

大跨度悬挑钢结构施工及临时支撑技术

王 懂,巨若冰,慕丰丞,王 晨

(中国建筑第八工程局有限公司西北分公司,陕西 西安 710076)

[摘要] “一带一路”文化交流中心传媒港公建项目整体可分为南北两部分,北侧为主体,采用钢结构框架-支撑结构,南侧为整体悬挑结构,长 37.5m,为大跨度悬挑钢结构,施工难度大,通过采用胎架支撑-高空原位对接的方法完成钢结构拼装。同时,通过严格控制钢结构施工工艺及安装顺序,并进行施工全过程数值模拟分析,解决临时支撑体系施工布置难题,并验算不同复杂工况下临时支撑体系强度、变形、稳定性以及钢结构整体受力与变形,保证大跨度悬挑钢结构安装、卸载精度和安全。

[关键词] 钢结构;悬挑结构;安装;数值模拟;施工技术

[中图分类号] TU758.1

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0082-06

Construction of Large-span Suspended Steel Structure and Application of Temporary Support Technology

WANG Dong, JU Ruobing, MU Fengcheng, WANG Chen

(Northwest Branch of China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710076, China)

Abstract: The public construction project of the media port of the “Belt and Road Initiative” cultural exchange center can be divided into two parts: north and south. The north side is the main body, and the steel structure frame-support structure is adopted. The south side is the overall cantilever structure, which is 37.5m long and is a large-span cantilever steel structure. It is difficult to construct; therefore, the steel structure assembly is completed by using the method of bracket support-high altitude in-situ docking. Meanwhile, the construction layout problem of the temporary support system was solved by strictly controlling the construction technology and installation sequence of the steel structure and analyzing the numerical simulation of the whole construction process. The strength, deformation, and stability of the temporary support system under different complex working conditions, and the overall stress and deformation of the steel structure, have been checked to ensure the accuracy and safety of the installation and unloading of the large-span cantilever steel structure.

Keywords: steel structure; cantilevered structure; installation; simulation; construction

0 引言

目前我国不断提升区域开放水平,涉及的文化交流公建项目需满足大容量、高空间要求。近年来,复杂的大跨度钢结构空间结构不断演变与革新,被广泛应用于公共建筑中,满足人们交流及生产生活的需求。大跨度悬挑结构有别于一般的平面结构,自身为三维受力特性,能够实现跨越超大空间的同时保证结构安全,具有空间资源利用充分、建筑艺术性强等优势,被广泛应用于大型公共

建设项目中。

技术人员对大跨度空间结构施工过程中发现的诸多技术问题和力学问题越来越重视,比如整体设计造型复杂、新颖,导致其构件加工精度要求高^[1];钢构件自重小,但高空拼装作业难^[2-3]等。姬帅等^[4]、肖魁等^[5]和沈海英等^[6]针对悬挑钢结构体系传力路径问题、临时支撑工艺以及高空吊装技术进行研究并开展工程实践应用,保证了施工安全。而大跨度悬挑钢结构在施工过程中具有显著的时变特性,受胎架设计冗余、布置合理问题等因素影响较大。由此可见,对于如何保证大跨度悬挑钢结构快速施工,保证临时支撑

体系施工误差在允许范围内是亟需解决的问题。

本文依托“一带一路”文化交流中心传媒港公建项目,该项目南侧整体钢结构体系悬挑 37.5m,采用胎架支撑和分段分区安装结合的临时支撑施工技术,待北侧主体结构框架施工完成后进行南侧悬挑安装。采用 MIDAS Gen 有限元软件对整个悬挑施工过程进行数值分析,详细验算南侧悬挑钢结构在施工过程中的杆件位移和应力变化情况,确保钢结构在施工过程中的安全并保证结构处于设计位形状态。

