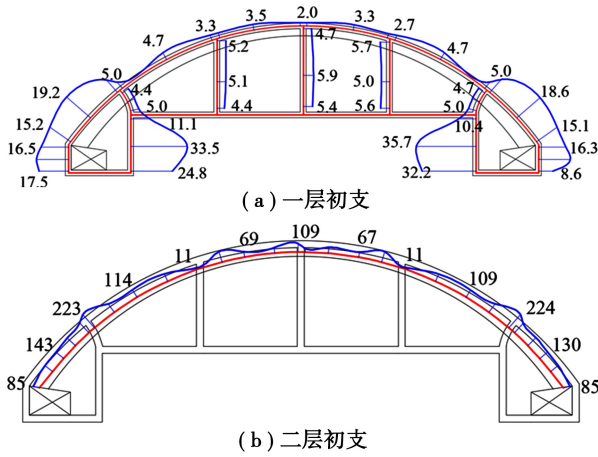


图 18 工况 1-3 拆撑后测线 2 处支护结构安全系数
Fig. 18 Safety factor of supporting structure under working condition 1-3 at measuring line 2

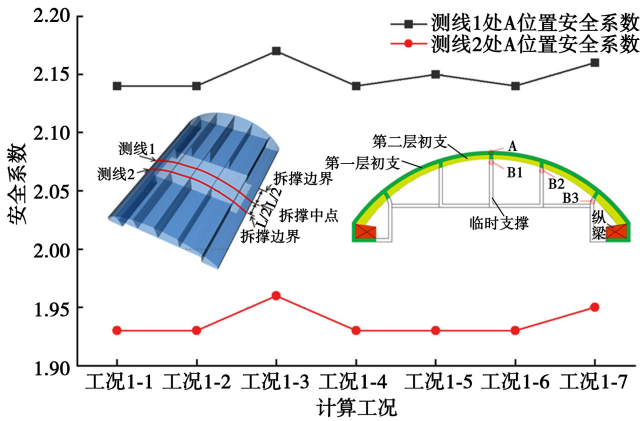


图 19 不同工况一层初支安全系数对比图
Fig. 19 Comparison diagram of first layer initial support safety factor under different working conditions

安全系数要稍大于测线 2 处一层初期支护的安全系数,说明拆撑使得结构发生变形协调和应力重分配,拆撑区段一层初期支护内力一方面向二层初期支护传递,另一方面由于“纵向成梁效应”传递给未拆撑区段结构,因此出现拆撑区段第一层初期支护比未拆撑区段第一层初期支护更加安全的现象;工况 1-3(III_L、III_R→II_L、II_R→I、IV)和工况 1-7(II_L、II_R→III_L、III_R→I、IV)条件下测线 1 和测线 2 处位置 A 的安全系数大于其他工况,说明最后拆除竖撑 I 有利于一层初期支护的安全。从图 20 可以看出,临时支撑上测点的安全系数并未随临时支撑横向拆除顺序变化而呈现出明显规律,总体来看,临时支撑安全系数均大于规范要求(1.8)。

综合上述分析,一层初期支护安全系数较小,最接近规范规定下限值 1.8,是整个结构的最薄弱部位,因此可根据一层初支安全系数选择合理横向拆撑顺序。工况 1-3(III_L、III_R→II_L、II_R→I、IV)和

工况 1-7(II_L、II_R→III_L、III_R→I、IV)条件下支护结构竖向位移最小,一层初支安全系数最大,是拆撑方案的较好选择。综合考虑施工组织的便利性,临时支撑拆除应选择工况 1-3(III_L、III_R→II_L、II_R→I、IV)所对应方案。

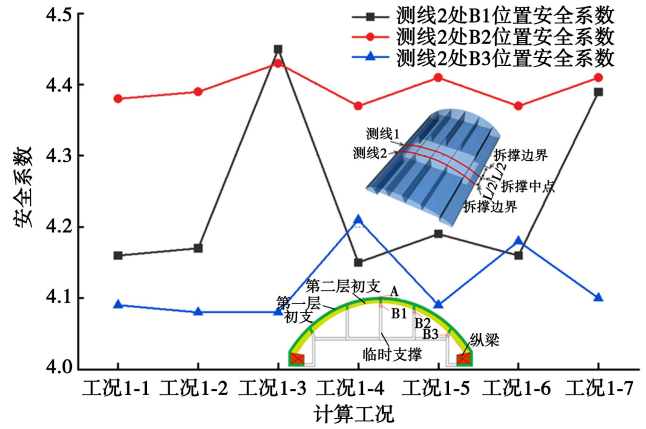


图 20 不同工况临时支撑安全系数对比图
Fig. 20 Comparison diagram of safety factor of temporary support under different working conditions

