

文章编号:1673-9469(2025)03-0015-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.03.003

## LYP 波纹双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究

袁朝庆,李国洋,房宽光,张浩,李月

(东北石油大学 土木建筑工程学院,黑龙江 大庆 163318)

**摘要:** 为研究低屈服点波纹双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能,运用 ABAQUS 构建有限元模型。以钢板形式(波纹钢板和平钢板)、钢材强度等级(低屈服点钢材和普通钢材)为主要参数进行对比研究,结果表明,波纹钢板试件相比平钢板试件屈服荷载最高提升了 11.28%,峰值荷载最高提升了 11.29%,延性最高提升了 18.68%,并且波纹钢板试件的刚度退化较为平缓,耗能能力更强,抗震性能更优;低屈服点钢材试件相比普通钢材试件,虽然更早达到屈服,承载能力有一定下降,但延性得到极大提升,最高提升 67.63%,最低提升 44.22%,耗能表现更为优异,抗震性能更好。结构的改变和材料的改变均能提高试件的抗震性能,且两者结合更能使试件的抗震性能得到更大提升。

**关键词:** 波纹钢板;低屈服点钢材;组合剪力墙;抗震性能

**中图分类号:** TU398.2; TU311.3

**文献标识码:** A

## Study on Seismic Performance of LYP Corrugated Double-Plate Concrete Composite Shear Walls

YUAN Zhaoqing, LI Guoyang, FANG Kuanguang, ZHANG Hao, LI Yue

(School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

**Abstract:** To study the seismic performance of low-yield point corrugated double-layer steel plate concrete composite shear walls, a finite element model was constructed using ABAQUS. The main parameters considered were the form of the steel plates (corrugated steel plates and flat steel plates) and the strength grade of the steel (low-yield point steel and ordinary steel). The results showed that the yield load of the corrugated steel plate specimens was 11.28% higher than that of the flat steel plate specimens, the peak load was 11.29% higher, and the ductility was 18.68% higher. Moreover, the stiffness degradation of the corrugated steel plate specimens was more gradual, and their energy absorption capacity was stronger, resulting in better seismic performance. Compared with the ordinary steel specimens, the low-yield point steel specimens reached yield earlier and had a certain decrease in bearing capacity, but their ductility was greatly improved, with the maximum improvement being 67.63% and the minimum improvement being 44.22%. Their energy absorption performance was more outstanding, and their seismic performance was better. In other words, both the structural change and the material change can improve the seismic performance of the specimens, and the combination of the two can achieve a greater improvement in the seismic performance of the specimens.

**Key words:** corrugated steel plate; low yield point steel; composite shear wall; seismic performance

双钢板混凝土组合剪力墙由于可以弥补高层及超高层建筑中传统钢筋混凝土组合剪力墙厚墙体、大自重、弱变形的缺点<sup>[1-2]</sup>,而被应用于一些地

标性超高层建筑中,如广州周大福金融中心<sup>[3]</sup>、盐城广播电视塔<sup>[4]</sup>等。但其性能仍存在一些局限性,为此国内外学者开展一系列研究,袁朝庆等<sup>[5-6]</sup>对

收稿日期:2024-03-22

基金项目:黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020E018)

第一作者:袁朝庆(1970—),男,黑龙江依安人,博士,教授,从事工程结构抗震方向的研究。

双钢板混凝土组合剪力墙端部和底部进行加强, 以此改善其易发生屈曲的缺点, Gallocher 等<sup>[7]</sup>首次提出波纹双钢板混凝土组合剪力墙, 通过改变钢板形状从而改善构件性能, 王凯杰等<sup>[8-9]</sup>对这两种墙体做了对比分析, 结果表明, 波纹双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能更优, 延性和耗能能力更强, 应用前景广阔。

低屈服点钢材 (Low Yield Point, LYP) 是一种高性能钢材, 其伸长率是普通钢材的 2~3 倍且相比普通钢材延性更大, 黄育琪等<sup>[10-12]</sup>对低屈服点单钢板剪力墙进行研究, 结果表明, 应用此种钢材的剪力墙滞回曲线饱满, 滞回环面积大, 耗能能力优异, 延性优秀, 抗震性能出色。现有文献主要将 LYP 应用于单钢板剪力墙, 本文将 LYP 应用于钢板混凝土组合剪力墙中, 把波纹钢板这种高性能结构形式与低屈服点钢材这种高性能材料相结合, 探究其抗震性能。

