

DOI: 10. 7672/sgjs2023180113

复杂环境下铁路柔性钢棚洞施工关键技术*

张立华,张 林,张利军

(中铁二十局集团第四工程有限公司,山东 青岛 266061)

[摘要] 结合陇海铁路宝天段南北崖隧道出口柔性钢棚洞设计和施工关键技术,分析了复杂环境下铁路坡面病害整治的方案比选,提出了适用于复杂环境的新途径、新方法,介绍了柔性钢棚洞的适用条件、结构设计和施工工艺,重点介绍了独特结构的组成、材料、功能,钢棚洞上、下部结构的特殊施工工艺。这为铁路隧道出口存在危岩落石风险,但由于环境复杂无法建设明洞的情况,提供了科学可行的防护方案和施工关键技术。

[关键词] 铁路工程;坡面;病害整治;棚洞;设计;施工技术

[中图分类号] U453

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2023)18-0113-04

Key Construction Technology of Flexible Steel Shed Tunnel Under Complex Environment

ZHANG Lihua, ZHANG Lin, ZHANG Lijun

(China Railway 20th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract: Combined with the key technology of design and construction of the flexible steel shed tunnel at the port of Nanbeiya Tunnel in Baoji-Tianshui section of Lanzhou-Lianyungang Railway, this paper expounds the comparison and selection of the schemes for the treatment of railway slope diseases under complex environment, this paper puts forward a new way and method suitable for complex environment, and introduces the applicable conditions, structure design and construction technology of flexible steel shed tunnel, with emphasis on the composition, material and function of unique structure, special construction technology for lower structure and upper structure of steel shed tunnel. There is a risk of rockfall at the exit of the railway tunnel, but the complex environment makes it impossible to build open cut tunnel, providing scientifically feasible protection schemes and key construction technology, it is worth popularizing and applying to the diseases treatment of similar railway and highway tunnel port.

Keywords: railways; slopes; disease treatment; shed tunnel; design; construction

0 引言

陇海线是我国重要的铁路大动脉,宝天段更是连接关中与西北的重要通道,随着时间的推移,南北崖隧道出口病害问题愈发突出和险峻,隧道出口坡面大,无法建造混凝土明洞,同时又紧邻国道310、渭河河道,存在坡面危石掉落风险,危及陇海铁路及国道行车安全,属于西安铁路局一级防洪点,是铁路局多年来未能解决的难题。

病害区域属于低中山渭河峡谷区,山势陡峻,河流曲折,地面高程768.000(河床)~1 030.000m(山顶),相对高差262m。隧道出口仰坡高约230m,

坡度70°~85°,中下部近于直立,基岩裸露,坡面方向与铁路走向近一致,坡面植被较差。铁路隧道出口紧接渭河大桥,隧道出口与桥梁下方是国道310和渭河河道,如图1所示。每年6月以后进入汛期。



图1 病害区域地形地貌及钢棚洞竣工

Fig.1 The terrain and topography of the affected area and the completion of the steel shed tunnel

* 中铁二十局集团有限公司科技创新计划项目(YF2204SD13C)

[作者简介] 张立华,正高级工程师, E-mail: 2421145571@qq.com

[收稿日期] 2023-04-20

病害整治方案的比选如下。

常规做法是采用“混凝土明洞”“型钢立柱+型钢棚洞”“轻型拱形棚洞”^[1]或“波纹钢板棚洞”^[2]或“T 构基础+型钢棚洞”^[3]等形式的防护结构。但该处地形由于国道与河道原因无法设置这些结构的基础,必须另觅思路,寻求新途径和方法。

根据现场地形情况,拟采用“桥式基础+ 柔性防护棚洞”^[4],该方案兼顾了铁路危岩防护、国道交通和河道泄洪不受影响,巧妙解决了复杂环境下危岩防护难题。总体结构如图 2 所示。

