



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309717

引用格式: 乔雄, 倪伟淋, 扈士静, 等. 隧道装配式临时支撑结构力学特性[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1688-1700.

Qiao Xiong, Ni Weilin, Hu Shijing, et al. Mechanical characteristics of tunnel assembly temporary support structure[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1688-1700.

隧道装配式临时支撑结构力学特性

乔雄¹, 倪伟淋^{2*}, 扈士静¹, 杨小龙¹

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050; 2. 中建桥梁有限公司, 重庆 402260)

摘要 针对隧道临时支撑施工中的不足, 提出临时支撑装配化, 并从临时支撑形状、装配化结构、受力变形等方面对该新型结构展开研究。以邵家塘隧道为背景, 统计现场监测数据, 并利用有限元软件将其与传统临时支撑结构进行对比分析可得: 隧道后行洞开挖时会对先行洞的变形造成不利影响。竖直临时支撑对隧道左、右拱腰、地表沉降以及总收敛变形的控制较好, 与传统弧形相比, 分别减小了 16%、20%、55% 和 14%, 且竖直临时支撑能够更快恢复稳定, 可缩短拆撑距。采用竖直临时支撑, 隧道初支受力相比弧形支撑更小、更安全, 竖向和横向最大应力分别减小了 58%、73%。采用 ABAQUS 软件对临时支撑局部结构的力学特性进行了模拟, 结果表明: 装配式竖直和传统临时支撑结构的受力与变形均能满足规范要求。但装配式临时支撑结构在施工效率和经济效益方面更有优势, 选用装配式临时支撑更合适。

关键词 隧道工程; 装配化结构; 数值模拟; 临时支撑; 现场监测

中图分类号 U455.4;; **文献标志码** A

Mechanical Characteristics of Tunnel Assembly Temporary Support Structure

QIAO Xiong¹, NI Wei-lin^{2*}, HU Shi-jing¹, YANG Xiao-long¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. China State Construction Bridge Corp., Ltd., Chongqing 402260, China)

[Abstract] In response to the shortcomings in the construction of temporary support for tunnels, a assembly of temporary support was proposed, and the new structure was studied from the aspects of temporary support shape, assembly structure, and stress deformation. Taking the Shaojiatang Tunnel as the background, on-site monitoring data was collected and compared with traditional temporary support structures using finite element software. It can be concluded that excavation of the tunnel's rear tunnel will have adverse effects on the deformation of the previous tunnel. Vertical temporary support has better control over the left and right arch waists, surface settlement, and total convergence deformation of the tunnel. Compared with traditional curved structures, it decreases by 16%, 20%, 55%, and 14%, respectively. Moreover, vertical temporary support can restore stability faster and shorten the dismantling distance. By using vertical temporary support, the initial support force of the tunnel is smaller and safer compared to the curved support, and the maximum vertical and lateral stresses are reduced by 58% and 73%, respectively. The mechanical characteristics of temporary support local structures were simulated using ABAQUS software. The results show that the forces and deformations of both prefabricated vertical and traditional temporary support structures can meet the requirements of the specifications. However, prefabricated temporary support structures have more advantages in construction efficiency and economic benefits, and choosing prefabricated temporary support is more suitable.

[Keywords] tunnel engineering; assembly structure; numerical simulation; temporary support; on-site monitoring

近年来, 中国隧道建设技术由传统工艺快速转向预制装配化, 使其建设技术向精度化、智能化、机械化飞速发展。隧道装配式支护, 不仅可解决隧道传统工艺施工中, 二衬的空洞、裂缝、掉块、厚度不足等问题^[1-4], 还可改善施工环境, 提高衬砌强度、防水性能^[5-6], 另外能带来较大的经济效益, 能

够缩短施工周期^[7]。中国的秦岭 I 线隧道^[8]、蒙华铁路白城隧道^[9]、浩吉铁路白城隧道^[10]等采用的正是装配化管片衬砌施工, 但由于地下环境过于复杂, 预制装配式新技术运用于地下空间结构会受环境的限制, 使装配构件强度受影响的因素较多, 尤其各管片之间的连接方式, 这与整个衬砌结构的稳

收稿日期: 2023-12-09; 修订日期: 2024-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(51768041)

第一作者: 乔雄(1980—), 男, 汉族, 陕西榆林人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。研究方向: 隧道工程。E-mail: qiaoxiong@lut.edu.cn。

* 通信作者: 倪伟淋(1997—), 男, 汉族, 重庆人, 硕士。研究方向: 隧道工程。E-mail: 10232581072@qq.com。

定性密切相关,常见的连接方式有平面式、榫式、“L”形台阶式、弧面式和楔式等^[11],而装配式衬砌破坏往往是由管片之间连接处强度受损引起。经研究表明合理的选择螺栓位置^[12-13]、螺栓形状^[14]及接头刚度^[15]能够有效改善衬砌的结构力学性能,因此衬砌管片之间的连接方式对整体衬砌强度尤为重要。为研究装配式衬砌结构在支护过程中的力学性能,Huang等^[16]通过有限元数值分析与加载试验相互验证分析出衬砌管片的最大正弯矩分布在拱顶和仰拱处。Liu等^[17]进一步分析出了衬砌的弯矩和轴力不均匀分布的主要原因,分别由衬砌径向的剪切力和切向剪切力造成。Wang等^[18]对加载试验中衬砌管片裂纹的发育过程进行分析,得出有关裂缝与加载路径的关系。而在实际工程中,管片衬砌强度受损,出现裂纹、变形时,可采用钢板加固法^[19-20]或环氧树脂黏合加固法^[21]增强衬砌结构的抗变形能力。

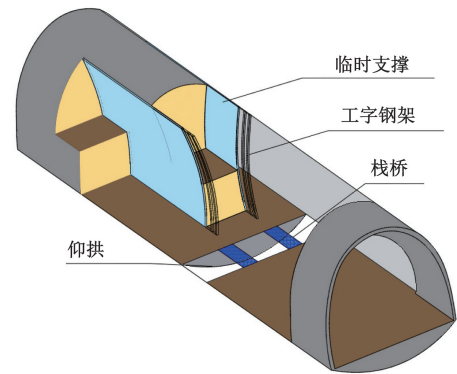
目前中国对装配式地下空间建设的研究,主要集中在地下站台、预制环形管片衬砌及衬砌间的连接方式。而对于大断面隧道的矿山法施工中,装配式临时支撑结构的研究尚鲜见报道。鉴于此,以邵家塘隧道施工为依托工程,对大断面双侧壁导坑法临时支撑技术进行探索,提出装配式临时支撑结构设计,以期为大断面隧道矿山法中装配式临时支撑施工技术提供借鉴。

1 工程概况

G30 连霍高速公路清水驿至忠和段扩容改造工程起于兰州市榆中县清水驿乡杜家咀村,接连霍高速十八里铺至清水驿段,止于皋兰县平岷村,邵家塘隧道按照三车道设计,为左右分离式双洞,隧道右线全长 2 242 m,左线全长 2 208 m,隧道最大埋深 173 m。隧道修建区域内有黄土丘陵沟壑区和局部砂岩段,整个山体走向呈北东向,该区域山体表层围岩为上更新统风成黄土,浅黄色,土质较均匀,主要以粉粒组成,含砂量较高,大孔隙发育,土质疏松,稍湿。下伏地层为上更新统冲积黄土,黄褐色、稍湿,硬塑,土质较均匀,粉粒为主,含砂量较高。隧道进口和出口处的坡度分别为 30°和 20°,隧道修建地区植被较少,该区域内地表水不发育,雨季时沟谷的内侧有短暂流水,无常年流水痕迹。为了便于研究,选取隧道典型段落 ZK53 + 160 ~ ZK53 + 210 段作为研究背景,该段隧道支护结构全部按土质 V 级围岩设计,隧道最大开挖跨度为 17.889 m,拱高 11.05 m,采用双侧壁导坑法施工,衬砌类型为 TVXa,现场施工方法如图 1 所示,支护参数如图 2 所示。



