引用格式：彭子祥，张延欣，黄颖健，等. 装配式混凝土剪力墙云端建造工厂附墙系统性能研究[J]. 工业建筑，2026，56(2)：150-157. PENG Zixiang，ZHANG Yanxin，HUANG Yingjian，et al. Mechanical Properties of Wall-Attached Support Systems in Cloud-Based Prefabricated Concrete Shear Wall Construction Factories[J]. Industrial Construction，2026，56(2)：150-157 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG25082204

装配式混凝土剪力墙云端建造工厂附墙系统性能研究*

彭子祥　张延欣　黄颖健　桂峥嵘　孙清臣　赵伟程

（中国建筑第四工程局有限公司，广州　510665）

摘　要　云端建造工厂是超高层建筑施工的一种工业化、智能化的新型模架平台系统，即造楼机平台。国内对于装配式剪力墙结构的造楼机平台附墙系统的研究相对缺失。通过1∶1足尺试验还原装配式剪力墙结构的云端工厂附墙系统承载力加载，并结合精细有限元分析对比研究，对此新型的附墙系统在1400 kN竖向荷载作用下的剪力裂缝发展、钢筋应变情况、附墙支座应力水平进行了分析。结果表明：附墙系统在1400 kN竖向荷载作用下具备充足的承载能力，此时裂缝最大宽度为0.27 mm；采用正常使用工况裂缝控制，附墙系统在1100 kN竖向荷载作用下，裂缝宽度小于0.2 mm。最终得到附墙系统竖向荷载设计值以1000 kN为宜的结论，并在中建映花悦府项目装配式剪力墙项目中进行了成果应用。

关键词　装配式剪力墙；云端建造工厂；高承载力附墙系统；足尺试验；精细有限元分析

Mechanical Properties of Wall-Attached Support Systems in Cloud-Based Prefabricated Concrete Shear Wall Construction Factories

PENG Zixiang　ZHANG Yanxin　HUANG Yingjian　GUI Zhengrong　SUN Qingchen　ZHAO Weicheng

(*China Construction Fourth Engineering Division Co.*, *Ltd.*, *Guangzhou* 510665, *China*)

Abstract: The cloud-based construction factory is an industrialized and intelligent formwork platform system designed for super high-rise building construction, also referred to as a building construction machine platform. However, research on the wall-attached support systems of such platforms, specifically for prefabricated shear wall structures, remains relatively limited in China. To address this gap, this study conducted a full-scale (1∶1) test to simulate the loading conditions of the wall-attached support system in a cloud-based prefabricated shear wall construction factory. The test results were compared with refined finite element analysis to investigate the development of shear cracks, reinforcement strain, and stress levels in the wall-attached supports under a vertical load of 1400 kN. The results demonstrated that the system exhibited adequate bearing capacity under this vertical load, with a maximum crack width of 0.27 mm. Under normal service conditions with crack control measures implemented, the crack width remained below 0.2 mm at a vertical load of 1100 kN. Therefore, it was concluded that the design vertical load for the wall-attached support system should be set at 1000 kN. These findings have been successfully applied to the prefabricated shear wall project of China State Construction's Yinghua Yuefu Development.

Keywords: prefabricated shear wall; cloud-based construction factory; high-bearing-capacity wall-attached support system; full-scale testing; refined finite element analysis

*“十四五”国家重点研发计划(2022YFC3801400)。

第一作者：彭子祥，硕士，工程师，主要从事智能建造研究。

电子信箱：799503622@qq.com

收稿日期：2025-08-22

0　引　言

云端建造工厂是造楼机的一种形态，针对超高层建筑施工的一种工业化、智能化的模架平台系统[1]，其设计理念来源于广州西塔的低位顶升系统。云端建造工厂的附墙系统是整个平台的基础，承担了所有的荷载传递，是至关重要的组成部件。初期的低位顶模系统相对于传统模架系统，表现出了顶升速度快、施工效率高、作业空间安全以及工程质量控制优越[2-3]等特点，但低位顶模的附墙系统，需要在墙身预留大尺寸孔洞或埋件，以承载支座处的承载力。随着时代的发展，造楼机附墙系统迭代升级，出现了微凸支点顶升附墙系统，先后在武汉中心工程项目[4]、华润总部大厦[5]成功应用，微凸支点附墙系统具有布置更加灵活、承载力高、墙身破坏少、节约钢材等优点。通用型多支点轻量化附墙系统，在原有附墙系统的基础上进行了革新，实现了单点支撑小荷载、短行程、轻量化设计、标准化桁架设计[6]，提高了可周转性，可运用于墙身较薄的住宅建筑的造楼机[7]。国内对于现浇结构造楼机平台附墙系统的研究十分深入，其中包含对附墙支座及附着位置剪力墙精细有限元分析[8-9]，但国内对于装配式剪力墙结构的造楼机平台的力学研究相对较少，尤其是针对预制剪力墙附墙系统的相关试验研究。

本文在轻量化附墙系统的基础上优化改进，改进内容包括标准节、支座设计优化，减小了承力销与剪力墙间的力臂。开发了首款基于预制装配式剪力墙结构的云端建造工厂，针对其高承载力附墙系统，进行了 1∶1 足尺极限承载力试验研究其极限承载力，并对附墙系统进行精细有限元分析，为附墙系统的实际应用提供理论参考。

1　云端建造工厂及附墙系统简介

1.1　云端建造工厂

本文研究云端建造工厂依托中建映花悦府项目 D2 栋项目，该项目地上结构 33 层，结构总高度为 101.2 m，剪力墙采用全装配式密拼结构体系，装配率达 80.52%。

该云端建造工厂主要组成部分为附墙支撑系统、主体钢结构系统、围护结构系统，详见图 1、2，此外集成了智能桁车系统[10]。附墙支撑系统（图 2）作为整个施工平台的承载基础及竖向受力构件，云端工厂的所有荷载通过附墙埋件传递给剪力墙，同时也是云端工厂爬升的主要机构，实现施工平台随楼层施工的爬升工作；主体钢结构平台作为主要平面受力构件，与附墙支撑系统组合形成受力体系，承担平台所有施工荷载；集成的智能桁车系统具备预制墙板、楼板等构件的吊装能力，云端建造工厂针对装配式剪力墙结构补充的核心功能，同时集成部分机器人辅助施工作业。围护系统作为人员通道，提供安全防护，改善作业环境。

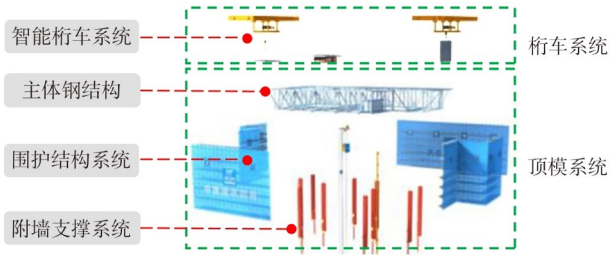


图 1　云端建造工厂组成系统示意

Fig. 1　Composition of the cloud-based construction factory

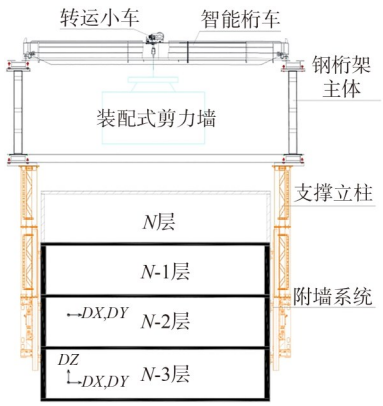


图 2　云端建造工厂组成立面示意

Fig. 2　Cloud-based construction factory elevation

1.2　附墙支撑系统

云端建造工厂附墙支撑系统，作为整个施工平台的承载基础及竖向受力构件，其组成部分如图 3 所示，包含附墙支座、标准节+附墙架、顶升导轨、液压油缸系统。

附墙支撑系统的核心传力部件为附墙支座。附墙支座（图 4）主要包括支座底板、锚杆孔、支撑耳板、摆挂件、滑动支撑、承力销[11]。其中承力销主要承担支撑架转爪传递的荷载，摆挂件主要是为了承受导轨传来的荷载，滑动支撑附着于顶升轨道上。

附墙支座的设计理念是以减小附墙支撑系统承担弯矩为目标，云端建造工厂采用类似门式刚架的设计理念，由钢结构主体承担绝大部分弯矩，附墙支座主要承担竖向荷载和水平荷载。此外通过减小承力销与剪力墙间的力臂来减小因竖向荷载及力臂

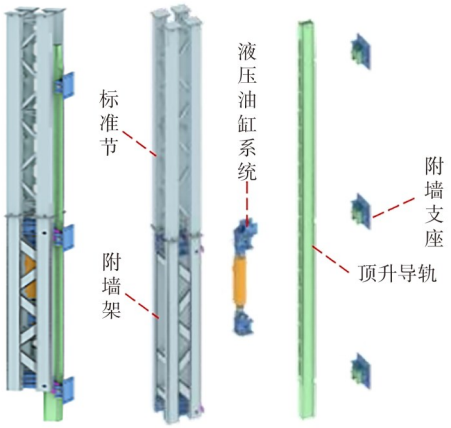
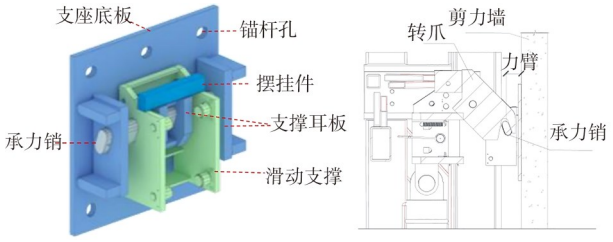


图 3 云端建造工厂附墙支撑系统

Fig. 3 Cloud-based construction factory wall-attached support system



(a) 三维示意　　(b) 侧视

图 4 附墙支座组成示意

Fig. 4 Composition of the wall-attached support

产生的弯矩。综合上述手段减少附墙支座的弯矩,给附墙支座的抗弯承载力预留更大的安全冗余。

云端建造工厂通过附墙支座(图5)固定于预制剪力墙上,预制剪力墙板上预留6个50 mm圆孔,整个附墙支座通过6颗10.9级φ42对拉锚杆固定在剪力墙上,锚杆设置30 mm厚钢垫块,可承担弯矩和竖向荷载。支座埋件采用可拆装的重复利用模式,提高了利用效率。

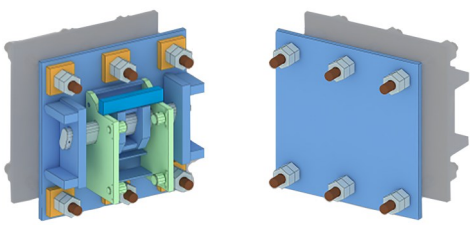


图 5 附墙支座安装示意

Fig. 5 Schematic diagrams of wall-attached support installation

1.3 装配式剪力墙连接节点

试验装配式剪力墙连接形式竖向为钢锚环灌浆连接节点[12],水平缝采用钢筋套筒灌浆连接节点。钢锚环连接节点如图6所示。

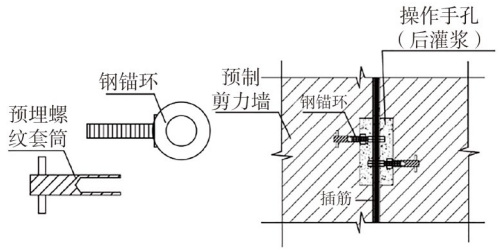


图 6 钢锚环灌浆连接节点

Fig. 6 Grouted connection joint with steel anchor ring

2 试验设计及方案

2.1 试验设计内容

试验设计为追求1:1还原附墙支撑系统轴向受力工况,采用足尺试件设计。附墙支撑系统选择附墙架、附墙制作、顶升导轨等主要受力部件,其中附墙支座2个,模拟云端建造工厂实际工作状态的受力情况。预制剪力墙选择2层局部剪力墙作为试验承载墙体,剪力墙厚度为200 mm,剪力墙底部设置300 mm厚的混凝土基座,层高为3.0 mm,试件总高度6.3 m;剪力墙总宽度为3.0 m,两侧各带1.0 m翼墙;附墙支座设置高度与实际工况一致,首个附墙支座距离楼层底部2.24 m,两个附墙支座间高度差为2.9 m,附墙支座距离左侧墙边线1.435 m。试验混凝土试件及附墙支座尺寸详见图7。

剪力墙混凝土强度等级C30,钢筋材料等级HRB400。试件配筋详见图8,两侧翼墙纵筋均为

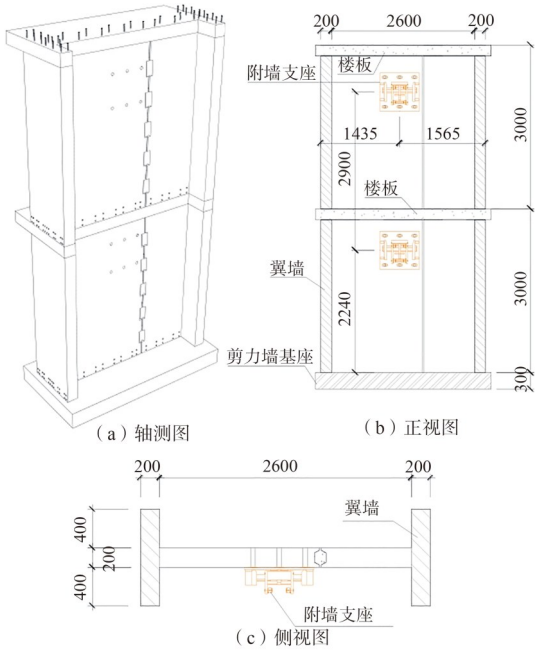


图 7 剪力墙试件及附墙支座示意　mm

Fig. 7 Schematic diagrams of the shear wall specimen and wall-attached support

12⌀14，主墙配筋水平筋为⌀8@200、纵筋⌀10@200，附墙支座附着位置水平筋局部加固，加固纵筋⌀10@100，加固水平筋⌀8@100。附墙系统包含附墙架、附墙支座两部分，其中螺栓、转爪和承力销轴为高强钢材 42CrMo，附墙架材料为 Q355，附墙支座主要材料为 Q355。附墙架通过转爪将荷载传递至附墙支座，随后传递至剪力墙。

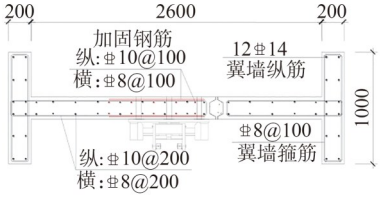
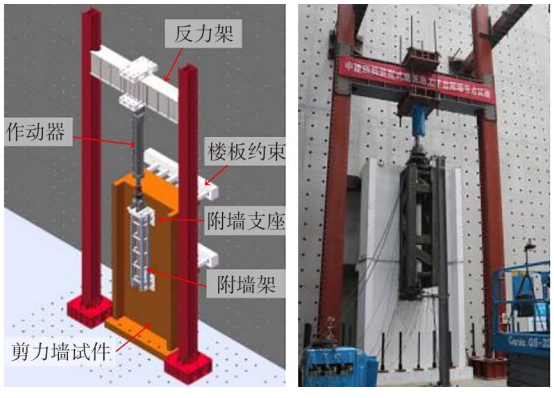


图 8　剪力墙试件配筋示意　mm

Fig. 8　Reinforcement layout of the shear wall specimen

2.2　试验加载方案

采用反力架及反力墙共同组成反力装置，在一层楼板和二层楼板处分别设置 6 根钢梁，以模拟实际楼板水平连接作用。钢梁梁端分别与加载梁、墙体楼板处的预埋钢板焊接连接；墙体底部通过底板预设螺栓孔与反力地板螺栓连接。试件加载示意详见图 9。使用加载范围为 0~2000 kN 的静态作动器进行加载，加载制度采用力控制、位移控制双阶段加载策略。1）弹性阶段。采用力控制，竖向加载速率为 1 kN/s，50 kN 为一级；每级进行持荷，无异常后开始下一级加载。持荷时间根据现场情况确定，力不大于 70 kN 时，持荷时间 1 min；力大于 70 kN 后，持荷时间增长以观测裂缝。2）非弹性阶段。混凝土试件出现开裂后，采用位移控制，以 0.1 mm 为一级，每级加载速率为 0.6 mm/min。试验拟加载至裂缝宽度超过 0.3 mm 时，停止加载。



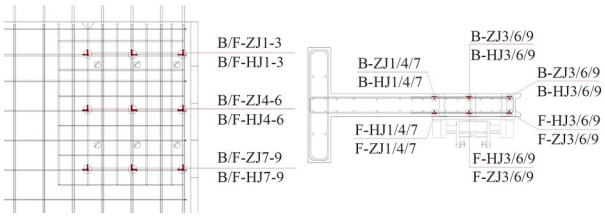
（a）试验加载模型　　（b）试验加载实拍

图 9　试验方案加载示意

Fig. 9　Schematic diagrams of the test loading setup

2.3　试验测点布置

试件应变片监测的部位主要为一层附墙支座附着位置的钢筋，在钢架侧（正面）、内墙侧（背面）分别布置横向和纵向应变片，共计 36 个应变片，钢筋应变片布置方案详见图 10。

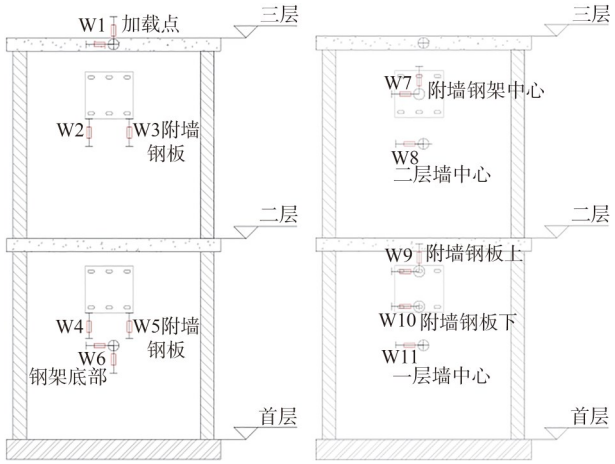


（a）正视　　（b）俯视

图 10　钢筋应变片布置

Fig. 10　Arrangement of strain gauges on rebars

试件的位移计监测的内容：竖向位移主要包含加载点的位移、附墙支座的位移、钢支架底部位移、附墙钢架中心位移；水平位移主要包含加载点位移、钢支架底部位移、附墙钢架中心位移、剪力墙层中心位移，附墙支座上下位移。位移计分别布置于钢架侧和内墙侧，详见图 11。



（a）钢架侧　　（b）内墙侧

图 11　试件位移计布置

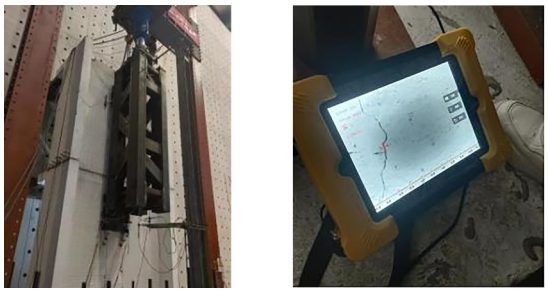
Fig. 11　Arrangement of displacement meters on the specimen

3　试验现象及结果

3.1　试验现象描述

试验现象主要以混凝土试件的裂缝发展为主要描述对象[13]。试验竖向荷载加载至 750 kN，开始出现第一条裂缝①，在竖向拼缝附近（下层附墙钢板下方），宽度为 0.09~0.12 mm。加载至 950 kN 时，裂缝①沿其长度方向继续延伸，新延伸裂缝宽度 0.09 mm，既有裂缝宽度增至 0.14 mm。加载至

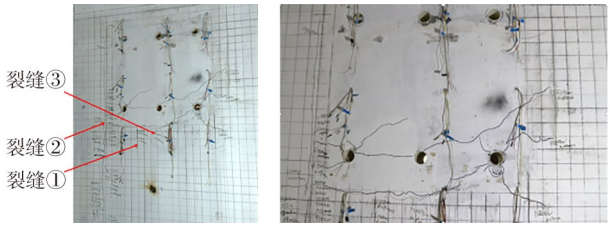
1100 kN时，裂缝宽度增至0.18 mm，并且在钢板附近出现新增纵向裂缝②，宽度为0.07 mm。加载至1200 kN时，裂缝①延伸并且增宽至0.2 mm，裂缝②延伸并增宽至0.08 mm，在裂缝②附近新增一条横向裂缝③。加载至1300 kN时，裂缝③宽度为0.1 mm，裂缝①继续延伸，宽度扩展至0.23 mm；加载至1382 kN时，裂缝扩展至0.27 mm。在钢板拆除后，得到的试件破坏形态详见图12、13。可见，在试件的下排螺栓孔处存在放射状裂缝。



（a）1200 kN竖向荷载现象　（b）裂缝最大宽度0.27 mm

图12　试件加载过程

Fig. 12　Specimen loading process



（a）混凝土试件裂缝　（b）下部锚杆位置网状裂缝

图13　试件裂缝分布

Fig. 13　Crack distribution in the specimen

拆除附墙钢架及附墙支座后，螺栓孔洞周边有局部压溃现象，附墙钢板周边墙体表面出现明显裂缝，螺栓孔洞试验现象详见图14。



（a）孔洞局部破坏情况　（b）转爪屈服变形

图14　附墙钢板螺栓孔附近破坏情况

Fig. 14　Failure modes near the bolt holes of the attached wall steel plate

3.2　荷载-位移曲线

试件加载荷载-位移曲线详见图15，加载测量点W1处最终竖向位移量为17.477 mm，附墙钢架底部测量点W6最终竖向位移量为16.428 mm。考虑到加载点位移值存在螺栓孔、机械连接等接触位置的初始间隙，故取附墙架底部测量点W6作为位移控制点。可以看出，初始加载阶段，荷载-位移曲线呈线性，附墙系统处于弹性受力状态；在300 kN附近，荷载-位移曲线出现拐点，刚度出现第一次下降；加载至1200 kN时，荷载-位移曲线出现明显波动，构件发生轻微滑移现象；加载至1382 kN时，裂缝扩展至0.27 mm后，停止加载。加载结束后，附墙钢架转爪出现屈曲变形。

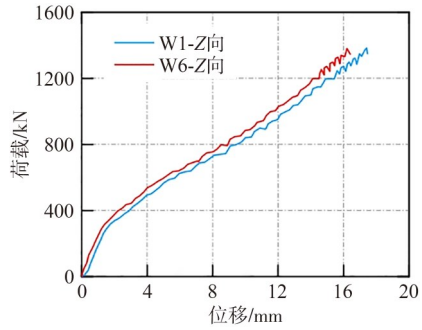


图15　主要监测点的荷载-位移曲线

Fig. 15　The load-displacement curves of principal monitoring points

3.3　应变分析

选取典型钢筋应变测量结果，全过程荷载-应变曲线如图16所示。可知，在荷载达到峰值时钢筋应变最大值为1239.482×10^{-6}，整个加载过程中，测点钢筋仍处于弹性状态。试件加载至1382 kN时，附墙系统的承载力仍具有增长潜力。

4　精细有限元分析

4.1　材料及本构选择

根据节点构造大样，将不同的部分赋予不同的材料属性和截面，图17分别列出了C60灌浆料、C30混凝土、HRB400钢筋、Q355钢材以及42CrMo钢材的力学本构骨架曲线[14]。将相应的材料参数输入到程序中，材料的弹塑性行为将在结构的非线性力学性能中得以体现。

采用大型通用有限元软件建立1:1模型，其中附墙支座、混凝土均采用Solid单元，钢筋部分采用Truss单元进行模拟[15]，同时在本次计算模拟中，将钢锚环、

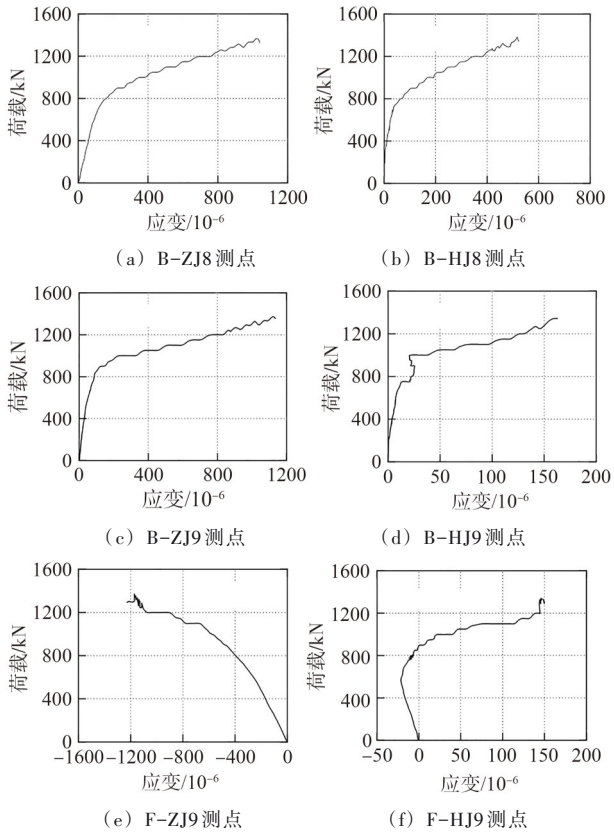


图 16　荷载-钢筋应变曲线

Fig. 16　Load-strain curves of rebars

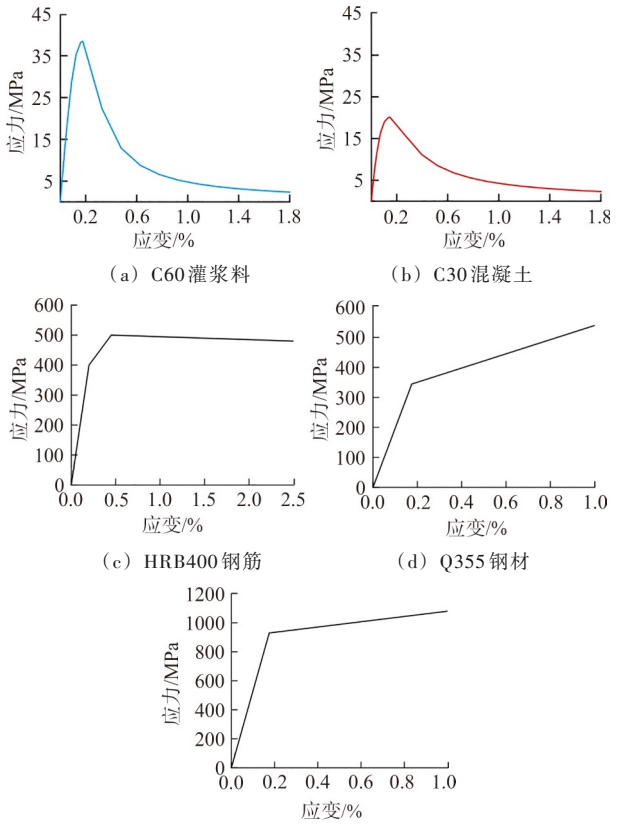


图 17　材料的本构曲线

Fig. 17　Constitutive curves of the materials

螺杆也用实体 Solid 单元进行了模拟并赋予了剪切、拉伸破坏的本构属性，以考虑在加载过程中可能出现的剪断、拉断的力学行为。钢筋采用 Embedded 约束与混凝土进行耦合。模型建立详见图 18。

试件底部采用固定约束模拟，同时在楼层位置约束楼板的水平方向位移以模拟楼板支座。模型中支座钢板、螺栓与混凝土间的接触采用通用解除-罚函数模拟，法向方向采用硬接触，切向方向摩擦系数取 0.3，以更真实地模拟接触行为。

施加的水平荷载与竖向荷载的比值为 1∶10，按照线性加载的模式，最大竖向荷载为 1400 kN，最大水平荷载为 140 kN。

4.2　有限元模拟结果

4.2.1　裂缝换算公式

根据 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》第 7.1.2 条[16]，在矩形、T 形、倒 T 形和 I 形截面的钢筋混凝土受拉、受弯和偏心受压构件及预应力混凝土轴心受拉和受弯构件中，按荷载标准组合或准永久组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度可按式(1)计算。

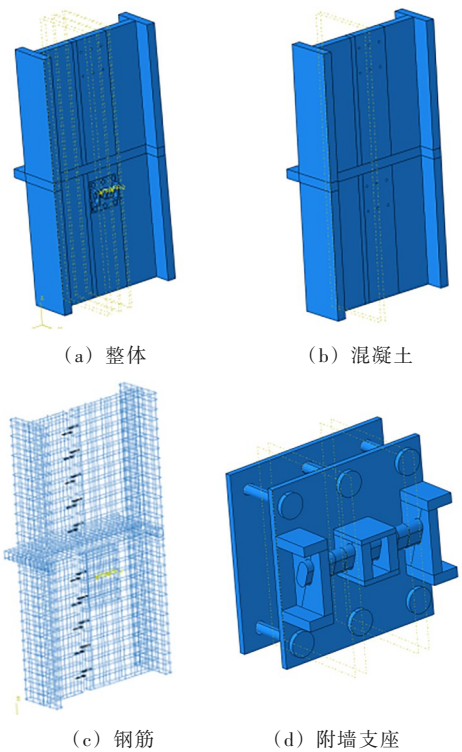


图 18　有限元模型示意

Fig. 18　Schematic diagrams of finite element models

$$w_{max} = \alpha_{cr}\psi\frac{\delta_s}{E_s}\left(1.9c_s + 0.08\frac{d_{eq}}{\rho_{te}}\right) \quad (1)$$

其中 $\psi = 1.1 - 0.65\dfrac{f_{tk}}{\rho_{te}\delta_s}$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i}$$

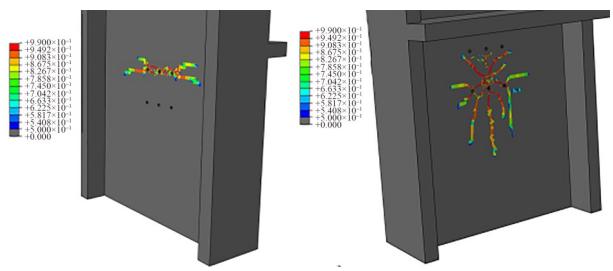
$$\rho_{te} = \frac{A_s + A_p}{A_{te}}$$

式中：各参数含义详见 GB/T 50010—2010[16]。

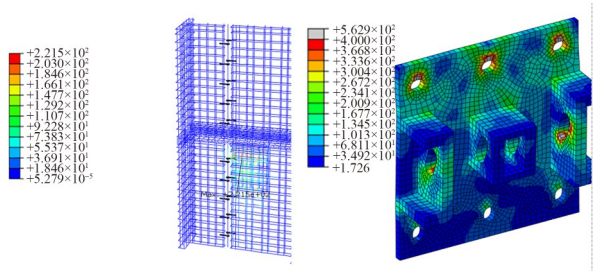
根据式(1)，对钢筋应力反复迭代，可计算出剪力墙裂缝宽度与钢筋应力之间的函数关系。依据此函数关系计算出裂缝的宽度，以评估该附墙节点是否会对剪力墙的耐久性产生影响。

4.2.2 模型计算结果

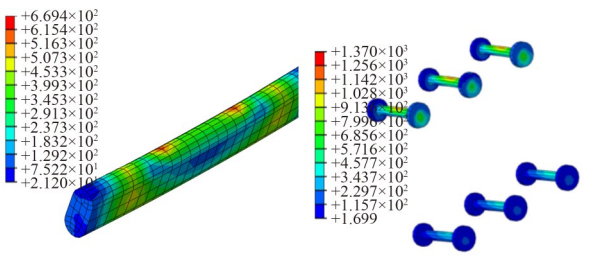
模型选取加载结束时 1400 kN 竖向荷载作用下的计算结果。该结果主要展示剪力墙受拉损伤情况、钢筋 Mises 应力、附墙支座 Mises 应力[17]，详见图 19。



(a) 试件正面受拉损伤分布　(b) 试件反面受拉损伤分布



(c) 钢筋 Mises 应力云图，MPa　(d) 附墙支座 Mises 应力云图，MPa



(e) 销轴 Mises 应力云图，MPa　(f) 螺栓 Mises 应力云图，MPa

图 19 有限元模型计算结果

Fig. 19 Calculation results of finite element model

可以看出，试验墙背面出现了由螺栓洞口向外发射状开展的受拉损伤，与试验现象十分接近；钢筋材料为 HRB400，Mises 最大应力出现在附墙支座位置的箍筋上，钢筋应力均小于 300 MPa；附墙支座的材质为 Q355，其最大应力值为 562.9 MPa，销轴承载及螺栓孔洞局部进入屈服状态，大部分仍未屈服；销轴和螺栓材料为 42CrMo，最大应力值为 877 MPa，仍小于屈服强度 930 MPa。综合上述结果情况，可以判断在 1400 kN 竖向荷载作用下，附墙支座仍具备良好的承载能力。

如图 20 所示，有限元模拟的荷载-位移曲线与试验的曲线整体趋势一致[18-19]，但存在一定的偏差，有限元模拟的整体刚度变化较小，最终的位移为 15.8 mm；试验过程中在 300 kN 左右出现了一次刚度变化，最终的位移为 16.4 mm，位移偏差为 3.7%。有限元模拟与试验结果对比效果符合预期要求[18]。

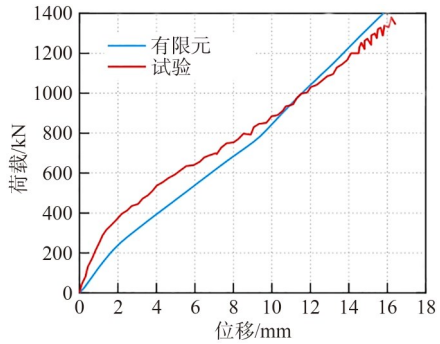


图 20 有限元与试验数据对比

Fig. 20 Comparison of finite element analysis and experimental results

5 结束语

以 1∶1 试验还原预制剪力云端建造工厂的高承载力附墙支撑系统，结合精细化有限元分析，在 1382 kN 竖向荷载作用下，裂缝发展仍是区域性的，钢筋应变片监测点钢筋未出现屈服现象，高承载力附墙支撑系统仍保留充足的承载能力，荷载-位移曲线仍处于上升阶段。

有限元计算结果与试验结果存在差异，这是因为材料本构的取值、安装偏差、荷载偏心等因素均会影响有限元分析结果；按照 GB/T 50010—2010 取值的材料性能较为保守，有限元计算结果具备安全性。

有限元计算分析和现场加载试验现象均表明预制剪力云端建造工厂的高承载力附墙支撑系统具备良好的力学性能，当竖向荷载加载至约 1100 kN 时，

裂缝的最大宽度不超过 0.2 mm，满足正常使用工况的裂缝宽度要求。此高承载力附墙系统在正常使用状态下的承载力设计值以 1000 kN 为宜，按此设计值设计云端建造工厂，该附墙系统承载力满足云端建造工厂支撑的需求。本文成果填补了装配式结构附墙系统试验研究空白，并为附墙系统的研究提供了理论支持。

参　考　文　献

[1] 张明，刘佳，李建宏，等. 武汉中心主塔楼智能型施工钢平台制作工艺[J]. 建筑钢结构进展，2013，15(4)：53-57.

[2] 季万年，杨玮，顾国荣，等. 广州珠江新城西塔新型模板体系设计与应用[J]. 施工技术，2009，38(12)：13-15.

[3] 葛洪军，苏广洪. 广州珠江新城西塔顶升模板系统支撑架设计与应用[J]. 施工技术，2009，38(12)：8-10.

[4] 周杰刚，崔旭旺，王开强，等. 武汉中心可变微凸支点匣套型顶升模架体系关键施工技术[J]. 施工技术，2013，42(19)：12-17.

[5] 陈凯，钟伟，胡建宏，等. 微凸支点智能控制顶升模架在华润总部大厦工程中的优化与应用[J]. 施工技术，2016，45(8)：103-105.

[6] 廖继，蒋及第，刘恒，等. 住宅造楼机在建筑施工中的应用[J]. 施工技术(中英文)，2022，51(8)：45-48.

[7] 骆发江，栗世伟，余自强，等. 住宅造楼机关键施工技术[C]// 2022 年全国土木工程施工技术交流会论文集(上册). 北京：2022：442-445.

[8] 王辉，王开强，杨辉，等. 基于“空中造楼机”应用的某超高层结构剪力墙精细化有限元分析[J]. 建筑结构，2022，52(增刊 2)：393-398.

[9] 马涛. 超高层建筑核心筒顶模施工技术及有限元分析[J]. 钢结构，2018，33(10)：108-112.

[10] 骆发江，栗世伟，孟召虎，等. 智能顶升模架支承动力系统研究与应用[J]. 施工技术(中英文)，2023，52(19)：133-138.

[11] 陈凯，刘丽丽，李宗昌，等. 一种基于云端建造工厂的自升降交互爬升机构及爬升方法：202411663046. 1[P]. 2025-02-21.

[12] 李然，田春雨，马云飞. 竖向接缝钢锚环灌浆连接装配式多层剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报，2020，41(增刊 2)：123-132.

[13] 曹万林，李凤丹，乔崎云，等. 造楼机附墙装置连接构造抗拉拔性能试验[J]. 建筑结构，2021，51(10)：65-72.

[14] 张田，侯正猛，李晓琴，等. 混凝土塑性损伤模型参数计算方法研究[J]. 计算力学学报，2024，41(6)：1130-1137.

[15] 田建勃，史庆轩，陶毅，等. 小跨高比钢板-混凝土组合连梁受力与变形性能研究[J]. 建筑结构学报，2016，37(12)：83-96.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准：GB/T 50010—2010[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2024.

[17] 田建勃，赵勇，陈黄健，等. 带钢筋桁架楼承板的 PRC 连梁抗震性能试验研究及数值分析[J]. 地震工程与工程振动，2024，44(1)：48-60.

[18] 刘新钊. 超高层建筑智能建造机关键系统的分析与施工技术研究[D]. 西安：西安工业大学，2023.

[19] 曾凡奎，刘新钊，潘壮，等. 超高层建筑的顶升模架结构施工模拟与监测[J]. 工业建筑，2021，51(11)：127-131.