3.5 拆撑方案纵向优化

隧道沿纵向采用跳仓法进行拆撑,基于前述分析,本文横向拆撑顺序取工况 1-3(III_L、III_R→II_L、II_R→I、IV)所对应方案,对纵向一次拆撑长度及隔仓拆撑距离开展详细研究。

3.5.1 一次拆撑长度

临时支撑由型钢钢架与喷射混凝土构成,纵向方向上相邻型钢钢架之间的间距为 0.5 m,故一次拆撑长度 L 必须为 0.5 m 的整数倍。选取一次拆撑长度 L 分别为 0.5 m、1 m、1.5 m、2 m、2.5 m、3 m、3.5 m、4 m、4.5 m、5 m,共 10 种工况,各工况拆撑长度均以模型纵向终点 $Z=20$ m 对称设置,计算结果如图 21—22 所示。

从图 21 可以看出,测线 1 处 A 位置安全系数随拆撑长度的增大而增大,这是因为随着拆撑长度的增加,一层初支“纵向成梁效应”逐渐减弱,一层初支柔度逐渐增大,通过变形协调传递给二层初支的力越大,一层初支越安全;测线 2 处 A 位置安全系数随拆撑长度的增大先增大后减小,这是因为拆撑长度较小时,拆撑边界一层初支也会适当变形,此时拆撑区域传递的不平衡力增量小于变形协调分配给二层初支的力,因此安全系数短暂增加,但随着拆撑长度超过 1 m,由于拆撑边界处临时支撑相当于刚性支座,限制了一层初支的进一步变形,一层初支受力逐渐增大,安全系数降低,当拆撑长度超过 4 m 后拆撑边界安全系数开始下降至 1.8

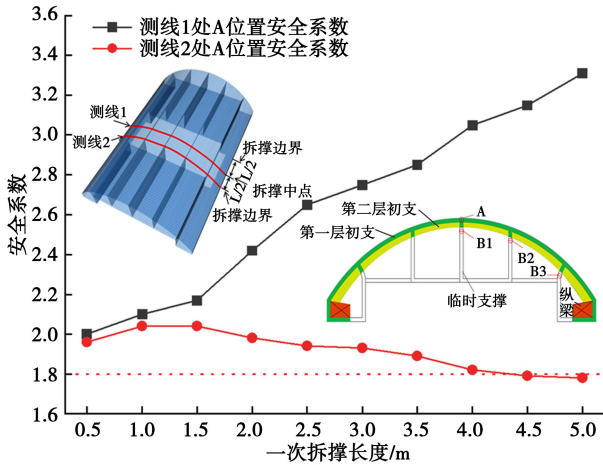


图 21 不同拆撑长度下第一层初支安全系数

Fig. 21 Safety coefficient of first layer initial support under different removing length

以下,结构处于不安全状态。

从图 22 可以看出临近拆撑断面临时支撑的安全系数随一次拆撑长度的增大而减小,其原因在于随着一次拆撑长度的增加,围岩应力释放加大,拆撑区段上部围岩压力由主要由“横向拱”承担转变为一部分由“横向拱”承担,一部分由“纵向梁”承担,因而临近拆撑断面的竖撑成为“纵向梁”的支座,支撑轴力显著增加,安全系数减小。B2 位置的安全系数小于 B1、B3 位置的安全系数,为临时支撑的最薄弱位置。

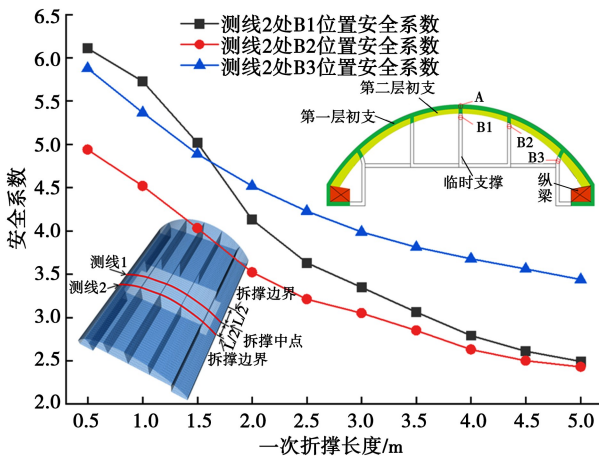


图 22 不同拆撑长度下临时支撑安全系数

Fig. 22 Safety coefficient of temporary support under different length of removing brace

