

大跨度钢桁架模板在地下硐室中的研究与应用

朱爱山, 郭红里, 周慧鹏, 费益滨

(浙江省隧道工程集团有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要:以江苏省某人防坑道工程为背景,通过实际工程应用,结合安全性、经济性和可操作性综合比较,研究融合了钢模台车、承重脚手架、钢桁架和定型钢模等施工方法,形成硐室大跨度钢桁架模板施工技术。对该系统在地下硐室中的施工做了技术研究和应用探讨,重点介绍了工艺原理、模架设计及受力分析、工程应用等。该施工方法能够提高工效,节省成本,提高施工质量。

关键词:地下大断面硐室;钢桁架;模板设计;脚手架;模板受力计算;人防硐室

中图分类号:P633.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)12-0066-06

Application of the large-span steel truss formwork system in underground chamber excavation

ZHU Aishan, GUO Hongli, ZHOU Huipeng, FEI Yibin

(Zhejiang Tunnel Engineering Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310030, China)

Abstract: Taking a civil air defense tunnel project in Jiangsu Province as the background, a construction technology with the large span steel truss formwork for chamber excavation has been developed by study and integration of the steel formwork trolley, load-bearing scaffold, steel truss and steel formwork through field use and comprehensive comparison of safety, economy and maneuverability, the construction methods. Technical study and application of the system in underground chamber excavation is discussed, with emphasis on the process principle, formwork design and stress analysis, engineering application, etc. The construction method can improve efficiency, save cost and improve construction quality.

Key words: large cross-section underground chamber; steel truss; formwork design; scaffold; force calculation of formwork; civil air defense chamber

0 引言

人防指挥大厅,地下机房等硐室多为一个工程的核心,其显著特点是超大断面,硐长短,进出通道小,与主体呈丁字或交叉。特别是交叉处模板量大,又有端墙,受力大且极不平衡,易造成模架系统失稳。通常这些硐室衬砌有 2 种支模方式:钢模台车^[1-2]、脚手架和钢(木)拱圈组合模架^[3-4]。脚手架和钢(木)拱圈组合模架为硐室传统支模方式,其质量受人影响较多,且易出安全事故。钢模台车因需在硐内组装,安拆受空间限制,以及端墙侧压力影响,且一次性投入极高。模板的强度、刚度、稳定性、可操作性和经济性指标平衡方为最佳。因此,

笔者对江苏某人防坑道大厅混凝土衬砌模板施工方法进行探索,通过安全性、经济性和可操作性综合比较,研究融合了钢模台车、承重架手架、钢桁架和定型钢模等施工方法,形成了硐室大跨度钢桁架模板^[5-9]施工技术。

1 工程概况

江苏省某人防坑道工程,穿廊段与通道段围岩为Ⅳ、Ⅴ级泥质砂岩,主体段为Ⅲ级泥质砂岩,山坡较缓;各段底板由硐中按 0.5% 坡度向硐口降低。两个出入口穿廊段开挖跨度 2.8 m,墙拱高 3.8 m;通道段 2.8 m,墙拱高 3.8 m;主体段开挖跨度 8.6

收稿日期:2020-05-28;修回日期:2020-09-23 DOI:10.12143/j.tkge.2020.12.011

作者简介:朱爱山,男,汉族,1976 年生,企业技术中心副主任,高级工程师,探矿工程专业,长期从事隧道施工工作,浙江省杭州市古墩路 673 号瑞博国际 A 座 1307 室,44667868@qq.com。

引用格式:朱爱山,郭红里,周慧鹏,等.大跨度钢桁架模板在地下硐室中的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(12):66-71.

