

# 格构式混凝土墙体结构性能研究进展

唐柏赞, 余广汕, 龚凯, 庄海洋, 刘旭晨, 张季

(华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 为解决建筑高能耗和高污染等问题, 国家正在积极推动绿色、节能、环保墙体结构的发展。其中, 格构式混凝土墙体结构体系作为一种新型墙体结构, 具备保温节能、隔声耐火、轻质承重、施工便捷和环保等多重功能, 近年来成为应用和研究的热点。本文简要介绍了格构式混凝土墙体形式, 归纳总结了格构式混凝土墙体的轴压、抗酸侵蚀、热工、隔声、耐候、抗震等性能, 提出现阶段格构式混凝土墙体研究中的问题和不足。研究表明: 格构式混凝土墙体结构发展, 是建筑材料循环利用和建筑垃圾资源化的重大需求, 可用于建筑结构抗震设计; 未来可从新型材料、整体结构防火试验、复杂环境下冻融试验等方面提升其物理性能, 以及结合减震技术开展可恢复功能性、高层应用方面的研究, 进一步提高其抗震性能, 为格构式混凝土墙体及其结构的广泛应用提供重要的科学依据和技术保障。

**关键词:** 格构式混凝土墙体; 墙体形式; 力学特性; 抗震性能; 研究进展

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

## Research progress on structural performance of latticed concrete wall

TANG Baizan, YU Guangshan, GONG Kai, ZHUANG Haiyang, LIU Xuchen, ZHANG Ji

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, NanChang, 330013, China)

**Abstract:** To solve the problems of high energy consumption and high pollution of buildings, China is actively promoting the development of green, energy-saving and environmentally friendly wall structures. Among them, the lattice concrete shear wall structure system, as a new type of wall structure, has multiple functions such as heat preservation and energy saving, sound insulation and fire resistance, light weight bearing, convenient construction and environmental protection, and has become a hot spot of application and research in recent years. This paper briefly introduces the form of lattice concrete wall, summarizes the axial compression, bending, acid corrosion resistance, thermal, sound insulation, weather resistance, seismic and other properties of lattice concrete wall, and puts forward the problems and deficiencies in the research of lattice concrete wall at the present stage. The research shows that the development of lattice concrete wall structure is a major demand for the recycling of building materials and the recycling of construction waste, which can be used for seismic design of building structures. In the future, its physical properties can be improved from the aspects of new materials, overall structural fire test, freeze-thaw test in complex environment, etc., and the research on recoverable functionality and high-rise application can be carried out in combination with shock absorption technology to further improve its seismic performance. It provides important scientific basis and technical support for the wide application of lattice concrete walls and their structures.

**Keywords:** lattice concrete wall; wall form; mechanical properties; seismic performance; research progress

近年来, 全球环境污染、能源紧缺等问题日益突出, 人们逐渐追求绿色、低碳的生活和发展方式。建筑行业作为能源消耗最大、碳排放量最高的行业之一, 成为国家重点改革发展领域。在我国实施“双

碳”政策的推动下, 建筑行业成为推动我国低碳转型的重要领域<sup>[1,2]</sup>。传统建筑材料存在着保温性差、耗能大等缺陷, 因此推动保温、节能、节土、环保新型墙体材料在建筑结构中的应用势在必行<sup>[3-9]</sup>。

收稿日期: 2024-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52368072, 51908216), 江西省主要学科科学技术带头人培养计划(20204BCJL23032), 江西省自然科学基金项目(20224BAB204073)

格构式混凝土墙体作为一种新型墙体，主要包括水泥聚苯模壳(EPSC)格构式墙体(国外称“ICF”或“RASTRA”墙体)、密肋复合墙体、现浇磷石膏—网格式框架组合墙等墙体体系。1) EPSC 格构式混凝土墙体是从国外引进并结合我国设计和施工经验研发的一种集保温节能、隔声耐火、轻质承重、施工便捷、环保等多功能于一体的新型墙体，构造示意图如图 1 所示；2) 密肋复合墙体主要包括密肋框格、填充砌块以及隐形边框构成，构造示意图如图 2 所示；3) 现浇磷石膏—网格式框架组合墙等墙体体系为我国自主提出，是在框架墙的基础上内嵌磷石膏，与密肋复合墙体类似，可应用多个建筑场景。

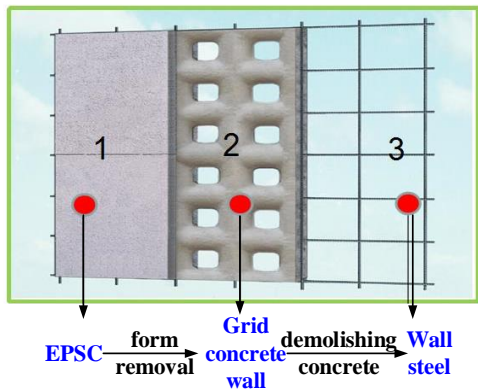


图 1 EPSC 格构式混凝土墙体  
Fig. 1 EPSC laticed concrete wall

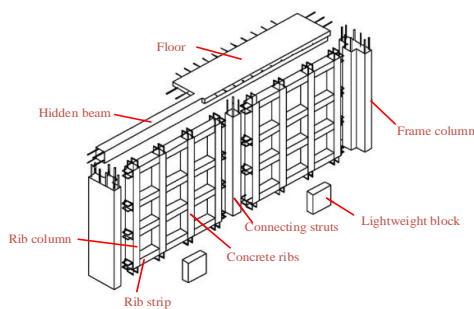


图2 密肋复合墙体  
Fig. 2 Multi-ribbed composite wall

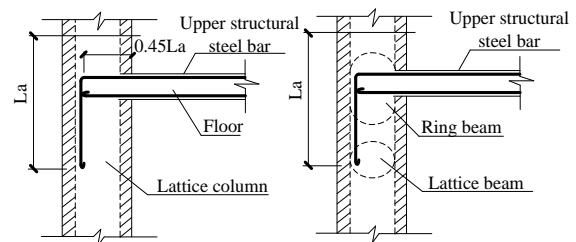
目前，国内外格构式混凝土墙体体系被广泛用于住宅、旅馆、厂房以及铁路隔音墙体等建筑中，主要得益于该墙体体系的多项优势。与实心混凝土墙相比，格构式混凝土墙体形式可大大节约建筑材料。因模壳在工厂预制，在施工工程不需要模板支护，可节省施工时间加快施工进度，符合我国建筑施工的趋势。这种墙体结构既能方便快捷地施工，减少了噪音和尘土污染，又具备了建筑节能环保、保温隔热、抗震抗裂、隔音轻质和承重能力等多种

