



波形钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究综述

李泽辉, 孙洪军, 王 晨

(辽宁工业大学 土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 波形钢板混凝土组合剪力墙是钢-混凝土组合墙的一种形式, 其以波形设计提供高承载力和优良的抗震性能, 近年来得到了广泛应用。本文在总结国内外文献的基础上, 介绍了内置波纹钢板混凝土组合剪力墙中轴压比、剪跨比、连接件以及钢板参数对抗震性能的影响, 并重点阐述了双波纹钢板混凝土组合剪力墙在轴压比、剪跨比、连接件、钢板参数和内置混凝土材料方面对抗震性能的作用机理及其破坏模式。此外, 本文还指出了该墙板研究领域目前存在的问题及尚未充分探索的领域, 以期为未来的研究与设计工作提供指导和参考。

关键词: 波形钢板; 剪力墙; 抗震性能; 承载力; 破坏模式

中图分类号: TU398⁺.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)07-0001-07

doi:10.13402/j.gcjs.2025.07.081

Summary on seismic resistance of corrugated steel plate concrete composite shear wall

LI Zehui, SUN Hongjun, WANG Chen

(College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract: Corrugated steel plate concrete composite shear wall is a form of steel-concrete composite wall. It provides high bearing capacity and excellent seismic resistance with corrugated design, and has been widely used in recent years. Based on the summary of domestic and foreign literature, the effects of axial compression ratio, shear-span ratio, connectors and steel plate parameters on the seismic performance of the built-in corrugated steel plate concrete composite shear wall are introduced; the mechanism and failure mode of the double-corrugated steel-plate concrete composite shear wall in terms of axial compression ratio, shear-span ratio, connectors, steel plate parameters and built-in concrete materials are emphatically expounded. In addition, the existing problems and unexplored areas in the research field of wallboard are pointed out, in order to provide guidance and reference for future research and design work.

Key words: corrugated steel plate; shear wall; seismic resistance; bearing capacity; failure mode

剪力墙在高层建筑中主要用于抵抗风荷载或地震作用产生的水平荷载, 同时承受结构垂直方向传递的重力荷载^[1]。在高层结构中, 传统钢筋混凝土剪力墙(reinforced concrete shear walls, RC剪力墙)需使用钢筋笼和大尺寸钢筋, 这大大降低了施工效率^[2-3]。此外, RC剪力墙只能通过增大

截面来满足轴压比限值要求, 不仅降低了房屋利用率, 还增加了自重, 不利于抗震要求^[4]。然而, 钢板混凝土组合剪力墙可以弥补传统RC墙板的不足^[5]。过去在平钢板方面的研究已取得一定进展^[6-8], 但由于外刚度较小, 平钢板面极易发生屈曲, 一些研究人员^[9-11]提出使用连接件来防止

收稿日期: 2025-02-17

基金项目: 2024年辽宁省科技计划联合计划资助项目(2024011314-JH2/1026)

作者简介: 李泽辉(2001—), 男, 硕士研究生, 从事装配式结构的研究与开发。

通信作者: 孙洪军(1973—), 男, 博士, 教授, 从事岩土工程相关教学与科研工作。

平钢板过早屈曲,并能与混凝土更好地协同工作。然而,连接件的存在使空腔结构变得复杂,因此对混凝土的流动性提出了更高的要求。波纹钢板混凝土组合剪力墙由平钢板混凝土组合剪力墙发展而来,其克服了平钢板面外刚度较小、滞回能力不佳^[12]以及设置过多连接件导致对混凝土流动性提出过高要求等缺点^[13]。因此,本文对现阶段波形钢板混凝土组合剪力墙的研究成果进行归纳分析,总结轴压比、剪跨比、钢板参数、混凝土材料等参数对抗震性能的影响,并分析不同截面形式墙板的破坏模式,以期为波形钢板混凝土组合剪力墙(corrugated steel plate concrete composite shear wall, CSPC 组合剪力墙)的进一步研究提供依据。

1 波纹钢板混凝土剪力墙抗震性能研究现状

1.1 内藏波形钢板混凝土组合剪力墙

由于平钢板面外刚度较小,易发生屈曲并逐步形成拉应力带,即使加入连接件也难以有效抑制屈曲的发展。内藏波形钢板混凝土剪力墙用波形钢板代替了平钢板,有效解决了上述问题。该结构具有较大的面外刚度,且便于运输和安装。表 1 总结了目前国内研究学者关于内置波形钢板的研究现状。