## 1 有限元模型建立

### 1.1 材料本构

对于本文所建立的剪力墙试件, 由于其内部的混凝土被外部钢板包裹, 因此采用韩林海<sup>[13]</sup>提出的方钢管混凝土本构模型, 如图 1(a) 所示, 该模型考虑了外部钢管对内部混凝土的约束作用, 结果更准确,  $\xi$  为约束效应系数, 见式 (1):

$$\xi = A_s f_y / A_c f_{ck} \quad (1)$$

式中:  $f_y$  为钢材屈服应力, MPa;  $f_{ck}$  为混凝土轴心抗压强度标准值, MPa;  $A_s$  为钢管横截面面积,  $\text{mm}^2$ ;  $A_c$  为混凝土横截面面积,  $\text{mm}^2$ 。

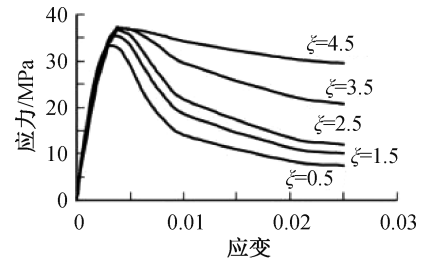
钢材本构关系选用双折线模型<sup>[14]</sup>, 如图 1(b) 所示, 其中  $f_y$  和  $\varepsilon_y$  为屈服应力和屈服应变;  $f_u$  和  $\varepsilon_u$  为极限应力和极限应变;  $E_0$  为弹性模量, MPa;  $E_s$  为硬化刚度,  $\text{N}/\text{mm}^2$ , 其值为  $0.01E_0$ 。钢材选用 Q235 钢。

### 1.2 单元选取与接触类型

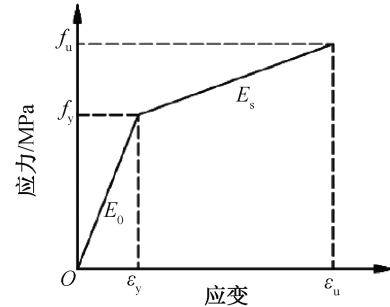
混凝土和钢材的模拟均采用了 C3D8R 单元, 对于两者之间的接触关系, 采用表面与表面的接触方式。在法向接触上, 设置“硬接触”, 这意味着在钢板与混凝土相互作用时, 它们可以发生分离, 但不允许相互穿透。而在切向接触上, 采用“罚接触”的方式, 并参考了文献<sup>[15]</sup>的研究结果, 将摩擦系数设定为 0.6。

### 1.3 加载方式与边界条件

模型计算设置 step1 和 step2 两个分析步, 试



(a) 混凝土本构关系



(b) 钢材本构关系

图 1 材料本构关系

Fig. 1 Constitutive relationship of materials

件的底部采用完全固定的约束方式, 即  $U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ , 设置参考点与试件加载梁的左侧面和顶面分别耦合, 并将加载梁与试件绑定。在 step1 中, 在加载梁顶面耦合点施加水平向下的恒力荷载; 在 step2 中, 在加载梁左侧面耦合点施加水平循环往复荷载, 加载制度如图 2 所示。

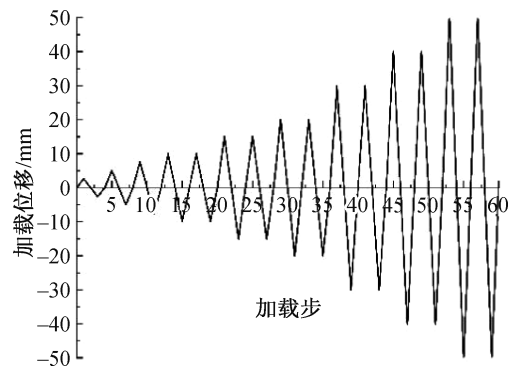


图 2 加载制度

Fig. 2 Loading system

## 2 有限元模型对比验证

本文选取天津大学李一康<sup>[16]</sup>的 4 个波纹双钢板组合剪力墙相关试验模型之一 D1, 该试件模型尺寸参数分别为高 2 000 mm、宽 1 000 mm、厚 100 mm、钢板厚度 3 mm, 材料选用 C40 混凝土, Q235 钢材, 据此建立了相对应的有限元模型 D1-1 (图 3)。

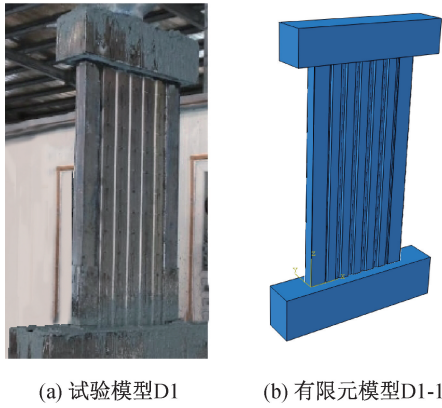


图 3 李一康试验模型验证示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model verification of Li Yikang's test

