

Finite Element Analysis of Mechanical Behavior of New Block Masonry under Shear-Compression

Ziyu Wang*, Honggang Lei#

College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi
Email: 845189758@qq.com, #lhgang168@126.com

Received: May 2nd, 2020; accepted: May 25th, 2020; published: Jun. 1st, 2020

Abstract

Mechanical properties are one of the important properties of fabricated wallboards. Different structural forms have different effects on the mechanical properties of the wallboard. This paper designs a new type of block with protruding ribs (shear-resistant keys) for easy masonry, and uses Ansys Workbench finite element software to build new blocks for traditional block masonry, new block masonry and end angled steel. The mechanical properties of masonry structures under shear compression are analyzed and compared, aiming to explore a new type of block masonry stress system. The results show that the total deformation, equivalent stress, maximum stress and equivalent strain of the new block masonry with new ribbed masonry and end angled steel are increased compared with the traditional masonry. However, compared with the total deformation and equivalent strain, the equivalent stress and maximum stress increase significantly, which indicates that the new block masonry has good bearing capacity and good deformability under shear compression.

Keywords

Assembled Structure, New Masonry, Finite Element, Mechanical Properties

剪压复合作用下新型砌体受力性能有限元分析

王紫瑜*, 雷宏刚#

太原理工大学土木工程学院, 山西 太原
Email: 845189758@qq.com, #lhgang168@126.com

收稿日期: 2020年5月2日; 录用日期: 2020年5月25日; 发布日期: 2020年6月1日

*第一作者。

#通讯作者。

摘要

力学性能是装配式墙板的重要性能之一, 不同的构造形式对墙板的力学性能有着不同程度的影响。本文设计了一种方便砌筑的带突肋(抗剪键)的新型砌块, 并采用Ansys Workbench有限元软件, 对传统砌块砌体、新型砌块砌体、端部加角钢的新型砌块砌体结构在剪压复合作用下的受力性能进行了分析对比, 旨在探索一种新型砌块砌体受力体系。研究表明: 与传统砌体相比, 新型砌块砌体和端部加角钢的新型砌块砌体的总变形、等效应力、剪切应力和等效应变都有所增加, 但相比于总变形和等效应变而言, 等效应力和剪切应力增加显著, 说明新型砌块砌体在剪压复合作用下, 具有良好的承载能力和较好的变形能力。

关键词

装配式结构, 新型砌体, 有限元分析, 力学性能

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济社会的发展以及装配化的快速进行, 装配式住宅受到建筑业的普遍关注, 其中钢结构由于预制程度高、施工方便等优点, 成为了装配式建筑中的主要发展对象, 但目前装配式结构大多是钢骨架, 而一个完整的建筑只有钢骨架是无法满足使用功能的, 因此, 与之配套的墙板体系应运而生。

国内外一些学者对墙板的受力性能做了相关研究, Narayanan N et al. [1]认为砌体的抗剪强度主要取决于砂浆和砌块之间的粘结强度; 一种带暗支撑的水平叠合剪力墙[2]呈现出良好的整体性, 具有和全现浇剪力墙相当的承载力; 对于钢板混凝土组合墙体[3]: 增加钢板厚度可明显增加组合墙体的承载力和耗能能力; 而对于加气混凝土承重墙[4]而言: 砌块强度的变化对墙体水平承载能力的影响较为明显, 而粘结强度的增加对水平承载能力的影响不明显。另外, 有研究表明, 十字形截面[5]在水平荷载作用下, 随着高宽比的增加, 墙体的受力状况从以剪切为主转变为以弯剪为主。高淑玲等[6]设计了不同“抹灰 + 砌筑”组合的墙体, 研究了 ECC 和 PVA 纤维砂浆对砌体抗剪性能、刚度以及延性的提升效果。结果表明: 相比于传统抹灰砂浆砌体墙, PVA 纤维抹灰砂浆使墙体抗剪强度提高了 12%, ECC 抹灰砂浆砌体的抗剪强度提高了 50%, 二者均表现出较好的抵抗变形能力; 同时, 一些学者[7]指出自保温暗骨架承重墙的破坏分为弯曲型、剪切型、剪切 - 弯曲型三种, 并提出了自保温暗骨架承重墙的抗震设计建议与构造措施。

