

文章编号:1008-1534(2025)02-0120-08

# 全现浇混凝土外墙精细及简化数值模拟 分析方法研究

梁家辉<sup>1</sup>, 徐涛<sup>1</sup>, 尹博<sup>1</sup>, 朱永晁<sup>1</sup>, 种迅<sup>2</sup>, 蒋庆<sup>2</sup>, 宋鹏程<sup>2</sup>, 苏文基<sup>2</sup>

(1. 中建一局集团第五建筑有限公司, 北京 100020; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009)

**摘要:**为了给全现浇混凝土外墙的抗震性能研究提供有效研究手段,基于前期开展的全现浇混凝土外墙抗震性能试验,研究了这类结构的精细有限元模型的建模方法,建立了适用于整体结构分析的混凝土填充墙简化等效斜撑模型,提出了开窗洞填充墙斜撑位置和形式的确定方法,以及等效斜撑宽度和厚度的计算方法等。结果表明:采用所建立的精细有限元模型分析得到的全现浇混凝土外墙损伤模式以及滞回曲线、刚度和承载力特性等均与试验结果吻合良好,可以较好地反映试验试件的受力性能;简化分析模型计算结果与试验结果均较为接近;简化分析模型在有效提高了计算效率的同时,具有较高的准确性。所提精细和简化有限元模型可为全现浇混凝土外墙在构件层次和整体结构层次的有限元分析提供参考。

**关键词:**混凝土与钢筋混凝土结构;全现浇混凝土外墙;抗震性能;精细有限元模型;简化等效斜撑模型;数值模拟分析

中图分类号:TU317.1 文献标识码:A DOI: 10.7535/hbgykj.2025yx02003

## Research on fine and simplified numerical simulation analysis method of fully cast-in-place concrete exterior wall

LIANG Jiahui<sup>1</sup>, XU Tao<sup>1</sup>, YIN Bo<sup>1</sup>, ZHU Yongchao<sup>1</sup>, CHONG Xun<sup>2</sup>,  
JIANG Qing<sup>2</sup>, SONG Pengcheng<sup>2</sup>, SU Wenji<sup>2</sup>

(1. China Construction First Group the Fifth Construction Corporation Limited, Beijing 100020, China; 2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

**Abstract:** To provide effective research methods for the seismic performance study of fully cast-in-place concrete exterior walls, a refined finite element modeling approach was studied based on previous seismic performance tests. Established a simplified equivalent bracing model for concrete infilled walls suitable for overall structural analysis, proposed methods for determining the location and configuration of diagonal bracing in infilled walls with openings, as well as for calculating the width and thickness of the equivalent diagonal bracing. The research results show that the damage pattern of the fully cast-

收稿日期:2024-07-26;修回日期:2025-02-24;责任编辑:王淑霞

基金项目:国家自然科学基金(52178472)

第一作者简介:梁家辉(1992—),男,湖南涟源人,工程师,主要从事房建混凝土结构施工技术方面的研究。

通信作者:种迅教授。E-mail:chongxun@hfut.edu.cn

梁家辉,徐涛,尹博,等.全现浇混凝土外墙精细及简化数值模拟分析方法研究[J].河北工业科技,2025,42(2):120-127.

LIANG Jiahui, XU Tao, YIN Bo, et al. Research on fine and simplified numerical simulation analysis method of fully cast-in-place concrete exterior wall[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2025, 42(2): 120-127.

in-place concrete exterior wall, as well as the hysteresis curve, stiffness, and bearing capacity characteristics derived from the refined finite element analysis, are in good agreement with the experimental results. Therefore, this model effectively reflects the mechanical performance of the test specimens. The results obtained from the simplified analysis model are also in close agreement with the experimental data. While it significantly enhances computational efficiency, the model still maintains high accuracy. The refined and simplified finite element models proposed in this study can serve as references for the finite element analysis of the fully cast-in-place concrete exterior walls at both the component level and the overall structure level.

**Keywords:** concrete and reinforced concrete structures; fully cast-in-place concrete exterior wall; seismic performance; refined finite element model; simplified equivalent bracing model; numerical simulation analysis

近年来将混凝土外围护墙与剪力墙作为整体,共同浇筑形成的全现浇混凝土外墙体在中国的高层剪力墙住宅建筑中得到了较为广泛的应用。该结构体系配合智能升降平台和铝模板施工工艺,施工效率高、外墙成型效果好且防水性能好,因此具有良好的应用前景<sup>[1]</sup>。与传统的砌体围护墙不同,混凝土围护墙的承载力和刚度较大,地震作用下不易损坏并退出工作,因此,其对主体结构抗震性能的影响不容忽视。由于全现浇混凝土外墙技术在中国应用的时间较短,目前围绕其开展的研究尚不充分。部分学者采用试验研究方法,对全现浇混凝土外墙的抗震性能以及填充墙与主体结构间采用不同柔性连接方式对结构抗震性能的影响展开了研究<sup>[2-3]</sup>。数值模拟分析是研究结构抗震性能的另一个有效途径。针对全现浇混凝土外墙的数值模拟分析研究往往采用较为精细的有限元模型,剪力墙和混凝土填充墙常采用实体单元或分层壳单元。上述模型计算精度高,适用于构件层次的研究。当用于高层建筑整体结构的数值模拟分析时,建模过程复杂,且计算效率较低。为了进一步提高计算效率,有必要研究全现浇混凝土外墙的简化建模方法。

