

双钢板内填轻骨料混凝土剪力墙抗震性能分析及设计建议

廖含喻¹, 乔鹏双¹, 张磊², 叶艳霞^{1*}

¹长安大学建筑工程学院, 陕西 西安

²中建八局设计管理总院, 上海

Email: *yeyanxia@chd.cn

收稿日期: 2021年4月10日; 录用日期: 2021年9月23日; 发布日期: 2021年9月30日

摘要

为了提高双钢板剪力墙的抗震性能, 减轻结构自重, 本文提出了一种采用高强轻骨料混凝土的双钢板剪力墙(SLCW)。采用有限元分析ABAQUS软件, 考虑钢板厚度、轻骨料混凝土强度、轴压比、剪跨比等参数, 分别建立了13个SLCW构件的数值计算模型, 并采用往复加载进行模拟数值试验研究, 分析了上述参数变化对SLCW承载力、滞回曲线、恢复力模型、刚度退化、耗能性能、延性等的影响规律。结果表明: 本文提出的内填轻骨料混凝土的双层钢板剪力墙具有良好的承载能力和抗震性能, 延性系数均在2.0~3.3之间, 具有良好的变形能力和耗能能力。增加钢板厚度、混凝土强度能提高组合墙体的承载能力和延性; 轴压比的提高对承载力提高作用不明显, 但对延性有改善作用; 增加剪跨比会降低组合墙体承载力, 但对延性有较好的提升。

关键词

轻骨料混凝土双钢板剪力墙(SLCW), 抗震性能, 有限元分析, 设计建议

Seismic Performance Analysis and Design Suggestions of Light Aggregate Concrete Shear Wall Filled in Double Steel Sheet

Hanyu Liao¹, Pengshuang Qiao¹, Lei Zhang², Yanxia Ye^{1*}

¹School of Civil Engineering of Chang'an University, Xi'an Shaanxi

²General Institute of Design and Management of China Construction Eighth Bureau, Shanghai

Email: *yeyanxia@chd.cn

*通讯作者。

文章引用: 廖含喻, 乔鹏双, 张磊, 叶艳霞. 双钢板内填轻骨料混凝土剪力墙抗震性能分析及设计建议[J]. 土木工程, 2021, 10(9): 945-960. DOI: 10.12677/hjce.2021.109106

Abstract

In order to improve the seismic behavior and reduce weight of the double steel sheet shear wall, a new high strength light-weight concrete filled double-steel-plate composite shear wall (SLCW) is proposed. The finite element analysis software ABAQUS is used in this paper. Considering the thickness of steel plate, strength of lightweight aggregate concrete, axial compression ratio, shearing span ratio and other parameters, the finite element analysis model of 13 SLCW components is established, and the influences on the bearing capacity, lag curve, recovery model, stiffness degradation, energy consumption performance and ductility, etc. of SLCW are analyzed. The simulated numerical test is carried out by reciprocating loading. As a result, the two-layer steel plate shear wall with lightweight aggregate concrete in this paper has good bearing capacity and seismic resistance, ductility coefficient is between 2.0~3.3, and has good deformation capacity and energy dissipation capacity. Increasing the thickness of steel plate and the strength of concrete can improve the bearing capacity and ductility of the composite wall; the increase of axial compression ratio does not obviously improve the bearing capacity, but it can improve the ductility; increasing the shear span ratio will reduce the bearing capacity of the composite wall, but it will improve the ductility better.

Keywords

Light Aggregated Concrete Double Steel Plate Shear Wall (SLCW), Seismic Performance, Finite Element Analysis, Design Suggestion

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢板混凝土组合剪力墙主要是由钢板、混凝土及两者之间的抗剪连接件组合而成[1]。按照钢板设置来分类,钢板混凝土组合剪力墙可分为双层钢板混凝土剪力墙和单钢板内置剪力墙[1]。双钢板剪力墙具有延性好、耗能能力强、构造简单、施工方便、避免裂缝外露等优点[2]。对于双钢板组合剪力墙,国内外学者对其力学性能已经做了大量的实验研究及理论分析[3] [4] [5] [6],但对其内填的混凝土材料还缺乏关注,因此本文提出一种内填轻骨料混凝土的双层钢板剪力墙(SLCW),并对其抗震性能进行研究。

轻骨料混凝土具有自重轻、强度高、节材环保的优点,在工程中的应用逐渐增多。强度等级达到 LC30 以上的轻骨料的混凝土的表观密度介于 1200~1900 kg/m³,比同一强度等级的普通混凝土,质量减轻 20%~50% [7],因此,内填轻骨料双层钢板剪力墙相比普通双层钢板剪力墙自重可减少 20%~50%,构件自重降低的同时也将会降低结构所受的地震作用,提高结构的质强比。同时,轻骨料混凝土比普通混凝土有更好的耐火性,而且轻骨料混凝土的弹性模量小,变形性能好,可以更多吸收地震荷载下的冲击波能量。因此,将轻骨料混凝土作为双层钢板的内填材料可以有效地增强结构的抗震性能[8] [9] [10]。

为了对双层钢板内填轻骨料混凝土组合剪力墙的抗震性能进行研究,本文通过查阅文献[11] [12] [13] [14]和有限元软件模拟[15] [16],将有限元模拟的结果与文献的试验数据进行对比,验证有限元模拟的有效性,分析影响双层钢板内填轻骨料混凝土组合剪力墙抗震特性的关键参数,及其对抗震性能的影响规律。

2. 双层钢板剪力墙的构造

计算模型

本文依据某工程实例选定一个标准试件，其主要尺寸为，墙体高度为 3200 mm，墙身截面大小为 1800 mm × 1600 mm，墙身两侧钢板厚 6 mm，墙身两侧端柱的尺寸为 200 mm × 240 mm，端柱钢板的厚度为 3 mm，轻骨料混凝土强度 f_{cu} 为 40 MPa，钢材屈服强度 f_y 为 345 MPa，墙体的剪跨比为 2，标准构件示意图见图 1。

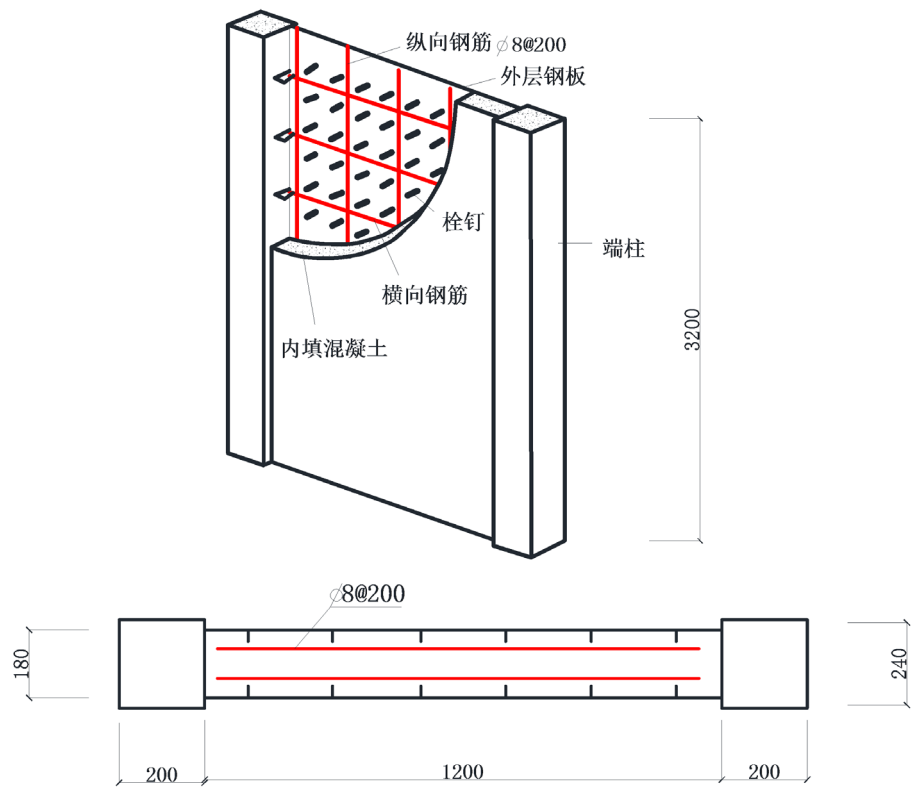


Figure 1. Basic component diagram
图 1. 基础构件图

为研究双层钢板内填轻骨料混凝土组合剪力墙在不同参数下的抗震性能，利用有限元分析软件 ABAQUS，考虑钢板的厚度、轻骨料混凝土的强度、轴压比、剪跨比等参数分别建立有限元分析模型，各模型参数见表 1。通过对上述计算模型施加往复循环荷载，研究轻骨料混凝土双钢板剪力墙的抗震性能及随参数改变的变化规律。

