

文章编号:1673-9469(2021)04-0007-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.04.002

端部加强钢管-双钢板剪力墙抗震性能研究

代晓辉,袁朝庆*,宋爽,李国洋,房宽光

(东北石油大学 土木建筑工程学院,黑龙江 大庆 163318)

摘要:为增强双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能,在双钢板混凝土组合剪力墙端部钢管引入工字型钢,有效抑制构件端部屈曲。以钢管的截面形式、工字型钢尺寸、剪跨比为主要参数,利用ABAQUS有限元软件设计了18片双钢板混凝土组合剪力墙有限元模型,对其滞回性能、承载能力、耗能能力、变形及延性和刚度退化等抗震性能进行对比研究。研究表明:端部加强钢管-双钢板混凝土组合剪力墙的承载能力、延性、刚度退化、耗能能力相比普通钢管-双钢板混凝土组合剪力墙构件均有较大提升。随着剪跨比增大,端部加强构件的峰值荷载、屈服荷载、延性、初始刚度、等效粘滞系数的峰值均有较大提升,钢管暗柱的截面形式和工字型钢的尺寸对构件抗震性能影响不显著,构件AZ22-2.0的抗震性能较为优越。

关键词:工字型钢;钢管;双钢板混凝土组合剪力墙;抗震性能

中图分类号:TU398.2

文献标识码:A

Study on Seismic Resistance of End Reinforced Steel Pipe-double Steel Plate Shear Wall

DAI Xiaohui, YUAN Zhaoqing*, SONG Shuang, LI Guoyang, FANG Kuanguang

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

Abstract: In order to enhance the seismic resistance of double steel plate concrete, I-type steel was introduced to effectively inhibit the end flexion of the component. With the cross-section form of steel pipe, I-shaped steel size and shear span ratio as the main parameters, the finite element model of 18 double steel sheet concrete combined shear wall was designed using ABAQUS finite element software to compare the seismic resistance of hysteresis performance, carrying capacity, energy consumption capacity, deformation and ductility and stiffness degradation. The research results show that the carrying capacity, ductility, stiffness degradation and energy consumption capacity of the terminal reinforced steel pipe-double steel plate concrete combined shear wall are greatly improved compared with the ordinary steel pipe-double steel plate concrete combined shear wall components. With the increase of shear span ratio, the peak load of end reinforcement component, yield load, ductility, initial stiffness and the peak of equivalent viscosity coefficient are greatly improved. The cross section form of steel pipe and dark column and type steel size have no significant impact on the seismic performance of components. Component AZ22-2.0 seismic resistance performance is superior.

Key words: I-type steel; steel pipe; double steel plate concrete combined shear wall; seismic performance

对双钢板混凝土组合剪力墙的研究,国内外学者开展了大量试验研究。聂建国^[1-3]及其试验小组设计了带小型端柱双钢板混凝土组合剪力

墙,结果表明,双钢板混凝土组合剪力墙轴压比越大,结构的承载能力和刚度退化方面表现越差,混凝土局部塑性铰区增加,特别是在破坏时,最先在

收稿日期:2021-09-05

基金项目:黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020E018)

