

一种新型装配式混凝土剪力墙等效平面桁架模型

樊禹江^{1,2}, 丁佳雄², 黄欢欢¹, 廖凯², 许锦宝²

(1.长安大学建筑学院, 陕西 西安 710061; 2.长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:针对一种具有一定地震响应自适应能力的新型装配式剪力墙的墙体,提出一种等效平面桁架模型非线性分析方法,有效解决传统的建模方法效率低下、提取的结构刚度和质量矩阵的阶数过大,影响后续结构振动控制系统调用的问题。对两种由不同水平连接装置连接而成的新型装配式剪力墙进行加载试验;通过刚度等效将矩形平面微元体简化为等效平面桁架单元,通过强调等效原则对混凝土应力-应变关系进行修正;结合装配式剪力墙等效平面桁架模型的特点,提出一种适用于该模型的破坏准则和一种裂缝处理方法。将新型装配式剪力墙等效平面桁架模型的模拟结果和试验结果进行误差分析,结果表明,所建等效平面桁架模型能够快速提取结构刚度、质量矩阵;单向推覆所得结果与试验特征荷载平均相对误差为4.0%,与ANSYS和ABAQUS传统有限元模拟结果特征荷载平均相对误差分别为2.3%和2.7%,但计算时间分别降低了60%和64%。所建立的新型装配式剪力墙结构等效平面桁架模型能够适用于后续结构振动控制中,且精度较高。

关键词:新型装配式剪力墙;等效平面桁架模型;本构模型;有限元模拟;非线性分析

中图分类号:TU398+.2

文献标志码:A

引用格式:樊禹江,丁佳雄,黄欢欢,等.一种新型装配式混凝土剪力墙等效平面桁架模型[J].山东大学学报(工学版),2024,54(3):94-102.

FAN Yujiang, DING Jiexiong, HUANG Huanhuan, et al. An equivalent plane truss model for new fabricated concrete shear wall[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(3):94-102.

An equivalent plane truss model for new fabricated concrete shear wall

FAN Yujiang^{1,2}, DING Jiexiong², HUANG Huanhuan¹, LIAO Kai², XU Jinbao²

(1. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. College of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: An equivalent planar truss model nonlinear analysis method was proposed for a new fabricated shear wall with certain seismic response adaptive capability. This method effectively solved the problems of low efficiency of traditional modeling methods and excessive order of extracted structural stiffness and mass matrices, which could affect the subsequent call of the structural vibration control system. Loading tests were carried out on two new fabricated shear walls connected by different horizontal connecting devices. The rectangular plane microelement was simplified into an equivalent plane truss element based on the equivalent stiffness principle, and the concrete stress-strain relationship was modified according to the principle of equivalent strength. Combining with the characteristics of the equivalent plane truss model of the fabricated shear wall, a failure criterion and a crack treatment method suitable for the model were proposed. Error analysis was carried out on the simulation results and test results of the equivalent plane truss model of the new fabricated shear wall. The results showed that the established equivalent plane truss model could quickly extract the structural stiffness and mass matrices. The average relative error between the results obtained from unidirectional overturning and the characteristic load value of the test was 4.0%, while the average relative errors between the results obtained by ANSYS and ABAQUS traditional finite element simulations and the characteristic load were 2.3% and 2.7%, respectively. However, the calculation time was reduced by 60% and 64%, respectively. The proposed model of the fabricated shear wall could be applied to subsequent structural vibration control with high accuracy.

Keywords: new fabricated shear wall; equivalent plane truss model; constitutive model; finite element simulation; nonlinear analysis

收稿日期:2023-03-17

基金项目:国家自然科学基金青年资助项目(51808046);陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBSF-315,2021SF-521);陕西省自然科学基金资助项目(2023-JC-YB-470)

第一作者简介:樊禹江(1987—),男,陕西西安人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为新型装配式建筑及评价、新型智能材料在结构振动控制中的应用等。E-mail:fanyujiangchd@163.com

0 引言

装配式剪力墙水平接缝处常采用湿式连接,导致施工效率较低,不能充分发挥装配式结构的优势,同时其水平连接处的传力路径并不明确。文献[1-2]提出一种具有地震响应自适应能力的新型装配式剪力墙,但利用传统建模方式调取的结构刚度、质量矩阵的阶数过大,影响后续结构振动控制系统的调用,导致计算效率低下^[3-4]。为此,本研究拟在保证计算精度的同时,提出一种更为适用的建模方法解决上述问题。

文献[5]利用等效平面桁架模型对3种剪力墙进行建模分析,考虑结构弯曲和剪切的相互作用,通过循环反复加载分析该模型钢筋和混凝土中的应变变化过程,说明混凝土受压应力-应变关系和混凝土横向应变的关联性。文献[6]利用等效平面桁架单元对简支梁进行建模,研究其非线性性能,运用位移增量法对试件荷载位移曲线的下降段进行更好的模拟。文献[7]利用非线性的纤维梁单元表示竖直方向的钢筋和混凝土,用非线性桁架表示水平方向的钢筋和混凝土以及对角方向的混凝土,通过对比分析试验结果和数值计算结果验证了该模型的有效性和精确性。文献[8]使用梁-桁架模型计算各种细长墙体结构在塑性铰处的平面外屈曲,该方法能准确计算出试件的滞回能力、平面外位移和屈曲性能。文献[9]利用非线性的梁-桁架模型对钢筋混凝土剪力墙进行建模,对其非线性性能进行研究,利用非线性静力分析方法和非线性动力时程分析方法对该模型进行数值模拟,同时提出使用该模型对实际建筑物中钢筋混凝土剪力墙进