通过对平钢板、水平波纹钢板和竖向波纹钢板的对比可以发现:水平波纹钢板具有较高的初始刚度、滞回曲线较为饱满;而竖向波纹钢板因

手风琴效应导致初始刚度较低,但其承载力和极限位移均高于水平放置的波纹钢板。

1.2 双波形钢板混凝土组合剪力墙

双波形钢板混凝土剪力墙是在钢板剪力墙和平钢板混凝土剪力墙的基础上发展而来,由两侧波形钢板和内填混凝土组成,充分体现了两种材料的优点。在受力时,混凝土由于钢板的约束处于三向受压状态,同时混凝土有效限制了钢板的屈曲,因此双波形钢板混凝土剪力墙具有较好的抗震性能^[13]。

1.2.1 轴压比、剪跨比对抗震性能的影响

唐际宇^[18]的研究表明,轴压比较大的试件抗侧刚度较大,但刚度退化速率较快;前期强度较为稳定,最终会发生较为严重的破坏。由于较大的轴压比导致试件屈曲更加严重,因此会产生较大的变形,试件的耗能能力也因此提高。剪跨比较大的试件承载力和抗侧刚度较小,而剪跨比较小的试件强度退化较快;通过设置连接件可以减缓强度退化。王凯杰^[19]对比了平钢板和波纹钢板的性能,发现平钢板试件在轴压比为 0.7 时承载力退化较为明显,而波纹钢板在轴压比为 0.7 时与最大峰值荷载相差在 5% 以内;在轴压比为 0.9 时,其承载力降低为最大峰值承载力的 89%。由此可见,在较大的轴压比下,波纹钢板仍能保持较好的稳定性,因此可适当调整轴压比的限制范围。

上述研究结果表明,轴压比和剪跨比的增大都会使滞回曲线更加饱满。增大轴压比会使试件

表 1 内藏波形钢板混凝土组合剪力墙研究现状

影响因素	研究方法	主要结论
钢板类型 ^[14]	低周往复有限元	1) 波形钢板平面外刚度大,变形较小,能够有效抑制混凝土裂缝的发展,且具有较好的抗震性能;2) 波形钢板试件的初始刚度高于平钢板试件,其承载力和刚度退化较为缓慢
剪跨比、钢板类型、厚度、波角 ^[15]	低周往复有限元	1) 钢板厚度和波角对承载力影响较小;2) 剪跨比与承载力成反比关系;3) 竖向钢板分担的剪力大于水平钢板,因此竖向钢板更有利于提高结构的抗震性能
轴压比 ^[16]	低周往复有限元	1) 当轴压比为 0.15 ~ 0.45 时,其与竖向波形试件的承载能力和耗能能力成正比关系,而与延性和变形能力成反比关系;2) 当轴压比为 0.15 ~ 0.30 时,其与水平波形试件的承载能力和耗能能力成正比关系,而与延性和变形能力成反比关系;3) 在相同轴压比的情况下,竖向波纹试件的抗震性能较好
轴压比、剪跨比、栓钉、钢板 ^[17]	有限元	1) 栓钉间距与试件的承载力和延性成反比关系(建议取 200 mm);2) 钢板厚度对延性的影响较大(建议厚度不小于 3 mm)

的极限承载力更高、耗能能力更强,但同时强度退化速率加快,最终破坏模式会更严重。增大剪跨比会使强度退化速率减慢,但极限承载力和刚度均有所降低。相对于平钢板而言,在较大轴压比下,波形钢板试件仍能保持较高的稳定性。

1.2.2 波形钢板和边界类型对抗震性能的影响

王凯杰^[19]通过建立参数分析模型,分别以钢板厚度为 2 mm、钢管厚度为 2 mm 为参考,研究了钢材厚度、钢管厚度对结构承载力的影响,结果如图 1、2 所示。由图 1、2 可知:随着钢管、钢板厚度的增加,结构的承载力显著提升。

