

文章编号: 1005-0523(2024)05-0115-12



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, 郭文杰

(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:为解决建筑高耗能、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。格构式混凝土墙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项优势,近年来成为研究和应用的热点。简要介绍了格构式混凝土墙体结构,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。诸多研究表明:格构式混凝土墙体结构的发展,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、复杂环境下冻融等方面提升其物理性能,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

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

本文引用格式:唐柏赞,余广汕,龚凯,等.格构式混凝土墙体结构性能研究进展[J].华东交通大学学报,2024,41(5):115-126.

Research on Structural Performance of Latticed Concrete Wall

Tang Baizan, Yu Guangshan, Gong Kai, Zhuang Haiyang, Liu Xuchen, Zhang Ji, Guo Wenjie

(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 has been actively promoting the development of green, energy-saving and environmentally friendly wall structures. Among them, as a new type of wall structure, the lattice concrete shear wall structure has multiple functions such as heat preservation, energy saving, sound insulation, fire resistance, light weight bearing, convenient construction and environmental protection, becoming a hot spot of application and research in recent years. This study briefly introduces the form of lattice concrete wall structure, summarizes the axial compression, 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 present. It shows that the development of lattice concrete wall structure is a major demand for the recycling of building materials and 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 prevention, freeze-thaw 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

收稿日期:2024-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(52478518,52368072,51908216);江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(20204BCJL23032);江西省自然科学基金项目(20224BAB204073)

and technical support for the wide application of lattice concrete walls and their structures.

Key words: lattice concrete wall; wall form; mechanical properties; seismic performance

Citation format: TANG B Z, YU G S, GONG K, et al. Research on structural performance of latticed concrete wall[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 115–126.

在国家推进“双碳”战略的背景下,建筑业作为能源消耗和碳排放的主要来源,成为了我国实现低碳发展的关键行业^[1]。在建筑领域,迫切需要用具有良好保温性能、节能、节土、环保的新型墙体材料来替代那些保温性能差、能耗高的传统建筑材料^[2]。

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。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、环保等于一体的新型墙体,构造示意图如图1所示;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;现浇磷石膏-网格式框架组合墙等墙体体系为我国自主研发,是在框架墙的基础上内嵌磷石膏实现,与密肋复合墙体类似,可应用多个建筑场景。

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,并因其多项优势被广泛应用于住宅、酒店、厂房以及铁路隔音墙体等建筑结构中。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

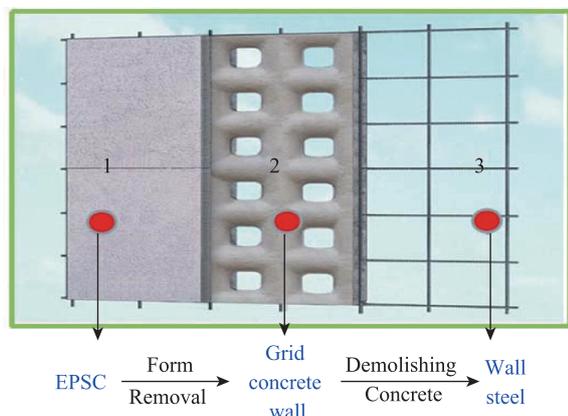


图1 EPSC格构式混凝土墙体
Fig. 1 EPSC lattice concrete wall

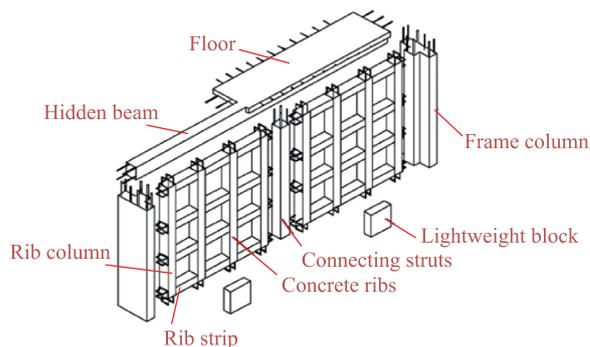


图2 密肋复合墙体
Fig. 2 Multi-ribbed composite wall

施工的特点。这种墙体结构既能方便快捷地施工,减少噪音和尘土污染,又具备建筑节能环保、保温隔热、抗震抗裂、隔音轻质和承重能力强等多种优点。本文通过对格构式混凝土墙体的轴压性能、热工性能、隔声性能、耐候性能、抗震性能等结构性能进行综述分析,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,具有极高的灵活性,可以根据施工需求进行精细切割,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式空腔,模壳构件充当混凝土浇筑模板。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。