(a) 邵家塘隧道左线断面开挖现场图



(b) 开挖示意图

图 1 隧道施工

Fig. 1 Tunnel construction

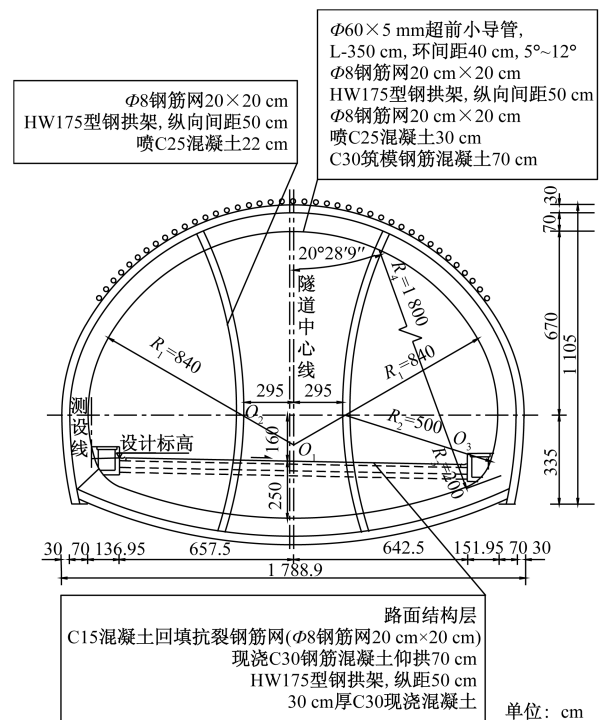


图 2 TVXa 衬砌类型

Fig. 2 TVXa lining type

2 隧道施工有限元分析

2.1 建立模型

邵家塘大跨度隧道采用双侧壁导坑法开挖,本

次模拟施工段长度为 50 m (ZK53 + 160 ~ ZK53 + 210),原设计衬砌支护参数^[22]如表 1 所示,优化后只改变支护结构形状,衬砌支护设计参数不变,其中初支和中隔壁的弹性模量计算公式为^[25]

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

式(1)中: E 为计算后钢筋弹性模量,MPa; E_0 为原混凝土的弹性模量,MPa; S_g 为钢拱架截面积, m^2 ; E_g 为钢材弹性模量,MPa; S_c 为混凝土截面积, m^2 。

由于弧形装配式支撑不易加工与施作,因此设计装配式临时支撑宜采用竖直型,但竖直型临时支撑在实际工程中运用较少,故还需对竖直型支撑替代弧形支撑的可行性做进一步研究。

根据圣维南原理,所建模型边界取值大于隧道最大跨径的 3~5 倍^[26],隧道跨径为 17.889 m,开挖

高度为 11.05 m。因此,隧道左、右边界取 99 m,进深边界取 100 m,下边界取 100 m,上边界取至地表,并根据地形图建立地表实际模型。模拟两种不同中隔壁隧道施工,两种不同中隔壁三维模型产生的单元和节点个数分别为 34 393 个单元、28 097 个节点和 33 948 个单元、27 261 个节点,三维模型如图 3 所示。隧道施工一次模拟开挖深度为 2 m,隧道几个导洞施工先后顺序依次为,左上导坑开挖支护、右上到坑开挖支护、左下导坑开挖支护、右下导坑开挖支护、中上导坑开挖支护、中下导坑开挖支护,开挖间距依次为 2 m、10 m、2 m、18 m、10 m,共计开挖 25 个全断面(进深 50 m)。

2.2 数值模拟变形规律对比分析

模拟邵家堂隧道施工段 zk 53 + 160 ~ zk 53 + 210 开挖,中隔壁拆除后,两种不同中隔壁支护隧道施工的围岩最终总位移云图,如图 4、图 5 所示。隧道最终沉降和收敛位移情况如图 6、图 7 所示。施工过程中,中隔壁最大位移如图 8 所示。

从图 4、图 5 可知,弧形中隔壁隧道,地表最终沉降量为 1.1 mm,竖直中隔壁隧道地表最终沉降量为 0.5 mm,弧形相比竖直中隔壁隧道地表的最终下沉量减少了 55%。另外,由于数值模拟施工过程中未做仰拱施工,导致两种中隔壁隧道的最终位移云中,最大位移均在隧道拱底处,其值分别为 72 mm 和 84.8 mm,竖直相对弧形中隔壁隧道拱底变形增大了 17%。经对比分析后可得,不同中隔壁对地表最终沉降量影响较大,对隧道拱底影响较小。竖直

表 1 三维模型材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of three-dimensional model materials

参数	弹性模量 E/MPa	泊松 比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(\circ)$	容重 $\gamma/$ (kN/m^3)
风积黄土(V级)	27.00	0.3	25	23	14.5
冲积黄土(V级)	60.00	0.3	26	25	16.0
初支	31 915.84	0.2	—	—	22.0
中隔壁	60 042.26	0.2	—	—	22.0
C25 混凝土	23 000.00	0.2	—	—	22.0
I18 钢拱架	210 000.00	0.3	—	—	78.5
HW175 钢拱架	206 000.00	0.3	—	—	78.5