陈宗平等^[20]发现,竖向波纹板的承载力较高;当承载力接近时,波纹板试件的延性与耗能性能优于平钢板,且不同波纹尺寸对结构的极限承载力及刚度退化影响较小。王凯杰^[19]研究发现,宽波纹试件的延性更优,而窄波纹试件的耗能能力更优。唐际宇^[18]发现,竖向波纹的承载力更大,尽管其耗能能力弱于横向波纹,但累计耗能优于横向波纹。TONG 等^[21]提出了一种多室波形钢板钢管混凝土墙(图 3),并研究了波纹单元参数、波纹钢板幅值以及边柱类型对墙体抗震性能的影响。研究表明:波纹钢板振幅对抗震性能无显著影响,但当波纹单元超过 300 mm 时,抗震

性能显著下降。无边界柱的墙体主要发生弯曲破坏,最终破坏发生在顶部和端部的焊缝处;有边界柱的墙体主要发生剪切破坏,最终破坏发生在中间焊缝处。

张良等^[22]通过有限元模拟分析钢板厚度对抗震性能的影响。研究表明:当钢板较厚时,试件的水平抗侧承载力由约束构件控制;当钢板高厚比为 500 ~ 800 时,由钢板与约束构件共同控制;当钢板较薄时,钢板平面抗弯刚度不足,容易出现剪切破坏,从而使得材料性能不能完全发挥。WEN 等^[23]研究边界单元对结构抗震性能的影响。结果表明:该结构具有良好的延性和抗震性能,且通过强化边界单元的强度和刚度、限制边界单元钢管的宽厚比,可以进一步提高试件的延性和抗震性能。李莲花等^[24]提出了正弦波纹钢板混凝土组合剪力墙(图 4),并分析波纹尺寸对抗震性能的影响。研究表明:波纹直径较大、波折次数较少的组合墙整体刚度较强;波幅等于半径的组合墙有更强的承载力和耗能能力,整体抗震性能较好。