1 工程概况

“一带一路”文化交流中心传媒港公建项目位于西安国际港务区,如图 1 所示。传媒港钢结构总吨位约 6 000t,总层数为 6 层,其中地下结构 1 层,地上钢框架结构 5 层,基础形式为平板式筏形基础,南侧整体悬挑钢结构为 3~5 层,建筑标高为 23.950m,最大悬挑长度达 37.5m,如图 2 所示。本项目以北侧主体为核心,采用钢结构框架-支撑结构体系,安装大截面钢梁作为外伸结构,大截面悬挑钢梁与主体整体连接,向南侧悬挑并共同承担悬挑部位荷载,类似于斜拉桥结构中的拉索。该结构体系通过布置支撑胎架和安装悬挑钢梁保证南侧悬挑钢结构施工质量,在保证结构刚度和控制变形的同时改善结构受力性能,而不影响建筑造型和使用功能。



图 1 “一带一路”文化交流中心传媒港公建项目
Fig. 1 “Belt and Road Initiative” cultural exchange center media port public construction project

2 钢结构施工

2.1 钢结构测量

根据现场图纸,完成工程测量准备工作,针对测量仪器以及人员配备问题做好交底;对于控制点的移交、复测等严格按照 GB 50026—2020《工程测量标准》要求进行;以先整体后局部的原则对整个工程进行控制,再进行各区段控制点的加密和放样工作;平面及高程控制网从整体考虑,施工过程中采用外控法控制,并定期对平面及高程控制网进行

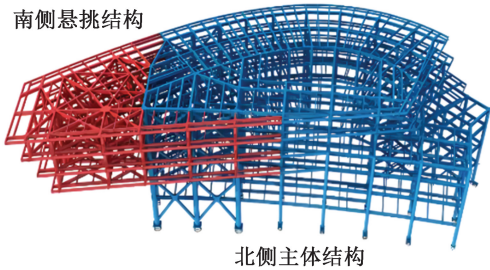


图 2 钢结构布置
Fig. 2 Steel structure layout

复核保证施测精度。

对于主体施工测量,做好轴线复核、高程测量等工作。在钢结构安装测量过程中,首要做好预埋件的准确测量定位,保证预埋板水平度、标高和平面位置的准确性及预埋套筒垂直度。

2.2 钢结构安装

传媒港南侧大悬挑结构最大长度约 37.5m,考虑大跨度悬挑钢结构直径大、安装支撑点少、施工拼接复杂,且高空作业危险性高等问题,根据现场施工进度,计划先完成北侧主体结构,再进行南侧悬挑结构安装。主体钢结构柱间支撑安装与钢梁至少保持 3 层进度,施工过程中,柱间支撑随钢梁同步吊装就位,暂时不参与结构受力,施工至 3 层时,开始逐层焊接工作。南侧悬挑结构先完成主桁架受力杆件,再安装桁架间框架梁,安装流程如图 3 所示。

对于钢梁的安装,遵循先主梁后次梁的原则,每个区域外框架钢柱安装后及时安装柱顶楼层的主梁和环梁,以便形成整体稳定的结构体系,其余钢梁在前一区域钢柱和钢梁校正焊接后进行安装。

校正时应应对轴线、水平度、垂直度、标高、连接板间隙等因素进行综合考虑,各分项的偏差值要达到设计与规范要求。钢梁按施工图进行吊装就位时要注意靠向,钢梁就位时先两端孔对位,再拧紧安装螺栓。安装螺栓数量不得少于该处螺栓总数的 30%,且 ≥ 3 颗。钢柱之间的连接板待校正、焊接完毕后将其割掉,并将焊接处打磨处理,涂装防锈漆。

针对悬挑第 3 层中间超长截面钢梁,结合以往类似工程施工经验,采用工厂预制成散件、分段,现场拼装后整体吊装的方式进行安装(见图 4),可减少高空作业量和临时支撑使用量,保证施工安全,提高施工质量,加快速度且节约成本。