将有限元模拟得到的数据进行处理,形成滞回曲线和骨架曲线,与试验结果的对比图如图 4、图 5 所示。

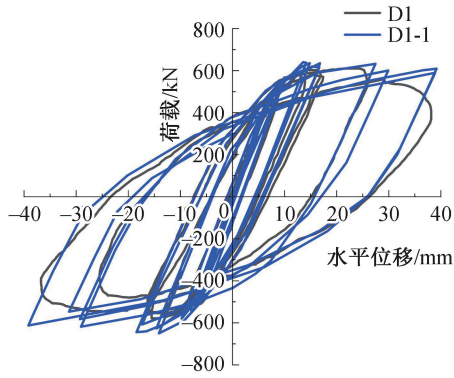


图 4 滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curves

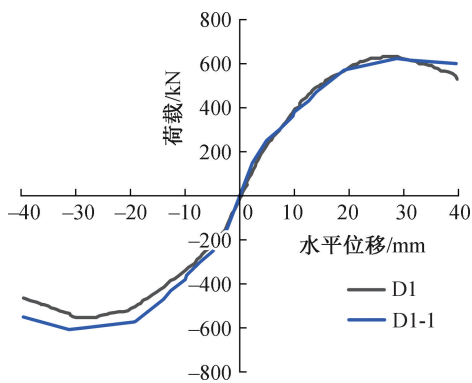


图 5 骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curves

由图 4 和图 5 可知,有限元模型和试验滞回曲线大体一致,有限元模型滞回曲线更加光滑饱满,峰值荷载略有提升;骨架曲线形状相近,尤其是在弹性阶段,骨架曲线几乎重合,初始刚度相差不大,到达屈服阶段后,出现一定偏差,但轨迹仍大体一致。

由表 1 可知,有限元模拟结果与真实试验相比,屈服位移误差为 2.67%,屈服荷载误差为 5.31%,峰值位移误差为 3.02%,峰值荷载误差为 4.69%,最大误差不超过 6%,说明有限元模型建模分析具有一定的合理性。

表 1 结果对比

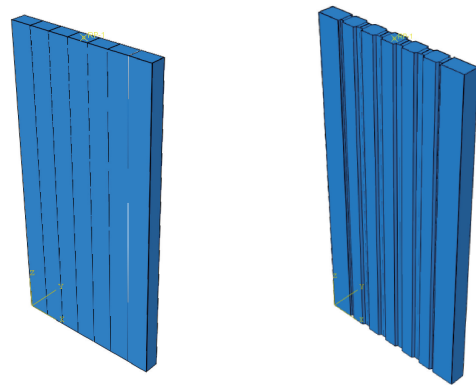
Tab. 1 Comparison of results

试件	屈服位移 /mm	屈服荷载 /kN	峰值位移 /mm	峰值荷载 /kN
D1	8.60	329.00	27.80	600.00
D1-1	8.83	346.47	28.64	628.15

### 3 LYP 波纹双钢板组合剪力墙抗震性能分析

#### 3.1 试件设计

为探究低屈服点钢材对波纹双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能的影响,选取常见屈服强度为 100、160 和 225 MPa 的三种低屈服点钢材和普通钢材 Q235,设计了 4 片不同钢材强度的平钢板混凝土组合剪力墙和 4 片不同钢材强度的波纹钢板混凝土组合剪力墙试件进行对比试验,建立模型如图 6 所示。



(a) 双钢板混凝土组合剪力墙 (b) 波纹双钢板混凝土组合剪力墙

图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

建模方式与上一节建模方法相同,为精简建模工作,把加载梁和基础梁省去,在组合剪力墙模型分析中,在试件顶部的中心位置设置了一个参考点 RP1,并使整个模型顶部表面与该参考点耦合,确保力的传递和位移的一致性。在 RP1 上施加了代表结构顶部所受的竖向荷载以及循环往复水平位移。各试件参数如表 2 所示,其中 DSS 指平钢板混凝土组合剪力墙,CSS 指波纹钢板混凝土组合剪力墙。

表 2 试件参数表

Tab. 2 Test specimen parameters

试件编号	高度/mm	宽度/mm	厚度/mm	轴压比	钢材强度	混凝土强度
DSS1	2 000	1 000	100	0.2	Q235	C30
DSS2	2 000	1 000	100	0.2	LYP100	C30
DSS3	2 000	1 000	100	0.2	LYP160	C30
DSS4	2 000	1 000	100	0.2	LYP225	C30
CSS1	2 000	1 000	100	0.2	Q235	C30
CSS2	2 000	1 000	100	0.2	LYP100	C30
CSS3	2 000	1 000	100	0.2	LYP160	C30
CSS4	2 000	1 000	100	0.2	LYP225	C30