通过改良材料配方,可以增强格构式混凝土墙体在抗压和抗拉方面的性能,并且提高其经济效

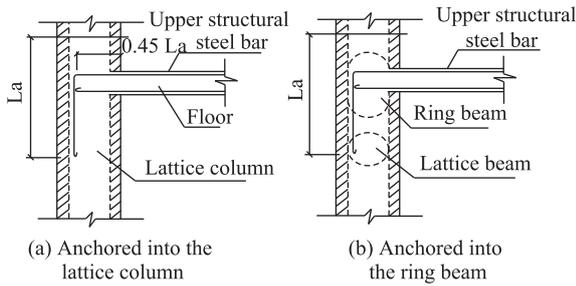


图3 EPSC格构式混凝土墙体基本构造
Fig. 3 Basic structure of EPSC lattice concrete wall

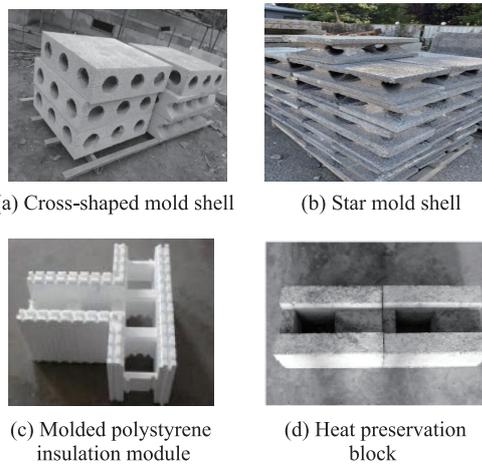


图4 模壳材料类别
Fig. 4 Mold shell material category

益。这种材料优化的方法有助于实现结构性能和成本效益之间的平衡,为格构式混凝土墙体的广泛应用提供新的可能性。在抗压性能方面,莫磊^[3]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,并基于力学性能试验获得了最优配合比。Babu等^[4]在EPS混凝土中掺入一定浓度的硅粉与不加硅粉做对照试验,发现前者的密度是后者的2倍,并且其强度是后者的3倍,说明添加一定浓度的硅粉可有效提高EPS混凝土的抗压性能。Miled等^[5]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。并进一步观察到这种尺寸效应对于低孔隙率混凝土的影响非常明显,而对于孔隙率较高的混凝土影响则可以忽略不计。Garth^[6]通过将85%的矿化木屑与15%的水泥混合制成墙体材料,并对其进行了拟静力试验。试验结果表明,这种新型墙体材料的抗压强度相较于传统材料有所提高。抗拉性能方面,徐阳等^[7]成功

研发了一种以植物纤维混凝土为原料的模壳。由于植物纤维本身具有较高的抗拉强度和良好的延伸性,这种新型模壳能显著增强混凝土在抗拉、抗弯、抗冲击以及韧性等性能。经济性方面,孙利铭^[8]通过计算现有轻骨料的传热系数对其进行筛选,筛选出性价比较高的轻骨料,实现了降低建筑成本的目标。

经过广泛的实验研究和多种改良添加剂的使用,研究人员开发了多种改良方法和配方。这些改良后的墙体材料在力学性能、耐久性以及其他相关的物理性能方面都有了显著的提高,为实际的工程应用提供了重要的参考依据。然而,在众多现有的改良研究中,提出的改性配方比较分散,即便是非常相似的改性方法,也可能得到不同的性能指标。因此,如何将这些材料改性方法或配方进行归纳、整理和加工,形成一套能够指导格构式墙体实际工程应用的成果,仍然是一个亟待解决的问题。此外,将工业废弃物如矿渣、粉煤灰与EPS混凝土相结合,也成为了未来研究的热点之一。

1.2 轴压性能

曹启坤等^[9]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,研究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^[10]研究了偏心距对HR-EPS剪力墙的影响,发现偏心距对HR-EPS墙的承载力影响较大,偏心距越大,墙体的承载力越小;从破坏形态看,随偏心距增大破坏位置由底部转移到中部。

综上,轴压承载力受配筋率、偏心距的影响,但

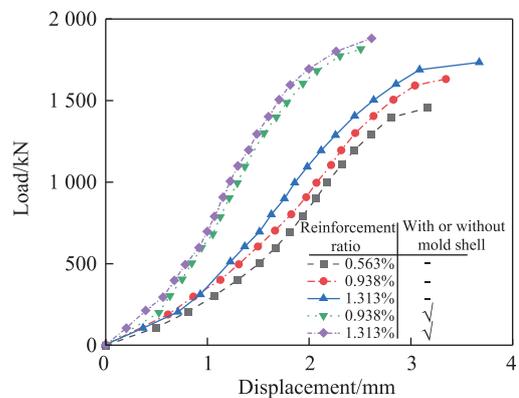


图5 荷载-位移曲线
Fig. 5 Load-displacement curve

整体上轴向压缩性能的变化并不明显,通过适量掺加粉煤灰也可以提高墙体的抗压变形能力。然而,目前的研究大多集中在对缩尺十字形墙体的模拟上,未来还需要开展以下几方面的研究工作:① 加强对高强格构式墙体的研究工作,形成完整的理论体系,为设计和施工提供理论指导;② 进一步完善足尺试件的试验研究或考虑试件尺寸效应,真实反映原型构件的实际受力性能,力求数据和理论的准确;③ 虽已有一些改善格构式墙体受压性能的措施被提出,但材料用量尚需要进一步研究明确。

