

文章编号:1008-1534(2025)02-0137-09

LYP160 低屈服点波纹双钢板混凝土组合 剪力墙抗震性能分析

袁朝庆^{1,2}, 李月¹, 李国洋¹, 张浩¹, 计静^{1,2}

(1. 东北石油大学土木建筑工程学院, 黑龙江大庆 163318; 2. 黑龙江省高校防灾减灾及防护工程重点实验室, 黑龙江大庆 163318)

摘要:为了更好地提升双钢板混凝土组合剪力墙的抗震性能,将新型 LYP160 低屈服点波纹双钢板替代平钢板应用于组合剪力墙结构,并以混凝土强度(C30、C40、C50 和 C60)、中低剪跨比(2.0、1.5 和 1.0)为主要参数,设计了 12 组试件,其中普通钢材试件、低屈服点钢材试件各 6 组。利用有限元软件建立新型 LYP160 低屈服点波纹双钢板组合剪力墙结构模型,通过绘制滞回曲线和骨架曲线,对 12 组试件进行承载能力和延性、刚度退化、耗能能力等抗震性能分析。结果表明:1)随着混凝土强度的增大,普通钢材试件和低屈服点钢材试件承载能力提高,延性有一定降低,耗能能力基本无变化,并且在相同混凝土强度下,低屈服点钢材延性比普通钢材延性好;2)随着剪跨比的减小,普通钢材试件和低屈服点钢材试件承载能力提升,延性略有下降,并且在相同剪跨比下,低屈服点钢材比普通钢材的延性最大提升 70.83%。研究证明了 LYP160 低屈服点钢材波纹双钢板混凝土组合剪力墙的承载能力、延性、刚度退化、耗能能力相较于普通试件均有显著提升,具有良好的抗震性能,并可为 LYP160 低屈服点钢材波纹双钢板混凝土组合剪力墙的应用提供理论参考。

关键词:复合结构;波纹钢板;组合剪力墙;LYP160 低屈服点钢材;抗震性能

中图分类号:TU398.2 文献标识码:A DOI: 10.7535/hbgykj.2025yx02005

Seismic performance analysis of LYP160 low-yield point corrugated double-steel concrete composite shear wall

YUAN Zhaoqing^{1,2}, LI Yue¹, LI Guoyang¹, ZHANG Hao¹, JI Jing^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Heilongjiang Provincial University Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation and Protection Engineering, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: In order to better improve the seismic performance of the double-steel concrete composite shear wall, a new LYP160 low-yield point corrugated double-steel plate was proposed to replace the flat steel plate in the composite shear wall structure, and 12 groups of specimens were designed with concrete strength (C30, C40, C50 and C60) and medium and low shear span ratios (2.0, 1.5 and 1.0) as the main parameters, including 6 groups of ordinary steel specimens and 6 groups of low-yield steel specimens. The finite element software was used to establish a new LYP160 low-yield point corrugated double-

收稿日期:2024-07-08;修回日期:2024-11-30;责任编辑:王海云

基金项目:黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020E018)

第一作者简介:袁朝庆(1970—),男,黑龙江依安人,教授,博士,主要从事工程结构抗震方面的研究。

E-mail:646231773@qq.com

袁朝庆,李月,李国洋,等. LYP160 低屈服点波纹双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能分析[J]. 河北工业科技, 2025, 42(2): 137-145.

YUAN Zhaoqing, LI Yue, LI Guoyang, et al. Seismic performance analysis of LYP160 low-yield point corrugated double-steel concrete composite shear wall[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2025, 42(2): 137-145.

steel plate composite shear wall structure model, and by drawing hysteretic curves and skeleton curves, the seismic performance of 12 groups of specimens, including their bearing capacity and ductility, stiffness degradation and energy dissipation capacity was analyzed. The results show that: 1) With the increase of concrete strength, the bearing capacity of ordinary steel specimens and steel specimens with low-yield point increases, the ductility decreases to a certain extent, and the energy dissipation capacity basically does not change. Under the same concrete strength, the ductility of steel with low-yield point is better than that of ordinary steel. 2) With the decrease of the shear-span ratio, the bearing capacity of ordinary steel specimens and low-yield point steel specimens increases, and the ductility decreases slightly. Under the same shear-span ratio, the ductility of steel with low-yield point is increased by 70.83% compared with that of ordinary steel. The study proves that the bearing capacity, ductility, stiffness degradation and energy dissipation capacity of LYP160 low-yield point steel corrugated double-steel plate concrete composite shear wall are significantly improved compared with ordinary specimens, and have good seismic performance, which can provide theoretical reference for the application of LYP160 low-yield point steel corrugated double-steel plate concrete composite shear wall.

Keywords: composite structure; corrugated steel plate; composite shear wall; LYP160 low-yield point steel; seismic performance

双钢板-混凝土组合剪力墙常用平钢板作为外层钢板,但由于平钢板的面外抗弯刚度低,容易发生弹性屈曲变形^[1-2],影响结构的承载力及延性^[3-4]。为确保双钢板混凝土组合剪力墙具备良好的抗震性能,通常要求外层钢板的屈服先于弹性屈曲发生^[5-6]。由于波纹钢板具有特殊的几何构造,面外抗弯刚度远大于平钢板^[7],将波纹钢板应用于双钢板-混凝土组合剪力墙中,可增强外层钢板的弹性屈曲性能,减少连接件用量及人工安装成本,降低施工周期及工程造价。国内学者对双波纹钢板混凝土组合剪力墙开展了广泛研究,如:张冯霖^[8]、唐际宇^[9]通过精细化的数值模拟与实验验证,揭示了双波纹钢板混凝土组合剪力墙在多种加载模式下的破坏模式与能量耗散路径。他们详细阐述了如何通过调整波纹形状、钢板厚度、混凝土强度等级等关键参数,来有效提升墙体的承载效率和抗震韧性。RAFIEI等^[10-11]通过试验发现将自密实混凝土(self-consolidating concrete, SCC)和工程水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)作为核心混凝土材料,可以显著提高剪力墙的抗剪承载力和延性。由于SCC具有良好的流动性和填充能力,因此它能够更好地与波纹钢板协同工作,减少内部空隙,从而提升整体结构的稳定性和耐久性。