袁朝庆等^[25]提出了利用低屈服点钢材替代传统钢材的方法。研究表明:低屈服点钢材在试验中展现出良好的能量耗散性能,具有更优的抗震

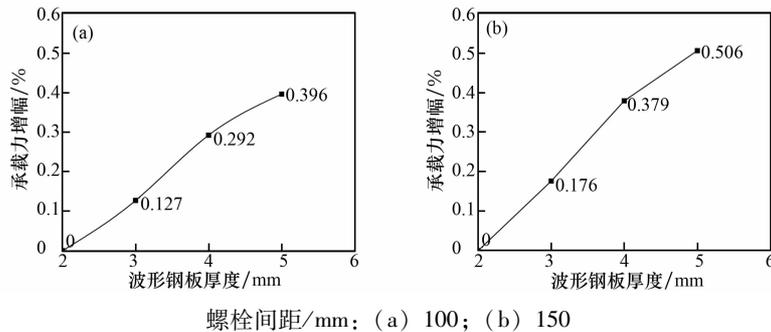


图 1 不同钢板厚度对墙板承载力的影响

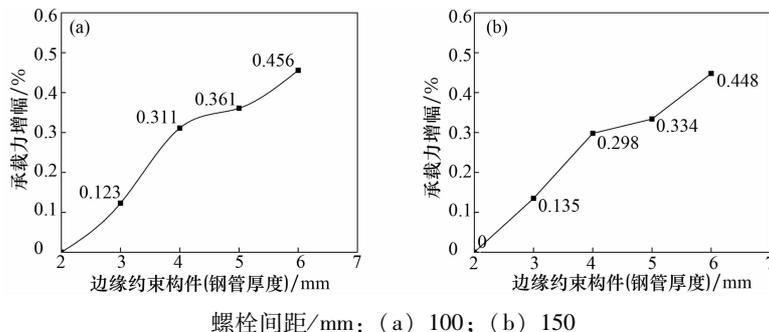


图 2 不同钢管厚度对墙板承载力的影响

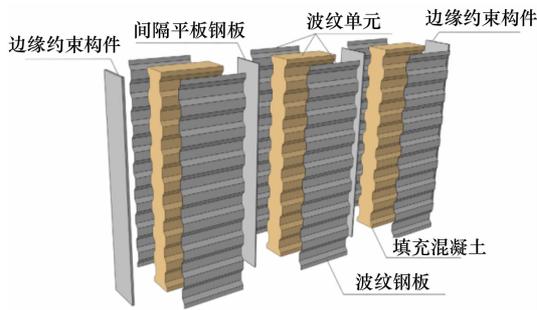


图 3 多室波形钢板钢管混凝土墙

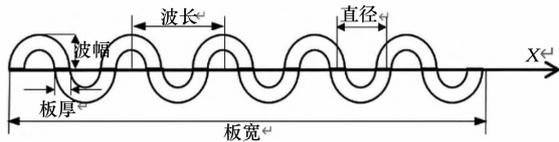


图 4 正弦波纹钢板混凝土组合墙

性能；将其与高性能结构相结合，能够实现更为显著的抗震效果。

上述研究发现，试件的刚度和承载力与钢板厚度等级以及边界约束单元密切相关，高厚比影响试件的破坏形式；波纹尺寸对结构抗震性能影响较小，但宽波纹的延性更优。

1.2.3 连接件对抗震性能的影响

王凯杰^[19]发现，降低螺栓间距可使构件的刚度和承载力提高。唐际宇^[18]对比了无连接件、栓钉、对拉螺栓以及栓钉 + 对拉螺栓的作用效果，发现由于开孔和焊接会导致钢板出现初始缺陷，因此未设置连接件的构件初始刚度较大，但在受力过程中刚度退化速率较快。连接件对剪跨比较大的构件作用效果不明显，而对剪跨比较小的极限承载力有显著影响，其影响效应：栓钉 + 对拉螺栓 > 对拉螺栓 > 栓钉。陈宗平等^[20]以连接件为单一变量研究其对抗震性能的影响。研究表明：设置连接件可减缓刚度和承载力的退化速率，并能防止钢板发生面外失稳，从而有效提高承载力和延性；在剪跨比小于 1.5 时，必须设置连接件。李文韬等^[26]基于正交各向异性，研究了双层 CSPC 组合剪力墙在轴压受力和水平剪切受力下对拉螺栓间距的限制。从水平剪切力出发，不考虑钢板与混凝土的黏结作用，发现对拉螺栓错列布置不利于抵抗剪切屈曲。谭又文^[27]设计并制作了 3 片自攻螺钉连接的闭口型压型钢板混凝土组合墙（图 5），研究连接件布置形式与数量等因素对其

抗震性能的影响。研究表明：自攻螺钉可以达到与焊接相连相同的破坏形态，随着自攻螺钉数量的增加，延性得到了改善。

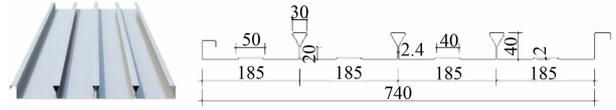


图 5 闭口型压型钢板混凝土组合墙 mm

WEN 等^[28]研究了螺栓排列和间距对波纹板弹性屈曲模式的影响，并提出了相应的屈曲应力公式。通过有限元模型分析波纹板在螺栓和混凝土约束下的剪力承载能力，发现当墙板发生剪切破坏时，波纹钢板主要承受剪切荷载，而边界单元对波纹钢板起到约束作用。

上述研究表明，连接件可使钢板与混凝土之间实现良好的协同工作，正交布置更有利于抵抗剪切屈曲。然而，焊接和开洞会导致初始缺陷，从而使得初始刚度降低。连接件对剪跨比较小的试件影响较大，且剪跨比小于 1.5 时，必须设置连接件。

1.2.4 内置混凝土材料对抗震性能的影响

PRABHA 等^[29-30]、RASSOULI 等^[31]将泡沫混凝土作为填充材料引入波形钢板混凝土组合剪力墙（图 6）。研究表明，泡沫混凝土与普通混凝土具有相似的抗剪承载力。增加约束程度可以提高墙板的轴向承载力，但会降低其耗能能力，然而在达到峰值荷载后仍具备较好的延性。刘芮希^[32]研究了不同风积沙取代率对钢板混凝土组合墙抗震性能的影响。研究表明，在 20% 风积沙取代率下，组合墙的抗震性能最优。杨梦^[33]对内填再生混凝土的 CSPC 组合剪力墙的抗震性能进行了系统研究（表 2），并探讨了再生骨料取代率对抗震性能的影响。研究表明：各墙板均具有良好的抗震性能，再生混凝土的力学性质受取代率的影响不大，且波纹钢板能够有效弥补该影响。