作者简介:代晓辉(1997-),男,河南濮阳人,硕士研究生,研究方向为工程结构抗震。

* 通讯作者:袁朝庆(1970-),男,黑龙江依安人,博士,教授,从事土木工程教学与研究工。

端部发生破坏。陈丽华等^[4-6]对拉结件的双钢板混凝土组合剪力墙进行了研究,L型及C型连接件均阻止了局部屈曲。袁朝庆等^[7]采用工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites,简称ECC)对双钢板混凝土组合剪力墙的底部进行加强,并对不同剪跨比的双钢板剪力墙最佳ECC高度进行了研究。纪晓东^[8]设计了矩形钢管混凝土内加了圆钢管的构件,相比于不加圆钢管的矩形钢管混凝土的构件,承载能力和耗能能力有明显提高。武晓东^[9]在双钢板混凝土组合剪力墙的端柱内嵌圆钢管,墙体的承载力和极限位移角均有提升,墙体有良好的变形能力。邓明科^[10]对5片低矮剪力墙,在两端均设置了方钢管(High Ductile Concrete,简称HDC)端柱,随轴压比增大时,变形能力和耗能能力逐渐降低。施加荷载以后,双钢板剪力墙一般从端部最先发生破坏。宋维国^[11]组合剪力墙两侧引入加劲肋后,改善和延缓了端部屈曲,提高了构件的耗能能力和延性。李云等^[12]在双钢板混凝土组合剪力墙的两端设置普通槽钢,拉结钢板采用工字钢,提高了构件的承载能力、延性和耗能能力。Yan Jiabao等^[13]提出了边界柱的双钢板混凝土组合剪力墙,在双钢板混凝土组合剪力墙中引入钢管,显著提高了钢管的极限承载力、延性和耗能能力均提高了20%。Han Jianhong等^[14]提出了一种在创新钢桁架的基础上增加了钢管混凝土作为边界构件,并采用了创新钢桁架连接件,提高了构件的抗剪强度、延性及耗能能力。Huang等^[15]在双层钢板组合墙两端和中部增设钢管柱,提高了构件的耗能能力、延性及变形能力。Jiang等^[16]提出了多腔式双钢板填充混凝土墙和钢管混凝土柱结构体系,在构件两端设置槽钢,提高了承载力,增强了延性和耗能能力。

目前国内外学者在双钢板剪力墙端部引入钢管和槽钢,抑制了构件的端部屈曲。本文在双钢板混凝土组合剪力墙端部引入工字型钢,研究其抗震性能。设计了轴压比为0.5的18片带工字型钢的端部加强双钢板混凝土组合剪力墙,主要研究构件暗柱的截面形式、工字型钢尺寸、剪跨比等参数对构件抗震性能的影响。

1 有限元模型对比验证

本文以文献[17]中的双钢板剪力墙构件DCSW1的拟静力试验为例,进行有限元模拟,从

而验证有限元模型的可行性。本文建立的双钢板剪力墙模型DCSW1[#]与文献[17]中的模型DCSW1尺寸和加载方式相同,有限元模型如图1所示。

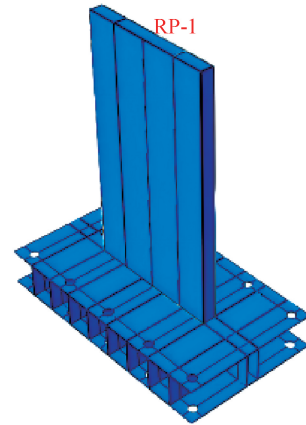


图1 DCSW1[#]有限元模型

Fig. 1 DCSW1[#]Finite element model

图2(a)、(b)分别为文献的试验构件DCSW1和本文的验证模型DCSW1[#]的滞回曲线,图3是骨架曲线。由图2和图3可以看出:试验的滞回曲线和本文验证的滞回曲线接近一致,有限元模拟情况下的滞回曲线更加光滑饱满。由骨架曲线图可以看出,两条骨架曲线形状相同,有限元模拟的骨架曲线DCSW1[#]与试验的骨架曲线相似,由表1可知,最大误差为8.32%,可以认为ABAQUS能较好地模拟双钢板剪力墙在往复荷载作用下的抗震性能。

2 有限元模型建立

2.1 材料本构模型

钢材本构关系采用理想的四折线本构关系,金属塑性模型,钢材材料选用Q235钢。常温静载状态下,钢材的单向拉伸的应力应变曲线如图4所示,采用文献[17]给出的应力应变关系如图5所示,根据输入的材性试验得到曲线图上相对应的数据点。混凝土本构关系选用的是韩林海^[18]的塑性损伤模型。

