

文章编号: 1674-599X(2020)03-0019-09

轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土墙受压性能研究

杨伟军, 罗瑞峰

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土结构是一种新型结构体系。为了解其力学性能, 采用 ABAQUS 有限元软件, 建立了轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土复合墙体的数值模型, 研究了复合墙体在轴压荷载作用下的受力状态和破坏模式, 并探究了不同开孔率的轻钢对复合墙体的影响。研究表明: 该复合墙体是一种受力性能良好的新型结构构件, 轻钢、钢板网和改性聚苯颗粒混凝土三者能较好的协同工作, 其受压破坏形态与框架填充墙类似。钢板网使复合墙体的极限承载力增加了 6%。因此, 作为竖向受力的承重复合墙体结构宜选用开孔率为 30% 左右。

关键词: 轻钢; 聚苯颗粒; 复合墙体; 受压性能; ABAQUS 有限元

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.004

Study on the compression performance of the composite wall with lightweight steel die net and modified expanded polystyrene granule concrete

YANG Wei-jun, LUO Rui-feng

(School of Civil Engineering, Changsha University of Sciences & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The composite wall with lightweight steel die net and modified expanded polystyrene granule concrete is a novel structure system. In order to understand its mechanical properties, the numerical model of the composite wall is established by the finite element software ABAQUS. The stress state and failure mode of composite wall under axial compression load are analyzed, and the influence of light steels with different opening ratios on the mechanical performances of composite wall is explored. The results show that the composite wall is a novel structural member with good mechanical performance, in which the lightweight steel, the die net and the modified expanded polystyrene granule concrete can work cooperatively. The failure pattern of the composite wall is similar to that of frame infilled wall. The die net increases the ultimate bearing capacity of the composite wall by 6%. It is suggested that the lightweight steel with the 30% open ratio should be selected as the vertical load-bearing component in the composite wall.

Key words: lightweight steel; expanded polystyrene granule; composite wall; compression performance; finite element

随着中国建筑工业规模的不断扩大, 建筑产业也需要转型升级。工业化建筑具有节材、节能、高品质和省工等优点, 因此, 建筑技术工业化是建筑业转型升级的突破口。《建筑业发展“十三五”规划》确定了建筑业绿色发展的目标。在 3 年内, 实现在新建建筑中, 绿色建材使用比例达到 40%。传

统建筑材料有 70% 用于墙体^[1], 因此, 发展新型节能墙体是实现建筑业绿色发展的重要途径, 提出了轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土结构技术。轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土结构是以薄壁轻钢、钢板网和改性聚苯颗粒混凝土作为主要材料, 以快速搭建的轻钢构架为依托, 钢板网作为免拆模板, 是将轻

收稿日期: 2019-12-13

作者简介: 杨伟军(1962-), 男, 长沙理工大学教授, 博士生导师。

钢预制装配和改性聚苯颗粒混凝土现浇相结合的新型结构体系^[2],如图 1 所示。

目前,国内正在推广应用的工业化结构体系有:预制混凝土装配结构体系、轻钢结构住宅体系、钢网构架混凝土复合建筑体系及轻钢构架混凝土剪力墙结构体系等。新型墙体材料应用较为广泛的有:石膏砌块、轻质水泥隔墙、泡沫混凝土及聚苯颗粒混凝土等。冯鹏^[3]等人针对钢网构架混凝土复合墙体,进行了受剪性能试验研究。梅松奇^[4]等人针对石灰粉对混凝土的改性性能,进行了试验研究。封叶^[5]等人针对一种由聚苯乙烯泡沫(Expanded Polystyrene, 简称为 EPS)颗粒复合而成的节能墙板,进行了力学与热工性能研究。王怀远^[6]针对泡沫混

凝土复合墙板,进行了低周往复荷载试验研究。杜运兴^[7]等人利用有限元,进行了挡土墙的静力性能研究。崔成臣^[8]针对轻钢 EPS 混凝土剪力墙,进行了模拟静力试验研究。李贝娜^[9]针对薄壁型钢-粉煤灰陶粒混凝土复合墙板,进行了轴压力学性能试验,并运用 ABAQUS 有限元软件,进行了模拟。但对轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土结构体系的研究较少。因此,作者拟基于 ABAQUS 有限元,拟建立轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土复合墙体的数值模型。研究复合墙体在轴压荷载作用下的受力状态和破坏模式,以及不同开孔率的轻钢对复合墙体的影响,为工程应用和室内试验提供参考。

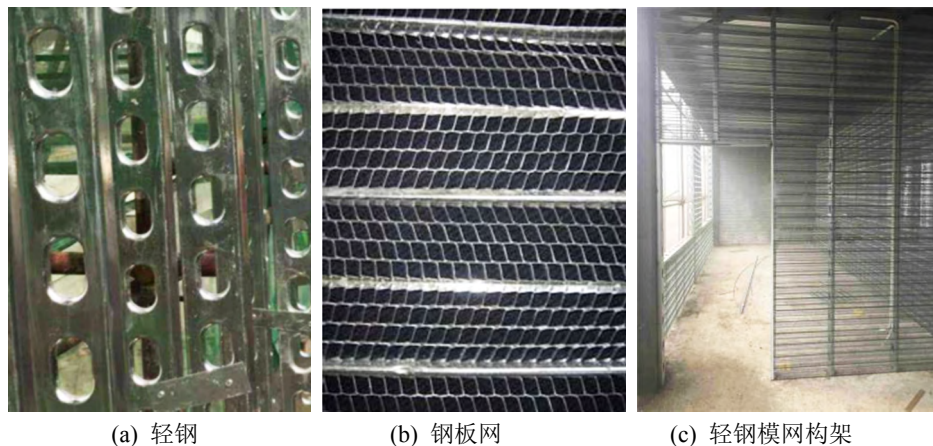


图 1 轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土复合墙体

Fig. 1 Compositewall of lightweight steel dienet and modified expanded polystyrene granule concrete