Table 1. Model parameters table
表 1. 模型参数表

试件编号	轻骨料混凝土等级	墙高(mm)	钢板厚度 (mm)	剪跨比	轴压比
SLCW-1	LC40	3200	6	2	0.35
SLCW-2	LC40	3200	8	2	0.35
SLCW-3	LC40	3200	10	2	0.35

Continued

SLCW-4	LC40	3200	12	2	0.35
SLCW-5	LC40	3200	6	2	0.4
SLCW-6	LC40	3200	6	2	0.45
SLCW-7	LC40	3200	6	2	0.5
SLCW-8	LC40	2880	6	1.8	0.35
SLCW-9	LC40	3520	6	2.2	0.35
SLCW-10	LC40	3840	6	2.4	0.35
SLCW-11	LC30	3200	6	2	0.35
SLCW-12	LC50	3200	6	2	0.35
SLCW-13	LC60	3200	6	2	0.35

3. 材料本构

3.1. 轻骨料混凝土的受压损伤本构

轻骨料混凝土的单轴的受压应力 - 应变曲线可按(3.1)、(3.2)、(3.3)式计算确定[17]。

$$y = \begin{cases} 1.5x - 0.5x^2 & x \leq 1 \\ \frac{ax}{1 + bx + cx^2} & x > 1 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \quad (3.2)$$

$$y = \frac{f}{f_c} \quad (3.3)$$

式中: f_c ——轻骨料混凝土单轴抗压强度代表值, 其值可根据实际结构分析的需要分别取 f_c 、 f_{ck} 或 f_{cm} ;

$\varepsilon_{c,r}$ ——与单轴抗压强度 $f_{c,r}$ 相应的轻骨料混凝土峰值压应变。

常数 a 、 b 、 c 满足:

$$\frac{dy}{dx}(x=1, y=1) = 0 \quad (3.4)$$

求得 $c=1$ 、 $a=2+b$, 将其代入到(3.1)式中得曲线下降段方程式。

$$y = \frac{(2+b)x}{1 + bx + cx^2} \quad (3.5)$$

对于轻骨料混凝土, 取 $b=-1.88$ 。

以上式中的 σ 和 ε 是在轻骨料混凝土未变形时的材料截面而计算出来的名义应力(σ_{nom})与名义应变(ε_{nom}), 而轻骨料混凝土在实际受力中是会发生变形的[18], 此时再用名义应力与名义应变就与实际受力情况不相符, 所以在 ABAQUS 计算模拟中要将名义应力和应变转化为真实应力与应变。转换公式见式(3.6)、(3.7)。

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3.6)$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3.7)$$

ABAQUS 中, 轻骨料混凝土破坏后的屈服应力应该取 σ_{true} (真实应力), $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$ (非弹性应变)为真实应

变减去轻骨料混凝土未损伤时的弹性应变。

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E_0} \quad (3.8)$$

3.2. 轻骨料混凝土的受拉损伤本构

轻骨料混凝土单轴受拉应力应变曲线，可按公式(3.9)、(3.10)、(3.11)计算确定[19]。

$$d_t = y = \begin{cases} 1.2x - 0.6x^2 & 0 < x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_t(x-1)^\beta + x} & x > 1 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t} \quad (3.10)$$

$$y = \frac{f}{f_t} \quad (3.11)$$

其中： α_t 、 β ——轻骨料混凝土中单轴受拉应力-应变下降段有关参数值，书中取 $\alpha_t = 1.1f_t^2$ 、 $\beta = 1.4$ ； f_t ——轻骨料混凝土的单轴抗拉强度代表值，其值可根据实际结构分析需要分别取 f_t 、 f_{tk} 或 f_{tm} ； ε_t ——与单轴抗拉强度代表值 $f_{t,r}$ 相应的混凝土峰值拉应变； d_t ——轻骨料混凝土单轴受拉时损伤演化参数。

3.3. 钢材的本构

有限元模型中钢板的应力应变关系采用三折线模型，且满足 Von-mises 屈服准则。

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + E'_s (\varepsilon_s - \varepsilon_y) & \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_u \\ 0 & \varepsilon_s > \varepsilon_u \end{cases} \quad (3.12)$$

式中： ε_{sh} 钢板强化起点应变； E'_s 钢板强化刚度。

3.4. 有限元模型的建立

双层钢板剪力墙由两侧钢板、轻骨料混凝土墙体、两端端柱、内置钢筋及抗剪栓钉组成。轻骨料混凝土墙体和端柱采用实体单元(SOLID)，单元类型设置为 8 节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)。钢板用壳单元(SHELL)，单元类型设置为 4 节点四边形有限元薄膜应变性壳单元(S4R)。钢筋及抗剪栓钉用桁架单元(TRUSS)来建模，单元类型设置为 T3D2。

端柱与钢板之间、混凝土墙体与两侧钢板之间的相互作用均采用“表面与表面之间接触”，接触的切向行为定义为“罚”，罚按照经验取为 0.35，法向行为设定为“硬接触”。抗剪栓钉与内侧钢板之间采用“绑定”约束来模拟焊接，抗剪栓钉采用“内置区域”与内填混凝土连接，钢筋作为被嵌入体嵌入到内填混凝土中。

在剪力墙顶部中央位置设置参考点 RP-1，为了保证所加荷载能均匀的施加在剪力墙上，所以应将 RP-1 与剪力墙顶部耦合，在 RP-1 加上 Y 方向的位移，X、Z 方向的转角都为零的边界条件，即约束顶部沿 Y 方向的位移和 X、Z 方向的转角，并加集中力荷载及水平往复荷载。将剪力墙的顶部截面的混凝土墙面与钢板施加壳-实体耦合约束，在剪力墙底部施加固接条件 X、Y、Z 方向的位移和转角均为零，即约束在剪力墙底部沿 X、Y、Z 轴的位移和转动。