行建模时的建议和限制。文献[10]提出一种用于平面钢筋混凝土剪力墙抗震性能评估的计算模拟方法,运用钢筋混凝土非线性桁架模型,无需手动定义杆单元之间的组合,能够考虑所有重要形式的材料损坏。

在上述研究的基础之上,本研究提出一种适用于新型装配式剪力墙的等效平面桁架模型,以刚度等效原则提出一种等效平面桁架单元,将结构进行网格划分、集成,得到相应的等效平面桁架模型,从而解决前述问题。

1 新型装配式剪力墙等效平面桁架模型理论分析

本课题组设计制作了2个新型装配式剪力墙构件^[1],如图1所示,试件编号为SJ-1和SJ-2,由加载梁、剪力墙、水平连接装置和地梁4个部分组成。纵筋和横向钢筋的配筋率分别为0.21%和0.41%。水平连接装置由内箱型钢和外槽钢组成,均用Q345级普通碳素钢板焊接而成,通过高强螺栓连接。SJ-1的水平连接装置(装置A)有5个半径为15 mm的孔洞,相应的外槽钢也有5个孔洞。SJ-2的水平连接装置(装置B)中内箱型钢和外槽钢是3个孔洞,通过12.9级M30高强螺栓连接,孔洞半径、弧形槽弧度均与SJ-1的水平连接装置相同。在试件制作过程中,将内箱型钢和墙体纵向钢筋在预设孔洞内焊接,形成一个整体,并将地梁内的纵向钢筋表面和外槽钢焊接成一个整体;分别在墙体和地梁内增加带肋锚固钢筋,其直径分别为6 mm和25 mm,弯曲角度均为135°,以增加墙体、地梁与水平连接装置之间连接的可靠性。

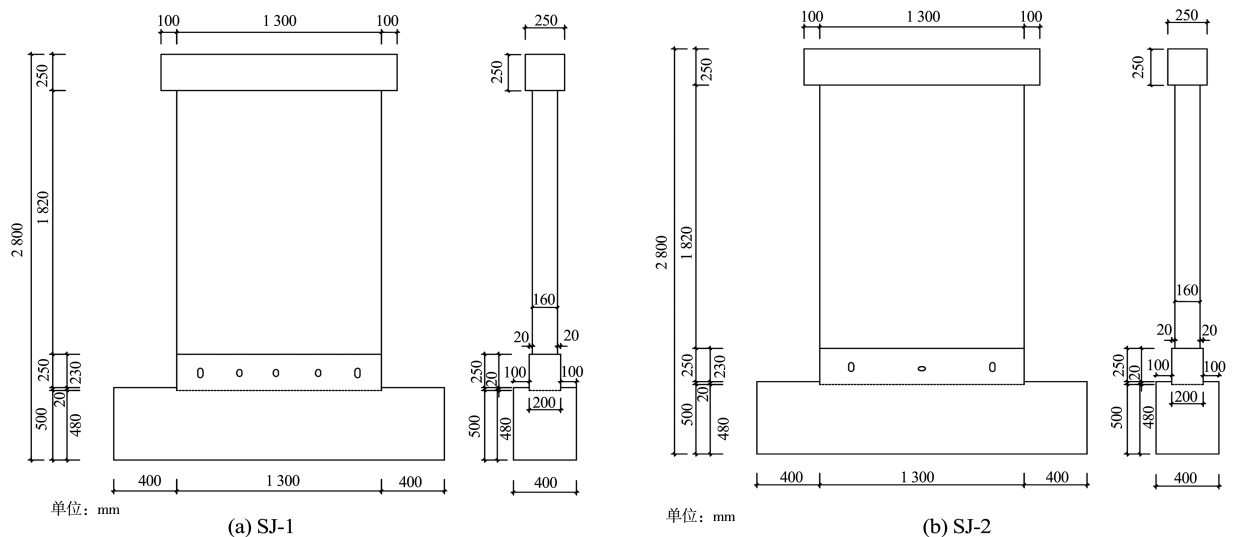


图1 新型装配式剪力墙尺寸图

Fig.1 Dimensions of the new prefabricated shear wall

1.1 等效平面桁架模型的初步建立

本研究将所设计的新型装配式剪力墙^[1]划分为上部钢筋混凝土剪力墙和水平连接装置两部分。将上部钢筋混凝土剪力墙划分为由水平方向杆、竖直方向杆和斜方向杆组成的一个个等效平面桁架单元。矩形平面微元体单元和等效平面桁架单元

均为混凝土材料,长宽比均为 a/b ,厚度均为 t ,其中等效平面桁架单元内部斜杆的长度 $c = \sqrt{a^2+b^2}$ 。等效平面桁架单元横向杆的线刚度为 k_1 ,竖向杆线刚度为 k_2 ,斜向杆线刚度为 k_3 ,截面面积分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 。矩形平面微元体单元与等效平面桁架杆件应变如图2所示。

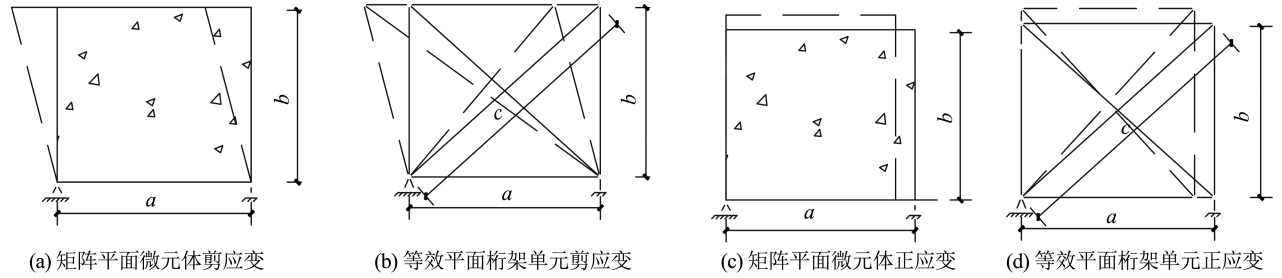


图2 矩形平面微元体单元与等效平面桁架杆件应变

Fig.2 Rectangular plane microelement element and equivalent plane truss member strain