众多学者针对传统砌体填充墙的简化模型已展开了较为广泛的研究<sup>[4-12]</sup>。POLYKAOV<sup>[6]</sup>提出等效斜撑模型应用最为广泛,结果表明填充墙对框架结构起到了对角斜压杆的作用,且等效斜撑的宽度是表征斜撑杆对框架结构抗震性能贡献的重要参数。HOLMES<sup>[7]</sup>在等效斜撑的基础上,更深入地进行了试验和理论研究,发现有效宽度的大小与填充墙的材料、尺寸以及主体框架的材料等特征参数有关,并提出相关等效斜撑有效宽度的计算公式。为了更好地表征在地震荷载作用下填充墙与框架结构的相互作用,国内外研究者分别提出了改进双斜撑模型<sup>[8]</sup>、三斜撑模型<sup>[9]</sup>、对角 X 形斜撑模型<sup>[10]</sup>等。对于开洞填充墙,其强度和刚度明显小于无开洞填充墙,因此开洞填充墙无法直接简化为等效斜撑。研究者提出了开洞填充墙的等效斜撑模型。如 SHAN 等<sup>[11]</sup>将开洞填充墙分成 4 个实体填充区域,

每个区域等效为双对角 X 形斜撑;王广庆<sup>[12]</sup>根据带洞填充墙在单调荷载下的最大反力时的应力分布图,再通过对称得到带洞填充墙的等效斜撑模型。

上述研究均围绕普通砌体填充墙展开,尚缺乏混凝土填充墙简化分析模型的相关研究。本文基于前期开展的全现浇混凝土外墙抗震性能试验,首先研究这类结构适用于构件层次分析的精细化有限元模型的建模方法。其中,混凝土采用实体单元,钢筋采用桁架单元,通过调用“uactive”子程序模拟试验过程中混凝土压碎的状态。为进一步提高有限元模型的分析效率,提出适用于整体结构层次分析的混凝土填充墙的简化等效斜撑模型,提出等效斜撑位置和形式的确定方法,以及等效斜撑的宽度和厚度的计算方法。将试验结果和精细有限元模型分析结果进行对比,验证 2 种分析模型的合理性。

## 1 试验概况

设计了一个带有混凝土填充墙的全现浇混凝土外墙试件,并进行了拟静力试验<sup>[13]</sup>。试件中填充墙与主体结构间采用了图 1 所示的 PVC 拉缝的柔性连接方式。

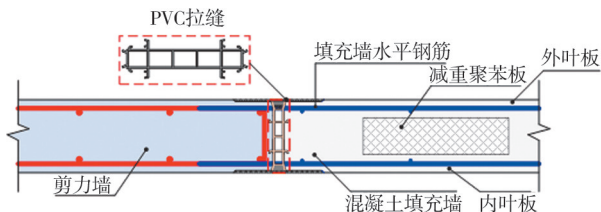
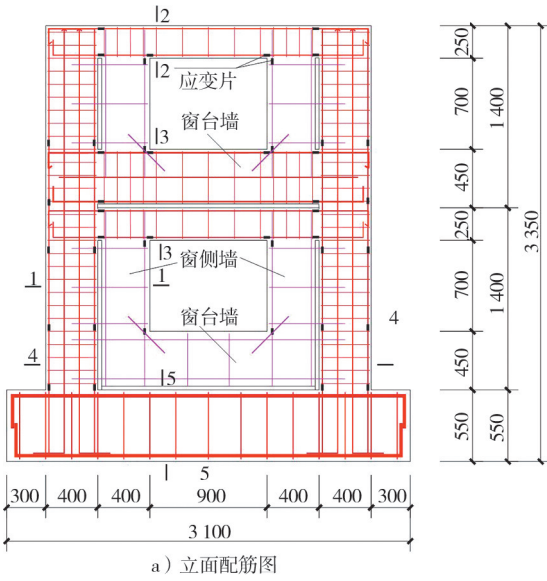


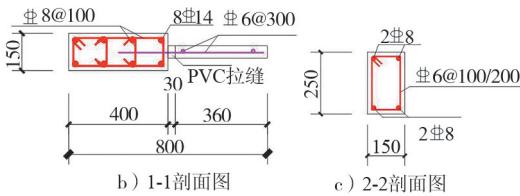
图 1 PVC 拉缝柔性连接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PVC tube connection