在上述背景下, 本文建立了三种非线性有限元的砌体模型, 对比了传统砌块砌体、新型砌块砌体和端部加角钢的新型砌块砌体在剪压复合作用下的力学性能。旨在为新型砌块砌体的设计提供思路, 同时解决装配式住宅中配套的墙板问题。

2. 精细化有限元模型的建立与参数设置

2.1. 建模理论

本模型采用 von-mises 屈服准则, 通过弹性本构矩阵、初始损伤准则及损伤演化准则的定义来描述界

面的应力-应变关系。界面出现损伤前, 忽略法向和切向刚度的耦合, 通过式(1)、(2)所示弹性方程矩阵确定界面应力与截面位移的关系[7]:

$$t = \begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Knn & Kns & Knt \\ Kns & Kss & Kst \\ Knt & Kst & Ktt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \delta \quad (1)$$

$$k_n = \frac{E_u E_m}{h_m (E_u - E_m)}, k_s = k_t = \frac{G_u G_m}{h_m (G_u - G_m)} \quad (2)$$

式中, k_n 、 k_s 、 k_t 为界面法向拉应力及两个切向剪应力; δ_n 、 δ_s 、 δ_t 为三个应力分量对应的相应位移; E_u 、 E_m 分别为砌块和砂浆的弹性模量, G_u 、 G_m 分别为砌块与砂浆的剪切模量[8]; h_m 为砂浆厚度。

接触面裂缝不断发展的结果是界面单元刚度和承载能力逐渐减小, 最终界面内聚力完全丧失致使块体分离。本文采用下式所示的损伤准则, 当接触面应力满足式(3)时, 接触面开始出现破坏[9]。

$$\left(\frac{F_n}{F_{nf}} \right) + \left(\frac{F_s}{F_{sf}} \right) \geq 1 \quad (3)$$

式中: F_n 、 F_s 分别为砌块接触面的正应力和剪应力; F_{nf} 、 F_{sf} 分别为砌块接触面的容许正应力和容许剪应力。

2.2. 非线性有限元模型的建立

本文采用 Ansys Workbench 界面进行模型的建立与求解, 与传统操作界面相比, Workbench 界面更加直观, 简便。首先在 Engineering Data 设置中添加混凝土材料, 然后在 Geometry 中添加草绘并采用添加冻结的方法建立砌块模型, 这样可以防止各砌块交叉接触的部位形成整体, 最后将砌块组装成整片墙体并设置为混凝土材料。在模型中引入接触单元来模拟砌块砂浆的作用, 接触类型选择摩擦接触 (Fricitonal), 摩擦系数取 0.7 [10]。

2.3. 非线性有限元模型的收敛控制

由于砌块与砂浆接触面之间的非线性和砌体材料的非线性原因, 需要使用非线性迭代法求解, 在非线形迭代求解过程中, 通常会遇到分析设置不准确而导致的计算不收敛问题, 从而影响仿真过程。因此, 本文采用以下设置方法来保证计算结果能有效收敛。

1) 网格尺寸: 几何建模完成后, 首先要对模型进行网格划分, 网格质量的好坏直接影响最终的计算结果, 网格尺寸过大会导致计算结果误差较大, 尺寸过小会导致计算难以收敛或结果不正确。因此本文采用规则的六面体网格, 设置网格尺寸为 20 毫米, 保证模型的网格选取及尺寸大小满足计算结果和精度要求。

2) 荷载数: 荷载步主要是为了满足灵活方便的施加不同种类荷载的要求而产生的, 荷载步过大或过小都会影响最终的计算结果。本文采用分级加载制度, 竖向荷载在 0~10 kN 之间均匀加载, 水平循环荷载在上皮砖上从 0~10 kN 之间往复加载, 每级增加 1.25 kN。

3) 其他设置: 通过激活分析选项中的弱弹簧、大变形、自动荷载步和非线性控制中的线性搜索选项, 在不影响计算精度的前提下加速计算的收敛速度, 提高计算效率。

3. 模型求解与分析

3.1. 三种模型的对比

本文中砌块尺寸采用统一的 180 mm × 280 mm × 220 mm; 墙体尺寸采用 840 mm × 180 mm × 660

mm。其中传统砌块为标准的长方体空心砌块；新型砌块厚 20 mm，顶部设置水平方向的突肋(抗剪键)，用来提高砌体的抗剪强度，抗剪键尺寸为 135 mm × 15 mm × 20 mm，距端部 70 mm；端部加角钢新型砌块砌体则是在上述基础上在砌体端部分别设置角钢来增强砌体的整体性。新型砌块及砌体如图 1 所示。