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^[11]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^[12]对水泥聚苯模壳在不同 pH 值模拟酸雨溶液中的抗酸侵蚀性能进行了研究,分析了酸雨对模壳抗压性和线膨胀系数的影响,结果表明:随侵蚀龄期增加,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小后增大的趋势。图 6 为酸性环境下水泥聚苯模壳抗压强度变化规律。

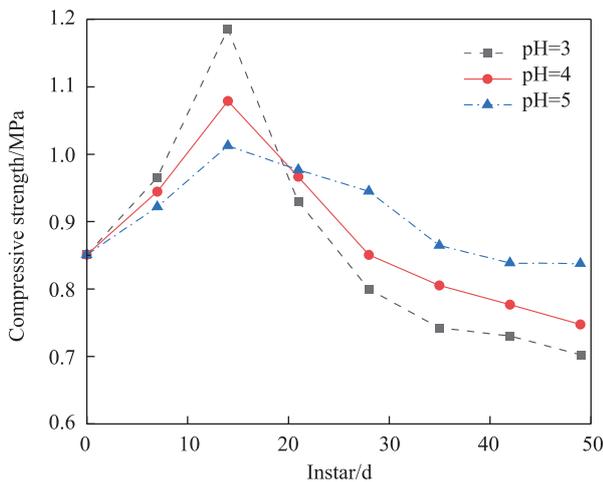


图 6 侵蚀作用下水泥聚苯模壳抗压强度变化规律
Fig. 6 The changing pattern of compressive strength of cement polystyrene mold shell under erosion

EPS 模壳在酸碱环境下的力学性能研究对于解决墙体老化和开裂问题具有重要意义。然而,为了使格构式混凝土结构得到广泛应用,还需要更多的耐久性研究。这包括在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。特别是在复杂环境下,格构式混凝土结构的耐久性研究需要进一步加强,以完善其理论体系,确保结构的稳定性和安全性。

1.4 热工性能

目前我国广泛采用的多种传统保温材料在防火方面存在明显不足。当火灾发生时,这些材料在高温作用下,抗压强度和抗震能力通常会大幅降低,这无疑增加了建筑物的安全风险。因此,增强保温材料的防火能力,确保它们在极端高温环境下能够保持必要的结构稳定性,对于提升建筑安全至关重要。Koju 等^[13]采用电阻加热法进行热试验,试验考虑了内部传热,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^[14]对各种规格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,如图 7 所示,耐火极限试验显示,当火焰温度达 1 080 °C 并持续燃烧 3 h,同时在顶部加载 96 t 荷载时,墙体仍然完整,背火面温度仅上升 5 °C。这些墙体的耐火隔热性、耐火承载力、耐火完整性均满足《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)对墙体耐火极限的要求。刘加强等^[15]对 EPSC 格构式墙体在不同厚度下的传热系数和热惰性指标进行了计算分析。他们发现,对于厚度为 250 mm 厚度 EPSC 外墙的传热系数和热惰性指标分别 0.706 4 W/(m²·K), 5.086 3。

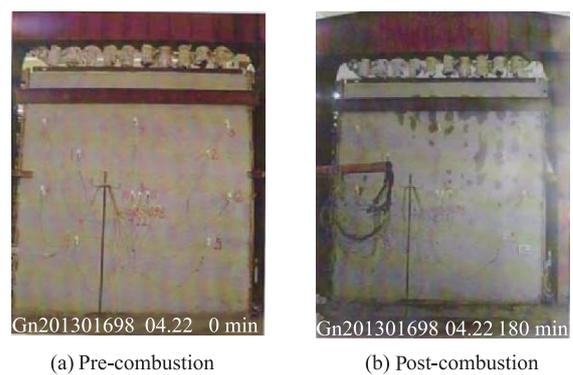


图 7 EPSC 材料耐火极限试验
Fig. 7 Fire resistance limit test of EPSC

综上所述,现有的研究多集中在探讨格构式混凝土单面墙体的防火特性,对于整体结构防火研究相对不足。因此,未来的研究应加强格构式结构的耐火性能与防火设计,目标是建立复杂火灾环境下格构式结构的通用设计理论。同时,研究还应包括