1 数值模型建立

1.1 数值模型概况

轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土复合墙体数值模型的截面尺寸为 $140\text{ mm} \times 600\text{ mm}$, 墙体高度为 $1\ 200\text{ mm}$, 混凝土强度为 3.5 MPa 。W1 为布置钢板网构件的复合墙体, W2 为未布置钢板网构件的复合墙体。

1.2 单元类型

1) 轻钢单元

为反映实际情况,采用开孔的冷弯薄壁轻钢。轻钢采用四节点减缩积分壳单元 S4R 模拟。

2) 改性聚苯颗粒混凝土单元

采用 C3D8R 单元,并进行线性减缩积分。

3) 钢板网

采用两节点线性三维桁架单元 T3D2 进行模

拟。在同一部件中,创建“X”状钢板网,会形成大量节点,增加不必要的计算量。采用钢丝分别在斜向左下和斜向右下布置的 2 个钢板网,分别内置到混凝土中,形成“X”状钢板网部件,减少节点,以达到优化模型的效果。

1.3 复合墙体材料属性

1) 轻钢

采用等向弹塑性模型进行模拟。轻钢的强度 f_y 为 350 MPa , 弹性模量 E 为 $206\ 000\text{ MPa}$, 泊松比为 0.3 。

2) 改性聚苯颗粒混凝土

采用混凝土塑性损伤模型及清华大学崔成臣^[8]提出的分段式 EPS 混凝土应力-应变全曲线方程。改性聚苯颗粒混凝土抗压强度 f_c 为 3.5 MPa , 弹性模量 E 为 $3\ 000\text{ MPa}$, 泊松比为 0.2 。

3) 钢板网

采用弹塑性模型,钢板网强度值 f_y 为 235 MPa ,

弹性模量 E 为 206 000 MPa, 泊松比为 0.3。

1.4 接触与边界条件模拟

轻钢和钢板网采用“Embedded”的方式, 嵌入到改性聚苯颗粒混凝土内部。复合墙体数值模型底部采用固端约束, 墙体上部采用“Coupling”的方式作用于一点, 通过对耦合点施加 8 mm 位移荷载, 进行竖向传力。

1.5 网格划分

轻钢按 40 mm、改性聚苯颗粒混凝土按 50 mm 及钢板网按 100 mm 的尺寸进行划分, 如图 2 所示。

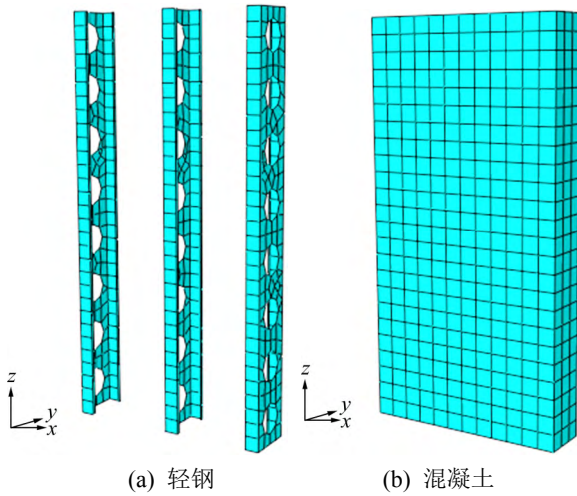


图 2 轻钢、混凝土网格划分
Fig. 2 Grid division of lightweight steel and concrete

2 数值模拟结果分析

2.1 荷载-位移曲线分析

复合墙体荷载-位移曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 曲线有上升段、下降段和平稳段, 符

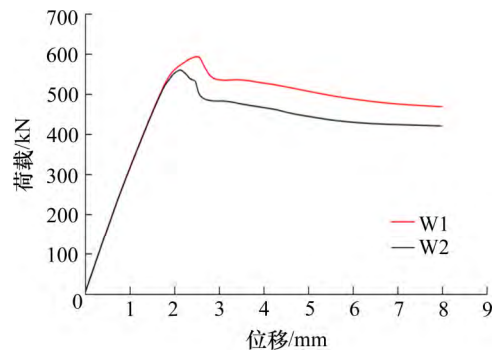


图 3 复合墙体荷载-位移曲线
Fig. 3 Load displacement curve of composite wall

合墙体受压时的变化特点。W1 极限承载力为 592.23 kN, W2 极限承载力为 559.27 kN, W1 较 W2 的极限承载力提升了 6%。因为在受力状态下, 钢板网依靠自身强度, 对轻钢和改性聚苯颗粒混凝土起到约束作用, 使复合墙体达到三向受压状态, 从而提高了抗压极限承载力。