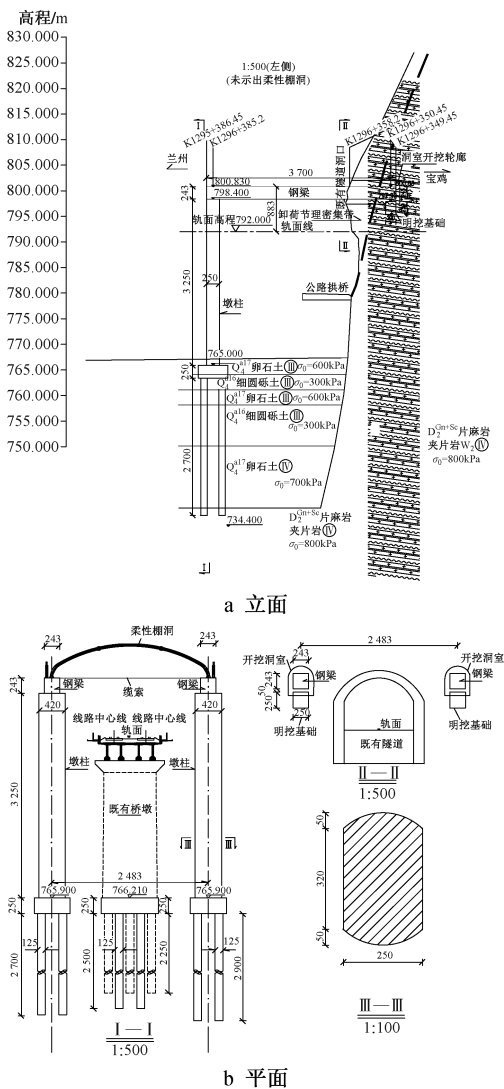


图 2 钢棚洞示意
Fig.2 Steel shed tunnel

1 柔性钢棚洞结构设计

1.1 钢棚洞下部结构设计

棚洞下部结构采用在既有桥梁两侧独立设置桩基础、承台、墩柱和隧道洞室等结构。

1) 桩基础于既有桥梁两侧分别各新增 4 根 $\phi 1.25\text{m}$ 桩,桩长 29m,桩中心横向间距 3.5m、纵向

间距 3.4m。桩基础采用 C35 钢筋混凝土。

2) 承台采用 C35 钢筋混凝土结构,于既有桥梁两侧分别各新增 1 座矩形承台,尺寸为 $5.7\text{m} \times 5.8\text{m} \times 2.5\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。

3) 采用矩形实体桥墩,为 C40 钢筋混凝土结构,尺寸为 $2.5\text{m} \times 3.6\text{m}$ (纵 $\times$ 横),高 32.5m(含既有桥梁轨面以下 26.1m、轨面以上 6.4m)。

4) 新建 2 个洞室呈城门形,开挖尺寸为 $5.04\text{m} \times 5.44\text{m}$ (宽 $\times$ 高),分别位于既有铁路隧道左、右侧,中心距 24.83m,纵向深度分别为 8,11m。洞室设计为马蹄形断面,采用复合式钢筋混凝土衬砌结构。

1.2 上部结构设计

上部结构为 2 根纵梁、8 根纵梁横向缆索、钢棚架。纵梁采用箱梁,尺寸为 $2.43\text{m} \times 2.43\text{m}$ (宽 $\times$ 高),长 37.1m。两侧钢箱梁中心距 24.83m,横向采用缆索对拉减少水平力作用。纵梁一端与桥墩刚接,另一端插放到隧洞中,隧洞内建设承台,承台上设置纵向 2 个活动支座。钢棚架为 9 榀拱架用 12 道纵向拉杆(钢管)栓接成一个整体,拱架上方铺设柔性网,用于弹性接收掉落危石^[5],耗散落石能量^[6],如图 3 所示。



图 3 柔性防护棚洞结构示意
Fig.3 Structure of flexible protective shed tunnel

1.3 附属结构设计

附属结构包括:防止落石滚落至国道的纵梁顶面双侧格栅网、防止落石滚落至铁路的柔性防护棚洞末端拦阻网(见图 4)、靠山侧柔性网与山体的缝合结构、桥墩上维修爬梯、危石预应力锚索加固等。

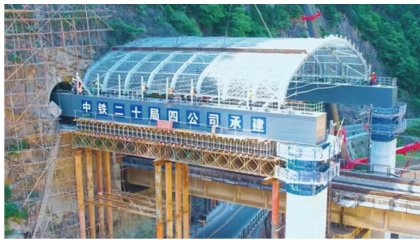


图 4 钢棚架吊装就位及平台支架、附岩脚手架
Fig.4 Steel shed frame position and platform support, attached rock scaffold