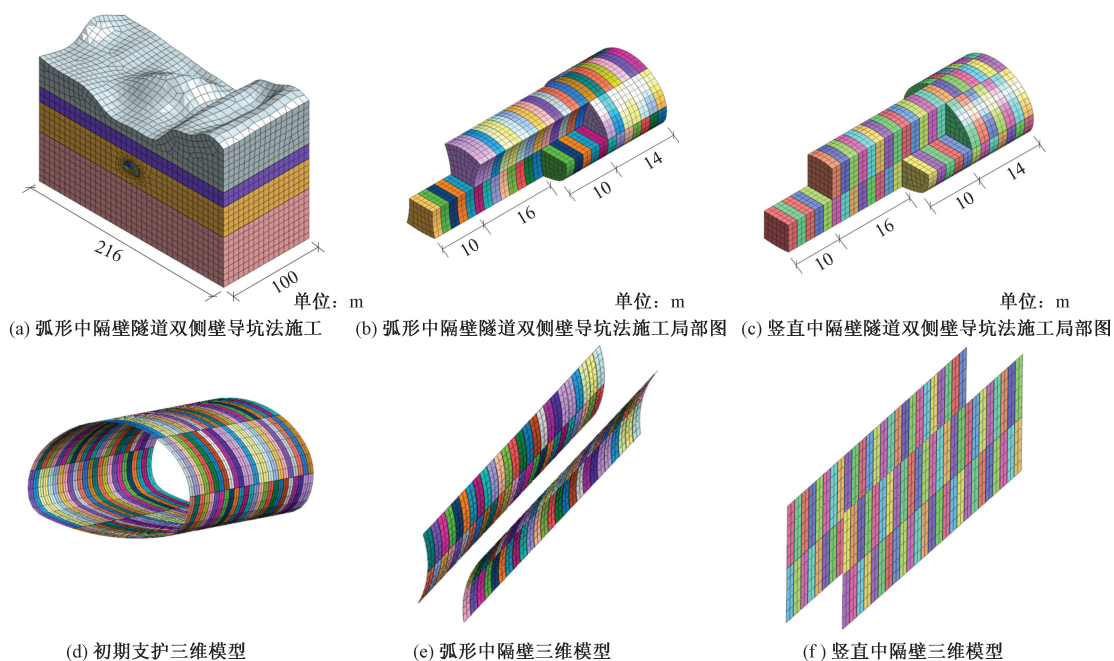


图 3 三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model

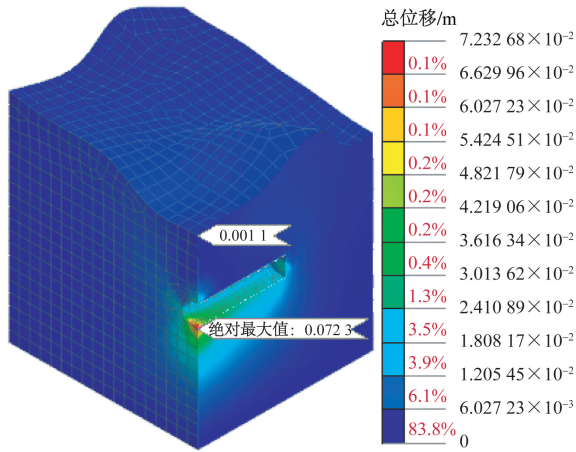


图4 弧形中隔壁隧道地表位移

Fig. 4 Surface displacement of the adjacent tunnel in the arc

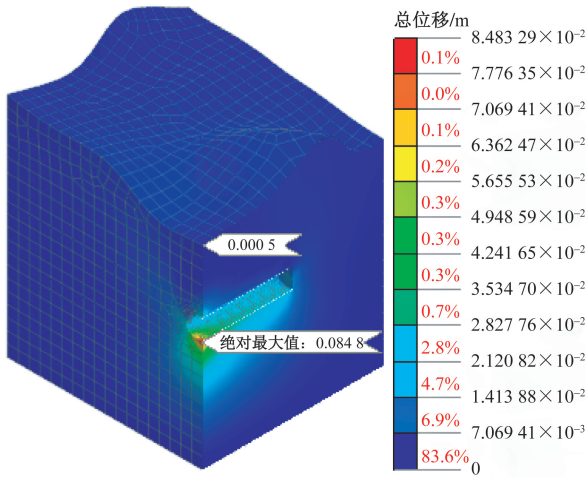


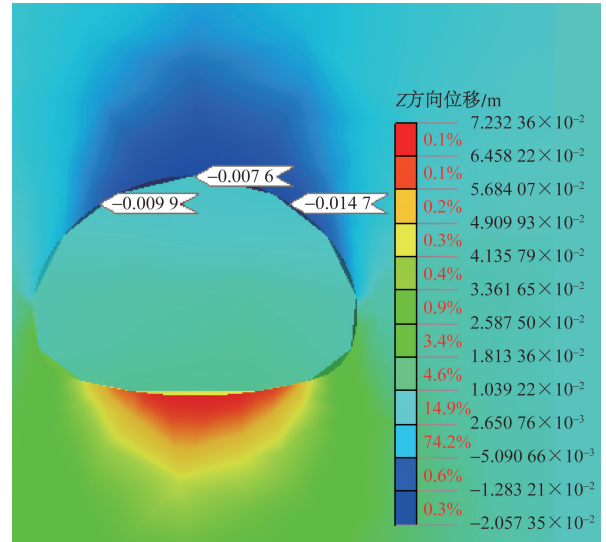
图5 竖直中隔壁隧道地表位移

Fig. 5 Surface displacement of the adjacent tunnel in the vertical middle

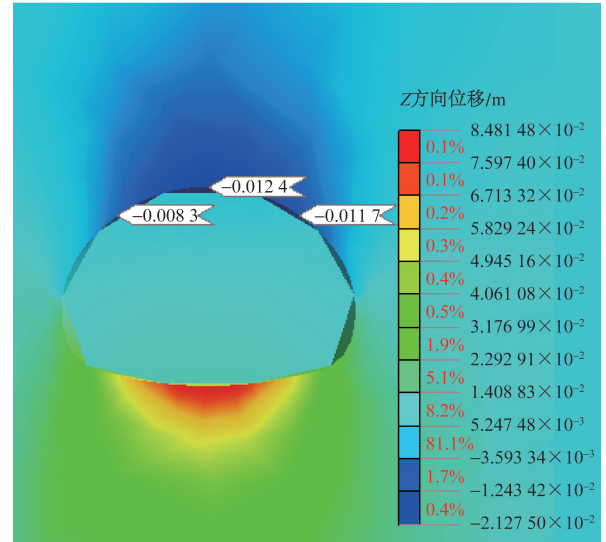
中隔壁隧道的最终地表沉降量小于弧形的,而弧形中隔壁隧道拱底变形小于竖直的。表明竖直中隔壁对控制地表下沉有较好的效果。

由图6可知,弧形中隔壁隧道拱顶以及左、右拱腰的最终沉降量分别为7.6、9.9、14.7 mm,竖直中隔壁隧道的分别为12.4、8.3、11.7 mm。竖直相比弧形中隔壁,隧道拱顶的最终沉降增加了63%,左、右拱腰的最终沉降值分别减少了16%、20%。由此可知,不同中隔壁对隧道拱顶以及左、右拱腰的沉降量均有一定的影响,且竖直中隔壁隧道的左、右拱腰均小于弧形的,表明竖直中隔壁能够很好地控制左、右拱腰的沉降量。

根据图7对比分析隧道左、右边墙收敛值可得,弧形中隔壁隧道左、右边墙收敛值分别为6.2、7 mm,竖直中隔壁隧道的左、右边墙收敛值相比弧



(a) 弧形中隔壁隧道围岩沉降



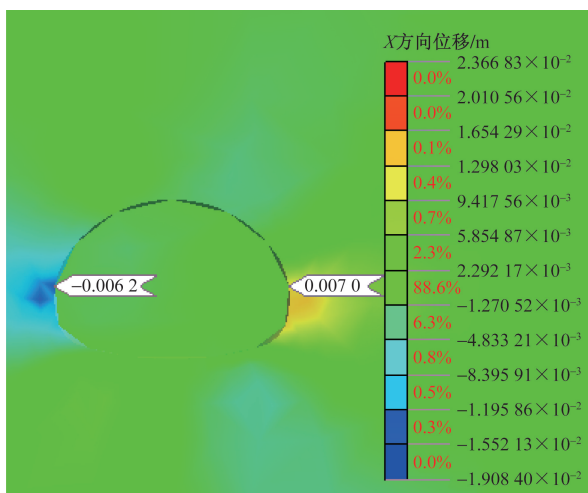
(b) 竖直中隔壁隧道围岩沉降

图6 两种中隔壁隧道围岩沉降对比

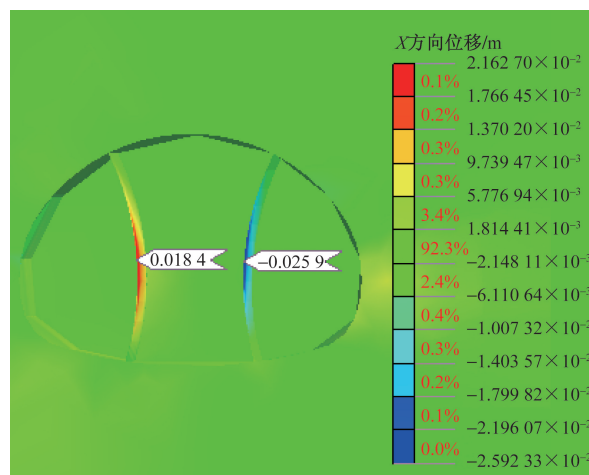
Fig. 6 Comparison of settlement of surrounding rock in the adjacent tunnel in two types

形的较小,分别为5.8、5.5 mm,分别减小了6%和21%;对比分析隧道总收敛值可得,弧形中隔壁隧道最终总收敛为13.2 mm,竖直中隔壁隧道的为11.3 mm,可得竖直相比弧形中隔壁隧道最终总净空收敛值减小了14%。由此可知,不同中隔壁对隧道收敛变形有一定的影响,相比传统中隔壁临时支撑施工方法,隧道采用竖直中隔壁临时支撑施工对隧道的收敛变形控制效果更好。

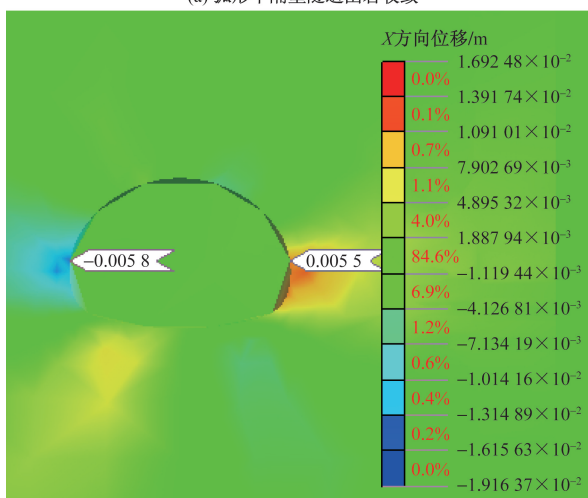
从图8可以看出,两种中隔壁隧道的右侧中隔壁临时支撑均大于左侧。弧形中隔壁隧道最后开挖断面施工完时,左、右中隔壁的位移值达到最大,其值分别为18.4、25.9 mm;竖直中隔壁隧道的中部下台阶开挖前阶段,因受土压力作用影响下,使中隔壁位移值达到最大,其值分别为24.6、27.7 mm。