优点。本文通过对格构式混凝土墙体的结构性能，主要包括轴压性能、热工性能、隔声性能、耐候性能、抗震性能等进行综述分析，为格构式混凝土墙体的研究和工程应用提供参考。

## 1 EPSC 格构式混凝土墙体

### 1.1 材料形式

EPSC 格构式混凝土墙体按构件布置可分为内墙和外墙，楼板与墙体的连接方式如图 3 所示。外层模壳主要是由轻质材料 EPS 构成，其具有极高的灵活性，可以根据施工需求进行精细的切割，从而满足不同尺寸的要求。模壳构件在建筑施工中起着模板和墙体保温层的双重作用。在施工阶段，通过拼接标准构件、实心平板构件和边端构件，形成了相互连接的网格空腔，模壳构件充当了混凝土浇筑时的模板。在使用阶段，模壳构件则转变为墙体的保温隔热层。模壳根据形式不同可分为十字形、米字形、模塑聚苯乙烯保温模块以及保温砌模，如图 4 所示。



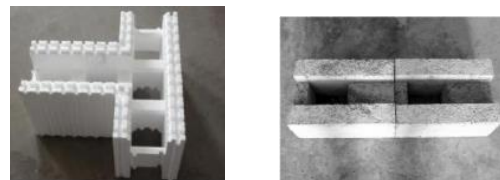
(a) Anchored into the lattice column (b) Anchored into the ring beam

图 3 EPSC 格构式混凝土墙体基本构造

Fig. 3 Basic structure of EPSC lattice concrete wall



(a) Cross-shaped mould shell (b) Star mold shell



(c) Molded polystyrene insulation module (d) Heat preservation block

图 4 模壳材料类别

Fig. 4 Mold shell material category

一些研究学者通过材料改性提升其性能，主要

体现在材料抗压性能、抗拉性能、经济性等。关于抗压性能,莫磊<sup>[10]</sup>开展了 EPS 轻集料混凝土配合比试验,分析了影响 EPS 混凝土性能的相关因素,并基于物理力学性能试验获得了最优配合比。Babu 等<sup>[11]</sup>在 EPS 混凝土中掺入一定浓度的硅粉与不加硅粉作对照试验,研究发现前者的密度是后者的 2 倍,并且其强度是后者的 3 倍,有效提高 EPS 混凝土的抗压性能。Miled 等<sup>[12]</sup>对 3 种孔隙率为 10%~50% 的 EPS 轻骨料进行了抗压试验。试验结果证实了 EPS 混凝土抗压强度存在粒径效应。进一步地观察到这种尺寸效应对于低孔隙率混凝土非常明显,而对于非常高的孔隙率混凝土则变得可以忽略不计。Garth<sup>[13]</sup>将 85% 的矿化木片和 15% 的水泥制作墙体,拟静力试验表明该墙体的抗压性能有一定的提升。关于抗拉性能,北京中清恒业科技公司<sup>[14]</sup>自主研发出植物纤维混凝土制作模壳,植物纤维由于其较高的抗拉强度和延伸率,能够显著提升混凝土在抗拉、抗弯、抗冲击以及韧性等方面的性能。关于模壳经济性,孙利铭<sup>[15]</sup>通过计算现有轻骨料的传热系数进行筛选,筛选出性价比比较高的轻骨料,以实现降低建筑成本的目标。

综上所述,大量不同改性掺料的试验研究得到了多种改性方法和改性配方。改性后的墙体材料在力学性能、耐久性和其他相关的物理性能方面都有所提升,为实际工程应用提供了有益参考。但众多改性研究,所提出的改性配方比较散乱,一些非常类似的改性方法,会得到不相同的性能指标。如何将材料改性方法或配方归纳、整理、加工,形成可指导格构式墙体实际工程应用的成果,尚有大量的工作要做。此外,工业废弃物矿渣、粉煤灰与 EPS 混凝土结合,也成为未来研究的热点之一。

## 1.2 轴压性能

曹启坤等<sup>[16]</sup>研究了配筋率、有无模壳因素对 EPSC 格构式墙体的轴心抗压性能影响,其试件荷载-位移曲线如图 5 所示。试验发现轴压性能随着配筋率的增加而增强,模壳与墙体相互作用增强了墙体的轴压能力。宋春玲等<sup>[17]</sup>研究了偏心距对 HR-EPS 剪力墙的影响,试验分为四组,设计了 0、100、200、300 mm 偏心距对剪力墙轴压性能的影响,得出结论:偏心距越大,试件的承载力逐渐下降。从破坏形态看,偏心距越大,破坏位置由底部转移到中部。

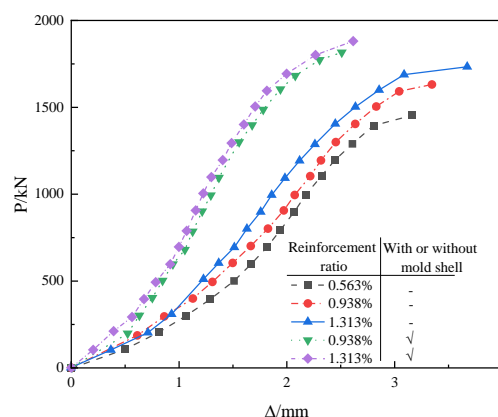


图 5 荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve

综上,轴压承载力随配筋率、偏心距等因素变化规律不一,可通过适量增加钢筋或掺加粉煤灰来提高其受压变形性能。但是已有多数研究主要围绕十字形缩尺墙体模拟进行,仍有以下研究工作需要开展:1)设置肋格,其可提高格构式墙体的承载力,不同加肋形式对构件极限承载力的提高程度不同。2)构件宽厚比、长细比、混凝土强度、钢筋强度等因素均可以影响格构式的承载力。3)应深入研究加肋尺寸、形式、含钢率等参数,在墙体设计上考虑矮墙和中高墙,改善严重破坏区域,提出改善措施以提高格构式墙体的延性和承载力。

## 1.3 抗酸侵蚀性能

为了研究 EPS 模块在不同酸、碱环境下的耐久性,Bagon 等<sup>[18]</sup>比较了相同湿密度的聚苯乙烯混凝土和珍珠岩混凝土在海水(碱性)环境下的力学性能。聚苯乙烯混凝土的抗压强度、弹性模量和断裂模量均显著高于珍珠岩混凝土。杨胜光等<sup>[19]</sup>通过配制不同 pH 值的酸雨溶液来模拟酸雨环境,进行了水泥聚苯模壳的酸雨试验,并分析了酸雨对模壳的耐压性和线膨胀系数的影响。试验结果表明,由于温度的变化,模壳的质量损失率、抗压性能和抗折能力呈现先增加后减少的趋势,而压折比则呈现先减少后增加的趋势。图 7 为酸性环境下水泥聚苯模壳抗压强度变化规律。

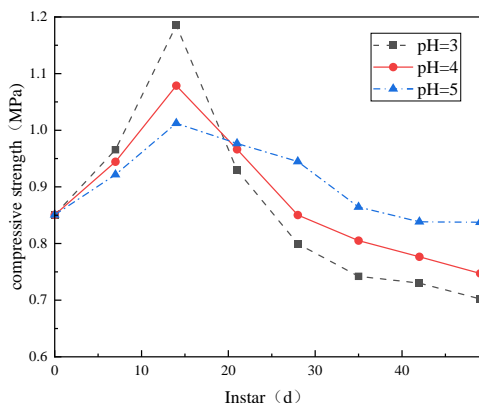


图7 侵蚀作用下水泥聚苯模壳抗压强度变化规律

Fig. 7 The change law of compressive strength of cement polystyrene mold shell under erosion

