DOI:10.19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2022. 02. 014

不同肋格形式装配式复合墙体抗震性能 研究及拓优评价

侯莉娜¹,黄 炜²,何梦迪¹

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为研究不同肋格形式装配式复合墙体抗震性能并进行墙体肋格形式择优,在对装配式复合墙体 1/2 比例模型拟静力试验及数值模拟的基础上,分析肋格形式对复合墙体抗震性能的影响规律,并对墙体肋格形式进行基于可拓优度评价法的多指标综合评价择优。结果表明墙体的承载力、延性、变形性能及耗能性能均随肋格数量的增加逐渐增大,但当肋格数量过多,墙体趋向于不利破坏模式,其抗震性能随之降低。4 肋梁×4 肋柱肋格布置是标准复合墙体的最优肋格形式。将可拓优度评价法应用于装配式复合墙体的综合评优,可较为科学地得出墙体的最优肋格形式,为装配式复合墙结构实际工程提供一定的设计依据。

关键词:装配式复合墙体;不同肋格;抗震性能;可拓优度评价

中图分类号: TU528.572 文献标志码: A 文章编号: 1006-4710(2022)02-0253-10

Seismic performance and optimal evaluation of prefabricated ecological composite wall with different ribs

HOU Lina¹, HUANG Wei², HE Mengdi¹

- (1. College of Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;
- 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of prefabricated composite wall with different rib-grid forms and select the best rib-grid form, the influence of different rib-grid forms on the seismic performance of composite wall is summarized on the basis of horizontal low cycle repeated loading test and nonlinear numerical analysis of 1/2 scale model for the prefabricated standard composite wall with different rib-grid forms, with the extension superiority evaluation method introduced into the evaluation of wall rib-grid forms. The results show that the bearing capacity, ductility, deformation performance and energy dissipation performance of the wall increase with the increase of the number of ribs, but when the number of ribs is too much, the wall tends to be an adverse failure mode, with its seismic performance decreasing accordingly; the layout of 4-rib-beam \times 4-rib-column is the optimal rib-form of the standard composite wall, and the extension degree evaluation method can obtain the optimal rib-grid form of the wall scientifically, which provides a certain design basis for the practical engineering of the fabricated composite wall structure.

Key words: prefabricated ecological composite wall; different ribs; seismic performance; extension evaluation

装配式复合墙结构是一种耗能减震、生态节能、 经济实用,适应我国住宅产业化要求的新型可装配 式结构体系[1-2]。作为装配式复合墙结构的主要承力构件,装配式复合墙是由不同材料填充砌块与截

收稿日期: 2021-07-13; 网络出版日期: 2021-12-14

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20211213.1258.005.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978566);陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2021JM-435)

通信作者: 侯莉娜·女,博士,讲师,研究方向为新型材料与结构体系。E-mail: houlina-163@163.com

面及配筋较小的钢筋混凝土肋格相互嵌套组合而成 的抗震墙。墙体的独特构造使得墙体破坏形态及受 力性能随墙体肋格的划分形式发生变化[3],因此,明 确肋格划分对墙体受力性能的影响规律,并进行墙 体合理肋格划分的综合择优评价是墙体优化设计的

研究人员前期对装配式复合墙体的受力性能进 行了大量的研究。黄炜等[4-6]进行了不同肋柱数量 复合墙体抗震性能试验,但试验未考虑墙体肋梁数 量的变化因素,也未从优化设计的角度明确其影响 规律。袁泉等[7]考虑通过将肋梁、肋柱斜向交叉布 置对墙体性能进行优化,但该布置方式会在一定程 度上增加墙体施工难度。陈国新等[8-9]尝试对无肋 梁复合墙体进行了抗震性能研究,结果表明,无肋梁 墙体在承载力、刚度等抗震性能方面较标准复合墙 体降低,墙体未能充分发挥受力性能优势。郭猛 等[10]进行了肋格形式影响复合墙墙加固框架抗震 性能试验,结果表明,肋格形式对复合墙加固框架的 抗震性能起着重要作用。综上所述,已有研究分别 从不同的角度对装配式复合墙体肋格形式的影响进 行了分析,但基于优化设计思想,明确肋格形式对标 准装配式复合墙体抗震性能的综合影响规律,并进 行最优肋格形式的评价选择还需进一步研究,

为此,本文针对不同肋格布置标准装配式复合 墙体,通过复合墙体低周反复加载试验与有限元扩 展分析,深入研究墙体肋格形式(肋梁与肋柱数量) 对装配式复合墙体各抗震性能指标的影响规律。在 此基础上,通过引入可拓优度评价法,对装配式复合 墙体肋格形式进行多指标综合优化设计,提出基于 可拓优度评价法的墙体肋格形式择优方法。

1 不同肋格形式装配式复合墙体抗震性能 对比分析

对比两批装配式复合墙体(不同肋柱数量)试件 拟静力试验结果,并进行有限元扩展分析(不同肋梁 数量),重点就不同装配式复合墙体墙体的抗震性能 进行研究,通过详细探讨复合墙体的破坏模式、承载 力特征值、变形性能、耗能能力及延性等,揭示装配 式复合墙体肋梁及肋柱数量对复合墙体抗震性能的 影响规律。同时,为可拓优度评价法评定最优肋格 形式提供关键指标参数。