在复杂环境下格构式结构的耐火韧性设计方法,目的是全面提高格构式结构的被动防火能力和灾后恢复能力,确保结构在火灾中不会发生垮塌。

1.5 隔声性能

良好的隔音效果能够为居住者营造出更加舒适和宁静的居住及学习空间。邵云波等^[16]通过空气声计权隔声量检测方法,研究了EPSC墙体的隔声量,如图8所示,研究表明,250 mm的EPSC墙体能够有效吸收噪声,具有良好的隔声效果;研究结果符合《声学 房屋和建筑物结构隔声测试第3部分:建筑物结构空气声隔声的实验室测量》(GB/T 19889.3—2005)的要求。刘加强等^[15]根据质量隔声定律,对300 mm和350 mm厚度的EPSC墙体进行计权隔声量计算,两者的计权隔声量分别为54.0 dB和54.4 dB。

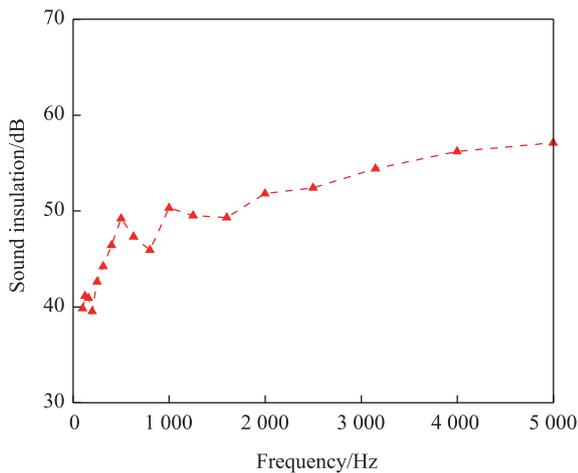


图8 隔声特性曲线

Fig. 8 Characteristic curve of acoustic insulation

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

耐候性是衡量结构在不同自然环境下抵抗退化、降解和损坏能力的指标。邵云波等^[16]对EPSC格构式混凝土墙体进行了冻融循环试验。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,根据试验结果评估EPSC模壳寿命可达50年以上。墙体耐候性能如表1所示。

表1 EPSC墙体的耐候性能

Tab.1 Weathering performance of EPSC wall

Performance	Result
Density/(g/m ³)	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.
Hanging force/N	Bearing 1 000 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.

目前,关于格构式混凝土的抗冻性能研究大多只考虑冻融循环单一影响,忽视了氯盐等环境因素及与荷载共同作用的复杂情况。此外,改善抗冻性能的措施也相对匮乏,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。为了深入探究格构式墙体的抗冻性能,未来的研究需要综合运用室内外试验,全面收集相关数据,并从微观和宏观两个层面对其性能进行评估。这将有助于丰富和完善冻融作用下的损伤机理和理论,从而为格构式混凝土墙体在实际工程中的应用提供更加有力的科学支撑。

1.7 抗震性能

在强震作用下,结构水平位移较大,易造成严重的非结构性破坏。因此,对于结构抗震性能的研究显得尤为重要。Mehrabi^[17]开展了木框架墙体、钢框架墙面板及格构式混凝土墙体(ICF)试件的水平往复荷载试验研究,研究表明,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等^[18-19]开展了两种不同的长宽比($H/L=0.89, 2.67$)、不同竖向荷载条件的ICF墙体拟静力试验,采用在ICF模板开口处插入金属丝网和在混凝土中加入钢纤维两种方法,以提升SGICF墙体平面内抗震性能。张微敬等^[20]开展了剪

跨比为1.13,2.02的大网格墙拟静力试验,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。周中一等^[21],曹万林等^[22],张勇波等^[23]对保温模块单排配筋再生混凝土剪力墙开展了系列拟静力试验,系列试验较完整体现了不同高宽比(高、中高、低矮)、不同构造形式(一字形、L形)和不同厚度剪力墙的抗震性能,结果表明保温模块及其面层砂浆对剪力墙抗震性能有显著影响,模塑聚苯乙烯保温模块单排配筋再生混凝土剪力墙可用于村镇底层和多层抗震结构中。Asadi P等^[24]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。通过数值模拟和实验结果的分析,他们认为在大地震风险区格构式墙体的延性符合抗震设计要求。

Lopez等^[25]对矩形和T形截面的ICF(内嵌混凝土)墙体进行了平面弯曲实验,验证了弯矩的解析模型,研究了细长的格构式混凝土墙体的变形能力,并对其变形能力、刚度、耗能和强度进行了评估。实验中,他们将最后一个峰值循环的耗散能量(E_{LC})与每个试件在不同侧向位移水平下第一个峰值循环的耗散能量(E_{FC})进行了归一化比较。 E_{LC}/E_{FC} 比值结果如图9所示。从图中可以观察到,在较大的位移角范围内,能量耗散比介于0.4到1之间。这项研究表明,ICF墙体具有良好的非弹性变形能力和稳定的力学响应,其力学特性与传统的钢筋混