综上所述,拆撑边界一层初支(测线 2 处 A 位置)安全系数最小,拆撑长度选为 2 m 既能保证支护结构有足够安全系数,同时方便现场施工组织。

3.5.2 隔仓区段长度

基于上述分析,一次拆撑长度 $L=2$ m,隔仓区段长度宜取一次拆撑长度的整数倍,分别设计隔仓区

段长度为 $S=2$ m、4 m、6 m 三种拆撑方案,为减小边界效应的影响,选择模型中段的 20 m 范围为研究区段,如图 23 所示,并设置相应工况如表 3 所示。

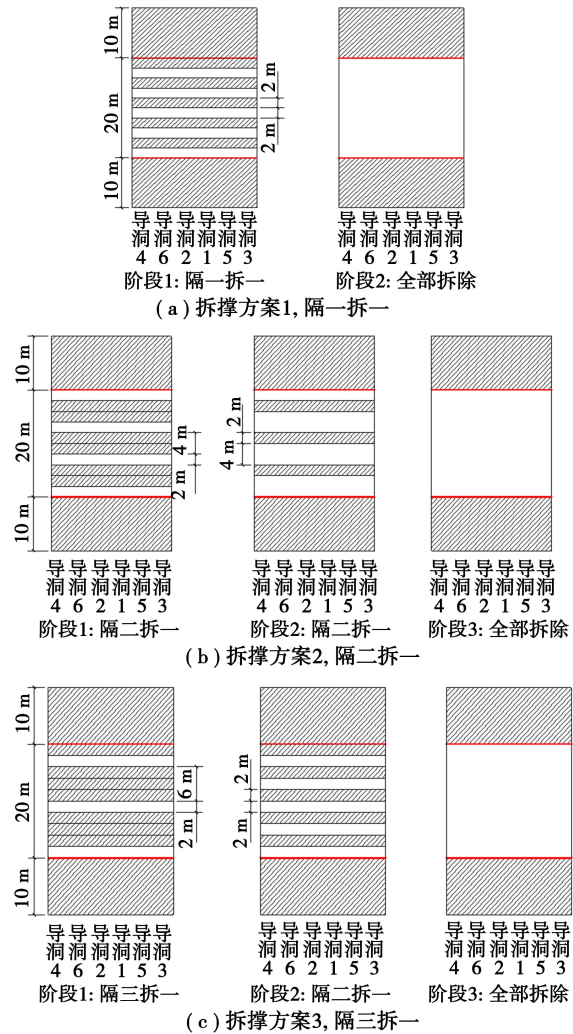


图 23 纵向拆撑方案示意图

Fig. 23 Schematic diagram of longitudinal disassembly scheme

表 3 纵向拆撑顺序

Table 3 Vertical disassembly sequence

计算工况	拆撑顺序
3-1-1	拆撑方案 1,阶段 1
3-1-2	拆撑方案 1,阶段 2
3-2-1	拆撑方案 2,阶段 1
3-2-2	拆撑方案 2,阶段 2
3-2-3	拆撑方案 2,阶段 3
3-3-1	拆撑方案 3,阶段 1
3-3-2	拆撑方案 3,阶段 2
3-3-3	拆撑方案 3,阶段 3

从 3.5.1 节分析中易知,一层初期支护为整个结构安全性最为薄弱环节,因此仅以拆撑区段和隔仓区段测点 A 位置安全系数随隔仓分区长度变化

规律进行分析。绘制各施工阶段一层初期支护安全系数如图 24 所示。总体上来看,拆撑区段一层初期支护安全系数大于隔仓区段,并且随着拆撑的进行,拆撑区段第一层初期支护的安全系数逐渐增大,但隔仓区段一层初期支护安全系数逐渐减小,与本文前述现象一致,说明拆撑有利于改善拆撑区段一层初支受力,但不利于隔仓区段结构受力。从拆撑过程中隔仓区段结构安全性而言,方案 1 和方案 3 均较方案 2 安全,安全系数最小值均为 1.92,略大于规范规定下限值 1.8,基于工效、安全二者的平衡考虑,方案 3 相对更优,最终确定拆撑施工方案为“ $L=2\text{ m}, S=6\text{ m}$ ”。