1.1 试验概况

两批试验[4-5]试件分别为不同肋柱划分的内填 加气混凝土砌块及内填秸秆生土砌块装配式复合墙 体标准试件,各试件均为4肋梁,见表1。各试件模

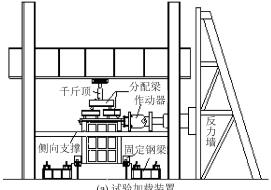
型缩尺比例均为 1/2,标准试件尺寸为 $1.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$, 混凝土为 C20,内填砌块加气混凝土轴心抗压强度 为 1.97 MPa, 秸秆生土砌块材料轴心抗压强度为 1.05 MPa。墙体试件设计轴压比均为 0.23。

表 1 试件参数表

Tab. 1 Specimen parameter list

批次	试件	肋柱数	内填砌块材料
	SW5	3	
_	SW6	4	加气混凝土
	SW12	5	
	ECW-2	3	
$\stackrel{-}{\rightharpoonup}$	XML-1	4	秸秆生土
	ECW-3	5	

试验采取低周反复加载,试验加载装置见图 1。 首先通过千斤顶施加竖向荷载,竖向荷载加在分配 梁上,经二次分配后施加于复合墙上,以达到施加均 布荷载。待其稳定后保持恒定,借助反力墙及液压 作动器施加水平反复荷载,水平反复荷载采用力-位 移混合控制,每级循环一次至墙体屈服,后采用位移 控制,每级循环三次至墙体破坏。



(a) 试验加载装置



(b) 试验加载现场

图 1 加载装置示意图 Fig. 1 Diagram of test setup

1.2 不同肋柱划分内填加气混凝土砌块复合墙体 抗震性能

1.2.1 破坏模式

由试验结果可知内填加气混凝土砌块装配式复

合墙体的破坏模式主要为剪切型破坏及弯曲型破坏。各墙体试件最终破坏现象见图 2。



SW-6.



(a) 试件SW5

(b) 试件SW6

(c) 试件SW12

图 2 试件破坏现象

Fig. 2 Failure modes of specimens

各墙体试件破坏现象的具体特征为如下。

1) 3 肋柱墙体 SW5 及 4 肋柱墙体 SW6 的破坏过程类似,主要破坏特征表现为,加载过程中,复合墙体中各组成部分,填充砌块、钢筋混凝土肋梁柱及边框依次发生破坏,可充分发挥多道抗震防线作用^[4],上述破坏模式属于剪切型破坏,该破坏模式是复合墙有利的破坏模式,可见当肋柱数量为 3 或 4 时,墙体破坏模式合理。

2) 荷载作用下,5 肋柱墙体 SW12 中,内填复合

墙板破坏不明显,墙体最终由于外框柱的拉压破坏而失效,在墙体整个受荷过程中,复合墙体中的钢筋混凝土肋格及内填砌块均未充分发挥各自作用,因此,墙体未形成有效多道抗震防。该种破坏为整体弯曲型破坏,属于不利的破坏模式,主要是由于墙体内肋柱数量多,致使内填复合墙板强度及刚度相比边框较大。

1.2.2 承载力

墙体试件主要抗震性能指标见表 2。

表 2 墙体抗震性能指标

Tab. 2 Seismic performance index

试件	开	裂	屈	服		峰值			极限延性	极限屈服位移角
编号	$V_{\rm K}/{ m kN}$	$\delta_{\rm K}/{ m mm}$	$V_{\rm Y}/{ m kN}$	$\delta_Y/$ mm	V _w /kN	δ_{W}/mm	$V_{ m U}/{ m kN}$	$\delta_{\rm U}/mm$	$\lambda \! = \! \delta_U / \delta_Y$	$\theta = \delta_{ m U}/h$
SW5	40	1.2	81	5.4	106.6	12.5	92.6	32.1	6.0	1/43
SW6	41	1.1	90	5.8	109.7	13.3	95.7	31.3	5.4	1/44
SW12	48.8	1.5	80	6.9	101.3	14.8	90.4	26.2	3.8	1/52

对比试件各阶段承载力可得下列结果。

1) 3 肋柱及 4 肋柱墙体均表现为有利的剪切型破坏,但 4 肋柱墙体各受荷阶段的承载力均大于 3 肋柱墙体,这是因为 4 肋柱墙体肋格划分较为合理,墙体在加载过程中砌块、肋格及外框可依次发挥其最大作用。3 肋柱墙体虽也发生了剪切型破坏,但 3 肋柱墙体中,肋格偏于稀疏,致使其未能较好地约束内填砌块共同受力,砌块开裂后,裂缝迅速发展,内填砌块较早退出工作。同时,由于主要承担荷载的构件——钢筋混凝土肋柱数量较少,墙体承载力自然偏低。因此,发生剪切破坏的墙体,其承载力随肋柱数量的增加而逐渐增大。

2) 5 肋柱墙体 SW12 的承载力小于 3 肋柱及 4 肋柱墙体,主要是因为 5 肋柱墙体发生了不利的弯

曲型破坏。内填复合墙板中的砌块及肋格均未充分 发挥作用。

由此可知肋格的不同划分方式是内填加气混凝土砌块装配式复合墙体承载力的主要影响因素,当肋柱数量合理,墙体发生了合理的剪切型破坏时,墙体的承载力随着肋柱肋柱数量的增加而逐渐增大。但当肋柱数量过多时,墙体趋向于不利的破坏模式,则墙体承载力随着肋柱数量的增加逐渐降低。