悬挑部位按照设计要求进行自根部直线预起拱,根据悬挑钢柱位置进行偏移放线。每处钢柱参

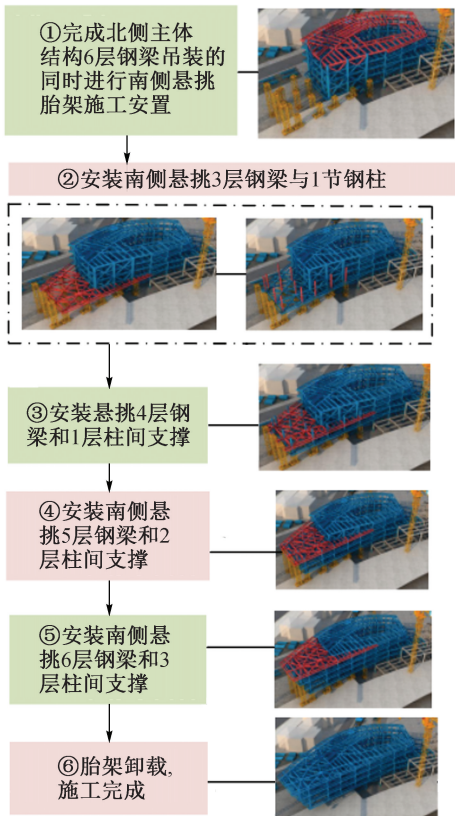


图 3 悬挑结构施工流程

Fig. 3 Construction process of cantilever structure

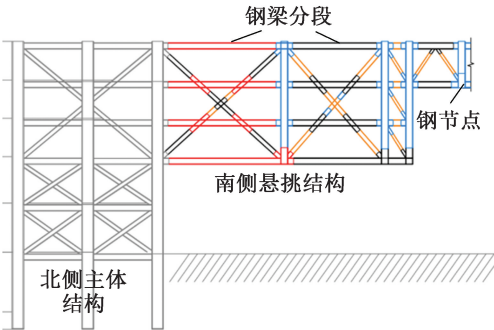


图 4 大悬挑部位分段

Fig. 4 Segmentation of the large overhanging part

照该轴线设计预拱值,共分成三段进行起拱,悬挑端部分别起拱 39,72,95mm,同时根据相似三角形原理确定胎架顶部标高,现场施工通过调节支撑胎架顶部标高实现起拱安装。

3 支撑体系设计与施工

3.1 临时支撑体系设计原则及内容

1)临时支撑体系设计时要满足钢结构安装及卸载过程中的受力及稳定性要求,考虑节点安装位置、调节空间及调节方法。

2)根据构件安装就位高度、支撑胎架平面布置情况及下方支撑结构形式,对每榀支撑胎架综合考虑使用标准节、调整节进行组合。

3)胎架设置需考虑安装施工操作、高空焊接施工操作、测量定位控制施工操作等工序的施工要求。

4)针对结构卸载方法及胎架支撑高度,设计相应顶部工装(工装高度=胎架顶标高-胎架底标高-胎架组合形式的高度),工装应方便构件安装、满足构件承载力要求并便于结构卸载。

3.2 胎架设计

临时支撑体系选择标准化格构胎架,格构胎架主要由底座、底座调整节、底层节、标准节、2.1m 调整节、1.0m 调整节斜缀杆、横缀杆、交叉支撑及顶梁等构配件使用连接销螺栓组装而成,标准节立面如图 5 所示。

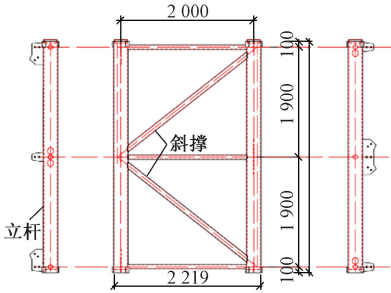


图 5 标准节立面

Fig. 5 Standard section elevation

南侧悬挑结构胎架布置如图 6 所示,考虑 2,3 号支撑胎架高度较高,根据 JGJ 300—2013《建筑施工临时支撑结构技术规范》^[7],胎架之间需做横向联系,将格构胎架形成整体结构体系,横向联系采用抱箍与 $\phi 219 \times 10$ 钢管进行连接,横向联系布置如图 7 所示。1,2,3,4,9,10 号胎架之间在标高 8.900m 左右处利用抱箍和横向联系杆连接,1,2,3 号胎架之间在标高 22.200m 左右处利用抱箍和横向联系杆连接。