低屈服点钢材(low yield point, LYP)包括LYP100、LYP160和LYP225,是理想的耗能材料,这些材料虽然在屈服强度上未超过Q235钢材,但它们的延展性显著高于普通钢材,延伸率可达普通钢材的2~3倍^[12-13]。LYP100屈服强度相对较低,在一些对承载能力要求较高的应用场景中的研究价值有限,而LYP225屈服强度较高,其性能表现过于“极端”。从韧性角度看,LYP160的韧性较为适中,与LYP100相比,它在承受一定冲击载荷时不容易

发生过度变形,而与LYP225相比,它又不会因为屈服强度过高而出现韧性急剧下降的情况,能够更好地吸收能量,减少结构在动态载荷下的破坏风险。因此,国内学者更多地关注这类材料的应用情况及其对结构性能的影响。卫星等^[14]建立低屈服点波纹钢板剪力墙有限元模型(corrugated steel plate shear wall, CSPSW),研究发现低屈服点CSPSW表现出更优的能量耗散能力和延性。研究成果为低屈服点波纹钢板组合剪力墙的组合方式提供了新思路。

低屈服点波纹双钢板混凝土组合剪力墙充分利用了钢材和混凝土的材料特性。双钢板通过连接件与混凝土紧密结合,形成一个整体的受力结构。在承受竖向荷载和水平荷载时,钢板主要承受拉力,混凝土主要承受压力,这种分工协作显著提高了剪力墙的承载能力和抗震性能。LYP160钢材具有较低的屈服点和良好的塑性变形能力,展现出优秀的能量耗散能力。故本文结合前人研究成果,将高性能波纹钢板与LYP160低屈服点钢材相结合,通过改变混凝土强度和剪跨比,开展LYP160低屈服点波纹双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究。

1 波纹双钢板组合剪力墙模型验证

1.1 模型的建立

依据李一康^[15]的试验,利用ABAQUS有限元软件建立与其相同的有限元模型W2-1,如图1a)所示。另制备波纹双钢板混凝土组合剪力墙试验模型W2,试件高度为2000mm,宽度为1000mm,截面厚度为100mm,钢板厚度为3mm,钢材强度等级为Q235,混凝土强度的等级为C40,如图1b)所示。为了确保波纹双钢板混凝土组合剪力墙模拟试验的准确性和真实性,模拟试件的底部采用完全固定的约束方式。试件逐级缓慢施加竖向荷载至目标值

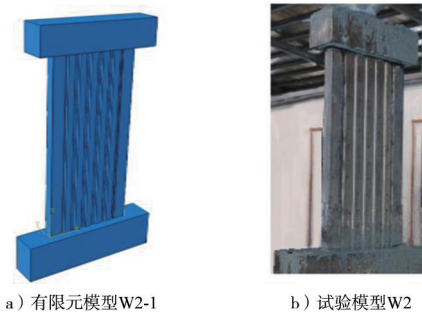


图 1 验证试验模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the verification test model

$N=1\ 000\ \text{kN}$, 竖向荷载施加至目标值后, 在整个水平荷载加载过程中保持恒定。水平荷载采用位移控制加载。试件在水平荷载作用下产生的位移与原始位置之间的夹角定义为位移角 θ 。试验前预估试件屈服时的位移角约为 0.5% , 因此, 在试件达到该状态前, 分别以位移角为 0.125% 、 0.250% 、 0.375% 3 级加载, 每级荷载循环 1 次, 以探究试件弹性变形阶段的表现; 随后分别按照位移角为 0.50% 、 0.75% 、 1.00% 、 1.50% 、 2.00% 、 2.50% 、 3.00% 进行加载, 每级荷载循环 2 次, 以探究试件非弹性变形阶段的表现。当试件水平荷载下降至峰值荷载的 85% , 或出现不宜继续加载的情况时, 即停止加载并结束试验。

1.2 数值模拟方法的验证

为检验数值模拟方法的有效性, 在试验工况下对 W2 墙体试件进行模拟, 并将模拟所得滞回曲线和骨架曲线与试验数据进行比较。由于滞回曲线能够反映出结构在循环往复荷载作用下的耗能能力, 而主要被用于分析评价结构的抗震性能。通常情况下, 滞回曲线的形状越饱满, 试件的耗能能力也就越强, 相应地, 其抗震性能也就越好。另外, 骨架曲线可以直观地反映结构的承载能力、刚度退化和耗能能力等重要性能, 所以验证滞回曲线和骨架曲线可以更加确保有限元模拟试验的合理性和准确性。

1.3 抗震性能的对比如

如图 2 所示, 有限元模型 W2-1 和试验模型 W2 的骨架曲线大体相近, 尤其是在弹性阶段, 有限元模型骨架曲线和试验模型骨架曲线几乎重合, 初始刚度相差不大, 到达屈服阶段后, 出现一定的误差, 但轨迹仍大体一致。如表 1 所示, 有限元模拟结果与试验结果的误差最大不超过 6% 。原因在于有限元模拟时忽略了材料本身的缺陷以及施工误差, 但两者骨架曲线接近一致, 说明模拟效果良好。有限元模拟分析得出的滞回曲线与试验滞回曲线吻合度较高(如图 2 所示), 说明有限元模型的建立和参数设置是合理有效的。