1.2.3 延性及变形能力

由表 2 可得如下结论。

- 1) 3 肋柱墙体延性及变形能力均大于 4 肋柱墙体,可见,随着墙体肋柱数量的增加,其延性及变形能力变小。
 - 2) 5 肋柱墙体 SW12 延性及变形能力最小,延

性相对于 4 肋柱墙体降低约 29.6%,变形降低约 18%,主要是因为墙体中复合墙板相对刚度较大,墙体发生弯曲型破坏。

1.2.4 耗能能力

各榀墙体试件不同受力阶段的等效粘滞阻尼系数见表 3。

表 3 墙体等效粘滞阻尼系数

Tab. 3 Equivalent viscous damping coefficient

单位:%

试件编号	开裂	屈服	峰值	极限
SW5	6.0	13.6	16.5	16.9
SW6	7.1	10.7	15.9	16.6
SW12	5.7	11.0	15.8	16.3

对比各数据可知如下结果。

1) 在复合墙体的受力过程中,三种不同肋格形

式的装配式复合墙体的耗能性能在各受荷阶段均表现为逐渐增强,但各阶段的增大率逐步减小。

2) 由于 5 肋柱墙体 SW12 中内嵌复合墙板抗侧刚度较大,整体性好,致使边框柱先于墙板破坏,墙体发生整体弯曲型破坏,内填墙板的耗能作用很小,故墙体整体耗能能力较弱,而 3 肋柱及 4 肋柱墙体在破坏过程中,加气混凝土砌块、肋格及外框三部分组成构件依次发生破坏,可分阶段充分耗能,因此,墙体的整体耗能能力较强。

1.3 不同肋柱划分内填秸秆生土砌块装配式复合 墙体抗震性能试验

1.3.1 破坏模式

由内填秸秆生土砌块装配式复合墙体试验结果 可知三榀墙体的破坏模式主要表现为剪切型及弯剪型,各墙体试件最终破坏现象见图 3。



(a) ECW-2试件



(b) XML-1试件



(c) ECW-3试件

图 3 试件破坏现象 Fig. 3 Failure modes of specimens

墙体具体的破坏特征为如下。

- 1) 3 肋柱墙体 ECW-2 及 4 肋柱墙体 XML-1 的破坏过程与内填加气混凝土砌块 3 肋柱及 4 肋柱墙体基本相同,墙体各部分能在受力的不同阶段充分发挥各自作用,均表现为合理的剪切型破坏。
- 2) 墙体 ECW-3(5 肋柱)的破坏特征主要表现为,加载初期,内填秸秆生土砌块由于材料强度较低,迅速开裂,此时,墙体破坏表现类似剪切型。随着荷载的增加,由于内填复合墙板肋柱数量多,外边框强度和刚度相对内填墙板较小,墙体边框柱开始出现拉压裂缝,并不断发展,墙体破坏趋向于整体弯

曲型。当加载至破坏阶段时,边框柱由于整体拉压 发生破坏,墙体进而宣告破坏,此时,内填复合墙板 破坏并不明显。因此,复合墙体最终发生弯剪型破 坏,其破坏特征介于剪切型及整体弯曲型之间。

由上述此可知对于内填秸秆生土砌块装配式复合墙体, 肋格的不同划分方式与墙体的破坏模式显著相关, 随着墙体肋柱数量的增加, 其破坏模式逐渐由剪切型趋向于先表现为剪切型后为弯曲型的弯剪型。

1.3.2 承载力

由表 4 可见 4 肋柱复合墙体 XML-1 的各阶段 承载力均远高于 3 肋柱及 5 肋柱墙体。

表 4 墙体抗震性能指标

Tab. 4 Seismic performance index

试件	开	裂	屈	服		峰	值		极限延性	极限屈服位移角
编号	$V_{\rm K}/{ m kN}$	δ_K/mm	$V_{ m Y}/{ m kN}$	δ_Y/mm	$V_{\rm W}/{ m kN}$	δ_W/mm	$V_{\mathrm{U}}/\mathrm{kN}$	δ_{U}/mm	$\lambda \! = \! \delta_U / \delta_Y$	$\theta \!=\! \delta_{\mathrm{U}}/h$
ECW-2	19.73	3.91	39.20	15.00	46.75	31.99	39.73	57.49	3.80	1/25
XML-1	28.05	1.19	61.20	8.60	74.56	24.10	67.50	36.00	4.20	1/39
ECW-3	19.68	1.84	44.74	11.02	55.95	37.01	47.87	67.02	6.08	1/21

4 肋柱墙体肋格布置较合理,肋梁、肋柱对内填砌块有足够的约束,同时内填复合墙板与边框相比强度及刚度合理,墙体发生有利的剪切型破坏,墙体中各组成构件均在不同受力阶段发挥作用。3 肋柱墙体肋柱偏少,对砌块的约束弱,同时混凝土肋格与秸秆生土砌块材料性能差异显著,二者粘结性较差,导致砌块与肋格接触面处易出现剪切薄弱面,因此,3 肋柱墙体承载力较小。