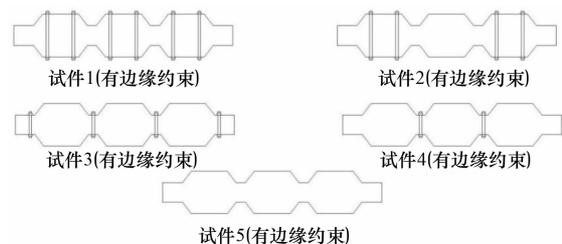


图 6 波纹钢板内填轻质泡沫混凝土组合剪力墙

表 2 不同类型不同内置混凝土参数影响

试件类型	峰值荷载/%	位移延性系数/%	半周累计耗能/%
平钢板普通混凝土组合剪力墙	5.71	12.29	0.11
波形钢板再生混凝土组合剪力墙	17.64	8.04	16.64

注: 上述数据为与平钢板再生混凝土组合剪力墙对比结构。

上述研究发现, 不同混凝土材料与钢板具有良好的协同作用, 取代率的不同对试件的抗震性能影响较小。再生混凝土与泡沫混凝土等材料不仅能降低结构重量、减弱地震作用, 而且符合绿色发展的理念。

1.2.5 异型截面对抗震性能的影响

在实际建筑工程中, 剪力墙常呈现多样化的截面设计, 特别是在建筑物的转角区域, 会出现异型结构, 如常见的 L 形、T 形等。目前, 国内研究人员^[34-38]对异形平钢板混凝土组合剪力墙进行了系统研究, 包括 L 形、T 形、Z 形等多种形式。董美静^[38]不仅研究了 Z 形截面构件, 还针对其他异型截面进行了对比分析, 研究发现: 抗震性能由高到低依次为 Z 形 > T 形 > L 形, 且在构件设计中优先选择翼缘关于腹板对称分布的结构。

国内研究人员也对异型波形钢板混凝土组合剪力墙进行了系统研究, 包括 L 形、T 形、工字形等形式。唐际宇^[18]、张冯霖^[39]针对 L 形墙体进行了系统研究, 结果表明: L 形结构的腹板外缘一侧应变较大, 若未设置约束构件, 会导致试件破坏范围大、鼓曲严重以及承载力降低。加宽翼缘主要在受压时改善墙体延性, 从而使滞回曲线更加饱满。竖向布置波纹可提高结构的初始刚度和承载力。王梦争^[40]、许新颖等^[41]、陈宗平等^[42]研究了 T 形截面波形钢板组合墙的抗震性能试验, 结果表明: T 形截面具有良好的抗震性能, 方钢管的设置显著影响构件破坏形式。未设置方钢管柱的试件由于墙体承压能力弱于方钢管, 在达到极限承载力后迅速产生裂缝并扩展, 其整体性能弱于设置方钢管柱的试件。仇紫璇^[43]对影响墙板承载力的参数进行了对比研究, 影响程度从高到低依次为构件钢板厚度、钢板强度等级、剪

跨比、混凝土强度等级、轴压比、腹板腔数。李清华^[44]提出了工字形 CSPC 组合剪力墙, 并对工字形、T 形、L 形 3 种异型截面构件进行了系统的抗震性能分析, 结果显示抗震性能由高到低依次为工字形 > T 形 > L 形。

不同截面形式的研究解决了施工过程中转角区域墙体布置的问题, 并发现竖向布置波纹钢板试件的初始刚度和承载力更高。综合目前研究的截面形式, 抗震性能依次为工字形 > T 形 > L 形。

1.2.6 破坏形式

破坏模式研究的根本目的是深刻理解结构的失效机理, 并在设计阶段确保结构的安全性、可控性和高性能, 最大程度保障生命安全、减少财产损失, 同时为优化设计、验证理论和改进规范提供核心依据。表 3 为波形钢板混凝土组合剪力墙结构破坏模式的总结归纳^[18], 为其在高层建筑中的应用提供参考。