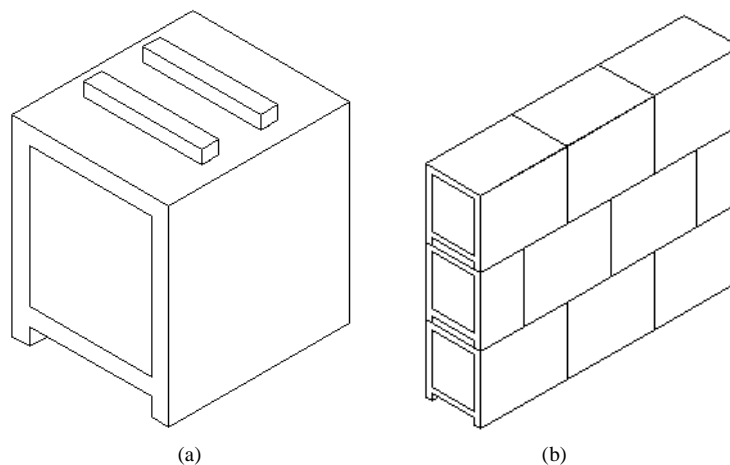


Figure 1. New types of blocks and masonry forms. (a) New block, (b) New block masonry

图 1. 新型砌块及砌体形式。(a) 新型砌块, (b) 新型砌块砌体

3.2. 结果与分析

通过有限元计算得到的三种墙体的总变形、等效应力、最大应力、等效应变结果见表 1，时间 - 位移曲线见图 2，三种砌体的变形图及最大应力图如图 3 所示。

Table 1. Comparison of mechanical properties of three masonry
表 1. 三种砌体的力学性能对比

项目	传统砌体	新型砌体	新砌体+角钢
总变形/mm	0.108	0.207	0.115
等效应力/MPa	1.806	4.354	12.413
等效应力/MPa	1.806	4.354	12.413
等效应变/MPa	1.02×10^{-5}	1.45×10^{-5}	7.26×10^{-5}

由表 1 可知，相比于传统砌体，新型砌块砌体的总变形和等效应变增加了接近一倍，等效应力和最大应力增加了 1.5 倍左右；而端部加角钢的新型砌块砌体总变形增加了 6.5%，等效应力、最大应力和等效应变却增加了五倍之多，说明在外界荷载作用下，新的结构形式可以最大限度的发挥材料的强度，砂浆和砌块之间的整体性增强，协同作用效果较好。由于新型砌块的上部具有类似于钢结构构件中抗剪键的作用，在砂浆破坏之后，下皮砖上部的抗剪键和上皮砖下部的突肋相互抵抗，砌体结构仍然具有部分抗剪能力并且可以抵抗部分形变；而传统砌体的破坏主要取决于砂浆层的破坏，一旦砂浆层被剪坏，整个砌体便沿通缝开裂，砌块还没有发挥全部的承载能力，墙体就已经破坏。因此在同的约束条件和荷载作用下，新型砌块砌体和端部加角钢的新型砌块砌体的强度被最大限度的利用，充分发挥了材料的力学性能。相应地，因为应力较大，所以二者的位移也大于传统砌块砌体，如图 2 中三种砌体的时间 - 位移曲线所示。