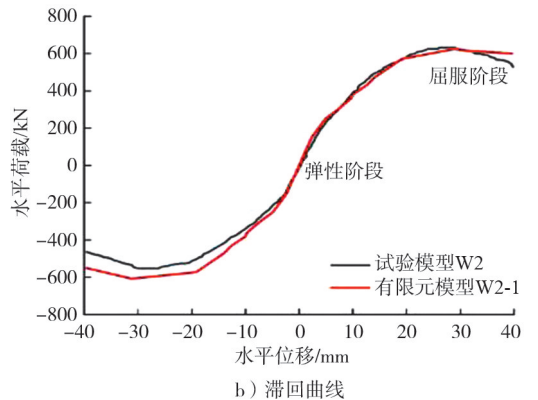
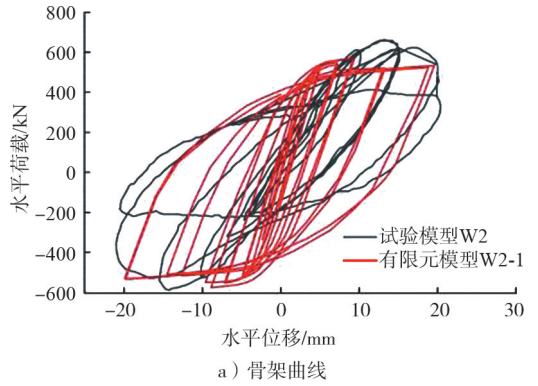


图 2 有限元模拟和试验的骨架曲线和滞回曲线对比

Fig. 2 Comparison of skeleton curve and hysteresis curve between finite element simulation and test

表 1 有限元模拟和试验的计算结果对比

Tab. 1 Comparison of calculation results from finite element simulation and experiments

模 型	屈服位移/ mm	屈服荷载/ kN	峰值位移/ mm	峰值荷载/ kN
W2	8.60	329.00	27.80	600.00
W2-1	8.83	346.47	28.64	628.15
误差/%	2.67	5.31	3.02	4.69

2 LYP160 低屈服点波纹双钢板混凝土组合剪力墙模型的建立

2.1 组合剪力墙模型的基本情况

本文研究不同混凝土强度、中低剪跨比对低屈服点波纹双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能的影响, 钢板厚度取 $3\ \text{mm}$, 轴压比为 0.2 。利用有限元软件 ABAQUS 建立不同混凝土强度和剪跨比的模型, 将 Q235 普通钢材波纹双钢板混凝土组合剪力墙和 LYP160 低屈服点波纹双钢板混凝土组合剪力墙作为对照组, 2 种钢材屈服强度分别为 $235\ \text{MPa}$ 和 $160\ \text{MPa}$ 。分别以混凝土强度为 C30、C40、C50、C60, 剪跨比为 2.0 、 1.5 、 1.0 进行组合, 选取 12 种波纹双钢板混凝土组合剪力墙试件(以下简称组合剪力墙试件)作为试验对象, 其具体参数根据

GB/T 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[16]定义,如表2所示。实际工程中,双钢板混凝土组合剪力墙的构建方式是将外围钢板与隔板组合成模具,再浇筑混凝土,这种结构设计使钢板与混凝土间产生相互作用力。为在ABAQUS软件中精准模拟该相互作用力,各表面之间设置为接触单元,底部采用完全固定的约束方式。同时采用位移控制加载方

式,将荷载施加于试件顶部,并在试件顶部设置了一个参考点RP1。混凝土和钢材均采用C3D8R单元,钢板和混凝土法向接触被设置为“硬接触”模型。由于切向接触,考虑到钢板和混凝土之间会存在摩擦,所以采用“罚接触”来模拟这种摩擦行为。其中摩擦系数取0.6,单元网格尺寸为40 mm。低屈服点波纹双钢板组合剪力墙的结构构造如图3所示。

表2 不同组合剪力墙试件的参数

Tab. 2 Parameters of different composite shear wall specimens

试件编号	高度/mm	宽度/mm	厚度/mm	钢板厚度/mm	钢材强度	混凝土强度	轴压比	剪跨比
S1	2 000	1 000	100	3	Q235	C30	0.2	2.0
S2	2 000	1 000	100	3	Q235	C40	0.2	2.0
S3	2 000	1 000	100	3	Q235	C50	0.2	2.0
S4	2 000	1 000	100	3	Q235	C60	0.2	2.0
S5	2 000	1 000	100	3	LYP160	C30	0.2	2.0
S6	2 000	1 000	100	3	LYP160	C40	0.2	2.0
S7	2 000	1 000	100	3	LYP160	C50	0.2	2.0
S8	2 000	1 000	100	3	LYP160	C60	0.2	2.0
S9	1 500	1 000	100	3	Q235	C30	0.2	1.5
S10	1 000	1 000	100	3	Q235	C30	0.2	1.0
S11	1 500	1 000	100	3	LYP160	C30	0.2	1.5
S12	1 000	1 000	100	3	LYP160	C30	0.2	1.0

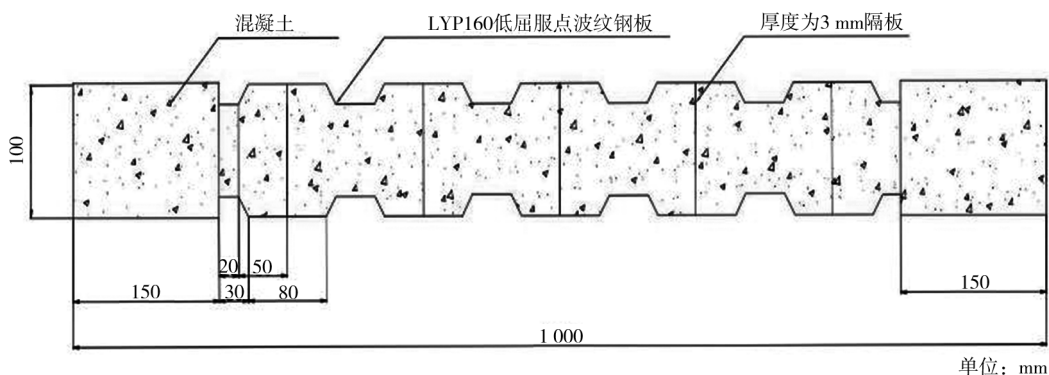


图3 低屈服点波纹双钢板组合剪力墙的结构构造图

Fig. 3 Structure diagram of low-yield point corrugated double-steel plate composite shear wall