2.2 加载方式

模型计算设置step1和step2分析步,初始状态,构件的底部边界条件设置为完全固定,顶部为自由。在剪力墙顶面设置参考点与顶面耦合,分析步step1时在顶部耦合点施加恒力,分析步step2时以水平位移加载方式,在剪力墙顶面设置参考

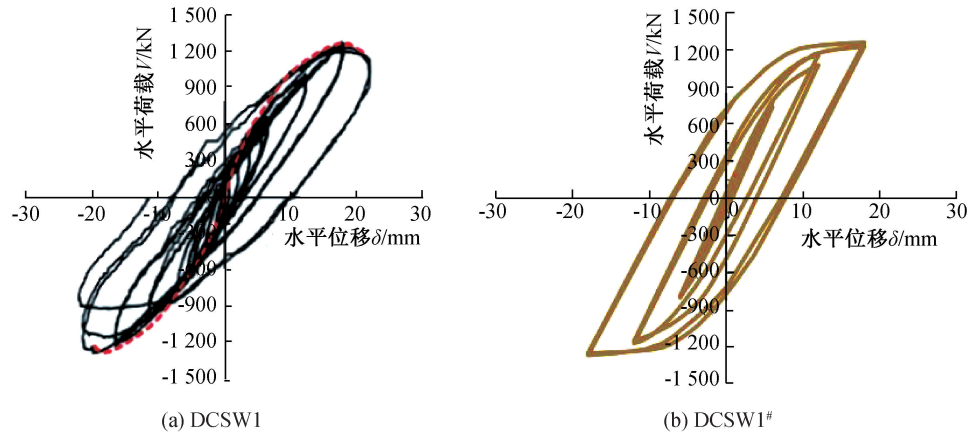


图 2 滞回曲线图
Fig. 2 Hysteresis graph

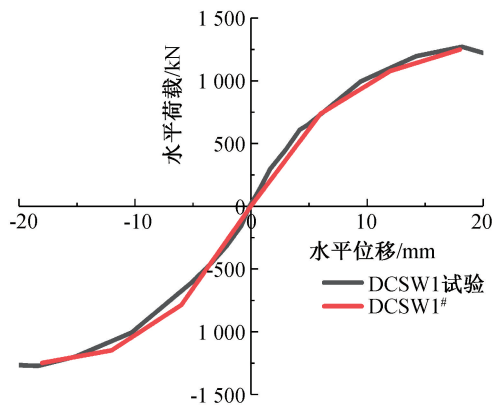


图 3 骨架曲线对比
Fig. 3 Comparison of skeleton curves

表 1 试验结果与有限元结果对比

Tab. 1 Comparison of test results and Finite element results

构件编号	初始刚度 $/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	屈服阶段		峰值阶段	
		P_y $/\text{kN}$	Δ_y $/\text{mm}$	P_{\max} $/\text{kN}$	Δ_{\max} $/\text{mm}$
DCSW1	143.73	1 091.02	12.10	1 270.02	18.3
DCSW1#	132.69	1 096.50	12.76	1 228.38	18.0
误差/%	8.32	0.50	5.54	3.38	1.63

注:表中误差均为有限元模拟结果与试验结果的误差;表中所列结果均为平均值。

点与顶面耦合,在顶部耦合点施加水平往复荷载,加载制度如图 6 所示。

本文分析模块采用的是 ABAQUS/Standard,混凝土、方钢管均选用 C3D8R 实体单元。钢管选取了壳单元,钢管选取了内嵌的方式,混凝土与钢板的接触方式定义为表面与表面接触,钢板与混凝土的关系为粘结滑移,混凝土和钢板法向接触为“硬接触”,切向接触为“罚”接触。