2 关键施工技术

南北崖隧道出口病害整治工程采用柔性钢棚洞对线路进行危石防护,存在临近既有线路、水中桥墩及国道施工,作业面受到极大限制;工程类别

涉及隧道、桥梁、钢结构等工程,具有风险高、技术难度大、工期紧的特点。经查阅,该柔性防护棚洞方案属世界最大跨度柔性钢棚洞,国内首例,施工难度和安全风险国内少有。

2.1 临近既有线隧道高空隧洞施工关键技术

由于临近既有线隧道,净距只有 3.1m,不能采用爆破施工,同时开挖的隧洞为片麻岩地质,非常坚硬。根据设计图纸及现场岩体分析:宝鸡侧隧洞岩体坚硬,但节理发育,完整性较差,裂隙交叉较多,利用水磨钻施工减少施工扰动,对岩体稳定性破坏较小,对该洞室采用“水磨钻+劈裂取芯”方案,并将断面分为上下台阶法施工;天水侧隧洞岩体较硬,节理发育,裂隙少,围岩完整性较好,静态爆破^[7]效率较高,对该洞室采用“静态爆破+劈裂取芯”方案,并采用全断面法施工。

主要施工要点如下。

1)左洞采用电动机与钻筒在开挖轮廓线钻孔取芯,使钻孔处形成周边槽,以周边槽作为临空面,用液压劈裂机分裂岩体,向周边槽道方向劈裂岩块。劈裂自上而下分裂岩块,人工撬落。

2)右洞按测量轮廓线钻孔后,将膨胀剂和水按一定比例拌成流质状,并进行充分搅拌后,分次倒入已钻好的钻孔内,24h 后,利用劈裂器对中部岩体进行破碎,由上往下逐步进行^[8]。

3)劈裂机将岩体分裂后,分裂岩块随时由人工将石块用手推车运至掌子面以外的平台上临时堆放,然后集中采用起重机倒运至指定堆放弃碴点。

4)由于洞口处在几乎直立的坡面上,下方即是国道,进洞开挖无作业面,也无出碴的通道,所以需搭设一个平台作为开挖和出碴作业面,并兼作国道的安全防护门洞。钢纵梁架设前的贝雷梁支架如图 4 所示。采用钢管贝雷梁支架形式,顶面铺设钢板并支立钢板围挡,避免石碴掉落危及行车安全。

2.2 水中墩施工关键技术

1)原河道如图 1 所示,水流位于河道右侧。为减小新建钢棚洞墩柱对排洪水流的影响,新建墩柱与既有墩柱处在同一横断面位置。根据施工期间水流的情况,选用改移河道的方案,将水流通过开挖堵截方式改移到河道左侧。由于渭河在该处为弯道,水流湍急,对岸堤冲刷严重,所以需对迎水面采用大石块和石笼进行围护。

2)在开挖方式方面对钢板桩围堰、钢套箱围堰、混凝土沉井和放坡开挖等方案进行比选^[9],从可行性、经济性、安全性和施工周期等几个方面综合考虑,最终选取了放坡开挖方案。

3)承台基坑开挖 6m,因地质为砂砾石,透水性强,又易坍塌,故在基坑周边采用黏土改良,形成透水性差的“堵墙”。放坡开挖形成台阶,底层台阶处的承台采用钢模板支护。基坑一个角落挖出集水坑,采用大功率水泵抽水。然后按标准工艺进行承台施工。

4)针对钻孔桩采取旋挖钻和冲击钻配合使用钻孔,墩柱采用翻模施工工艺。

2.3 钢结构安装关键技术

2.3.1 安装制约因素

1)环境因素 钢结构的吊装跨越国道 310、渭河、陇海铁路。起重机站位只能在河道内,棚架预拼装、钢纵梁进场放置、起重机站位及辅助工具放置都需进行合理规划。

2)时间因素 钢结构吊装分别有临近既有线和跨既有施工,这都需在天窗点内完成。

3)质量与体积因素 钢结构分为 2 个部分,第 1 部分是钢纵梁,重 113t;第 2 部分是钢棚架,重 60t。钢纵梁全长 37.1m,宽和高都为 2.43m,钢棚架长 24m、宽 24.83m,平面面积接近 600m²,高 5m,是一个拱形巨型柔性支架,为当前世界最大跨度铁路柔性钢棚洞。