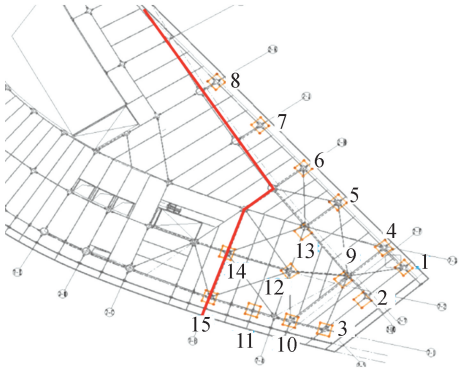


图 6 悬挑结构胎架布置

Fig. 6 Layout of suspension structure moulding frame

考虑 1~3 号胎架高度已超过 20m,为保证胎架整体稳固,在第 1 层横向联系上方 6~8m 处拉设缆

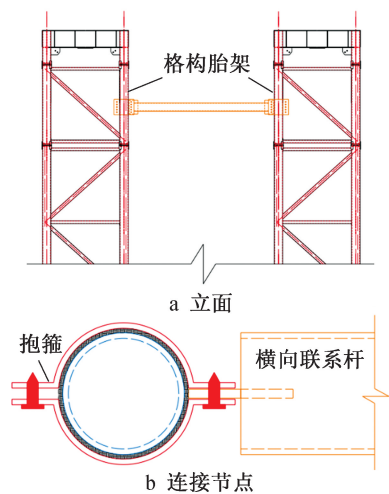


图 7 格构胎架横向联系

Fig. 7 Lateral connection of tire structure

风绳,在每组胎架南北两侧主立柱上各拉设 1 道,缆风绳与地面通过预埋圆钢弯头拉结。

3.3 胎架顶部工装及底部设计

胎架顶部工装设计如图 8 所示,胎架顶部钢梁规格为 HM594mm×302mm,顶部调节段为 $\phi 219\times 10$ 钢管;型钢顶部布置安全立杆和双道安全绳,标准与钢梁双道安全绳相同,下方搭设钢跳板作为人员作业平台。

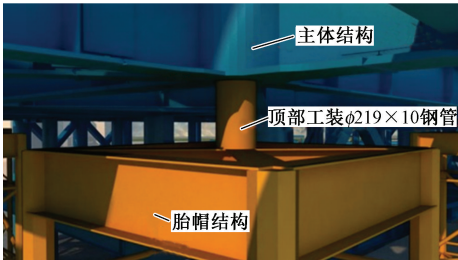


图 8 支撑胎架顶部工装设计

Fig. 8 Design of supporting the top tooling of the moulding frame

考虑胎架底部受力集中,现场回填土不宜直接作为胎架底部传力基础,故选择在该区域浇筑混凝土基础。通过前期施工模拟提取胎架底部反力,使用尺寸 $400\text{mm}\times 400\text{mm}\times 20\text{mm}$ 钢板,并在其上开 $\phi 16$ 圆孔,使用 $\phi 12$ 螺纹钢塞焊,螺纹钢总长 360mm ,埋件设计如图 9 所示。

3.4 支撑体系安装

胎架拼装应在平整地面上进行,在拼装胎架完成 1 个结构单元并调整后完成吊装,为保证吊装安全性,拼装单元不宜超过 4 个标准节^[8];每搭设完 4 层标准节后,应校验 1 次支撑结构垂直度。

格构胎架采用卧拼方式进行拼装,过程如下:

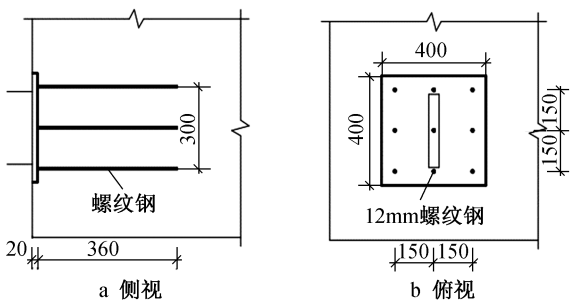


图 9 胎架基础埋件设计

Fig. 9 Tire frame foundation embedment design

①拼装场地整平后,放置格构胎架标准片于地面上并进行抄平;②使用 25t 汽车式起重机吊装另一片标准片至工人操作场地,安装格构胎架横缀杆及斜缀杆,形成 1 个单元;③使用 25t 汽车式起重机吊装已拼装单元至地面标准片上方,安装横缀杆及斜缀杆螺栓,完成胎架标准节拼装;④按照前 3 步拼装其他标准节或调整节;⑤根据每榀桁架组合形式,将若干标准节、调整节及底座、顶梁使用螺栓进行连接,完成 1 榀胎架拼装施工。