2.2 数值模型云图分析

2.2.1 轻钢应力云图分析

轻钢随着荷载的增加, 逐渐参与受力, 其孔洞边缘应力较小, 如图 4(a)所示。在达到极限荷载的过程中, 轻钢孔洞左、右边缘最先达到屈服强度, 腹板未开孔部分和侧翼继而达到, 如图 4(b)所示。达到极限荷载时, 除轻钢孔洞上、下边缘外, 其余部分均达到屈服强度, 轻钢整体受力均匀, 抗压性能得到了充分发挥, 如图 4(c)所示。

2.2.2 轻钢塑性应变云图分析

复合墙体在极限荷载作用下, 轻钢均产生塑性变形, 中间轻钢的中部产生的塑性变形最大, 如图

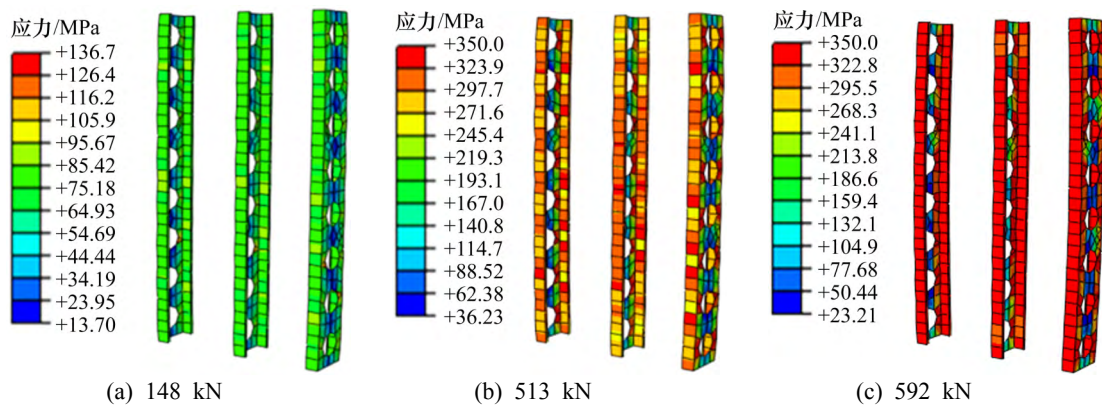


图 4 轻钢应力云
Fig. 4 Stress nephogram of lightweight steel

5(a)所示。复合墙体竖向产生 8 mm 位移时,由于轻钢未对称布置,因此,轻钢产生不对称塑性变形,如图 5(b)所示。从图 5(b)中可以看出,左侧轻钢中上部向外凸起,右侧轻钢中下部向外凸起,中间轻钢的中部向左侧凸起,整体发生畸曲变形。