ZHU Aishan, GUO Hongli, ZHOU Huipeng, et al. Application of the large-span steel truss formwork system in underground chamber excavation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(12):66-71.

m,墙拱高 6.2 m;大厅开挖跨度 17.1 m,墙拱高 12 m,长 39.4 m,衬砌厚度 0.8 m。穿廊段与通道段丁字相连,通道段与主体段单侧墙顺接,主体段与大厅十字交叉。典型的“口小肚大”布置,施工运输极为不便。

主体段与大厅十字交叉处需整体浇筑,通道段单侧 4.5 m,大厅段支模长 11.75 m,并且含大厅一端端墙模板,单模模板和单模混凝土浇筑量均较大,模板受力不平衡。

2 工艺原理

2.1 模架受力原理

碗扣式脚手架水平横杆、螺杆千斤顶、工字钢立柱和模板承受洞室侧墙混凝土浇筑压力,为对称受力结构。碗扣式脚手架立杆、螺杆千斤顶、方木、工字钢立柱和钢桁架及拱部模板承受洞室拱顶混凝土自重压力及浇筑压力,吸收变形应力。底部锁脚锚杆,地锚防滑斜拉、八字撑和整个模架支撑体系阻力承受洞室端墙混凝土浇筑压力。

2.2 混凝土浇筑工艺

先浇筑底板,墙拱采用泵送台车混凝土施工工

艺。施工顺序由易到难,先洞中段,再内端墙段,最后交叉段。可降低端墙侧压力影响,也有助于提高施工经验,完善方案。

3 模架设计和受力分析

3.1 设计原则

(1)模架系统构件尽可能使用标准件,可以多次周转利用,有利于降低成本。

(2)因受作业空间限制,要求各部件质量轻,便于人工拆装及搬运,做到施工效率高,立模速度快,质量稳定,易检查。

(3)能充分利用主体、通道和其他部位模板、模架,利于节省模架材料成本。

3.2 模架设计

满橙脚手架及钢桁架设计^[10-11]详见图 1。满橙脚手架立杆架横距 0.805 m,纵距 0.915 m;步距下部为 0.8 m,上部为 0.712 m(因高度限制原因变小);搭设长度不少于 3 模。钢桁架分 5 部分,两侧墙工字钢支柱(即侧墙模板拼缝处立柱)和拱部钢桁架(考虑到空间和人工搬运又分 3 部分)。支柱上部焊接连接法兰,中间依靠脚手架水平杆螺杆千斤顶