综上, EPS模壳在酸碱环境下的力学性能研究有助于解决墙体老化与开裂问题。但格构式混凝土结构的广泛应用还需更多耐久性研究, 这包括单一和多因素作用下的破坏机理, 以及环境与荷载耦合作用下的实际耐久性。可见, 格构式混凝土结构长期性能的研究亟需加强, 以完善其理论体系。

#### 1.4 热工性能

目前我国传统保温材料存在防火性较弱的不足, 在火灾来临时, 结构高温下的抗压、抗震等性能会被削弱, 存在极大的安全隐患。Koju 等<sup>[20]</sup>采用电阻加热法进行热试验, 实验过程中考虑了内部传热, 并通过稳态传热方法测得 EPS 轻质混凝土夹芯板在低、常、高和极端温度下的总传热系数。

孙洪明等<sup>[21]</sup>对改性水泥聚苯模壳格构式自保温墙体的热阻值进行了深入研究, 测量了各种规格的模壳墙体, 如图 8 所示, 耐火极限试验显示, 在火焰温度达 1080 °C 并承受 260 kN/m 均布荷载的条件下, 墙体仍然完整且未失去承载能力, 可连续燃烧 3 小时以上。此外, 背面平均温度仅上升 5 °C, 符合建筑防火性能要求。另外, 刘加强等<sup>[22]</sup>人对不同厚度的 EPSC 格构式墙体进行了传热系数和热惰性指标的计算。其中 250 mm 厚度 EPSC 外墙的传热系数和热惰性指标分别为 0.7064 W/(m<sup>2</sup>·K)、5.0863 W/(m<sup>2</sup>·K)。

综上所述, 当前格构式混凝土结构防火研究主要关注构件细节, 缺乏整体房屋结构的研究。因此, 需探讨不同布局、构件组合、结构形式和防火措施, 并在整体房屋层面评估火灾蔓延限制和结构影响, 以深化防火性能研究。



(a) pre-combustion (b) post-combustion

图 8 EPSC 材料耐火极限试验

Fig. 8 Fire resistance limit test of EPSC

#### 1.5 隔声性能

住宅优越的隔声性能可以提供居住者适宜的生活学习环境。正仁集团<sup>[23]</sup>通过空气声计权隔声量检测, 测试了 EPSC 墙体的隔声量, 如图 9 所示, 研究表明, 250 mm 的 EPSC 墙板能够有效吸收噪声, 并且具有良好的隔声效果。该结果依据 GB/T19889.3-2005 《声学房屋和建筑物结构隔声测试第 3 组成部分: 建筑物结构空气声隔声的试验室测试》, 并且在实践使用中表现良好。刘加强等<sup>[22]</sup>人根据质量隔声定律, 对 300 mm 和 350 mm 厚度的 EPSC 墙体的计权隔声量进行计算, 两者的计权隔声量分别是 54.0 dB 和 54.4 dB。

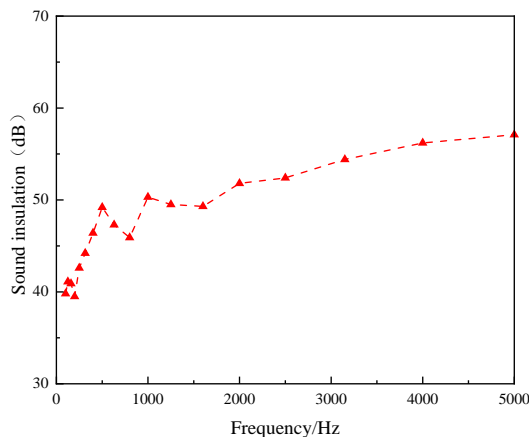


图 9 隔声特性曲线

Fig. 9 Acoustic insulation characteristic curve

综上, EPSC 墙板能够有效吸收噪声, 并且具有良好的隔声效果。未来的隔声材料发展将倾向于采用 EPS 材料与粘弹性高分子材料复合, 或者在 EPS 材料中添加有机、无机或金属填料的方式, 以提高面密度和隔声性能。这一趋势明确表明, 复合材料和填料的使用是提高隔声性能的有效方法。



## 1.6 耐候性能

耐久性是指工程在规范施工的条件下, 工程竣工后的合理使用寿命周期。建筑的耐久性对人民的生命财产安全性具有重大意义。山东正仁集团<sup>[23]</sup>与山东住建厅、山东省质量局联合实验, 对 EPSC 格构式混凝土墙体进行了冻融循环实验。在 25 次循环冻融试验后, 墙体的质量和抗压强度无明显变化, 具有优越的耐久性。根据实验结果, 评估了 EPSC 模壳的寿命可达 50 年以上。墙体耐候性能如表 1 所

表 1 EPSC 墙体的耐候性能

Tab.1 Weathering performance of EPSC wall

Structure	Performance	Result
EPSC	Density(g/m <sup>3</sup> )	362
	Compressive strength(kPa)	448
	Softening index	0.95
	Volume water accumulation rate(%)	15.1
	Thermal conductivity(W/m·K)	0.078
	Rate of quality-led loss(%)	1.6
	Post-freezing strength(MPa)	0.37
	Impact resistance(Frequency)	Impact 5 times, no cracks on the wall surface.
Wall	Hanging force(N)	Bearing 1000 N, no cracks on the surface of the wall
	Freeze-thaw resistance property (10 freeze-thaw cycles)	There is no hollowing, foaming and peeling phenomenon on the surface of the sample.

## 1.7 抗震性能

刚性骨架是新型格构式墙体结构体系的主要受力构件, 国内外学者对构件和结构的力学性能开展了大量研究。Mehrabi<sup>[24]</sup>开展了木框架墙体、钢框架墙面板及 ICF 墙体试件的水平往复荷载试验研究, 试验得出: 格构式混凝土墙体的平面内横向强度和刚度均高于相同高长比的木材和钢柱墙。Dusicka 和 Kay<sup>[25,26]</sup>, Abdel-Mooty 等<sup>[27]</sup>分别研究两种不同的长宽比(H/L=0.89 和 2.67)、两种不同的竖向荷载条件的 ICF 墙体拟静力试验, 为了提高 ICF 墙体抗震能力, 采用了在混凝土浇筑前在 ICF 模板开口处插入金属丝网或在混凝土中加入钢纤维增强材料性能两种方法, 以提高 SGICF 墙体平面内抗震能力。张微敬等<sup>[28]</sup>研究了大网格墙在剪跨比为 1.13、2.02 时的拟静力试验, 并提出了等效普通剪力墙的计算方法, 研究表明: 大网格墙可用于六层及以下的建筑, 并适用于抗震烈度八度的场地。曹万林, 周中一, 张勇波等<sup>[29-31]</sup>提出了保温模块单排配筋剪力墙, 分别研究在低矮、中高以及 L 形等不同因素下墙体的

