

DOI: 10.7672/sgjs2025020091

异形 GRC 幕墙结构卡槽式连接施工技术及有限元分析*

蒋雪城, 张玉建, 张金鹏, 张玉良, 刘本奎, 郑洪

(中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200120)

[摘要] 针对宁波国际会议中心室外廊桥外侧幕墙特殊需求, 提出了复杂异形 GRC 幕墙施工技术。通过全装配式施工工艺、BIM 模型深化技术、外伸牛腿+U 形槽的连接形式、优化幕墙组件安装顺序等, 确保了 GRC 幕墙高效、可靠安装。同时, 为解决传统异形 GRC 幕墙结构设计及施工方案中存在的现场装配率低、施工工序繁琐、施工效率低及施工质量不易控制等问题, 提出一种新型异形 GRC 幕墙结构卡槽式连接设计。该连接形式包括幕墙板背附骨架结构和外伸钢牛腿+U 形槽连接节点, 具有构造简单、可实现全装配式安装等优点。通过有限元分析可知, 提出的卡槽式 GRC 幕墙节点具有足够连接强度。

[关键词] 安装; 幕墙; 装配式; 卡槽式连接; 背附骨架; 有限元分析; 施工技术

[中图分类号] TU758

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)02-0091-07

Construction Technology and Finite Element Analysis of Slotted Connection for Special-shaped GRC Curtain Wall Structure

JIANG Xuecheng, ZHANG Yujian, ZHANG Jinpeng, ZHANG Yuliang, LIU Benkui, ZHENG Hong

(China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: In view of the special requirement of the outdoor gallery bridge outer curtain wall for Ningbo International Conference Center, the construction technology of complex special-shaped GRC curtain wall is put forward. The efficient and reliable installation of GRC curtain wall is ensured by adopting fully prefabricated construction technology, BIM model deepening technology, overhanging bracket + U-shaped groove connection form, and optimization of installation sequence of curtain wall components. At the same time, in order to solve the problems of low on-site assembly rate, tedious construction process, low construction efficiency and difficult control of construction quality in the design and construction scheme of traditional special-shaped GRC curtain wall structure, a new type slotted connection of special-shaped GRC curtain wall structure is proposed. The connection form includes the curtain wall plate carrying skeleton structure and the extended steel corbel + U-shaped groove connection joint, which has the advantages of simple structure and full prefabricated installation and construction. The finite element analysis results show that the proposed slotted GRC curtain wall joint has sufficient connection strength.

Keywords: installation; curtain wall; prefabrication; slotted connection; carrying skeleton; finite element analysis; construction

1 工程概况

宁波国际会议中心坐落于东钱湖风景区泄洪区域, 结构被现有 3 条河道分为 4 个不同功能区域,

约 1 300m 超长双层廊桥贯穿各功能区, 如图 1 所示。

结构各区域存在不同建筑形式玻璃纤维增强水泥(GRC)板幕墙结构, 以满足该项目富有中国江南韵味的建筑外观需求。其中, 在廊桥外侧采用梳形挂板式异形幕墙结构, 不仅体现了混凝土特有厚重感, 而且其独特的斜挂梳形结构为廊桥外观带来

* 中国建筑第八工程局有限公司课题: 临山跨河江南特色会议会展建筑建造关键技术研究(2021-2-16)

[作者简介] 蒋雪城, 工程师, E-mail: wancanglan@163.com

[收稿日期] 2024-05-20



图1 宁波国际会议中心效果

Fig. 1 Effect of Ningbo International Conference Center

了层次分明、整齐划一的美感,如图2所示。依托于该项目,提出一种异形GRC幕墙结构卡槽式连接设计,以解决复杂异形幕墙结构传统设计及施工方案中现场装配率低、施工工序繁琐、施工效率低及施工质量不易控制等问题^[1-3],并通过有限元分析验证该连接设计的可行性。



图2 室外复杂异形GRC幕墙

Fig. 2 Outdoor complex special-shaped GRC curtain wall

2 技术特点

宁波国际会议中心复杂异形GRC幕墙施工技术主要特点如下。

1) 采用装配式幕墙体系,由预埋件、金属骨架、外伸牛腿、U形槽、幕墙背附骨架、板内预埋螺栓/套筒、幕墙板等组件组成,将结构进行合理划分,分步安装。幕墙板及其他各组件均在工厂预制加工,现场直接进行组装,不仅能保证单元构件尺寸精确统一,还保证了安装完成后整体效果一致。