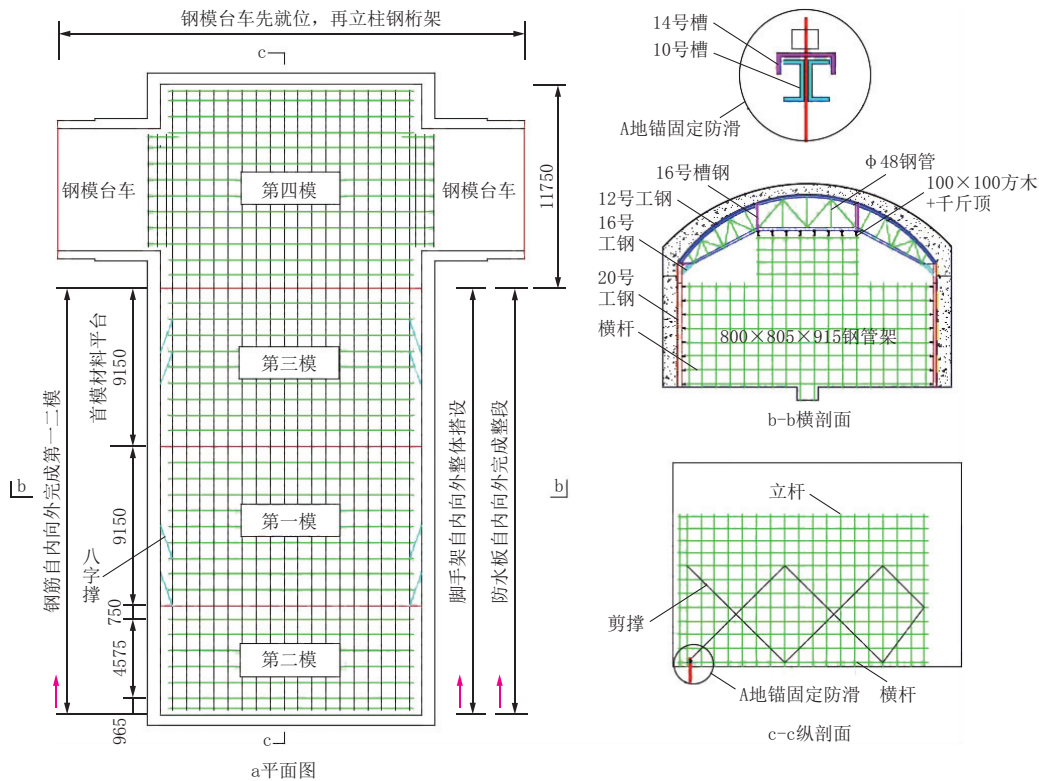


图 1 模架设计

Fig.1 Design of the mould frame system

支撑稳定。拱部钢桁架焊接,每段之间采用槽钢法兰连接;脚手架和钢桁架之间通过螺杆千斤顶和方木传力;附加底部锁脚锚杆,地锚防滑斜拉、八字撑加强墙模板支撑。模架墙部外侧安装钢木组合模板,标准尺寸为1830 mm×915 mm,再配套其他尺寸使用。拱部采用定型钢模板,标准尺寸为915 mm×600 mm,再配套其他尺寸使用。墙模板上开有呈品字形排列的工作窗,顶部安装有与混凝土泵接口的注浆装置。墙模板可更换板面,正常情况下板面可用15~20次;角铁框用3~4个项目。

3.3 模架(板)受力验算方法

3.3.1 满堂脚手架横向对撑杆件受力验算

满堂脚手架横向对撑杆件采用 $\varnothing 48\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}$ Q235钢管,受力验算^[12-13]如下。

(1)横向对撑水平杆允许最大轴力

$$N = FA\varphi = 78.22\text{ kN}$$

式中: F ——抗压强度设计值,按规范取 215 N/mm^2 ; A ——立杆横截面积,计算得 489 mm^2 ; φ ——轴心抗压构件稳定系数,根据长细比 λ 查表(JGJ 130-2011附A.0.6)确定为 0.744 , $\lambda = (h_0 + 2a)/I = 75.9$; h_0 ——步距,取 800 mm ; a ——千斤顶外露长,取 200 mm ; I ——回转半径,取 15.8 mm 。

(2)混凝土对模板的最大侧压力 P

$$P = 0.28\gamma_c t_0 \beta V_1 / 2 = 32.921\text{ kN/m}^2$$

或:

$$P = \gamma_c H = 302.4\text{ kN/m}^2$$

式中: γ_c ——混凝土的重力密度,取 24 kN/m^3 ; t_0 ——混凝土的初凝时间,取 4 h ; V_1 ——混凝土的浇筑速度,取 1.5 m/h ; H ——混凝土侧压力计算位置至新浇混凝土顶面总高度,取 12.6 m ; β ——混凝土坍落度影响修正系数,取 1.0 (说明:塌落度= 160 mm)。

按上列两公式取小值 $P = 32.921\text{ kN/m}^2$,则计算轴力 $N_1 = P \times 0.915\text{ m} \times 0.8\text{ m} = 24.098\text{ kN}$ 。

(3)新浇混凝土模板计算轴力 N_1 小于水平杆轴力 N ,符合施工要求。

3.3.2 拱部模板承受最大压力计算(按平板受力计算)

衬砌的厚度渐变,由底部到顶处 $1.4\sim 0.6\text{ m}$,满堂脚手架支撑横距、纵距、步距分别为 915 、 805 、 800 mm ,钢桁架上下弦采用 10 号工字钢、腹杆采用