4)高度因素 钢结构吊装高度>34m。

5)运输因素 钢结构需考虑从外地工厂运至现场的道路限载要求,同时进场受到新冠肺炎疫情控制制约,现场需按钢结构进场有关属地政策规定,提前做好个人健康检测和属地提前报备。

2.3.2 主要吊装方案选择

通过对吊装质量、吊装半径、吊装高度等因素综合计算,采用 650t 汽车式起重机进行吊装。

1)钢纵梁吊装 钢纵梁长 37.1m,对整体式吊装、两段式吊装、三段式吊装进行比选,选择两段式吊装方案。两段式吊装优点为:①两段式分为洞室段 22m、桥墩段 15m,前期作为洞室施工的钢平台改造成纵梁支撑架,便于承受纵梁荷载与纵梁接缝焊接。支撑架的两头钢管柱仍采用单排钢管桩,但分别与山体和桥墩进行适当横向连接,增加横向约束减小压杆失稳倾向,保证了支撑的整体稳定性^[10]。两段式吊装质量较恰当,符合起重机选型与环境条件。②22m 段采用四吊点三节段,使进入洞室的节段长度正好满足洞室深度要求。钢纵梁如图 4 所示。③时间上可与天窗时间完美结合,不会出现对一个天窗点的浪费情况。左、右 2 根钢纵梁吊装就位后进行接缝焊接,然后进行钢纵梁与桥墩的刚接和隧洞内钢纵梁与支座的位置精调和连接。

2) 钢棚架吊装^[11] 钢棚架施工难点为:①整体现场预拼装后的平面面积接近 600m^2 , 立面为拱形柔性结构, 吊装需考虑吊装变形控制。②钢棚架与钢纵梁设计为栓接, 共有 18 个栓接法兰支座。需考虑所有法兰支座上的所有螺栓孔精准对位才能进行螺栓连接, 难度极大。

针对以上难点, 分别选取以下方案:①优化棚架吊装形式, 增加吊装框架, 在棚架顶部对称放 2 根长 24m 双拼 I40, 工字钢在横向拉杆第 4 与第 5 根中间位置纵向放置, 与每榀拱架通过 U 型卡连接, 在每根工字钢上设置 4 个吊耳平均分布。这样便可让 9 榀拱架均匀受力减少变形量, 整体实际变形量控制在 2cm 以内。②钢棚架与纵梁间栓接支座的安装采用先栓接后焊接工艺, 即上、下栓接法兰板先栓接好后悬挂到钢棚架上, 一起吊装到位后进行位置调整, 然后进行支座在纵梁上的焊接施工。该工艺未改变钢棚架与纵梁的栓接特性, 但大大减小了施工难度, 缩短了施工时间。

3) 钢缆索安装 施工难点为: 连接纵梁的 8 根缆索如果逐根安装需多个天窗点, 而且在铁路上方吊装柔性缆索对铁路接触网有较大危险。采用先悬挂在钢棚架上“携带”吊装, 就位后再转换到纵梁钢索锚具上进行安装, 减小了安装难度, 减少了对既有线的影响和安全风险。即在棚架拼装完毕后分别将 8 根钢缆索放在每榀拱架间的中间位置并对准锚具位置用倒链拉紧, 中间用 5 根均匀分布的麻绳将钢缆索悬吊, 悬吊高度基本水平, 方便缆索安装, 如图 4 所示。安装完成后抽除麻绳。

2.4 陡峭坡面危石预应力锚索加固措施

1) 首先需搭设附岩脚手架^[12] 根据山体坡面情况用钢卷尺拉直, 分出立杆位置, 并用油漆点出立杆标记; 垫板、底座应准确放在定位线上, 垫板必须铺放平整, 不得悬空。立杆在顶部搭接时, 搭接长度 $\geq 1\text{m}$, 必须等间距 3 个旋转扣件固定, 端部扣件盖板边缘至搭接纵向水平杆杆端距离 $\geq 100\text{mm}$ 。某些杆件需随山体的变化做成倾斜状, 为使杆件与山体附着牢固, 采用加工连墙件方式固定。附岩脚手架如图 4 所示。