试件的缩尺比例为 1 : 2,几何尺寸及截面配筋如图 2 所示。试件一层、二层高度均为 1 400 mm,剪力墙墙肢长 400 mm,墙厚 150 mm,连梁净跨 1 700 mm,截面尺寸为 150 mm × 250 mm,属于剪力墙中的壁式框架结构。填充墙中部设有 1 个窗洞,洞口宽 900 mm,高 700 mm,窗台墙高 450 mm,窗侧墙宽 400 mm。为减小混凝土填充墙的强度和

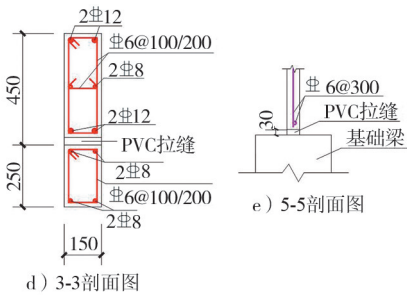


a) 立面配筋图



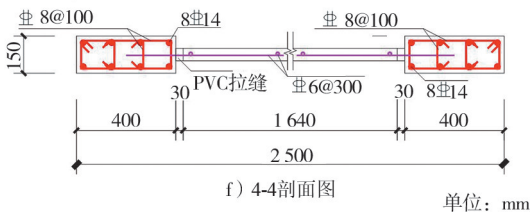
b) 1-1剖面图

c) 2-2剖面图



d) 3-3剖面图

e) 5-5剖面图



f) 4-4剖面图

单位: mm

图 2 试件的几何尺寸及配筋

Fig. 2 Dimensions and reinforcement detail of the specimen

刚度,使其能尽早退出工作,从而降低对主体结构的影响,对混凝土填充墙采取了弱化措施。实际工程中往往在填充墙内设置一定厚度的减重材料,形成内、外叶板厚度为 50 mm 左右,中部为减重材料的夹心墙板。在缩尺比例为 1 : 2 的试件中,内、外叶板厚度仅有 25 mm,不易加工,因此采用了简化的方法,填充墙采用厚度为 50 mm 的实心墙体。此外,混凝土填充墙采用少筋墙,设置 $\Phi 6@300$ 的单层钢筋网片,配筋率为 0.23%~0.28%。

试验采用 MTS 电液伺服作动器施加低周反复水平荷载,竖向轴压荷载通过 2 个 150 t 千斤顶分别施加 132 kN 的恒定轴力,相应的设计轴压比为 0.2,加

载装置如图 3 所示。试验加载制度采用位移控制加载<sup>[14]</sup>,试件屈服前每级循环 1 次,屈服后每级循环 3 次。当试件承载力低于峰值承载力 85%时,认为试件破坏,结束试验。具体加载制度如图 4 所示。

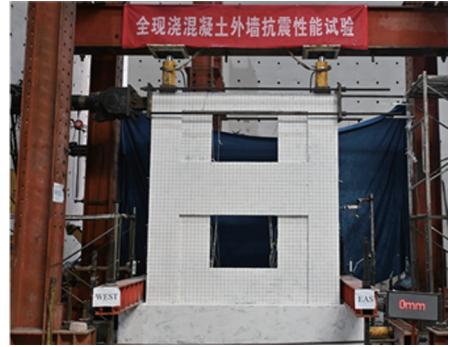


图 3 试验加载装置照片

Fig. 3 Photos of the test setup

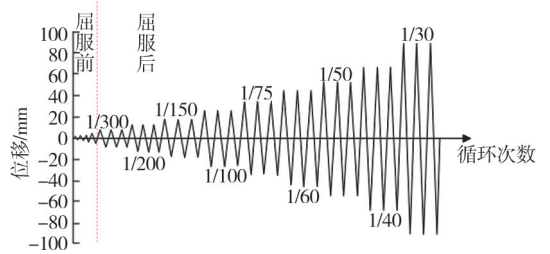


图 4 试验加载制度

Fig. 4 Experimental loading protocol

试件损坏模式和裂缝分布分别如图 5 和图 6 所示。由图 5 和图 6 可知,试件一层连梁和上方窗台墙独立工作,形成双连梁的工作模式。试件主体结构的破坏模式为梁铰机制,即剪力墙根部、双连梁端部及二层连梁端部形成塑性铰,最终相应部位混凝土轻微压碎。对于配筋量和厚度均较小的填充墙,二层窗侧墙与两侧剪力墙独立受力,弯矩较大的顶、底部截面纵筋较早达到屈服,此后墙内斜裂缝不断增多,窗侧墙逐渐发生弯剪破坏。加载结束时,墙内



图 5 试件损伤模式图

Fig. 5 Failure mode of the specimen

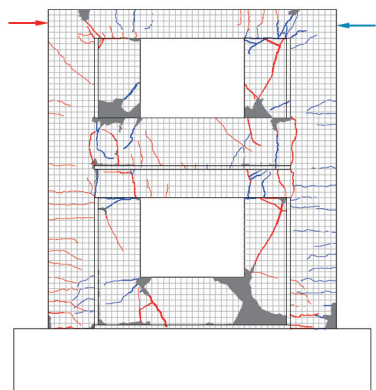


图 6 试件裂缝分布图

Fig. 6 Crack distribution of the specimen

混凝土大面积压碎,损伤严重。一层填充墙尽管在左、右两侧及底部均采用 PVC 拉缝与主体结构间弱连接,加载过程中填充墙也能与主体结构发生一定的相对变形,但二者无法完全相互独立变形,仍有较强的相互作用,导致一层填充墙在加载后期也损坏严重。