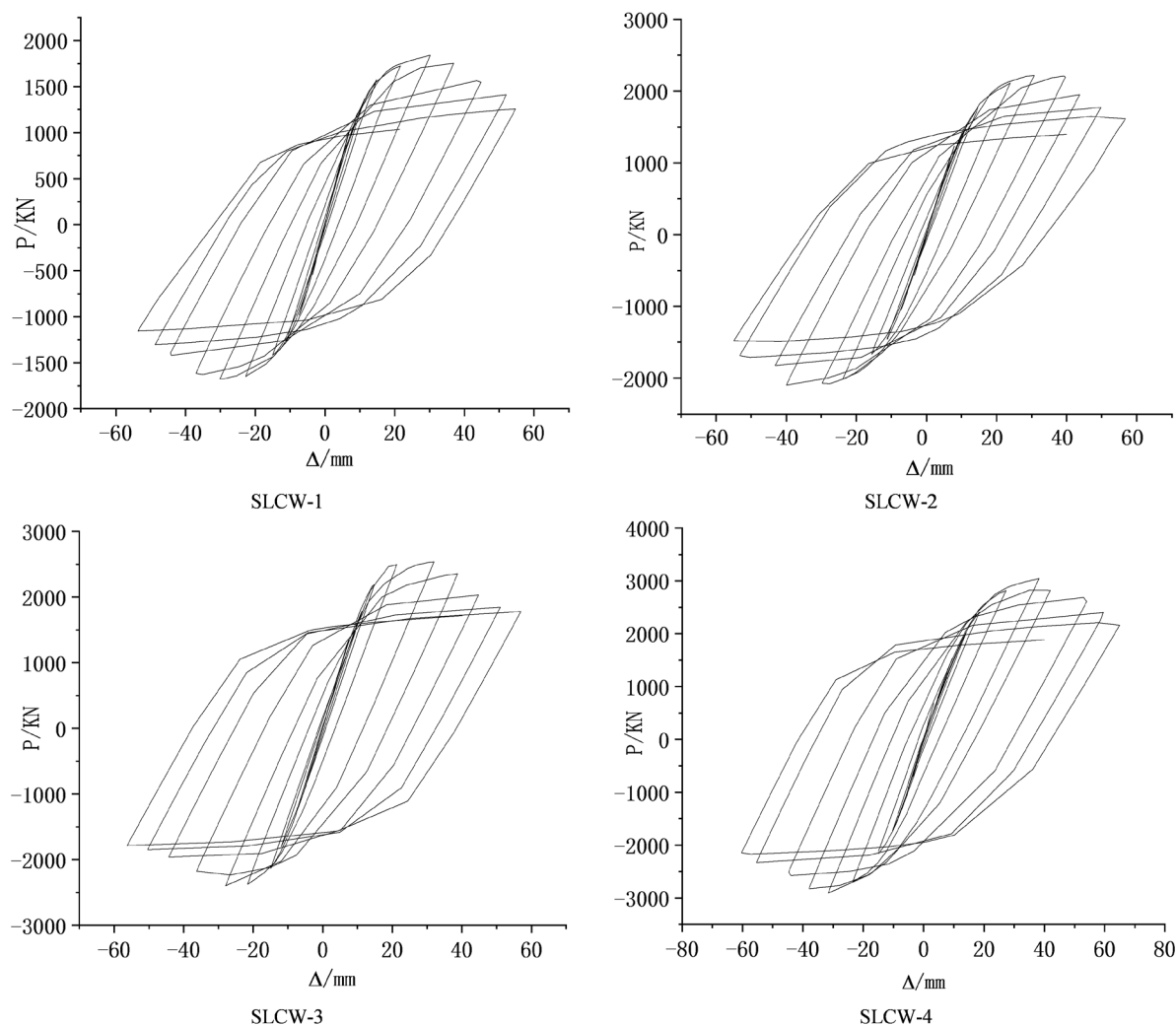
4. SLCW 的抗震性能分析

4.1. 滞回曲线

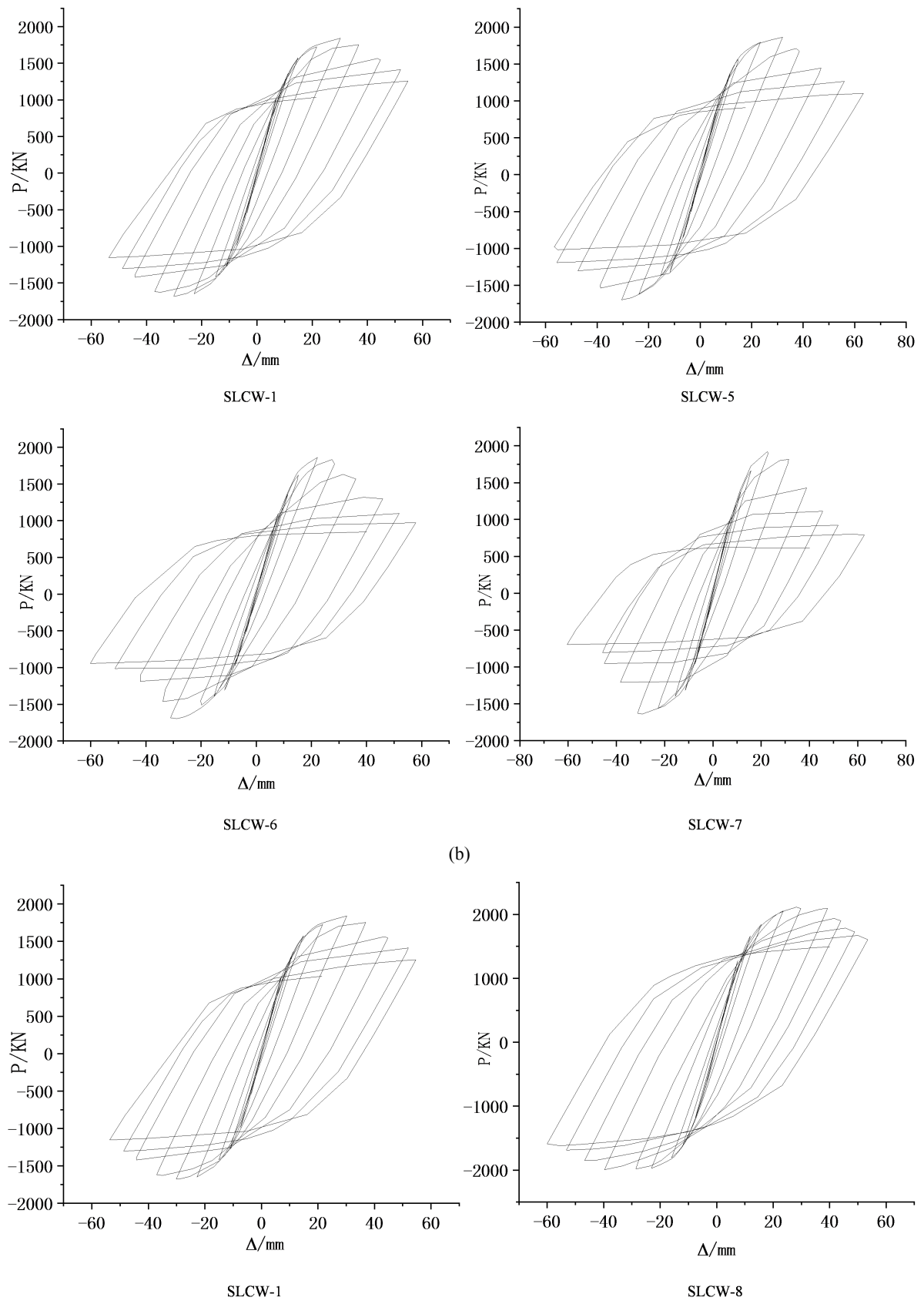
图 2 分别给出了改变钢板厚度、轴压比、剪跨比、轻骨料混凝土强度时对应各组试件的滞回曲线。

总的来看,试件加载过程中的经历了弹性、弹塑性、塑性发展直至破坏三个阶段,各试件的滞回曲线形状相似,其受力、变形、破坏特征也较为一致。限于篇幅,本文以试件 SLCW-1 为例具体说明如下:

在试件加载初期,各试件基本都处于弹性阶段,滞回曲线特征为线性关系,当试件卸载时塑性变形很小,几乎为零,滞回曲线的斜率基本没有出现下降;随着组合剪力墙试件加载位移不断增加,当加载位移 $\Delta = 20 \text{ mm}$ 时,各试件进入弹塑性阶段,两侧钢板逐渐发生屈曲,钢板和内填轻骨料混凝土之间开始出现缝隙,组合构件的截面组合效应下降,滞回曲线的斜率开始下降,表明试件刚度发生退化,但是承载能力逐渐增加,卸载时试件塑性变形逐渐增大,在此弹塑性过程中滞回曲线呈饱满的梭形;当加载位移 $\Delta = 40 \text{ mm}$ 时,试件加载到峰值荷载,继续加载,墙体两侧钢板由屈曲逐渐演变为鼓曲,并且鼓曲现象逐渐加重,部分两侧钢板与内填轻骨料混凝土脱开现象变得明显,截面组合效应逐渐下降,卸载时塑性变形明显增加,刚度退化 37.5%。



(a)



