

模块化 GFRC 幕墙施工过程承载力及变形研究

蒋志军^{1,2} 黄立暖^{1,2} 蒋启诚^{1,2} 邓景富^{1,2} 丁石磊^{1,2}

1.中国建筑第八工程局有限公司 上海 200122

2.中建八局华南建设有限公司 广东 广州 510663

【摘要】：模块化 GFRC 幕墙在施工阶段的动态力学行为是保障装配式建筑安全的核心问题。本文以广州医科大学横琴医院 GFRC 幕墙工程为背景，聚焦脱模、运输、吊装及台风等多工况耦合作用，建立精细化三维有限元模型，系统分析构件的应力分布与变形特征。研究突破传统静态分析框架，量化边界突变、动态荷载及风-结构相互作用对幕墙的影响，揭示加强肋变截面处为关键薄弱区域。通过构造优化与动态边界模拟，提出模块化幕墙施工控制策略，为装配式建筑的高精度施工与风险防控提供实践依据。

【关键词】：模块化 GFRC 幕墙；施工承载力；变形控制；有限元模拟；装配式建筑安全

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.060

引言

近年来，建筑工业化进程加速，模块化施工技术凭借高效组装与绿色环保的优势，逐渐成为大型公共建筑的主流选择。以玻璃纤维增强混凝土（GFRC）为代表的轻质高强材料，因其出色的造型能力与耐久性能，被广泛应用于幕墙系统。然而，模块化 GFRC 幕墙在施工中需经历脱模、转运、吊装及台风等多重复杂工况，其承载能力与变形特征直接影响工程安全与进度。尤其在构件装配过程中，局部应力集中与协同受力问题亟待深入探究。

当前，针对 GFRC 的研究多集中于材料性能或单一静态荷载分析，对施工全周期的动态力学响应关注不足。例如，吊装时边界突变引发的应力重构、运输振动对构件的累积损伤，以及台风与结构耦合作用下的风致效应，尚未形成系统化评估方法。此外，既有模型常简化遮阳板、加强肋等细节构造，难以真实反映复杂几何对结构行为的影响，导致理论成果与实际工程需求存在脱节。

本文以广州医科大学附属第一医院横琴医院 GFRC 幕墙为案例，聚焦施工全流程关键节点，通过精细化有限元模型，

模拟脱模、运输、吊装、台风及正常使用等工况下的结构响应。研究结合材料非线性与边界动态特性，揭示应力分布规律与变形机制，并依据规范验证安全性，提出构造优化策略。全文从工程背景出发，依次阐述模型构建方法、多工况分析结果及工程应用价值，为模块化幕墙的标准化设计与智能施工提供参考。

1 工程概况

广州医科大学附属第一医院横琴医院位于广东省珠海市横琴新区，项目总建筑面积 191594.85 m²，规划总床位 500 床，日门急诊量 2700 人次。横琴医院聚焦粤港澳大湾区战略和行业发展需求，建设高水平的医疗服务和医学科技创新平台，医院将按照高水平三级甲等医院标准建设成为集医疗、保健、科研、教学于一体并与国际接轨的综合性公立医院，是服务大横琴、辐射珠港澳的中心医院，为广东地区，澳门，珠海和香港健康和可持续发展的重要支撑。项目外立面采用 GFRC 装配式系统组成，整个立面系统包含对应的十种不同颜色 10 个 GFRC 模块在不同方位的立面上均有精巧的微妙变形，幕墙立面系统如图 1 所示。

作者简介：

蒋志军（1991 年 07 月-），男，学士，主要从事建筑施工技术管理。

黄立暖（1989 年 2 月-），男，学士，主要从事建筑施工生产管理。

蒋启诚（1994 年 05 月-），男，学士，主要从事建筑施工技术管理。

邓景富（1988 年 10 月-），男，学士，主要从事建筑施工生产管理。

丁石磊（1987 年 04 月-），男，学士，主要从事建筑施工质量管理。

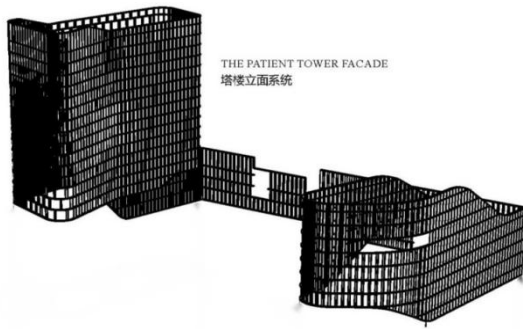


图1 立面系统

GFRC 装配式标准模块尺寸为 2.1m(宽)X3.9m, 模块包括玻璃窗, 垂直遮阳板和横向遮阳板, 共计 2648 块, 最大单件构件重量达 5.6t。

2 有限元模型

2.1 模型建立及单元选取

采用有限元软件 ABAQUS/Standard2020 对装配式 GRC 墙板进行有限元模拟。有限元模型采用分离式建模, 按照墙体实际尺寸 1:1 进行建模, 对模型进行一定简化, 不考虑未直接受力的 20mm 厚 GRC 板。GRC 和混凝土选用 8 节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)。钢筋选用三维桁架线性单元(T3D2), 不考虑钢筋与混凝土之间的滑移, 将钢筋通过 Embedded 方式嵌入混凝土。

2.2 材料参数

墙体混凝土强度等级为 C40, 轴心抗压强度标准值 $f_{ck}=26.8\text{MPa}$, 轴心抗拉强度标准值 $f_{tk}=2.39\text{MPa}$, 密度 2400kg/m^3 。GRC 各项力学性能指标不低于 C40 混凝土, 采用与 C40 混凝土相同材料参数进行计算。混凝土材料模型采用 ABAQUS 提供的混凝土损伤塑性模型, 该模型通过损伤因子描述材料非线性阶段的刚度退化程度。应力-应变曲线采用《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)附表 C.2 推荐公式进行计算。对于单轴受压, $\sigma \leq 1/3f_{c,r}$ 时取为线弹性, 其对应的割线模量作为材料的初始弹性模量; 对于单轴受拉, $\sigma \leq f_{t,r}$ 时取为线弹性。

钢筋强度等级为 HRB400, 屈服强度标准值 $f_{yk}=400\text{MPa}$, 密度 7850kg/m^3 。钢筋材料模型采用双折线模型。

2.3 网格划分

由于几何模型形状不规则, 无法直接划分网格, 需对模型进行切割再划分网格。模型网格均采用结构化划分方式, 试算后取全局网格尺寸为 50mm。

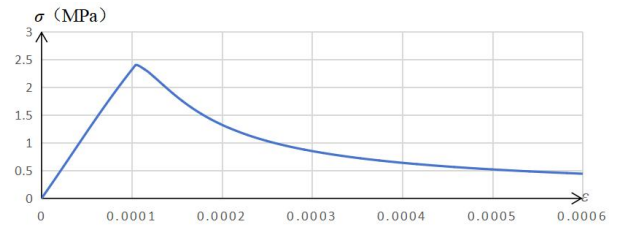


图2 混凝土单轴受拉应力-应变曲线

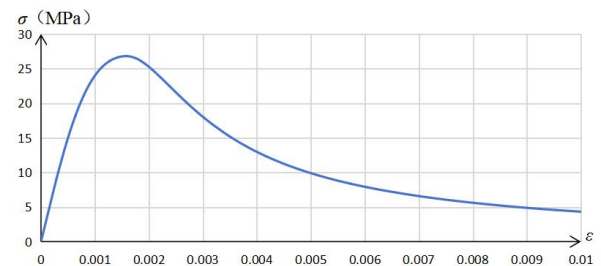


图3 混凝土单轴受压应力-应变曲线

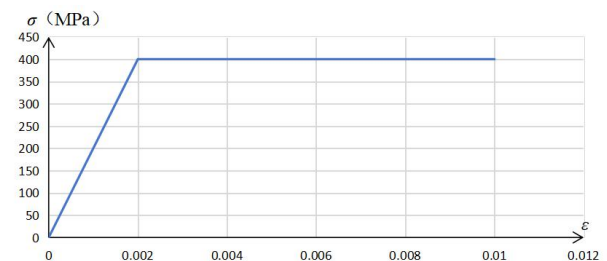


图4 钢筋应力-应变曲线

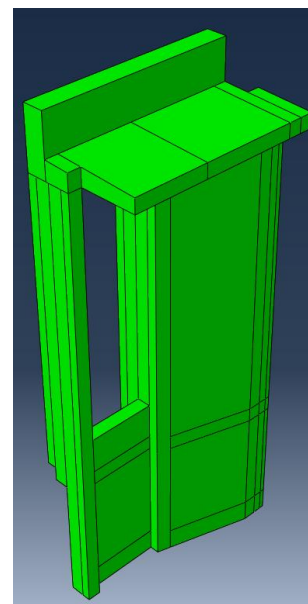


图5 结构几何模型

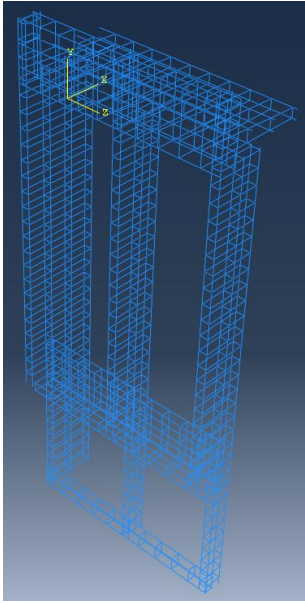


图 6 钢筋几何模型

3 有限元分析

3.1 脱模验算

脱模工况下，混凝土强度达到标准值的 80%。（轴心抗拉强度标准值 1.91MPa，轴心抗压强度标准值 21.4MPa）；

荷载：1.2 倍重力荷载+1.5KN/m² 脱模吸附力；

边界条件：等效为吊点处铰接，对整个墙体施加 1.2 倍重力加速度，外表面施加 1.5KN/m² 脱模吸附力。

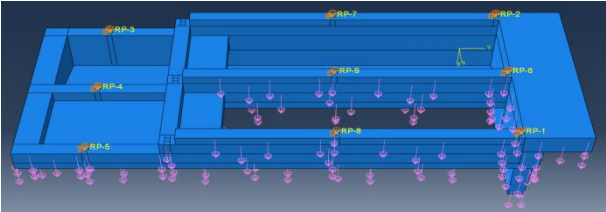


图 7 有限元模型边界条件

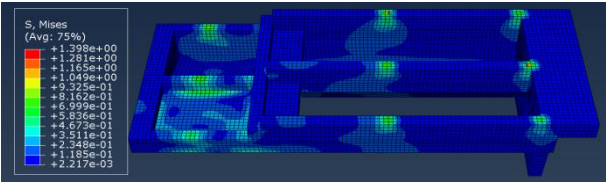


图 8 混凝土等效应力云图

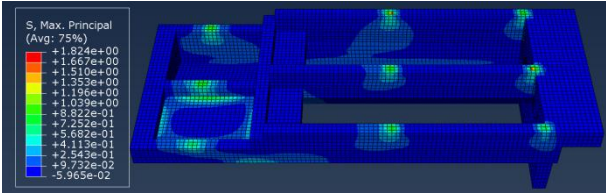


图 9 混凝土第一主应力图

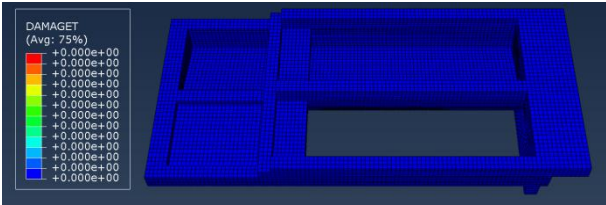


图 10 混凝土拉伸损伤图

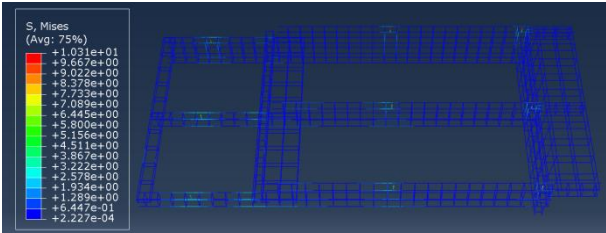


图 11 钢筋等效应力云图

由图 7~11 可知，应力集中在构件吊点附近和加强肋变截面处，应力最大值出现在上部中间吊点处，混凝土第一主应力最大值为 1.82Mpa，小于混凝土抗拉强度标准值 1.91Mpa。整个墙体在脱模过程中处于弹性阶段，验算通过。

3.2 运输过程验算

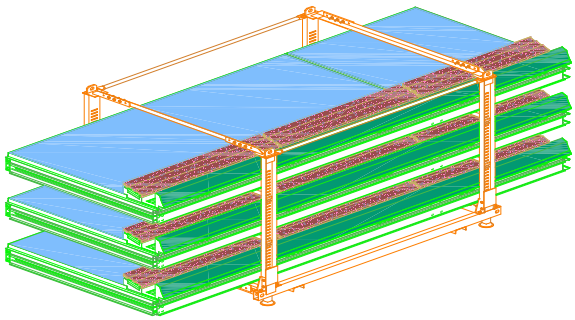


图 12 墙体转运架示意图

荷载：（1）1.5 倍重力荷载；（2）货车车速 80km/h，转弯半径 15m，转弯引起向心加速 1.48m/s²；

边界条件：由运输方案可知，构件的边界条件可等效为：限制墙体底部与货架接触区域的平动自由度，限制墙体侧面与货架接触区域的侧向平动自由度，接触区域宽度均为 50mm；

对整个墙体施加 1.5 倍竖向重力加速度和 1.48m/s² 侧向离心加速度。

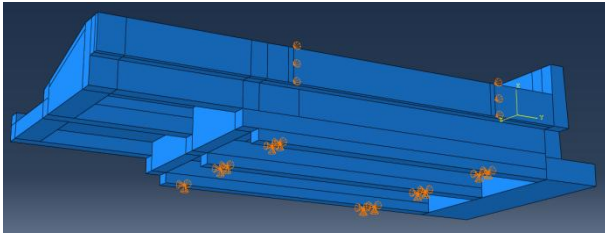


图 13 有限元模型边界条件

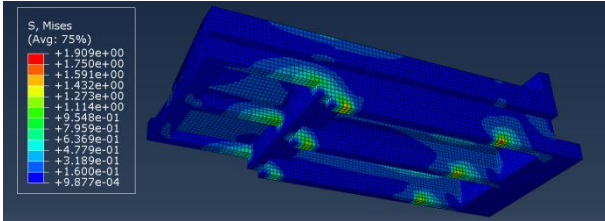


图 14 混凝土等效应力云图

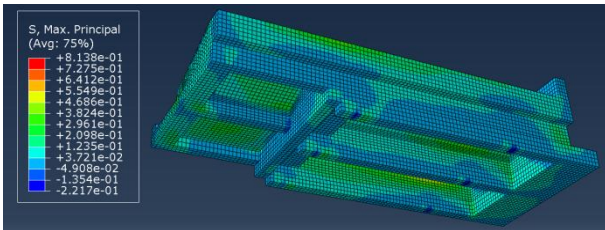


图 15 混凝土第一主应力云图

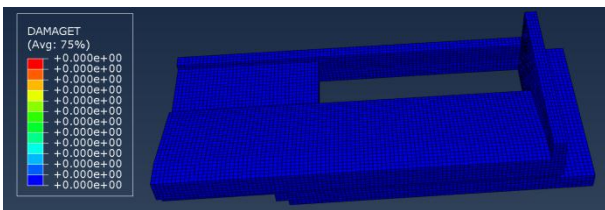


图 16 混凝土拉伸损伤图

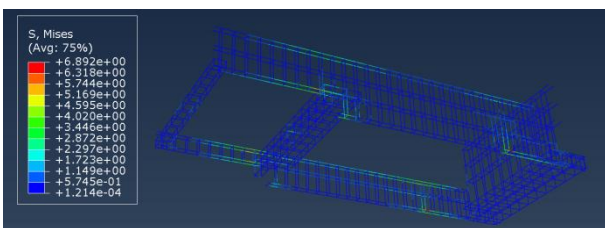


图 17 钢筋等效应力云图

通过图 13~17 可以看到，墙体与货架的接触区域与加强肋变截面处应力较大，混凝土第一主应力最大值为 0.813MPa，小于混凝土抗拉强度标准值 2.39MPa。墙体在运输过程中处于安全状态，验算通过。

3.3 吊装验算

荷载：1.5 倍重力加速度。

边界条件：起吊离开地面的瞬间，底板只有一条线与地面接触，此时为最危险时刻，构件边界条件可等效为：限制墙体顶部吊点区域的平动自由度，限制墙体底部内侧边缘的平动自由度，施加 1.5 倍重力加速度。

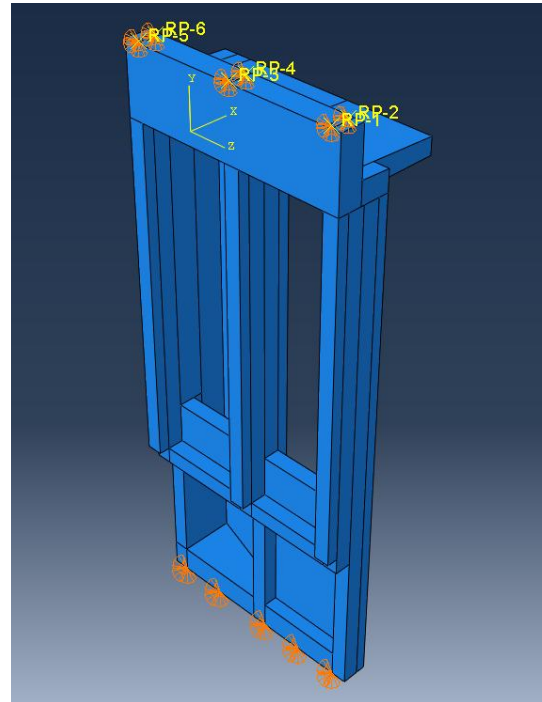


图 18 有限元模型边界条件图

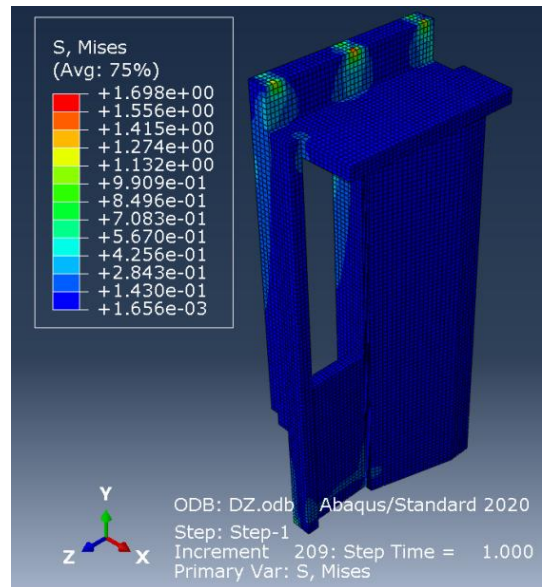


图 19 混凝土等效应力云图

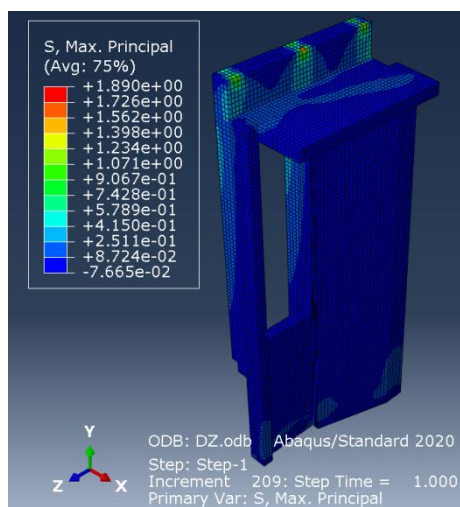


图 20 混凝土第一主应力云图

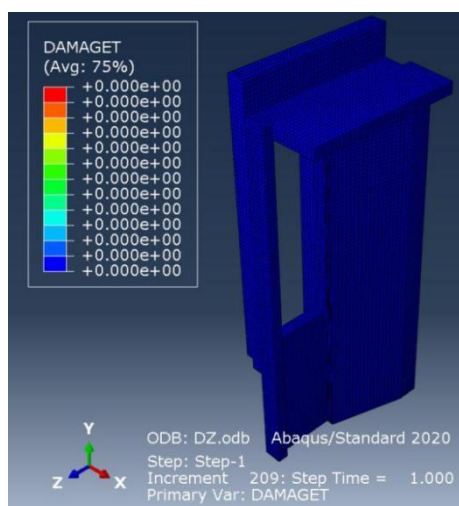


图 21 混凝土拉伸损伤图

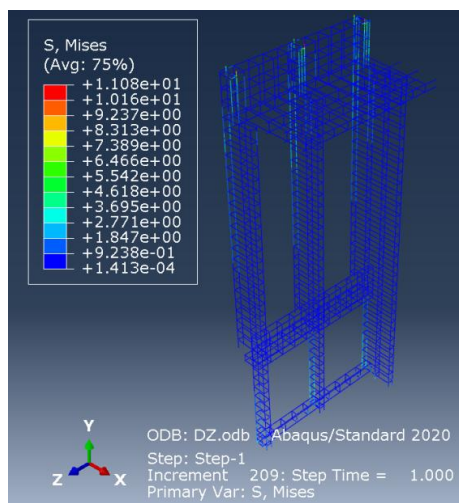


图 22 钢筋等效应力云图

通过图 19~22 可知, 墙体吊点附近和底部内侧应力较大, 应力最大值出现在中间外侧吊点处, 混凝土第一主应力最大值 1.89MPa, 小于抗拉强度标准值 2.39MPa。由图 29 可知, 钢筋等效应力最大值 11.08MPa, 小于钢筋屈服强度标准值 400MPa。整个墙体在起吊瞬间未发生破坏, 验算通过。

3.4 台风组合工况下构件承载力验算

台风工况下,采用设计值进行计算,混凝土抗拉强度设计值 1.71MPa,混凝土抗压强度设计值 19.1MPa,钢筋屈服强度设计值 360MPa。

珠海为台风多发地区, 17 级台风, 对应的最大风速 61.2m/s , 最大风压 $W_0=61.2\times 61.2/1600=2.34\text{kN/m}^2$, 地面粗糙度类别 A 类, 结构高度 80m , 阵风系数为 1.4675 , 风压高度变化系数为 2.115 , 风载体型系数为 1.6 , 由此可得风压标准值 $W_k=2.34\times 1.4675\times 2.115\times 1.6=11.62\text{kN/m}^2$ 。

荷载: $1.3 \times G_k + 1.5 \times W_k = 0 + 1.5 \times 11.62 = 17.43 \text{ kN/m}^2$ 。(墙体自重通过钢垫片传递到下部楼面)。

边界条件: 构件四个安装点按铰接考虑, 限制四个安装点区域的平动自由度。窗户承受的荷载施加在竖向加强肋的窗户安装区域, 下部玻璃承受的荷载施加在水平加强肋的玻璃安装点。

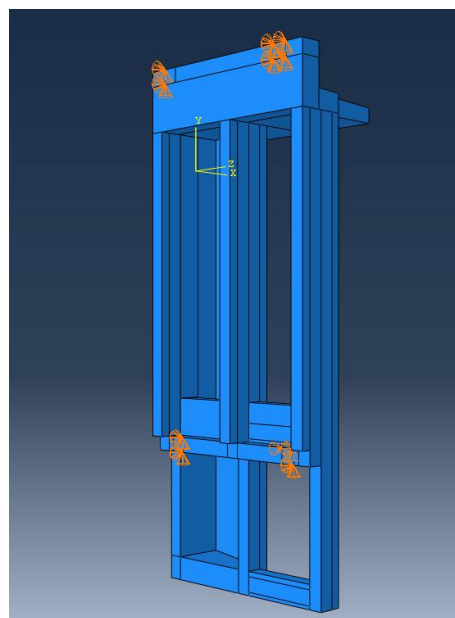


图 23 有限元模型边界条件

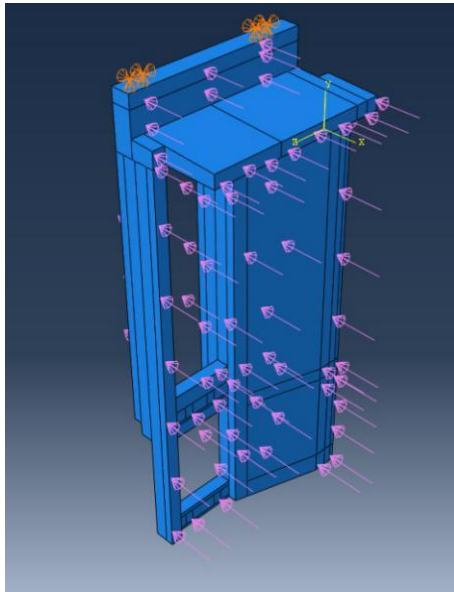


图 24 有限元模型边界条件

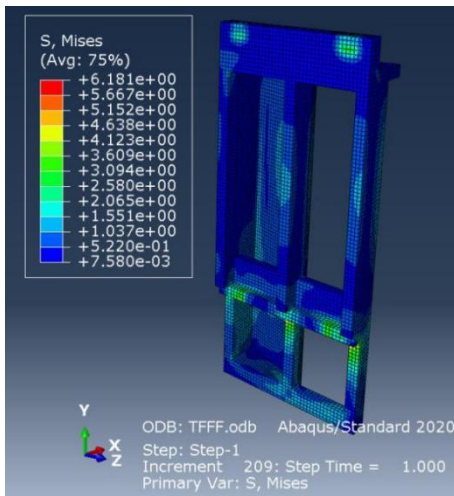


图 25 混凝土等效应力云图

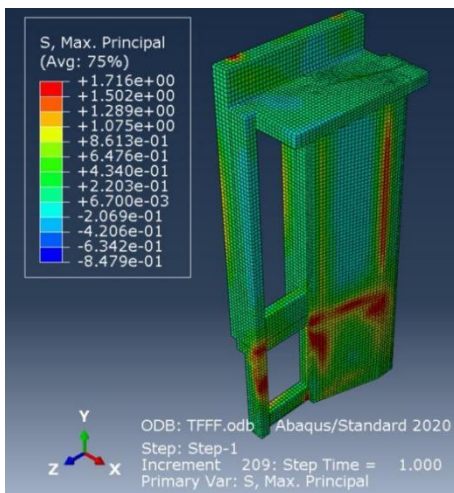


图 26 混凝土第一主应力云图

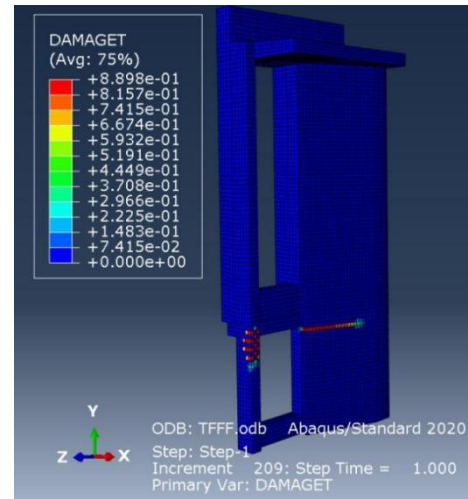


图 27 混凝土拉伸损伤图

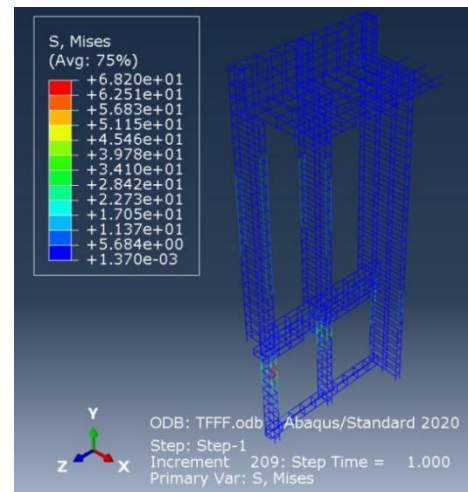


图 28 钢筋等效应力云图

由图 23~28 可知,墙体安装点附近和加强肋变截面处应力很大,混凝土等效应力最大值出现在左侧加强肋变截面处内侧,最大值为 6.181MPa,小于混凝土抗压强度设计值 19.1MPa;混凝土第一主应力最大值出现在左侧和中间加强肋变截面处外侧,最大值为 1.716MPa,大于混凝土抗拉强度设计值 1.71MPa。图 36 为混凝土拉伸损伤图,根据拉伸损伤分布可以较为直观地观察墙体混凝土受拉破坏情况,由该图可知,拉伸损伤集中出现在左侧及中间加强肋变截面处,损伤因子最大值为 0.889。由图 37 可知,钢筋等效应力最大值出现在左侧加强肋变截面处,最大值为 68.2MPa,小于钢筋屈服强度设计值 360MPa。台风工况下,墙体混凝土局部开裂,钢筋应力为 68.2MPa,未屈服,处于弹性状态,满足安全要求。

3.5 正常使用极限状态验算

荷载 : $1.0 \times G_k + 1 \times W_k + 0.7 \times Q_k = 0 + 4.22 + 0.42 = 4.64 \text{ kN/m}^2$ 。

边界条件: 构件四个安装点按铰接考虑, 限制四个安装点区域的平动自由度。窗户承受的荷载施加在竖向加强肋的窗户安装区域, 下部玻璃承受的荷载施加在水平加强肋的玻璃安装点。

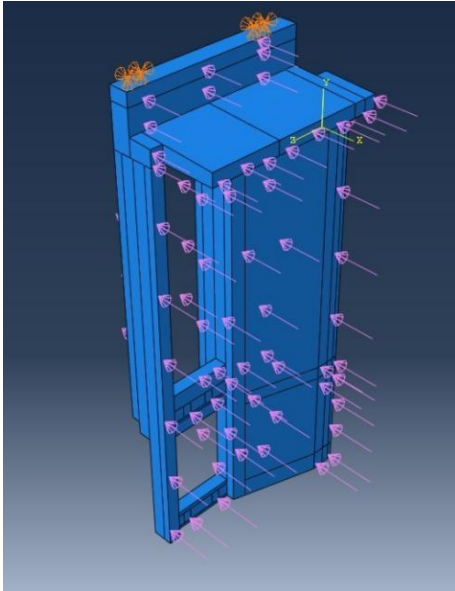


图 29 有限元模型边界条件

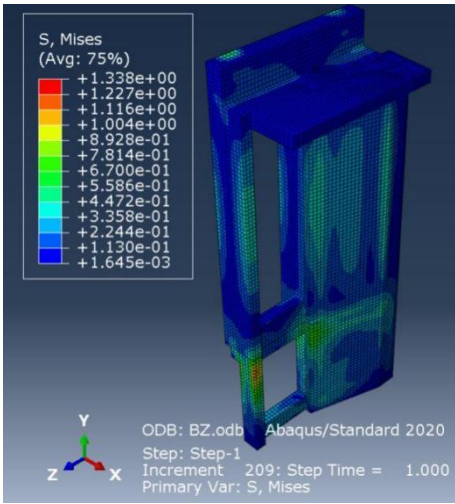


图 30 混凝土等效应力云图

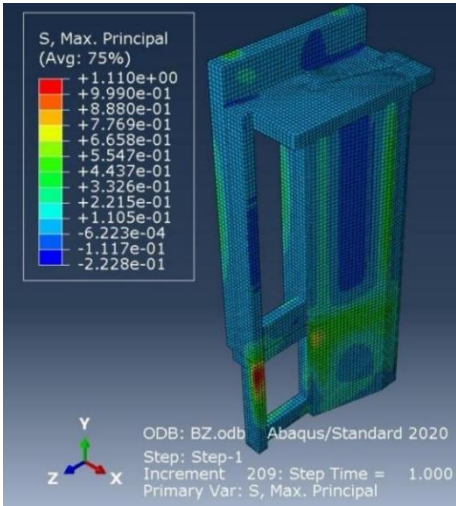


图 31 混凝土第一主应力云图

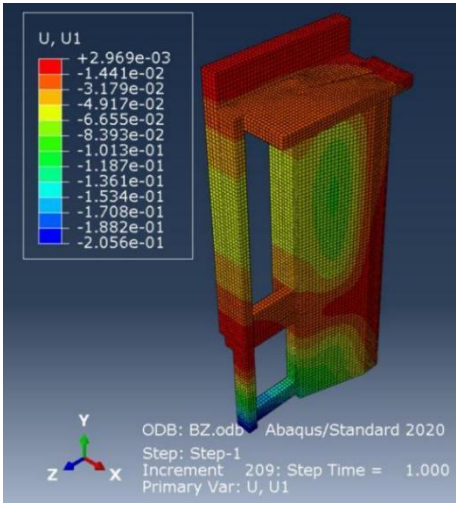


图 32 X 方向位移图

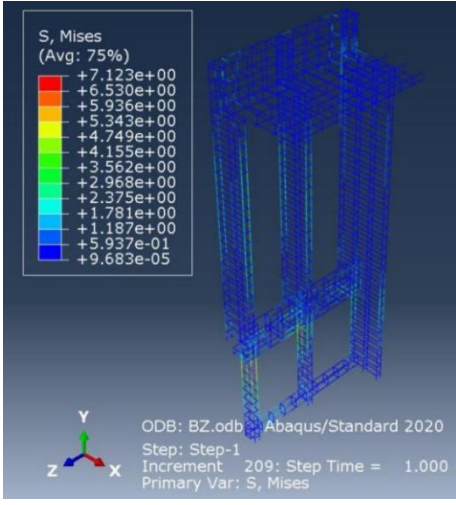


图 33 钢筋等效应力云图

由图 29-33 可知,墙体应力集中区域为加强肋上半部分跨中和变截面处,第一主应力最大值为 1.11MPa,小于混凝土抗拉强度标准值 2.39MPa。由图 44 可知,左侧加强肋下端位移最大,最大位移值为 0.205mm,小于规范限值 $10/200=13.5\text{mm}$ 。通过图 45 可知,钢筋最大应力出现在左侧加强肋变截面处,最大值为 7.12MPa,通过《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)式 7.1.2 可求得该处裂缝宽度为 0.00173mm,小于规范限值 0.3mm。正常使用极限状态下,墙体挠度及裂缝均满足规范要求,验算通过。

4 结论

通过对模块化 GFRC 幕墙施工过程承载力及变形研究和分析,可以获得下列结论:

(1) 模块化 GFRC 幕墙在施工全过程中的力学性能直接

影响装配式建筑安全。本研究通过精细化有限元模拟,分析了脱模、运输、吊装及台风等复杂工况下的结构响应。结果表明:吊点与加强肋变截面处存在应力集中,但混凝土最大拉应力(1.89MPa)与钢筋应力(68.2MPa)均未超限;台风工况局部损伤因子达 0.889,但未触发连续破坏;正常使用阶段位移(0.205mm)及裂缝宽度(0.00173mm)满足规范要求,验证了设计可靠性。

(2) 研究提出加强肋截面优化与动态边界控制策略,如几何参数调整或局部补强,以缓解应力集中。同时,动态荷载模拟方法为类似工程提供技术参考。未来需结合环境因素研究 GFRC 长期性能,并引入智能监测技术实现施工实时预警。本文成果为模块化幕墙的标准化设计与高精度施工提供理论支撑,推动装配式建筑向智能化、可持续发展。

参考文献:

- [1] 郭彬荣,关永莹,刘生强.应用于大面积轻质凸型 GFRC 挂板单元模块化的新工艺[J].施工技术,2020,49(S1):951-954.
- [2] 张天文.GFRC 建筑幕墙在综合场馆工程中的应用[J].天津建设科技,2017,27(04):29-30.
- [3] 宋大涛.GFRC 在现代建筑中的发展与应用研究[D].大连理工大学,2013.
- [4] 陈惠苏,孙伟,张亚梅.高掺量粉煤灰对 GFRC 改性的可行性研究[J].工业建筑,2000,(04):54-57.DOI:10.13204.