2) 运用BIM技术,对主体结构与幕墙进行一体化设计施工,通过整体深化建模、优化调整幕墙骨架等方式,从设计源头解决两种体系间的空间干扰问题,保证幕墙结构与不同位置处主体结构均具有可靠连接^[4]。通过幕墙结构施工全过程模拟,优化施工工序,加快整体施工进度。

3) 采用外伸牛腿+U形槽的构造作为幕墙金属骨架支撑系统节点连接形式,在实现装配式连接的基础上,保证了节点的稳定可靠。

4) 通过优化幕墙结构中转接件、金属骨架支撑系统、幕墙单元和幕墙板等各组件施工顺序,以确保幕墙结构施工质量与施工速度。

3 施工关键技术

3.1 工艺流程

宁波国际会议中心复杂异形GRC幕墙施工工

艺流程可划分为4个阶段,分别为施工准备、加工制作、金属骨架安装和幕墙安装。各阶段工艺要点如图3所示。

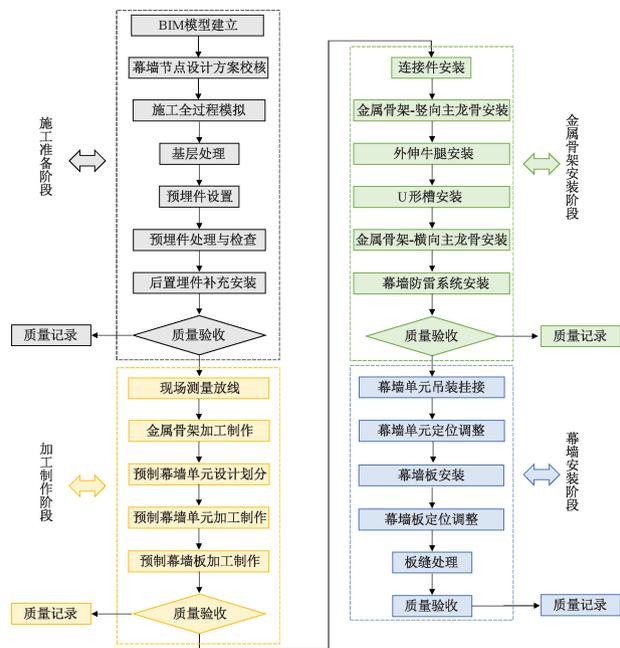


图3 施工工艺流程

Fig. 3 Construction process

3.2 BIM模型深化

利用Revit, Rhino, SketchUp等三维软件,进行复杂异形幕墙结构BIM模型的准确、高效搭建,如图4所示,使包括施工、监理、建设单位在内的各参建方更直观地理解设计意图,为错漏碰缺检查及设计优化、施工综合排布、四维施工模拟和主材工程量统计等后续工作提供基础模型。



a BIM模型深化

b 成品效果

图4 幕墙BIM模型与成品效果

Fig. 4 BIM model and finished product effect of curtain wall

根据BIM模型,进行主体结构与复杂异形幕墙各连接处的碰撞检查,验证幕墙各连接节点设计方案的合理性,校核主体结构预埋件与连接件的设置是否到位。根据检查结果,提出相应幕墙结构设计深化建议,并进行相应深化设计处理。在此基础上,根据预定施工进度计划安排,进行复杂异形幕墙结构施工全过程演示,校核施工方案的可行性与

各组件安装顺序的合理性,如图 5 所示,并提出相应的改进建议。根据基于 BIM 模型的施工全过程模拟结果,可方便技术团队与施工人员理解操作,用于指导现场施工,也便于项目管理人员更直观地进行工程项目施工进度可视化控制管理。