根据正应变等效分析,通过刚度等效原则即可求得:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{t(b^2 - a^2\nu)}{2b(1 - \nu^2)} \\ A_2 = \frac{t(a^2 - b^2\nu)}{2a(1 - \nu^2)} \\ A_3 = \frac{c^3\nu t}{2ab(1 - \nu^2)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} k_1 = \frac{Et(b^2 - a^2\nu)}{2ab(1 - \nu^2)} \\ k_2 = \frac{Et(a^2 - b^2\nu)}{2ab(1 - \nu^2)} \\ k_3 = \frac{Ec^2\nu t}{2ab(1 - \nu^2)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, E 为弹性模量, ν 为泊松比。根据剪应变等效分析求得斜杆的等效面积 A'_3 和刚度 k'_3 分别为:

$$A'_3 = \frac{c^3 t}{4ab(1 + \nu)} \quad (3)$$

$$k'_3 = \frac{Ec^2 t}{4ab(1 + \nu)} \quad (4)$$

由于新型装配式剪力墙墙体主要以抗剪切变形为主,因此取 A'_3 、 k'_3 作为后续剪力墙等效平面桁架模型中斜杆的截面面积和刚度。

通过矩阵位移法集成得出上部剪力墙的有限元模型。借鉴传统钢筋混凝土结构分离式有限元建模方法,在上述剪力墙简化模型中引入钢筋单元^[11],构成钢筋混凝土剪力墙等效平面桁架模型。其中,钢筋单元采用杆单元,因为钢筋是热轧带肋钢筋,所以视作钢筋和混凝土之间粘结稳定,在建立模型时将钢筋杆单元和混凝土杆单元共结点,不插入连接单元。水平连接装置采用实体建模,完成后通过有限元软件 ANSYS 中的 CP 命令将上部墙体等效平面桁架模型和水平连接装置进行节点固结,所得新型装配式剪力墙有限元模型如图3所示。

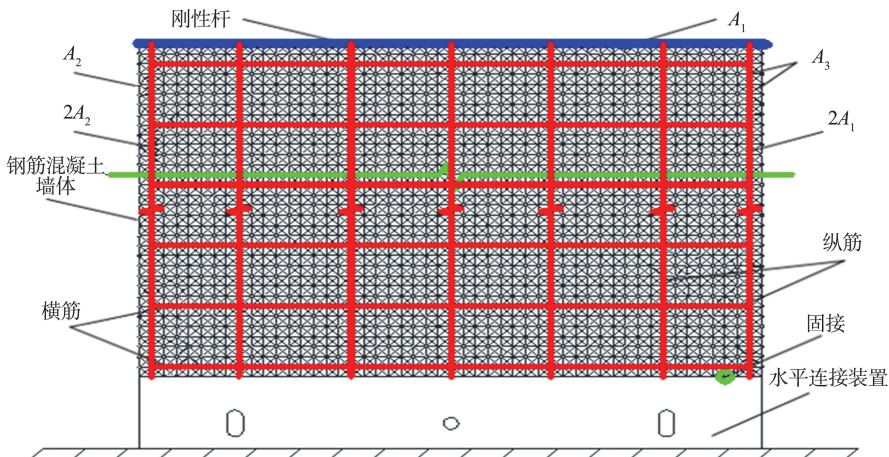


图3 新型装配式剪力墙有限元模型

Fig.3 Schematic diagram of finite element model of new fabricated shear wall

在所建新型装配式剪力墙等效平面桁架模型中,同一种单元只能赋予一种材料本构,考虑到混凝土的抗压强度和抗拉强度相差悬殊,并且有限元软件 ANSYS 中默认杆单元的受压和受拉本构模型一致,因此需要对混凝土杆单元受压和受拉本构模型分别进行定义。具体实施方法为:在加载前对所有等效平面桁架混凝土杆件赋予受压本构模型,加载开始对该荷载子步计算后,对所得混凝土杆件应变进行判断,如果杆件应变为正,即受拉状态,将其杆件编号储存下来,在进行下一荷载子步前将所有受拉杆件赋予受拉本构模型,在此过程中受压杆件的本构模型保持不变。按照上述过程,对每一荷载子步进行一次重复操作,直至加载到预定荷载。

1.2 杆单元的本构关系

在进行多重荷载作用下结构的有限元分析时,可将比较成熟的混凝土材料单轴本构模型^[12]赋予等效平面桁架单元中,避免使用复杂的多参量多轴本构模型,因此本研究水平和垂直方向的混凝土杆单元采用单轴本构模型。虽然模型中各杆件的应力-应变关系各不相同,但与混凝土的剪应力-剪应变关系、抗拉应力-应变关系和抗压应力-应变关系具有关联,并且在受力过程中各个杆单元的应变具有比例关系,为了使等效平面桁架单元中某一杆单元1在达到峰值应变时,其与杆单元1应力-应变关系有关的杆单元应变也达到峰值,即保证杆单元在达到峰值应力后,等效平面桁架单元中的杆件变形协调,因此根据强度等效准则求得模型中各杆件的应力-应变关系,并据此对混凝土的单轴应力-应变关系进行修改,以适用于本研究中新型装配式剪力墙等效平面桁架模型。混凝土的剪应力-剪应变关系采用纯剪力作用下混凝土强度和变形的关系^[13],钢材采用两线段的理想弹塑性模型^[12]。