示。

目前, 关于格构式混凝土的抗冻性能研究主要考虑冻融循环单一影响, 忽视了氯盐等环境因素与荷载共同作用的情况。同时, 针对抗冻性能的改善措施也相对匮乏, 缺乏对材料耐久性、结构设计和施工工艺等多方面因素的综合考量。为深入研究格构式墙体的抗冻性能, 应进行室内外试验, 全面收集数据, 从微观和宏观层面评估其性能, 以丰富冻融机理和理论, 为实际应用提供支持。

抗震性能, 并且将再生混凝土应用到墙体中, 并建议可应用于乡村低层及多层建筑。Asadi P 等<sup>[32]</sup>提出格构式混凝土墙体系统的折减系数, 通过非线性静力分析(Pushover)和混凝土塑性损伤模型(CDP)确定了 ICF 墙体系统的延性降低系数。然后基于 ABAQUS 有限元软件与实验进行比较, 研究结果如果在高地震风险区使用这种结构系统, 其延性是符合抗震要求的。孙建超等, 王奇等, 刘军进等<sup>[33-35]</sup>研究了混凝土强度、剪跨比、轴压比等不同因素对保温砌模混凝土格构式墙体的抗震性能, 提出网格墙可用实体墙的三分之二等效。

Lopez 等<sup>[36]</sup>进行了六个矩形截面和四个 T 形截面 ICF 墙的面内弯曲试验。研究的主要目的是验证弯曲模型, 研究细长格构式混凝土墙体的抗弯性能, 评估其变形能力、刚度、耗能, 强度和变形裂缝。其中, 上峰周期( $E_{LC}$ )的正态耗散能分解为第一峰周期( $E_{FC}$ )在不同位移角(位移与墙高的比值)水平下的归一化耗散能。 $E_{LC}/E_{FC}$  比值的结果如图 10 所示, 可以观察到, 在很大位移角范围内, 能量耗散比主要在 0.4 和 1 的范围内。研究表明, ICF 墙

体可以达到较大的非弹性变形以及稳定的响应，力学特性与传统钢筋混凝土墙体类似。

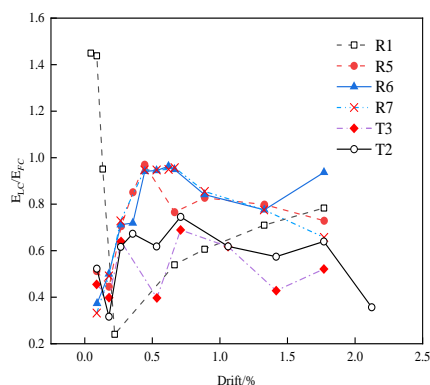


图 10 矩形和 T 形试件的耗能比

Fig. 10 The energy dissipation ratio of rectangular and T-shaped specimens

李小军等<sup>[37]</sup>进行了斜向肋格和传统格构式混凝土墙体拟静力试验，如图 11 (a) 所示，在试验现象中两种墙体结构表现出相似的剪切类型破坏。试验表明：在传统正交墙体的基础上增加斜向肋格能提升墙体的刚度，提升墙体的抗震性能，模壳和墙体协同作用可增强结构的耗能能力。唐柏赞等<sup>[38,39]</sup>进行了框架一格构式混凝土填充墙的振动台实验，探究了墙体房屋在地震作用下的结构反应，并通过观察图 11 (b) 中的洞口和墙壁的连接情况来分析它们的加速度变化特征，以及基于层间位移角来评估结构的抗震性。在渐进地震加载下，试验观察到 EPSC 的表面部分区域开始变形，裂缝主要出现在格构梁和格构柱，RC 框架没有受到明显破坏。



(a) Pseudo static test

(b) shake table test

图 11 抗震性能试验

Fig. 11 Seismic performance test

从上述研究可见，通过试验研究和数值模拟表明，格构式混凝土墙体的开裂荷载、耗能能力均能满足抗震设计要求。然而，受试验条件限制，目前对格构式墙体的研究仍未系统完善，需要进一步开展以下工作：1) 其在高层建筑和高烈度区域的研究比较贫乏，难以得到更广泛的应用。2) 相对拟静力试

验，格构式墙体的振动台试验仅限于框架填充墙结构研究，未来应朝着多层格构式墙体剪力墙三维试验研究，探究多层结构在真实地震下的抗震行为和破坏机理。3) 有限元分析能模拟结构的动力响应，完成多工况及复杂荷载下的动力学分析，为实际工程提供参考。目前，相对试验研究，数值模拟较少。因此，在试验研究的基础上借助数值模拟方法进一步拓展研究。

## 2 密肋复合墙体

### 2.1 抗震性能

密肋复合墙结构体系作为一种装配式建筑结构，其具有快速施工速度、轻质节能等优点，并且具备良好的抗震性能。姚谦峰等<sup>[40]</sup>研究，密肋复合墙的四常见的损伤方式分别为剪切、弯曲、剪切滑移以及复合型。郭猛等<sup>[41]</sup>运用 ETABS 程序对墙体在不同密肋框格构造形式下的动力特性进行了研究，结果显示，密肋框格与外框架协同工作能够有效提升结构的刚度和抗震性能。贾穗子等<sup>[42]</sup>、常鹏<sup>[43]</sup>等对正交肋格和斜交肋格框支密肋复合墙进行了拟静力试验，研究表明采用斜向肋格的砌筑方法，可以大大改善墙体的延性、抗倒塌能力和耗能能力。田鹏等<sup>[44]</sup>通过拟静力试验研究了钢骨外框密肋复合墙体的性能，发现其抗剪承载力和开裂荷载相比普通密肋复合墙体有所提高。刘佩等<sup>[45]</sup>使用轻钢龙骨取代传统钢筋，通过对比发现新型密肋复合墙结构体系遵循“砌块—框格—外框”的破坏顺序，抗剪承载力比传统钢筋混凝土密肋复合墙提高 50% 以上，具有显著的抗震能力。袁泉等<sup>[46]</sup>采用型钢骨架和斜交肋格组合装配的密肋复合板结构，经过拟静力试验可以观察到各种类型墙体的破坏形态，如图 12 所示 (MW-1、MW-2 分别是正交与斜交钢筋混凝土；SMW-1、SMW-2 分别是正交与斜交型钢混凝土)。研究结果表明，斜交不仅可以显著提高墙体的受剪承载力和抗侧刚度，而且还能够有效地提高结构耗能能力和刚度。