3.3 基层处理与预埋件设置

在幕墙系统正式施工前,需清理主体结构表面,清除柱、梁、楼板及墙体表面浮浆与松动部分,确保表面整洁且无其他杂质和污染物。

在传统幕墙施工方案中,无法提前发现幕墙骨架系统和钢结构空间碰撞冲突问题,现场施工只能通过调整幕墙体系解决问题。局部构造变化不仅使质量和精度无法保证,影响建筑整体效果,还造成返工和材料浪费,影响施工进度。为解决这一问题,预埋件设置应根据与幕墙结构相连的主体结构具体情况确定。结合主体结构相连位置处实际形式,在满足装配式工艺需求基础上,需提前制订合理的幕墙节点设计方案,并在主体结构施工时设置并预留必需预埋件。主体结构幕墙一体化设计施工可在图 3 所示工序流程中完成,解决了空间干扰问题,确保了施工精度,减少了现场工作量,降低了施工难度,可满足不同幕墙节点形式的装配化施工需求。设置预埋件时,需控制相连钢结构施工精度,校核转接件偏差,进一步保证施工质量。在特殊情况下,需根据测量放线结果安装后置埋件,后置埋件由钢板和后切底机械锚栓组成,通常采用吊篮安装。最后,需检查预埋件位置是否正确,并采用抗拉拔试验验证其合格后,方可进入下一道工序。

3.4 金属骨架、异形幕墙单元与幕墙板加工制作

幕墙主龙骨采用镀锌方钢管,横龙骨采用镀锌角钢,并且采用背栓连接,横龙骨间距按板材规格进行排布。Q235B 钢材表面进行热浸镀锌处理。金属骨架的工厂化预制与现场装配式安装施工,可

避免幕墙埋件、转接件和钢结构现场焊接所产生的电弧,以及高温对防腐、防火层与结构安全性的不利影响,保证了施工质量。

目前,GRC 幕墙安装方法^[5-7]多为在现场对混凝土幕墙面板打孔,随后放置转接件或预埋件,与幕墙骨架通过螺栓或焊接形成整体。此类方法现场工艺繁琐,无法实现现场装配式施工,施工质量难以控制,同时现场打孔也易造成 GRC 幕墙面板强度不足^[8],导致结构服役期内幕墙板破损问题。部分 GRC 幕墙采用装配式安装方法,其在幕墙面板内嵌槽钢、角钢或其他形式埋件,但其埋件形式复杂且需定制,经济效益较差^[9]。此外,由多种不同规格槽钢、角钢或其他形式埋件组合形成的幕墙骨架连接节点也具有受力形式不明确的缺点,为异形幕墙连接设计带来较大困难^[10]。

针对上述问题,提出一种预制幕墙板背附骨架结构,以实现 GRC 幕墙装配式连接,如图 6 所示。通过背附骨架的合理放置,可避免施工现场直接处理板材所造成的损坏、质量难以控制等问题。GRC 板材与背附骨架通过板材内侧鼓包式预埋螺栓或预埋套筒连接,并在工厂预制时即已完成组装。预制幕墙板根据建筑要求可合理划分为幕墙单元,以满足建筑模块化设计需求。

现场安装时,仅需将幕墙板或预制幕墙单元吊装至预定位置后,通过螺栓连接预制幕墙板背附骨架与金属骨架支撑系统,避免了现场焊接,实现了施工现场的全装配式连接。

3.5 连接件与竖向主龙骨安装

依据预埋件中心线确定并调节受力钢结构连接件位置,安装连接件时需按水平及纵向线控制其平面及进出位置,以保证连接件安装准确无误。连接件通过焊接与埋件固定。找准位置后,先将连接件通过点焊与埋件固定,检查无误后再满焊固定。