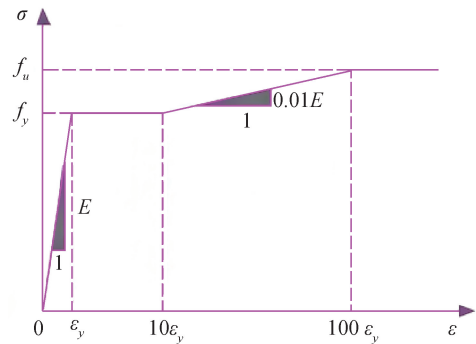


图 4 钢材应力-应变曲线
Fig. 4 Steel stress-strain curve

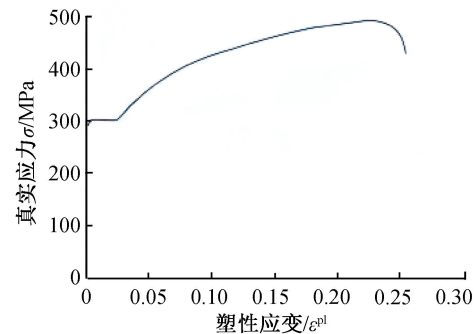


图 5 钢材应力-应变曲线
Fig. 5 Steel stress-strain curve

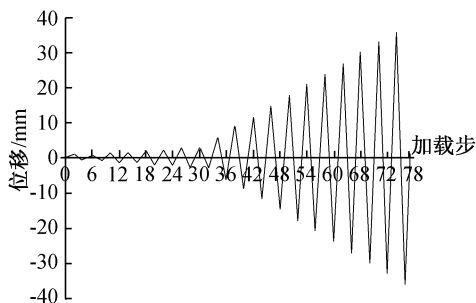


图 6 加载制度
Fig. 6 Loading system

3 抗震性能研究

3.1 构件设计

为了研究端部加强钢管-双钢板混凝土组合剪力墙的抗震性能,对非加强型普通钢管暗柱以及加强型钢管暗柱内配工字型钢的双钢板混凝土组合剪力墙滞回性能、承载能力、延性和耗能能力等抗震性能指标进行研究。本文设计了18个组合墙构件,研究构件钢管暗柱截面形式、剪跨比及工字型钢尺寸对组合剪力墙构件抗震性能的影响,剪力墙轴压比按照文献[8]计算。构件的有限元模型见图7,端部加强双钢板剪力墙截面如图8所示,构件参数参照表2,钢板厚度均为3mm。

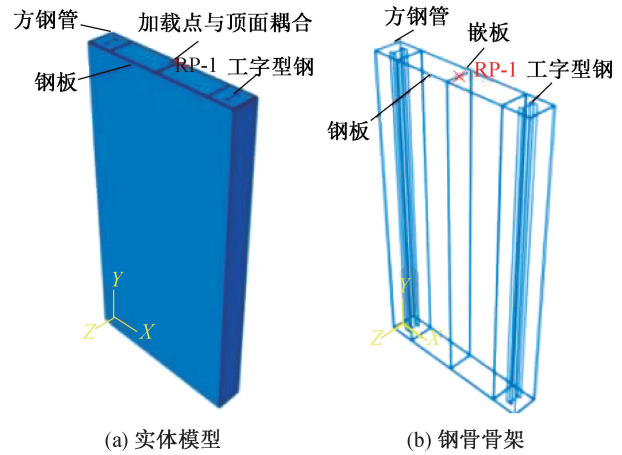


图7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

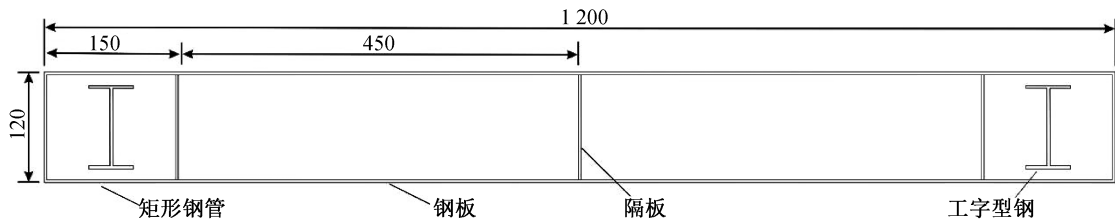


图8 钢管-双钢板剪力墙截面

(单位:mm)