## 2 精细有限元模型数值模拟分析

### 2.1 精细有限元模型建立

采用有限元软件 MSC.Marc 建立了上述试件的精细有限元模型(实体有限元模型)。混凝土与 PVC 拉缝采用八节点空间六面体的 3D-Solid(7 号单元)。钢筋采用二节点的 3D-Truss 桁架单元(9 号单元),并将钢筋单元嵌入混凝土单元中,实现两者之间的协调作用。混凝土单元主体网格尺寸为  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ,钢筋网格尺寸为  $100\text{ mm}$ 。同时,由于 PVC 拉缝的强度较小,在试验加载前期二层窗台墙与连梁间的 PVC 拉缝就与边缘混凝土受剪脱开,对试件的水平承载力影响较低。因此,模型中不考虑该处 PVC 拉缝的建模。精细有限元模型示意图如图 7 所示。

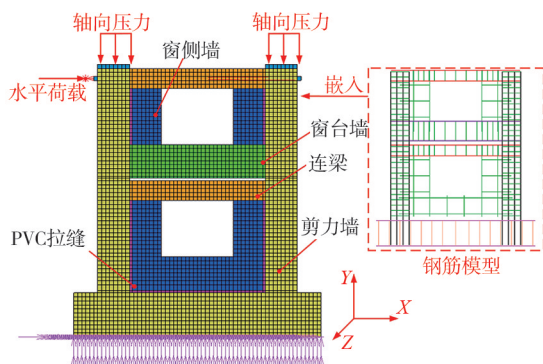


图 7 精细有限元模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the refined finite element model

混凝土受压本构模型采用 KENT 等<sup>[15]</sup>所提出的单轴受压本构关系曲线,且剪力墙、连梁以及二层窗台墙均考虑箍筋带来的约束作用,采用约束混凝土本构模型。混凝土的受拉单轴本构曲线采用 HILLERBORG 等<sup>[16]</sup>提出的双折线模型。混凝土的受压弹性模量取值为  $3 \times 10^4\text{ MPa}$ ,泊松比取值为 0.2,混凝土轴心抗压强度取值为  $22.95\text{ MPa}$ ,开裂应力与开裂后的软化模量分别取为轴心抗压强度与受压弹性模量的  $1/10$ 。钢筋的应力-应变曲线( $\sigma$ - $\epsilon$ 曲线)采用 ESMAEILY 等<sup>[17]</sup>所建模型,根据文献<sup>[18]</sup>确定相关系数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  分别为 4、25、40, $k_4$  则是根据材性试验结果取值为钢筋的抗拉强度与屈服强度的比值。混凝土应力-应变关系曲线与钢筋应力-应变关系曲线分别如图 8 和图 9 所示。

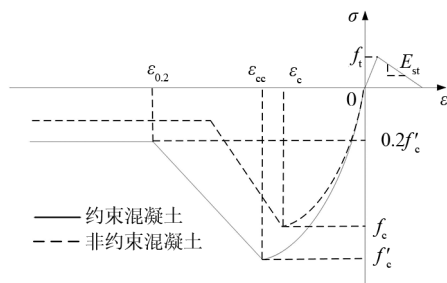


图 8 混凝土应力-应变关系曲线

Fig. 8 Stress-strain relationship curve of the concrete

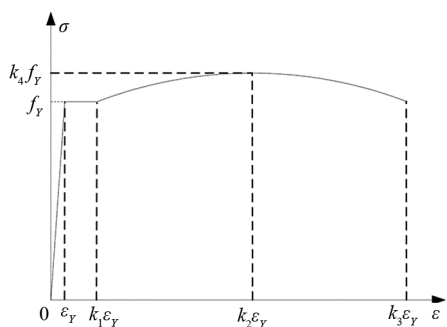


图 9 钢筋应力-应变关系曲线

Fig. 9 Stress-strain relationship curve of reinforcement

本文所建立的试件有限元模型边界条件均与试验相同。在两侧剪力墙顶部施加  $132\text{ kN}$  的恒定轴向压力,在二层连梁端部根据加载制度施加水平荷载,约束基础底部 X、Y、Z 3 个方向上的平动自由度以及转动自由度。并通过调用“uactive”子程序模拟试验过程中混凝土的压碎状态,即当混凝土单元的压应变达到所规定的应变值时就不考虑该单元对模型刚度与承载力的贡献<sup>[3]</sup>。经过多次调试,最终确定剪力墙、连梁、二层窗台墙以及其余墙体所定义的应变值分别为 0.015 0、0.007 5、0.008 2、0.007 5。