### 3.2 有限元模型抗震性能分析

#### 3.2.1 滞回曲线分析

通过对 8 片组剪力墙试件施加水平低周循环往复位移,得到各试件滞回曲线见图 7。滞回曲线是结构在拟静力试验下所得的荷载与位移之

间关系的曲线。这一曲线能够有效地展示结构在经历循环往复的荷载作用时能量耗散的能力。具体而言,滞回曲线的形状越饱满,意味着试件在受力过程中展现出了更强的能量耗散能力,进而反映出更为卓越的抗震性能。由图 7 可知,试件滞

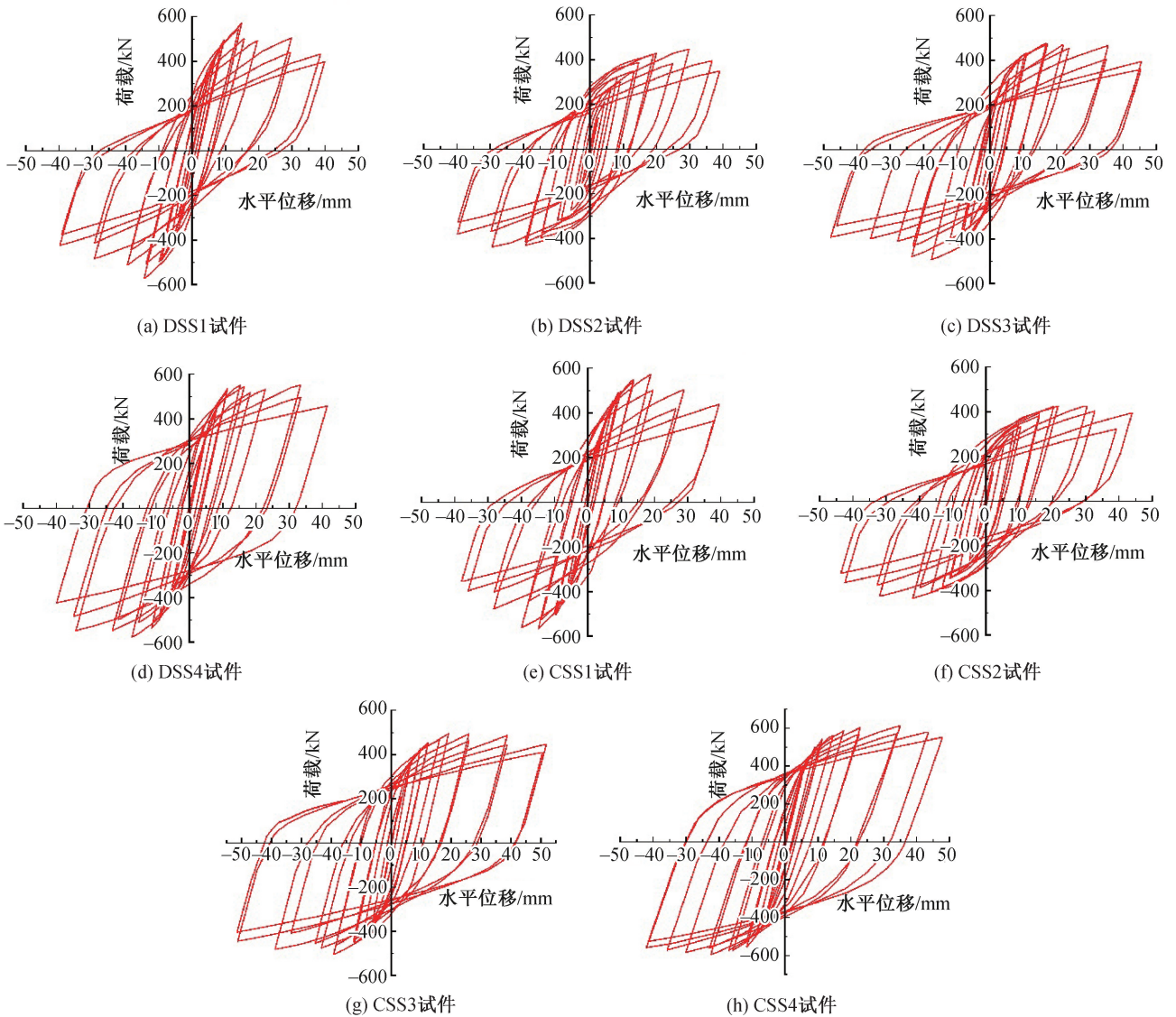


图 7 滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves

回曲线整体呈梭形,低屈服点试件 DSS2-4 和 CSS2-4 相比普通钢材试件 DSS1 和 CSS1,滞回曲线更加饱满,试件耗能能力更强。虽然钢材强度的减小导致峰值荷载有所降低,但水平荷载下降速率明显变缓,试件延性提高。波纹钢板试件 CSS1-4 相比平钢板试件 DSS1-4,滞回曲线更加饱满,滞回环面积有所提升,耗能能力提高,水平荷载下降速率略有减小,且峰值荷载也得到一定提升。