在加载前期,由于复合墙体填充的秸秆生土砌块开裂强度较低,墙体破坏形态类似剪切型,因此,5 肋柱墙体 ECW-3 墙体开裂荷载值与 3 肋柱墙体 ECW-2 相近。随着荷载增大,5 肋柱墙体各受荷阶段的承载力均较 3 肋柱墙体高。主要是因为,当墙体中肋柱数量较多时,相应的肋格对填充砌块的约束增强,可较好地限制砌块裂缝的进一步发展,复合墙体最终以边框拉压破坏告终,墙体破坏整体呈现为弯剪型破坏。同时可见,5 肋柱复合墙体各特征荷载值均远小于 4 肋柱墙体 XML-1。

1.3.3 延性及变形能力

对比各榀墙体的延性系数可知,随着肋柱数量的增加,内填秸秆生土砌块复合墙体延性及变形能力逐渐增强,5 肋柱墙体的延性及变形能力最优。主要由于墙体破坏表现为剪切型,墙体内填秸秆生土砌块强度较低,较早退出工作,墙体在加载过程中的变形除整体剪切变形外,肋梁肋柱的局部弯曲变形较充分。

1.3.4 耗能能力

墙体试件不同加载阶段等效粘滞阻尼系数见表 5。 表 5 复合墙体等效粘滞阻尼系数

Tab. 5 Equivalent viscous damping coefficient

单位:%

试件编号	开裂	屈服	峰值	极限
ECW-2	5.5	6.8	7.7	9.0
XML-1	5.0	6.1	9.0	10.5
ECW-3	7.0	7.2	9.2	11.0

复合墙体等效粘滞阻尼系数依次为: ECW-2(3 肋柱) < XML-1(4 肋柱) < ECW-3(5 肋柱)。复合墙体 ECW-3(5 肋柱)耗能能力最突出,主要是因为荷载作用下,墙体的破坏过程表现为先剪切,后弯曲的弯剪型破坏。墙体在加载初期,其破坏特征类似剪切型,此时,墙体耗能主要由内填砌块开裂贡献,加载中后期则主要由边框柱的整体拉压开裂屈服耗能贡献,因此破坏阶段墙体耗能较大,但其并非理想的耗能模式。

综上所述,随着复合墙体肋柱数量的增加,墙体

的耗能能力逐渐增大,但当肋柱数量过多,墙体破坏 模式趋于不利,墙体耗能形式不合理。

1.4 不同肋梁划分内填加气混凝土砌块装配式复 合墙体抗震性能数值分析

为进一步分析肋梁布置对装配式复合墙体抗震性能的影响,变换肋格数量,分别建立3肋梁及5肋梁标准复合墙体数值模型并进行分析。

1.4.1 非线性有限元模型及验证

以试验墙体试件 SW5、SW6 及 SW12 为原型, 建立其非线性有限元模型。

- 1) 墙体单元模型:混凝土及内填砌块单元均采用八节点三维实体单元 SOLID65;钢筋单元采用三维杆元 LINK8。
- 2) 材料模型:混凝土及加气混凝土砌块本构关 系均采用 Willam-Warnke 五参数破坏准则[11],同 时,在单轴本构模型中采用试验实测值。钢筋采用 钢筋单轴本构模型,且不考虑 Bauschinger 效应,本 构关系采用二折线模型。
- 3) 钢筋与混凝土的间联结,采用分离式处理; 混凝土与砌块的所有联结均采用固结处理。

采用上述有限元模型进行数值分析,分别得到墙体试件 SW6 钢筋的应力分布及各榀墙体骨架曲线数值模拟与试验对比情况,见图 4 和图 5。

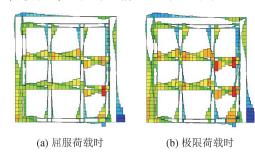


图 4 SW6 钢筋应力图 Fig. 4 Steel bar stress of SW6

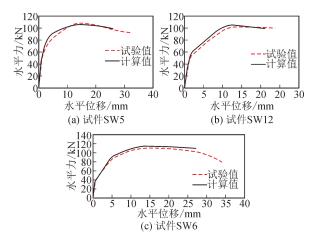


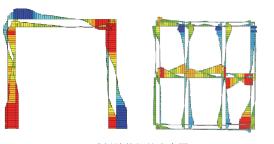
图 5 有限元与实测骨架曲线对比 Comparison between FE and tested skeleton

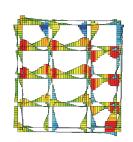
由图 4 可知,墙体 SW6 屈服荷载时,肋梁钢筋 多达到屈服,而边框柱钢筋均未屈服。极限荷载时, 肋梁钢筋屈服甚至达到强化状态,外框柱及肋柱钢筋也达到屈服,符合墙板先于外框破坏的剪切型破坏模式特征[12],与试验结果一致,说明该模型可以很好地预测试件的破坏形态。由图 5 可知,模拟曲线的上升段和下降段均与试验曲线吻合较好,试件 SW5、SW6 和SW12 的模拟极限承载力与试验极限承载力的比值依

次为 0.98、1.04 及 1.02,误差较小,故本次建立的有限元模型是有效的,可用于后续参数分析。

1.4.2 有限元结果分析

分别建立装配式复合墙体 BK1(3 肋梁×4 肋柱)及 BK2(5 肋梁×4 肋柱)有限元模型,并进行数值分析,可得 3 肋梁与 5 肋梁复合墙体外框钢筋应力、复合墙板中肋梁、柱钢筋应变及墙体整体荷载位移曲线(见图 6 和图 7)。