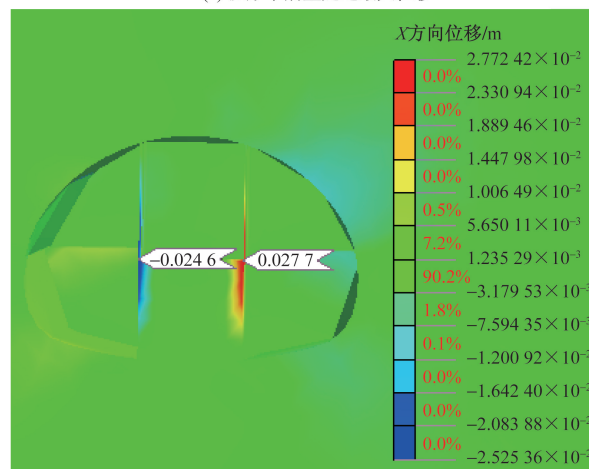
(a) 弧形中隔壁隧道围岩收敛



(a) 弧形中隔壁隧道最大位移



(b) 竖直中隔壁隧道围岩收敛



(b) 竖直中隔壁隧道最大位移

图7 两种中隔壁隧道围岩收敛对比

Fig. 7 Convergence comparison of surrounding rock of the tunnel next door in two types

图8 两种中隔壁隧道围岩收敛对比

Fig. 8 Convergence comparison of surrounding rock of the next tunnel in two types

相比弧形,竖直中隔壁隧道左、右中隔壁的最大位移值增大了34%、7%。经对比分析可得,不同中隔壁隧道施工对中隔壁自身有一定的影响,相比弧形,竖直中隔壁隧道施工时,对中隔壁变形的控制相对较弱,但左、右中隔壁变形较均匀,竖直中隔壁的最大变形主要由未开挖土体向外挤压导致。

2.3 数值模拟受力特征对比分析

对比两种不同中隔壁临时支撑工况下,隧道8个关键点(拱顶、左、右拱腰、左、右边墙、左、右拱脚及拱底)的最终应力云图、中隔壁临时支撑最终产生的应力云图,分别如图9、图10所示。

经分析可知,中隔壁拆除后,弧形中隔壁隧道初支结构在X方向上的应力大于Y和XY两个方向,因此,只对X方向进行受力分析。根据图9可知,竖直和弧形中隔壁隧道初支结构的最大拉应力均分布在隧道拱脚处。分别为23.1、29.3 MPa。最大压应力均分布在隧道拱脚与仰拱底部之间,分别

为26.1、32.5 MPa,隧道初支结构均以受压为主。对比可得。竖直比弧形中隔壁隧道的初支结构的最大压应力减少了20%,表明竖直中隔壁对隧道初支结构的受力更有利。

根据图10可知,弧形中隔壁竖向和水平方向的最大拉应力均大于最大压应力;竖直中隔壁竖向和水平方向的最大拉应力均小于最大压应力。从竖向最大应力分析可得,弧形中隔壁的竖向最大压力分布在中隔壁中下部位,竖直中隔壁的竖向最大压力分布在中隔壁底部,分别为39.8、37.4 MPa,竖直相比弧形中隔壁,竖向最大压应力减少了6%。弧形中隔壁的竖向最大拉应力在中隔壁顶部、底部均有分布,竖直中隔壁的主要分布于顶部,分别为63.0、26.5 MPa,竖直相比弧形中隔壁,竖向最大拉应力减少了58%。

从水平方向最大应力分析可得,弧形中隔壁最大压应力分布在中隔壁中下部位,竖直中隔壁最大压应力分布在中隔壁顶部,分别为49.7、35.4 MPa。

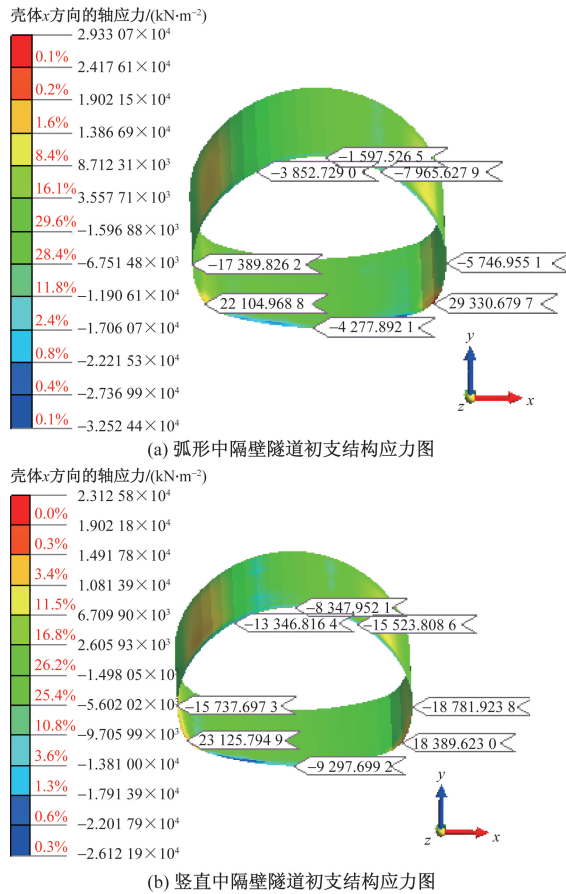


图9 两种中隔壁隧道初支结构应力对比
Fig. 9 Stress comparison of the primary branch structure of the two middle partition tunnels

竖直相比弧形中隔壁的水平最大压应力减少了29%。弧形中隔壁最大拉应力在中隔壁的顶部和底部均有分布,竖直中隔壁最大拉应力主要分布在中隔壁上部,在中部也有分布,分别为66.8、17.8 MPa。竖直与弧形相比,中隔壁的水平最大拉应力减小了73%。

综上所述,从最大拉、压应力值分析可知,不同中隔壁,对中隔壁竖向的最大压应力影响较小,对竖向的最大拉应力以及水平方向的最大拉、压应力的影响较大,尤其是对水平方向的最大拉应力值影响最大。竖直中隔壁产生的水平和竖向最大拉、压应力均小于弧形中隔壁所产生的,这现象表明,采用竖直替换弧形中隔壁,可显著降低中隔壁产生的最大应力值。

3 现场监测数据

为了获得邵家堂隧道采用传统双侧壁导坑法施工时支护结构的变形数据。选取 ZK53 + 160、ZK53 + 165 和 ZK53 + 170 断面进行变形监测,监测项目为隧道下沉和净空收敛,断面监测点如图 11 所示。

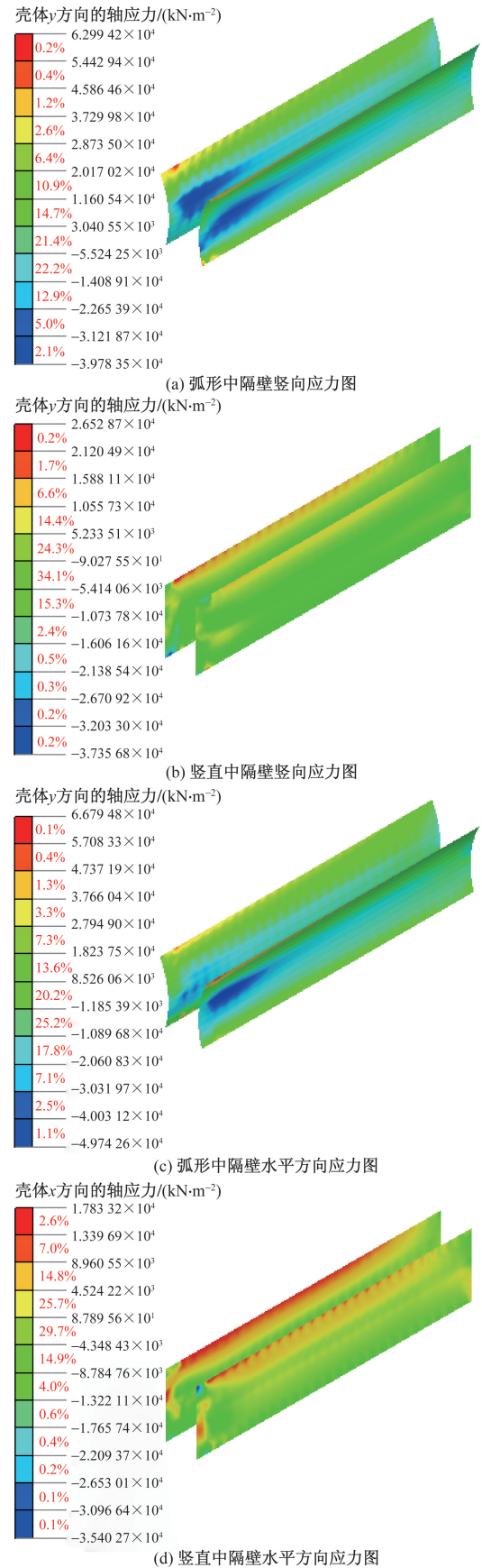
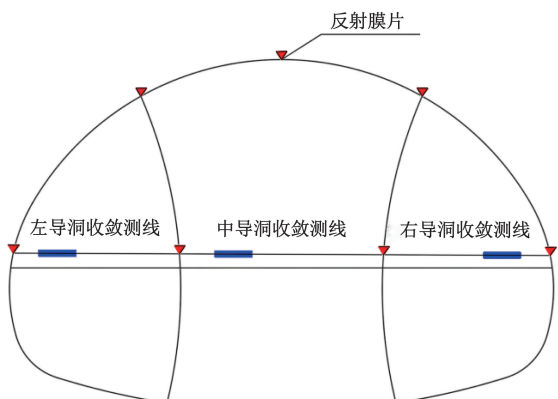