### 3.2.2 骨架曲线分析

骨架曲线是各级滞回环峰值荷载的包络线。骨架曲线对比图见图 8,由图 8(a)可知,骨架曲线可大致分为弹性、塑性和破坏阶段。在初始弹性阶段,各试件骨架曲线比较接近,曲线基本吻合。之后在塑性阶段,CSS 波纹钢板试件的峰值荷载相比 DSS 平钢板试件有所提升,曲线下降速率有所降低。由图 8(b)和图 8(c)可知,由于钢材强度的不同,相比普通钢材试件,低屈服点钢材试件先发生屈服,但曲线下降速率明显降低,且极限位移更大,说明低屈服点试件延性更好,尤其是低屈服点钢材 LYP160 的极限位移最大,性能最好。

### 3.2.3 承载能力分析

承载能力是评价结构强度和结构抗震性能的重要指标,本文采用“割线刚度法”,即极限荷载取峰值荷载 85%时所对应的值,各试件承载力特征点的有限元结果如表 3 所示。

由表 3 可知,相比平钢板试件 DSS1-4,波纹钢板试件 CSS1-4 屈服荷载和峰值荷载均有所提高,屈服荷载分别提高了 3.06%、11.28%、2.56% 和 7.47%,峰值荷载分别提高了 0.24%、5.31%、4.34% 和 11.29%。对于普通钢材试件 DSS1,钢板类型由平钢板变为波纹钢板,试件 CSS1 屈服荷载只提升了 3.06%,峰值荷载只提升了 0.24%;而对于低屈服点钢材试件 DSS2-4,钢板类型由平钢板变为波

表 3 各试件承载能力的有限元结果

Tab. 3 Finite element results of load bearing capacity of each specimen

试件	屈服荷载/kN	峰值荷载/kN	极限荷载/kN
DSS1	460.20	570.09	484.58
DSS2	314.95	424.37	360.72
DSS3	316.98	474.21	403.08
DSS4	387.53	551.06	468.40
CSS1	474.29	571.45	485.74
CSS2	350.49	446.91	379.88
CSS3	325.10	494.77	420.55
CSS4	423.93	613.30	521.31

纹钢板,试件 CSS2-4 屈服荷载最高提升了 11.28%,峰值荷载最高提升了 11.29%。由此可以看出,相比使用普通钢材的波纹钢板混凝土组合剪力墙,使用低屈服点钢材的波纹钢板混凝土组合剪力墙承载能力提升更为显著。将低屈服点钢材这种高性能材料与波纹钢板这种高性能结构组合在一起可以更好地发挥两者的特性,达到叠加的效果。

### 3.2.4 变形与延性分析

延性作为衡量结构塑性变形能力的关键指标,其数值是通过极限位移与屈服位移的比值来计算的。各试件变形能力的有限元结果如表 4 所示。

表 4 各试件变形能力的有限元结果

Tab. 4 Finite element results of deformation capacity of each specimen

试件	屈服位移 /mm	峰值位移 /mm	极限位移 /mm	延性
DSS1	10.23	14.89	32.21	3.15
DSS2	8.24	29.76	37.46	4.55
DSS3	8.92	32.84	44.24	4.96
DSS4	9.60	33.40	40.47	4.28
CSS1	9.26	18.90	32.01	3.46
CSS2	7.98	30.41	43.12	5.40
CSS3	8.36	31.62	48.53	5.80
CSS4	9.02	32.47	46.27	5.13