Fig. 8 Steel pipe-double steel plate shear wall section

表2 构件参数

Tab. 2 Test part parameters

模型名称	钢板高度/mm	宽度/mm	厚度/mm	钢板厚度/mm	钢材强度/(N·mm ⁻²)	混凝土强度	剪跨比	轴压比
BASE1-1.0	1 200	1 200	120	3	235	C30	1.0	0.5
BASE1-1.5	1 800	1 200	120	3	235	C30	1.5	0.5
BASE1-2.0	2 400	1 200	120	3	235	C30	2.0	0.5
BASE2-1.0	1 200	1 200	120	3	235	C30	1.0	0.5
BASE2-1.5	1 800	1 200	120	3	235	C30	1.5	0.5
BASE2-2.0	2 400	1 200	120	3	235	C30	2.0	0.5
AZ11-1.0	1 200	1 200	120	3	235	C30	1.0	0.5
AZ11-1.5	1 800	1 200	120	3	235	C30	1.5	0.5
AZ11-2.0	2 400	1 200	120	3	235	C30	2.0	0.5
AZ12-1.0	1 200	1 200	120	3	235	C30	1.0	0.5
AZ12-1.5	1 800	1 200	120	3	235	C30	1.5	0.5
AZ12-2.0	2 400	1 200	120	3	235	C30	2.0	0.5
AZ21-1.0	1 200	1 200	120	3	235	C30	1.0	0.5
AZ21-1.5	1 800	1 200	120	3	235	C30	1.5	0.5
AZ21-2.0	2 400	1 200	120	3	235	C30	2.0	0.5
AZ22-1.0	1 200	1 200	120	3	235	C30	1.0	0.5
AZ22-1.5	1 800	1 200	120	3	235	C30	1.5	0.5
AZ22-2.0	2 400	1 200	120	3	235	C30	2.0	0.5

注:1. BASE为普通钢管暗柱构件,AZ为钢管暗柱内配工字型钢的构件;2. 第一个数字代表钢管暗柱的截面形式,1代表矩形钢管,2代表方形钢管,例如:A212表示矩形钢管暗柱的构件;3. 第二个数字代表工字型钢,1代表内配工字型钢I₁:90 mm×50 mm×3 mm×3 mm,2代表内配工字型钢I₂:75 mm×50 mm×3 mm×3 mm,例如:AZ12表示矩形钢管暗柱内配I₂的构件。

3.2 荷载-位移曲线分析

3.2.1 滞回曲线分析

图9对应的是18片端部加强双钢板混凝土组合剪力墙的滞回曲线。由图9可知,剪跨比(m)对滞回曲线影响较为显著。对于中高剪跨比($m=1.5$ 、 $m=2.0$)构件,其滞回曲线呈现较为饱满梭形,构件极限位移相对较大,塑性变形能力相对较强;对于小剪跨比($m=1.0$)构件,极限位移相对较小,塑性变形能力相对较弱。配工字型钢构件AZ系列相较于普通构件BASE系列,滞回环更加饱满,承载能力有所提高,极限位移相对较大,延性较好,塑性变形能力提高,抗震性能增强。钢管形状和工字钢尺寸对其抗震性能影响不太显著。

3.2.2 骨架曲线分析

骨架曲线和滞回曲线统称为恢复力曲线,是研究非弹性地震反应时的重要指标。骨架曲线是指荷载-位移曲线的各级循环的峰值点所连接起来的包络线。由图10可知骨架曲线均呈倒S形,构件的受力破坏分三个阶段,即弹性、塑性、破坏退化阶段。在弹性段可以看出同一剪跨比下,骨架曲线接近重合;进入塑性段以后,普通构件即可达到峰值后下降,而后来又有所上升,说明钢板屈曲以后,混凝土开始发挥作用。