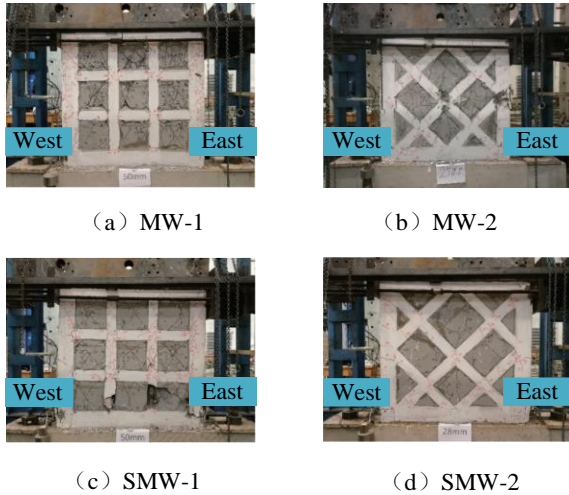


图12 不同类型墙体破坏形态

Fig. 12 Failure modes of different types of walls

孙静等<sup>[47,48]</sup>通过提一种新的损伤指标,用于评估高温后密肋复合墙体框格单元的承载能力。研究结果显示,随着受热时间的增加,剩余承载力呈现出一种先快后慢的趋势。另外,单面受热的框格单元比双面受热的框格单元更快达到极限荷载,这是因为单面受热造成受热不均,更易出现面外位移。这意味着在设计和应用中应更加注重密肋复合墙体单面受热的情况。

密肋复合墙体在框格的基础上内嵌砌块,其受力原理本质上为“米”字形格构式混凝土墙体。姚谦峰等<sup>[49]</sup>对密肋复合墙体提出简化模型,计算简图见图13。

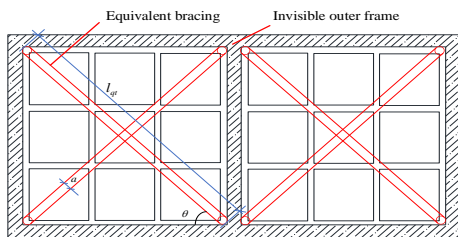


图13 等效斜撑的计算简图

Fig. 13 Calculation diagram of equivalent bracings

等效斜撑的弹性模量按下式计算

$$E_{eq} = \eta V_c E_c + V_q E_q \quad (1)$$

式中:  $E_c$ 、 $E_q$  分别为原墙板中混凝土、砌块的弹性模量;  $V_c$ 、 $V_q$  分别为原墙板中混凝土、砌块的体积占比;  $\eta$  为混凝土纤维修正系数,取 0.5。

有效宽度  $a$  为:

$$a = \zeta (\lambda_1 h_0)^{-0.4} l_{qt} \quad (2)$$

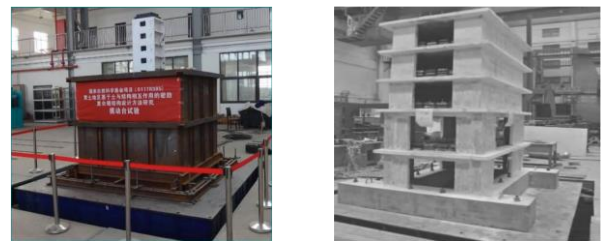
$$\lambda_1 = \left[ \frac{E_{eq} t_b \sin 2\theta}{4E_c I_{wk} h_b} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

式中:  $h_0$  为密肋复合墙板地面到暗梁中线间的距离;  $l_{qt}$  为墙体轴线对角线长度;  $t_b$  为墙板厚度,  $\theta$  为墙体对角线与水平线之间夹角;  $I_{wk}$  为边框柱的惯性矩;  $h_b$  为墙板高度;  $E_c$  为外框架混凝土的弹性模量;  $\zeta$  为修正系数。

卢俊龙等<sup>[50,51]</sup>进行了 1:15 比例的密肋复合墙体-基础-地基共同作用体系的振动台试验,见图 14 (a)。通过地震输入来研究基础和地基的共同作用。试验过程中,观察到结构底部的弯矩和基底剪力较其他位置偏大,最容易出现破坏。当基础与地基出现脱离时,两者之间难以协同作用,上部结构受到严重的影响,从而削弱了上部结构的稳定性。

袁泉、何玉阳等<sup>[52,53]</sup>对 1/6 缩尺模型的框支密肋复合墙体结构进行了振动台实验,见图 14 (b),通过分析楼层结构的动力特性、加速度、位移、钢筋应变反应,得出以下结论:该框支密肋复合墙体结构的转换层主要发生剪切型破坏。同时,还发现转换层附近的抗弯矩能力较弱,抗震性能薄弱。

目前,密肋复合墙的研究中,墙体研究的成果较多,绝大多数是试验研究,这些试验成果大多能直观、客观地反应密肋复合墙的基本性能,对实际应用能提供可靠的参考。但墙体构件的研究仍然不足,特别是对可恢复功能、新型材料的应用、新的墙体形式等方面的研究,还有很大的空间。



(a) Shake table test 1

(b) Shake table test 2

图 14 密肋复合墙体振动台试验

Fig. 14 Shaking table test of ribbed composite wall

## 2.2 易损性分析

试验主要是定性评价密肋复合墙的抗震性能,然而,由于地震荷载具有一定的随机性,通过易损性分析可以从概率角度对结构的抗震性能进行量化评估,这对抗震研究是重要补充。孙静等<sup>[54]</sup>采用 OpenSees 建立了六层密肋复合墙模型,基于 IDA 分析和易损性理论,研究了不同转换层刚度比(如图



15所示, M1~M6分别为4.973、2.636、1.793、1.359、1.094、0.787)、肋柱数量、砌块强度的变化以及混凝土强度对密肋复合墙体抗震性能的影响,由易损性曲线可以发现密肋复合墙结构的刚度比取值为1.0~2.5较为合理,肋梁、肋柱根数对结构抗震能力影响较为明显应选择合理的肋梁、肋柱数量;在满足抗震规范的前提下,尽可能选择强度较大的混凝土。

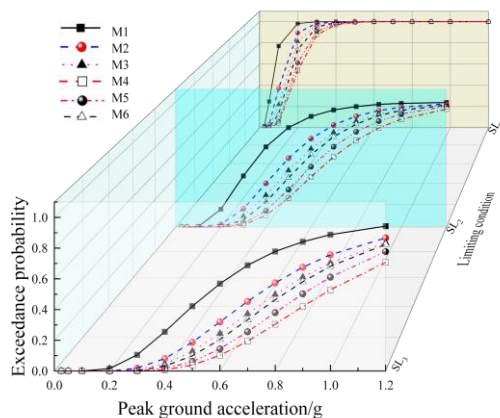


图15 不同转换层刚度比易损性曲线对比图

Fig. 15 Comparison of vulnerability curves of different conversion layer stiffness ratios

综上,目前学者对密肋复合墙的易损性分析较少,未来应增加对高层结构的易损性分析,以及通过机器学习等方法探究最佳损伤指标和最佳地震动指标,以推动密肋复合墙的易损性研究。