2 结论与展望

2.1 结论

(1) 波纹钢板混凝土组合剪力墙的结构性能优于平钢板混凝土组合剪力墙, 表现出更优的抗震性能。在钢板的几何特性中, 竖向放置的波纹钢板相比横向放置, 在极限承载力、延性、抗侧刚度和耗能能力方面表现更优, 强度退化也更为缓慢。波纹尺寸主要影响结构的变形和耗能能力, 窄波纹的变形和耗能能力弱于宽波纹。墙板的承载力和刚度均与钢板厚度相关。

(2) 连接件的设置虽然会导致钢板初始刚度降低, 但能够使钢板和混凝土更好地协同工作, 在受力过程中刚度退化缓慢, 并防止钢板面外失稳。不同连接件对抗震性能的影响依次为栓钉 + 对拉螺栓 > 对拉螺栓 > 栓钉。由于波纹钢板具有较高的面外刚度, 关于连接件的研究相对较少。

(3) 剪跨比和轴压比对构件的抗震性能有较大影响。轴压比和剪跨比的增大都会使滞回曲线更加饱满。相对于平钢板, 在较大轴压比下试件依然能够保持稳定。

(4) 内填再生混凝土及泡沫混凝土可以减少建筑物材料的使用, 同时降低结构自重, 从而减

表 3 不同形式 CSPC 组合剪力墙破坏模式分析

研究内容	试件类型	破坏模式	破坏机理分析
一字型双波形 钢板混凝土组 合剪力墙	轴压比为 0.1、0.2, 剪 跨比为 1.5、2.0 且布 置连接件	压弯破坏	边缘约束构件端部出现严重鼓曲甚至开裂, 开裂处伴有混凝土 粉末溢出, 而墙体波纹钢板未见显著变化
	轴压比为 0.4	压屈破坏	边缘约束构件端部出现明显的鼓曲现象, 且在距顶部 12 cm 处 沿加载方向产生新的鼓曲, 并迅速向钢板延伸
	轴压比为 0.2、小剪跨 比为 1.5 且未布置连 接件	约束失效破坏	边缘约束构件端部未出现鼓曲现象, 而波纹钢板整体向外鼓胀, 最终因突然屈曲致使试件破坏
L 型双波形钢 板混凝土组 合剪力墙	跨比为 2.0, 采用窄波 纹	压弯破坏	腹板边缘约束构件的墙角发生开裂, 并沿水平方向扩展, 开裂处 伴有混凝土粉末溢出
	跨比为 1.5、2.0, 采用 宽波纹	压屈破坏	腹板边缘的约束构件受压屈服, 形成鼓曲环, 且钢板未出现开裂 现象
	未设置约束方钢管柱	约束失效破坏	封口板处钢材发生撕裂, 混凝土粉末溢出, 波纹钢板出现鼓曲现 象
T 型双波形钢 板混凝土组 合剪力墙	横向波纹钢板	压弯破坏	腹板边缘的约束构件受压屈服, 形成鼓曲环; 转角处出现竖向裂 缝, 其余面出现水平裂缝; 核心混凝土被压碎, 底部钢板拉裂, 从 而形成贯穿的裂缝层
	剪跨比较大、剪跨比较 小的竖向波纹, 且布置 约束方钢管	压屈破坏	边缘约束构件端部受压屈服, 形成鼓曲环; 混凝土开裂后被压 碎, 与钢板失去黏结力, 但钢板未产生裂缝

弱地震效应。

(5) 异形截面相对于单一的一字形截面, 考虑了实际过程中的转角问题。设置约束构件的异形截面结构整体抗震性能优于未设置约束构件的结构, 且抗震性能由高到低依次为工形 > T 形 > L 形。

2.2 展望

(1) 对于波形钢板混凝土组合墙的内填材料而言, 目前研究较为局限, 后续应考虑多种内填材料, 以符合国家绿色发展的理念。如再生混凝土、纤维混凝土等。

(2) 对于连接件而言, 不应仅局限于螺栓、栓钉、对拉螺栓等传统形式, 还应探索缀板、缀条、T 型连接件、J 型连接件等新型连接件及其耦合作用, 找出经济效益最优的组合方案。

(3) 高层建筑是未来建筑发展的主要趋势, 如何提高利用率是一个关键问题。因此, 应加大对异型墙板的研究力度, 目前规范仅包括一字型、L 型、T 型的设计标准, 对于其他异型墙体尚未制定设计标准, 需进一步完善相关规范。