根据强度等效准则求模型中各杆件的应力-应变关系的具体过程如下。

(1)斜向的混凝土杆单元主要用于模拟混凝土的抗剪性能,将单元的压应力-应变关系与垂直于单元轴的拉伸应变 ε_t 进行耦合,受力响应比水平和垂直混凝土杆单元复杂。如图2中纯剪切状态下,矩形平面微元体和等效平面桁架单元在相同剪应力下的剪应变相等,即 $\gamma = \Delta/h$,其中 Δ 为节点 x 方向的水平位移, h 为单元 y 方向的长度, γ 为微元体的剪应变。由变形协调原理可知,等效平面桁架单

元中水平杆和垂直杆的应变均为0,斜杆的应变为 $\gamma/2$,根据强度等效原则^[11],取斜杆的应力-应变关系

$$\sigma_{ob}(\varepsilon) = \tau(2\gamma), \quad (5)$$

式中 τ 为混凝土的剪应力。

(2)通过刚度等效将矩形平面微元体简化为等效平面桁架单元可知,在相同轴向压力的作用下(图2),等效平面桁架单元 x 方向杆单元的受压应变为 ε_0 时,由于泊松比效应, y 方向的受拉应变为 $\nu\varepsilon_0$,根据变形协调原理可知斜杆的应变为 $(1-\nu)\varepsilon_0/2$ 。当斜杆达到极限应变 $\gamma_p/2$ 时,由上述关系可知, x 方向杆单元的受压应变为 $\gamma_p/(1-\nu)$, y 方向杆单元的受拉应变为 $\nu\gamma_p/(1-\nu)$ 。为了考虑斜杆单元应变对 x 方向和 y 方向杆单元的影响,通过抗压强度等效分析可知, x 方向和 y 方向杆单元应力-应变关系中对应于混凝土剪应力-剪应变关系式中的极限应变分别为 $\gamma_p/(1-\nu)$ 和 $\nu\gamma_p/(1-\nu)$,由此可得, x 方向的抗压应力-应变关系为:

$$\sigma_{x,c}(\varepsilon) = \sigma_c(\varepsilon) - \tau((1-\nu)\varepsilon), \quad (6)$$

此时 y 方向抗拉应力-应变关系为:

$$\sigma_{y,t}(\varepsilon) = \tau\left(\frac{1-\nu}{\nu}\varepsilon\right). \quad (7)$$

同理,当沿 x 方向施加拉应力时, x 方向杆件受拉, y 方向杆件受压,可得 x 方向的抗拉应力-应变关系为:

$$\sigma_{x,t}(\varepsilon) = \sigma_t(\varepsilon) - \tau((1-\nu)\varepsilon), \quad (8)$$

此时 y 方向抗压应力-应变关系

$$\sigma_{y,c}(\varepsilon) = \tau\left(\frac{1}{\nu}\varepsilon\right). \quad (9)$$

1.3 其他判定准则

1.3.1 新型装配式剪力墙等效平面桁架模型裂缝处理

对于结构裂缝模型的传统定义已经不适用于本研究中的新型装配式剪力墙等效平面桁架模型,因而对此做出如下处理:当混凝土水平或垂直杆单元达到极限抗压应变 ε_u 时,即认为其受压破坏,将相应方向杆件做压裂处理,并释放单元内力,重新进行迭代计算,同时将该杆件标识出来,以显示裂缝位置。一般混凝土极限应变 ε_u 为0.003~0.004,本研究取 $\varepsilon_u = 0.0038$ ^[12],同时取极限抗压应变 $\varepsilon_{c,p} = 0.002$ 。当混凝土水平或垂直杆件达到极限抗拉应变 $2\varepsilon_{t,p}$ 时,即认为其受拉破坏,将相应方向杆件做拉断处理,并释放单元内力,为了将拉应力全部释放,同时将斜杆进行拉断处理,重新进行迭代

计算,此时仅将水平或竖直杆件标识出来,斜杆不再标识,以显示裂缝位置。

1.3.2 新型装配式剪力墙等效平面桁架模型破坏准则

混凝土杆单元的压裂和拉断处理均通过 ANSYS 中的生死单元命令实现。当混凝土杆件达到极限抗压应变和极限抗拉应变时,将该杆件刚度系数乘上一个很小的系数(系统默认值为 1.0×10^{-6}),从而将其“杀死”。

2 新型装配式剪力墙等效平面桁架模型及有限元实体的建立

2.1 新型装配式剪力墙等效平面桁架模型的建立

在建立 SJ-1、SJ-2 等效平面桁架模型时,采用尺寸 $26 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$ 的单元对上部墙体进行网格划分,即水平方向有 50 个单元,竖向有 75 个单元,所涉及参数的设置按照上文提出的建模方法完成,最终所建等效平面桁架模型如图 4 所示。