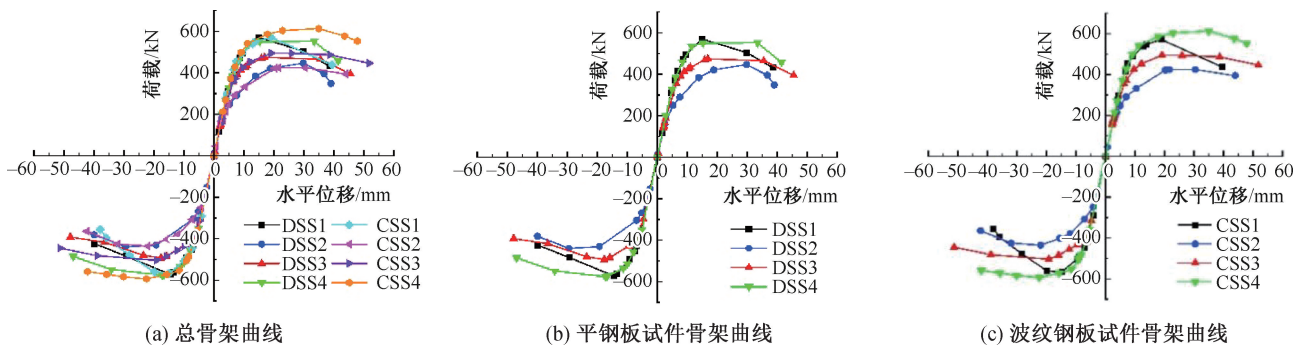


图 8 骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curves

由表4可知,相比平钢板试件 DSS1-4,波纹钢板试件 CSS1-4 延性均有所提升,分别提升了 9.84%、18.68%、16.94%和 19.86%。对于普通钢材试件 DSS1,钢板类型由平钢板变为波纹钢板,试件 CSS1 延性只提升了 9.84%;而对于低屈服点钢材试件 DSS2-4,钢板类型由平钢板变为波纹钢板,试件 CSS2-4 延性最高提升了 19.86%。由此可以看出,波纹钢板对试件的延性提升较为明显,且低屈服点波纹钢板试件提升幅度更大,二者组合在一起的提升效果更为显著。相比平钢板试件 DSS1,钢材类型由普通钢材变为低屈服点钢材,试件 DSS2-4 延性均有提升,分别提升了 44.44%、57.46%和 35.87%。相比波纹钢板试件 CSS1,试件 CSS2-4 延性同样均有提升,分别提升了 56.07%、67.63%和 44.22%,波纹钢板试件的提升幅度均大于平钢板试件,由此可以看出,无论是平钢板还是波纹钢板,使用低屈服点钢材对试件的延性提升尤为明显,而波纹钢板的提升幅度更大。这也进一步说明,波纹钢板和低屈服点钢材组合在一起的提升效果更为显著。

### 3.2.5 刚度退化分析

在循环往复荷载的作用下试件的刚度会随着

水平荷载的增加而逐渐降低。这一过程可以通过刚度退化曲线来展现。具体来说,刚度退化曲线反映了刚度  $k$  随着加载循环  $n$  的递增而发生的变化,即每次加载循环所对应的峰值荷载与峰值位移的比值(图9)。

由图9(a)可知,初始阶段刚度的大小与钢材强度相关,钢材强度越大,初始刚度越大,且随着钢材强度的增加,刚度退化速度越来越慢。由图9(b)和图9(c)可知,刚度退化大致可分为三个阶段,初始阶段钢板和混凝土共同作用且施加的水平位移较小,刚度下降较为缓慢;第二个阶段,平钢板试件刚度出现骤降,可能是因为该阶段在水平位移荷载不断增大的过程中,钢板逐渐发生屈曲,同时混凝土也遭受了破坏,这种破坏现象导致了结构的刚度急速下降。而波纹钢板试件得益于其比较优异的结构,刚度退化较为平缓,未出现骤降的现象;第三个阶段,刚度下降速度变缓,这是由于钢板已发生屈曲,底部一定高度的混凝土已被破坏,试件的承载能力变弱。综上所述,波纹钢板整体刚度退化平缓,更加符合现实中高抗震性能结构的要求。