### 3 现浇磷石膏—网格式框架组合墙

现浇磷石膏—网格式框架组合墙是由我国工程院马克俭院士<sup>[55]</sup>首先提出的新型建筑结构墙体体系,该体系创新性地将磷石膏和网格式框架组合,不仅具有节能、环保、经济等优势,还适用于多种建筑场景。由于该体系提出较晚,目前国内研究较少。尹烽宇等<sup>[56]</sup>通过试验和有限元分析方法,对比了无填充框架墙、磷石膏—混凝土组合墙和改性磷石膏—混凝土组合墙的抗压性能。研究结果显示,磷石膏和改性磷石膏在框架墙的基础上承载力显著提高,观察破坏现象发现,改性磷石膏—混凝土墙体相较于另外两种墙体更易出现水平和斜向裂纹,说明其具有更好的延性。董晓龙等<sup>[57]</sup>以偏心距为变量,对现浇磷石膏—框架组合墙体进行一系列抗压试验,并着重探讨构件在整体抗震性能中的有效分配系数。在试验的基础上利用有限元软件建立等尺寸模型,分析墙体结构的损伤情况,试验和数值模拟表明:楼层梁比层间梁更易破坏,中柱比边

柱更易压坏,最后破坏时磷石膏出现崩塌现象;墙体开洞对结构抗压能力有明显影响。

张华刚等<sup>[58]</sup>详细介绍了改性磷石膏—混凝土组合墙体结构及相应楼盖的构造特点,通过计算和工程验证发现新型墙体结构使用的磷石膏用量可极大节约混凝土用量,具有出色的经济效益。卢亚琴等<sup>[59]</sup>开展了3榀1/5缩尺墙体模型的拟静力试验,结果表明,新型钢筋混凝土框架结构显示出了传统钢筋混凝土框架结构的受力特点,试件的各层都存在着反弯点,主要表现为剪切破坏,饱满的滞回曲线意味着结构具有较强的耗能能力,在延性方面明显高于常规钢筋混凝土框架结构。

综上,现浇磷石膏—网格式框架组合墙起步较晚,目前国内研究较少。高性能混凝土具有强度高、抗裂性能和耐久性好等优点,将其运用到网格墙的研究还较少,应开展相关方面的研究,如运用新材料和新技术,使网格墙具有更多建筑功能。

### 4 结语

文中概述了格构式墙体结构在材料性能、轴压性能、抗酸侵蚀、热工性能、隔声性能、耐候性能和抗震性能方面的研究。主要结论包括:格构式墙体在酸性、火灾和冻融环境中表现出色;框架-格构式混凝土墙协同效应良好;剪跨比、配筋率和模壳使用对轴压和抗震性能有显著影响等。研究者还提出并验证了采用不同格构形式、新型材料和构造的改进格构式墙体结构,以增强其抗震性能。

国外对格构式混凝土研究及应用较为成熟,我国相关单位和设计人员需要根据当地气候和地震情况等实际情况进行适当的调整和完善。建议针对格构式混凝土墙体进一步开展以下研究工作:

1) 格构式混凝土高层剪力墙的易损性尚缺乏研究,如何将该类突破建筑高度极限,使该墙体应用广泛也是未来发展方向。

2) 当前,具备格构式混凝土墙体生产基地的大型企业较少,尚未满足建筑工业化的发展需求,因此仍具有较大的开发潜力。为实现建筑工业化,应该努力将结构、外部保护、设备和管道以及内部安装系统整合在一起,以达到最佳效果。

3) 再生混凝土、工业矿渣、植物纤维板材等材料运用到格构式混凝土墙体中,是绿色建筑发展的需求。

4) 格构式混凝土结构应设计具有震后可快速恢复使用功能,以确保灾后生活和生产的迅速重建。



采用可更换构件的策略,可实现格构式混凝土墙体结构在地震后能迅速修复受损部分。

5) 格构式混凝土墙体结构应融入减震技术,既能抵御地震冲击,又能发挥耗能减震的作用。这样的设计旨在减少建筑和设备的损毁,降低经济损失,具有明显的实用价值。

## 参考文献:

- [1] 刘伟,江振松.基于系统动力学的装配式建筑产业发展研究[J].华东交通大学学报,2021,38(02):8-16.  
LIU W, JIANG Z S. Research on the Industry Development of Prefabricated Building Based on System Dynamics[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021,38(02):8-16.
- [2] 张年,张诚.新农村经济-交通运输-农村生态环境耦合协调发展研究[J].华东交通大学学报,2020,37(02):46-55.  
ZHANG N, ZHANG C Research on Coupling Coordination Development of New Rural Economy—Transportation-Rural Ecological Environment[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020,37(02):46-55.
- [3] HE J X, XU Z D, ZHANG L Y, et al. Shaking table tests and seismic assessment of a full-scale precast concrete sandwich wall panel structure with bolt connections[J]. Engineering Structures, 2023, 278: 115543.
- [4] SHI J, ZHANG F, ZHAO X, et al. Full-scale shaking table test on seismic performance of a steel frame with translational-type precast-concrete exterior wall panel[J]. Journal of Vibroengineering, 2024, 26(1): 79-97.
- [5] PANG R, GAO C, GAO X, et al. Shaking table test and numerical analysis of an innovative precast reinforced concrete building structure[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 77: 107503.
- [6] ZHOU T, WANG Z, LIU H, et al. Seismic behavior of a new fabricated concrete grating composite wall structure in rural residences: Shaking table test and finite element analysis[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 82: 108254.
- [7] ZHAO B, WU D, ZHU H. New modular precast composite shear wall structural system and experimental study on its seismic performance[J]. Engineering Structures, 2022, 264: 114381.
- [8] TANG B, YU B, ZHUANG H, et al. Seismic behavior of irregular underground structures in saturated sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 179: 108478.
- [9] WU F W, LI Y Q. Large-scale shaking table tests of a six-story floor-by-floor assembled CFS frame-framing shear wall structure[J]. Engineering Structures, 2023, 293: 116608.
- [10] 莫磊.新型保温节能复合墙体研究[D].河北工业大学,2003.  
MO L. Study on a new type thermal-insulating and energy-saving complex wall[D].Tianjin:Hebei University of Technology,2003.
- [11] BABU K G, BABU D S. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(5): 755-762.
- [12] MILED K, SAB K, LE ROY R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling[J]. Mechanics of Materials, 2007, 39(3): 222-240.
- [13] GARTH J S. Experimental investigation of lateral cyclic behavior of wood-based screen-grid insulated concrete form walls[D]. Portland State University, 2014.
- [14] 徐阳,褚作勇,王晓波.超低能耗纤维膜壳格构式混凝土结构体系研究[J].安徽建筑,2018,24(05):115-117+241.  
XU Y, CHU Z Y, WANG X B. Research on ultra-low energy fiber membrane shell latticed concrete structure system[J].Anhui Architecture, 2018,24(05):115- 117+241.
- [15] 孙利铭.水泥聚苯模壳格构式墙体本土化研究[D].北京建筑大学,2015.  
SUN L M. The Localization research of RAST-RA[D]. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015
- [16] 曹启坤,张金喜,杨胜光,等.水泥聚苯模壳格构式混凝土墙体轴心受压试验研究[J].混凝土,2018(10):28-32.  
CAO Q K, ZHANG J X, YANG S G, et al. Experimental study on axial compression of epsc latticed concrete wall[J]. Concrete, 2018(10):28-32.
- [17] 宋春玲,高立堂,李培培.偏心距对 HR-EPS 剪力墙抗压性能的影响[J].工程建设,2014,46(06):4-6+25.  
SONG C L, GAO L T, LI P P, et al. Influence of eccentricity on compression resistance of HR-EPS shear wall[J]. Engineering Construct-ion, 2014, 46(06):4-6+25.
- [18] BAGON C,FRONDISTOU-YANNAS S.Marine floating concrete made with polystyrene expanded beads[J]. Magazine of Concrete Research,1976, 28(97):225-229.
- [19] 杨胜光,曹启坤,暴佳乐.模拟酸雨对水泥聚苯模壳侵蚀影响的试验研究[J].重庆建筑,2017,16(07):60-63.