图10 中隔壁应力对比
Fig. 10 Comparison of partition-door stresses



(a) 邵家堂隧道断面监测点示意图



(b) 邵家塘隧道测点布置现场

图 11 测点布置

Fig. 11 Measurement point arrangement

3.1 隧道监测结果

对邵家塘隧道左线 zk53 + 160 断面的左、右导洞和主导洞拱顶部位进行沉降监测,断面布置三个反射膜片作为沉降观测点,最终沉降、收敛监测结果分别如表 2、表 3 所示,沉降曲线如图 12 ~ 图 14 所示,收敛曲线如图 15 ~ 图 17 所示。根据现场监测数据,可得到变形规律,主导洞小于左、右导洞拱顶最终沉降量。收敛值由大到小排列依次为全断面、左导洞、右导洞。另外,全断面的相对收敛速率也大于左右导洞。

3.2 现场监测与数值模拟对比

将邵家堂隧道施工段 ZK53 + 160 ~ ZK53 + 210

表 2 邵家堂隧道左线观测断面拱顶沉降监测结果
Table 2 Monitoring results of arch settlement of the left line of Shaojiatang Tunnel

试验断面	位置	最终沉降值/mm	最终速率/(mm·d ⁻¹)
ZK53 + 160	主导洞拱顶	59	0
	右侧导洞拱顶	144	-1
	左侧导洞拱顶	134	-2

数值模拟的最终沉降、收敛值与其现场监测施工断面 ZK53 + 160 的相比较,对比结果如表 4 所示,可以看出,数值模拟结果中的沉降、收敛值均比现场监测数据小,由于现场施工监测存在时空效应,并且监测时间长,共计监测 141 d。而数值模拟开挖和支护为瞬间完成,模拟的施工段落也较短。数值模拟过程中没考虑渗水和人为因素的影响,故变形较小。但从整体沉降上可得出相同的规律,左右导洞拱顶沉降值明显大于主导洞拱顶的,表明该数值模拟结果较可靠。

表 3 邵家堂隧道左线观测断面收敛监测结果

Table 3 Observation section convergence monitoring results of Shaojiatang Tunnel

位置	测试断面	最大收敛值/mm	最终收敛值/mm	最终速率/(mm·d ⁻¹)
左导洞	ZK53 + 160	73	69	-2
右导洞	ZK53 + 160	-71	58	10
全断面	ZK53 + 160	-89	-35	-6

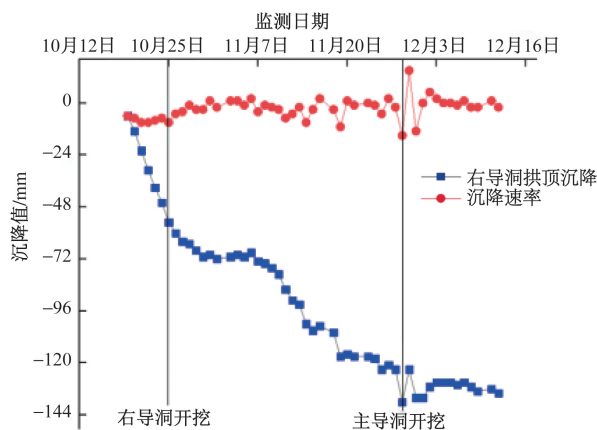


图 12 ZK53 + 160 断面左导洞拱顶沉降

Fig. 12 Settlement of the left guide hole vault of the ZK53 + 160 section

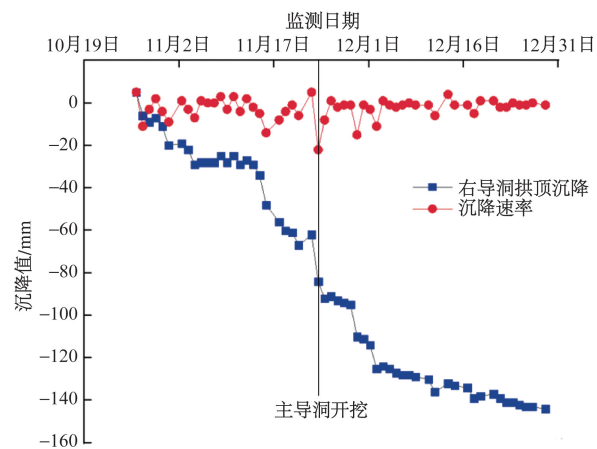


图 13 ZK53 + 160 断面右导洞拱顶沉降

Fig. 13 Settlement of the right guide hole vault of the ZK53 + 160 section

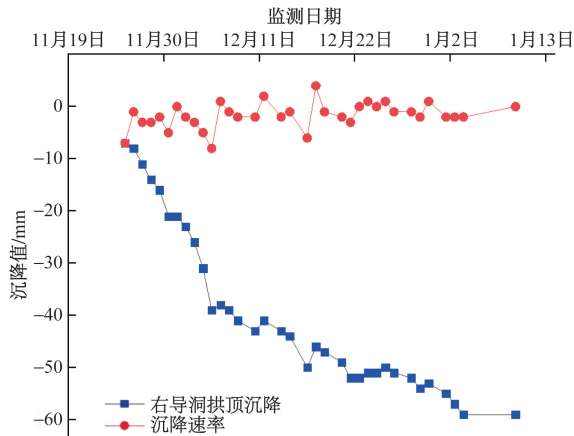


图 14 ZK53 + 160 断面主导洞拱顶沉降

Fig. 14 Settlement of the dominant hole vault of ZK53 + 160 section

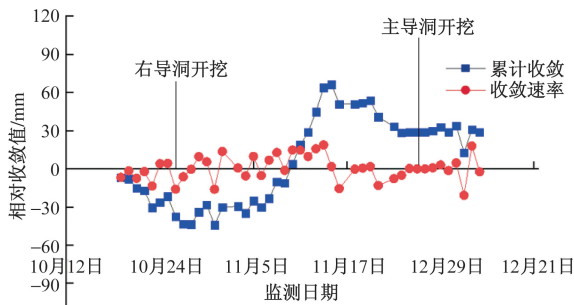


图 15 ZK53 + 160 断面左导洞相对收敛

Fig. 15 Left guide hole of the ZK53 + 160 section is relatively convergent

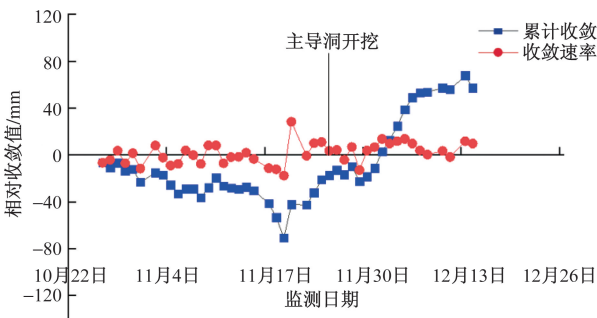


图 16 ZK53 + 160 断面右导洞相对收敛

Fig. 16 Right guide hole of the ZK53 + 160 section is relatively convergent

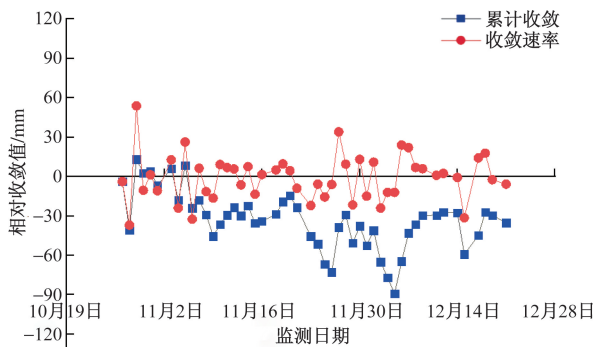


图 17 ZK53 + 160 断面全断面相对收敛

Fig. 17 Full section of ZK53 + 160 section is relatively convergent

表 4 模拟数据与现场监测结果对比

Table 4 Comparison of simulation data and on-site monitoring results

项目	数值模拟/mm	现场 ZK53 + 160/mm
拱顶最终沉降	7.6	59
左导洞最终沉降	9.9	134
右导洞最终沉降	14.7	144
断面总最终收敛	13.2	89