$\varnothing 48\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}$ 钢管,三榀桁架采用 16 号槽钢法兰连接,支撑材料全部采用Q235钢材。

3.3.2.1 荷载参数标准值

钢模板自重标准值为 0.36 kN/m^2 ;被覆钢筋自重标准值为 1.5 kN/m^3 ;施工人员及设备荷载标准值为 1 kN/m^2 ;振捣混凝土时产生的荷载标准值为 2 kN/m^2 ;新浇混凝土自重标准值为 24 kN/m^3 。

3.3.2.2 荷载计算

钢模板自重标准值: $q_1 = 0.9 \times 0.36 = 0.32\text{ kN/m}$;

顶部新浇混凝土自重标准值: $q_{2(1)} = 0.9 \times 0.6 \times 24 = 12.96\text{ kN/m}$;

底部新浇混凝土自重标准值: $q_{2(2)} = 0.9 \times 0.904 \times 24 = 19.53\text{ kN/m}$;

顶部衬砌钢筋自重标准值: $q_{3(1)} = 0.9 \times 0.6 \times 1.5 = 0.81\text{ kN/m}$;

底部衬砌钢筋自重标准值: $q_{3(2)} = 0.9 \times 0.904 \times 1.5 = 1.22\text{ kN/m}$;

施工人员及设备活荷载标准值: $q_4 = 0.9 \times 1 = 0.9\text{ kN/m}$;

振捣混凝土产生的荷载标准值: $q_5 = 0.9 \times 2.0 = 1.8\text{ kN/m}$ 。

则顶部的荷载设计值: $Q_1 = 1.35 \times (q_1 + q_{2(1)} + q_{3(1)}) + 1.4 \times (q_4 + q_5) = 23.17\text{ kN/m}$;

底部的荷载设计值: $Q_2 = 1.35 \times (q_1 + q_{2(2)} + q_{3(2)}) + 1.4 \times (q_4 + q_5) = 32.76\text{ kN/m}$ 。

3.3.2.3 桁架内力计算

采用迈达斯GTS软件建立的模型^[14],腹杆轴力最大值 $N = 43.7\text{ kN}$,长度为 1.53 m ,经计算钢管稳定应力为 $140.58\text{ MPa} < 215\text{ MPa}$, $\varnothing 48\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}$ Q235钢管满足要求(见图2)。上弦最大轴力为 78.7 kN (见图3)、最大弯矩为 $5.4\text{ kN}\cdot\text{m}$ (见图4),计算得到整体稳定应力为 $225\text{ MPa} > 215\text{ MPa}$,超过设计应力,但是超过幅度小于 5% ,也满足要求。腹杆轴力最大值 $N = 43.7\text{ kN}$,长度为 1.53 m ,经计算钢管稳定应力为 $140.58\text{ MPa} < 215\text{ MPa}$, $\varnothing 48\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}$ Q235钢管满足要求(见图5)。