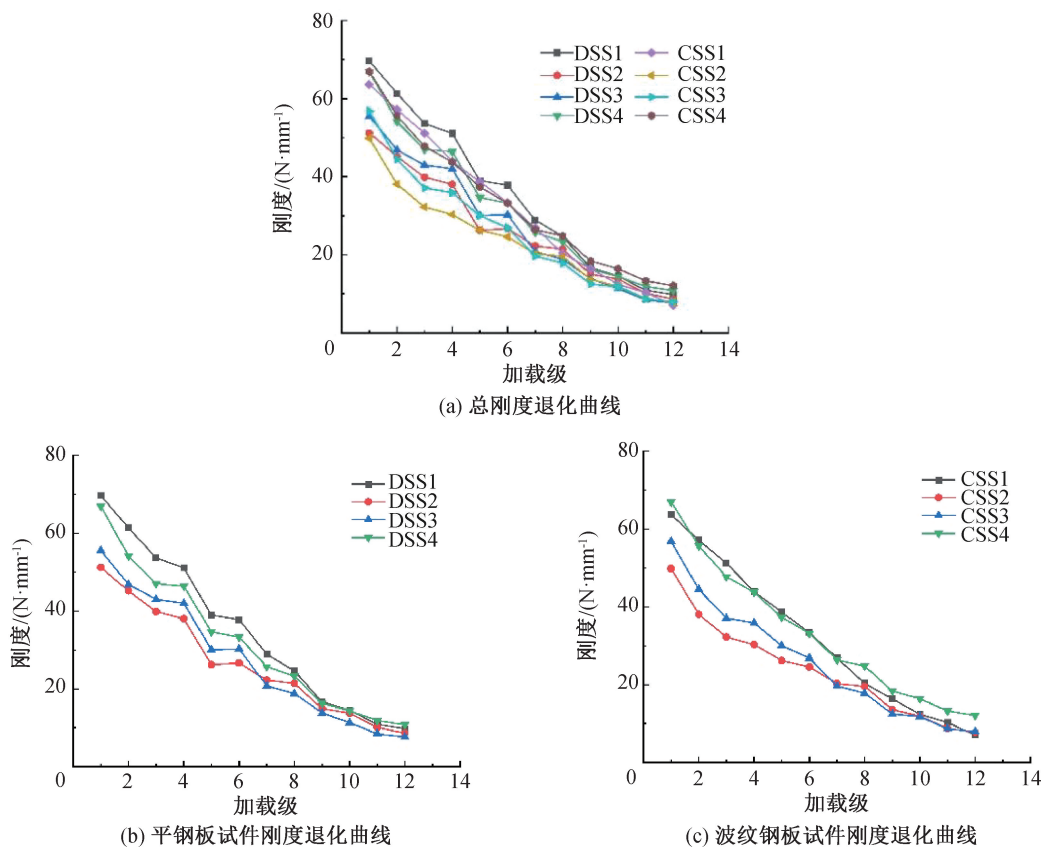


图9 刚度退化曲线

Fig. 9 Stiffness degradation curves

### 3.2.6 耗能能力分析

耗能能力是指结构在地震作用下对能量吸收和耗散的能力,结构在地震作用下耗散的能量越多,耗能能力越高,越有利于提高结构整体的抗震性能。耗能能力通常可以用等效粘滞系数、能量耗散系数、累计耗能来表示,为了更加直观地体现低屈服点高性能材料与波纹钢板高性能结构的优势,本文选用累计耗能作为结构的耗能能力指标,累计耗能对比图如图 10 所示。

由图 10(a)可知,同样钢材强度情况下,得益于波纹钢板的结构性优势,波纹钢板的耗能能力均大于平钢板。由图 10(b)和图 10(c)可知,低屈服点钢材试件相比普通钢材试件整体耗能能力有明显提高。普通钢材试件累计耗能大致可分为平缓上升、快速上升、再次平缓上升三个阶段。初始阶段由于水平位移较小,承载力较小,单个滞回环的面积也较小,故累计耗能上升较为平缓;第二个阶段水平位移增大,承载力增大,单个滞回环面积也逐渐增大,故累计耗能开始快速上升;第三个阶段由于钢板屈曲,混凝土被破坏,试件的承载力开始下降,单个滞回环面积减小,最后累计耗能逐渐趋于平缓。而低屈服点钢材钢板由于钢板先发生

屈服,之后一直在发挥作用,且低屈服点钢材延性更好,故其累计耗能只经历了平缓上升、快速上升两个阶段,耗能能力更好,其中 LYP160 的耗能能力最佳。

## 4 结论

1) 相比平钢板试件,不同钢材强度的波纹钢板试件屈服荷载和峰值荷载均有所提高,屈服荷载最高提高了 11.28%,峰值荷载最高提高了 11.29%,而试件延性也同样有所提升,最高提升了 18.68%。并且波纹钢板试件的刚度退化较为平缓,耗能能力更强,抗震性能更优,说明波纹钢板相对于平钢板各项性能都更加优异。

2) 相比普通钢材试件,低屈服点钢材试件承载能力虽然有一定下降,但得益于低屈服点钢材伸长率是普通钢材的 2~3 倍,其达到峰值荷载后,骨架曲线下降速度变缓,极限位移变大,试件延性得到极大提升,最高提升 67.63%,最低提升 44.22%,二者刚度退化速率大致相同,低屈服点钢材试件耗能表现更为优异,抗震性能更好。