- YANG S G, CAO Q K, BAO J L. Experimental simulation on erosion influence of acid rain on epsc[J]. Chongqing Architecture, 2017,16(07): 60-63.
- [20] KOJU S M. Thermal behaviour of expanded polystyrene based lightweight concrete sandwich panel at various temperatures[J]. Journal of Science and Engineering, 2017,4:47-52.
- [21] 孙洪明,许红升,高鹏.水泥聚苯模壳格构式自保温墙体热工性能与防火性能研究[J].建设科技,2016(11):47-49. SUN H M, XU H S, GAO P. Study on thermal performance and fire performance of cement polystyrene lattice self-insulation wall[J]. Construction Science and Technology, 2016(11):47-49.
- [22] 刘加强,高宇,朱盈豹.水泥聚苯模壳格构式混凝土墙体热工及隔声性能浅析[J].辽宁建材,2010(05):16-17. LIU Q, GAO Y, ZHU Y B. Thermal and sound insulation performance analysis of cement polystyrene latticed concrete wall[J]. LiaoNing Building Materials, 2010(05):16-17.
- [23] 邵云波,郭洪亮.水泥聚苯模壳格构式墙体保温结构一体化建筑技术[J].建设科技,2013(21):44-45. SHAO Y B, GUO H L. Integrated building technology of cement polystyrene shell lattice wall thermal insulation structure[J]. Construction Science and Technology, 2013(21):44-45.
- [24] MEHRABI, AB. In-plane lateral load resistance of wall panels in residential buildings[R]. Portland Cement Association, 2000. Portland Cement Association.
- [25] DUSICKA P, KAY T. Seismic evaluation of a green building structural system: ICF grid walls[J]. Structures Congress, 2009:1-7.
- [26] DUSICKA P, KAY T. In-plane lateral cyclic behavior of insulated concrete form grid walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(10): 1075-1084.
- [27] ABDEL-MOOTY M, HAROUN M, EL MAGHRABY Y, et al. Performance of screen grid insulating concrete form walls under combined in-plane vertical and lateral loads[J]. Advanced Materials Research, 2011, 163: 1803-1810.
- [28] 张微敬,杜轶男,康洪震,等.大网格混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(05):116-124. ZHANG W J, DU Y N, KANG H Z, et al. Experimental study on seismic behavior of large grid size RC shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(05):116-124.
- [29] 周中一,曹万林,张勇波. L形边框单排配筋保温模块矮剪力墙抗震性能研究[J].土木工程学报,2016,49(12):35-44.
- ZHOU Z Y, CAO W L, ZHANG Y B. Study on seismic performance of low-rise shear wall with thermal insulation blocks of single-row steel reinforcement and L-shaped frame[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(12):35-44.
- [30] 曹万林,程娟,张勇波,等.保温模块单排配筋再生混凝土低矮剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(01):51-58. CAO W L, CHENG J, ZHANG Y B, et al. Experiment of seismic behavior of low-rise recycled aggregate concrete shear wall with insulation blocks and single layer of reinforcement[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(01):51-58.
- [31] 张勇波,曹万林,周中一,等.保温模块单排配筋再生混凝土中高剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(09):29-36. ZHANG Y B, CAO W L, ZHOU Z Y, et al. Experimental study on seismic behavior of mid-rise recycled aggregate concrete shear wall with insulation blocks and single layer reinforcement[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(09):29-36.
- [32] ASADI P, MADANDOUST R, ZAHRAI S M. Response modification factor due to ductility of screen-grid ICF wall system in high seismic risk zones[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21: 258-264.
- [33] 孙建超,钱稼茹,方鄂华等.小剪跨比保温砌模混凝土墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2002(02):19-26. SUN J C, QIAN J R, FANG E H, et al. Experimental study on seismic behavior of concrete grill wall with small shear span ratio[J]. Journal of Building Structures, 2002(02):19-26.
- [34] 王奇,钱稼茹,马宝民等.保温砌模混凝土网格墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2004(04):15-25. WANG Q, QIAN J R, MA B M, et al. Experimental study on seismic behavior of concrete grillage walls[J]. Journal of Building Structures, 2004(04):15-25.
- [35] 刘军进,王翠坤,肖从真,等.水泥聚苯模壳格构式混凝土墙体抗震性能研究[J].建筑结构,2006,36(S1):677-681. LIU J J, WANG C K, XIAO C Z, et al. Study on aseismic performance of epsc form latticed concrete wall with testing method[J]. Building Structure, 2006, 36(S1): 677-681.
- [36] LOPEZ A, BAZAEZ R, LEIVA G, et al. Experimental study