2.2 材料本构的确定

2.2.1 钢材本构

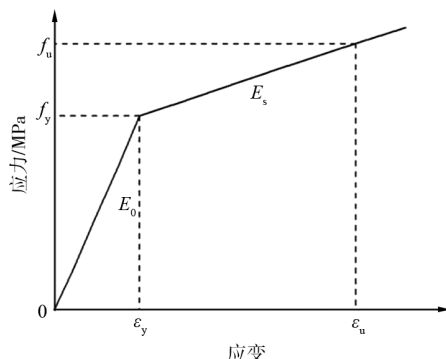
钢材本构关系选用双折线理想塑性模型^[17],如图4所示,即屈服前是理想弹性,屈服后到极限强度前的硬化刚度为钢材弹性模量的0.01。

2.2.2 混凝土本构

混凝土本构关系采用韩林海^[18]提出的本构模型,具体混凝土受压应力-应变表达式如式(1)所示:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1, \\ \frac{x}{\beta(x-1)^\eta + x}, & x > 1. \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中: } x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}; y = \frac{\sigma}{\sigma_0};$$



注: f_y 和 ε_y 分别为屈服应力和屈服应变; f_u 和 ε_u 分别为极限应力和极限应变; E_0 为弹性模量; E_s 为硬化刚度。

图4 钢材本构关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of steel constitutive relationship

$$\epsilon_0 = \epsilon_c + \left[1\ 330 + 760 \left(\frac{f_c}{24} - 1 \right) \right] \times \xi^{0.2} \times 10^{-6};$$

$$\epsilon_c = (1\ 300 + 12.5 f_c) \times 10^{-6};$$

$$\eta = 1.6 + \frac{1.5}{x};$$

$$\xi = \frac{\alpha f_y}{f_c}; \alpha = \frac{A_s}{A_c};$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{f_c^{0.1}}{1.35 \sqrt{1 + \xi}}, & \xi \leq 3, \\ \frac{f_c^{0.1}}{1.35 \sqrt{1 + \xi} (\xi - 2)^2}, & \xi > 3. \end{cases}$$

式中: f_y 为屈服应力; f_c 为混凝土抗压强度; A_s 为钢材截面面积; A_c 为混凝土截面面积; σ 为应力; α 为钢管混凝土截面; ξ 为约束效应系数; ϵ_0 为对应于峰值应力的应变; ϵ_c 混凝土抗压强度对应的应变; ϵ 为应变; x 表示为应变值; y 表示为应力值; σ_0 为混凝土的峰值应力; η 代表一个与约束效应系数 ξ 有关的函数,用于调整核心混凝土的应力-应变关系; β 为代表与约束效应系数 ξ 有关的参数,用于描述核心混凝土的塑性性能。

混凝土受拉应力应变表达式如式(2)所示。

$$y = \begin{cases} 1.2 - 0.2x^6, & x \leq 1, \\ \frac{x}{0.31f_t^2(x-1)^{1.7} + x}, & x > 1, \end{cases} \quad (2)$$

其中: $f_t = 0.26 \times f_{cu}^{\frac{2}{3}}$; $\epsilon_0 = 43.1 \times f_t \times 10^{-6}$ 。