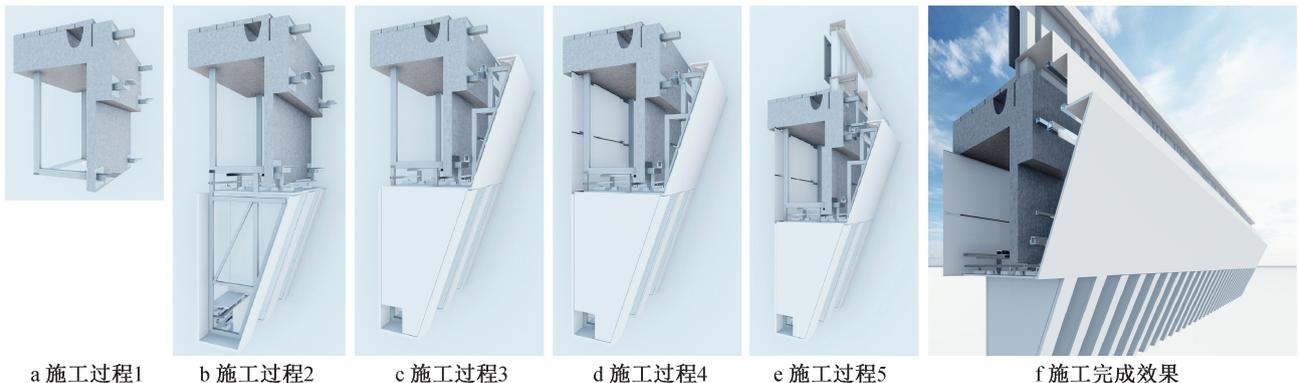


图 5 基于 BIM 技术的幕墙施工过程模拟

Fig. 5 Simulation of curtain wall construction process based on BIM technology

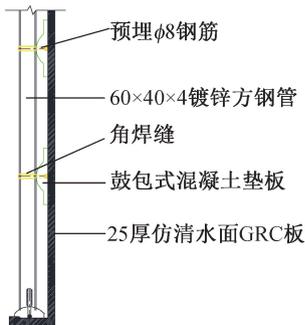


图 6 预制 GRC 幕墙板背附骨架

Fig. 6 Prefabricated GRC curtain wall panel carrying skeleton

幕墙结构支撑系统由金属骨架构成,其通过连接件与主体结构连接。金属骨架包括竖向主龙骨(立柱)和横向次龙骨(横梁)。幕墙金属骨架安装既要控制加工和安装精度,又要保证骨架连接正确、合理、牢固。

立柱在车间加工,采用四轴数控加工中心保证加工精度。在确定预埋件材料、位置、尺寸无误后,预先进行防腐处理。利用螺栓将主龙骨与连接件相连,调整好整幅幕墙垂直度、水平度后,加固主节点。

3.6 外伸牛腿、U形槽及横向次龙骨安装

待立柱安装完毕并检查验收合格后,方可进行外伸牛腿、U形槽及横向次龙骨安装。横梁与立柱采用外伸牛腿+U形槽节点连接,在保证金属骨架连接节点稳定可靠的基础上,实现此处各构件装配式连接。对于不同位置、不同造型幕墙结构,外伸牛腿+U形槽节点构造形式保证了金属骨架支撑系统各组件均为预先设计、加工,这优化了施工工序,满足了不同位置处幕墙施工需求。

在目前技术方案中,干挂幕墙后置金属骨架与主体结构幕墙预埋件相连的节点构造通常包含多种异形板件与连接件,构造形式复杂。同时,由于现有连接形式在全部安装完成前通常为机构,导致幕墙安装时难以调整幕墙位置,需另外设置临时支撑^[11]。

如图 7 所示,设计一种卡槽式幕墙节点连接结构,采用钢牛腿+U形槽形式连接主体结构幕墙预埋件与幕墙后置金属骨架。该结构可实现幕墙现场全装配式安装,具有构造简单、连接方便且可靠等优点。同时,节点的卡槽式设计也可作为幕墙安装时的临时支撑,便于施工现场微调幕墙位置,可提高现场安装效率。

3.7 幕墙单元吊装挂接与幕墙板安装

在龙骨、避雷系统、岩棉保温系统、外墙照明系

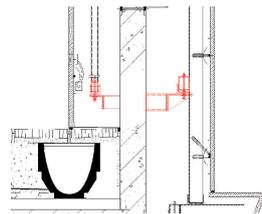


图 7 外伸牛腿+U形槽构造

Fig. 7 Structure of extended corbel + U-shaped groove

统管线安装通过隐蔽验收后,方可安装预制板。在幕墙单元与幕墙板正式安装前,应根据施工方案要求进行试验段实体样板安装,经过检验并验收合格后进行幕墙单元与幕墙板安装。

复杂异形幕墙结构^[12-14]中存在不同类型幕墙板或幕墙单元,应结合实际操作情况制订合理的施工流程。幕墙结构板件包括梳形幕墙单元、立面 GRC 板、吊顶板、内侧封口铝板、拦河内外侧板及拦河盖板等,如图 8 所示。安装流程如图 9 所示。因此,幕墙单元吊装挂接与幕墙板安装需预先安排、依次进行。