4 主要施工工艺

大跨度钢桁架模板系统施工主要分为支撑体系

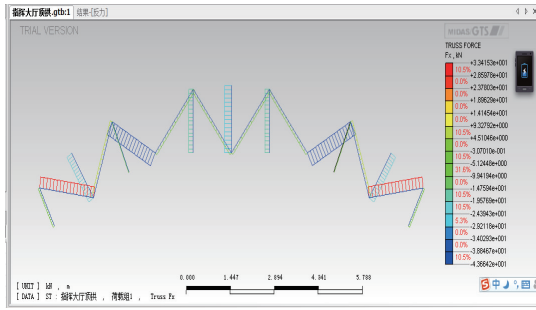


图 2 钢桁架腹杆轴力图

Fig.2 Axial force diagram of the steel truss web members

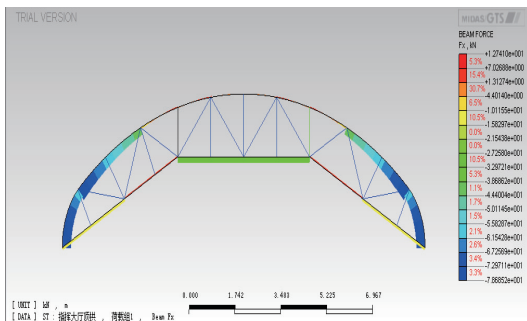


图 3 钢桁架上下弦轴力图

Fig.3 Axial force diagram of the upper and lower chords of the steel truss

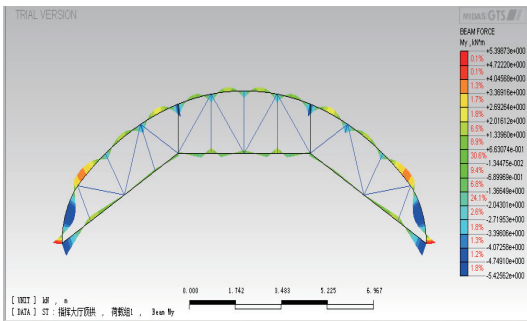


图 4 钢桁架上下弦弯矩图

Fig.4 Bending moment diagram of the upper and lower chords of the steel truss

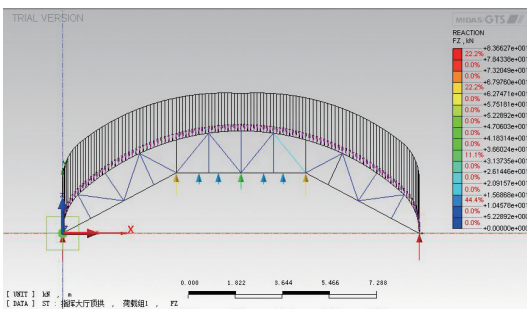


图 5 钢桁架支座反力图

Fig.5 Counterforce diagram of the steel truss support

搭设、模板及混凝土浇筑。

具体施工顺序为:施工准备→满槓脚手架搭设与验收→搬运工字钢立柱至使用点→安装侧墙下部第一层模板→水平横杆上安放螺杆千斤顶→工字钢立柱就位→螺杆千斤顶精准调位→安装侧墙上部模板→钢桁架中段就位→钢桁架边段就位→安装拱部模板→桁架纵向钢管扣件连接并校准→安装止水带→封头模板安装→混凝土浇筑(先墙后拱)→养生、拆模。

5 施工质量控制要点

5.1 满槓脚手架施工质量控制

(1)制定方案,确定分槓及浇筑顺序。方案制定时要考虑脚手架尺寸是否能租到,交叉处模板最大用量使用时间和高处人工移动整体材料的重力。首槓浇筑长度为墙标准模板的整数倍,首段搭设长度不少于 3 槓,便于材料在平台堆放。

(2)脚手架严格按放线位置搭设,特别是端槓段纵距要严格控制,注意横杆中心应与立柱中心差一倍管径,杆位误差 ≥ 10 mm,防止与模板对缝处不一致,造成重新加横向杆和立杆。专业架子工电动扳手扭紧不够,需安排专人对扣件逐一再检查扭紧。利用底板地锚和槽钢固定扫地杆,防止滑动,此外剪撑每两横距一个。

(3)检查安装螺杆千斤顶钢管端头质量,不平整的更换或专用割刀修整平整。

(4)端墙模板不能对撑,浇筑混凝土时受力很大,用 3 种方法抵消外推力:一是在最底部用锚杆拉结;二是在纵向水平杆上安装螺杆千斤顶,利用至少三槓脚手架本身抗滑移;三是八字撑。

5.2 钢桁架施工质量控制

(1)放大样加工,每槓做试验性拼接,并做好每槓标记。焊接质量符合要求,不能虚焊,假焊。墙部工钢立柱与脚手架按步距高度相连,提高稳定性。特别是钢桁架与工钢立柱相接处,要用纵向钢管连接所有立柱,并用斜撑与主体脚手架相连;用横向钢管及螺杆千斤顶支撑立柱,确保横向稳定。