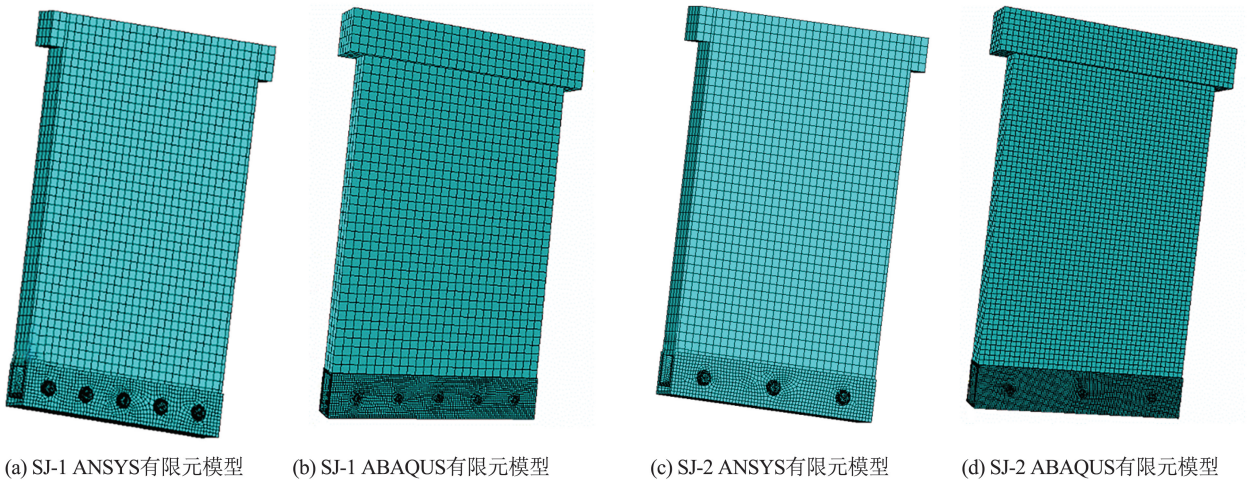


图 5 新型装配式剪力墙有限元实体模型

Fig.5 Finite element solid model of new fabricated shear wall

3 新型装配式剪力墙等效平面桁架模型有效性分析

3.1 有限元模型加载制度

为验证新型装配式剪力墙等效平面桁架模型的有效性,本研究对 2 个新型装配式剪力墙抗震性能进行试验,获得屈服荷载、屈服位移、峰值荷载和峰值位移进行对比。有限元模型加载制度如图 6 所示。按照轴压比 $n=0.25$ 控制竖向荷载,根据文献 [14] 计算得到竖向荷载 $N=619.7 \text{ kN}$,之后进行水

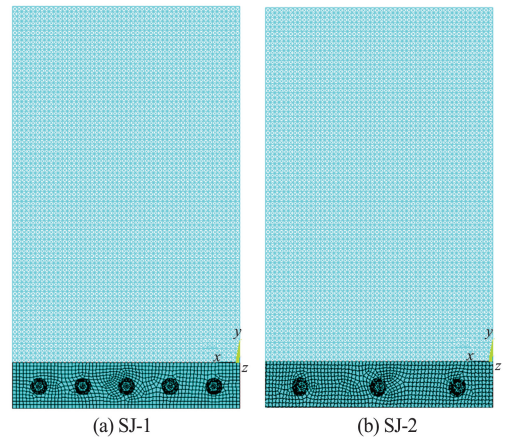


图 4 等效平面桁架模型

Fig.4 Equivalent plane truss model

2.2 新型装配式剪力墙有限元实体模型的建立

采用有限元软件 ANSYS 和 ABAQUS 对新型装配式剪力墙进行实体建模。对于新型装配式剪力墙的实体模型,模型尺寸、钢筋配筋均与文献 [1] 中的试件相同,只是具体的建模方法和参数赋予等不同。SJ-1 与 SJ-2 网格划分后的有限元实体模型如图 5 所示。

平位移加载,在此过程中分为 2 个阶段:对单个高强螺栓施加 $110 \text{ kN}^{[15]}$ 的预紧力后进行单调往复 15 mm 的位移,每一级单个高强螺栓预紧力的增量为 20 kN ,直至单个高强螺栓预紧力施加至 260 kN ;在单个高强螺栓预紧力施加至 260 kN 后,水平位移加载从 15 mm 按 $\Delta=5 \text{ mm}$ 递增,直至试件破坏或试件承载力下降至峰值荷载的 85% 时停止加载。本研究提出的等效桁架模型、ANSYS 实体模型和 ABAQUS 实体模型的加载制度均与现场试验相同^[1]。

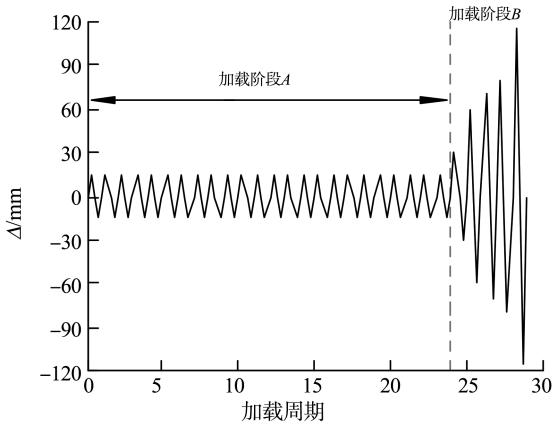


图6 有限元模型加载制度
Fig.6 Loading system

3.2 计算时间对比

不同模型的计算时间对比如表1所示。由表1可知,等效桁架模型的计算效率相较于实体模型计算效率大幅提升,其中相较于 ANSYS 有限元模型的平均计算时间降低了 60%,相较于 ABAQUS 有限元模型平均计算时间降低了 64%。可见新型装配式剪力墙等效平面桁架模型可以大幅减少计算

时间,提高了计算效率。

表1 不同模型的计算时间对比
Table 1 Comparison of calculation time of different models

试件	计算时间/s		
	ANSYS 实体模型	ABAQUS 实体模型	等效平面 桁架模型
SJ-1	19 806	22 507	7 460
SJ-2	23 780	25 556	10 081