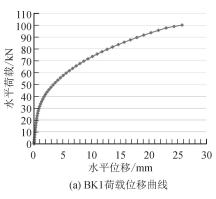


(a) 3肋梁墙体钢筋应力图

(b) 5肋梁墙体钢筋应力图

图 6 3 肋梁及 5 肋梁墙体钢筋应力图

Fig. 6 Stress diagramfor reinforcement of 3-ribbed beam and 5-ribbed beam wall



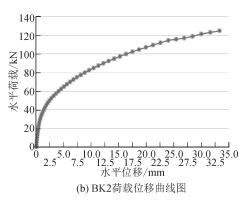


图 7 3 肋梁及 5 肋梁墙体荷载位移曲线图

Fig. 7 Load displacement curve of 3-ribbed beam and 5-ribbed beam wall

将 BK1 与 BK2 有限元数值计算结果分析处理,并与 4 肋梁墙体 SW6 抗震性能指标进行对比,见表 6。

表 6 不同肋梁墙体抗震性能指标 Tab. 6 Seismic performance index of the walls with different ribbed beams

墙体	SW6 (4 肋梁)	BK1 (3 肋梁)	BK2 (5 肋梁)
极限承载力/kN	109.7	100.0	125.0
延性系数	5.4	5.6	3.2
等效粘滞阻尼系数	16.6	16.7	16.1
极限屈服位移角	1/44	1/87	1/58
破坏模式	剪切型	剪切型	弯曲型

由上表可知肋梁数量对墙体的破坏模式及抗震性能影响显著。

- 1) 肋梁对墙体破坏模式的影响与肋柱类似,随着肋梁数量的增加,墙体的破坏模式由剪切型趋向于整体弯曲型。
- 2) 随着肋梁数量的增加,复合墙体的极限承载力呈增大趋势,其中,5 肋梁墙体承载力较 4 肋梁墙体增大 25%,肋梁数量对墙体承载力影响较大。
- 3) 发生整体弯曲型破坏的 5 肋梁墙体,其延性、变形能力及耗能性能均较差,其中,5 肋梁墙体延性较 4 肋梁降低 40.7%。

2 基于可拓优度评价法的装配式复合墙体 肋格形式择优

鉴于装配式复合墙体肋格形式方案的择优评价 具有多个指标及多个目标,属于综合性评价问题。 本文选用可拓学中的基本方法——可拓优度评价 法,对装配式复合墙体的肋格形式进行多指标的综 合评价择优。该方法包括事物、策略及方法等内容^[13-14]。下面是装配式复合墙体肋格形式可拓优度评价步骤。

2.1 复合墙体肋格形式择优步骤

以内填加气混凝土砌块复合墙体为例,引入可 拓优度评价法,对标准复合墙体进行基于肋格形式 变化的综合评价择优,具体见下。

步骤 1 评价指标的确定。由试验及数值模拟结果可知墙体的肋格形式是影响墙体抗震性能特征值的关键因素,因此选取墙体的承载力、延性、耗能能力、变形能力和破坏模式作为肋格择优的评价指标,同时考虑墙体的经济性能,墙体肋格择优评价指标及其对应的取值依据见表 7。

表 7 肋格择优评价指标

Tab. 7 Evaluation factors and standards of ribs selection

评价指标	评价指标取值依据
承载力 c1	选取墙体的极限承载力进行评价
延性 c2	采用位移延性系数评价
耗能能力 c ₃	采用破坏荷载时对应的等效粘滞阻尼系数 评价
变形能力 c4	采用墙体的极限屈服位移角评价
破坏模式 c_5	剪切型、弯剪型及弯曲型破坏,用 0 \sim 1 表示
经济性能 c ₆	用每榀墙体的总造价评价,(参考市场报价,不含支座材料及人工费)

其中,由于试验及数值分析结果表明,复合墙体的破坏模式是墙体抗震性能的关键因素之一,具有合理破坏模式——剪切破坏的复合墙体,在受荷各阶段,墙体中内填砌块、钢筋混凝土肋格及外边框依次作为主要受力构件发挥抗震防线作用。因此,墙体抗震性能表现优良。但当墙体破坏模式由剪切型向为弯剪型,或由弯剪型向整体弯曲型逐渐转变时,对应墙体的抗震性能逐渐变差。因此,参考前期大量研究结果,综合考虑不同破坏模式墙体抗震性能特征值[12],针对墙体的三种破坏模式,分别取值如下:剪切型破坏=0.6;弯剪型=0.4;弯曲型=0.2。

选取前期试验中复合墙体 SW5(3 肋柱×4 肋梁)、SW6(4 肋柱×4 肋梁)、SW12(5 肋柱×4 肋梁)及有限元墙体模型 LL1(4 肋柱×3 肋梁)、LL2(4 肋柱×5 肋梁)共同作为本次最优肋格形式的待

评价样本,则各墙体模型的评价指标取值见表 8。

表 8 墙体评价指标取值 Tab. 8 Value of evaluation index

————— 评价指标			墙体		
取值	SW5	SW6	SW12	LL1	LL2
——承载力 c₁	106.6	109.5	0.226	0.2	0.3
延性 c2	6.0	5.4	3.8	5.6	3.2
耗能能力 c3	16.9	16.6	16.3	16.7	16.1
变形能力 c4	1/43	1/44	1/52	1/87	1/58
破坏模式 c_5	0.6	0.6	0.2	0.6	0.2
经济性能 c6	89.3	95.8	97.3	89.4	97.2