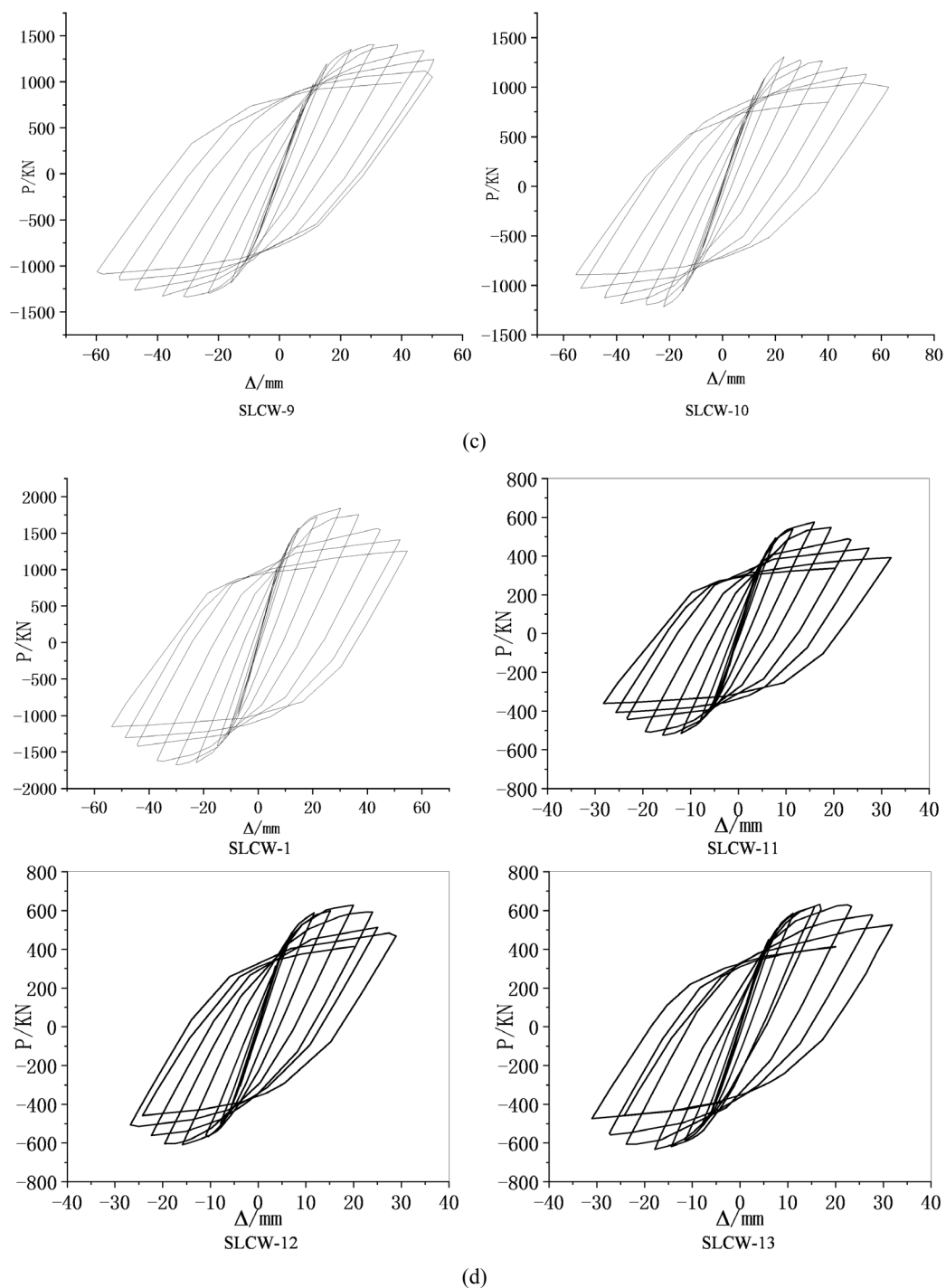


Figure 2. Hysteresis curves of each group. (a) Hysteresis curves of different plate thicknesses; (b) Hysteresis curves at different axial compression ratios; (c) Hysteresis curves under different shear span ratios; (d) Hysteresis curves under different concrete strength

图 2. 各组试件的滞回曲线。(a) 不同钢板厚度的滞回曲线；(b) 不同轴压比下的滞回曲线；(c) 不同剪跨比下的滞回曲线；(d) 不同混凝土强度下的滞回曲线

对比图 2(a)中的四个滞回曲线可以发现, 当改变 SLCW 的钢板厚度时, 钢板的厚度越大, 滞回曲线就越饱满。SLCW 的承载力随钢板厚度增加而加大。其他条件相同的情况下, 钢板厚度由 6 mm 提高到 8

mm、10 mm、12 mm 时组合剪力墙的抗剪承载力分别提高了 23%、40.5%、67%。

对比图 2(b)中的四个滞回曲线可以发现,当改变 SLCW 的轴压比时,试件轴压比越大,图中滞回曲线的捏拢想象就越明显,滞回曲线达到峰值承载力之后的下降段斜率也越大。

对比图 2(c)中的四个滞回曲线可以发现,当改变 SLCW 的剪跨比时,剪跨比越大,滞回曲线的峰值荷载越小。组合剪力墙的剪跨比由 1.8 提高到 2.0、2.2、2.4 时峰值荷载分别下降了 14%、33%、39.5%。

对比图 2(d)中的四个滞回曲线可以发现,当改变 SLCW 中内填的混凝土强度等级时,混凝土强度提高可以在一定程度上提高组合墙的极限承载力,混凝土强度等级从 C30 提高到 C40、C50、C60 时峰值荷载分别提高了 8.25%、12.5%、13.85%。

4.2. 骨架曲线

图 3 为 SLCW 试件在钢板厚度、轴压比、剪跨比及混凝土强度发生改变时的对比试件骨架曲线图。表 2 为各试件骨架曲线的特征值和延性表。从图 3 可见,四组曲线形状相似,均呈倒 S 形,具有明显的弹性、屈服及破坏三个过程。限于篇幅,仅以 SLCW-1 试件为例进行说明。当组合剪力墙刚开始加载时,荷载与位移是线性变化的关系,为弹性破坏阶段;当加载位移 $\Delta = 15.43$ mm 之后骨架曲线有转折出现,骨架曲线的斜率不断减小,代表试件刚度在不断的减小,墙身的两侧钢板和两端的钢管相继变为屈服状态,此时试件进入弹塑性破坏阶段;当承载力达到峰值荷载后,墙身两侧钢板和轻骨料混凝土界面分离,截面组合效应减弱,钢板被发生撕裂破坏,骨架曲线呈现下降段,此时试件进入破坏阶段。

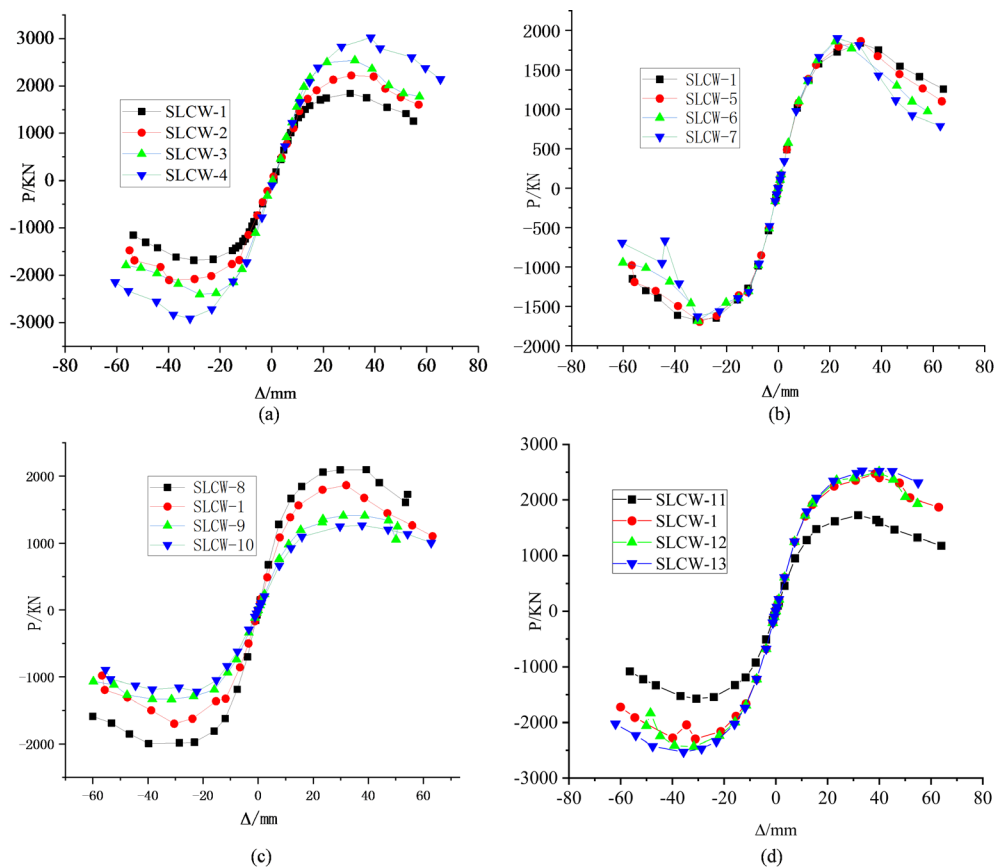


Figure 3. Skeletons curves with different parameters. (a) Different plate thickness; (b) Different axial compression ratios; (c) Different shear-span ratios; (d) Different concrete strength