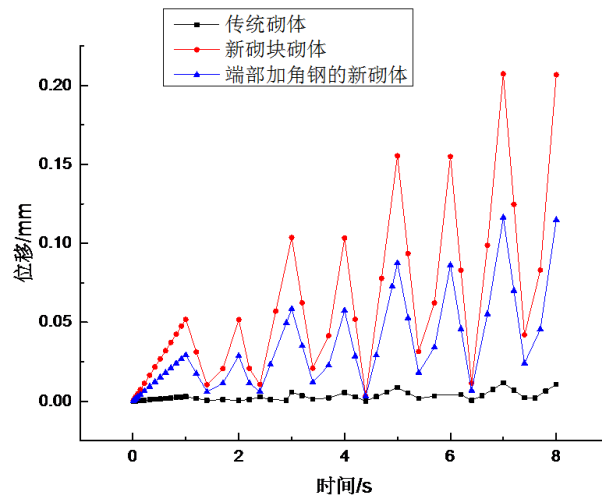
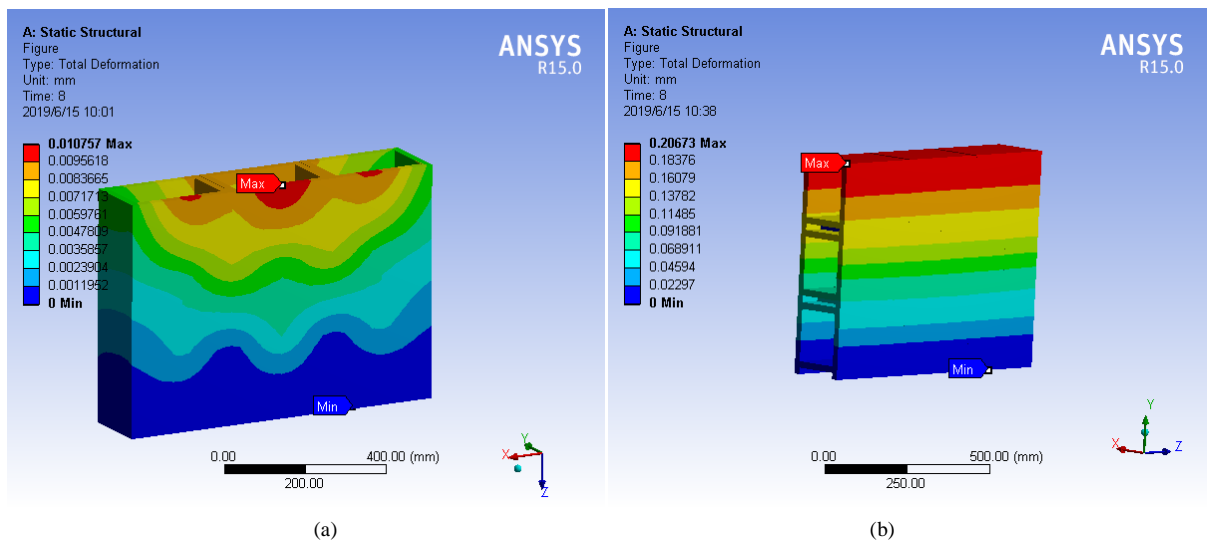


Figure 2. Time-displacement curves of three masonry
图 2. 三种砌体的时间 - 位移曲线

3.3. 三种墙体最大应力和极限位移的对比分析

由图 3(a)可知, 在均布荷载作用下, 传统砌块砌体的最大位移发生在受力截面的中部, 这是比较合理的; 而图 3(b)中新型砌块砌体由于砌块上方设置了抗剪键, 在砂浆失效之后仍具有一定的抗剪能力, 同时可以抵抗部分形变, 并且均匀分布在砌体上下皮砖之间, 类似于支撑构件, 因此最大位移发生在砌体的端部; 当在端部设置角钢以加强砌体的整体性后, 如图 3(c)所示, 由于角钢的增强作用, 砌体的最大位移又回到了砌体的中部。

图 3(d)、图 3(e)中砌体的最大应力均发生在受力位置附近上下皮砖的连接处, 即砂浆层所在位置, 只是存在中部和端部的区别, 砌体的整体性不强, 砂浆之间的传力效果不明显, 虽然新砌体所能承受最大应力已有较大程度的提升, 但是砌体的破坏仍然取决于砂浆层的强度; 而图 3(f)中在砌体端部增设角钢之后, 砌体所能承受的最大应力不但有显著提升, 而且最大应力发生在承载力较大的角钢处, 墙体的整体性增强, 上下皮砌块之间不只依靠灰缝传力, 角钢也参与了荷载的传递, 砂浆 - 砌体 - 角钢之间共同作用, 大大提高了砌体的承载能力。