4 新型装配式临时支撑结构

4.1 装配式结构的优点

大力发展装配式建筑,有利于推动建材可循环利用的绿色发展,装配式技术能够满足低碳建材、绿色施工,节约成本等^[23-24,27]条件,而装配式临时支撑结构的优点在于,可根据现场需要制作高精度构件,配合现场智能化施工,减少现场人力拼装,加快安装和拆卸速度,节约时间成本。

若能将装配式技术广泛运用到山岭隧道施工中,针对山岭隧道设计一种可循环使用的预制装配式中隔壁结构,不仅能为矿山法技术带来快速、绿色、高效的发展前景,还能为山岭隧道建设带来良好的经济效益。

4.2 临时支撑结构

提出一种新型装配式临时支撑结构,并对其在施工过程中的力学特征展开研究。该结构选用钢材,由 H175 型钢、横向连接构件、挡土钢板、插销式连接口以及“T”形槽口组成,该模型如图 18 所示。选用 H175 型钢作为主要的竖向受力支撑杆件,挡土钢板作为主要的水平受力结构,而横向连接构件主要用于连接两相邻的 H175 型钢,使其形成一个整体支撑结构。

为验证装配式临时支撑结构前期预制容易,后期施工高效,将按照 1:10 的比例预制出装配式临时支撑结构构件,并按照要求将预制的装配构件拼装出相应的实体模型,模型材料选用钢材,如图 19 所

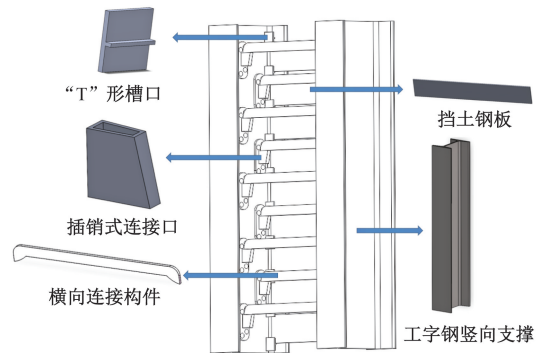


图 18 装配式临时支撑结构

Fig. 18 Prefabricated temporary support structure

示。经过实际操作后发现,该选型结构的拼装过程快速、易操作,符合新型装配式临时支撑现场施工简便的目的。若能将该技术运用于实际工程建设中,取代传统喷射混凝土的挡土方式,不仅能降低成本,减少混凝土用量和材料损耗带来的建筑垃圾,还能够改善临时支撑拆除时对其他支护结构造

成的扰动问题,使施工达到高质量,高效率的目的。

4.3 装配构件主体结构

装配化施工技术,通常先在材料加工厂,将装配构件预制成形,再运输到现场进行拼装,各杆件之间通过设计的连接方式进行连接。如图 20 所示,插销式连接口和“T”形槽口采用焊接的方式分别布置于 HW175 型钢的内侧翼缘和腹板,而横向连接构件和挡土钢板分别嵌入插销式连接口和“T”形槽口中,各装配件尺寸参数如表 5 所列。



图 19 装配式临时支撑结构

Fig. 19 Prefabricated temporary support structure

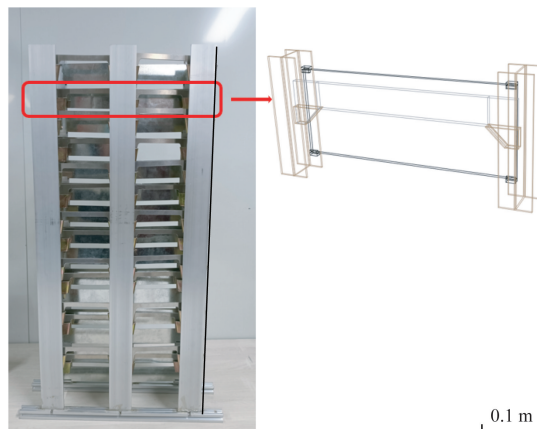


图 20 装配式临时支撑基本结构

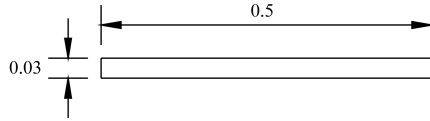
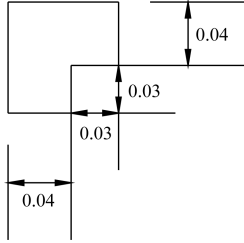
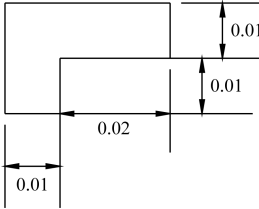
Fig. 20 Basic structure of prefabricated temporary support

表 5 临时支撑装配构件尺寸

Table 5 Size of temporary support assembly members

构件名称	横截面尺寸/m	拉伸长度/m
横向连接构件		0.030 00
HW175		0.700 00
插销式连接口		0.050 00

续表 5

构件名称	横截面尺寸/m	拉伸长度/m
挡土板		1.325 00
“L”形上槽口		0.083 75
“L”形下槽口		0.083 75

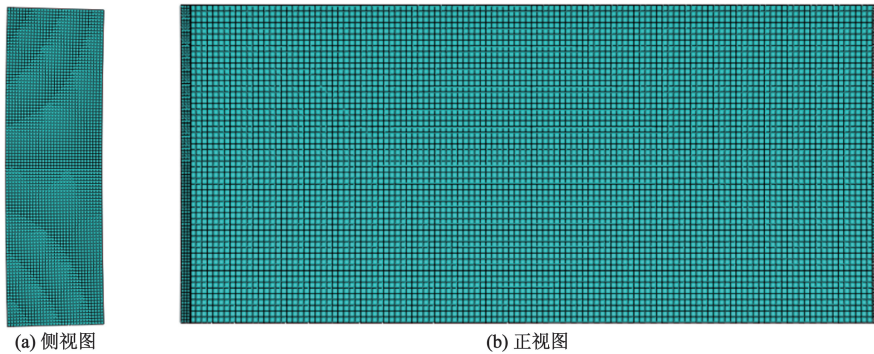


图 21 传统临时支撑结构有限元模型

Fig. 21 Finite element model of traditional temporary support structure

5 隧道临时支撑有限元分析

5.1 传统与新型装配式临时支撑模型建立

为了进一步验证新型装配式临时支撑结构的可用性,将该临时支撑结构模型与传统临时支撑结构进行对比,分析相同外荷载下两种不同临时支撑结构的应力应变特征。

有限元模型中,临时支撑装配构件均设置为三维可变形体,传统临时支撑为混凝土包裹型钢的弧形结构,混凝土为 C25,钢架为 HW175,有限元模型如图 21 所示。新型临时支撑结构除了插销式接口以外,其他装配构件均通过建立草图和实体拉伸命令完成,插销式接口通过建立草图和实体拉伸后再进行切削得到。考虑模型计算的收敛性以及网格划分方便,将选取新型临时支撑结构中,一段完整的装配结构进行受力验证,忽略其他段的影

响;并对结构进行简化。“T”形槽口简化:将“T”形槽口简化为“L”形槽口;插销式接口简化:将插销式接口与工字钢竖向支撑的接触简化为焊接。有限元模型如图 22 所示,加载方式如图 23 所示,模型边界条件如图 24 所示,模型的尺寸采用实际尺寸,如表 5 所示,材料参数如表 6 所示。钢材的塑性模型采用双折线模型,混凝土的塑性模型采用塑性损伤模型。

5.2 传统与装配式临时支撑模拟应变结果对比分析

为进一步了解受相同外荷载下,两种不同结构的应变差异,将装配式竖直临时支撑模型与传统弧形临时支撑结构模型的应变云图进行对比,如图 25 所示,可以看出,装配式临时支撑结构和传统弧形临时支撑结构整体最大应变分别为 0.95 mm 和 0.89 mm,由于传统弧形临时支撑采用是混凝土包裹