### 2.2 精细有限元模型结果分析

模拟所得试件在极限位移角下的混凝土主拉应

变云图如图 10 所示。由图 10 可以看出,连梁以及二层窗台墙两端混凝土单元因压应变过大而被“uactive”子程序“杀死”退出工作,两侧墙肢根部的拉应变也较大,表明在这些地方形成了塑性铰区,且二层窗台墙与一层连梁之间独立工作,填充墙也发生了较为严重的剪切破坏,这与试验现象吻合良好。

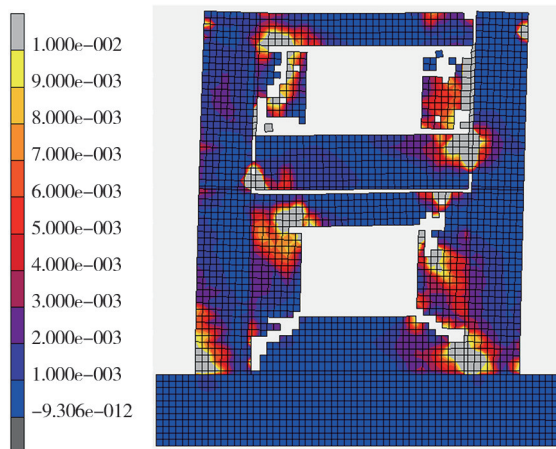
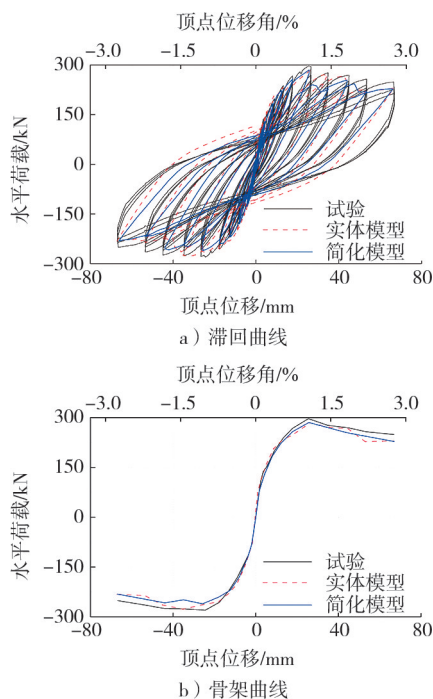


图 10 精细有限元模型极限位移角下混凝土主拉应变云图

Fig. 10 Principal tensile strain cloud map of the refined finite element model under ultimate drift

图 11 给出了相应的滞回曲线与骨架曲线,由图 11 可以看出实体模型的滞回曲线与试验结果总



注:简化模型指简化有限元模型。

图 11 试验与有限元分析得到滞回曲线与骨架曲线对比图

Fig. 11 Comparison of the tested and analyzed hysteresis curve and skeleton curve

体上吻合良好,承载力的上升与下降趋势基本保持一致。表 1 列出了数值模拟与试验得到的曲线特征点的对比结果,屈服荷载和峰值荷载的最大误差(绝对值,下同)分别为 1.70% 和 2.49%;屈服位移和峰值位移的最大误差分别为 3.71% 和 17.65%。可见,分析得到试件承载力和屈服位移均与试验结果吻合良好,峰值位移结果与试验差别略大,这主要是由于反向加载时分析与试验得到峰值荷载不在同一级别所致。上述结果表明,所建立的精细化实体模型可以有效地反映出试件受力模式与承载力变化趋势,同时“uactive”子程序的应用可以有效地模拟出混凝土压碎退出工作的效果。

表 1 数值模拟与试验得到的曲线特征点对比

Tab. 1 Comparison of curve characteristic points obtained from numerical simulation and experimental results

项目	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	峰值荷载/kN	峰值位移/mm
试验	239.79	14.55	288.28	24.98
实体模型模拟	235.72	14.01	281.10	29.39
简化模型模拟	227.79	14.16	272.87	25.71
实体模型误差/%	1.70	-3.71	-2.49	17.65
简化模型误差/%	-5.00	-2.68	-5.35	2.92

### 3 简化有限元模型数值模拟分析

#### 3.1 混凝土填充墙等效斜撑模型

##### 3.1.1 等效斜撑位置的确定

由于等效斜撑模型概念简单,且能够较好地表征填充墙与主体结构间的相互作用,得到了国内外学者的广泛研究。为了更好地反映填充墙与框架结构间的作用机理和传力效果,研究者提出了各类斜撑模型,包括单斜撑模型<sup>[7]</sup>、多斜撑模型<sup>[8-9]</sup>、交叉斜撑模型<sup>[10]</sup>等。对于开洞填充墙,其等效斜撑模型常见的处理方法可大致分为 2 类:1)考虑开洞导致的填充墙刚度的降低对等效斜撑宽度进行折减;2)将围绕洞口的 4 个实体填充区域分别等效为斜撑模型<sup>[11]</sup>。本文通过试验发现,一层洞口左右和下方的填充墙以及二层洞口左右两侧的填充墙作分别参与受力。因此,参照文献[12],本文将混凝土填充墙围绕洞口划分区域,并在每个区域内单独设置对角线方向的斜撑模型。图 12 为开洞现浇混凝土填充墙墙体的划分示意图。