图 3. 不同参数下的骨架曲线。(a) 不同钢板厚度; (b) 不同轴压比; (c) 不同剪跨比; (d) 不同混凝土强度

4.3. 骨架曲线特征值及延性

从骨架曲线可以确定组合剪力墙试件的初始刚度、承载力、屈服荷载及延性等参数。屈服点的确定方法主要有三种：几何作图法(Geometric Graphic)、R. Park 法(R. Park Method)、等能量法(Equivalent Elasto-Plastic Energy Method)。本文的屈服位移采用几何作图法，得相应的骨架曲线。

国内外学者一般采用延性系数 μ 来量化结构的延性特征，可以通过公式(4.1)来求结构的位移延性系数。

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{4.1}$$

Table 2. Eigenvalues and ductility coefficients of skeleton curves
表 2. 骨架曲线的特征值及延性系数

试件编号	屈服点		极限点		破坏点		延性系数
	Δ_y (mm)	P_y (KN)	Δ_{max} (mm)	P_{max} (KN)	Δ_u (mm)	P_u (KN)	
SLCW-1	15.43	1506.38	30.16	1758.62	43.62	1494.83	2.83
SLCW-2	17.87	1829.17	35.39	2158.40	52.36	1834.64	2.93
SLCW-3	19.51	2224.21	29.98	2468.77	58.02	2098.45	3.04
SLCW-4	21.13	2516.96	38.39	2933.17	66.17	2493.20	3.13
SLCW-5	16.11	1495.47	30.98	1780.19	41.52	1513.17	2.58
SLCW-6	15.96	1524.94	26.40	1773.49	35.09	1507.47	2.20
SLCW-7	16.54	1532.54	27.36	1795.98	35.30	1499.39	2.14
SLCW-8	14.73	1772.00	39.74	2044.91	39.53	1738.16	2.69
SLCW-9	17.05	1210.58	34.97	1369.98	50.20	1164.48	2.95
SLCW-10	17.31	1101.30	29.18	1240.99	55.68	1054.85	3.22
SLCW-11	17.88	1520.34	34.95	1689.21	52.54	1467.22	2.95
SLCW-12	18.48	2133.31	35.6	2458.54	53.92	2133.73	2.92
SLCW-13	19.44	2210.25	32.29	2503.86	59.63	2147.64	3.25

结合图 3 和表 2，可以得到以下结论：

- 1) 随着钢板厚度的增加，SLCW 的抗剪承载力也将逐渐提高。其他条件相同的情况下，钢板厚度由 6 mm 提高到 8 mm、10 mm、12 mm 峰值荷载分别提高了 23%、41%、67%；屈服位移分别提高了 15.1%、26.5%、36.4%，屈服荷载分别提高了 21.6%、48.0%、67.4%。
- 2) 随着 SLCW 的轴压比的增加，SLCW 的承载力略有增加。其他条件相同的情况下，轴压比从 0.35 提高到 0.40、0.45、0.5 时，极限承载力分别提高了 1.12%、1.13%、3.01%，对承载力的改善不是很明显；SLCW 的屈服位移分别增加了 4.4%，3.5%、7.2%。
- 3) 随着剪跨比的增加，组合墙体的极限承载能力随之降低。其他条件相同的情况下，剪跨比由 1.6 提高到 1.8、2.0、2.2 时峰值荷载分别下降了 14%、33%、40%；屈服位移分别提高了 4.8%、15.8%、17.5%，屈服荷载分别降低了 15.1%、32.7%、37.9%。
- 4) 随着混凝土强度的提高，SLCW 的承载力也随之提高。其他条件相同的情况下，轻骨料混凝土强度从 LC30 提高到 LC40、LC50、LC60 时峰值荷载分别提高了 8.25%、12.5%、13.85%。

4.4. 退化刚度

SLCW 组合墙体在同次加载过程中平均荷载与平均位移的比值为环线刚度，环线刚度是用来表示结构刚度退化程度的数值[20]，刚度退化根据公式(4.2)计算。

$$K_j = \frac{\sum_{i=1}^n P_j^i}{\sum_{i=1}^n u_j^i} \quad (4.2)$$

式中： K_j ——环线刚度，单位为 KN/mm； P_j^i ——第 j 级加载位移时多次加载循环的总荷载； u_j^i ——第 j 级加载位移时多次加载循环的总位移。

图 4 为各试件在不同参数影响下的刚度退化曲线。由图 4 可见，随着加载位移的提高，各试件的环线刚度出现逐渐下降的趋势，而且随着位移的增大环线刚度的下降速度逐渐放缓，刚度退化曲线慢慢变平缓。