2) 锚索钻孔采用潜孔冲击式钻机 该钻机所配钻杆统一规格, 按锚索设计长度将钻孔所需钻杆摆放整齐, 钻杆用完, 孔深也恰好到位, 钻孔深度 13~25m, 孔距 3m。因施工场地因素影响, 锚索在现场编束完成后, 采取人工+起重机协同安装, 安装时暂时封闭国道。安装锚索后立即进行预制混凝土锚板安装, 并初步进行加压固定。

2.5 施工监测

1) 由于既有铁路隧道口存在危石, 时刻影响现场施工安全, 在进场后对山体危石进行标记, 做好监测点, 每天监测, 并形成记录, 特别是锚索钻孔时钻机的振动可能会加大危石滑落可能, 随之监测频率进行调整。

2) 新建洞室开工前对既有隧道进行无损检测, 并做好监测点, 形成报告, 与工务段进行沟通确定缺陷位置, 施工时再次进行检测, 观察监测点的变动情况, 及时了解既有隧道变动情况, 待工程结束后最后进行检测, 确定对隧道的扰动情况。

3) 钢结构安装前进行支撑体系检测, 做好数据记录, 在安装过程中随时进行沉降、位移监测, 并与之前数据进行对比, 待钢结构安装完成后, 拆除支撑体系, 进行力学转换再次进行沉降观测, 确保数据稳定符合要求。

3 结语

这座世界最大跨度柔性钢棚洞历时 4 个多月建设完成, 经过相关部门的竣工验收^[13]。施工过程中未发生任何安全事故, 使用过程中各部位结构安全稳定, 性能优良。

参考文献:

- [1] 王立军, 张金平, 郭宝库, 等. 隧道口轻型钢棚洞防护高边坡施工工法[Z]. 2017.
WANG L J, ZHANG J P, GUO B K, et al. Construction method of high slope protection for light steel shed tunnel at tunnel entrance [Z]. 2017.
- [2] 严广艺, 付兵先. 3 种隧道洞口落石防护方案对比分析[J]. 铁道建筑, 2020, 60(3): 54-58.
YAN G Y, FU B X. Comparison and analysis of three protection schemes for rockfall at tunnel entrance[J]. Railway engineering, 2020, 60(3): 54-58.
- [3] 乔雷涛, 陈应陶. 铁路桥梁防护棚架结构及其施工方法: CN108517795A [P]. 2018-09-01.
QIAO L T, CHEN Y T. Protective shelf structure of railway bridge and its construction method: CN108517795A [P]. 2018-09-01.
- [4] 陈银灯, 雷晓峰. 一种铁路防护棚洞基础结构: CN217378639U [P]. 2022-09-06.
CHEN Y D, LEI X F. The utility model relates to a railway protective shed tunnel foundation structure: CN217378639U [P]. 2022-09-06.
- [5] 严广艺. 隧道洞口柔性棚洞防护结构可靠性分析及应用[J]. 铁道建筑, 2019, 59(12): 51-54.
YAN G Y. Reliability analysis and application of protective structure of flexible shed tunnel at tunnel entrance[J]. Railway engineering, 2019, 59(12): 51-54.
- [6] 郑长青, 汪辉武, 张一帆, 等. 铁路隧道柔性棚洞优化方案研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2): 508-514.

(下转第 132 页)

合实际,而物理模型试验的冲刷结果相对保守。

5 结语

1)物理模型试验和数值计算得出,最大冲刷深度均随流速的增大而增大,且在同一原型流速下,物理模型试验的最大冲刷深度大于数值计算的最大冲刷深度。

2)原型流速 1.5m/s 作用下,基本可将表层粉砂层冲掉,粉质黏土层基本未冲刷;原型流速 2.5m/s 作用下,最大冲刷深度未到粉质黏土层底标高,粉质黏土层阻冲刷效果明显。

3)地质不分层条件下,物理模型试验和数值计算的冲刷形态相似;在地质分层较大流速作用下,物理模型试验中沉井两侧未形成明显淤积,而数值计算中沉井中部和尾部两侧淤积明显。

4)数值计算的冲刷结果更加贴合实际,而物理模型试验的冲刷结果相对保守。

参考文献:

[1] LI C, HAO H, LI H N, et al. Theoretical modeling and numerical simulation of seismic motions at seafloor [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2015, 77: 220-225.