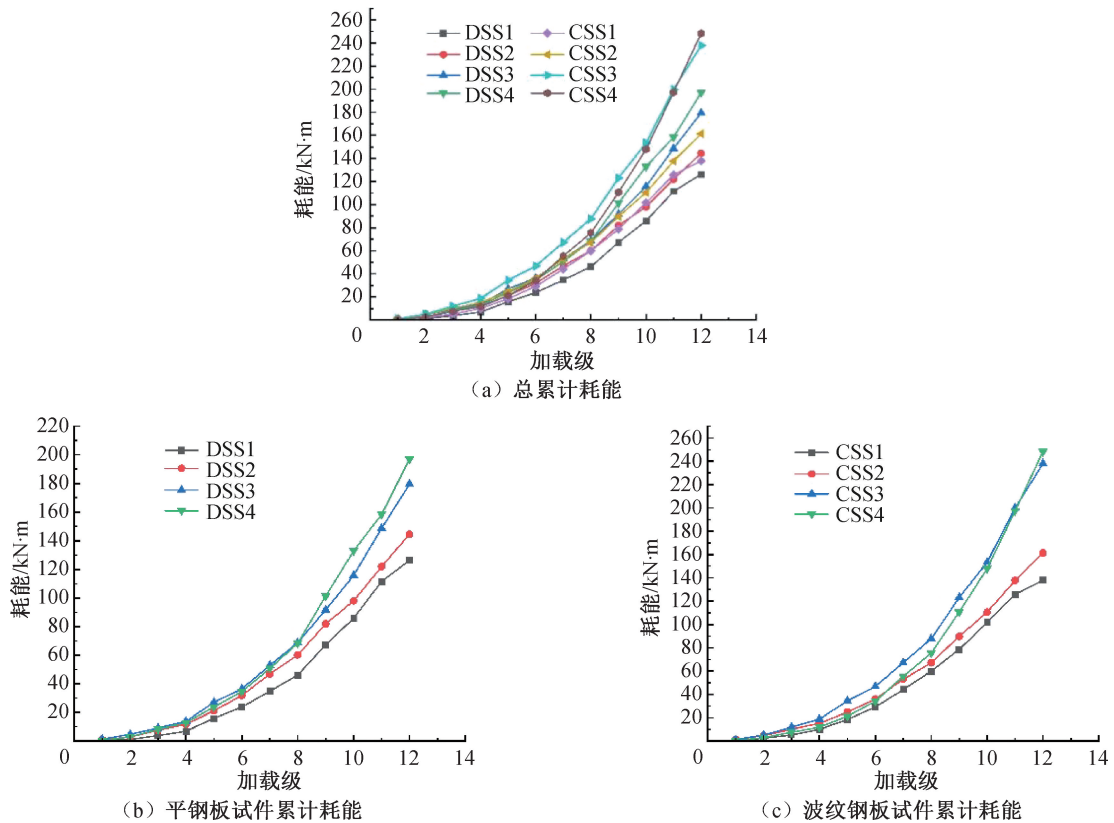


图 10 累计耗能

Fig. 10 Cumulative energy consumption

3)将低屈服点钢材和波纹钢板组合在一起的组合剪力墙,可以更好地发挥两者的高性能特点,各项性能的提升都更为显著,达到叠加的效果。

#### 参考文献:

- [1] HUANG S, HUANG Y, HE A, et al. Experimental study on seismic behaviour of an innovative composite shear wall[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 148: 165-179.
- [2] VARMA A H, MALUSHTA S R, SENER K C, et al. Steel-plate composite (SC) walls for safety related nuclear facilities: Design for in-plane forces and out-of-plane moments[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 269: 240-249.
- [3] 侯胜利,刘永策,赵宏. 广州东塔内嵌双层钢板高强混凝土组合剪力墙的设计与施工[J]. *建筑结构*, 2017,47(14):74-79.
- [4] CHEN L, MAHMOUD H, TONG S, et al. Seismic behavior of double steel plate-HSC composite walls[J]. *Engineering Structures*, 2015, 102: 1-12.
- [5] 代晓辉,袁朝庆,宋爽,等. 端部加强钢管-双钢板剪力墙抗震性能研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2021,38(4):7-15.
- [6] 袁朝庆,代晓辉,宋爽,等. 底部加强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)*, 2022,39(2):11-18.
- [7] GALLOCHER S C, WRIGHT H D. The Behavior of composite walling under construction and service loading[J]. *Journal Constructional Steel Research*, 1995, 35(3): 257-273.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 黄育琪. 低屈服点钢板剪力墙力学性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
- [11] 吴群. 低屈服点钢板剪力墙结构基于性能的抗震设计方法研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2016.
- [12] 卫星,周林君,李刚. 低屈服点波形钢板剪力墙减震耗能性能数值分析[J]. *西南交通大学学报*, 2023,58(3):546-554.
- [13] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 3版. 北京:科学出版社,2016.
- [14] 王萌,石永久,王元清. 考虑累积损伤退化的钢材等效本构模型研究[J]. *建筑结构学报*, 2013,34(10): 73-83.
- [15] ZHANG Z T, LIU Y F. Concrete damaged plasticity model in ABAQUS[J]. *Building Structure*, 2011, 2: 229-231.
- [16] 李一康. 波纹双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能及设计方法研究[D]. 天津:天津大学,2020.

(责任编辑 周雪梅)