- of in-plane flexural behavior of screen-grid insulated concrete form rectangular and T-shaped walls[J]. *Engineering Structures*,2021,247:113128.
- [37] 李小军,曹鑫雨,唐柏赞,等.斜向肋格水泥聚苯模壳格构式混凝土墙体抗震性能试验[J]. *工程科学与技术*,2022,54(02):81-89.
- LI X J, CAO X Y, TANG B Z, et al. Seismic Performance Test of Expansive Polystyrene Granule Cement Latticed Concrete Wall with Diagonal Bracing[J]. *Advanced Engineering Sciences*,2022, 54(02):81-89.
- [38] 唐柏赞,熊立红,李小军,等.足尺水泥聚苯模壳格构式混凝土填充墙钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*,2020,41(09):13-23.
- TANG B Z, XIONG L H, LI X J, et al. Experimental study on seismic behavior of full-scale reinforced concrete frame with EPSC latticed concrete infill wall[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(09):13-23.
- [39] TANG B, CHEN S, LI X, et al. Seismic performance of RC frames with epsc latticed concrete infill walls[J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109437.
- [40] 姚谦峰,黄炜,田洁,等.密肋复合墙体受力机理及抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*,2004(06):67-74.
- YAO Q F, HUANG W, TIAN J, et al. Experimental analyses of mechanical characteristics and seismic performance of multi-ribbed panel wall[J]. *Journal of Building Structures*,2004(06):67-74.
- [41] 郭猛,姚谦峰,李鹏飞.基于ETABS的斜交密肋框架结构地震反应分析[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*,2009,25(5):842-846.
- GUO M, YAO Q F, LI P F. Seismic responses analysis of skew multi-ribbed frame structure based on etabs[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)* 2009, 25(5):842-846.
- [42] 贾穗子,曹万林,袁泉.框支密肋复合墙体拟静力试验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*,2015,47(08):120-124.
- JIA S Z, CAO W L, YUAN Q. Pseudo-static experiment of multi-ribbed composite wall supported on frame shear-wall structure[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015,47(8):120-124.
- [43] 常鹏,李强军,贾穗子.底框-斜向网格复合墙体抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*,2014,35(03):85-92.
- CHANG P, LI Q J, JIA S Z. Experimental research on seismic performance of bottom-frame diagonal-grid composite walls[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(3):85-92.
- [44] 田鹏,姚谦峰,何明胜,等.钢骨外框密肋复合墙体抗剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*,2008,29(S1):78-82.
- TIAN P, YAO Q F, HE M S, et al. Experimental research on shear bearing behavior of the steel reinforced multi-ribbed composite wall[J]. *Journal of Building Structures*,2008, 29(S1):78-82.
- [45] 刘佩,郭猛,李挺,等.轻钢龙骨框格密肋复合墙体抗震性能试验研究[J]. *工程力学*,2012,29(01):128-133.
- LIU P, GUO M, LI T, et al. Experimental investigation on seismic behavior of multi-grid composite wall reinforced by light steel[J]. *Engineering Mechanics*, 2012,29(1):128-133.
- [46] 袁泉,赵媛媛,宗明奇,等.装配式型钢斜交密肋复合墙抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*,2019,40(11):122-130.
- YUAN Q, ZHAO Y Y, ZONG M Q, et al. Experimental study on seismic behavior of precast shape steel oblique multi-ribbed composite wall[J]. *Journal of Building Structures*,2019,40(11):122-130.
- [47] 孙静,吴君怡,赵秀丽.高温后密肋复合墙体框格单元损伤[J]. *清华大学学报(自然科学版)*,2022,62(02):285-293.
- SUN J, WU J Y, ZHAO X L. Damage of multi-ribbed composite wall cell after high temperatures[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*,2022, 62(02):285-293.
- [48] 孙静,赵秀丽,张敬.高温后密肋复合墙体框格单元剩余承载力[J]. *同济大学学报(自然科学版)*,2018,46(09):1182-1188.
- SUN J, ZHAO X L, ZHANG J. Residual Bearing Capacity of Multi-Ribbed Composite Wall Cell After High Temperature[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*,2018,46(09):1182-1188.
- [49] 姚谦峰,荆罡,黄炜,等.密肋壁板结构刚架-等效斜撑计算模型研究[J]. *工业建筑*,2009,39(8):52-56.
- YAO Q F, JING G, HUANG W, et al. Study on rigid frame-equivalent brace model of multi-ribbed slab structure[J]. *Industrial Construction*, 2009, 39(8): 52-56.
- [50] 卢俊龙,张荫.地基与密肋复合墙结构相互作用系统频域地震响应试验研究[J]. *岩土力学*,2019,40(06):2163-2171+2182.
- LU J L, ZHANG Y, et al. Experimental study of the seismic response of the assembled multi-ribbed wall structure-subsoil system in frequency domain[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019,40(06):2163-2171+2182.
- [51] 卢俊龙,张荫.密肋复合墙结构-基础-地基共同作用体系振动台试验[J]. *武汉大学学报(工学版)*,2018,51(12):1



063-1071.

LU J L, ZHANG Y, et al. Shaking table test study of interaction systems of multi-ribbed wall structure-foundation-sabsoil[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2018,51(12):1063-1071.

- [52] 袁泉,何玉阳.框支密肋复合墙结构模型振动台试验研究[J].振动与冲击,2014,33(22):72-77.

YUAN Q, HE Y Y. Earthquake simulation test on multi-ribbed composite wall supported on frame[J]. Journal of Vibration and Shock,2014,33(22):72-77.

- [53] 何玉阳,袁泉.框支密肋复合墙结构振动台试验与数值模拟分析[J].振动与冲击,2015,34(13):205-210.

HE Y Y, YUAN Q. Frame-supported multi-ribbed composite wall shaking table test and numerical simulation analysis[J]. Journal of Vibration and Shock,2015, 34(13): 205-210.

- [54] 孙静,吴君怡,卢啸.框支密肋复合墙结构地震易损性研究[J].工程力学,2023,40(06):61-72.

SUN J, WU J Y, LU X. Seismic fragility analysis of frame-supported multi-ribbed composite wall structure[J]. Engineering Mechanics,2023,40(06):61-72.

- [55] 马克俭,高国富,张华刚,等.空间网格格式框架结构在多层、高层大开间灵活划分房间石膏节能建筑中的应用综述[J].空间结构,2009,15(03):66-84+65.

MA K J, GAO G F, ZHANG H G, et al. Research and application on space grid frame construction used in multi-story and tall buildings with energy saving and large bays[J]. Spatial Structures,2009,15(03):66-84+65.

- [56] 尹烽宇,马克俭,张华刚,等.磷石膏—混凝土网格格式框架组合墙受压力学性能[J].空间结构,2022,28(04):72-80.

YIN F Y, MA K J, ZHANG H G, et al. Compressive performance of phosphogypsum-concrete grid frame composite wall[J]. Spatial Structures,2022,28(04):72-80.

- [57] 董晓龙,张华刚,吴琴,等.现浇磷石膏—混凝土网格格式框架组合墙平面外偏心受压试验研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(03):114-118.

DONG X L, ZHANG H G, WU Q, et al. Out-of-plane

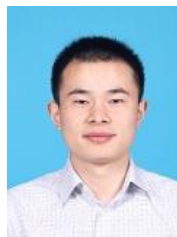
eccentric compressive experimental study on grid framework composite wall with cast-in-situ phosphogypsum-concrete[J]. Journal of Guizhou University(Natural Sciences),2016,33(03):114-118.

- [58] 张华刚,梁凡凡,罗琦等.基于现浇磷石膏的节能与结构一体化新型墙体结构及其应用[J].贵州大学学报(自然科学版),2013,30(01):104-110.

ZHANG H G, LIANG F F, LUO C, et al. Energy-saving and Structure Integration of New-type Wall Structure Based on Cast-in-situ Phosphogypsum and its Application. Journal of Guizhou University(Natural Sciences), 2013,30(1):104-109.

- [59] 卢亚琴,胡岚,马克俭,等.新型 RC 网格格式框架结构墙体试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(4):8-14.

LU Y Q, HU L, MA K J, et al. Test Research on the Wall of New Type RC Grid Frame Structure[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2013, 40(4):8-14.



第一作者:唐柏赞(1989—),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为结构抗震和防灾减灾研究。

E-mail: tangbaizan@163.com



通信作者:庄海洋(1978—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为岩土地震工程研究。E-mail:

zhuang7802@163.com