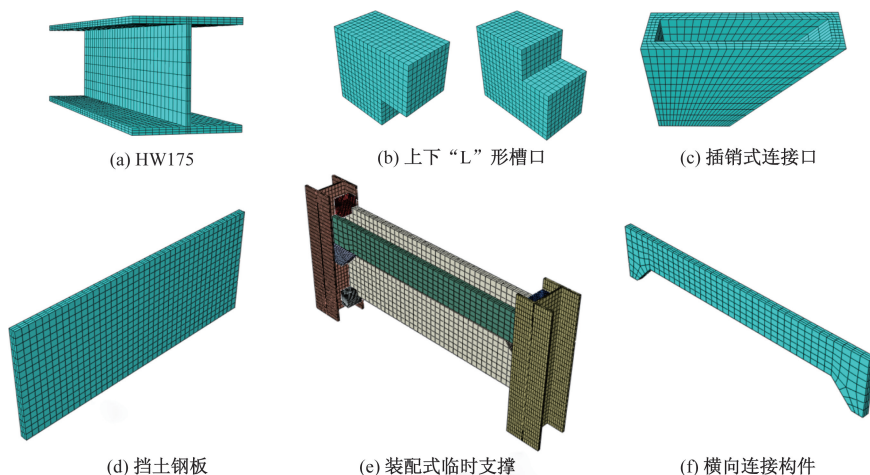


图 22 新型装配式临时支撑结构有限元模型

Fig. 22 Finite element model of new prefabricated temporary support structure

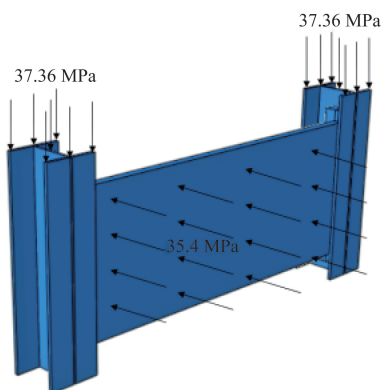


图 23 新型装配式临时支撑结构加载图

Fig. 23 Loading diagram of the new prefabricated temporary support structure

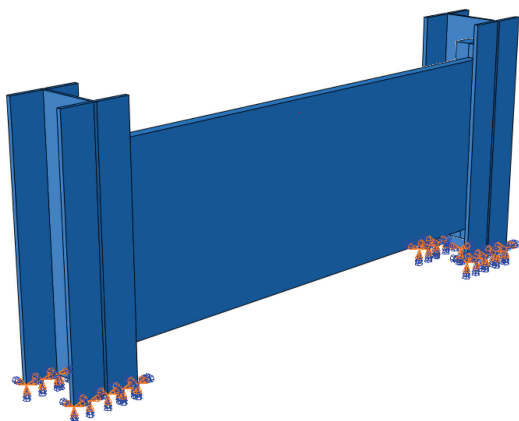


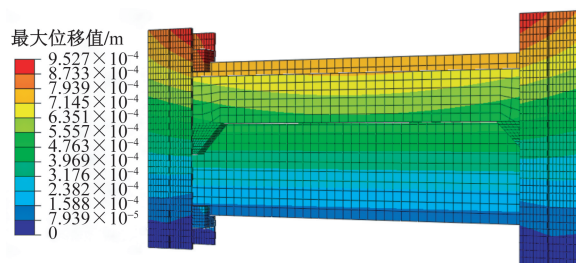
图 24 新型装配式临时支撑结构边界条件

Fig. 24 Boundary conditions of new prefabricated temporary support structure

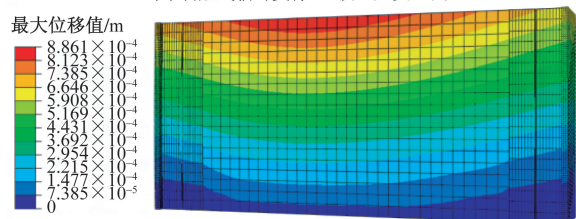
表 6 中隔壁材料参数

Table 6 Material parameters for middle partition wall

参数	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
钢材	206 000	0.3	7 850
C25 混凝土	23 000	0.2	2 400



(a) 装配式临时支撑T-2模型应变云图



(b) 传统弧形临时支撑模型剖面应变云图

图 25 两种不同临时支撑模型应变云图对比

Fig. 25 Comparison of strain clouds of two different temporary support models

型钢的形式,而该型钢型号与装配式临时支撑结构中的型钢相同,导致传统弧形临时支撑整体尺寸较大,相比装配式临时支撑结构每条边多两个混凝土保护层的厚度。这也是造成传统弧形临时支撑整体最大应变相比装配式临时支撑结构较小的原因之一,相对减少了6%。另外可以看出装配式临时支撑结构的最大应变分布在“L”形上槽口以及工字钢顶部附近处,而传统弧形临时支撑结构最大应变分布在混凝土结构中上部位以及型钢顶部,可看出装配式与传统弧形临时支撑结构相比应变大小以及位置有一定差异,但整体最大应变均相对较小,且均符合稳定性要求。

5.3 传统与装配式临时支撑模拟应力结果对比分析
将装配式临时支撑结构与传统弧形临时支撑

结构模型的应力云图进行对比,如图 26 所示,可以看出,装配式临时支撑结构和传统弧形临时支撑结构整体最大应力分别为 132.3 MPa 和 110.9 MPa。模型结构的尺寸是影响结构应力的重要因素,而传统弧形临时支撑的尺寸相对装配式临时支撑结构较大。因此传统弧形临时支撑整体最大应力相比装配式临时支撑结构较小,相对减少了 16%,两种不同临时支撑结构的最大应力均分布在型钢底部。另外可知,两种支撑结构的最大应力均满足要求。

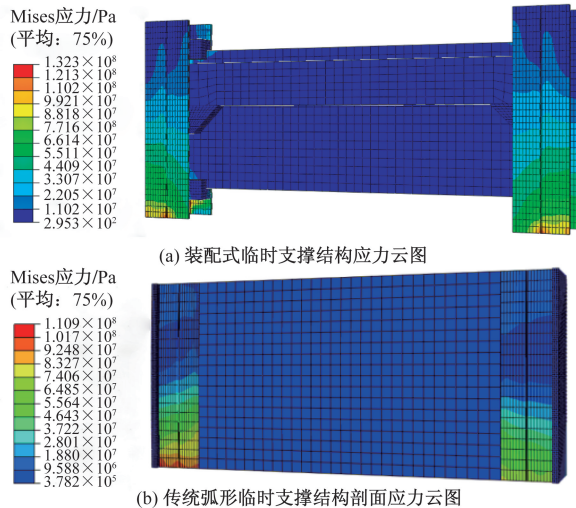


图 26 两种不同临时支撑模型应力云图对比
Fig. 26 Comparison of stress clouds of two different temporary support models

6 结论

以 G30 连霍高速公路清水驿至忠和段扩容改造工程邵家堂隧道为研究背景,针对传统中隔壁临时支撑施工存在的问题,提出一种可循环使用的装配式临时支撑结构,并对其力学特性展开研究,得出以下结论。

(1) 将弧形改为竖直中隔壁支撑,地表最终下沉量可减少 55%,左、右拱腰最终沉降量可分别减少 16%、20%,隧道最终的总收敛值可减小 14%,而未考虑仰拱回填情况下,仰拱整体位移从 7.23 cm 增到 8.48 cm,必要时可对仰拱采取加固措施。另外可知,隧道后行洞开挖会对先行洞造成影响。

(2) 通过两种中隔壁隧道初支沉降收敛对比可知,竖直中隔壁在最终的地表下沉、隧道左右拱腰最终沉降和隧道最终净空收敛方面的控制更好,而弧形中隔壁在隧道拱顶最终沉降、仰拱隆起、自身杆件变形方面控制更好。从受力对比分析可得,隧道初支的最大拉、压应力分布位置近似相同,且都主要以受压应力为主,竖直相比弧形中隔壁最大压应力减少了 20%,表明竖直中隔壁隧道初支的受力

值更小,更安全。

(3) 通过对两种中隔壁支撑的变形分析可得,竖直和弧形中隔壁的最大变形均分布在右侧中隔壁,竖直中隔壁在中部未开挖土层向外挤压的作用下,产生的最大位移量大于弧形中隔壁,其最大位移值分别为 2.77、2.59 cm,但竖直中隔壁稳定后的最终变形量明显小于弧形中隔壁。从受力分析可得,竖直中隔壁最大应力小于弧形中隔壁,竖向最大拉、压应力值分别减少了 58%、6%,水平最大拉、压应力值分别减少了 73%、29%,因此,采用竖直中隔壁施工,隧道支护结构的受力更小。