3.3 结果对比

3.3.1 特征点和荷载-位移曲线的对比

表2、3和图7展示了SJ-1和SJ-2试验和各有有限元模型的荷载特征点及荷载-位移曲线的对比,其中不同荷载与位移的相对误差为模拟结果和试验结果之差与试验结果的比值。由于SJ-1和SJ-2在正式的单调加载之前进行了单调反复加载试验,造成剪力墙产生塑性变形,甚至开裂,所以在单调加载起点处对应的荷载不为0,即试件有残余荷载,其对分析试件的整体承载能力影响不大。实体模型屈服点的确定采用等能量法^[16-17]。

表2 SJ-1试验和模拟的特征点对比

Table 2 Comparison of characteristic points of SJ-1 test and simulation

数据来源	屈服 荷载/kN	屈服荷载 相对误差/%	屈服 位移/mm	屈服位移 相对误差/%	峰值 荷载/kN	峰值荷载 相对误差/%	峰值 位移/mm	峰值位移 相对误差/%
试验	269.63		73.00		387.12		99.21	
ANSYS 实体模型	285.46	5.87	80.89	10.81	380.14	-1.80	107.10	7.95
ABAQUS 实体模型	273.05	1.27	82.03	12.37	375.13	-3.10	98.13	-1.09
等效平面桁架模型	293.04	8.68	81.75	11.99	375.86	-2.91	99.84	0.64

表3 SJ-2试验和模拟的特征点对比

Table 3 Comparison of characteristic points of SJ-2 test and simulation

数据来源	屈服 荷载/kN	屈服荷载 相对误差/%	屈服 位移/mm	屈服位移 相对误差/%	峰值 荷载/kN	峰值荷载 相对误差/%	峰值 位移/mm	峰值位移 相对误差/%
试验	269.30		90.00		376.19		123.00	
ANSYS 实体模型	280.62	4.20	105.63	17.37	370.22	-1.58	134.42	9.28
ABAQUS 实体模型	273.03	1.39	84.47	-6.14	377.94	0.47	111.07	-9.70
等效平面桁架模型	281.90	4.68	99.46	10.51	358.15	-4.80	120.90	-1.71

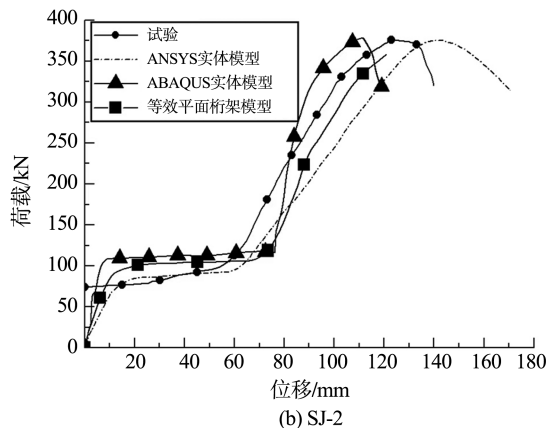
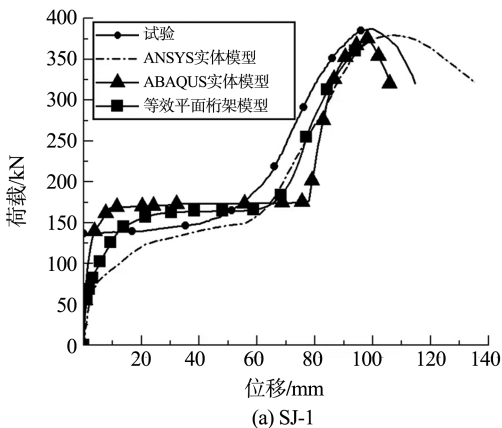


图7 试验和模拟的位移曲线对比

Fig.7 Comparison of displacement curves between test and simulation

由表2、3和图7可知,不同方式获得的 SJ-1 和 SJ-2 荷载-位移曲线形状和发展趋势大致相同,水平连接装置的受力状况可以分为3个阶段:静摩擦阶段、转动-滑动摩擦阶段和限位-静摩擦阶段。等效平面桁架模型计算结果与试验特征荷载平均相对误差为4.0%,与 ANSYS 和 ABAQUS 传统有限元模拟结果特征荷载平均相对误差分别为2.3%和2.7%。对于特征位移,模拟与试验误差均较大,最