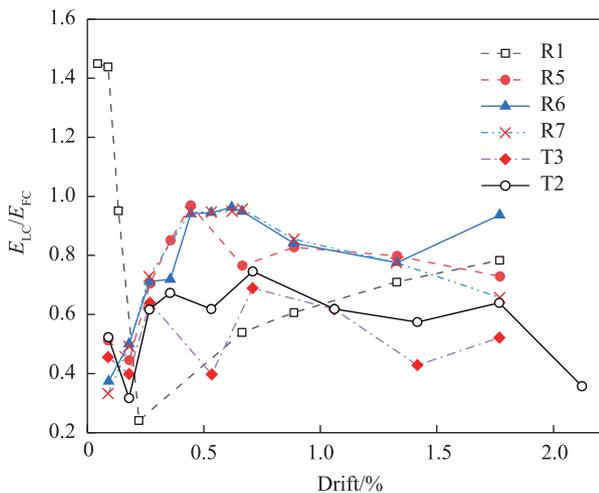


图9 矩形和T形试件的耗能比

Fig. 9 The energy dissipation ratio of rectangular and T-shaped specimens

凝土墙体相近。

李小军等^[26]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10(a)所示,在试验中两种墙体结构表现出类似的剪切破坏。结果表明:在传统正交墙体的基础上增加斜向肋格可提升墙体刚度和抗震性能,模壳和墙体的协同作用可增强结构的耗能能力。唐柏赞等^[27]通过框架-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动力响应,通过观察框墙破坏情况,分析加速度放大系数变化、层间位移和应变规律,评估框架-格构式混凝土填充墙抗震性能,见图10(b),实验显示,在渐进地震激励下,EPSC的表面部分区域开始变形,格构梁和格构柱出现一些水平、环形裂缝,RC框架未发生明显破坏。

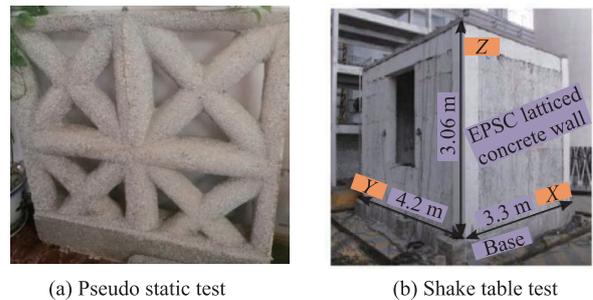


图10 抗震性能试验

Fig. 10 Seismic performance test

上述研究表明,通过实验和数值模拟验证,格构式混凝土墙体在开裂荷载和耗能能力方面均符合抗震设计标准。然而,受实验条件限制,目前对格构式墙体的研究尚不完善,未来研究中需要注意以下事项:①现阶段研究主要围绕缩尺模型开展,而材料及构件的尺寸效应、相似关系的处理将直接影响结构受力性能分析,需对试验结果进行准确分析。②与拟静力试验相比,格构式墙体的振动台试验主要集中于框架填充墙结构。未来的研究应扩展到多层格构式墙体剪力墙的三维试验,以探索多层结构在实地震作用下的抗震行为和破坏机制。③有限元分析能够模拟结构的动力响应,并在多工况和复杂荷载下进行动力学分析,为实际工程提供有价值的参考。与试验研究相比,数值模拟的研究相对较少。因此,亟需在已有试验研究的基础上,进一步完善有限元分析方法,以提高其在工程实践中的应用价值。

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,具有施工速度快、轻质节能等优点,并有着良好的抗震性能。姚谦峰等^[28]研究发现,密肋复合墙的四中常见的损伤形式分别为剪切、弯曲、剪切滑移以及复合型。郭猛等^[29]运用ETABS程序对墙体在不同密肋框格形式下的动力特性进行了研究,结果表明密肋框格与外框架协同工作能有效提升结构的刚度和抗震性能。贾穗子等^[30]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改善墙体的延性、抗倒塌能力和耗能能力。田鹏等^[31]通过拟静力试验研究钢骨外框密肋复合墙体性能,发现其抗剪承载力和开裂荷载较普通密肋复合墙体有所提高。刘佩等^[32]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了50%以上,具有优越的抗震能力。袁泉等^[33]采用拟静力试验研究型钢骨架和斜交肋格组合装配的密肋复合板结构的抗震性能,观察各种类型墙体的破坏形态,如图11所示(MW-1, MW-2分别为正交与斜交钢筋混凝土;SMW-1, SMW-2分别为正交与斜交型钢混凝土),结果表明,采用斜交肋格的设计可显著增强墙体的抗剪承载力和侧向刚度,同时也有效地提升了结构耗能能力和刚度。