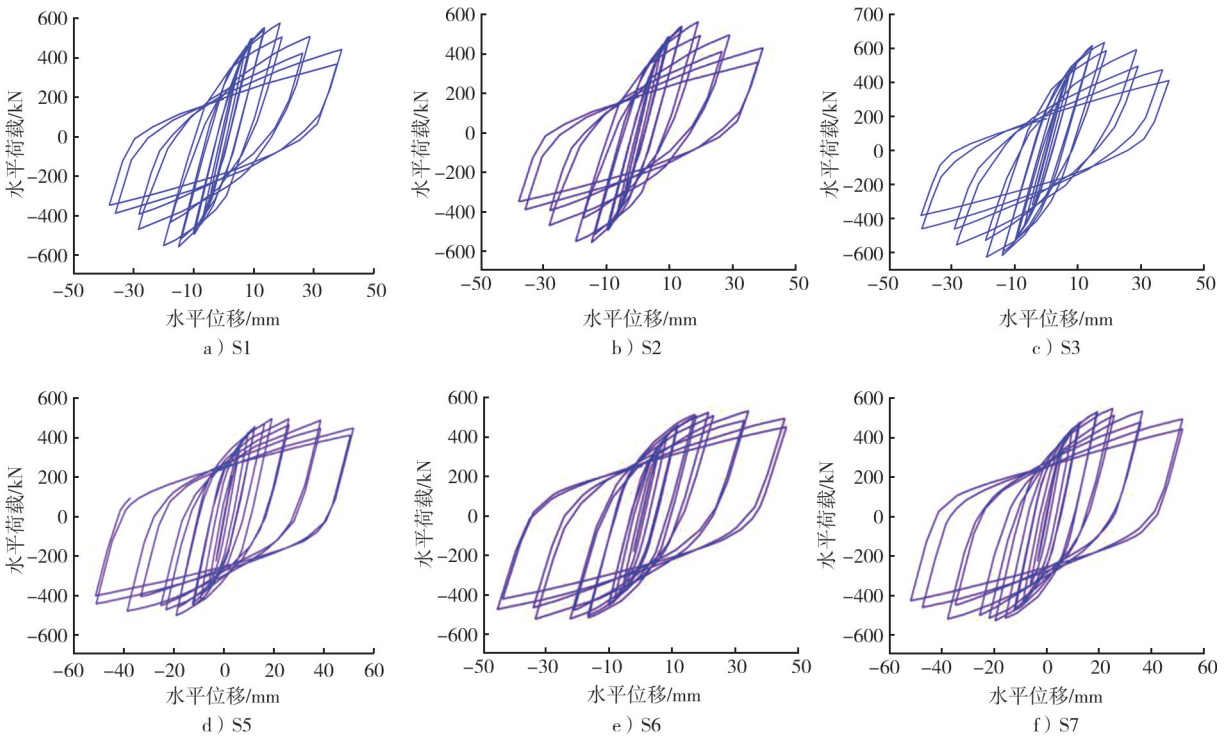


图 6 不同混凝土强度和钢材强度试件的水平荷载-水平位移滞回曲线对比

式中: f_t 为混凝土的抗拉强度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度。

针对表 2 中 12 种试件,利用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟,分为 2 个分析步骤:施加竖向荷载、循环往复的水平位移。组合剪力墙试件的有限元模型如图 5 所示。

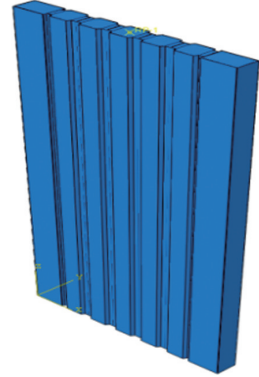


图 5 组合剪力墙试件的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of composite shear wall specimen

3 结果与分析

3.1 混凝土强度对抗震性能的影响分析

3.1.1 滞回曲线分析

图 6 给出了不同混凝土强度和钢材强度试件的水平荷载-水平位移滞回曲线对比。随着混凝土强度的增大,试件 S1、S2、S3、S5、S6、S7 的峰值荷载分别为

Fig. 6 Comparison of horizontal load-horizantal displacement hysteretic curves of specimens under different concrete strength and steel strength

571.45、591.09、618.68、494.77、531.27、548.78 kN。试件在屈服后进入弹塑性阶段，滞回环呈梭形且逐渐饱满，表明其具有较强的耗能能力和一定的弹性恢复能力。达到峰值荷载后，尽管荷载开始下降，但滞回环仍保持饱满，说明试件的刚度退化相对较慢，且残余变形逐渐增大。相同混凝土强度下，相对于普通钢材对照组试件，低屈服点钢材试件滞回环面积明显扩大，滞回环更加饱满，耗能能力更加优异。

3.1.2 骨架曲线分析

图7为不同混凝土强度和钢材强度试件的骨架曲线对比。

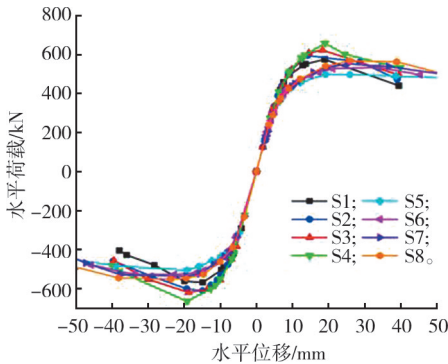


图7 不同混凝土强度和钢材强度试件的骨架曲线对比

Fig. 7 Comparison of skeleton curves of specimens with different concrete strength and steel strength

表3 不同混凝土强度和钢材强度试件承载能力的有限元分析结果

Tab. 3 Finite element results of bearing capacity of specimens with different concrete strength and steel strength

试件	钢材强度	混凝土强度	屈服荷载 σ_b /kN	峰值荷载 σ_{max} /kN	极限荷载 σ_u /kN
S1	Q235	C30	474.29	571.45	485.74
S2	Q235	C40	517.08	591.09	502.42
S3	Q235	C50	536.69	618.68	525.88
S4	Q235	C60	543.90	632.19	537.30
S5	LYP160	C30	325.10	494.77	420.55
S6	LYP160	C40	344.64	531.27	451.58
S7	LYP160	C50	361.05	548.78	464.46
S8	LYP160	C60	369.51	554.20	471.07

3.1.4 刚度退化分析

不同混凝土强度和钢材强度下试件的刚度退化曲线对比如图8所示。由图可知，随着混凝土强度的增加，普通钢材试件和低屈服点钢材试件的初始刚度分别最大提升了7.19%和9.11%。相同混凝土强度下，低屈服点钢材初始刚度较低，初始阶段下降斜率大，之后下降的斜率变小，最后刚度与普通钢材试件刚度大体一致，这是由于低屈服点钢材因其高延伸率和良好的延性，在屈曲后仍能发挥作用，有效延缓结构刚度的下降。同时，低屈服点钢材在循环加载下表现出较低的刚度退化速率，且其性能受

在弹性阶段S1—S8的骨架曲线比较接近，上升斜率相似，曲线基本吻合；在进入塑性阶段以后，对于不同强度的钢材试件，随着混凝土强度的增大，其峰值荷载均有所提高，最高达到了632.19 kN，等级为C60的混凝土比等级为C30的混凝土峰值荷载高出10.63%，说明混凝土强度对改善试件承载能力有一定作用。相同混凝土强度下，低屈服点钢材试件比普通钢材试件先发生屈服，但曲线下落速率明显小于普通钢材试件，且极限位移更大，说明低屈服点钢材试件延性更好。