大为12.3%。

3.3.2 应力云图对比

为直观显示新型装配式剪力墙等效平面桁架模型与实体模型模拟效果之间的关系,以 SJ-1 为例,对模拟云图及裂缝发展过程进行对比。

图8和图9分别展示了不同模型中受压区混凝土和受压区钢筋的状态。

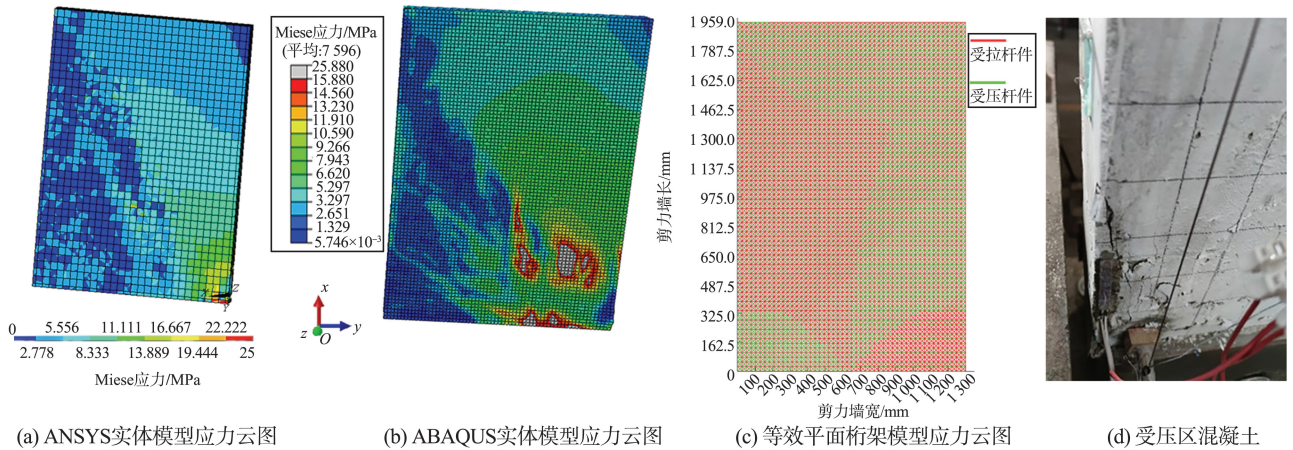


图8 不同模型的混凝土应力云图与受压区混凝土状态

Fig.8 Stress nephogram of concrete with different models and concrete state in compression zone

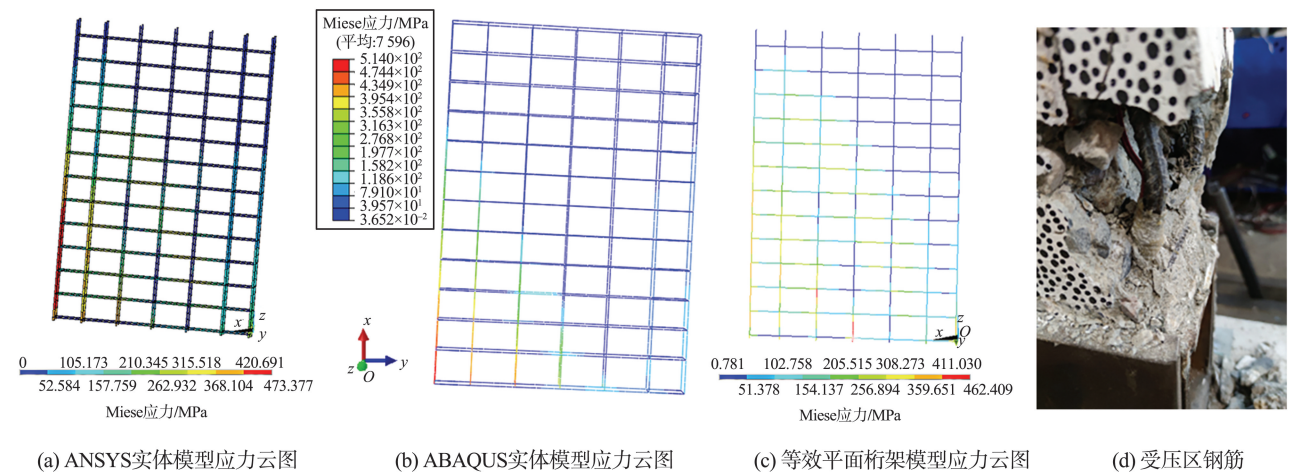


图9 不同模型的钢筋应力云图与受压区钢筋状态

Fig.9 Stress nephogram of reinforcement of different models

由图8可知,最大应力在受压区的墙角,并依次向墙体中部区域扩散,这和试验中墙体受压区被压碎的现象较为贴合;由图9可知,3个模型受拉区边缘的竖向钢筋均已屈服,可以较好地反映新型装配式剪力墙在极限状态下应力分布情况。

3.3.3 裂缝发展对比

图10和图11展示了不同模型和试验的裂缝分布情况,分析可知,SJ-1在极限状态下的破坏形式

为剪切破坏,其中 ANSYS 中的 CRACK CRUSH 是分布式裂缝,仅能对裂缝分布的大致区域进行判断。ABAQUS 的受拉损伤云图能够较好地表示实体单元的损伤程度,以近似地表示受拉裂缝分布情况,但这需要将其单元网格划分得很小才可以得出相对精确的结果,导致计算时长增加,代价过高。因此,通过等效平面桁架模型中单元的生死表示混凝土的拉裂和压碎,可以更加直观地看出裂缝的分布。