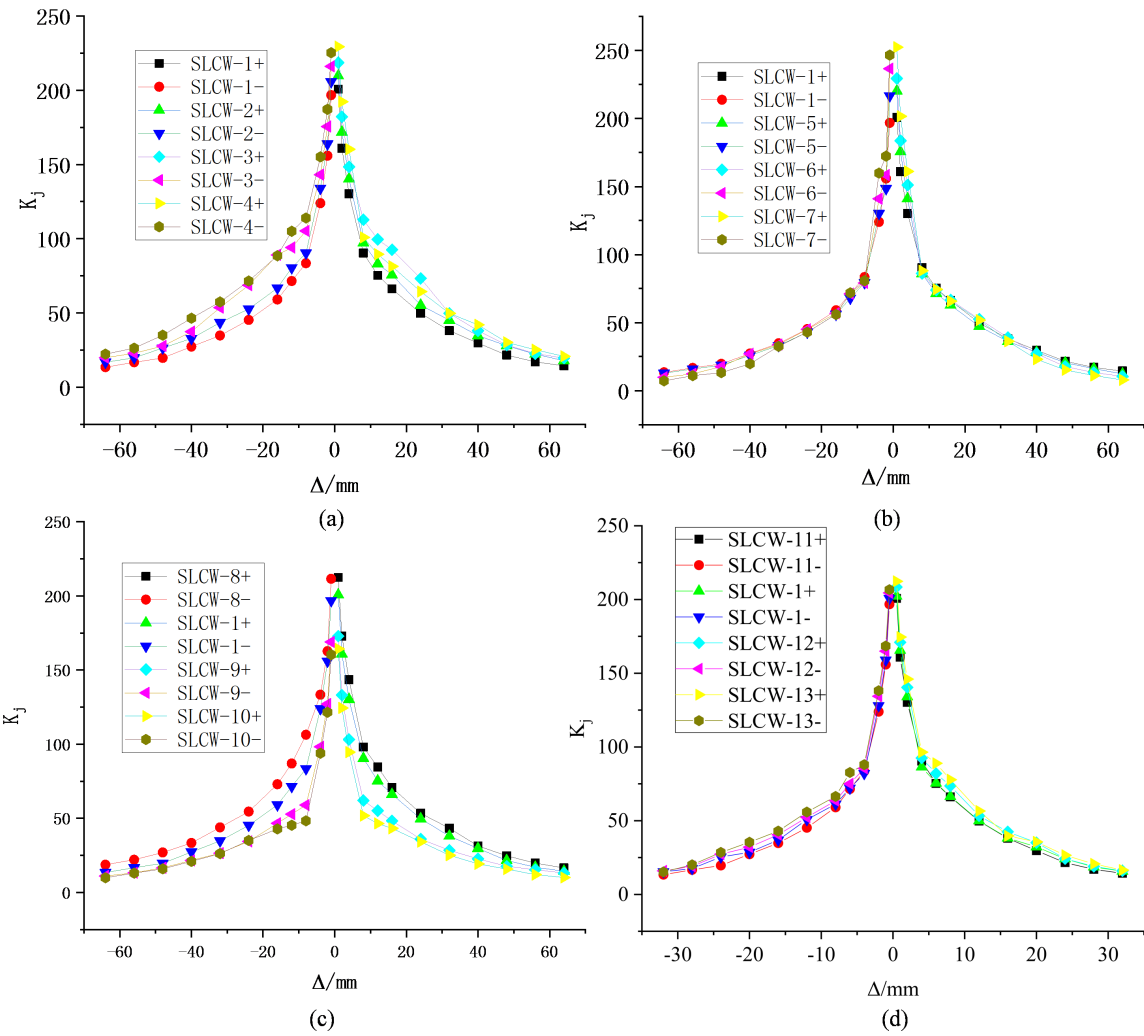


Figure 4. Stiffness degradation curves under different parameters. (a) Different plate thickness; (b) Different axial compression ratios; (c) Different shear-span ratios; (d) Different concrete strength

图 4. 不同参数下的刚度退化曲线。(a) 不同钢板厚度；(b) 不同轴压比；(c) 不同剪跨比；(d) 不同混凝土强度

由图 4(a)可以看出钢板的厚度越大, 试件的初始刚度就越大, 随着钢板厚度的增加后期刚度退化程度逐渐减小, 说明增大钢板厚度可以有效减小试件加载过程中的刚度退化。

由图 4(b)可以看出轴压比越大的试件初始刚度越大, 并且轴压比越大的试件随着加载位移的增大刚度下降越快, 等到加载后期轴压比试件较大的试件的刚度略小于轴压比较小的试件。说明轴压比的提高不利于减小组合剪力墙的刚度退化。

由图 4(c)可以看出剪跨比越小的试件初始刚度越大, 并且剪跨比越小的试件随着加载位移的增大刚度下降越快, 等到加载后期剪跨比试件较大的试件的刚度略小于剪跨比较小的试件。

由图 4(d)可以看出轻骨料混凝土的强度越大, 试件的初始刚度就越大, 随着轻骨料混凝土强度增加后期刚度退化程度逐渐减小, 说明提高轻骨料混凝土强度可以有效减小试件加载过程中的刚度退化。

4.5. 耗能能力

国内外的学者针对结构的耗能能力做了很多研究, 引用累计耗能系数、等效粘滞阻尼系数 ζ_e 及能量耗散系数 E_n 等参数来量化结构的耗能能力[21], 由此可以对试件的耗能能力来进行综合评估。已完成循环加载的滞回环的总面积为累计耗能系数, 根据图 5 分解滞回环, ζ_e 及 E_n 的计算公式(4.3)、(4.4)。