4 悬挑结构模拟分析

南侧钢结构悬挑结构长 37.5m ,属于超过一定规模的危险性较大分部分项工程,为保证结构安装与卸载过程的安全,确定施工方案可行性,对整体结构施工进行数值模拟计算。

4.1 主体与悬挑结构施工模拟

1) 计算参数确定

根据施工方案中的安装顺序,采用 MIDAS 有限元软件结合生死单元法进行模拟安装,对每个步骤结构强度和变形进行验算;主体结构杆件与悬挑结构杆件材料全部采用 Q355B,临时支撑结构各杆件材料采用 Q345B;综合考虑结构实际质量,构件自重(含节点自重)模型中放大系数设为 1.4,等效考虑施工附加荷载。

模型中钢梁柱等采用梁单元模拟,钢拉杆采用杆单元模拟,构件截面尺寸均根据实际情况赋予,对于边界条件,钢结构安装过程中结构柱底部约束为刚接,临时支撑结构与主体结构之间采用焊接连接,胎架底部采用固定铰支座模拟。

2) 施工模拟分析

根据施工方案,按照实际施工步骤进行模拟分析,整体安装完成后的位移云图如图 10 所示,位移变化曲线如图 11 所示。

由图 11 可知,主体钢梁开始安装时,最大竖向和水平位移较小;随着主体钢结构逐层安装,最大竖向和水平位移逐步增加。主体施工完成时水平

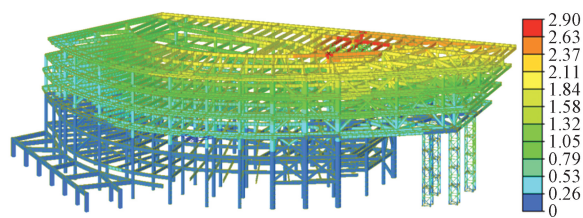


图 10 主体与悬挑结构位移云图
Fig. 10 Model displacement cloud map

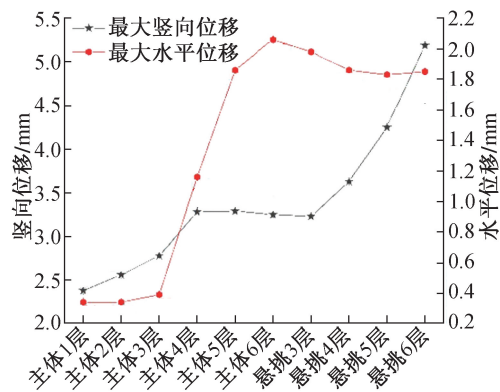


图 11 主体与悬挑结构位移变化曲线
Fig. 11 Displacement change curve of main body and overhanging structure

位移达峰值,后随南侧悬挑结构的施工而有所减小,这是由于悬挑结构安装时,结构整体拉伸,水平受力整体更为平衡,故水平位移更加平稳,也说明悬挑结构设计的合理性^[9];而主体 3,4 层水平位移突增是因为在后期进行悬挑结构南侧钢柱间支撑以及节点加固安装时,结构南侧局部自重有所增加,造成水平位移增加。随施工安装进行,结构整体自重不断增加,竖向位移随之变化,其主要发生在主体南侧钢柱处。整个安装过程中,杆件截面组合应力随安装进行而不断增加,最大截面组合应力为 69.722N/mm^2 ,仍小于材料强度设计值,强度验算满足要求。