3.1.3 承载能力和延性分析

不同混凝土强度和钢材强度下试件的承载能力的有限元分析结果如表3所示。由表可知，随着混凝土强度的增加，普通钢材试件和低屈服点钢材试件的屈服荷载和峰值荷载均有一定提高，延性有一定降低，刚度有一定提升，耗能能力基本上没有变化。普通钢材试件屈服荷载最高提升了14.68%，峰值荷载最高提升了10.63%，延性最大降低了15.32%；低屈服点钢材试件屈服荷载最高提升了13.66%，峰值荷载最高提升了12.01%，延性最大降低了25.52%。由此可以看出，增大混凝土强度可以增大结构的承载能力，但同时也会导致结构延性的降低，尤其是对于低屈服点钢材试件而言，这种影响更为明显。因此，在设计时需要综合考虑承载能力和延性之间的平衡，以确保结构的安全性和适用性。

混凝土强度变化的影响较小。

3.1.5 耗能能力分析

不同混凝土强度和钢材强度下试件的累计耗能曲线对比如图9所示。由图可知，改变混凝土强度对普通钢材和低屈服点钢材试件的耗能能力均影响不大。相同混凝土强度下，低屈服点钢材的累计耗能最高超出普通钢材试件10.38%，说明低屈服点钢材有着优异的耗能能力，这种特性使得低屈服点钢材在地震等动态荷载作用下，能够有效地耗散能量，减少结构的损伤，提高结构的抗震性能。

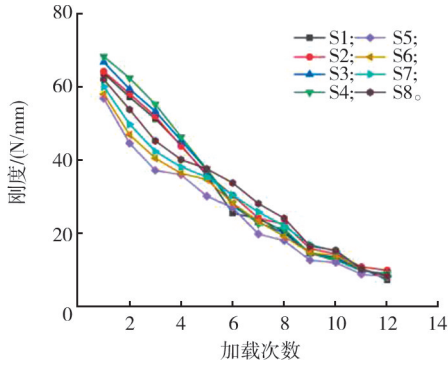


图 8 不同混凝土强度和钢材强度下试件的刚度退化曲线对比

Fig. 8 Comparison of stiffness degradation curves of specimens under different concrete strength and steel strength

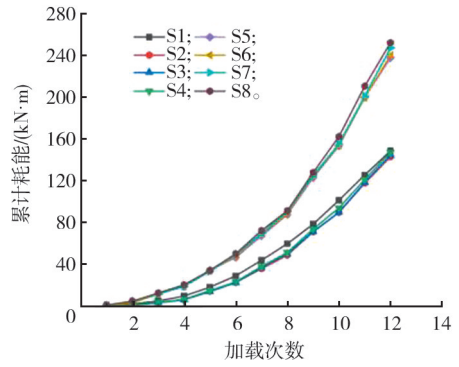


图 9 不同混凝土强度和钢材强度下试件的累计耗能曲线对比

Fig. 9 Comparison of cumulative energy dissipation curves of specimens with different concrete strength and steel strength

3.2 剪跨比对抗震性能影响分析

3.2.1 滞回曲线分析

图 10 为不同钢材强度试件在不同剪跨比(2.0、1.5、1.0)下的水平荷载-水平位移滞回曲线对比结果。随着剪跨比的减小,试件 S1、S5、S9、S10、S11、S12 的峰值荷载分别为 571.45、494.77、716.57、944.50、647.38、

853.70 kN,表明随着剪跨比的减小,试件的峰值荷载大幅度提升,承载能力提高,但到达峰值荷载后滞回曲线下降速率变大,极限位移减小。此外,低屈服点钢材试件在不同剪跨比下的滞回曲线表现出较好的饱满度,说明其在循环荷载作用下具有良好的能量耗散能力,这为提高结构的抗震性能提供了有力支持。

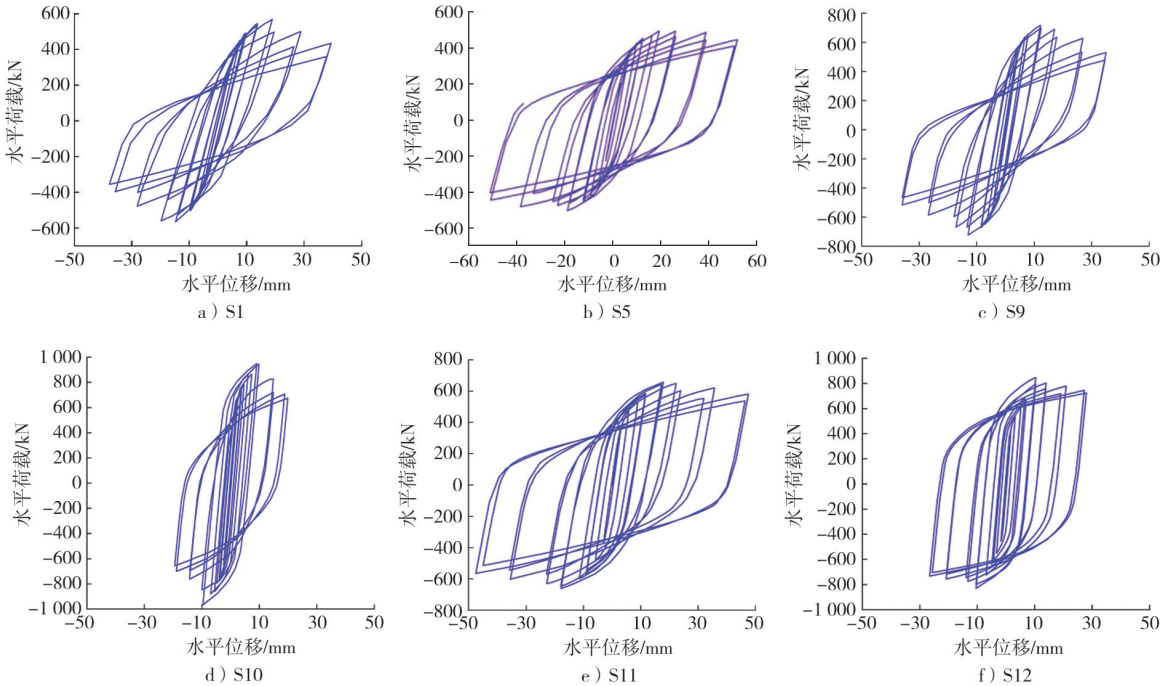


图 10 不同钢材强度试件在不同剪跨比下的水平荷载-水平位移滞回曲线对比

Fig. 10 Comparison of horizontal load-horizontal displacement hysteretic curves of steel specimens with different strength under different shear-span ratios