孙静等^[34]利用局部损伤值,并基于能量分析方法,构建了一种整体损伤指标,用于评估高温后密

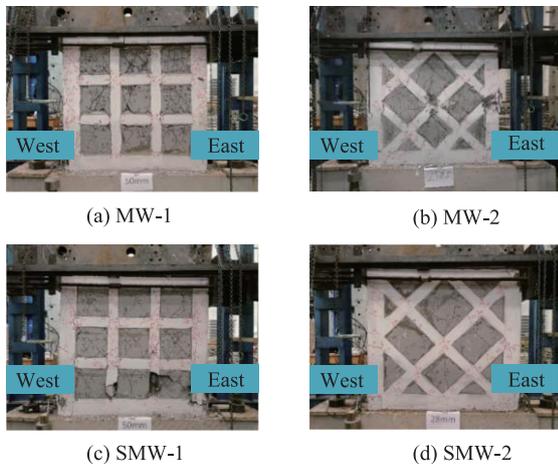


图11 不同类型墙体破坏形态

Fig. 11 Failure modes of different types of walls

肋复合墙体框格单元的承载能力;根据评估结果显示,随着受热时间增加,框格单元的剩余承载力变化呈现出先快后慢的趋势。此外,与双面受热相比,单面受热的框格单元更快达到其极限承载力。这一现象主要是由于单面受热导致温度分布不均,进而引发了较大的面外位移,从而加速了结构损伤的累积过程。

密肋复合墙体在框格的基础上内嵌砌块,其受力原理本质上与“米”字形格构式混凝土墙体相似。姚谦峰等^[35]针对密肋复合墙体提出了一种简化模型,计算简图如图12所示。

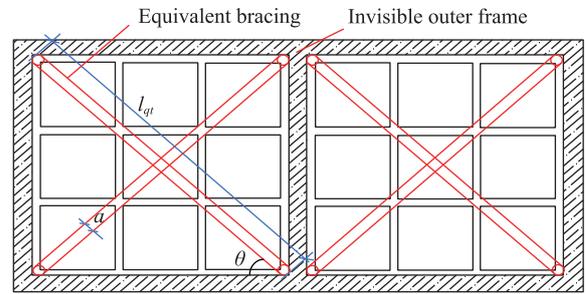


图12 等效斜撑的计算简图

Fig. 12 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; η 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, θ 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; ζ 为修正系数。

卢俊龙等^[36]进行了1:15缩放比例的密肋复合墙结构-基础-地基共同作用体系的振动台试验,旨在探究地震作用下基础与地基的协同效应,如图13(a)所示。试验发现结构底部的弯矩和基底剪力较其他位置偏大,是最容易出现破坏的地方。当基础与地基发生脱离时,两者之间的协同作用难以实

现,这会对上部结构产生严重影响,从而使整个上部结构的稳定性减弱。

何玉阳^[37]对1:6缩尺模型的框支密肋复合墙结构进行了振动台实验,如图13(b)所示,通过分析楼层结构的动力特性、加速度、位移、钢筋应变反应,发现框支密肋复合墙结构的转换层主要发生剪切破坏;转换层附近楼层是结构薄弱楼层。

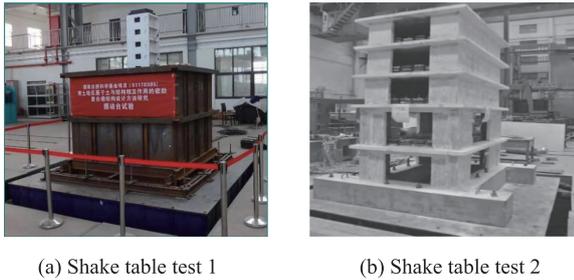


图13 密肋复合墙体振动台试验
Fig. 13 Shaking table test of ribbed composite wall

当前,密肋复合墙体的研究主要集中在拟静力分析和振动台试验上。这些研究通常能够较为真实地模拟墙体在地震作用下的反应,为工程实践提供了有价值的参考。然而,在墙体的可恢复性、新型材料的运用以及墙体结构形式的创新等方面的研究还有待加强,特别是在提高墙体抗震韧性、优化墙体结构设计以及探索墙体材料的可持续应用等方面。

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,由于地震荷载具有较大的离散性,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,对抗震研究是重要补充。孙静等^[38]采用OpenSees建立了6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14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在1.0~2.5的区间内时较为合理,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。