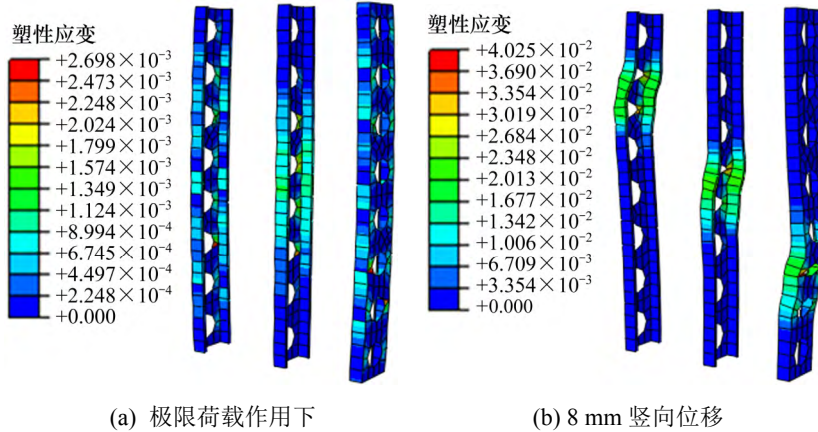


图 5 轻钢塑性应变云图

Fig. 5 Plastic strain nephogram of lightweight steel

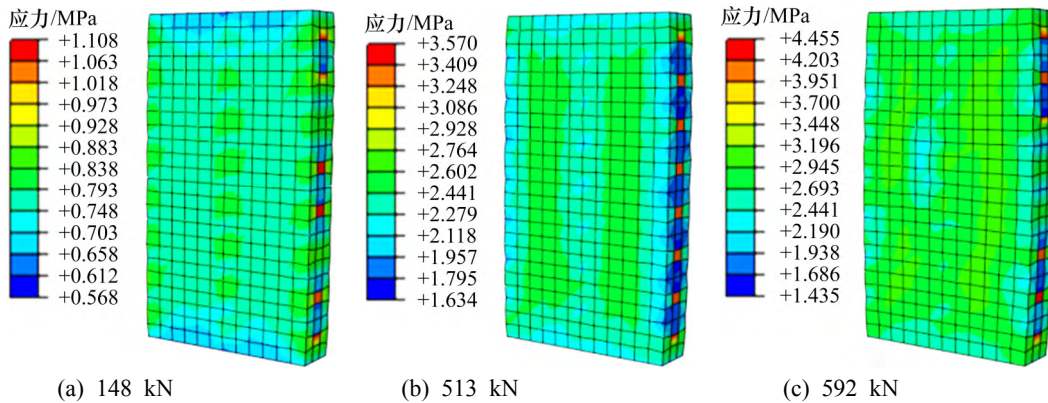


图 6 混凝土应力云图

Fig. 6 Stress nephogram of concrete

轻钢之间的混凝土,达到抗压强度,混凝土应力值向四角逐渐递减,呈 X 状分布,与框架填充墙受压状态下的应力分布类似,如图 6(c)所示。

2.2.4 改性聚苯颗粒混凝土塑性应变云图分析

荷载达到极限荷载的 40%时,混凝土与轻钢接触处,首先出现塑性应变,如图 7(a)所示。当荷载达到极限荷载的 90%时,混凝土两侧的上、下边缘部分和复合墙体的中间部位,产生较大应变,如图 7(b)所示。当荷载达到极限荷载时,混凝土应变呈 X 状分布,主要集中在复合墙体的中间部分,应变值从中间向复合墙板四角逐渐降低,如图 7(c)所示。复合墙体竖向产生 8 mm 位移时,混凝土产生的塑

2.2.3 改性聚苯颗粒混凝土应力云图分析

当施加荷载作用时,复合墙体整体受力均匀,如图 6(a)所示。复合墙体随着荷载逐渐增加,在轻钢之间部分混凝土受到挤压,比轻钢接触的混凝土产生的应力大,如图 6(b)所示。当达到极限荷载时,

性应变,分布于复合墙体左上至右下的斜线范围内,左侧上部和右侧下部向外凸出,整体发生畸曲变形,如图 7(d)所示。

2.2.5 钢板网应力云图分析

当施加荷载作用时,钢板网产生的应力,呈斜向分布。钢板网随着荷载的增加,应力增长较为均匀,如图 8(a)所示。当荷载达到极限荷载时,钢板网产生较大应力,但未达到屈服强度。左、右两侧的钢板网,与轻钢接触的孔洞边缘的应力集中,前、后两侧的钢板网应力呈 X 状分布,如图 8(b)所示。复合墙体竖向产生 8 mm 位移时,钢板网的前、后两面、左侧上部及右侧下部,均达到屈服强度,如