为了验证该设置方法是否可以反映填充墙的实际受力情况,提取出上一节中实体有限元模型在最大正向承载力时的主压应力迹线图,如图 13 所示。可见,在填充墙的各墙段范围内,主压应力均存在较明显的方向性,且主压应力方向与图 12 所示斜撑杆

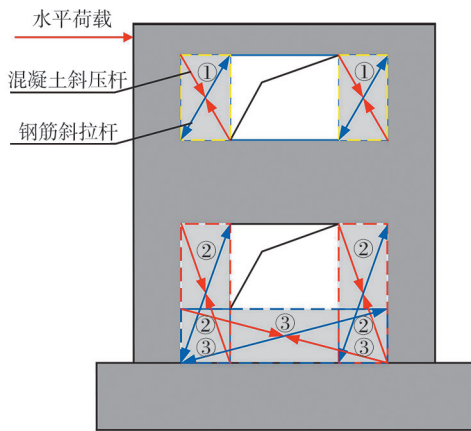


图 12 开洞现浇混凝土填充墙墙体划分示意图

Fig. 12 Schematic diagram of division of the cast-in-place concrete infill wall with openings

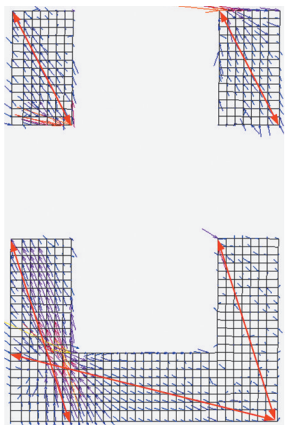


图 13 实体模型墙体主压应力迹线

Fig. 13 Main compressive stress trace of the wall in the solid element model

分布较为一致。

根据文献[6]的研究,砌体填充墙只能受压而不能受拉,因此等效斜撑均为受压杆件。钢筋混凝土填充墙与砌体填充墙在受力特性上有所差别。在钢筋混凝土构件受剪的桁架模型中,将斜裂缝间混凝土视为斜压杆,而与斜裂缝相交的钢筋视为斜拉杆。参考这一模型,本文混凝土填充墙模型中既包含混凝土的斜压杆,又包含钢筋斜拉杆,如图 12 所示。

### 3.1.2 等效斜撑几何参数的确定

等效斜撑的几何参数包括斜撑宽度和厚度。根据文献[7],等效斜撑杆的厚度与填充墙的厚度一致。因此,本文中混凝土填充墙的等效斜撑厚度取填充墙的厚度,即 50 mm。

研究表明,等效斜撑的宽度是与填充墙的尺寸、材料组成、高宽比,主体结构尺寸、材料以及主体结构与填充墙的刚度比有关。对于现浇混凝土填充墙的研究尚少,相应等效斜撑模型的公式较少,因此,本文参照美国混凝土协会(ACI)提出的砌体结

构建筑规范中建议的砌体填充墙等效斜撑宽度  $a$  计算方法,见式(1)和式(2)<sup>[19]</sup>。

$$a = \frac{0.3}{\lambda \cos \theta}, \quad (1)$$

其中:

$$\lambda = \left[ \frac{E_m t_{inf} \sin 2\theta}{4E_{fe} I_{col} H_{inf}} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

式中: $a$  为等效斜撑的宽度; $\lambda$  为特征刚度系数; $\theta = \arctan(H_{inf}/L_{inf})$ ;  $E_m$  为填充墙的弹性模量; $t_{inf}$  为填充墙的厚度; $E_{fe}$  为框架构件的弹性模量; $I_{col}$  为填充墙相邻框架柱的转动惯量; $H_{inf}$  为填充墙的高度; $L_{inf}$  为填充墙的宽度。

为了实现模型的双向加载分析,本文使用双对角 X 形斜撑对填充墙进行等效,并采用式(1)按照填充墙墙体划分结果分别计算各墙段的等效斜撑宽度  $a$ 。双对角 X 形斜撑中各斜撑的宽度均为  $a$ 。混凝土作为压杆,仅考虑其受压。同时,混凝土抗拉强度取值为 0,利用填充墙内钢筋作为斜拉杆。

### 3.2 简化有限元模型建立

简化模型中,剪力墙、连梁与二层窗台墙均采用实体单元,其建模方法与上一节相同。填充墙的等效斜撑采用欧拉梁单元进行模拟。MSC. Marc 软件中针对 52 号单元(欧拉梁单元)提供了 UBEAM 用户子程序接口,用户可以根据自己需要编写相关代码,自定义梁单元的非线性截面属性。本文利用清华大学开发的 THUFIBER 子程序<sup>[18]</sup>并对其进行了适当改进,将斜撑杆截面离散为 36 个混凝土纤维和 4 个钢筋纤维。由于等效斜撑杆的方向与试验试件中填充墙钢筋方向不同,故将试件钢筋按斜撑方向等效,即取填充墙中的垂直钢筋和水平钢筋的截面面积乘以与其等效斜撑夹角所对应的余弦值,等效钢筋面积平均赋予到 4 个钢筋纤维中,最终得到有限元模型如图 14 所示。模型的位移边界条件、加载方式和加载制度也均与试验试件相同。