由图10(a)可知,同等条件下,加载初期,各组骨架曲线趋于重合,构件在此时处于弹性阶段,构件卸载后可恢复,构件达到峰值荷载后不可恢复。由图10(b)、(c)可得,工字型钢尺寸和钢管形状对构件的抗震性能影响不显著。随着剪跨比的增大,构件极限位移在不断增大,塑性不断增强,延性不断增大,抗震性能增强。

3.3 承载能力对比分析

结构承载能力是评价结构强度和结构抗震性能的重要指标。本文利用“割线刚度法”,取85%的峰值点 p_m 为极限点 p_u ,极限荷载公式如公式(1)所示。各组构件的屈服荷载、峰值荷载、极限荷载大小可见表3。

$$p_u = 0.85p_m \quad (1)$$

由表3可知,随着剪跨比增大,屈服荷载、峰值荷载、极限荷载均有所下降。同等条件下,AZ系列各组构件相比BASE系列,屈服荷载、峰值荷载、极限荷载均有所提升。AZ1系列相比BASE1系列在屈服荷载方面分别提升了12.59%、18.20%、25.80%、12.97%、18.40%、23.69%,AZ1系列相比BASE1系列在峰值荷载方面分别提升了13.53%、18.77%、25.37%、11.28%、17.70%、23.52%。AZ2系列相比BASE2系列在屈服荷载方面分别提升了

16.04%、25.26%、22.95%、9.59%、19.04%、18.85%,AZ2系列相比BASE2系列在峰值荷载方面分别提升了15.67%、23.70%、27.10%、12.69%、18.37%、22.80%。可以看出,同等条件下,工字型钢尺寸和钢管暗柱的截面形式对屈服荷载、峰值荷载影响不显著。随着剪跨比增大,屈服荷载和峰值荷载逐渐降低。

3.4 变形与延性分析

结构在发生屈服破坏后,在一般采用延性系数作为衡量结构延性的量化系数。延性的具体求出方法按照位移延性比来计算即极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 之比。

通过BASE、AZ系列模型提取计算出具体位移参数和延性参数如表4所示。

由表4可得,随着剪跨比的增大,延性在逐渐提高,由此可见,中高墙的延性要比矮墙的延性要好。AZ1系列相比BASE1系列延性分别提升了9.01%、11.48%、15.48%、4.50%、8.61%、12.70%,AZ2系列相比BASE2系列延性分别提升了8.06%、1.57%、1.14%、6.63%、10.98%、13.69%。同等条件下,随着剪跨比增大,延性逐渐增大,对于各组构件,高剪跨比时,构件的延性最优。综合比较剪跨比2.0时,AZ11-2.0提升幅度最大,提升了15.48%。AZ22-2.0延性达到最大,延性为2.99。由表4可知钢管截面形式和工字型钢的尺寸对延性影响不显著。

3.5 刚度退化能力分析

对于双钢板混凝土组合剪力墙在往复荷载作用下抵抗变形的能力,本文采用环线刚度公式(2)分析了BASE和AZ系列模型的刚度退化关系。刚度退化曲线是指滞回曲线每次循环加载的峰值荷载点与峰值位移的比值按照加载级别顺序连接的曲线。

$$K = \frac{|P_i|}{|\Delta_i|} \quad (2)$$

式中: p_i 等于第*i*次循环的峰值荷载, Δ_i 为第*i*加载对应的峰值位移。

由图11可知,同等条件下,工字型钢的构件初始刚度要高于普通构件,且退化速度要略低于普通构件。随着剪跨比增大,初始刚度下降速度越来越缓慢,中高剪跨比的初始下降速度要低于低剪跨比构件。随着加载级增加,低剪跨比构件后期退化速度接近直线式下降,中高剪跨比构件后期退化速度越来越缓慢,工字型钢的尺寸和钢管截面形式对刚度退化影响不大。