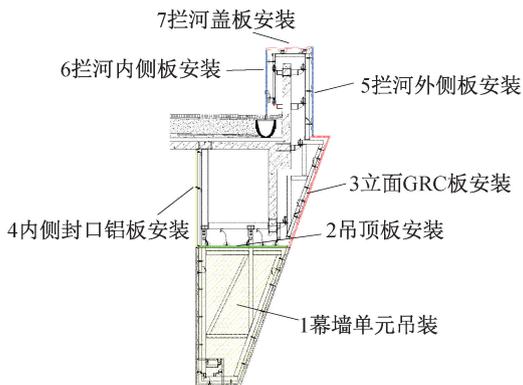


图 8 复杂异形幕墙结构各板件安装顺序

Fig. 8 Installation sequence of each plate for complex special-shaped curtain wall structure

总之,幕墙单元吊装挂接与幕墙板安装施工顺序需遵循先低层后高层、先立面后平面、先前的单元或板件安装不影响后续板件安装等原则。梳形幕墙单元组件在工厂加工并组装完成后,在现场采用汽车式起重机吊装,按顺序分层或分段吊装。施工过程中,先安装角部幕墙挂板,再依次自下而上进行其他挂板安装,安装过程中逐面逐层进行调整。单元件与龙骨通过不锈钢连接件进行连接,现场将单元件吊至安装位置后,吊篮上或登高车上工作人员手扶板块,缓慢将其移至固定处,放置在挂点槽内,通过水准仪、盒尺等将单元件调整至准确位置,将 GRC 板块固定后再松开吸盘机。

幕墙板与金属骨架相连时,应注意各连接位置

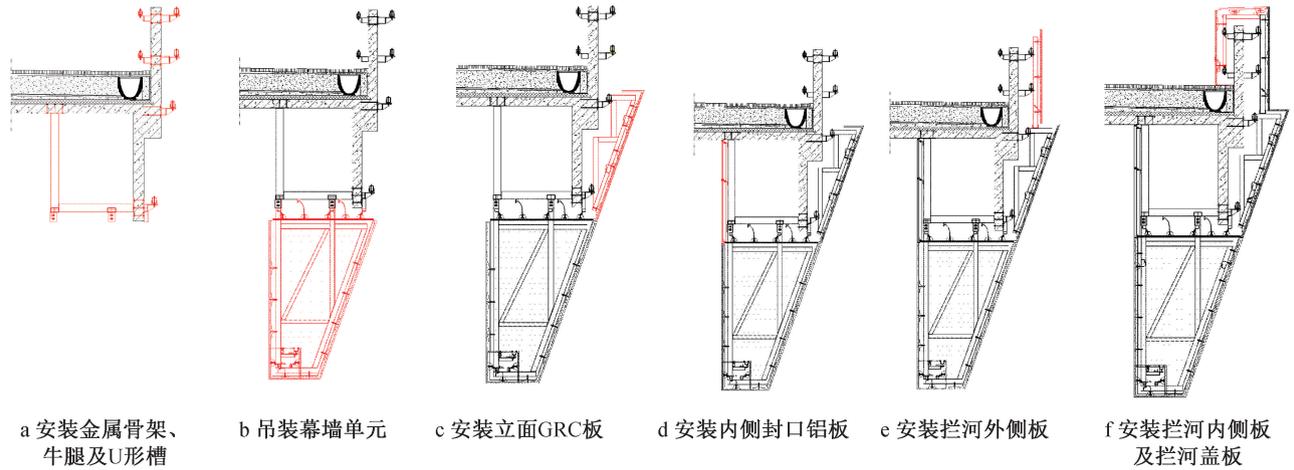


图9 复杂异形幕墙结构各组件安装流程

Fig. 9 Installation process of each component for complex shaped curtain wall structure

处可靠性,保证各节点均按要求形成稳定可靠连接。对于具有幕墙板防脱落设计要求的位置,如图10所示,需预先在地面完成幕墙板或幕墙单元防脱落装置安装,吊装后完成防脱落装置与金属骨架剩余部分安装。

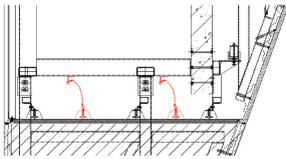


图10 幕墙板防脱落装置

Fig. 10 Anti-shedding device of curtain wall panel

3.8 幕墙板定位调整与板缝处理

在挂板四角安装螺栓调节件,在角钢横梁上固定构件调节件。利用三角钢螺栓孔巢及下螺丝调节件,调节外墙挂板水平位移,准确定位外墙挂板,保证后期同一水平方向外墙挂板间接缝宽度一致。挂板下部调节件通过螺丝调节件控制定位并进行轻微垂直偏差调整。经过重复测量及调节,使外墙挂板平整度和外墙垂直度等安装质量符合规范要求,完成墙板的调整就位。