4.2 临时支撑体系施工模拟

1) 搭设模拟

随施工工序进行全过程施工模拟,在悬挑结构施工前开始进行临时支撑体系搭建,按照悬挑支撑胎架布置方案,整体安装过程中,选取最不利工况计算胎架位移变化^[10]。胎架布置于最南侧受力最不利,1~4,9,10 号胎架利用抱箍和横向联系杆连接为整体,因此对其整体进行模拟计算。由计算结果可知,胎架组在 x 向水平变形最大为 48.71mm ,发生在 1 号胎架, y 向变形最大为 70.04mm ,发生在 3 号胎架,小于规范要求 $L_{\text{水平}}/250=116.8\text{mm}$;胎架顶部交叉梁单元最大截面组合应力为 168.6N/mm^2 ,

小于材料强度设计值 305N/mm^2 ,强度验算满足要求。

2) 卸载模拟

临时支撑体系卸载共分 4 步进行,胎架采用等量分级卸载的方法进行,所有胎架卸载 10mm 后进入下级卸载,顺序如下:①卸载 1,2,3,8 号胎架;②卸载 4~7 号胎架;③卸载 13~15 号胎架;④卸载 9~12 号胎架。

临时支撑体系卸载会使整体结构受力转换,由部分支撑胎架受力转化为钢结构受力,采取由荷载较大部分向荷载较小部位卸载的方案,卸载过程中的最大水平与竖向位移如图 12 所示。

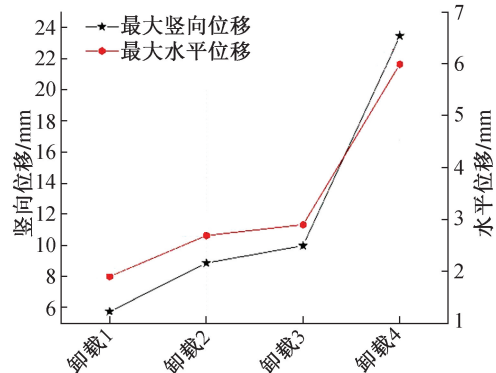


图 12 胎架卸载位移变化曲线
Fig. 12 Change curve of unloading displacement of tire frame

由图 12 可知,第 3 次卸载后,悬挑结构支撑压力均由 9~12 号胎架承担,最大竖向位移与水平位移分别增加了 $13.47, 3.09\text{mm}$ 。整个卸载过程中最大组合应力 151.71N/mm^2 ,发生在第 3 次卸载时,仍小于结构限值,满足安全要求。

5 结语

针对传媒港大跨度、大悬挑钢结构空间体系施工,合理设计临时支撑体系搭设与卸载,采用“分区分段、地面拼装”的施工方案,安装过程中结构位移响应、应力水平变化均匀且受力体系向设计状态逐步平稳过渡,构件刚度、强度等性能指标均符合规范要求,该施工方案合理可行,保证了施工质量与安全要求。

参考文献:

[1] 王晋,马天龙,李玉强,等. 大跨度连廊钢结构临时支承体系施工阶段计算分析[J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(3): 97-103.
WANG J, MA T L, LI Y Q, et al. Analysis of temporary support system for large-span corridor steel structure under construction stage [J]. Progress in building steel structures, 2018, 20(3): 97-103.

[2]

柳明亮,李翔宇,邢国华,等. 大跨空间轮辐式弦支桁架结构施工过程监测与模拟分析[J]. 建筑科学与工程学报,2023,40(1):95-102.
LIU M L, LI X Y, XING G H, et al. Construction process monitoring and simulation analysis of large-span spatial spoke chord truss structure [J]. Journal of architecture science and engineering, 2023,40(1): 95-102.

[3]

秦学锋,侯文崎,林泓志,等. 多重体系转换对大跨无柱地下空间结构力学行为影响[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(10):2703-2714.
QIN X F, HOU W Q, LIN H Z, et al. Influence of multiple system transformation on the mechanical behavior of long-span non-column underground spatial structure [J]. Journal of railway science and engineering, 2021,18(10): 2703-2714.

[4]

姬帅,芦继忠,凌亚青,等. 钢结构拼装胎架研制及其在大跨度钢桁架中的应用[J]. 建筑结构,2018,48(15):66-70.
JI S, LU J Z, LING Y Q, et al. Development of steel structure assembly jig and its application in large-span steel trusses [J]. Building structure, 2018,48(15): 66-70.