(4) 通过对比分析,按照实际的不同尺寸,在相同外荷载下,装配式临时支撑结构与传统弧形临时支撑结构的应力应变,分析出由于传统临时支撑比装配式结构的每条边多两个保护层厚度,因此传统临时支撑结构应力应变略小于装配式临时支撑结构,分别减少了 6% 和 16%,但两种结构均能够满足施工要求。另外可知新型装配式临时支撑结构在施工效率和经济效益方面更有优势。因此,可采用新型装配式临时支撑结构替代传统临时支撑结构。

参 考 文 献

- [1] 张金伟,罗富荣,童丽红,等. 地铁矿山法隧道装配式二次衬砌结构设计初步研究[J]. 隧道建设, 2021, 41(5): 822-830.
Zhang Jinwei, Luo Furong, Tong Lihong, et al. Study on prefabricated lining structure design of a metro tunnel constructed by mining method[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(5): 822-830.
- [2] 周晓军,宁远思,杨昌宇. 矿山法施工双线铁路隧道二次衬砌拱部预制拼装结构的设计与工程应用[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 204-217.
Zhou Xiaojun, Ning Yuansi, Yang Changyu. Tunnels constructed by the mining method design and engineering application of prefabricated structure for secondary lining arch of double-track railway [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(4): 204-217.
- [3] 王嵩,谢运来,卿伟宸,等. 矿山法隧道拱部装配式衬砌结构设计研究[J]. 隧道建设, 2022, 42(S1): 360-368.
Wang Song, Xie Yunlai, Qing Weichen, et al. Design of prefabricated lining structure at tunnel arch constructed with mining method [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1): 360-368.
- [4] 何泉,陈真,杨义,等. 新型装配式衬砌在矿山法施工铁路隧道中的应用研究[J]. 隧道建设, 2022, 42(8): 1491-1498.
He Quan, Chen Zhen, Yang Yi, et al. Application of new prefabricated lining structure in railway tunnel construction by mining method [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8): 1491-1498.
- [5] 计中彦,张学民,陈进,等. 高速公路隧道装配式仰拱结构施工技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(4): 983-990.
Ji Zhongyan, Zhang Xuemin, Chen Jin, et al. Research on construction technology of highway tunnel fabricated invert structure [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 983-990.

- [6] Wang Q, Luan Y, Jiang B, et al. Study on key technology of tunnel fabricated arch and its mechanical mechanism in the mechanized construction[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83: 187-194.
- [7] Yang X, Huang M, Lin F. Research strategies on new prefabricated technology for underground metro stations[J]. *Urban Rail Transit*, 2019, 5(3): 145-154.
- [8] 林志, 冯万林, 陈相, 等. 超大断面装配式明挖隧道结构及其施工方法研究[J]. *隧道建设*, 2022, 42(7): 1167-1176.
Lin Zhi, Feng Wanlin, Chen Xiang, et al. Prefabricated structure of super-large cross-section open-cut tunnel and its construction method[J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(7): 1167-1176.
- [9] 赵修旺, 毕程程, 朱毅, 等. 马蹄形预制初期支护力学性能及设计方案研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(6): 1980-1991.
Zhao Xiawang, Bi Chengcheng, Zhu Yi, et al. Study on the mechanical properties and design scheme of horseshoe prefabricated primary support[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(6): 1980-1991.
- [10] 章龙管, 李志刚, 路桂珍, 等. 大断面马蹄形盾构施工关键技术——以蒙华铁路白城隧道工程为例[J]. *隧道建设*, 2020, 40(S1): 297-306.
Zhang Longguan, Li Zhigang, Lu Guizhen, et al. Key construction technology of large cross-section horseshoe-shaped shield: a case study on Baicheng Tunnel on Menghua Railway[J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(S1): 297-306.
- [11] 林志, 冯万林, 陈相, 等. 超大断面装配式明挖隧道结构及其施工方法研究[J]. *隧道建设*, 2022, 42(7): 1167-1176.
Lin Zhi, Feng Wanlin, Chen Xiang, et al. Prefabricated structure of super-large cross-section open-cut tunnel and its construction method[J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(7): 1167-1176.
- [12] Huang Z, Zhang C, Ma S, et al. Parameter sensitivity analysis of a new fabricated rectangular tunnel joint using numerical method[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(2): 907-920.
- [13] Liu X, Liu Z, Ye Y, et al. Mechanical behavior of quasi-rectangular segmental tunnel linings: further insights from full-scale ring tests[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 79: 304-318.
- [14] 张亚鹏, 赵学艺, 刘泾堂, 等. 高速公路隧道装配式仰拱接头力学性能研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(18): 7983-7994.
Zhang Yapeng, Zhao Xueyi, Liu Jingtang, et al. Mechanical properties of drill-and-blast highway tunnel fabricated inverted arch joint[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(18): 7983-7994.
- [15] 张胜龙, 马伟斌, 王志伟, 等. 高铁双线隧道预制拼装衬砌设计选型[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(31): 13029-13034.
Zhang Shenglong, Ma Weibin, Wang Zhiwei, et al. The design and selection of precast assembly linings for high speed rail double line tunnel[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(31): 13029-13034.
- [16] Huang X, Zhu Y, Zhang Z, et al. Mechanical behaviour of segmental lining of a sub-rectangular shield tunnel under self-weight[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 74: 131-144.
- [17] Liu X, Zhang Y, Bao Y, et al. Investigation of the structural effect induced by stagger joints in segmental tunnel linings: numerical explanation *via* macro-level structural modeling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 120: 104284.
- [18] Wang F Y, Zhou M L, Zhang D M, et al. Random evolution of multiple cracks and associated mechanical behaviors of segmental tunnel linings using a multiscale modeling method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 90: 220-230.
- [19] Zhang D, Zhai W, Huang H, et al. Robust retrofitting design for rehabilitation of segmental tunnel linings: using the example of steel plates[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83: 231-242.
- [20] Zhai W, Chapman D, Zhang D, et al. Experimental study on the effectiveness of strengthening over-deformed segmental tunnel lining by steel plates[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 104: 103530.
- [21] Liu X, Jiang Z, Yuan Y, et al. Numerical investigation of the mechanical behavior of deformed segmental tunnel linings, strengthened by epoxy-bonded filament wound profiles[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78: 231-244.
- [22] 单超, 甘露, 王亚东, 等. 灰土挤密桩加固黄土隧道受力与变形性状分析[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(2): 86-95.
Shan Chao, Gan Lu, Wang Yadong, et al. Analysis of mechanical behaviors and deformation characteristics of the loess tunnel reinforced by lime-soil compaction piles[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(2): 86-95.
- [23] 赵俊杰. 高寒地区隧道深埋中心水沟施工优化及爆破振动数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
Zhao Junjie. Research on construction optimization and numerical simulation of blasting vibration in deeply buried central ditch of tunnel in alpine region[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [24] 黄明利, 刘煜, 李子强. 快速硬化型喷射混凝土的适用性及在崂山隧道中的应用[J]. *铁道建筑*, 2019, 59(8): 75-80.
Huang Mingli, Liu Yu, Li Ziqiang. Applicability of rapid hardening shotcrete and its application in Xiaoshan Tunnel[J]. *Railway Engineering*, 2019, 59(8): 75-80.
- [25] 秦哲麟. 矿山法隧道装配式预制仰拱拱架吊装及衬砌结构受力特征[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
Qin Zhelin. Research on stress characteristics of precast inverted arch block hoisting and fabricated lining structure in mined tunnel[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2023.
- [26] 欧阳冬, 罗会平, 陈剑伟, 等. 装配式空心钢管混凝土支撑技术研究及应用[J]. *都市轨道交通*, 2023, 36(4): 107-113.
Ouyang Dong, Luo Huiping, Chen Jianwei, et al. Technology and application of assembled hollow concrete-filled steel tubular struts[J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2023, 36(4): 107-113.
- [27] 邹楷. 装配式建筑智能制造和智能建造的创新需求分析[C]//2023年智慧城市建设论坛深圳分论坛论文集. 深圳: 中国智慧城市经济专家委员会, 2023: 2.
Zou Kai. Innovation demand analysis of intelligent manufacturing and intelligent construction of prefabricated buildings[C]//Smart City Construction Forum Shenzhen Sub-forum Papers. Shenzhen: China Smart City Economic Expert Committee, 2023: 2.