(2)红外线水平仪激光扫描,确保桁架垂直及在同一平面。

(3)钢桁架纵向连接可靠,端部加斜撑防倾,法兰连接螺栓可靠。

5.3 施工技巧

(1)20号工钢较重,先行搬运到位,并临时固定。

(2)底部先安装一层模板用于找平和定位。

(3)立柱平面位置要准确,可用加短钢管临时限位方法校准,工钢立柱调垂直后用铁丝与承重脚手架临时固定。

(4)中段钢桁架螺杆千斤顶严控扭矩,防止过顶,造成钢桁架与脚手架不能联合受力或受力不均造成螺杆千斤顶破坏,要充分利用方木变形吸收钢桁架弹性变形,以及拼装间隙。

(5)模板之间采用螺杆连接,增加整体稳定性。

(6)纵向连接间距控制要均匀。

(7)混凝土浇筑时用千分表检查脚手架的变形与位移。

6 施工效果及经济分析

6.1 衬砌效果

大跨度钢桁架模板施工方法用于短硐室支模方

法为国内首创,施工质量稳定,效率较高,解决了大断面硐室立模安全风险大的问题,拆模后观感质量^[15]也较好(见图6)。



图6 隧道衬砌实际效果

Fig.6 Actual finished tunnel lining

6.2 经济性分析

结合现场实际情况,钢模台车与大跨度钢桁架模板施工方法施工成本分析对比见表1。每项目模板施工费用可节省40万元以上,并且养护期间工人可做其他工作,误工少,有利于项目成本管理。

表1 施工成本经济性分析对比

Table1 Breakdown of construction costs

成本类别	项目明细	数量	单价	金额/元
钢模台车 11.75 m 长(十字交叉口处要求最短量)				
台车制造成本	台车材料	145 t	7500 元/t	1087500
立模成本(不含端墙)	墙拱方量	1120 m ³	75 元/m ³	84000
作业平台增加	平台搭拆	620 m ²	25 元/m ²	15500
可回收费用	台车材料	145 t	2000 元/t	-290000
合计				897000
脚手架和钢桁架组合模架				
桁架制造成本	桁架材料	15.2 t	5500 元/t	83600
专业队伍脚手架搭设成本	脚手架搭拆	552 m ²	100 元/m ²	55200
脚手架另行加固成本	加固用工	40 工	200 元/工	8000
脚手架顶托租金	租金 70000 元,赔偿 30000 元			100000
立模成本(不含端墙)	墙拱方量	1120 m ³	180 元/m ³	201600
钢模板成本	拱部钢模板(按 15 次消耗)	224 m ²	300 元/m ²	17920
钢木模板成本	墙面钢木模板(按 10 次消耗)	154 m ²	340 元/m ²	20944
可回收费用	桁架材料	15.2 t	2000 元/t	-30400
合计				456864

7 结语

(1)常用的长度较短的超大断面硐室模架支撑方法存在安全风险大及成本高问题,创新采用满堂脚手架结合分段式钢桁架方法,解决了支模空间限制问题,人员便于操作,有效保证了施工质量,具有较高的推广应用价值。

(2)采用此方法,脚手架和模板可多次周转使

用。墙模板和立柱可直接使用其他部位模板或稍做改造即可使用,有效降低了工程施工成本。

(3)拆模可先拆墙部和拱部边段部位,中部后拆,缩短了施工循环时间。

参考文献(References):

[1] 唐果良.特大断面隧道液压模板台车的研制与施工技术[J].现代隧道技术,2006,43(4):77-82.
TANG Guoliang. Development and fabrication of a hydraulic-