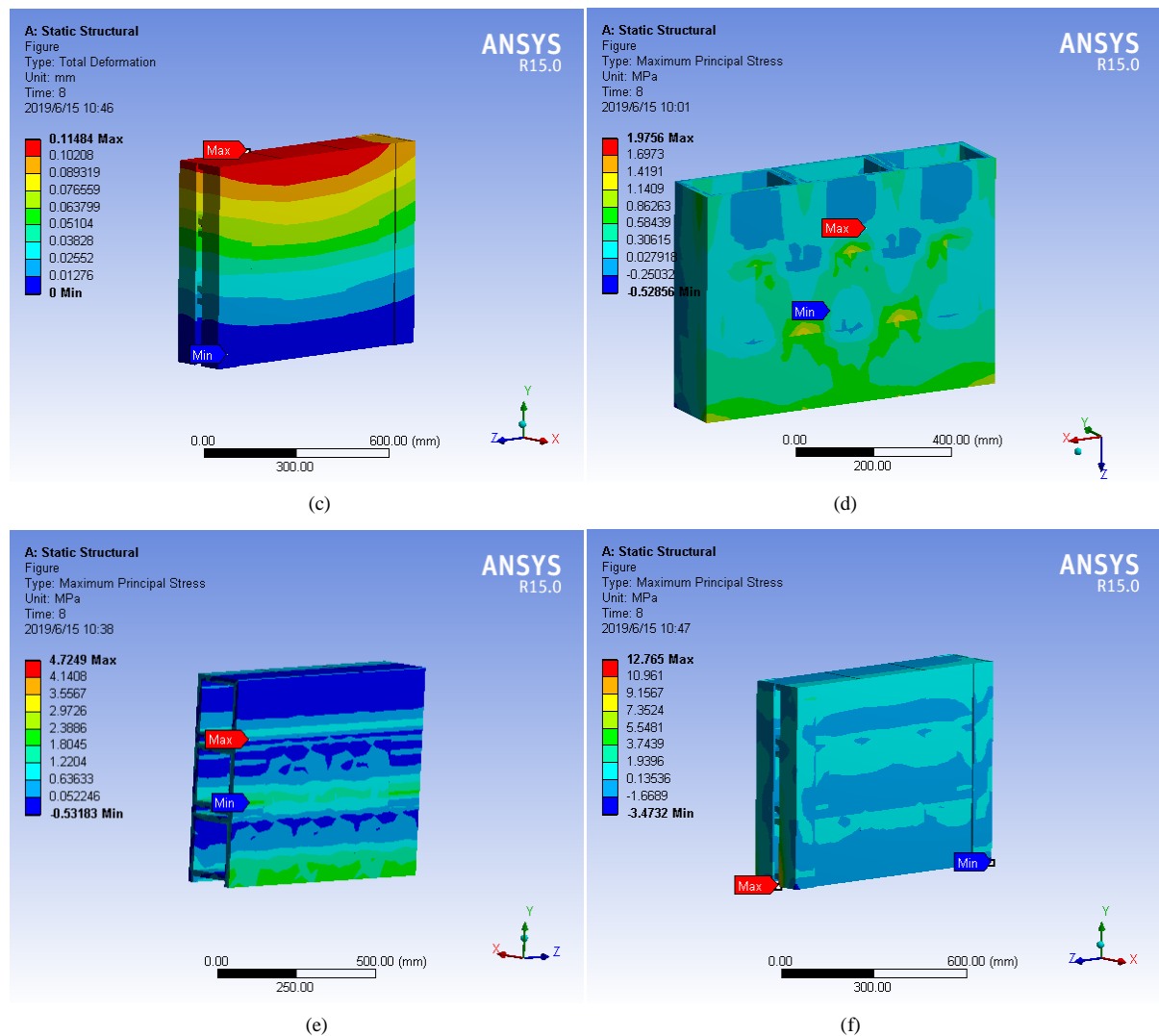


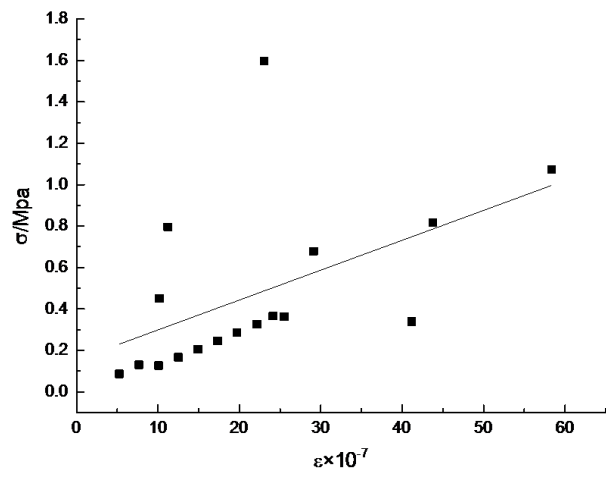
Figure 3. Three masonry total deformation maps and maximum stress maps. (a) Traditional masonry total deformation, (b) New masonry total deformation, (c) Total deformation of end angled steel masonry, (d) Traditional masonry maximum stress, (e) New masonry maximum stress, (f) Maximum stress of end angled steel masonry