步骤 2 确定待评价墙体的物元模型。基于墙体最优肋格形式,构造代表墙体最优肋格形式的经典域物元 R_{\circ} ,及代表墙体所有肋格形式的节域物元 R_{\circ} ,其中物元格式为:

$$R = (N, C, V) \tag{1}$$

式中: N 为墙体肋格形式; $C = [c_1, c_2, \cdots c_n]^T$ 为评价指标; $V = [V_1, V_2, \cdots, V_n]^T$, 其中 $V_i = \langle a_i, b_i \rangle$ 是墙体评价指标的量值 c_i 构成的量值范围。由于本文例子中 N 和 C 固定,实际中可以只列出 V。

分别建立复合墙体关于最优肋格形式的经典物元 $R_0 = (N,C,V_0)$ 的量值范围 V_0 及节域物元 $R_q = (N,C,V_q)$ 的量值范围 V_q :

$$V_{0} = \begin{bmatrix} \langle 90, 140 \rangle \\ \langle 3, 8 \rangle \\ \langle 14, 18 \rangle \\ \langle 0, 1/20 \rangle \\ \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 70, 120 \rangle \end{bmatrix}, \quad V_{q} = \begin{bmatrix} \langle 60, 200 \rangle \\ \langle 0, 40 \rangle \\ \langle 8, 40 \rangle \\ \langle 0, 1/10 \rangle \\ \langle 0, 1 \rangle \\ \langle 50, 200 \rangle \end{bmatrix}$$
(2)

设待评价对象即 5 种墙体的肋格形式为 N_j ($j=1,\dots,5$),针对评价指标,将待评价墙体的实测取值结果用物元 R_j ($j=1,\dots,5$)表示,称为待评价墙体的物元模型:

$$R_i = (N_i, C, V_i) \tag{3}$$

式中: N_j 为墙体肋格形式; $C = [c_1, c_2, \cdots c_n]^T$ 为评价指标; $V_j = [V_{j1}, V_{j2}, \cdots, V_{jn}]^T$ 是待评价墙体评价指标的量值 c_i 的实测数据,见表 8。

设各待评价墙体 SW5、SW6、SW12、LL1、及 LL2 的物元模型分别为 R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5

代入相关参数,可得各墙体物元模型如下:

$$V_{1} = \begin{bmatrix} 106.6 \\ 6.0 \\ 16.9 \\ 1/43 \\ 0.6 \\ 89.3 \end{bmatrix}, V_{2} = \begin{bmatrix} 109.7 \\ 5.4 \\ 16.6 \\ 1/44 \\ 0.6 \\ 95.8 \end{bmatrix}, V_{3} = \begin{bmatrix} 101.3 \\ 3.8 \\ 16.3 \\ 1/52 \\ 0.2 \\ 97.3 \end{bmatrix}, V_{4} = \begin{bmatrix} 100 \\ 5.6 \\ 16.7 \\ 2/87 \\ 0.6 \\ 89.4 \end{bmatrix}, V_{5} = \begin{bmatrix} 125.0 \\ 3.2 \\ 16.1 \\ 1/58 \\ 0.2 \\ 97.2 \end{bmatrix}$$

$$(4)$$

步骤 3 确定特征权重。由于各评价指标对评价对象 N,即墙体肋格形式的重要性不同的,因此,需以权系数来表示各评价指标的重要性程度,同时,权系数依据评价指标的重要程度需在[0,1]之间取

值,权系数可表示为 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n)$ 且 $\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1$,采用层次分析法[15] 对装配式复合墙体各指标的权重赋值为:

$$\alpha = (0.3, 0.1, 0.1, 0.05, 0.15, 0.2)$$

步骤 4 建立关联函数,计算关联度。关联函数是可拓模式的基础,关系到识别效果,目的是将实数域与关联函数结合起来,采用如下关联函数^[12]计算关联度:

$$K(x) = \begin{cases} \frac{-\rho(x, X_{\circ})}{|X_{\circ}|} & (x \in X_{\circ}) \\ \frac{\rho(x, X_{\circ})}{\rho(x, X_{\circ}) - \rho(x, X_{\circ})} & (x \notin X_{\circ}) \end{cases}$$

$$(6)$$

式中: X_{\circ} 为经典域物元的取值; $|X_{\circ}| = |b-a|$,其中 a 和 b 分别为 X_{\circ} 评价指标取值的下限和上限; $\rho(x, X_{\circ})$ 为点 x 与区间 X_{\circ} 之间的距离, $\rho(x, X_{\circ}) = |x-(a+b)/2|-(b-a)/2$; X_{\circ} 为节域物元的取值。

设 $K_i(x_i)$ 为 i 待评价墙体的 j 评价指标对最优肋格形式的关联度,则采用上述关联函数计算复合墙体 SW5 评价指标承载力对最优肋格形式的关联度,由于 $\rho(x_1,X)=-16.6$, $x_1=106.6\in X_0$, $|X_0|=50$,因此可得对应的关联度指标 $K_1(x_1)=-\rho(x_1,X_0)/|X_0|=0.032$,其余指标同理求得,见表 9。

表 9 评价指标对最优肋格形式墙体的关联度 Tab. 9 Correlation degree of evaluation index

	评价 指标	承载力	延性	耗能 能力	变形 性能		经济 性能
	关联度						
	$K_1(x_j)$	0.332	0.4	0.275	0.465	0.4	0.386
($j=1,\cdots,6$)					