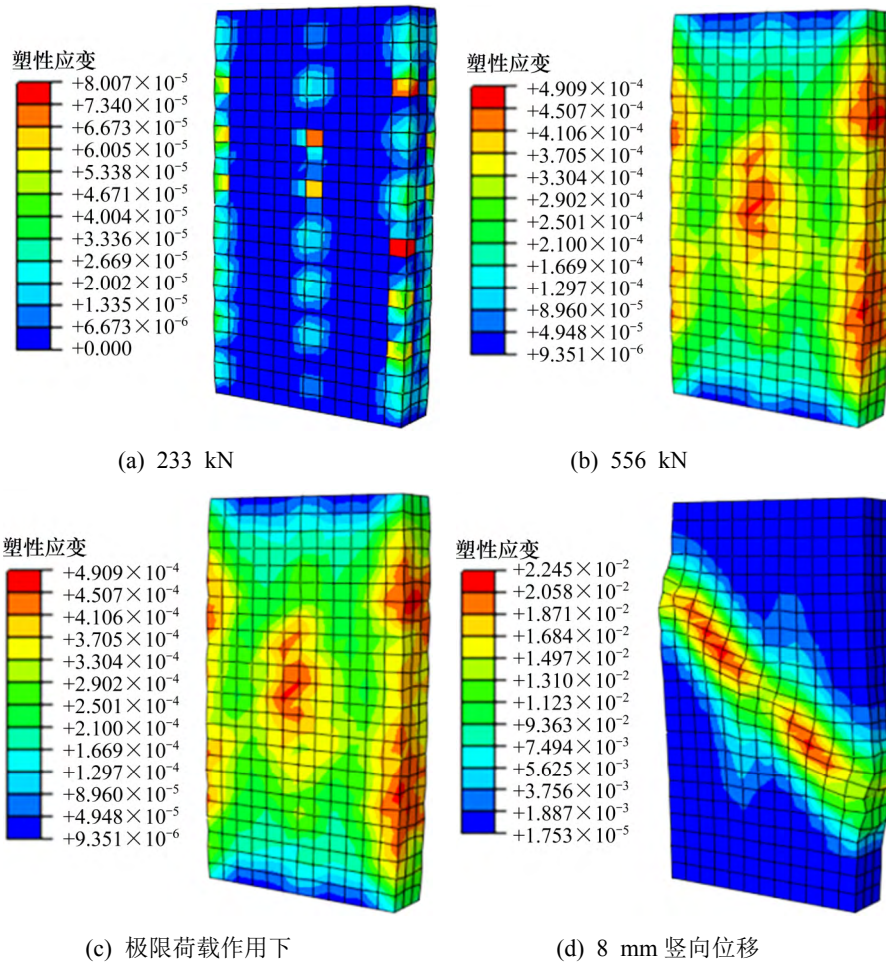


图 7 混凝土塑性应变云图

Fig. 7 Plastic strain nephogram of concrete

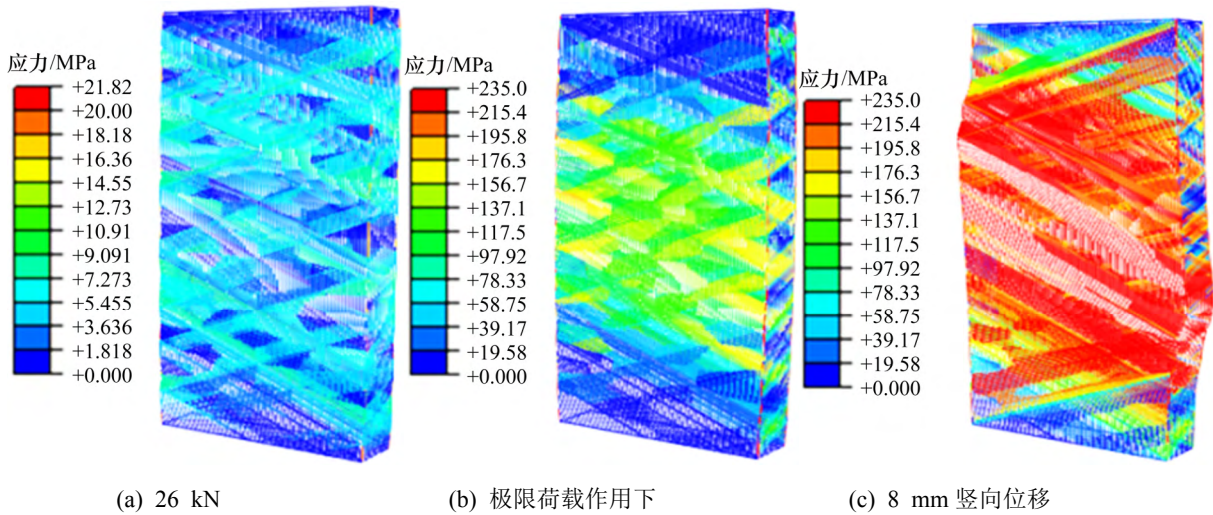


图 8 钢板网应力云图

Fig. 8 Stress nephogram of steel die net

图 8(c)所示。

2.2.6 钢板网塑性应变云图分析

复合墙体达到极限荷载时, 未产生大幅度塑性

变形, 如图 9(a)所示。复合墙体竖向产生 8 mm 位移时, 钢板网上、下两端未产生较大塑性应变, 钢板网左侧上部和右侧下部, 向外凸起, 产生较为明

显的畸曲变形, 钢板网整体的塑性应变, 沿左上至右下斜线分布, 如图 9(b)所示。

2.2.7 复合墙体应力分量云图分析

复合墙体各部件初始荷载阶段应力分量如图 10 所示。图 10(a)为改性聚苯颗粒混凝土竖向应力; 图 10(b)为腹板竖向应力和翼缘板水平应力; 图 10(c)

为翼缘板竖向应力和腹板水平应力。在荷载初始阶段, 改性聚苯颗粒混凝土整体受压均匀。轻钢腹板、翼缘板的竖向压应力相差不大, 水平方向均为拉应力且数值近似。轻钢与改性聚苯颗粒混凝土在初始阶段, 同时进入工作状态, 参与复合墙体受力。