$$\zeta_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (4.3)$$

$$E_n = \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (4.4)$$

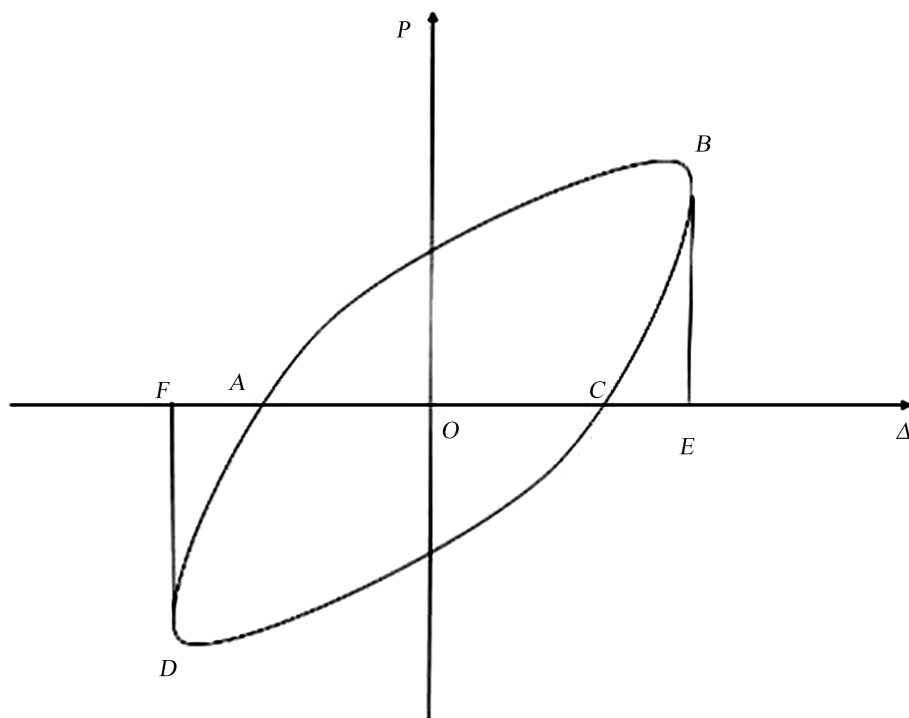


Figure 5. Diagram of the hysteresis loop
图 5. 滞回环图解

计算得到等效粘滞阻尼系数 ζ_e 、能量耗散系数 E_n 及累计耗能系数分别如图 6~8 所示。

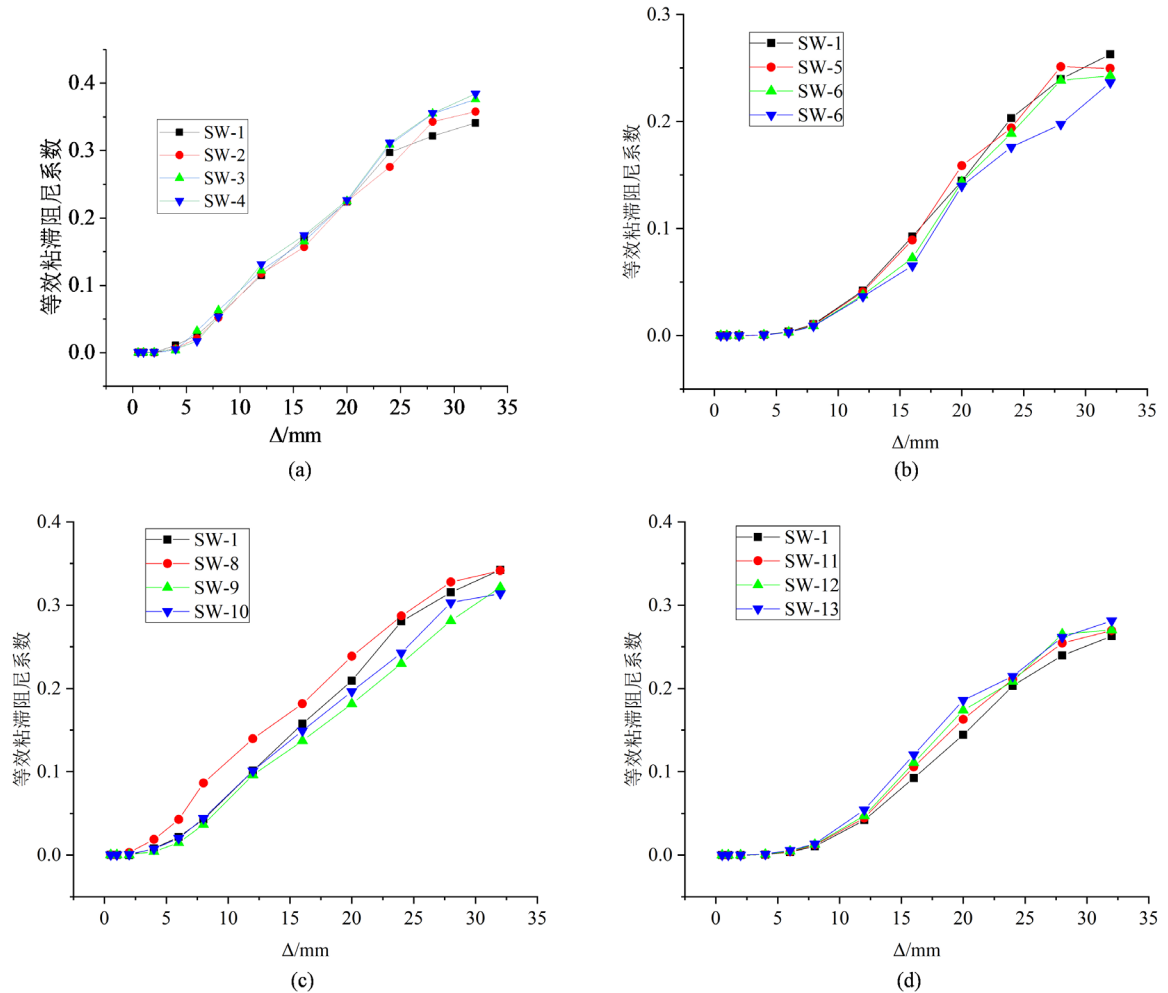
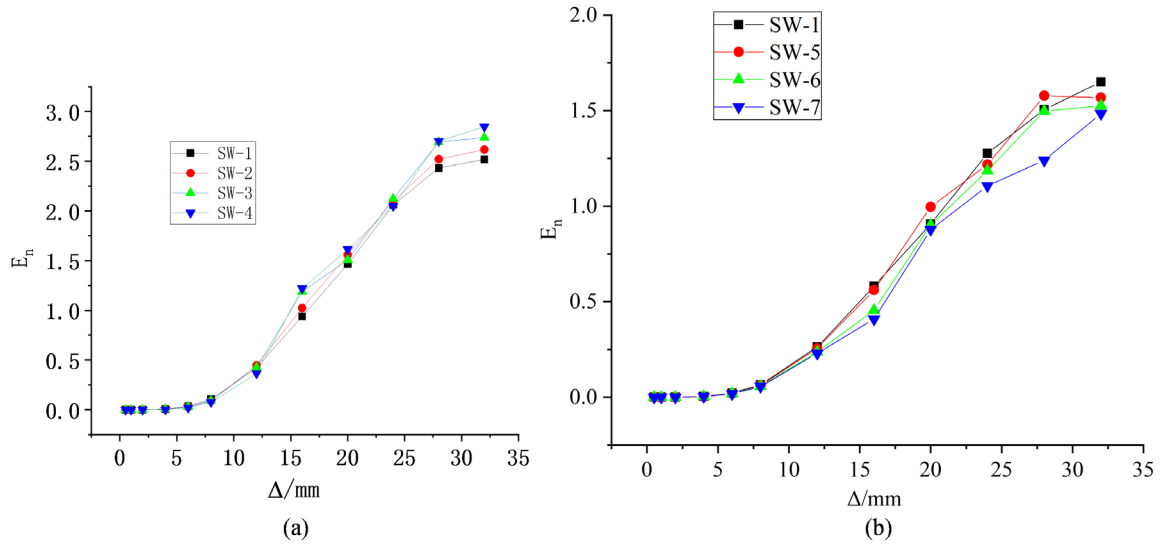


Figure 6. Comparison ζ_e and displacement. (a) Different plate thickness; (b) Different axial compression ratios; (c) Different shear-span ratios; (d) Different concrete strength
图 6. ζ_e 与位移的比较。(a) 不同钢板厚度; (b) 不同轴压比; (c) 不同剪跨比; (d) 不同混凝土强度



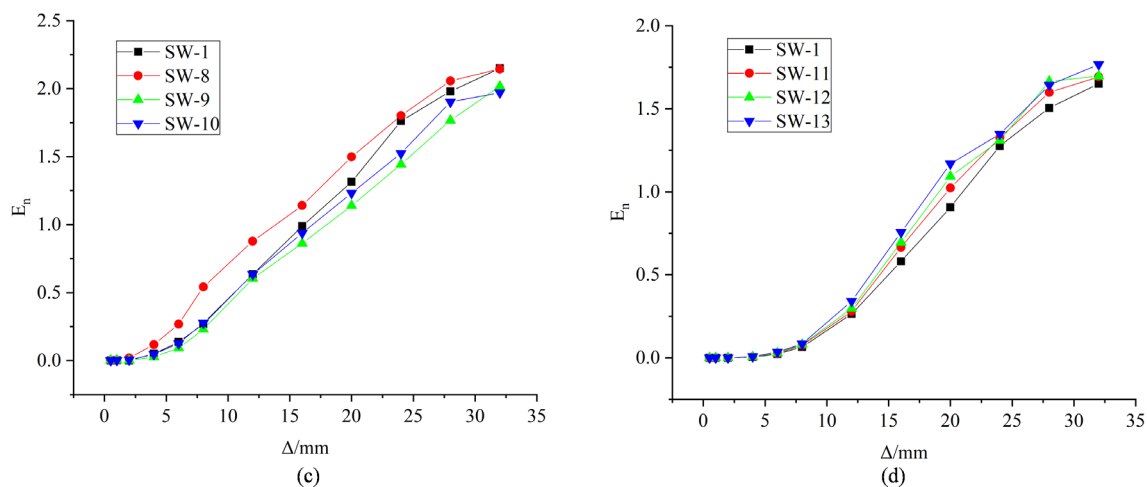


Figure 7. Comparison E_n and displacement. (a) Different plate thickness; (b) Different axial compression ratios; (c) Different shear-span ratios; (d) Different concrete strength