3.2.2 骨架曲线分析

图 11 为不同钢材强度试件在不同剪跨比下的骨架曲线对比结果。由图可知,在弹性阶段,各试件的骨架曲线差异不大,剪跨比越小,相同位移下荷载越大;进入塑性阶段,随着剪跨比减小,S10 试件峰值荷载最大提高了 72.54%,但峰值荷载下降

速率变大,极限位移减小,说明剪跨比越小,试件承载能力越强,但强度退化速度加快,此时钢板与混凝土出现黏结破坏,损伤开始累计;当钢板完全屈服时,骨架曲线达到峰值点;最后曲线进入下降阶段,当混凝土受损严重、钢板鼓曲时,试件发生破坏。

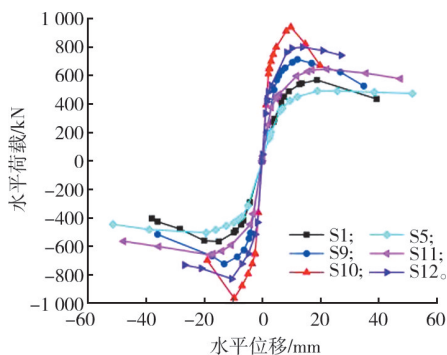


图 11 不同钢材强度试件在不同剪跨比下的骨架曲线对比

Fig. 11 Comparison of skeleton curves of different steel strength specimens under different shear-span ratios

3.2.3 承载能力和延性分析

不同钢材强度试件在不同剪跨比下的承载能力如表 4。由表可知,随着剪跨比的减小,普通钢材试

表 4 不同钢材强度试件在不同剪跨比下的承载能力

Tab. 4 Bearing capacity of steel specimens with different strength under different shear-span ratios

试件	钢材强度	剪跨比	屈服荷载 σ_b /kN	峰值荷载 σ_{max} /kN	极限荷载 σ_u /kN
S1	Q235	2.0	474.29	571.45	485.74
S9	Q235	1.5	616.15	716.57	609.09
S10	Q235	1.0	771.53	944.50	802.83
S5	LYP160	2.0	325.10	494.77	420.55
S11	LYP160	1.5	439.00	647.38	550.27
S12	LYP160	1.0	580.57	853.70	725.65

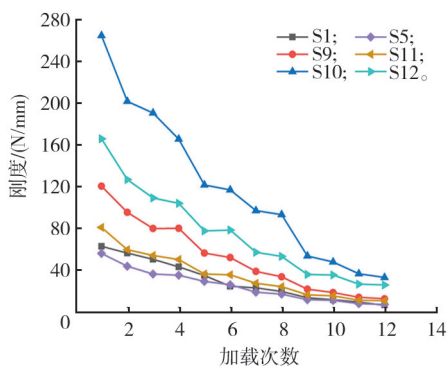


图 12 不同钢材强度试件在不同剪跨比下的刚度退化曲线

Fig. 12 Stiffness degradation curves of steel specimens with different strength under different shear-span ratios

由图 12 可知,随着剪跨比减小,普通钢材试件和低屈服点钢材试件的刚度都有提升,但最终破坏状态时不同剪跨比试件的抗侧刚度相比初始阶段更小,说明小剪跨比试件的刚度退化速率大于大剪跨比试件,这是因为小剪跨比试件能承受更大的剪力,而内部混凝土受损导致试件刚度退化更快。剪跨比相同时,低屈服点钢材试件刚度退化比普通钢材试件最大提高了 59.37%。低屈服点钢材试件在小剪跨比条件下的抗震性能表现更为优越,这为结构设计提供了更大的灵活性和安全性。

件和低屈服点钢材试件的屈服荷载、峰值荷载和刚度均有大幅度提高,耗能能力有一定提升,延性略有下降,几乎可以忽略不计。其中:普通钢材试件屈服荷载最高提升了 62.67%,峰值荷载最高提升了 65.28%,延性最大降低了 2.89%;低屈服点钢材试件屈服荷载最高提升了 78.58%,峰值荷载最高提升了 72.54%,延性最大降低了 1.03%;在剪跨比相同的条件下,低屈服点钢材比普通钢材延性最大提升 70.83%。由此可以看出,随着剪跨比的减小,试件的承载能力大幅度提升,同时,减小剪跨比对延性有一定影响,但对于低屈服点钢材试件而言,这种影响非常小,几乎可以忽略不计。

3.2.4 刚度退化分析

不同钢材强度试件在不同剪跨比下的刚度退化曲线如图 12 所示。

3.2.5 耗能能力分析

不同钢材强度试件在不同剪跨比下的累计耗能曲线如图 13 所示。由图可知,相同剪跨比下,低屈服点钢材的累计耗能最高超出普通钢材试件 85.01%,随着剪跨比减小,2 种钢材试件在初始阶段的累计耗能均有小幅度提升,这是由于初始阶段水平位移较小,滞回环面积较小,不同剪跨比之间的差距较小;之后随着水平位移的增大,滞回环面积逐渐变大,累计耗能差距逐渐变大,说明随着剪跨比的减小,试件耗能能力逐渐提高,这进一步证实了低屈