综上,对于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

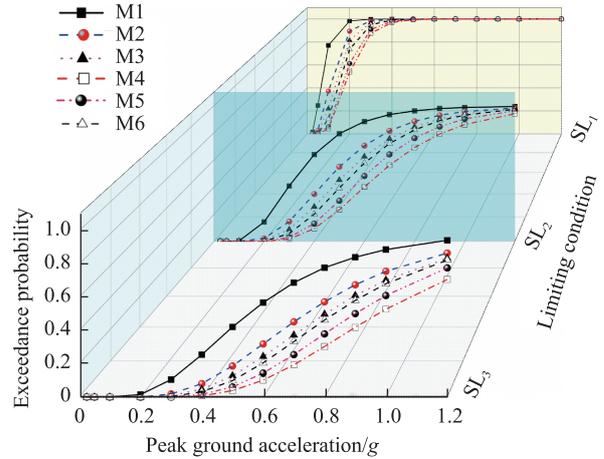


图14 不同转换层刚度比易损性曲线对比图
Fig. 14 Comparison of vulnerability curves with different conversion layer stiffness ratios

学习等方法探究最佳损伤指标和地震动指标,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

3.1 抗压性能

现浇磷石膏-网格式框架组合墙是由马克俭^[39]研发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。尹烽宇等^[40]通过试验和有限元分析方法,对无填充的框架墙、磷石膏-混凝土组合墙以及改性磷石膏-混凝土组合墙的轴向压缩性能进行了对比分析,如图15所示,分析结果表明,在框架墙的基础上,添加磷石膏和改性磷石膏能显著提升墙体的承载力,通过观察破坏

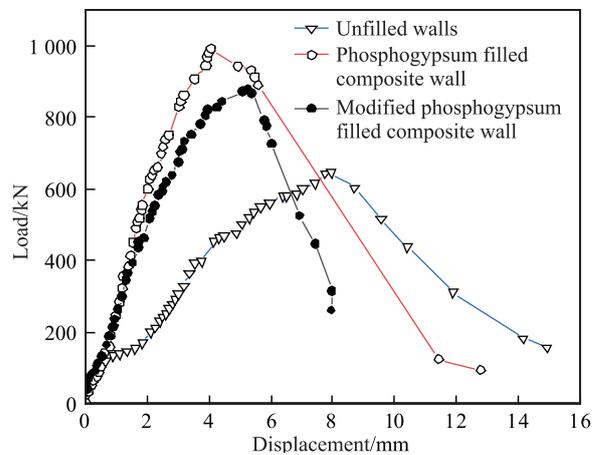


图15 三种墙体的荷载-位移曲线
Fig. 15 Load-displacement curves of three walls

形式,发现改性磷石膏-混凝土墙体相较于其他两种墙体更容易产生水平和斜向的裂缝,这表明其具有更佳的延性。董晓龙等^[41]以偏心距为变量,对现浇磷石膏-框架组合墙体进行了一系列抗压实验,并着重探讨构件在整体抗震性能中的有效分配系数,在实验基础上建立等尺寸有限元模型,分析了墙体结构的损伤情况;实验和数值模拟表明,相较于层间梁,楼层梁更易发生破坏,而中柱也比边柱更容易被压坏,在最终破坏阶段,磷石膏出现了崩塌,此外,墙体开洞对结构的轴压性能有着明显的影响,这可能是因为开洞导致应力集中使洞口成为了结构的薄弱环节。

3.2 抗震性能

张华刚等^[42]通过计算和工程验证发现新型墙体结构使用磷石膏可极大节约混凝土用量,具有良好的经济效益。卢亚琴等^[43]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表现出传统钢筋混凝土框架结构的受力特点,试件各层均存在反弯点;结构滞回曲线饱满,具有较强的耗能能力,延性明显强于传统钢筋混凝土框架结构,结构发生了典型的剪切破坏。

目前,现浇磷石膏-网格式框架组合墙的研究尚处于起步阶段,国内对此领域的关注和研究相对较少。尽管高性能混凝土因其高强度、优异的抗裂性能和耐久性备受推崇,但将其应用于网格式结构的研究仍然较少。探索新材料和技术的应用,以提升网格式结构的力学性能和抗震性能将成为未来研究的重要方向之一。

4 结语

文章概述了格构式墙体在材料性能、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工作。得出如下结论:格构式墙体在酸性、火灾和冻融环境中表现出良好的性能;框架-格构式混凝土墙协同效应良好;剪跨比、配筋率和模壳等参数对轴压和抗震性能有显著影响,不同的格构形式和材料对格构式墙体结构的抗震性能有不同的影响,需要综合考虑结构形式、材料特性和连接方式等因素,以实现最优的抗震性能。