复合墙体各部件加载阶段的应力分量如图 11

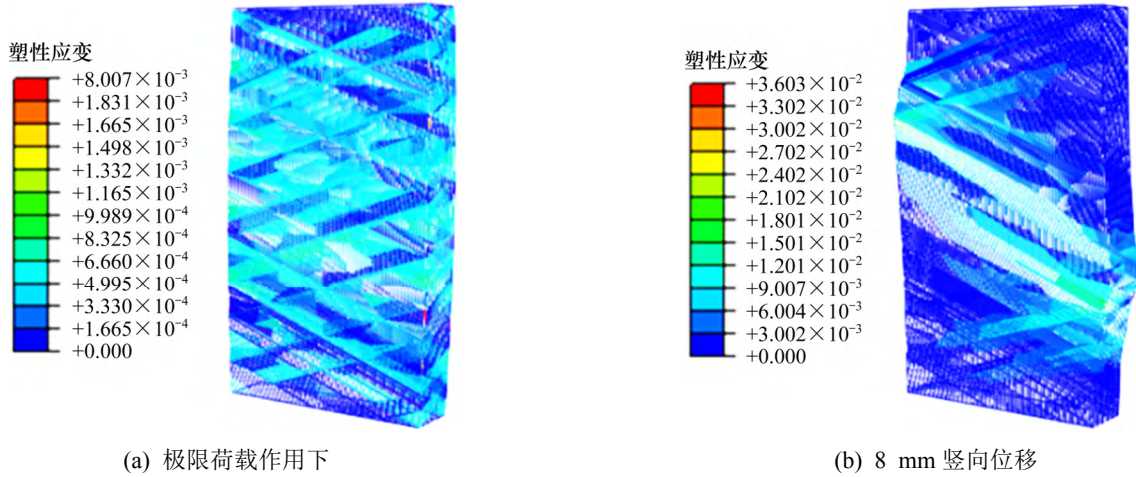


图 9 钢板网塑性应变云图

Fig. 9 Plastic strain nephogram of steel die net

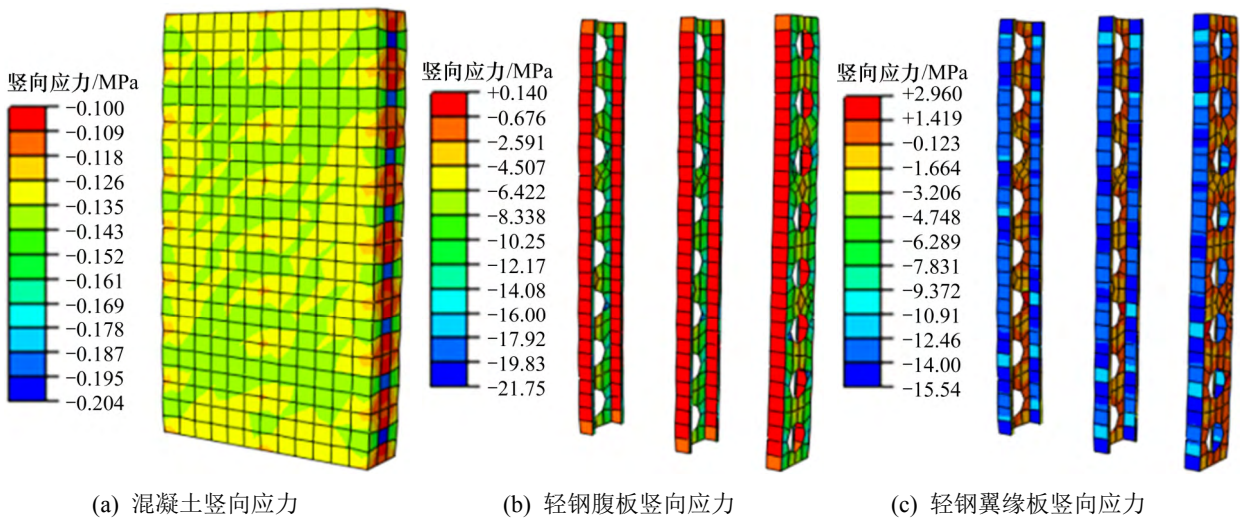


图 10 应力分量云图(26 kN)

Fig. 10 Stress component nephogram (26 kN)

所示。改性聚苯颗粒混凝土的竖向应力, 出现明显变化。在轻钢处的压应力较小, 轻钢之间部位的压应力较大。轻钢在该阶段, 分担了改性聚苯颗粒混凝土的部分压应力。轻钢腹板、翼缘板的竖向应力大幅度增加, 且翼缘板压应力明显高于腹板的。腹板、翼缘板的水平拉应力增加, 数值相差不大。

复合墙体各部件极限荷载阶段应力分量如图 12 所示。改性聚苯颗粒混凝土整体达到屈服应力。轻钢腹板、翼缘板的竖向应力达到屈服应力。腹板、翼缘板的水平拉应力增加, 且腹板的水平拉应力明显高于翼缘板拉应力, 这是由于腹板开孔所导致的。在接近极限荷载阶段, 改性聚苯颗粒达到屈

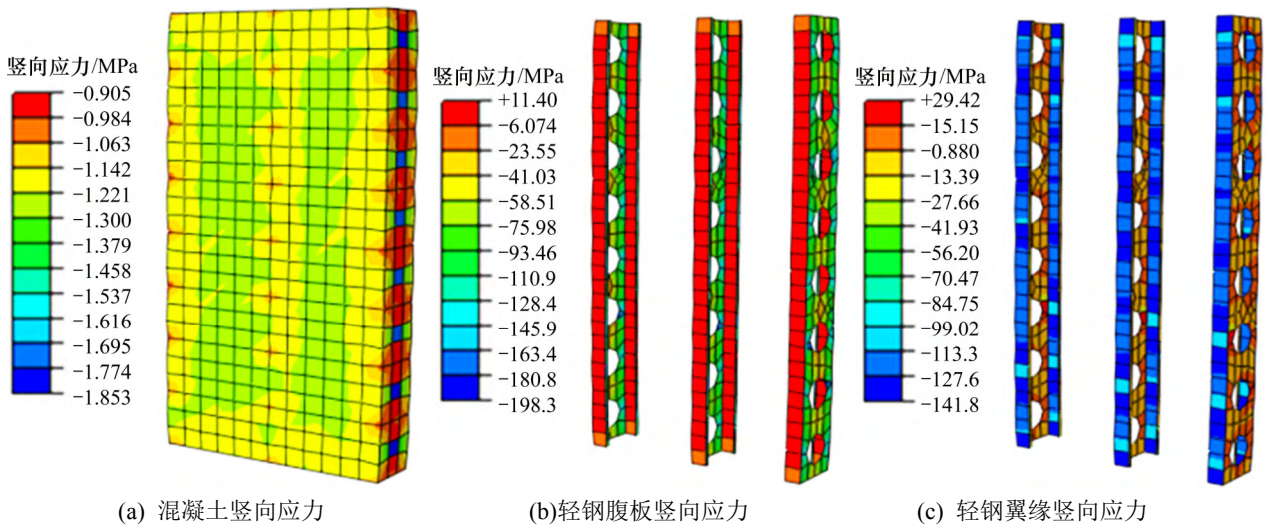


图 11 应力分量云图(233 kN)

Fig. 11 Stress component nephogram(233 kN)