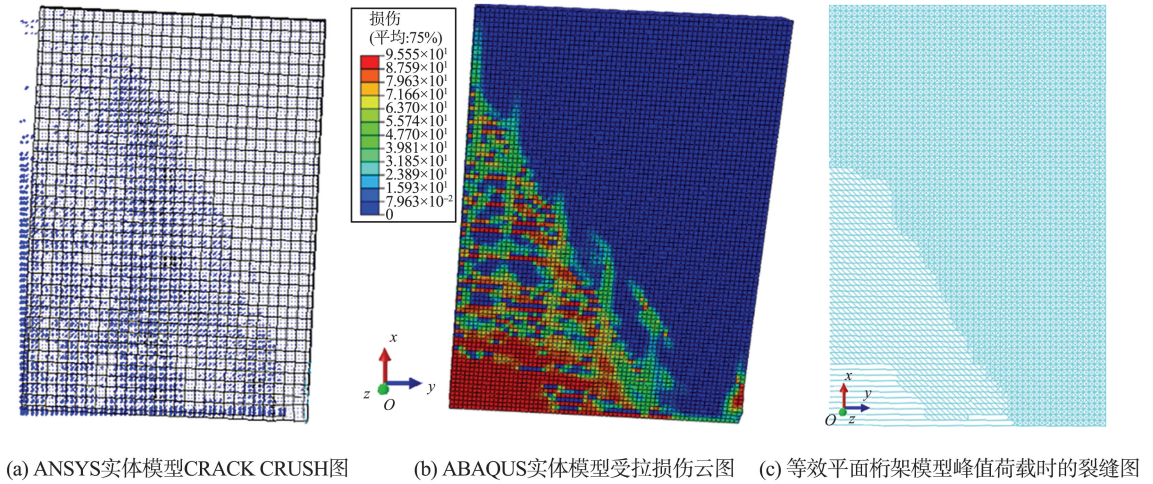


图 10 不同模型的受拉裂缝趋势
Fig.10 Trend of tensile cracks of different models

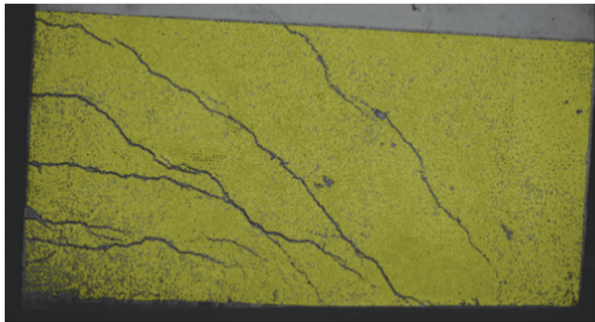


图 11 正立面的受拉裂缝
Fig.11 Tension cracks on front elevation

4 结论

本研究运用刚度等效原则等将新型装配式剪力墙的上部墙体进行简化,得到相应的等效平面桁架模型,利用该建模方法及不同有限元软件分别建立试验所用新型装配式剪力墙结构,对结果进行对比分析,所得结论如下。

(1)为通过强度等效原则,对等效平面桁架单元中杆件的应力-应变关系进行修正,以保证杆单元在达到峰值应变时,等效平面桁架单元变形协调,从而真实反映混凝土材料的强度和变形性能。

(2)引用极限应变破坏准则对各杆件在达到极限状态时的破坏准则进行定义,提出一种适用于该新型装配式剪力墙等效平面桁架模型的裂缝处理方法。

(3)将等效平面桁架模型、常规有限元软件模拟、现场试验所得结果进行对比,结果表明新型装配式剪力墙等效平面桁架模型能够较好地完成试件受力性能的模拟,平均计算时间较 ANSYS 和

ABAQUS 缩短了 60%和 64%,并且计算精度亦在工程允许范围之内。

参考文献:

[1] 樊禹江,葛俊,艾斌平,等. 新型装配式剪力墙抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(5): 78-87.
FAN Yujiang, GE Jun, AI Binping, et al. Experimental study on seismic behavior of a new fabricated shear wall [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(5): 78-87.

[2] 樊禹江,黄欢欢,廖凯,等. 新型装配式剪力墙抗震性能数值模拟与起滑荷载分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 41-50.
FAN Yujiang, HUANG Huanhuan, LIAO Kai, et al. Numerical simulation on seismic performance and slip load analysis of new prefabricated shear walls[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(3): 41-50.

[3] 李龙龙. 带肋钢筋与混凝土粘结滑移本构关系的理论和试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016.
LI Longlong. Theoretical and experimental study on bond stress-slip relationship between ribbed bar and concrete [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2016.

[4] 郑山锁,裴培,张艺欣,等. 钢筋混凝土粘结滑移研究综述[J]. 材料导报, 2018, 32(23): 4182-4191.
ZHENG Shansuo, PEI Pei, ZHANG Yixin, et al. Review of research on bond-slip of reinforced concrete [J]. Materials Reports, 2018, 32(23): 4182-4191.

[5] PANAGIOTOU M, RESTREPO J, SCHOETTLER M, et al. Nonlinear cyclic truss model for reinforced concrete walls[J]. Journal of Building Engineering, 2012, 109

- (2): 205-214.
- [6] 桂静. 基于等效桁架模型的钢筋混凝土结构数值分析[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
GUI Jing. Numerical analysis of reinforced concrete structures based on equivalent truss model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [7] YUAN Q, WANG Z H, LI H H, et al. Experimental study on seismic performance of new-type fabricated shear wall with mortar connection[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 103103.
- [8] ÁLVAREZ R, RESTREPO J I, PANAGIOTOU M. RC wall plastic hinge out-of-plane buckling: analysis using the nonlinear beam-truss model[J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(12): 04020274.
- [9] CARRILLO J, CUBILLOS E, PARRA P F. Modeling the seismic response of thin concrete walls using the non-linear beam-truss model[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 52: 104424.
- [10] DENG X, KOUTROMANOS I, MURCIA-DELISO J, et al. Nonlinear truss models for strain-based seismic evaluation of planar RC walls [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(11): 2939-2960.
- [11] 张明. 等效桁架模型非线性有限元的研究与应用[D]. 长沙:湖南大学, 2012.
ZHANG Ming. Research and application of equivalent truss model on nonlinear finite element[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [12] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [13] 过镇海, 王传志. 多轴应力下混凝土的强度和破坏准则研究[J]. 土木工程学报, 1991, 24(3): 1-14.
GUO Zhenhai, WANG Chuanzhi. Strength and failure criterion of concrete under multiaxial stress[J]. China Civil Engineering Journal, 1991, 24(3): 1-14.
- [14] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [16] 殷晓三. 无明显屈服特征构件屈服点的确定与评价[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(3): 143-150.
YIN Xiaosan. Evaluation and determination methods on yield point of structural components without obvious yield feature[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(3): 143-150.
- [17] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36-46.
FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping, et al. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36-46.

(编辑:孙亚彤)