### 3.3 简化有限元模型分析结果

简化模型分析结果与试验结果的对比也示于图 11 和表 1。可以看出,简化模型的滞回曲线与骨架曲线总体上吻合良好,屈服荷载和峰值荷载仅分别与试验结果相差 5.00% 和 5.35%。且位移较小时,简化模型的骨架曲线与试验结果基本重合,将混凝土填充墙简化为等效斜压杆可以有效模拟出试件的承载力变化趋势。同时,由图 15 所给出的极限位移角下简化模型主拉应变云图可以看出,简化模型的主体结构损伤模式与实体模型基本一致,且与斜压杆相连的 PVC 拉缝和混凝土单元的应变均较大,表明接缝处受力较大,甚至由于变形

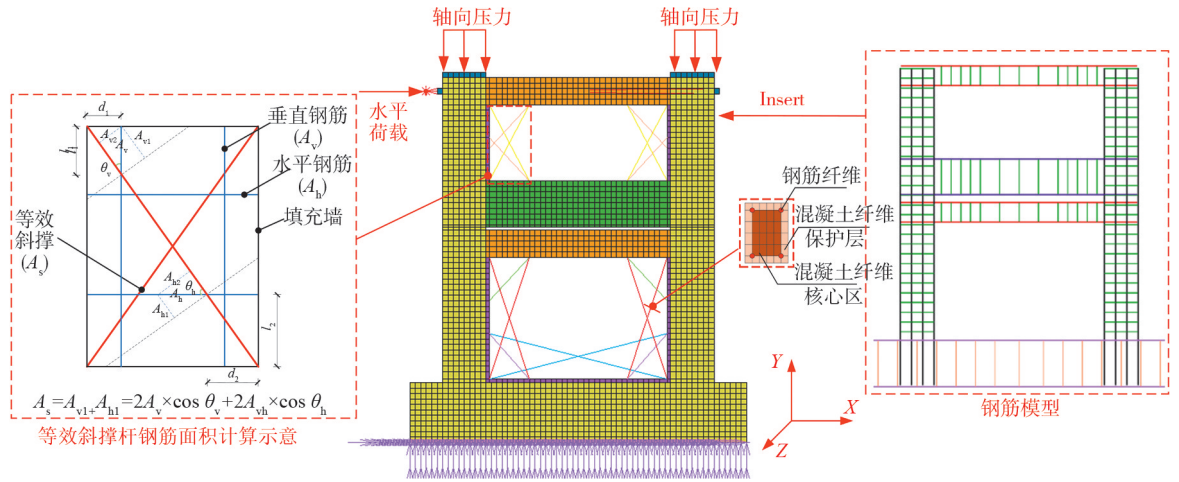


图14 简化有限元模型示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the simplified finite element model

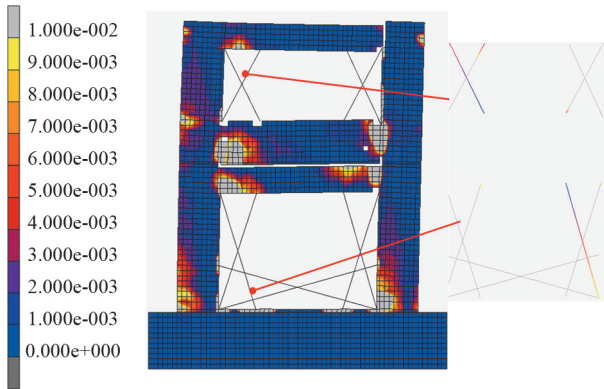


图15 极限位移角下简化模型主拉应变云图

Fig. 15 Principal tensile strain cloud map of the simplified model under ultimate drift

过大而被“uactive”子程序“杀死”而实现斜撑与主体结构的脱开。斜撑的主拉应变也较大,远超过钢筋的屈服应变,表明填充墙损伤严重,这与试验现象一致。上述结果表明,本文所提将混凝土填充墙简化为等效斜压杆的方法可以有效模拟全现浇混凝土外墙的受力模式与承载力变化趋势,可用于整体结构层次的分析。

## 4 结语

本文在前期进行的全现浇混凝土外墙拟静力试验研究基础上,研究了这类结构的精细和简化有限元模型建模方法。得出以下主要结论。

1)建立的全现浇混凝土外墙试件的精细化实体模型可较好地模拟试验试件的受力性能和刚度、承载力特性,且调用的“uactive”子程序可以有效模拟出混凝土压碎退出工作以及承载力的变化趋势效果。