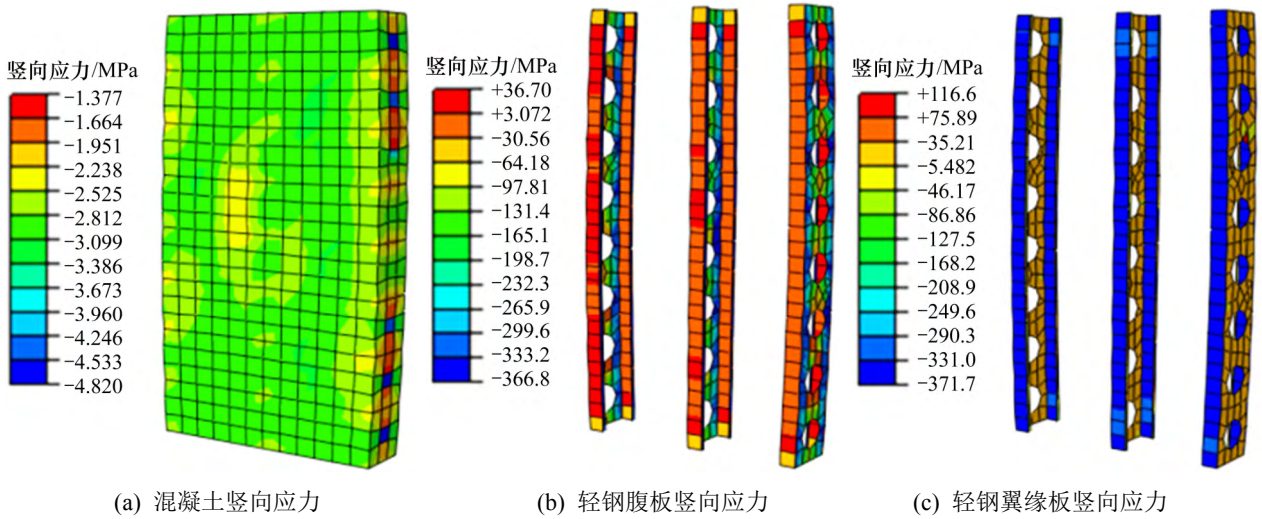


图 12 应力分量云图(极限荷载)

Fig. 12 Stress component nephogram (ultimate load)

服强度, 此时竖向应力主要由轻钢承担。

表 1 改变轻钢开孔率数值模型参数表

3 不同开孔率对受压性能的影响

Table 1 Parameter table of numerical model for changing the opening rate of lightweight steel

轻钢做开孔处理的优点: ①浇筑改性聚苯颗粒混凝土时, 因为开孔, 所以混凝土能够在轻钢之间自由流动, 使墙体达到较好的密实效果。②开孔能节省材料, 降低成本。不同开孔率的轻钢对复合墙体受压性能有不同的影响。本试验采用 6 种不同开孔率的轻钢进行数值模拟, 具体尺寸见表 1。

试件编号	开孔个数	圆孔半径/mm	轻钢开孔率/%
WA-1	0	0	0.0
WA-2	8	35	18.4
WA-3	8	40	24.0
WA-4	8	45	30.4
WA-5	8	50	37.6
WA-6	8	55	45.6

3.1 复合墙体承载力分析

复合墙体数值模拟的极限承载力及承载力下降百分值见表 2。WA-2~WA-6 相较 WA-1 的极限

承载力均有下降。表明: 使用开孔轻钢, 会降低复合墙体的极限承载力, 且随开孔率的增加, 复合墙体的极限承载力逐渐下降。

表2 数值模型承载力对比表

Table 2 Comparison of bearing capacity of numerical model

编号	轻钢开孔率/%	极限承载力/kN	承载力下降/%
WA-1	0.0	795.56	0.00
WA-2	18.4	633.53	20.37
WA-3	24.0	609.94	23.33
WA-4	30.4	592.23	25.56
WA-5	37.6	578.50	27.28
WA-6	45.6	544.74	31.53

复合墙体轻钢开孔率-极限荷载曲线如图13所示。从表3和图13可以看出,开孔率在24%~37.6%时,复合墙体极限承载力变化较小。开孔率的增加与承载力的下降值并非是简单的线性关系。开孔率在其他范围内增加,复合墙体的极限承载力,会出现较为明显的下降。

表3 数值模型对比分析表

Table 3 Comparative analysis of numerical models

编号	开孔率增加值/%	承载力下降值/kN	开孔率每增加1%承载力下降值/kN
WA-2与WA-3	5.6	23.59	4.21
WA-3与WA-4	6.4	17.71	2.77
WA-4与WA-5	7.2	13.73	1.91
WA-5与WA-6	8.0	33.76	4.22

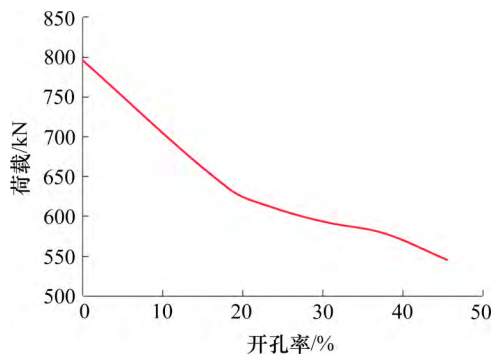


图13 复合墙体轻钢开孔率-极限荷载曲线

Fig. 13 Curve of light steel opening rate ultimate load of composite wall

考虑到开孔率对复合墙体极限承载力的影响。复合墙体浇筑改性聚苯颗粒混凝土时,受混凝土的流动性及工程造价等多方面影响。所以,建议采用轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土结构,选用开孔率约为30%的轻钢作为竖向受力承重构件。