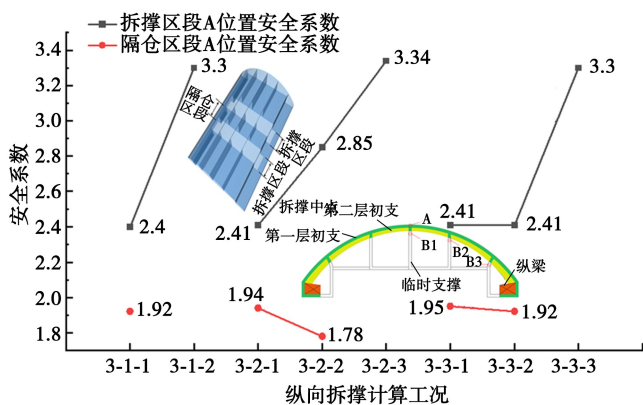


图 24 各方案条件下一层初期支护安全系数
Fig. 24 The safety factor of the first layer under each scheme condition

4 现场施工

现场从 2021 年 7 月开始导洞施工,至 2022 年 4 月导洞全部贯通,5 月完成二层初期支护施做。之后经过多次探讨,基于数值仿真分析结果,结合现场实际情况,采用单次拆撑长度 2 m,先隔三拆一,后隔一拆一的施工方案进行施工。于 2022 年 8 月完成所有临时支撑拆除工作。部分现场施工照片如图 25 所示。

拆撑过程中对隧道拱顶沉降、一层初期支护受力进行了严密监测,隧道断面测点布置如图 26 所示。拆撑前拱顶沉降最大值为 17.3 mm,较数值模拟结果偏大,这可能是因为数值模拟没有考虑地下水作用;拆撑完成后拱顶沉降最大量为 21.97 mm,未拆过控制标准 30 mm。

施工现场通过在二层初期支护型钢钢架上下翼缘附近各焊接一个应力计对支撑结构受力进行监测,沿隧道纵向 5 m 布置一个横断面,每个断面布置 6 个应力测点(见图 26)。选取纵向中间断面衬砌内力监测值,与数值模拟值进行对比分析,如图 27 所示。从图中可以看出,现场监测一层初期

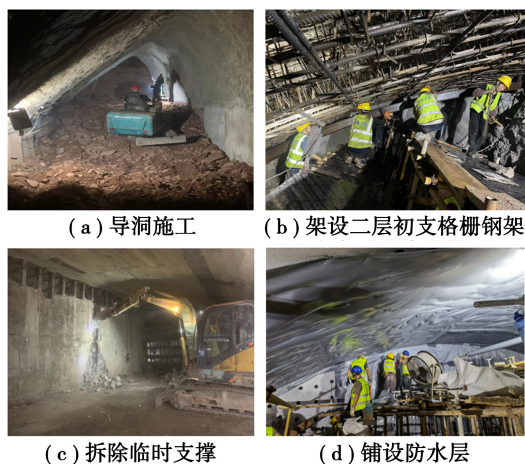


图 25 现场施工照片

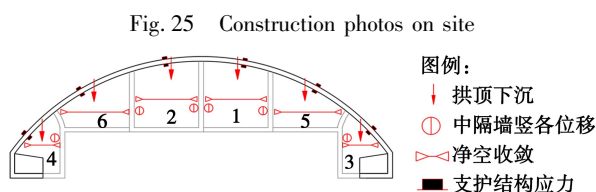


图 26 断面监测布置示意图
Fig. 26 Diagram of cross-section monitoring

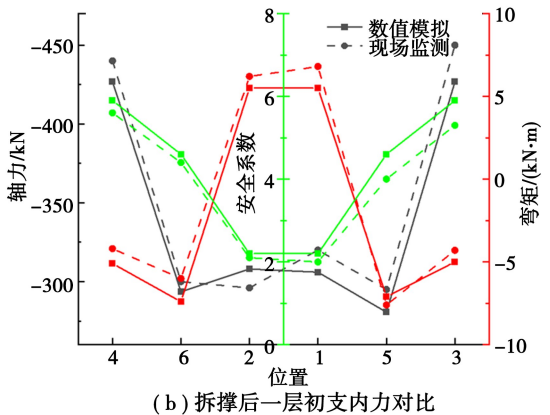
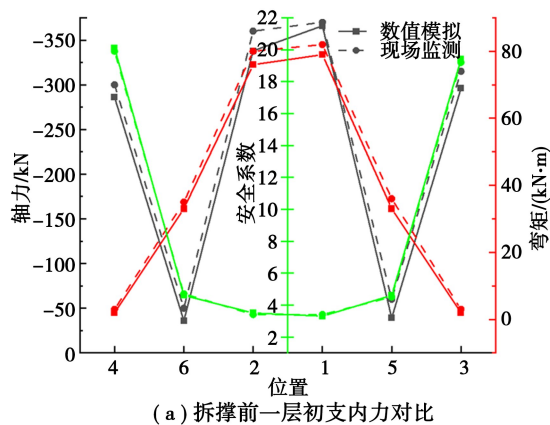