根据板面刻痕槽接头形式,外挂墙板接缝宽度设定为10~15mm;密封材料厚度 $\geq 8\text{mm}$,且不宜小于缝宽的一半。

4 有限元分析

4.1 数值模型

为验证卡槽式幕墙节点的合理性与有效性,采用MIDAS Gen有限元分析软件,建立卡槽式GRC幕墙节点数值模型并进行分析^[15-16]。首先建立GRC幕墙板和背附骨架有限元模型,其中GRC板采用板单元模拟,背附骨架采用梁单元模拟,背附

骨架与主体结构连接采用刚接。

恒荷载仅包括结构自重,其中GRC幕墙自重取 0.4kN/m^2 ,钢结构容重取 78.5kN/m^3 。活荷载仅包括风荷载,其中基本风压取值为 0.5kN/m^2 ,地面粗糙度为B类,GRC幕墙顶标高为10.200m。

4.2 幕墙整体验算

4.2.1 应力

GRC幕墙及背附骨架应力如图11所示。由图11可知,GRC幕墙最大应力为 $1.1\text{MPa} < 7\text{MPa}$ (抗弯比例极限强度),背附骨架最大应力为 $53\text{MPa} < 215\text{MPa}$ (强度设计值),因此GRC幕墙及背附骨架应力满足要求。

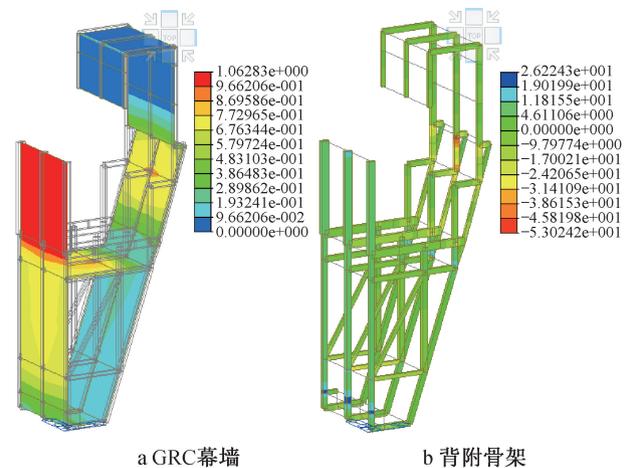


图11 应力模拟结果(单位:MPa)

Fig. 11 Simulation results of stress(unit: MPa)

4.2.2 挠度

GRC幕墙结构变形如图12所示。由图12可知,GRC幕墙结构挠度最大值为 $0.3\text{mm} < 248/240 = 1.03\text{mm}$,因此GRC幕墙结构挠度满足要求。

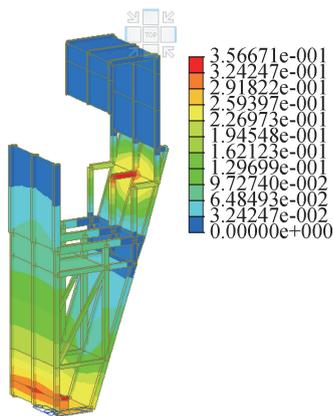


图 12 GRC 幕墙结构变形云图(单位:mm)

Fig. 12 Deformation of GRC curtain wall structure (unit:mm)

4.2.3 应力比

背附骨架应力比如图 13 所示。由图 13 可知,背附骨架最大应力比为 $0.28 < 1$,因此背附骨架稳定性满足要求。

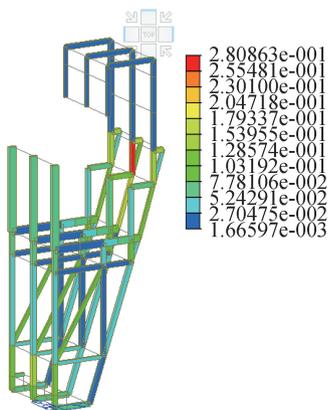


图 13 背附骨架应力比云图

Fig. 13 Stress ratio of carrying skeleton

4.3 连接节点验算

4.3.1 预埋锚栓计算

GRC 幕墙在荷载作用下预埋锚栓受力设计值如图 14 所示。由图 14 可知,预埋锚栓最大反力 $N_x = 6.19\text{kN}$, $N_z = 1.6\text{kN}$ 。根据受力设计值,对锚栓进行验算,求得各螺栓合力强度安全系数为 0.083 ,满足设计要求。