图 3. 三种砌体总变形图及最大应力图。(a) 传统砌体总变形, (b) 新型砌体总变形, (c) 端部加角钢砌体总变形, (d) 传统砌体最大应力, (e) 新型砌体最大应力, (f) 端部加角钢砌体最大应力

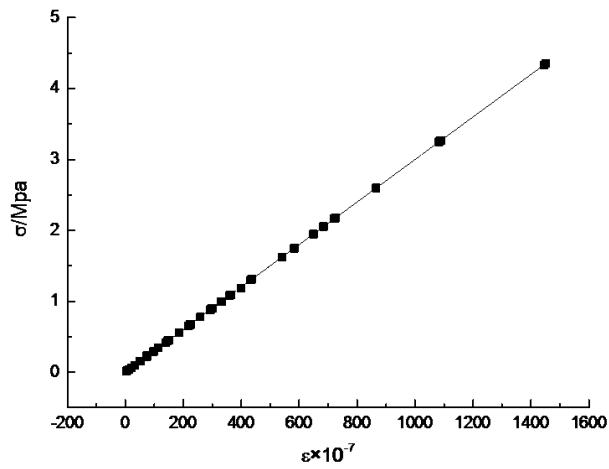
3.4. 新型砌体的抗剪承载力及应力集中

应力应变曲线反应了材料在外力作用下发生的脆性、塑性、屈服、断裂等各种形变过程, 在剪压复合作用下, 三种砌体破坏前的应力 - 应变曲线如图 4 所示。

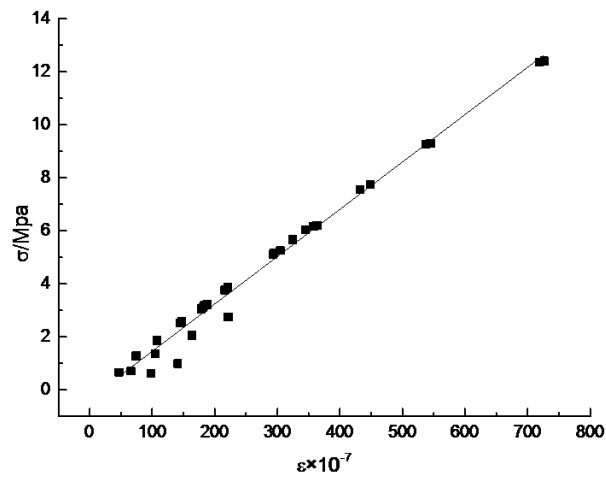
由图 4 可知, 在破坏之前, 三种砌体在剪压复合作用下的应力应变曲线均为线性上升的直线段, 即应变随应力的增加而增加[11]。其中传统砌块砌体的应力应变点较为离散, 原因可能是传统砌体的抗剪强度仅取决于砂浆和砌块之间的粘结强度, 而砂浆强度的离散性较大, 从而导致砌体的整体性差, 可靠度差, 因此应力 - 应变点离散且应力、应变值较低; 新型砌块砌体和端部加角钢的新型砌块砌体由于抗剪键的作用和端部角钢的加强作用, 在砂浆层破坏后, 抗剪键可以继续抵抗水平荷载, 相当于“二道防线”, 从而使结构的整体性增强, 承载能力增加, 抵抗变形的能力增加, 因此二者的应力应变点均匀的分布在应力 - 应变曲线的两边, 并且应力、应变值较大。



(a)



(b)



(c)

Figure 4. Stress-strain curves before three masonry failures. (a) Traditional block masonry, (b) New block masonry, (c) New masonry with angled steel

图 4. 三种砌体破坏前的应力 - 应变曲线。(a) 传统砌块砌体, (b) 新型砌块砌体, (c) 端部加角钢的新型砌体

3.5. 新型砌体的抗剪承载力及应力集中

砌体在水平荷载作用下的抗剪承载力根据《砌体结构设计规范》(GB50003-2011)计算所得, 如下式(4)所示。

$$f_{v,m} = k_5 \sqrt{f_2} \quad (4)$$

式中, $f_{v,m}$ 为砌体抗剪强度平均值(MPa); f_2 为砂浆抗压强度平均值(MPa), 本文取 M15 型砂浆; k_5 为与块体类别有关的系数, 取 0.125, 由(4)式算得砌体的抗剪强度为 0.484 MPa。新型砌块由于上部设置了抗剪键, 当外荷载作用时, 在截面较小且受力较大的位置会产生应力集中现象, 根据有限元计算的三种砌体抗剪强度及应力集中现象如图 5 所示。