2)建立了混凝土填充墙的简化等效斜撑模型,

包括开窗洞填充墙斜撑的位置和形式的确定方法,以及等效斜撑的宽度和厚度的计算方法。简化模型分析结果与试验结果和精细有限元分析结果均吻合良好,表明所提出简化模型具有较好的准确性。

3)所提等效斜撑简化模型能够较好地模拟试验试件的受力性能和损伤模式,同时有效提高了计算效率,可用于采用全现浇外墙整体结构层次的数值模拟分析。

混凝土填充墙上存在的洞口大小以及位置对等效斜撑的布置有较大影响。本研究仅针对前期开展试验的试件中洞口尺寸大小及居中布置的情况提出了等效斜撑的布置方案,所提等效斜撑简化模型在不同情况下的适用性仍有待进一步研究。

## 参考文献/References:

- [1] 袁姗姗.“低碳循环”背景下的居住建筑设计策略研究[J]. 建筑学报,2023(增刊2):144-148.  
YUAN Shanshan. Research on architectural design methods of residential building based on "lowcarbon cycle" [J]. Architectural Journal, 2023(sup2):144-148.
- [2] 周剑,田春雨,王俊,等.带现浇混凝土填充墙的剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(8):86-99.  
ZHOU Jian, TIAN Chunyu, WANG Jun, et al. Experimental study on seismic behavior of shear wall with cast-in-situ concrete infilled walls [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(8):86-99.
- [3] JIANG Qing, SU Wenji, CHONG Xun, et al. Experimental and numerical studies on the seismic performance of fully cast-in-situ concrete exterior walls [J]. Earthquake Engineering Resilience, 2024, 3(2):219-235.
- [4] 刘昊鹏,李爽,王浩然.韧性填充墙框架水平荷载-位移曲线简化分析模型[J]. 建筑结构学报,2023,44(增刊2):411-426.  
LIU Haopeng, LI Shuang, WANG Haoran. Simplified analysis model of horizontal load-displacement curves of resilient infilled frame [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44

- (sup2):411-426.
- [5] 张景博,杨健,王斐亮.带填充墙预制混凝土框架抗连续倒塌分析[J].上海交通大学学报,2021,55(4):357-364.  
ZHANG Jingbo, YANG Jian, WANG Feiliang. Progressive collapse resistance analysis of precast concrete frames with infill walls[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(4):357-364.
- [6] POLYAKOV S V. On the Interactions Between Masonry Filler Walls and Enclosing Frame When Loaded in the Plane of the Wall[M]. Moscow: Traslations in Earthquake Engineering Research Instituted, 1956, 125.
- [7] HOLMES M. Steel frames with brickwork and concrete infilling [J]. ICE Proceedings, 1961, 19(4):473-478.
- [8] 刘博,孔璟常,崔亮.填充墙钢筋混凝土框架结构简化分析模型及抗震性能系数研究[J].科学技术与工程,2022,22(12):4902-4911.  
LIU Bo, KONG Jingchang, CUI Liang. Simplified analysis model and seismic performance coefficient of infilled walls reinforced concrete frame structure[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4902-4911.
- [9] TRAPANI F D, SBERNA A P, BENEDETTO M D, et al. Dynamic progressive collapse response of multi-storey frame structures with Masonry infills [J]. Structures, 2023, 54: 1336-1349.
- [10] WANG Haishen, BARBAGALLO F, PAN Peng. Test of precast pre-stressed beam-to-column joint with damage-free reinforced concrete slab[J]. Engineering Structures, 2020, 210:110368.
- [11] SHAN Sidi, LI Shuang, XU Shiyu, et al. Experimental study on the progressive collapse performance of RC frames with infill walls[J]. Engineering Structures, 2016, 111:80-92.
- [12] 王广庆.砌块填充墙的精细化模拟与等效斜撑建模[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.  
WANG Guangqing. Refined Simulation and Improved Strut Models of Masonry Block Infills[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [13] 蒋庆,苏文基,沈毅,等.柔性连接混凝土填充墙对剪力墙抗震性能影响研究[J/OL].建筑结构.[2024-11-07]. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.LS240007>.  
JIANG Qing, SU Wenji, SHEN Yi, et al. Study on the influence of seismic performance of shear wall with flexible connection concrete infilled wall [J/OL]. Building Structure. [2024-11-07]. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.LS240007>.
- [14] SHEN Shaodong, PAN Peng, CAO Yingri, et al. Analysis, and seismic design approach of RC infill walls isolated by PVC tubes in coupled shear wall systems[J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(8):04022091.
- [15] KENT D, PARK R. Flexural members with confined concrete [J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(7): 1969-1990.
- [16] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6):773-781.
- [17] ESMAEILY A, XIAO Y. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads: Analysis[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5):736-744.
- [18] 陆新征.建筑抗震弹塑性分析[M].北京:中国建筑工业出版社,2015:180-188.
- [19] TMS 402-13/ACI 530-13/ASCE 5-13, Building Code Requirements for Masonry structures[S].