参考文献:

- [1] 李翔宇, 张建伟, 朱雨轩, 等. 塑性铰区加强方式对高强混凝土剪力墙抗震性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(9): 3480-3493.
- [2] SENER K C, VARMA A H, AYHAN D. Steel-plate composite (SC) walls: Out-of-plane flexural behavior, database, and design[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 108: 46-59.
- [3] SEO J, VARMA A H, SENER K, et al. Steel-plate composite (SC) walls: In-plane shear behavior, database, and design[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 119: 202-215.
- [4] 严炎炎. 新型双钢板-混凝土组合墙抗震性能试验及数值分析[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [5] 聂建国, 卜凡民, 樊健生. 低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 74-81.
- [6] 聂建国, 陶慕轩, 樊健生, 等. 双钢板混凝土组合剪力墙研究新进展[J]. 建筑结构, 2011, 41(12): 52-60.

- [7] 卜凡民, 聂建国, 樊健生. 高轴压比下中高剪跨比双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 91-98.
- [8] WANG B, JIANG H J, LU X L. Seismic performance of steel plate reinforced concrete shear wall and its application in China Mainland[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 131: 132-143.
- [9] 韦芳芳, 朱有华, 喻君. 栓钉连接双钢板-混凝土组合剪力墙抗剪性能数值分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(1): 96-106.
- [10] LIM J S, JEONG Y D, NAM J W, et al. Analytical performance evaluation of modified inclined studs for steel plate concrete wall subjected to cyclic loads[J]. Computers and Concrete, 2016, 17(2): 227-240.
- [11] 马恺泽, 阙昂, 刘伯权. 双层钢板混凝土组合剪力墙滞回性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(4): 39-45.
- [12] EMAMI F, MOFID M, VAFAI A. Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls[J]. Engineering Structures, 2013, 48: 750-762.
- [13] 郭彦林, 朱靖申. 剪力墙的类型、设计理论研究进展[J]. 工程力学, 2020, 37(6): 19-33.
- [14] 王威, 赵春雷, 任坦, 等. 波形钢板-混凝土组合剪力墙的非线性有限元分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2054-2062; 2324.
- [15] 王威, 梁宇建, 向照兴, 等. 波形钢板混凝土组合剪力墙轴压比影响研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(4): 66-76.
- [16] 王威, 刘格炜, 苏三庆, 等. 波形钢板剪力墙及组合墙抗剪承载力研究[J]. 工程力学, 2019, 36(7): 197-206; 226.
- [17] 王威, 张龙旭, 苏三庆, 等. 波形钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 75-84.
- [18] 唐际宇. 双波纹钢板混凝土组合剪力墙抗震性能及设计方法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [19] 王凯杰. 双层波纹钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [20] 陈宗平, 周济, 莫琳琳, 等. 双波纹钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(10): 199-213.
- [21] TONG J Z, ZHANG J M, YU C Q, et al. Seismic experiments and shear resistance prediction of multi-celled corrugated-plate CFST walls[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2024, 53(5): 1681-1704.
- [22] 张良, 吴边, 张凤亮, 等. 波形钢板加强的钢管混凝土组合剪力墙抗震性能分析[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 146-155; 138.
- [23] WEN C B, GUO Y L, SUN H J, et al. Experimental and numerical study on seismic performance of concrete-infilled double steel corrugated-plate walls[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 68: 106171.
- [24] 李莲花, 汪小平, 魏祎昉, 等. 双层波纹钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究[J]. 广东建材, 2024, 40(9): 141-145.
- [25] 袁朝庆, 李国洋, 房宽光, 等. LYP 波纹双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2025, 42(3): 15-22.
- [26] 李文韬, 郭明, 范佳琪, 等. 双层波纹钢板混凝土组合剪力墙对拉螺栓间距研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊1): 1309-1312.
- [27] 谭又文. 自攻螺钉连接的压型钢板组合剪力墙滞回性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [28] WEN C B, ZHU B L, HOU Y G, et al. Shear-bearing capacity prediction of concrete-infilled double steel corrugated-plate shear walls[J]. Structures, 2024, 65: 106763.
- [29] PRABHA P, MARIMUTHU V, SARAVANAN M, et al. Effect of confinement on steel-concrete composite light-weight load-bearing wall panels under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 81: 11-19.
- [30] PRABHA P, PALANI G S, LAKSHMANAN N, et al. Behaviour of steel-foam concrete composite panel under in-plane lateral load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 139: 437-448.
- [31] RASSOULI B, SHAFAEI S, AYAZI A, et al. Experimental and numerical study on steel-concrete composite shear wall using light-weight concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 126: 117-128.
- [32] 刘芮希. 内置钢板风积沙混凝土组合剪力墙抗震性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2023.
- [33] 杨梦. 双层钢板-内填再生混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [34] 芦华, 赵宝成. 外包钢板混凝土 T 形短肢剪力墙抗剪承载力分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2018, 40(3): 31-39.