鉴于评价指标中承载力,延性,耗能能力及变形性能等指标均要求越大越优,而经济性能指标则相

反,因此需对第 6 个评价指标,即经济性能指标项 $K_i(x_6)$ 进行同趋势化,即:

$$\widetilde{K}_{i}(x_{6}) = (\text{Max}K_{i}(x_{6}) + \text{Min}K_{i}(x_{6}) - K_{i}(x_{6}))$$
(7)

为简便起见,仍然将 $\tilde{K}_i(x_6)$ 记为 $K_i(x_6)$,经济性能同趋化后的各指标关联度见表 10。

表 10 经济性能同趋化后各指标关联度 Tab. 10 Correlation degree of indexes after the same trend of economic performance

A) tre	墙体关联度								
评价 指标	SW5	SW6	SW12	LL1	LL2				
1日 7/八	$K_1(x_j)$	$K_2(x_j)$	$K_3(x_j)$	$K_4(x_j)$	$K_5(x_j)$				
承载力	0.332	0.390	0.226	0.200	0.300				
延性	0.40	0.48	0.16	0.48	0.04				
耗能	0.275	0.350	0.425	0.325	0.475				
能力	0.210	0.000	0.120	0.020	0.470				
变形	0.465	0.456	0.385	0.460	0.345				
能力 破坏									
模式	0.4	0.4	0.2	0.4	0.2				
经济	0.484	0.386	0.416	0.482	0.414				
性能	0.404	0.300	0.410	0.402	0.414				

步骤 5 计算综合关联度及评价。鉴于本文需确定的是墙体不同肋格形式 N 对最优肋格形式的优度,因此,采用式(7)计算各墙体肋形式对最优肋格形式的综合关联度,见表 11。

$$C_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_i(x_i) \tag{7}$$

式中: C_i 为i 墙体的综合关联度; α 为评价指标的权系数; $K_i(x_i)$ 取值见表 10。

表 11 不同肋格形式对最优肋格形式的综合关联度 Tab. 11 Correlation degree of walls with different ribs

墙体	SW5	SW6	SW12	LL1	LL2
肋柱×肋梁	3×4	4×4	4×5	4×3	5×4
关联度 C_i $(i=1,\cdots,5)$	0.347	0.36	0.259	0.320	0.272

利 用 最 优 关 联 度 判 定 方 法 $C(X_0) = \max_{(i=1,\cdots,5)} \{C_i\}$ 对各墙体优度进行比较,可知: $C_2 >$

 $C_1 > C_4 > C_5 > C_3$,由关联度的大小可得如下结果。

- 1) 5 榀内填加气混凝土砌块标准复合墙体中,墙体 SW6 关联度值最大,因此,4 肋柱×4 肋梁复合墙体肋格形式为最优肋格形式。
- 2) 墙体 SW5 及 LL1 关联度值较高,且 SW5 值略高于 LL1。即 3 肋柱 \times 4 肋梁或 4 肋柱 \times 3 肋梁的肋格布置形式是墙体次优选择,但 3 肋柱 \times 4 肋梁要优于 4 肋柱 \times 3 肋梁布置。
- 3) 墙体 SW12 及 LL1 关联度较低,主要是因为墙体破坏模式不合理,抗震性能较差,同时肋格的增加致使墙体造价高,经济性差。

2.2 内填秸秆生土砌块复合墙体肋格形式择优 结果

采用同样的方法对填充秸秆生土砌块复合墙体 进行可拓方法择优,得到墙体关联度见表 12。

表 12 经济性能同趋化后各指标关联度
Tab. 12 Correlation degree of indexes after the same trend of economic performance

		墙体	
指标 -	XML-1	ECW-2	ECW-3
承 载 力 C ₁	0.298	0.370	0.221
延 性 C2	0.360	0.450	0.156
耗能能力 C ₃	0.247	0.332	0.416
变形能力 C_4	0.418	0.433	0.377
破坏模式 C₅	0.360	0.380	0.196
经济性能 C ₆	0.435	0.366	0.407

对各墙体进行优度比较,得到如下结论。

墙体 XML-1 关联度为 $C_1 = 0.342$; 墙体 ECW-2 关联度为 $C_2 = 0.312$; 墙体 ECW-3 关联度为 $C_3 = 0.254$, 则 $C_1 > C_2 > C_3$ 。

由关联度的大小可判断,与内填加气混凝土砌块复合墙相同,内填秸秆生土砌块复合标准墙体中,4 肋梁×4 肋柱复合墙体 XML-1 的关联度最高,因此复合墙体肋格的最优形式为 4 肋柱×4 肋梁,3 肋柱×4 肋梁为次优选择,而 5 肋柱×4 肋梁形式较差。

3 结 论

- 1) 装配式复合墙体中肋格的布置形式是影响墙体破坏模式及受力性能的关键因素,随着肋梁、肋柱数量的增加,墙体破坏模式的变化趋势总体体现为剪切型→弯剪型→整体弯曲型。
 - 2) 当肋梁、柱数量适当,肋格形式布置合理时,

墙体发生剪切型破坏时,墙体的承载力、延性、变形性能及耗能性能均随肋梁、肋柱数量的增加而逐渐增大,其中肋梁数量对墙体承载力的影响较大。当肋梁、柱数量过多,墙体逐渐趋向于不利破坏模式,墙体的抗震性能随之降低。