图 7. E_n 与位移的比较。(a) 不同钢板厚度; (b) 不同轴压比; (c) 不同剪跨比; (d) 不同混凝土强度

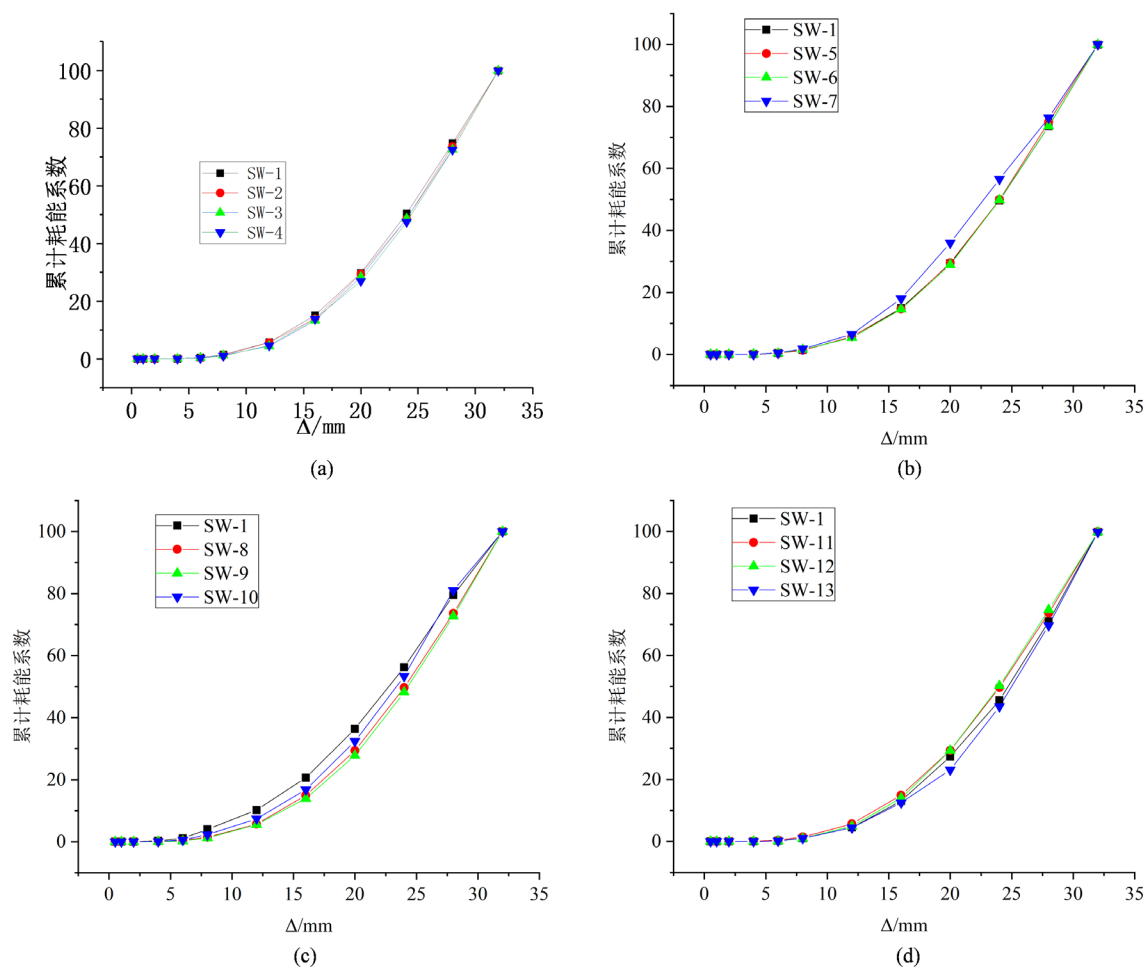


Figure 8. Comparison of cumulative energy consumption and displacement. (a) Different plate thickness; (b) Different axial compression ratios; (c) Different shear-span ratios; (d) Different concrete strength

图 8. 累计耗能与位移比较。(a) 不同钢板厚度; (b) 不同轴压比; (c) 不同剪跨比; (d) 不同混凝土强度

从图6和图7的几组对比试件的 ζ_e 和 E_n 变化曲线,发现两者变化规律基本相同,可以得到以下的规律。

1) 对比不同钢板厚度的试件可以发现,在同一加载位移下钢板的厚度越大, ζ_e 和 E_n 越大。表明提高组合墙体钢板的厚度可以有效的提高组合墙体的耗能能力。

2) 对比不同轴压比的试件可以发现,在同一加载位移下轴压比越大,等效粘滞阻尼系数 ζ_e 和 E_n 越小,并且随着加载位移的增大,这种差距越来越大。说明轴压比组合剪力墙的耗能有很大的影响,并且影响比较大,轴压比越大的试件耗能越差。

3) 对比不同剪跨比的试件可以发现,在同一加载位移下剪跨比越大,等效粘滞阻尼系数 ζ_e 和 E_n 越大,并且随着加载位移的增大,这种差距越来越小,并且趋于稳定。说明剪跨比对组合剪力墙的耗能有很大的影响,并且影响比较大,剪跨比越大的试件耗能越好。

4) 对比不同混凝土强度的试件可以发现,在同一加载位移下混凝土强度越大,等效粘滞阻尼系数 ζ_e 和 E_n 越大,并且随着加载位移的增大,这种差距越来越小,并且趋于稳定。说明混凝土强度对组合剪力墙的耗能有较大的影响,并且影响比较大,混凝土强度越大越大的试件耗能越好。

从图8的几组对比试件的累计耗能变化曲线,可以得出以下规律。

1) 对比不同钢板厚度的试件可以发现,各试件的累计耗能在相同加载位移下基本相同,且随着加载位移的增大,累计耗能能力基本成抛物线上升。

2) 对比不同轴压比的试件可以发现,各试件的累计耗能在相同加载位移下基本相同,但SW-7在加载中期的累计耗能能力优于其他试件,说明提高轴压比对耗能能力的提高有一定作用。

3) 对比不同剪跨比的试件可以发现,在同一加载位移下剪跨比越大,试件累计耗能越大,并且随着加载位移的增大,这种差距越来越小,并且趋于稳定。说明剪跨比对组合剪力墙的耗能有很大的影响,并且影响比较大,剪跨比越大的试件耗能越好。

4) 对比不同混凝土强度的试件可以发现,在同一加载位移下混凝土强度越大,试件累计耗能越大,说明混凝土强度对组合剪力墙的耗能有较大的影响,并且影响比较大,混凝土强度越大越大的试件耗能越好。

5. 结论

本论文通过考虑轻骨料混凝土强度、钢板厚度、轴压比、剪跨比等因素,利用有限元软件计算,分析了滞回曲线、骨架曲线、退化刚度、耗能能力等,得到了以下主要结论。

1) 随着钢板厚度的增加,组合剪力墙的抗剪承载力提升非常显著。在实际设计过程中增加钢板厚度是提升双层钢板抗剪承载力的有效途径,同时钢板厚度的提升对组合墙体的延性、抗侧刚度极其耗能也有提升,因此设计过程中应尽量提升钢板的厚度,但也要考虑经济效应。

2) 当轴压比提高时,组合剪力墙的抗震承载力略微下降,但组合剪力墙的延性会显著下降,所以为了保证其抗震性能,在实际过程中应该严格控制其轴压比。

3) 随着剪跨比的增加,组合墙体的承载力有明显的下降,而结构延性有所提高。

4) 随着混凝土强度的增加,组合墙体的承载力和延性等都有提升,但提高不太明显。

基金项目

西安市科技局计划项目(2020KJRC0124)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T380-2015 钢板剪力墙技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

- [2] 聂建国, 陶慕轩, 樊健生, 卜凡民, 胡红松, 马晓伟, 李盛勇, 刘付钧. 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.
- [3] Clubley, S.K., Moy, S.S.J. and Xiao, R.Y. (2003) Shear Strength of Steel-Concrete-Steel Composite Panels. Part II—Detailed Numerical Modelling of Performance. *Journal of Construction Steel Research*, **59**, 795-808. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00062-7)
- [4] Hossain, K.M.A. and Wright, H.D. (2004) Performance of Double Skin-Profiled Composite Shear Walls-Experiments and Design Equations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **31**, 204-217. <https://doi.org/10.1139/l03-087>
- [5] 雷升祥, 张艳青, 刘勇, 韩石, 宋玉香, 尤龙飞, 符瑞安. 双钢板-混凝土组合构件面外性能研究综述[J]. 建筑结构, 2021.
- [6] 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.
- [7] 中华人民共和国国家标准. JGJ12-2006 轻骨料混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [8] 徐晓霖, 唐九如. 钢筋轻骨料混凝土框架节点的试验研究[J]. 南京工学院学报, 1988(6): 72-79.
- [9] 魏慧. 大尺寸高强轻骨料混凝土深弯构件受剪性能研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2018.
- [10] 刘喜, 吴涛, 魏慧, 刘伯权, 邢国华. 高强轻骨料混凝土深弯构件受剪模型分析[J]. 工程力学, 2015, 32(12): 108-116.
- [11] 丁路通. 双钢板-交错栓钉-混凝土组合剪力墙抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.
- [12] 马恺泽, 刘伯权, 鄢红良, 张巧巧. 高轴压比双层钢板-高强混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 218-224.
- [13] Chen, L., Mahmoud, H., Tong, S.M., *et al.* (2015) Seismic Behavior of Double Steel Plate-HSC Composite Walls. *Engineering Structures*, **102**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.017>
- [14] 郝婷玥, 曹万林. 双钢板混凝土组合剪力墙轴压承载力研究[J]. 工程科学学报, 2017, 39(11): 1765-1773.
- [15] 朱立猛, 周德源. 板混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 结构工程师, 2013, 29(4): 153-158.
- [16] 石亦平. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [17] 张建文, 曹双寅. 结构轻骨料混凝土应力-应变曲线研究[J]. 建筑科学, 2008, 24(11): 83-85.
- [18] 梁兴文, 叶艳霞. 混凝土结构非线性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [19] 叶列平, 孙海林, 陆新征. 高强轻骨料混凝土结构: 性能、分析与计算[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [20] 王天稳. 土木工程结构试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006: 28-29.
- [21] Fajfar, P. and Fischinger, M. (1988) N2—A Method for Nonlinear Seismic Analysis of Regular Buildings. *Proceedings 9th World Conference Earthquake Engineering*, Tokyo, Vol. 5, 111-116.