3.2 复合墙体荷载-位移曲线分析

6种复合墙体数值模拟的荷载-位移曲线如图14所示。从图14可以看出,WA-2~WA-26较WA-1的墙体,刚度均有下降。因为使用开孔轻钢,所以

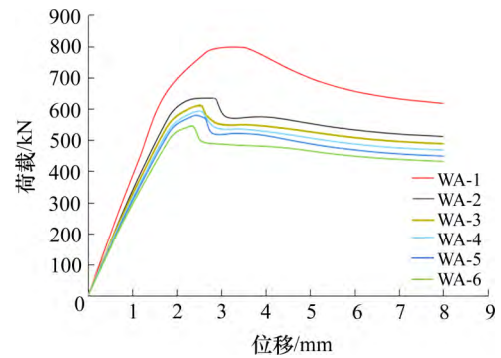


图14 不同开孔率轻钢复合墙体的荷载-位移曲线

Fig. 14 Load displacement curve of lightweight steel composite wall with different opening rate

会降低复合墙体的刚度。并随开孔率的增加,复合墙体的刚度下降更为明显。当WA-1~WA-26达到极限荷载时,位移均在3mm。表明:复合墙体在极限荷载作用下,开孔轻钢及开孔率大小对产生的竖向位移影响较小。

4 结论

基于ABAQUS有限元,建立了复合墙体的数值模型,研究了复合墙体在轴压荷载作用下的受力状态和破坏模式,并探究了不同开孔率的轻钢对复合墙体的影响,得到结论为:

1) 在轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土复合墙体中,钢板网符合墙体是一种极具潜力的新型结构构件,其承载力提升了6%。

2) 轻钢、钢板网及改性聚苯颗粒混凝土三者能较好的协同工作,复合墙体的破坏形态与框架填充墙类似。

3) 建议轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土结构,宜选用开孔率约为30%的轻钢作为竖向受力承重构件。

参考文献(References):

- [1] 石红玉.新型墙体材料全寿命周期费用效益分析[D].赣州:江西理工大学,2013.(SHI Hong-yu.Life cycle cost benefit analysis of new wall materials[D].Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2013.(in Chinese))
- [2] 长沙理工大学.DBJ43/T 341-2019,轻钢模网改性聚苯颗粒混凝土结构技术规程[S].大连:大连理工大学出版

- 社,2019.(Changsha University of Sciences & Technology. DBJ43/T 341-2019,Technical specification for structures of lightweight steel die net and modified expanded polystyrene granule concrete[S].Dalian:Dalian University of Technology Press,2019.(in Chinese))
- [3] 冯鹏,初明进,叶列平,等.冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2010(11):83-91.(FENG Peng, CHU Ming-jing, YE Lie-ping, et al. Experimental study on shear behavior of cold-formed thin-walled steel reinforced concrete shear walls[J]. Journal of Building Structured, 2010(11): 83-91.(in Chinese))
- [4] 梅松奇,范进.石灰石粉对混凝土性能影响的试验研究[J].交通科学与工程,2018,34(2):12-17.(MEI Song-qi, FAN Jing. Experimental study on the shear behavior of cold-formed thin-walled steel reinforced concrete shear wall[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018,34(2):12-17.(in Chinese))
- [5] 封叶,王庆华,刘家钦,等.EPS颗粒-EPS板复合保温墙板的力学性能研究[J].新型建筑材料,2014,41(7):10-12.(FENG Ye, WANG Qing-huai, LIU Jia-qin, et al. Research on the mechanical properties of EPS particles-EPS board composite insulation wallboard [J]. New Building Material, 2014,41(7): 10-12.(in Chinese))
- [6] 王怀远.泡沫混凝土复合墙板力学性能研究[D].长春:吉林建筑大学,2017.(WANG Huai-yuan.An Experimental Study about Mechanical Properties of Foam Concrete Composite Wall Panels[D].Changchun: Jilin Jianzhu University,2017.(in Chinese))
- [7] 杜运兴,陈仕文,周芬.预应力筋预拉力对预应力加筋土挡墙静力性能影响[J].公路工程,2019,44(2):28-35.(DU Yun-xing,CHEN Shi-wen,ZHOU Feng. Influence of pretention on the performance of reinforced retaining wall[J]. Journal of Highway Engineering, 2019, 44(2): 28-35.(in Chinese))
- [8] 崔成臣.轻钢EPS混凝土剪力墙抗震性能研究[D].北京:清华大学,2016.(CUI Cheng-chen.Seismic behavior of light gauge steel reinforced EPS concrete shear walls[D]. Beijing:Qinghua University,2016.(in Chinese))
- [9] 李贝娜.冷弯薄壁型钢骨架-粉煤灰陶粒混凝土复合墙板力学性能研究[D].长春:吉林大学,2018.(LI Bei-na. The mechanical properties of cold-formed thin-walled steel skeleton-flyashcreamsite concrete wallboard study [D].Changchun:Jilin University,2018.(in Chinese))