图 27 拆撑前后衬砌内力对比
Fig. 27 Comparison of lining internal force before and after support removal

支护内力值偏大,这是因为地表车辆荷载及地下水对现场施工存在影响。整体来看,拆撑前后数值模

拟结果均与现场监测结果吻合较好,同时,现场施工过程中未发生结构失稳、破坏,验证了拆撑方案的可行性与数值模拟的合理性。

5 结论

(1)跳仓法拆撑力学效应可分为“横向成拱效应”和“纵向成梁效应”。拆撑打破结构原有力学平衡所引发的荷载增量部分由横向成拱效应传递给拱脚位置围岩,部分由纵向成梁效应以剪力形式传递给未拆撑区域。横向成拱效应随距未拆撑区段距离的减小而减弱,纵向成梁效应随一次拆撑长度的增加而减弱。

(2)拆撑前,围岩最大竖向、水平位移均发生在导洞1、2拱顶位置,量值均远小于控制要求;围岩荷载主要由一层初期支护及临时支撑承担,且一层初期支护和临时支撑主要承担外荷载产生的弯矩和轴力,二层初期支护在导洞贯通后施做,基本不受力;二层初期支护安全系数远大于一层初期支护及临时支撑,一层初期支护为双层初支拱盖受力薄弱构件,受力最不利位置为其与竖撑相交处,安全系数略大于《铁路隧道设计规范》规定下限值1.8。

(3)同一断面横向拆撑顺序而言,最后拆除隧道拱顶位置竖撑有利于控制结构沉降,保障支护结构安全。隧道纵向上采用跳仓法进行拆撑,一次拆撑长度越长,拆撑区段“纵向成梁效应”越弱,结构变形越大,受力越不利,但受力最不利位置发生在拆撑边界截面,当一次拆撑长度超过4 m时,结构处于不安全状态,兼顾施工便利性和结构安全性,一次拆撑长度最终确定为 $L=2$ m;隔仓长度越小,相邻拆撑区域相互影响越大,结构越危险,经研究确定安全、合理、高效的隔仓长度为 $S=6$ m。

(4)双层初期支护结构拆撑过程中二层初期支护的安全系数较一层初期支护大,且拆撑导致的初支间协调变形和内力重分配会提高一层初期支护的结构安全性,表明双层初支比单层初支在拆撑时更安全。

参考文献(References)

- [1] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 351-364. (Wang Mengshu. An overview of development of railways, tunnels and underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(4): 351-364. (in Chinese))
- [2] 宋超业, 贺维国. 上软下硬岩质地层大跨隧道叠合承载拱结构设计分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 17-26. (Song Chaoye, He Weiguo. Structural design of the stacked loaded arch of large-span tunnels in upper-soft lower-hard rock stratum [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(1): 17-26. (in Chinese))
- [3] 龚彦峰, 张俊儒, 徐向东, 等. 全风化花岗岩富水地层超大断面隧道设计技术[J]. 铁道工程学报, 2015(10): 79-85, 92. (Gong Yanfeng, Zhang Junru, Xu Xiangdong, et al. Design technology for super large cross section tunnel in stratum of completely weathered granite with abundant water[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015(10): 79-85, 92. (in Chinese))
- [4] 李志业, 曾艳华. 地下结构设计原理与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003. (Li Zhiye, Zeng Yanhua. Theory and method of underground structure design [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003. (in Chinese))
- [5] 杨林, 江鸿, 陈培帅, 等. 浅埋大断面公路隧道塌方处治措施及效果分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(6): 207-213. (Yang Lin, Jiang Hong, Chen Peishuai, et al. Treatment measures for collapses of the shallow-buried highway tunnel with large cross-section and its effects analysis [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(6): 207-213. (in Chinese))
- [6] 黄斐, 高鑫. 基于拱部CD法修筑的土岩复合地层双层初期支护拱盖法隧道结构稳定性研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 37-45. (Huang Fei, Gao Xin. Study on the structural stability of mined tunnels with double-layer initial supporting arch cover in soil rock composite strata based on the arch section constructed by CD method [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(1): 37-45. (in Chinese))
- [7] 张建国, 王明年, 罗禄森, 等. 浅埋大跨度隧道拆撑对初支安全性影响分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 497-502. (Zhang Jianguo, Wang Mingnian, Luo Lusen, et al. Analysis of influence of dismantling temporary supports on preliminary lining of large-span shallow tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 497-502. (in Chinese))
- [8] 孙克国, 龚彦峰, 许炜萍, 等. 暗挖大跨地铁车站临时支撑拆除效应研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(7): 94-100. (Sun Keguo, Gong Yanfeng, Xu Weiping, et al. Research on the dismantling temporary support of metro station with shallow-depth subsurface-excavated and large-span [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(7): 94-100. (in Chinese))
- [9] 王松周. 基于卸荷减跨理论大断面水下隧道开挖的工序优化技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012. (Wang Songzhou. Research on process-optimized technology for large-span and