国外对格构式墙体的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风险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) 目前,对于高层建筑中格构式混凝土剪力墙的易损性分析相对较少,探索如何使这类墙体突破现有建筑高度的限制,并促进其在建筑领域的广泛应用是未来研究的重要方向之一。

2) 目前,拥有格构式混凝土墙体生产能力的大型企业数量有限,尚不能满足建筑工业化快速发展的需求,因此这一领域仍具有巨大的发展潜力。将结构设计、外部防护、设备管道以及内部安装系统集成一体化,是实现建筑工业化的重要途径。

3) 为了满足绿色建筑发展的需求,人们将再生混凝土、工业矿渣、植物纤维板材等环保材料应用于格构式混凝土墙体的设计中,这些材料的使用有助于提高墙体的环保性能,促进建筑行业的可持续发展。

4) 格构式混凝土结构的设计应考虑震后快速恢复。通过采用可更换构件的策略,可以在地震后迅速修复结构中受损的部分,减少灾后重建的时间和成本。

5) 格构式混凝土墙体结构的设计应融入减震技术,使其既能抵御地震冲击,又能发挥耗能减震的作用。这种设计旨在减少地震对建筑和设备造成的破坏,降低经济损失,具有显著的实用价值和社会效益。

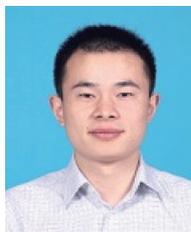
参考文献:

- [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(2):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 (2): 8-16.
- [2] TANG B, DONG Y, BAI W, et al. Seismic response of star-type grid concrete wall structure by numerical modeling[J]. Materials, 2022, 15(23): 8519.
- [3] 莫磊.新型保温节能复合墙体研究[D].天津: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.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] GARTH J S. Experimental investigation of lateral cyclic behavior of wood-based screen-grid insulated concrete form walls[D]. Oregon: Portland State University, 2014.
- [7] 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(5): 115-117.
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(5): 115-117.
- [8] 孙利铭. 水泥聚苯模壳格构式墙体本土化研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.
SUN L M. The Localization research of RAST-RA[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015.
- [9] 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.
- [10] 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(6): 4-6.
SONG C L, GAO L T, LI P P. Influence of eccentricity on compression resistance of HR-EPS shear wall[J]. *Engineering Construction*, 2014, 46(6): 4-6.
- [11] BAGON C, FRONDISOU-YANNAS S. Marine floating concrete made with polystyrene expanded beads[J]. *Magazine of Concrete Research*, 1976, 28(97): 225-229.
- [12] 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(7): 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(7): 60-63.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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(5): 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(5): 16-17.
- [16] 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.
- [17] MEHRABI A B. In-plane lateral load resistance of wall panels in residential buildings[M]. Washington, D. C. Portland Cement Association, 2000.
- [18] DUSICKA P, KAY T. Seismic evaluation of a green building structural system: ICF grid walls[J]. *Structures Congress*, 2009: 1-7.
- [19] 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.
- [20] 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(5): 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(5): 116-124.
- [21] 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.
- [22] 曹万林, 程娟, 张勇波, 等. 保温模块单排配筋再生混凝土矮剪力墙抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(1): 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 rein-

- forcement[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(1): 51-58.
- [23] 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(9): 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(9): 29-36.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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(2): 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(2): 81-89.
- [27] 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(9): 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(9): 13-23.
- [28] 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(6): 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(6): 67-74.
- [29] 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.
- [30] 贾穗子,曹万林,袁泉.框支密肋复合墙体拟静力试验研究[J]. *哈尔滨工业大学报*, 2015, 47(8): 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.
- [31] 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.
- [32] 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(1): 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.
- [33] 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.
- [34] 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(2): 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(2): 285-293.
- [35] 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.
- [36] 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(6): 2163-2171.
- LU J L, ZHANG Y. 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(6): 2163-2171.
- [37] 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.
- [38] 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(6): 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(6): 61-72.
- [39] 马克俭, 高国富, 张华刚, 等. 空间网格式框架结构在多、高层大开间灵活划分房间石膏节能建筑中的研究与应用综述[J]. 空间结构, 2009, 15(3): 66-84.
- 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(3): 66-84.
- [40] 尹烽宇, 马克俭, 张华刚, 等. 磷石膏—混凝土网格式框架组合墙受压力学性能[J]. 空间结构, 2022, 28(4): 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(4): 72-80.
- [41] 董晓龙, 张华刚, 吴琴, 等. 现浇磷石膏—混凝土网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(3): 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(3): 114-118.
- [42] 张华刚, 梁凡凡, 罗瑒, 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(1): 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[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2013, 30(1): 104-110.
- [43] 卢亚琴, 胡岚, 马克俭, 等. 新型RC网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: tangbaizhan@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。E-mail: zhuang7802@163.com。

(责任编辑:李根)