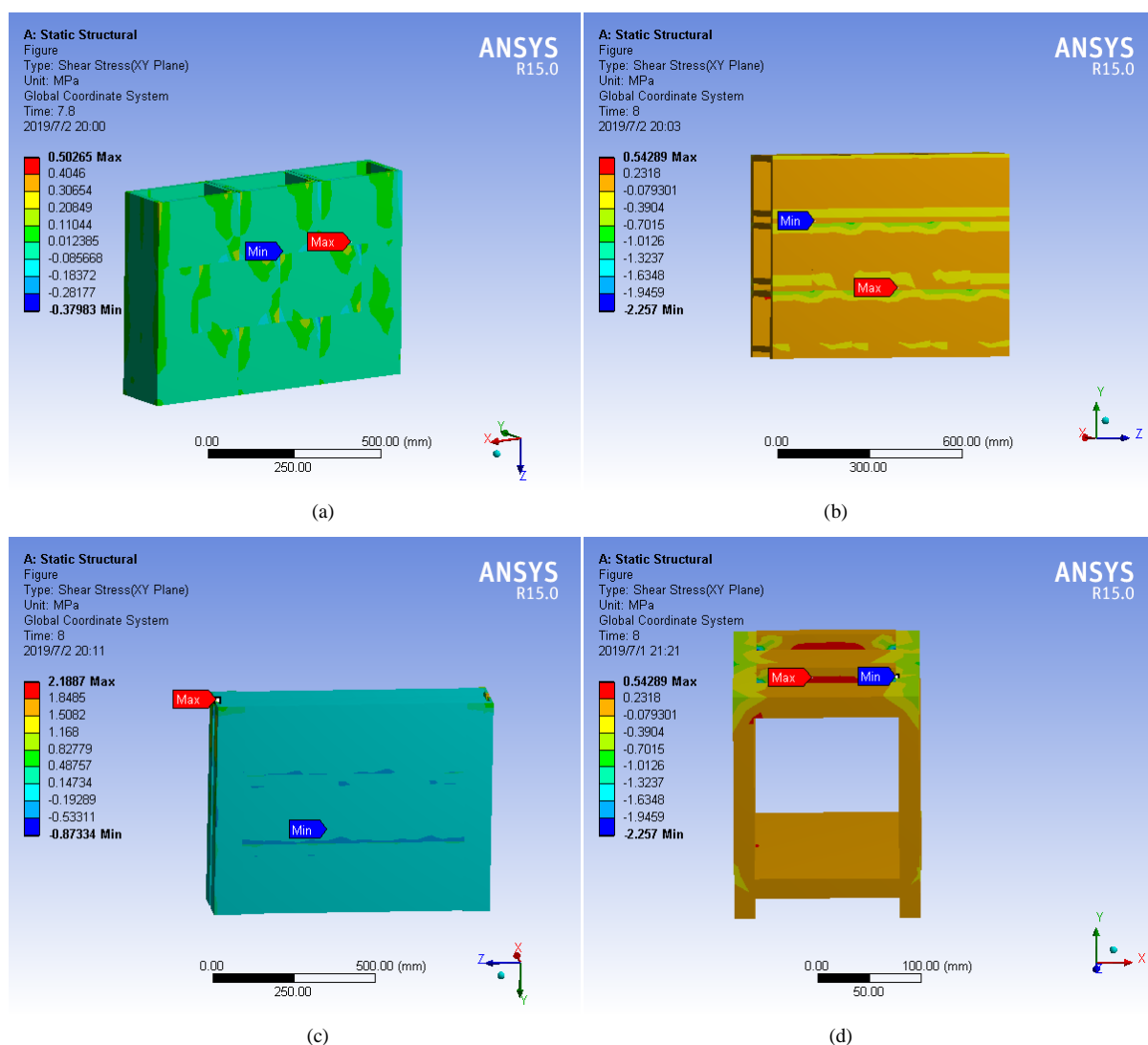


Figure 5. Shear strength and stress concentration of three masonry. (a) Traditional block masonry, (b) New block masonry, (c) End angled steel masonry, (d) Stress concentration of new blocks