- 3)运用可拓优度评价法对填充加气混凝土砌块复合墙体及内填秸秆生土砌块墙体分别进行综合评价,结果表明4肋梁×4肋柱是标准复合墙体的最优肋格形式,3肋柱×4肋梁或4肋柱×3肋梁次之。
- 4) 将可拓优度评价法引入装配式复合墙体肋格形式的拓优评价中,可将墙体多指标的评价转化为单目标决策,并给出了最终定量的数值评价结果,可较为科学地得出装配式复合墙体的最优肋格形式,为复合墙体的优化设计提供了一定的理论依据。

参考文献:

- [1] 苗欣蔚, 黄炜, 胡高兴, 等. 水平缝螺栓连接的全装配式复合墙体受力性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(5):19-28.
 - MIAO Xinwei, HUANG Wei, HU Gaoxing, et al. Experimental study on mechanical behavior of fully assembled composite wall with bolted connection on horizontal joints[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48 (5): 19-28
- [2] 苗欣蔚, 黄炜, 凌柯, 等. 干式连接装配式复合墙体抗震性能试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2):36-41.
 - MIAO Xinwei, HUANG Wei, LING Ke, et al. Experimental study on seismic behavior of fabricated composite wall based on different horizontal joints dry connection [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2020, 48(2):36-41.
- [3] 黄炜,苗欣蔚,赵媛媛,等.不同竖向接缝干式连接的全装配式复合墙体抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(增刊2):114-122.
 - HUANG Wei, MIAO Xinwei, ZHAO Yuanyuan, et al. Experimental study on seismic performance of fully assembled composite walls with vertical joints using different dry connections [J] Journal of Building Structures. 2020, 41(S2): 114-122.
- [4] HUANG Wei, ZHANG Min, YANG Zengke, A comparative study on seismic performance of precast shear walls designed with different variable[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(12): 4955-4963.
- [5] 张敏,黄炜,苗欣蔚.纤维增强再生混凝土装配式复合墙体抗震性能试验[J].工业建筑,2020,50(12):42-49.

- ZHANG Min, HUANG Wei, MIAO Xinwei. Seismic behavior test of fiber-reinforced recycled concrete prefabricated composite walls[J]. Industrial Construction, 2020, 50 (12): 42-49
- [6] 张程华, 黄炜, 赵冬, 等. 基于关键参数变化的生态复合墙体抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30 (11): 166-172.
 - ZHANG Chenghua, HUANG Wei, ZHAO Dong, et al. Experimental research on seismic behaviors of ecological composite walls based on the change of key parameters[J] Engineering Mechanics, 2013, 30 (11): 166-172.
- [7] 袁泉,刘美霞,宗明奇,等. 装配式斜交密肋标准化墙体构件受剪承载力研究[J]. 建筑结构,2020,50(增刊1);578-584.
 - YUAN Quan, LIU Meixia, ZONG Mingqi, et al. Study on shear capacity of prefabricated skew multi-ribbed standardized wall components [J]. Building Structure, 2020,50 (S1): 578-584
- [8] 陈国新,阿热帕提·艾斯凯尔,席亮.洞口对带纵向加强肋复合墙体竖向受力性能影响[J].科学技术与工程,2020,20(9);3691-3698,
 - CHEN Guoxin, AREPATI Aisikaier, XI Liang. Influence of the hole on the vertical force performance of the composite wall with longitudinal rib reinforcement [J]. Science, Technology and Engineering, 2020, 20(9): 3691-3698.
- [9] 陈叶顺, 陈国新. 带洞口加强肋复合墙体抗剪承载力研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(3): 343-352, 371 CHEN Yeshun, CHEN Guoxin. Study on shear capacity of reinforced rib composite wall with the hole[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2020, 40(03): 343-352, 371
- [10] 郭猛, 王双娇, 袁泉,等. 框格形式影响组合墙加固框架抗震性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34 (4): 65-71.
 - GUO Men, WAND Shuangjiao, YUAN Quan, et al.

- Seismic performance experiment of frame strengthened by composite walls with different grid forms [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34 (4): 65-71.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑试验抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2015.
- [12] 黄炜,李斌,张巍.基于可拓识别法的生态复合墙体破坏模式判别[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 50-56.
 - HUANG Wei, LI Bing, ZHANG Wei. Failure mode recognition of ecological composite wall based on extension identification method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2015, 43(1): 50-56.
- [13] 谭章禄, 张长鲁. 基于可拓优度的煤矿应急能力评估 [J]. 煤矿安全, 2014, 45(4): 215-218.

 TAN Zhanglu, ZHANG Changlu. Coal mine emergency response capability based on extension superiority evaluation method[J]. Safety in Coal Mine, 2014, 45 (4): 215-218.
- [14] 陈彦光,陈海群,高崇阳. 电力建设工程施工过程风险的可拓优度评价[J]. 安全与环境工程,2019,26 (2):105-110.
 - CHEN Yanguang, CHEN Haiqun, GAO Chongyang. Risk assessment of power construction process based on extension superiority[J]. Safety and Environmental Engineering, 2019,26 (2): 105-110
- [15] 董伟智, 张爽, 朱福. 基于可拓层次分析法的沥青混合料路用性能评价[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(6): 2137-2143.
 - DONG Weizhi, ZHANG Shuang, ZHU Fu. Evaluation of pavement performance of asphalt mixture based on extension analytic hierarchy process[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2021, 51(6): 2137-2143.

(责任编辑 王绪迪)