- drive tunnel shutter jumbo with super large cross-section[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2006,43(4):77-82.
- [2] 雍金柱.扁平特大断面隧道模板台车设计及施工[J].*铁道勘察*,2018,44(6):111-117.
YONG Jinzhu. Design and construction of formwork trolley for flat super large section tunnel[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2018,44(6):111-117.
- [3] 王强华,楼如岳.超大型矩形盾构 ECL 工法钢模板支撑系统[C]//中国土木工程学会,中国土木工程学会隧道及地下工程分会.中国土木工程学会第十二届年会暨隧道及地下工程分会第十四届年会论文集,2006:428-431.
WANG Qianghua, LOU Ruyue. Steel formwork support system for ECL construction method of super large rectangular shield[C]// China Civil Engineering Society, Tunnel and Underground Works Branch of China Civil Engineering Society. Proceedings of the 12th Annual Meeting of China Civil Engineering Society and the 14th Annual Meeting of Tunnel and Underground Works Branch of China Civil Engineering Society. 2006:428-431.
- [4] 冉孟安.人防指挥所工程大厅被复施工支架的设计与应用[J].*科技风*,2012(22):146-148,150.
RAN Meng'an. Design and application of the support for reconstruction of civil air defense command post engineering hall [J]. *Technology Wind*, 2012(22):146-148,150.
- [5] JGJ 130-2011, 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范[S].
JGJ 130-2011, Technical code for safety of steel tubular scaffold with couplers in construction[S].
- [6] 刘群,等.建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
LIU Qun, et al. Safety technical manual of fastener type steel pipe scaffold in construction[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [7] GB 50775-2012, 钢结构工程施工规范[S].
GB 50775-2012, Code for construction of steel structures[S].
- [8] 编委会.钢结构工程制作安装便手册[M].北京:中国建材工业出版社,2007.
Editorial Board. Manual for fabrication and installation of steel structures[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2007.
- [9] 沈祖炎,陈以一,陈扬骥,等.钢结构基本原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
SHEN Zuyan, CHEN Yiyi, CHEN Yangji, et al. Basic principle of steel structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [10] 王浩,王柏松,武家欣,等.支架型模板台车与隧道混凝土机械手联合灌注[J].*机械工程师*,2020(4):84-85,87.
WANG Hao, WANG Baisong, WU Jiixin, et al. Joint pouring of support type formwork trolley and tunnel concrete manipulator[J]. *Mechanical Engineer*, 2020(4):84-85,87.
- [11] 钟鹏,蒋忠全,王利国,等.折叠式弧形模板台车在隧道紧急停车加宽段施工技术的运用[J].*中国设备工程*,2019(15):154-156.
ZHONG Peng, JIANG Zhongquan, WANG Liguoguo, et al. Application of folding arc formwork trolley in the construction of emergency stop widening section of tunnel[J]. *China Plant Engineering*, 2019(15):154-156.
- [12] 赵晔.模板支架工程施工验算案例[J].*城市道桥与防洪*,2019(7):211-214.
ZHAO Ye. Necessity of checking calculation in construction of formwork support engineering[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2019(7):211-214.
- [13] 明晓丹,岳中文,牛学超,等.高大模板盘扣式钢管支撑体系受力与变形实测分析研究[J].*工业建筑*,2019,49(11):125-130.
MING Xiaodan, YUE Zhongwen, NIU Xuechao, et al. Research on force and deformation measurement of high formwork disc-buckled steel tube support system [J]. *Industrial Construction*, 2019,49(11):125-130.
- [14] 吴罗文.应用力解器和迈达斯软件进行复杂挑模设计和计算[J].*广东土木与建筑*,2020,27(5):80-83,91.
WU Luowen. Application of force solver and midas software in the design and calculation of complex cantilever formwork [J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2020,27(5):80-83,91.
- [15] GB 5066-2011, 混凝土结构工程施工规范[S].
GB 5066-2011, Code for construction of concrete structures [S].

(编辑 王建华)