图 5. 三种砌体的抗剪强度及应力集中。(a) 传统砌块砌体, (b) 新型砌块砌体, (c) 端部加角钢砌体, (d) 新型砌块的应力集中

由图 5(a)可知, 传统砌体有限元模型计算的抗剪强度值为 0.503 MPa, 与规范相比误差为 3.9%。说

明有限元计算结果可信度较高;由图 5(b)可知,新型砌块砌体有限元计算结果为 0.543 MPa,与规范结果相比,提高了 12.2%,说明新型砌块上方设置的抗剪键起到了抵抗水平荷载的作用,使砌体结构在砂浆层破坏后仍然具有一定的承载能力;由图 5(c)可知,端部加角钢的砌体由于钢材性能原因,剪应力主要由角钢承担,最大剪应力也发生在角钢布置处,为 2.189 MPa,与规范相比提高了三倍之多,使砌体结构的抗剪承载力大大加强。

由图 5(d)可知,在水平荷载作用下,新型砌块上部的抗剪键受力较大,在中部发生应力集中现象(而非端部),如图中红色部分所示,而一般情况下,应力集中现象发生在截面尺寸较小的角部或端部。出现上述情况的原因可能是:新型砌块抗剪键两侧距上部砖下部的突肋各有 2.5 mm 的距离,在实际砌筑过程中,抗剪键和突肋并没有直接接触,而是由砂浆填充了这部分缝隙,并通过砂浆传力,起到了一定缓冲作用,当砂浆破坏后,水平荷载全部由抗剪键承担,因此在中部出现应力集中现象。

4. 结论

1) 新型砌块砌体和端部加角钢的新型砌块砌体由于设置了抗剪键,砌块构造合理,新的结构形式可以最大限度的发挥材料的强度,砂浆和砌块之间的整体性增强,协同作用效果较好。

2) 三种砌体破坏前的应力-应变曲线均呈现出较好的线性增加关系,即应变随着应力的增加而增加。

3) 新型砌块砌体由于上部的抗剪键和下部的突肋相互抵抗,起到类似于钢结构构件中抗剪键的作用,因此在砂浆层破坏后仍然具有一定的抗剪能力和抵抗变形能力,同时在抗剪键中部也产生了应力集中现象,但仍是一种抗剪能力较好的新型砌体结构形式。

4) 新型砌块施工方便,模数统一,在抗剪键和突肋之间填满砂浆即可,灰缝质量容易保障,受工人水平的影响较低,同时新型砌块具有较大的孔隙率,材料强度利用率高,经济效益好,适合于装配式建筑体系。

参考文献

- [1] Narayanan, N. and Ramamurthy, K. (2000) Structure and Properties of Aerated Concrete: A Review. *Cement & Concrete Composites*, 22, 321-329. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00016-0)
- [2] 张亚卿. 带暗支撑水平拼接叠合剪力墙试验研究及有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [3] 葛琪, 熊峰, 何涛. 钢板混凝土组合墙试验和有限元分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(5): 885-895.
- [4] 陈程, 程才渊. 加气混凝土承重墙抗震性能试验与有限元分析[J]. 结构工程师, 2014(6): 151-156.
- [5] 张伟, 余国英, 程才渊. 十字形截面配筋砌体墙片的非线性有限元抗剪分析[J]. 结构工程师, 2009, 25(1): 21-25, 40.
- [6] 高淑玲, 靳嘉鹏, 郭亚栋. 纤维增强水泥基复合材料加固砌体墙抗剪性能试验研究及破坏机理分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(12): 174-180.
- [7] 史凤凯, 王少杰, 刘福胜, 等. 基于精细化有限元模型的自保温暗骨架承重墙抗震性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2018, 40(3): 40-47.
- [8] 刘桂秋, 施楚贤, 刘一彪. 砌体及砌体材料弹性模量取值的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(4): 29-32.
- [9] 李利莎, 杜建国, 张洪海, 等. 爆炸冲击震动对砖墙破坏作用的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(4): 459-466.
- [10] 《砌体结构设计规范》: GB50003-2001. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [11] 刘立鹏, 翟希梅, 张连振, 等. 砌体材料的应力-应变关系[J]. 低温建筑技术, 2007(6): 63-65.