- [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e02107.
- [5] QIU H F, ZHANG F S, LIU L, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of cemented rock-tailings backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 315: 125278.
- [6] 张友志, 甘德清, 薛振林, 等. 基于 NMR 技术的孔隙结构与充填体强度关联机制[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(4): 121 – 128.
- [7] 李文臣, 王忠红, 郭利杰, 等. 尾砂胶结充填体试样早期强度与孔结构关联规律研究[J]. *中国矿业*, 2018, 27(10): 143 – 147.
- [8] 赵康, 何志伟, 严雅静, 于等. 纤维增强超细尾砂充填体微观破坏机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(增刊 1): 3010 – 3020.
- [9] 赵文华, 崔锋, 刘鹏亮, 等. 粉煤灰 – 脱硫石膏充填材料性能及微观结构研究[J]. *中国矿业*, 2022, 31(9): 132 – 138.
- [10] LIU L, FANG Z Y, QI C C, et al. Experimental investigation on the relationship between pore characteristics and unconfined compressive strength of cemented paste backfill [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 254 – 264.
- [11] 宋迪迪, 张根广, 张宇卓, 等. Image-pro plus 软件在泥沙絮凝体结构特征分析中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(4): 156 – 161.
- [12] 钱觉时, 余金城, 孙化强, 等. 钙矾石的形成与作用[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(11): 1569 – 1581.
- [13] XU L, WANG J J, LI K F, et al. Investigations on the rehydration of recycled blended SCMs cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2023, 163: 107036.
- [14] YANG P, SUO Y L, LIU L, et al. Study on the curing mechanism of cemented backfill materials prepared from sodium sulfate modified coal gasification slag[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 62: 105318.
- [15] 刘光宗, 方水平, 陈小燕. 基于各相矿物组成含量的水泥水化动力学模型[J]. *四川建筑科学研究*, 2012, 38(1): 164 – 167.
- [16] 陈恋, 袁梅, 许石青, 等. 数字图像技术结合小島法在煤分形特征中的应用[J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(3): 77 – 83.

(上接第 7 页)

- [35] ZHANG X M, QIN Y, CHEN Z H, et al. Experimental behavior of innovative T-shaped composite shear walls under in-plane cyclic loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 120: 143 – 159.
- [36] JI X D, CHENG X W, JIA X F, et al. Cyclic in-plane shear behavior of double-skin composite walls in high-rise buildings [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(6): 04017025.
- [37] 李健, 韩广强, 李峰, 等. L 形截面双钢板组合剪力墙受力性能有限元分析[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(5): 70 – 80.
- [38] 董美静. Z 形双钢板 – 混凝土组合剪力墙抗震性能研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
- [39] 张冯霖. L 形双波纹钢板 – 混凝土组合剪力墙抗震性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [40] 王梦争. T 形截面波形钢板组合墙设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2021.
- [41] 许新颖, 陈宗平, 张冯霖, 等. T 形双波纹钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(3): 176 – 189.
- [42] 陈宗平, 莫琳琳, 许新颖, 等. 低周反复荷载下 T 型双波纹钢板混凝土组合剪力墙受力性能试验研究[J]. *工程力学*, 2024, 41(6): 87 – 104.
- [43] 仇紫璇. T 形双波纹钢板 – 混凝土组合剪力墙抗震性能有限元分析[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- [44] 李清华. 工字形双波纹钢板 – 混凝土组合剪力墙力学性能有限元分析[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2021.