- subaqueous tunnel excavation based on unloading and span-cut mechanism [D]. Shangsha: Central South University, 2012. (in Chinese))
- [10] 张社荣, 曹世伟, 王超, 等. 浅埋偏压大跨度地铁隧道拆撑方案优化分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(8): 80-86, 136. (Zhang Sherong, Cao Shiwei, Wang Chao, et al. Optimization analysis of temporary supports dismantling of shallow-buried large-span subway tunnel under unsymmetrical pressure [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(8): 80-86, 136. (in Chinese))
- [11] 高鑫, 王文娟, 李清菲, 等. 软弱地层浅埋大跨隧道跳仓法拆撑空间效应研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 111-121. (Gao Xin, Wang Wenjuan, Li Qingfei, et al. Spatial effect of support dismantling through alternate bay construction method in shallow-buried large-span tunnels in soft and weak strata [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 111-121. (in Chinese))
- [12] 张俊儒, 欧小强, 郑强, 等. 超大断面隧道在双层初期支护下的拆撑安全性研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(6): 108-116. (Zhang Junru, Ou Xiaoqiang, Zhen Qiang, et al. On safety in dismantling temporary strut of super-large tunnels with double-layer primary support [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(6): 108-116. (in Chinese))
- [13] 宋超业, 贺维国. 上软下硬岩质地层大跨隧道叠合承载拱结构设计分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 17-26. (Song Chaoye, He Weiguo. Structural design of the stacked loaded arch of large-span tunnels in upper-soft lower-hard rock stratum [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(1): 17-26. (in Chinese))
- [14] 肖明清, 徐晨, 郑强, 等. 荷坳隧道四洞小净距段支护结构设计研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 1-10. (Xiao Mingqing, Xu Chen, Zheng Qiang, et al. Study on the support structure design of spatially small-spaced four-tube section of He'ao tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 1-10. (in Chinese))
- [15] 来弘鹏, 谢永利, 杨晓华. 地表预注浆加固公路隧道浅埋偏压破碎围岩效果分析[J]. 岩石力学与工程报, 2008(11): 2309-2315. (Lai Hongpeng, Xie Yongli, Yang Xiaohua. Treatment effect analysis of shallow-buried crushed surrounding rocks under unsymmetrical pressure reinforced with surface pregrouting technology in highway tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(11): 2309-2315. (in Chinese))
- [16] 张德华, 刘士海, 任少强. 高地应力软岩隧道中型钢与格栅支护适应性现场对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2258-2266. (Zhang Dehua, Liu Shihai, Ren Shaoqiang. Research on selection of steel and steel grid for tunnel support in soft rock with high geostress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2258-2266. (in Chinese))
- [17] 张德华, 刘士海, 任少强. 基于围岩-支护特征理论的高地应力软岩隧道初期支护选型研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 139-148. (Zhang Dehua, Liu Shihai, Ren Shaoqiang. Research on selection of preliminary support for tunnel in high ground-stress soft rock based on surrounding rock-support characteristic curve theory [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 139-148. (in Chinese))
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范(JGJ 138-2016)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of composite structures [S]. Beijing: China Building and Building Press, 2016. (in Chinese))
- [19] 魏鹏儒, 刘丁丁, 张俊儒. 浅埋强风化泥质粉砂岩地层大断面地铁渡线区间隧道开挖方法优化研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增 2): 207-216. (Wei Pengru, Liu Dingding, Zhang Junru. Research on construction method optimization of large section subway crossover tunnel in shallow and strongly weathered argillaceous siltstone [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(Supp. 2): 207-216. (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路隧道设计规范(TB 10003-2016)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017. (National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of railway tunnels [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese))