

## 基于 OpenSEES 和 ABAQUS 有限元模型的 剪力墙拟静力试验研究

崔纳仑<sup>1</sup>, 张纪刚<sup>1,2,\*</sup>, 陈德刚<sup>2,3</sup>, 孙晓莉<sup>2,3</sup>, 马哲昊<sup>1,2</sup>, 许卫晓<sup>1,2</sup>, 王向英<sup>1,2</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525;

2. 青岛青建理工建筑工业化研究院有限公司, 青岛 266033; 3. 青建集团股份公司, 青岛 266071)

**摘要:** 为保证模拟精度并提高钢筋混凝土剪力墙有限元模型计算效率, 分别采用 ABAQUS 软件和 OpenSEES 软件建立精细化和简化有限元模型, 对 1 个足尺钢筋混凝土剪力墙试件拟静力试验进行数值模拟分析, 从试验现象、破坏模式、裂缝发展趋势、应变、滞回曲线等方面进行对比验证。结果表明: 在保证模拟精确度的前提下, ABAQUS 精细化模型在裂缝发展、墙体损伤等方面与试验现象吻合较好, 但模型计算时间较长; OpenSEES 简化模型在滞回曲线方面模拟结果与试验结果吻合更好, 误差在 5% 以内, 并显著提高了计算效率。

**关键词:** 剪力墙; 拟静力试验; ABAQUS; OpenSEES

**中图分类号:** TU398<sup>+</sup>.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)02-0084-10

## Research on the finite element model of the quasi-static test of shear wall based on OpenSEES and ABAQUS

CUI Nalun<sup>1</sup>, ZHANG Jigang<sup>1,2,\*</sup>, CHEN Degang<sup>2,3</sup>, SUN Xiaoli<sup>2,3</sup>,  
MA Zhehao<sup>1,2</sup>, XU Weixiao<sup>1,2</sup>, WANG Xiangying<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Qingjian Research Institute of Construction Industrialization Co. Ltd, Qingdao 266033, China;

3. Qingjian Group Co. Ltd., Qingdao 266071, China)

**Abstract:** In order to ensure the simulation accuracy and improve the calculation efficiency of the finite element model of reinforced concrete shear wall, refined and simplified finite element models were established by using ABAQUS and OpenSEES to conduct the numerical simulation of the quasi-static test on a full-size reinforced concrete shear wall and comparatively analyze the phenomenon, failure mode, crack development process, strain and hysteretic performance. The results showed that on the premise of ensuring the simulation accuracy, the ABAQUS refined model is in good agreement with the test phenomenon in terms of crack development process and wall damage, but the calculation time of the model is longer; the OpenSEES simplified model is in good agreement with the test results in terms of hyster-

收稿日期: 2022-12-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0703600); 国家自然科学基金(NSFC)-山东联合基金重点支持项目(U2106222); 国家自然科学基金青年基金资助项目(52108282)

作者简介: 崔纳仑(1998-), 男, 山东青岛人。硕士, 研究方向为结构抗震。E-mail: 913497436@qq.com。

\* 通信作者: 张纪刚(1975-), 男, 山东沂水人。博士, 教授, 主要从事结构抗震方面的研究。E-mail: jigangzhang@126.com。

esis performance, with the error less than 5%, and the calculation efficiency is significantly improved.

**Key words:** shear wall; quasi-static test; ABAQUS; OpenSEES

在实际工程中对剪力墙构件进行有限元模拟,分析构件的抗震性能,有助于对结构进行分析设计。对剪力墙构件的有限元模拟对验证滞回性能、延性、刚度退化和耗能能力具有重要的指导意义<sup>[1-4]</sup>。

目前国内学者对剪力墙进行了大量有限元模拟验证,王田田等运用 ABAQUS 有限元软件对 3 组耗能钢筋不同的自复位剪力墙及传统剪力墙在低周往复荷载作用下的抗震性能进行模拟分析,结果表明,自复位剪力墙承载力是现浇墙的 93%,有限元模拟中峰值荷载对应的位移早于试验结果,模拟结果存在一定误差<sup>[5]</sup>。李治等通过 ABAQUS 有限元软件对错列开洞剪力墙进行抗震性能分析,结果表明剪力墙承载力随跨高比减小而提高,开洞率较小时,墙体破坏模式为剪切破坏;开洞率较大时,会导致墙体不协调变形从而发生破坏<sup>[6]</sup>。武立伟等研究钢管混凝土剪力墙的抗震性能,并通过 ABAQUS 进行模拟验证,结果表明钢管混凝土剪力墙连接节点安全可靠,有限元模拟结果与试验结果较为吻合,误差在 15%左右<sup>[7]</sup>。张祥辉等通过对装配式剪力墙灌浆套筒连接位置和套筒失效数量对承载力和刚度的影响进行 ABAQUS 有限元软件模拟分析,研究结果表明,采用灌浆套筒有效连接的装配式剪力墙与现浇剪力墙的力学性能基本一致;灌浆套筒连接失效数量多但位置远离加载侧,其极限承载力和刚度比钢筋连接失效数量少而位置靠近加载侧的大<sup>[8]</sup>。何尧琼等对 6 组 L 型、6 组一字型高强钢筋高强混凝土剪力墙进行低周往复荷载试验,并采用 OpenSEES 有限元软件研究其抗震性能,试验结果表明 12 组试件破坏形态均为弯剪破坏,在同高厚比下 L 型试件的承载力较一字型试件提升 50%,OpenSEES 模型能精确地模拟各个试件的抗震性能,且误差较小<sup>[9]</sup>。伍福炜等通过 OpenSEES 的纤维梁柱单元建立了轻钢龙骨式剪力墙模型,并针对不同龙骨材料、是否开洞等参数的剪力墙模型进行抗震性能分析,结果表明基于 OpenSEES 有限元模拟的结果与试验结果拟合度较高且误差较小,并提出了轻钢龙骨式剪力墙在不同高宽比情况下力-位移曲线的换算方法<sup>[10]</sup>。

本文通过对 1 个足尺剪力墙试件进行低周往复荷载试验,采用 ABAQUS、OpenSEES 有限元软件分别建立试件精细化模型和简化模型研究其抗震性能,并将 2 种不同的有限元模拟结果与试验结果进行对比,为后期相似剪力墙设计并建立有限元模型提供理论依据。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)、《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)中剪力墙结构设计要求,设计制作了 1 个剪力墙,试件编号为 XJ,试件浇筑方式采用整体现浇,墙体内钢筋未断开,轴压比为 0.2。

由于结构实验室加载设备能力与场地不具备足尺试件试验的条件,因此根据墙体连接特点进行相应的简化设计。试件由墙体、边缘构件、加载梁以及地梁组成。现浇剪力墙 XJ 试件尺寸及配筋如图 1 所示。

### 1.2 材料性能

在剪力墙试件浇筑混凝土过程中同时预留 3 个边长 100 mm 的立方体试块,并同 XJ 试件同条件养护,使用数显式压力试验机进行混凝土强度测试,表 1 为混凝土强度测试结果。XJ 试件采用 HRB400 级钢筋。钢筋强度采用数显式万能材料试验机进行钢筋拉伸试验测定,表 2 为钢筋力学性能。

### 1.3 加载装置及加载制度

试验在青岛理工大学土木工程学院结构实验室四连杆试验装置上进行。试件的水平位移由 100 t MTS 液压伺服作动器进行施加,试验加载装置如图 2 所示。本次试验的加载制度中涵盖不同性能水平下的层间位移角限值,考虑《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中弹性、塑性层间位移角的限值 1/800 和 1/100,试验采用位移控制加载,每级位移循环 3 次,加载制度如图 3 所示。

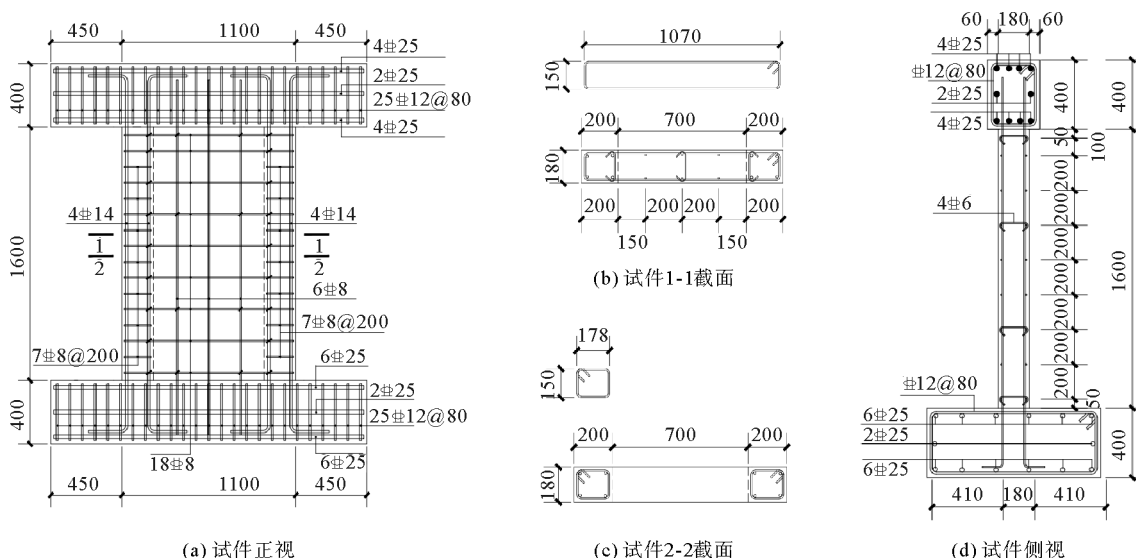


图1 现浇剪力墙 XJ 试件尺寸及配筋示意(单位:mm)

表1 立方体试块抗压强度 MPa

试块1	试块2	试块3	平均值
37.5	38.2	38.1	37.8

表2 钢筋力学性能

d/mm	S/mm <sup>2</sup>	f <sub>y</sub> /MPa	f <sub>u</sub> /MPa
8	50.27	553.81	734.91
14	153.94	527.96	705.37

注:d 为钢筋直径;S 为钢筋横截面积;f<sub>y</sub> 为抗拉强度;f<sub>u</sub> 为极限强度。

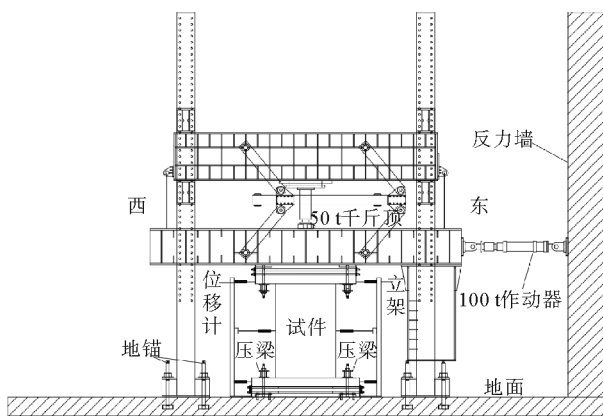


图2 加载装置示意

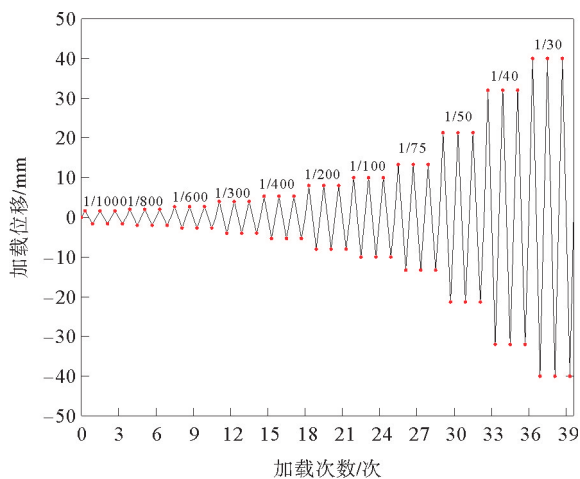


图3 加载制度

## 2 有限元模型建立

### 2.1 基于 ABAQUS 的剪力墙精细化有限元模型

剪力墙试件模型采用 ABAQUS 有限元软件进行精细化建模,混凝土采用 C3D8R 单元,钢筋采用 T3D2 桁架单元进行模拟。图4为剪力墙精细化建模模型。

为节约时间和保证计算精度,模型中的材料性能采用1.2节中混凝土实测强度(表1)、钢筋实测强度(表2),混凝土本构模型参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的塑性损伤模型(图5),钢筋本构模型采用双折线本构模型(图6)。按照图1对不同直径钢筋模型进行组装,并合并成整体钢筋网。由于

剪力墙墙体与地梁、压梁为整体浇筑,所以模型中墙体、地梁、压梁为一个整体;钢筋与混凝土之间采用内置命令,将钢筋嵌入混凝土中,墙体接触采用通用接触,边界条件为下部地梁部分固结,施加轴压力后对墙体进行低周往复荷载加载。

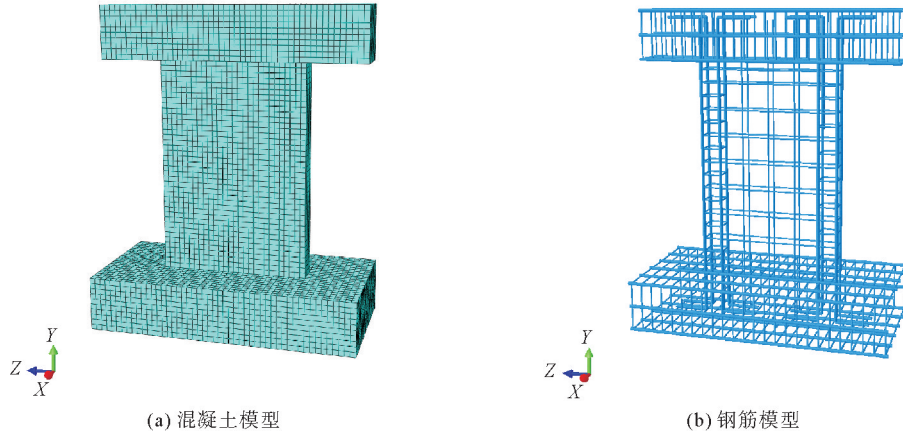


图 4 剪力墙精细化建模模型

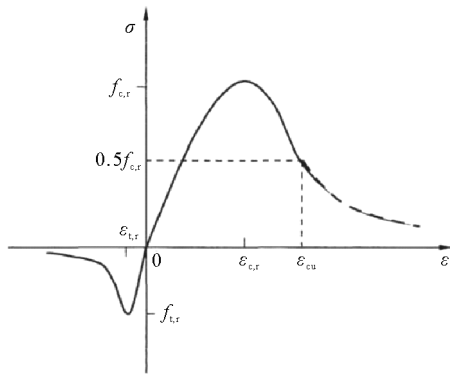


图 5 混凝土塑性损伤模型

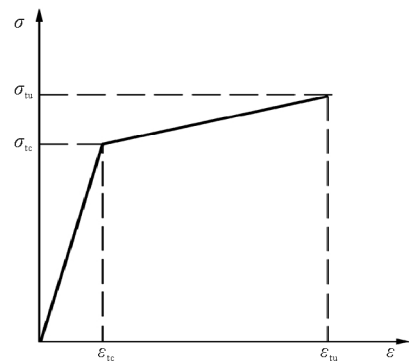


图 6 钢筋双折线本构模型

### 2.2 基于 OpenSEES 的剪力墙有限元模型

本文采用 OpenSEES 有限元模拟软件对剪力墙进行抗震性能试验模拟,剪力墙模型为分层壳(Shell-DKGQ)单元模型<sup>[11]</sup>。分层壳单元采用局部坐标系,向量  $\eta$ 、 $\xi$  通过 GramSchmidt 标准正交化和向量单位化得到,向量  $\zeta$  根据右手定则为向量  $\eta$ 、 $\xi$  的乘积。该单元将剪力墙沿厚度方向分解成若干层,将剪力墙的三维非线性行为简化为若干层壳体,并根据墙体的大小和钢筋的分布情况,可将不同的材料性能和厚度分配到每一层,根据钢筋的位置和方向,将钢筋转化为一层或多层壳体,如图 7 所示。

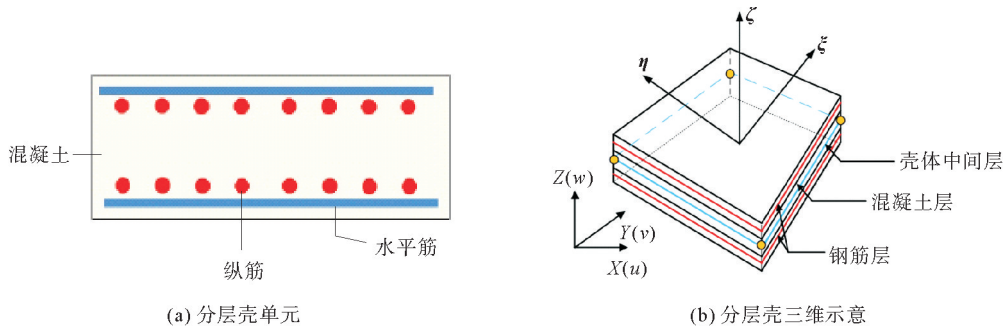


图 7 分层壳单元钢筋分布

本文混凝土本构模型基于损伤力学概念和混凝土弥散开裂模型建立的混凝土二维本构关系模型 nD-Material PlaneStressUserMaterial<sup>[12]</sup>,对于钢筋混凝土剪力墙,滞回曲线产生“捏缩”现象的原因是钢筋和混凝土间的黏结滑移<sup>[13]</sup>,而分层壳单元满足的基本假定之一是钢筋和混凝土之间黏结滑移忽略不计,因此模拟“捏拢”效应较为困难<sup>[14]</sup>,故钢筋材料采用 Hysteretic Material<sup>[15]</sup>本构模型(图8),并通过材料试验(表2)中的钢筋强度对分层壳模型骨架曲线中的3组特征点进行定义。通过对剪力墙 XJ 试件进行单元划分,将其分为多个分层壳单元,根据试验设计中的非边缘构件墙体和边缘构件,将分层壳单元截面定义为2种截面类型,非边缘构件墙体分层壳分为8层,分别对应墙体保护层、水平分布钢筋层、竖向分布钢筋层、内部混凝土层;边缘构件分层壳分为10层,分别对应墙体保护层、水平分布钢筋层、竖向分布钢筋层、边缘构件箍筋层、内部混凝土层。在确定分层壳单元数量后,通过 node 命令进行节点的建立,采用 element 命令创建分层壳单元,边缘构件纵筋单独采用 Truss 单元进行模拟,边缘构件纵筋节点与分层壳共节点,并赋予钢筋面积及材料编号,实现 Truss 单元与分层壳单元协同工作。OpenSEES 剪力墙模型如图9所示。

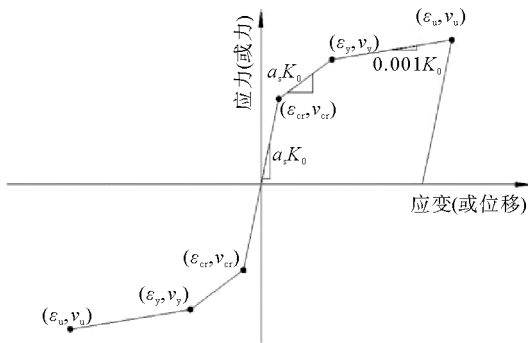


图8 Hysteretic Material 本构模型

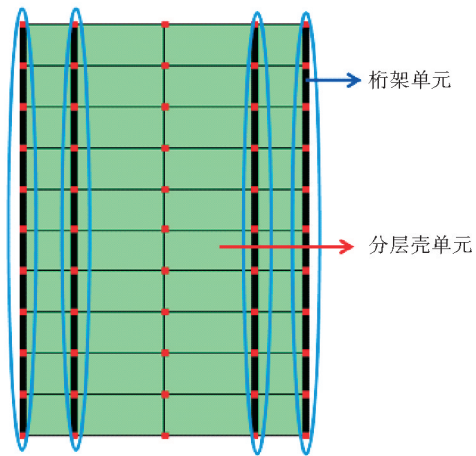


图9 OpenSEES 剪力墙模型

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 试验现象

XJ 墙体在试验 5.33 mm(层间位移角 1/300)第 1 圈时墙体正面首次出现水平裂缝;加载至 5.33 mm 第 3 圈时墙体正面水平裂缝增多,有发展成斜裂缝的趋势,背面出现斜裂缝。随着试验的进行,墙体水平裂缝增多且多数水平裂缝在原有基础上继续发展成斜裂缝,墙体底部出现水平裂缝;随着水平位移的不断增大,墙体斜裂缝延伸较为明显,在靠近底部处裂缝发展为贯通斜裂缝,墙体侧面水平裂缝贯通且裂缝宽度增大,墙体底部连接处混凝土出现压溃现象,混凝土轻微剥落,斜裂缝持续发展。试验加载至 32.00 mm(层间位移角 1/50)时,墙体底部裂缝宽度继续增大,混凝土持续剥落。试验加载至 40.00 mm(层间位移角 1/40)时,墙体底部连接部位两侧混凝土剥落严重,墙体背面钢筋裸露,此时承载力下降为峰值承载力的 77%,试验停止。试验最终破坏现象如图 10 所示。

#### 3.2 滞回曲线和骨架曲线

图 11、图 12 为 XJ 试件所对应的滞回曲线和骨架曲线,其中,  $F$  为试件水平荷载;  $\Delta$  为试件位移;  $\theta$  为试验层间位移角。表 3 明确了 XJ 试件试验过程中的特征点和延性系数等性能指



图10 试件破坏现象

标,由此可看出:XJ 试件屈服位移为 10.13 mm,屈服荷载为 463.61 kN;峰值荷载为 654.6 kN,峰值位移为 23.21 mm;试件破坏荷载为 508.5 kN,破坏位移为 30.00 mm。试件加载初期,滞回环面积狭长,基本为直线,斜率几乎无变化,试件混凝土未开裂,墙体处于弹性工作阶段;随着加载位移增大,斜裂缝数量增加,宽度加大残余变形逐渐增大,试件的刚度减弱,在试验后期,墙体钢筋与混凝土间滑移量增加,滞回曲线有较为明显的捏缩现象,滞回曲线呈现“反 S 型”,骨架曲线有明显上升、下降段,最终墙体破坏模式为弯剪破坏。

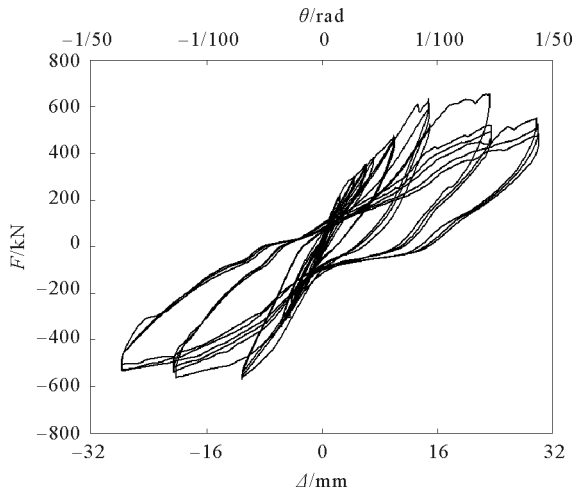


图 11 滞回曲线

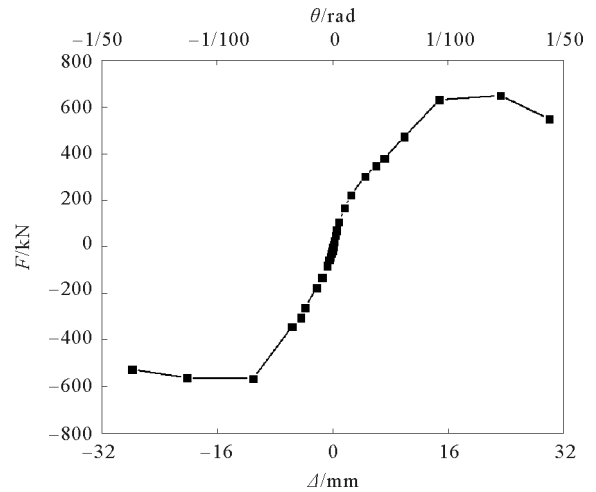


图 12 骨架曲线

表 3 XJ 试件承载力、特征点及延性系数

$P_y/kN$	$\Delta_y/mm$	$P_u/kN$	$\Delta_u/mm$	$P_f/kN$	$\Delta_f/mm$	$\mu$	$\theta_f$
463.61	10.13	654.60	23.21	508.5	30.00	2.96	1/55

注: $P_y$  为屈服荷载; $\Delta_y$  为屈服位移; $P_u$  为峰值荷载; $\Delta_u$  为峰值位移; $P_f$  为极限荷载; $\Delta_f$  为极限位移; $\mu$  为延性系数; $\theta_f$  为极限层间位移角。

## 4 有限元结果与试验结果对比

### 4.1 滞回曲线与骨架曲线

对 ABAQUS 精细化模型和 OpenSEES 简化模型分别进行有限元模拟,将模拟得到的滞回曲线、骨架曲线与 XJ 试验结果进行对比分析。对比结果如图 13、图 14、表 4 所示。

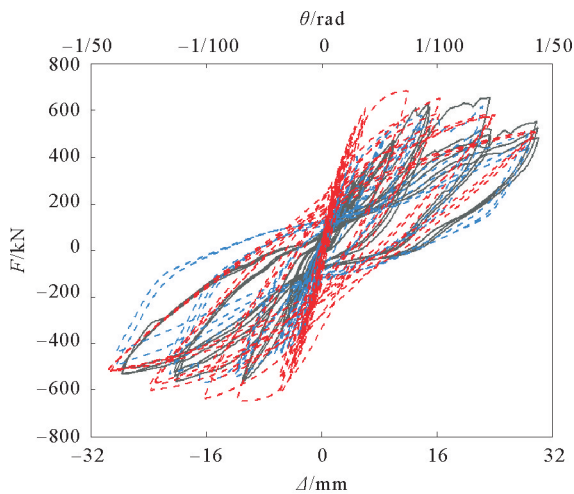


图 13 滞回曲线对比

— XJ试验; - - - ABAQUS模拟; - - - OpenSEES模拟

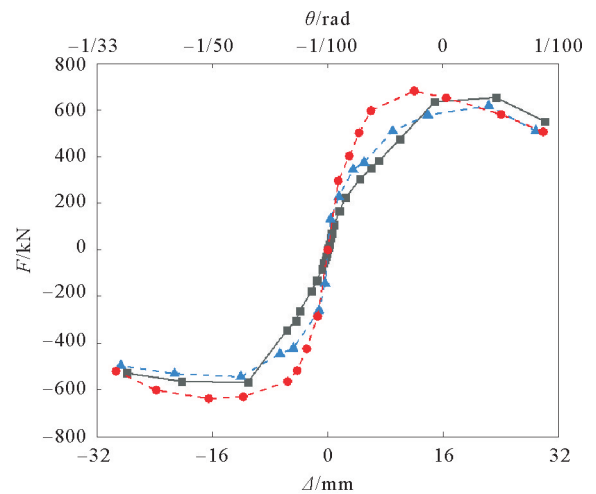


图 14 骨架曲线对比

—■ XJ试验; - - -● ABAQUS模拟; - - -▲ OpenSEES模拟

表 4 试验与模拟结果对比

项目	$P_y$		$P_u$		$P_f$		$\mu$	
	结果/kN	误差/%	结果/kN	误差/%	结果/kN	误差/%	结果	误差/%
XJ 试验	463.61	—	654.60	—	508.5000	—	2.96	—
ABAQUS	580.73	24.0	682.83	4.2	507.5040	0.2	4.00	35
OpenSEES	455.80	2.7	619.51	5.0	511.3668	0.5	3.38	14

由图 13、图 14 可以看出, ABAQUS 和 OpenSEES 所模拟出的滞回曲线形状与试验曲线吻合较好, 加载初期, 滞回环较为狭长, 斜率变化不大, 试件未开裂, 处于弹性工作阶段; 随着加载位移增大, 斜裂缝数量增加、宽度增大, 残余变形逐渐增大, 试件的刚度减弱, ABAQUS 模拟的滞回环相对于试验结果较为饱满, 捏缩现象不明显; OpenSEES 模拟滞回环出现的捏缩效应与试验结果较为相似, 可见 OpenSEES 在捏缩效应方面模拟效果较好。

由表 4 可知, 由于 ABAQUS 塑性损伤模型参数存在一定误差, 导致模拟结果屈服荷载与试验结果误差较大, 达到屈服时的位移早于试验结果, 达到峰值荷载时其位移也小于与试验结果, 使得模拟延性系数大于试验数据; OpenSEES 模拟相对于试验结果大体相同, 荷载误差均小于 5%, 延性系数略大于试验数据。在滞回曲线与骨架曲线方面, OpenSEES 有限元模拟相较于 ABAQUS 的误差较小, ABAQUS 有限元分析时间约为 1.5 h, OpenSEES 有限元分析时间约为 10 min, 不但节约了模拟运算的时间, 而且计算精度也得到保障, 提高了运算效率。

4.2 刚度退化与耗能

试验与模拟刚度退化结果对比如图 15 所示, 由于非人为因素的影响, 导致试验与有限元结果存在一定程度误差。在试验开始初期, 墙体与四连杆装置存在一定的微小缝隙, 导致试验初始刚度小于有限元模拟的初始刚度。随着试验的进行, 墙体与装置内缝隙因被挤压而消除, 刚度退化趋势大致相同。ABAQUS 有限元模拟刚度退化最快, 位移在 12 mm 后试验与 2 种有限元模拟的刚度退化斜率基本一致, 吻合较好。

采用等效黏滞阻尼系数  $h_e$  对耗能进行评价, 等效黏滞阻尼系数越大代表耗能效率越高。试验与模拟等效黏滞阻尼系数结果对比如图 16 所示, XJ 试件与 OpenSEES 有限元模拟的滞回环(图 13)饱满程度相当, 二者等效黏滞阻尼系数吻合较好; 试验过程中水平位移逐渐增大, 墙体底部坐浆层被压碎, 墙体内部钢筋与混凝土之间滑移量增大, 滞回曲线捏缩效应较为明显, ABAQUS 有限元模拟中滞回环相对于试验结果较为饱满, 试验与 ABAQUS 有限元模拟滞回环面积相比有较大差异, 在耗能方面模拟值大于试验值。

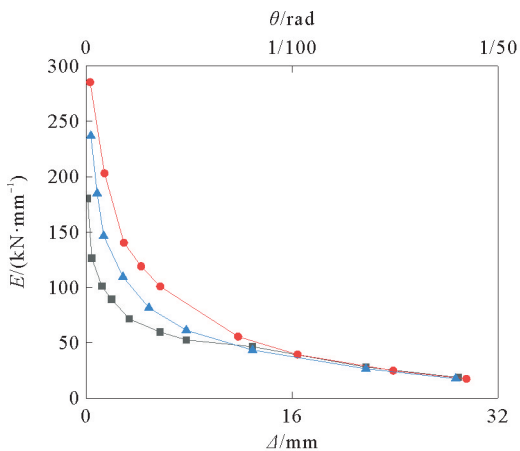


图 15 刚度退化结果对比

—■— XJ 试验; —●— ABAQUS 模拟; —▲— OpenSEES 模拟

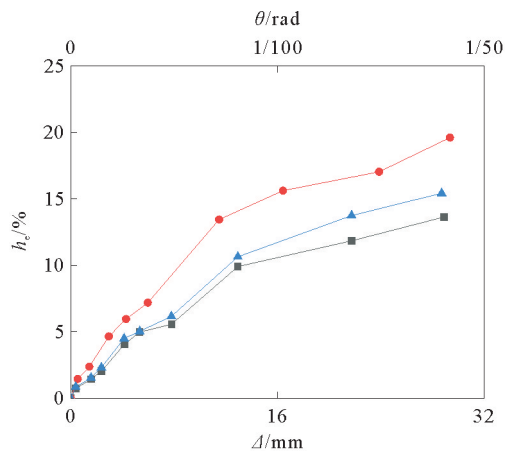


图 16 等效黏滞阻尼系数结果对比

—■— XJ 试验; —●— ABAQUS 模拟; —▲— OpenSEES 模拟

### 4.3 试验现象对比

由于 OpenSEES 有限元模型为简化模型,所以不能观察到模型在外荷载作用下产生的现象,图 17 和图 18 为 ABAQUS 有限元模型在模拟过程中的现象。

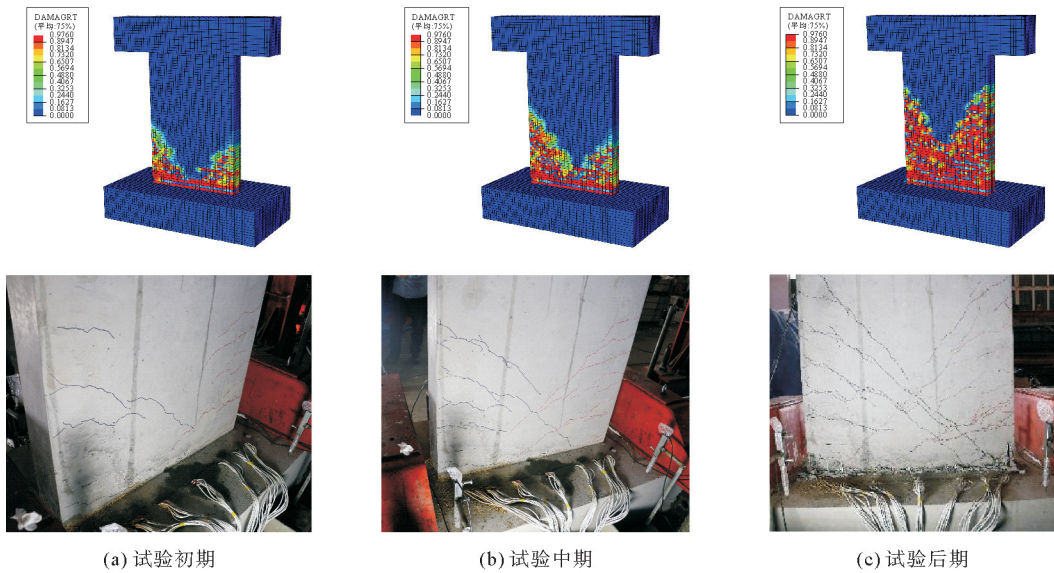


图 17 混凝土受拉损伤云图与试验现象对比

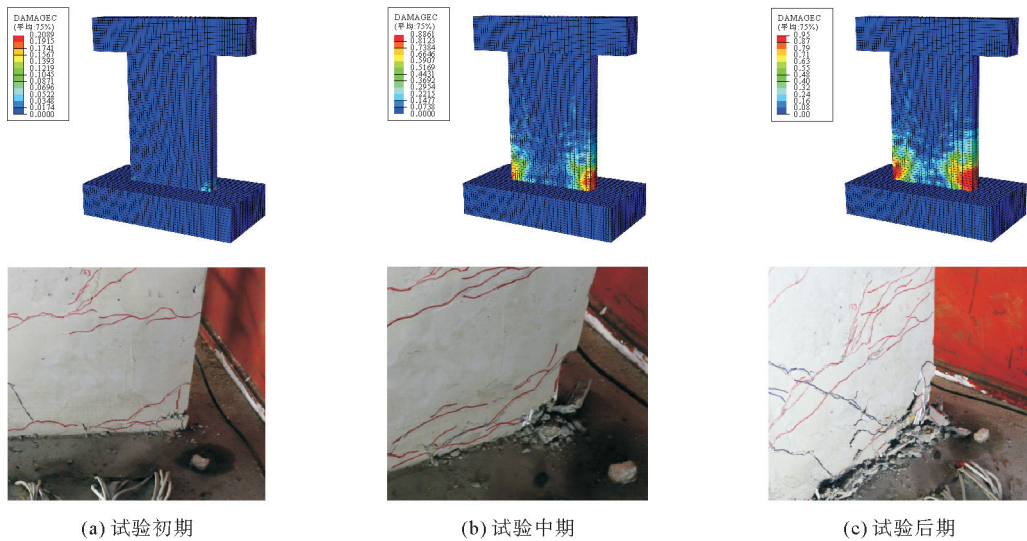


图 18 混凝土受压损伤云图与试验现象对比

由图 17 可以看出,在加载初期阶段,墙体裂缝类型大多为水平裂缝且数量较少,在加载中期墙体两侧水平裂缝多数发展为斜裂缝,裂缝长度较长,最终墙体两侧斜裂缝交会形成 X 型交叉斜裂缝,裂缝数量不断增多,宽度不断增大,位置由墙体底部发展至墙体中下部,墙体受拉所产生的裂缝发展过程与试验过程极为相似;图 18 描绘了墙体受压过程,试验初期墙体底部两侧压溃现象并不明显,随着墙体水平位移的增加,墙体底部压溃现象逐渐清晰,在加载后期墙体底部两侧混凝土被压碎并剥落。模拟现象与试验现象大致相同。

图 19 为 XJ 试件墙体内纵筋测点。XJ 试件在循环荷载作用下,同一根纵向钢筋中墙体与地梁交界处

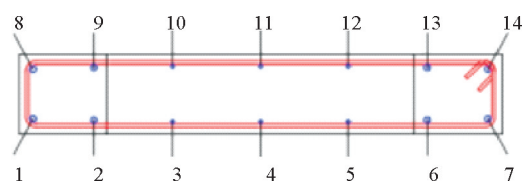


图 19 墙体纵筋测点

应变最大,由图 20 可知墙体边缘构件外侧 1、7、8、14 号纵向钢筋首先达到屈服状态,随着水平位移的增加,边缘构件中纵筋全部达到屈服状态,随着试验进行,墙体底部被压碎,边缘构件钢筋露出并屈曲。由图 21 可知,墙体受力主要由钢筋承担,钢筋由外向内逐渐屈服,墙体边缘构件外侧钢筋塑性应变最大,屈服时间相对较早,墙体内边缘构件内钢筋塑性应变增大,最终墙体边缘构件外侧钢筋压屈,墙体承载力下降。与试验过程中钢筋屈服至变形结果大致吻合,且钢筋屈服位置基本相同,证明 ABAQUS 有限元模型在试验现象方面较为一致。

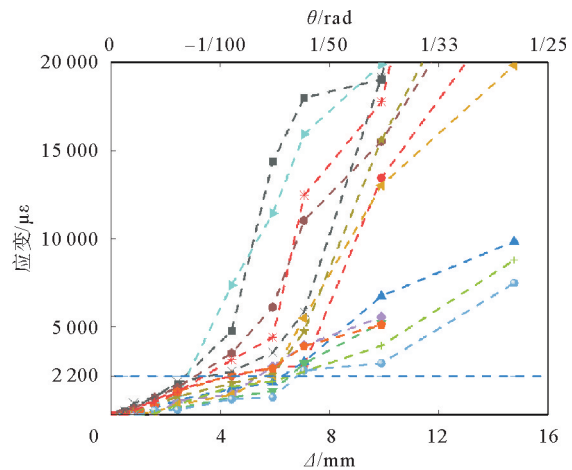
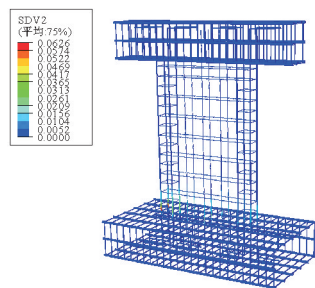
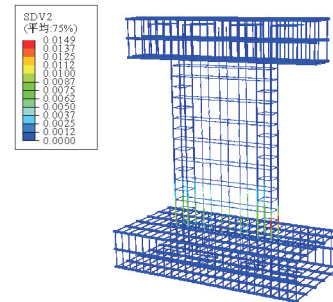


图 20 XJ剪力墙钢筋应变

—■— 1; —●— 2; —▲— 3; —▼— 4; —◆— 5; —◇— 6; —▽— 7; —○— 8;  
—☆— 9; —⊙— 10; —⊕— 11; —⊗— 12; —⊘— 13; —⊙— 14



(a) 模拟前期钢筋塑性应变



(b) 模拟后期钢筋塑性应变



(c) 试验后期左侧钢筋变形



(d) 试验后期右侧钢筋变形

图 21 钢筋塑性应变与试验现象对比

## 5 结论

对钢筋混凝土剪力墙进行拟静力试验研究,通过试验结果与 2 种有限元模拟结果进行对比分析,得出以下结论:

1) ABAQUS 有限元精细化模型计算时间较长,在滞回性能方面与 OpenSEES 简化模型相比误差较大,滞回曲线较为饱满,屈服荷载大于试验结果,其对应的屈服位移相对较小;但在裂缝发展过程、墙体损伤过程、钢筋塑性变形方面与试验现象基本一致。

2) 采用 OpenSEES 有限元软件中分层壳(ShellDKGQ)单元能够较为准确地模拟剪力墙在低周往复荷载作用下的滞回性能,能够较为准确模拟出滞回曲线的捏缩效应,整体误差结果在 5% 以内,有限元模拟延性系数略大于试验延性系数,刚度退化曲线形状和等效黏滞阻尼系数曲线形状与试验结果基本一致,

验证了 OpenSEES 简化模型的准确性,极大地提高了模型运算的效率。

### 参考文献(References):

- [1] 聂建国,卜凡民,樊健生. 高轴压比、低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙拟静力试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 60-66.  
NIE Jianguo, BU Fanmin, FAN Jiansheng. Quasi-static test on low shear-span ratio composite shear wall with double steel plates and infill concrete under high axial compression ratio[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 60-66.
- [2] 王文达,魏国强,李华伟. 钢管混凝土框架-RC 剪力墙混合结构滞回性能分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(15): 41-46.  
WANG Wenda, WEI Guoqiang, LI Huawei. Hysteresis behavior analysis of mixed structures with concrete-filled steel tubular frame and RC shear wall[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(15): 41-46.
- [3] 史庆轩,戚德赛. 中美规范 RC 剪力墙承载力和变形能力对比[J]. 建筑结构, 2022, 52(13): 106-111.  
SHI Qingxuan, QI Desai. Comparison of strength and deformability on RC shear wall between Chinese and American codes[J]. Building Structure, 2022, 52(13): 106-111.
- [4] 肖从真,徐培福,任重翠. 钢筋混凝土剪力墙拉剪承载力分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(5): 26-36.  
XIAO Congzhen, XU Peifu, REN Zhongcui. Analysis of tension-shear capacity of reinforced concrete shear wall[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(5): 26-36.
- [5] 王田田,刘英利. ABAQUS 模拟现浇剪力墙与自复位剪力墙[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 56-60.  
WANG Tiantian, LIU Yingli. Simulation of cast-in place shear wall and self-restoring shear wall with ABAQUS software[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 40(2): 56-60.
- [6] 李治,薛天琦,祝捷,等. 错列开洞钢筋混凝土剪力墙抗震性能数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(3): 154-164.  
LI Zhi, XUE Tianqi, ZHU Jie, et al. Numerical simulation on seismic performance of reinforced concrete shear wall with irregular openings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(3): 154-164.
- [7] 武立伟,于斐凡,郭雪源,等. 装配式圆钢管混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(S1): 186-195.  
WU Liwei, YU Feifan, GUO Xueyuan, et al. Experimental study on seismic behavior of prefabricated concrete-filled circular steel tube composite shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(S1): 186-195.
- [8] 张祥辉,郁有升. 钢筋灌浆套筒连接局部失效对装配式剪力墙承载力影响的有限元研究[J]. 青岛理工大学学报, 2022, 43(5): 35-41.  
ZHANG Xianghui, YU Yousheng. Finite element study on the influence of local failure of reinforced grouting sleeve connection on the bearing capacity of assembled shear wall[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2022, 43(5): 35-41.
- [9] 何尧琼,张品乐,贾毅,等. 高强钢筋高强混凝土短肢剪力墙抗震性能试验研究与数值模拟分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(5): 238-248.  
HE Yaoqiong, ZHANG Pinle, JIA Yi, et al. Experimental study and numerical simulation analysis of seismic performance of high-strength steel bar and high-strength concrete short-limb shear wall[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(5): 238-248.
- [10] 伍福炜,李元齐. 轻钢龙骨式复合墙体受剪性能的 OpenSees 模拟及高宽比影响换算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(7): 225-235.  
WU Fuwei, LI Yuanqi. Numerical simulation on shear performance and conversion method considering height to width ratio effect of cold-formed steel framing walls using OpenSees[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(7): 225-235.
- [11] 林旭川,陆新征,缪志伟,等. 基于分层壳单元的 RC 核心筒结构有限元分析和工程应用[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 49-54.  
LIN Xuchuan, LU Xinzhen, MIAO Zhiwei, et al. Finite element analysis and engineering application of RC core-tube structures based on the multi-layer shell elements[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 49-54.
- [12] LU Xinzhen, XIE Linlin, GUAN Hong, et al. A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2015, 98: 14-25.
- [13] 张新培. 钢筋混凝土抗震结构非线性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
ZHANG Xinpei. Nonlinear analysis of reinforced concrete seismic structures[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [14] 刘培,邓江东,宗周红. 基于 ABAQUS 的钢筋混凝土柱墩双塑性铰研究[J]. 土木工程, 2019, 8(2): 380-389.  
LIU Pei, DENG Jiangdong, ZONG Zhouhong. Research on double plastic hinges of reinforced concrete pier based on ABAQUS[J]. Journal of Civil Engineering, 2019, 8(2): 380-389.
- [15] 曹徐阳,冯德成,王諝,等. 基于 OpenSEES 的装配式混凝土框架节点数值模拟方法研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(4): 13-27.  
CAO Xuyang, FENG Decheng, WANG Zhun, et al. Investigation on modelling approaches for prefabricated concrete beam-to-column connections using OpenSEES[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(4): 13-27.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)