[5]

肖魁,贾水钟,贾君玉,等. 上海图书馆东馆悬挂结构方案设计与研究[J]. 建筑结构,2022,52(1):1-6.
XIAO K, JIA S Z, JIA J Y, et al. Design and research on the suspension structure scheme of Shanghai Library East Hall [J]. Building structure, 2022,52(1): 1-6.

[6]

沈海英,张潇南. 嘉兴万科邻里中心悬挂钢结构施工模拟分析[J]. 施工技术(中英文),2022,51(21):119-122,132.
SHEN H Y, ZHANG X N. Construction simulation analysis of

core-tube suspension steel structure of Jiaxing Vanke neighborhood center [J]. Construction technology, 2022, 51(21): 119-122,132.

[7]

中国建筑一局(集团)有限公司,中国建筑股份有限公司. 建筑施工临时支撑结构技术规范:JGJ 300—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
China Construction First Group Corporation Limited, China State Construction. Technical code for temporary support structures in construction:JGJ 300—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2013.

[8]

刘洋,刘永添,余永辉,等. 某带悬挑复杂连体办公楼结构设计与分析[J]. 建筑结构,2023,53(8):54-61.
LIU Y, LIU Y T, YU Y H, et al. Structural design and analysis of a complex connected office building with cantilever [J]. Building structure, 2023,53(8): 54-61.

[9]

邱斌,杨会伟,雷宏刚,等. 太原植物园大跨悬挑钢结构优化分析[J]. 太原理工大学学报,2020,51(1):43-49.
QIU B, YANG H W, LEI H G, et al. Optimization analysis of large-span cantilever steel structures in Taiyuan Botanical Garden [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(1): 43-49.

[10]

石开荣,潘文智,许洁槟,等. 拆撑对高层悬挑转换桁架结构内力的影响[J]. 工业建筑,2019,49(7):129-132,175.
SHI K R, PAN W Z, XU J B, et al. The effect of dismantling braces on the internal force of high-rise cantilever transfer truss structures [J]. Industrial construction, 2019, 49(7): 129-132,175.

(上接第 28 页)

[5]

武哲书,孙文昊,肖明清,等. 胶州湾第二海底隧道穿越活动断层抗错断结构方案研究[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(5):826-836.
WU Z S, SUN W H, XIAO M Q, et al. Antidislocation structure design of Jiaozhou Bay Second Subsea Tunnel crossing an active fault[J]. Tunnel construction,2023,43(5):826-836.

[6]

吴明,彭建兵,贺凯,等. 地铁隧道受平行向地裂缝错动影响数值分析[J]. 工程地质学报,2015,23(5):1020-1029.
WU M, PENG J B, HE K, et al. Numerical analysis of dislocation of ground fissure on the metro tunnel paralleling to the ground fissure's strike [J]. Journal of engineering geology, 2015, 23(5): 1020-1029.

[7]

王杰,盛俭,赵梦丹,等. 康西瓦断裂错动对近断层隧道影响的数值模拟分析[J]. 地震工程与工程振动,2022,42(3):235-242.
WANG J, SHENG J, ZHAO M D, et al. Numerical simulation analysis of the influence of Karakax fault dislocation on near-fault tunnel[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics,

2022,42(3):235-242.

[8]

胡旭东. 近断层浅埋隧道结构动力响应分析[J]. 施工技术(中英文),2024,53(9):40-46.
HU X D. Analysis of the structural dynamic response of near-fault shallow-buried tunnel [J]. Construction technology, 2024, 53(9): 40-46.

[9]

贺凯. 小角度斜交与近距离平行条件下地铁隧道与地裂缝相互作用的模型试验研究[D]. 西安:长安大学,2012.
HE K. Model test on the interaction between metro tunnel and ground fissure under the condition of tunnel crossing with small angle and paralleling with short distance to ground fissure[D]. Xi'an:Chang'an University,2012.

[10]

周光新,崔臻,盛谦,等. 活动断裂错动位移模式对隧洞变形与内力的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报,2021,41(6):1323-1330,1349.
ZHOU G X, CUI Z, SHENG Q, et al. Study on the deformation and internal force of the tunnel under the displacement pattern of the active fault zone [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering,2021,41(6):1323-1330,1349.