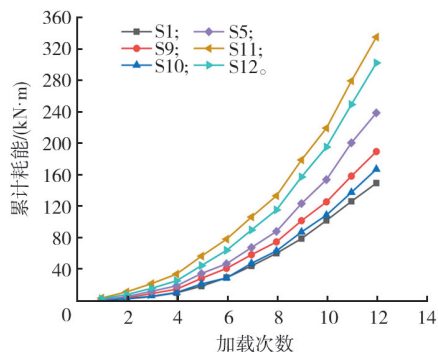


图 13 不同钢材强度试件在不同剪跨比下的累计耗能曲线

Fig. 13 Cumulative energy dissipation curves of different steel strength specimens under different shear-span ratios

服点钢材在小剪跨比条件下的抗震性能优势。

4 结 语

本文提出了一种新型 LYP160 低屈服点波纹双钢板组合剪力墙结构,并通过 ABAQUS 有限元软件建立了相关模型,通过数值模拟与普通钢材的抗震性能进行对比分析,得到如下结论。

1)随着混凝土强度的增大,普通钢材试件和低屈服点钢材试件的屈服荷载和峰值荷载均有一定提高,延性有一定降低,刚度有一定提升,耗能能力基本上没有变化。普通钢材试件屈服荷载最高提升了 14.68%,峰值荷载最高提升了 10.63%,延性最大降低了 15.32%;低屈服点钢材试件屈服荷载最高提升了 13.66%,峰值荷载最高提升了 12.01%,延性最大降低了 25.52%。普通钢材试件承载能力受混凝土强度的影响更大,低屈服点钢材延性、刚度受混凝土强度变化的影响更大。

2)随着剪跨比的减小,普通钢材试件和低屈服点钢材试件的屈服荷载、峰值荷载和刚度均有大幅度提高,耗能能力有一定提升,延性略有下降,几乎可以忽略不计。普通钢材试件屈服荷载最高提升了 62.67%,峰值荷载最高提升了 65.28%,延性最大降低了 2.89%;低屈服点钢材试件屈服荷载最高提升了 78.58%,峰值荷载最高提升了 72.54%,延性最大降低了 1.03%。普通钢材试件刚度受剪跨比的影响更大,低屈服点钢材承载能力和耗能能力受剪跨比变化的影响更大。

3)LYP160 低屈服点波纹双钢板组合剪力墙在小剪跨比条件下展现出优异的抗震性能,尤其在耗能能力方面表现出色,因此其在结构抗震设计中具有一定的优势。

本文主要分析了混凝土强度和剪跨比 2 个主要参数对 LYP160 低屈服点波纹双钢板组合剪力墙结构抗震性能的影响,今后会继续对轴压比、高厚比、钢板强度等参数的影响开展试验研究和理论分析。

参考文献/References:

[1] 徐增珍,董玉英,刘超,等.方钢管铁尾矿再生混凝土柱抗震性能有限元分析[J].河北工业科技,2023,40(5):362-373.
XU Zengzhen,DONG Yuying,LIU Chao,et al. Finite element analysis of seismic performance of iron tailings recycled concrete-filled steel tube columns with square section [J]. Hebei Journal of Industrial Scienceand Technology, 2023, 40 (5):362-373.

[2] 郝贵强,张鹏飞,赵媛媛,等.新型钢板螺栓连接装配式混凝土剪力墙抗震性能研究[J].河北工业科技,2022,39(6):480-486.
HAO Guiqiang,ZHANG Pengfei,ZHAO Yuanyuan,et al. Research on seismic performance of new steel plate bolted assembled concrete shear wall[J]. Hebei Journal of Industrial

Scienceand Technology,2022,39(6):480-486.

[3] BHARDWAJ S R,VARMA A H. Effect of imperfections on face plate slenderness requirements for SC walls[C]//Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council. Orlando: AISC,2016:524.

[4] ZHANG Kai,VARMA A H,MALUSHTE S R,et al. Effect of shear connectors on local buckling and composite action in steel concrete composite walls[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014,269:231-239.

[5] JGJ/T 380—2015,钢板剪力墙技术规程[S].

[6] ANSI/AISC N690—2018, Specification for Safety-Related Steel Structures for Nuclear Facilities[S].

[7] QIU Jing,ZHAO Qihong,YU Cheng,et al. Experimental studies on cyclic behavior of corrugated steel plate shear walls [J]. Journal of Structural Engineering,2018,43(10):214-224.

[8] 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.
ZHANG Fenglin. The Research on Seismic Performance of L-Shaped Double Corrugated Steel Plate Concrete Composite Shear Wall[D]. Nanning:Guangxi University,2021.

[9] 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.
TANG Jiyu. Study on Seismic Performance and Design method of Double Corrugated Steel Plateconcrete Composite Shear Wall [D]. Nanning:Guangxi University,2022.

[10] RAFIEI S,HOSSAIN K M A,LACHEMI M,et al. Profiled sandwich composite wall with high performance concrete subjected to monotonic shear [J]. Journal of Constructional Steel Research,2015,107:124-136.

[11] RAFIEI S,HOSSAIN K M A,LACHEMI M,et al. Finite element modeling of double skin profiled composite shear wall system under in-plane loadings [J]. Engineering Structures, 2013,56:46-57.

[12] NAKASHIMA M. Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel. I ; Test [J]. Journal of Structural Engineering,1995,121(12):1742-1749.

[13] NAKASHIMA M,AKAZAWA T,TSUJI B. Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel. II ; Model [J]. Journal of Structural Engineering,1995,121(12):1750-1757.

[14] 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.
WEI Xing,ZHOU Linjun,LI Gang. Numerical analysis of seismic energy dissipation performance of corrugated steel plate shear wall with low yield point [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2023,58(3):546-554.

[15] 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.
LI Yikang. Cyclic Behavior and Design Methods of Corrugated Double-skin Composite Shear Walls [D]. Tianjin: Tianjin University,2020.

[16] GB/T 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].

[17] 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.
WANG Meng,SHI Yongjiu,WANG Yuanqing. Study on equivalent constitutive model of steel with cumulative degradation and damage [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (10):73-83.

[18] 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,2016:26-75.