4.3.2 牛腿计算

牛腿受力设计值如图 15 所示。由图 15 可知,牛腿最大反力 $N_x = 10\text{kN}$, $N_z = 27\text{kN}$ 。将最大反力设计值施加于模型中并提取强度计算结果如图 16 所示。由图 16 可知,牛腿及 U 形槽应力最大值为 $72\text{MPa} < 215\text{MPa}$,满足要求。

5 结语

宁波国际会议中心室外廊桥采用 GRC 幕墙结

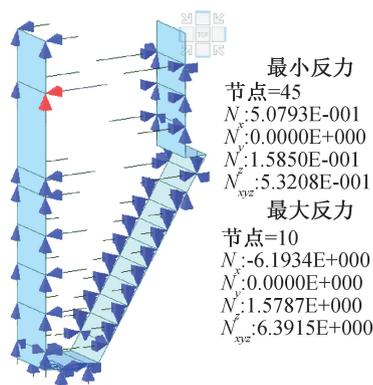


图 14 预埋锚栓最大受力设计值(单位:kN)

Fig. 14 The maximum force design value of embedded anchor bolt (unit:kN)

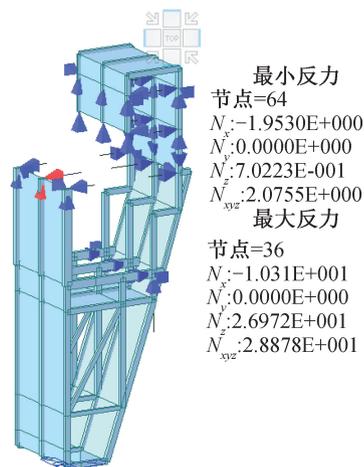


图 15 牛腿最大受力设计值(单位:kN)

Fig. 15 The maximum force design value of corbel (unit:kN)

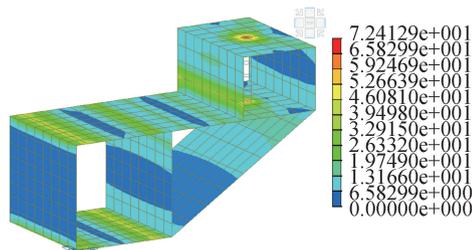


图 16 牛腿及 U 形槽应力云图(单位:MPa)

Fig. 16 Stress of corbel and U-shaped groove (unit:MPa)

构,为保证该复杂异形 GRC 幕墙结构高效、可靠安装,采用全装配式施工工艺、BIM 模型深化、外伸牛腿+U 形槽连接形式、幕墙组件安装顺序优化等关键技术,确保了施工质量,提高了施工效率。同时,为解决传统 GRC 幕墙节点施工工艺繁琐、无法完全实现现场装配式、施工质量难控制等难题,提出了一种异形 GRC 幕墙结构卡槽式连接节点设计,该节

点形式包含幕墙板背附骨架结构和外伸牛腿+U形槽连接节点,具有构造形式简单、可实现 GRC 幕墙全装配式安装等优点。数值模拟验算结果表明,提出的卡槽式 GRC 幕墙节点具有足够连接强度。

参考文献:

- [1] 白正仙,刘育民,陈鸣飞,等. 高层建筑幕墙节点力学性能比较分析[J]. 钢结构, 2012,27(9):16-19.
BAI Z X, LIU Y M, CHEN M F, et al. Comparative analysis of mechanical property of high-rise building curtain wall joint[J]. Steel construction, 2012,27(9):16-19.
- [2] 唐瑜,宫献伟,张如意,等. 塞尔维亚中国文化中心 UHPC 双层幕墙设计施工技术研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1):2974-2979.
TANG Y, GONG X W, ZHANG R Y, et al. Research on design and construction technology of UHPC double-layer curtain wall in Serbia China Cultural Center Building[J]. Building structure, 2022, 52(S1):2974-2979.
- [3] 郭彦林,窦超,刘学武,等. 中央电视台新主楼菱形幕墙单元变形性能研究[J]. 施工技术, 2006(12):99-102.
GUO Y L, DOU C, LIU X W, et al. Study on the deformation performance of diamond curtain wall unit in CCTV new main building[J]. Construction technology, 2006(12):99-102.
- [4] 贾宝莹,李云,李岩宾. BIM 技术在某超高层建筑中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(5):65-67,135.
JIA B Y, LI Y, LI Y B. Application of BIM technology in a super high-rise building [J]. Construction technology, 2023, 52(5):65-67,135.
- [5] 岑锦秀,唐相文,熊宇坤,等. 大型 GRC 幕墙板单元窗式整体安装施工技术[J]. 施工技术, 2018, 47(22):89-91.
CEN J X, TANG X W, XIONG Y K, et al. Construction technology of large GRC curtain wall panel [J]. Construction technology, 2018, 47(22):89-91.
- [6] 刘加华. 预制装配式大面积非线性 GRC 幕墙及屋面板安装技术[J]. 施工技术, 2017, 46(3):26-29.
LIU J H. Installation technology of precast large size nonlinear GRC curtain wall and roof board [J]. Construction technology, 2017, 46(3):26-29.
- [7] 韦林,蒋伟. 风荷载作用下点式玻璃幕墙的受力分析[J]. 建筑施工, 2006(5):401-403.
WEI L, JIANG W. Mechanical analysis of wind load effect on point-typed glass-curtain wall [J]. Building construction, 2006(5):401-403.
- [8] 袁瑞青. 外立面悬挂装饰清水砖幕墙施工技术[J]. 施工技术, 2017, 46(15):54-56.
- YUAN R Q. Construction of facade hanging decorative fair-faced brick curtain wall [J]. Construction technology, 2017, 46(15):54-56.
- [9] 乔羽,韩汝军,聂志峰,等. 半刚性连接幕墙龙骨框架的力学性能分析[J]. 钢结构, 2018, 33(1):69-72.
QIAO Y, HAN R J, NIE Z F, et al. Analysis of mechanical properties of semi-rigidly connected curtain wall keel frame [J]. Steel construction, 2018, 33(1):69-72.
- [10] 张建军,宋海罡,张晓东,等. 背栓式石材幕墙支承点处受力的有限元分析[J]. 施工技术, 2007, 36(S2):328-330.
ZHANG J J, SONG H G, ZHANG X D, et al. Finite element analysis on back-bolt stone curtain wall stresses of point-supporting [J]. Construction technology, 2007, 36(S2):328-330.
- [11] 梁锐. 某高层建筑蜂窝铝板幕墙安装技术及有限元分析[J]. 钢结构, 2017, 32(9):106-109.
LIANG R. Installation technique and finite element analysis of cellular aluminum curtain wall for a high-rise building [J]. Steel construction, 2017, 32(9):106-109.
- [12] 邓博. 不规则异形铜板幕墙施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(14):31-33.
DENG B. Construction technology of irregular shaped copper plate curtain wall [J]. Construction technology, 2020, 49(14):31-33.
- [13] 唐安,廖勇. 蝴蝶形建筑空间异形幕墙施工技术[J]. 建筑施工, 2021, 43(3):396-399.
TANG A, LIAO Y. Construction technology of special shaped curtain wall in butterfly shaped building space [J]. Building construction, 2021, 43(3):396-399.
- [14] 王晋,龙叶天,尹凌川,等. 大型体育馆幕墙系统安装技术[J]. 施工技术, 2021, 50(6):58-60.
WANG J, LONG Y T, YIN L C, et al. Installation technology of curtain wall system of large stadium [J]. Construction technology, 2021, 50(6):58-60.
- [15] 彭斌. 大型展览馆主体结构与玻璃幕墙相互作用的仿真分析[J]. 钢结构, 2008, 23(11):5-9,12.
PENG B. Simulation analysis for the interactions between main structure and glass curtain wall of large-scale exhibition buildings [J]. Steel construction, 2008, 23(11):5-9,12.
- [16] 马臣杰,钟玉柏,许璇. 幕墙预埋件承载力非线性有限元分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(2):94-96,88.
MA C J, ZHONG Y B, XU X. Nonlinear finite element analysis of bearing capacity of embedded part in curtain wall [J]. Building Structure, 2011, 41(2):94-96,88.