[2] 王德斌,夏青,孙治国,等. 冲刷环境下跨海桥梁海陆地震动作用易损性对比研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(5): 127-137.

WANG D B, XIA Q, SUN Z G, et al. Seismic fragility comparative research of sea-crossing bridges in scour conditions under onshore and offshore ground motions [J]. Advanced engineering sciences, 2021, 53(5): 127-137.

[3] 李金钊. 近海岸桥墩冲刷理论与数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.

(上接第 116 页)

ZHENG C Q, WANG H W, ZHANG Y F, et al. Study on optimization scheme of flexible shed tunnel in railway tunnel[J]. Modern tunnelling technology, 2019, 56(S2): 508-514.

[7] 郑志军. 襄渝铁路新紫阳隧道静态爆破施工技术[J]. 铁道标准设计, 2009(1): 86-89.

ZHENG Z J. Static blasting construction technology of new Ziyang Tunnel in Xiangyang-Chongqing Railway [J]. Railway standard design, 2009(1): 86-89.

[8] 曹传文. 非爆破方法在新紫阳隧道施工中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2011(7): 116-119, 123.

CAO C W. Application of non-blasting method in construction of new Ziyang Tunnel [J]. Railway construction technology, 2011(7): 116-119, 123.

[9] 王军舰,刘均儒. 深水桥梁大型基础施工方案比选研究[J]. 城市道桥与防洪, 2021(11): 130-133, 18.

WANG J J, LIU J R. Comparison and selection of construction schemes for large-scale foundation of deep-water bridges[J]. Urban roads bridges & flood control, 2021(11): 130-133, 18.

LI J Z. Theory and numerical simulation of bridge pier scour in coastal area [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[4] 李梦龙. 潮流作用下桥墩局部冲刷研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

LI M L. The research of pier scour under tidal flow [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[5] 喻鹏. 改进数值模型与群桩基础桥墩局部冲刷的 CFD 模拟[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.

YU P. Improved numerical model and CFD simulation of local scour around pile group foundation [D]. Changsha: Hunan University, 2017.

[6] XIANG Q Q, WEI K, QIU F, et al. Experimental study of local scour around caissons under unidirectional and tidal currents [J]. Water, 2020, 12: 640.

[7] 杜硕, 戴国亮, 高鲁超, 等. 波流作用近海风机单桩基础局部冲刷深度预测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 616-622.

DU S, DAI G L, GAO L C, et al. Scour condition analysis on pylons of Hangzhou Bay Bridge by tracing dynamic behaviors of superstructures [J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2020, 50(4): 616-622.

[8] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

QIAN N, WAN Z H. Sediment transport dynamics [M]. Beijing: Science press, 2003.

[9] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.

SHA Y Q. Introduction to sediment transport [M]. Beijing: China Industry Press, 1965.

[10] 周名德. 粘土局部冲刷与模拟相似 [J]. 水利学报, 1998(7): 61-64.

ZHOU M D. Study on similarity of local scouring of cohesive material in hydraulic model test [J]. Journal of hydraulic engineering, 1998(7): 61-64.

[10] 刘东岳. 施工临时支撑结构专项技术方案[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2013.

LIU D Y. Special technical scheme for construction of temporary supporting structure [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2013.

[11] 曹棚棚, 王小军. 运营铁路移动防护棚架吊装数值模拟分析[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(4): 41-45, 132.

CAO S C, WANG X J. Numerical simulation analysis of mobile protective scaffolding hoisting in railway operation [J]. Construction technology, 2022, 51(4): 41-45, 132.

[12] 刘宝奎, 张治平, 夏志雄, 等. 超高陡边坡加固用钢管脚手架的设计与应用[J]. 铁道建筑, 2021, 61(8): 48-52.

LIU B K, ZHANG Z P, XIA Z X, et al. Design and application of steel pipe scaffold for super-high and steep slope reinforcement [J]. Railway engineering, 2021, 61(8): 48-52.

[13] 世界最大跨度铁路单孔柔性钢棚洞安装通过验收[N]. 西铁资讯. 2022-05-31.

The installation of the world's largest railway single-hole flexible steel shed has passed the acceptance inspection[N]. Information of Xi'an Railway Group. 2022-05-31.