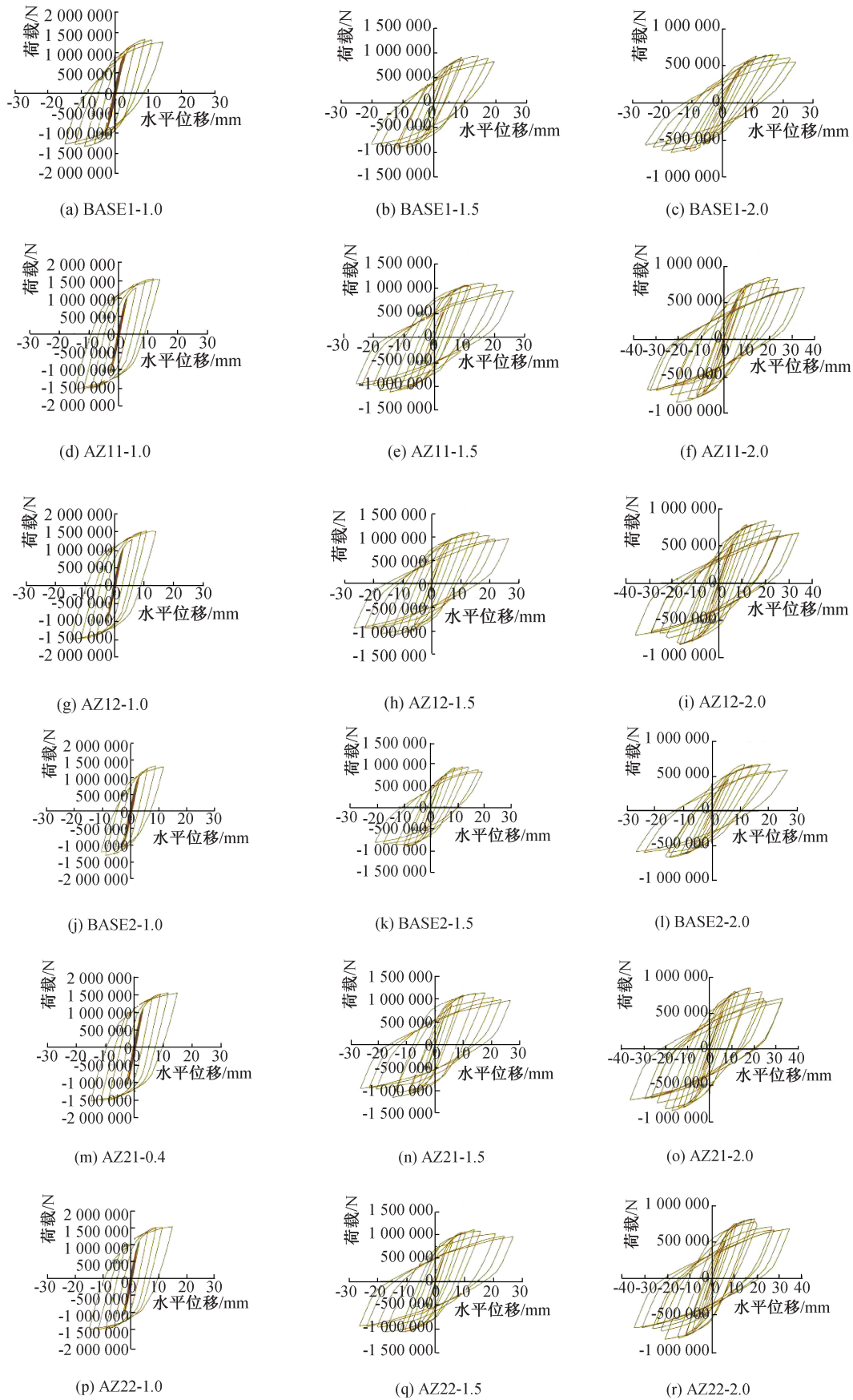


图9 滞回曲线

Fig. 9 Postresis curve

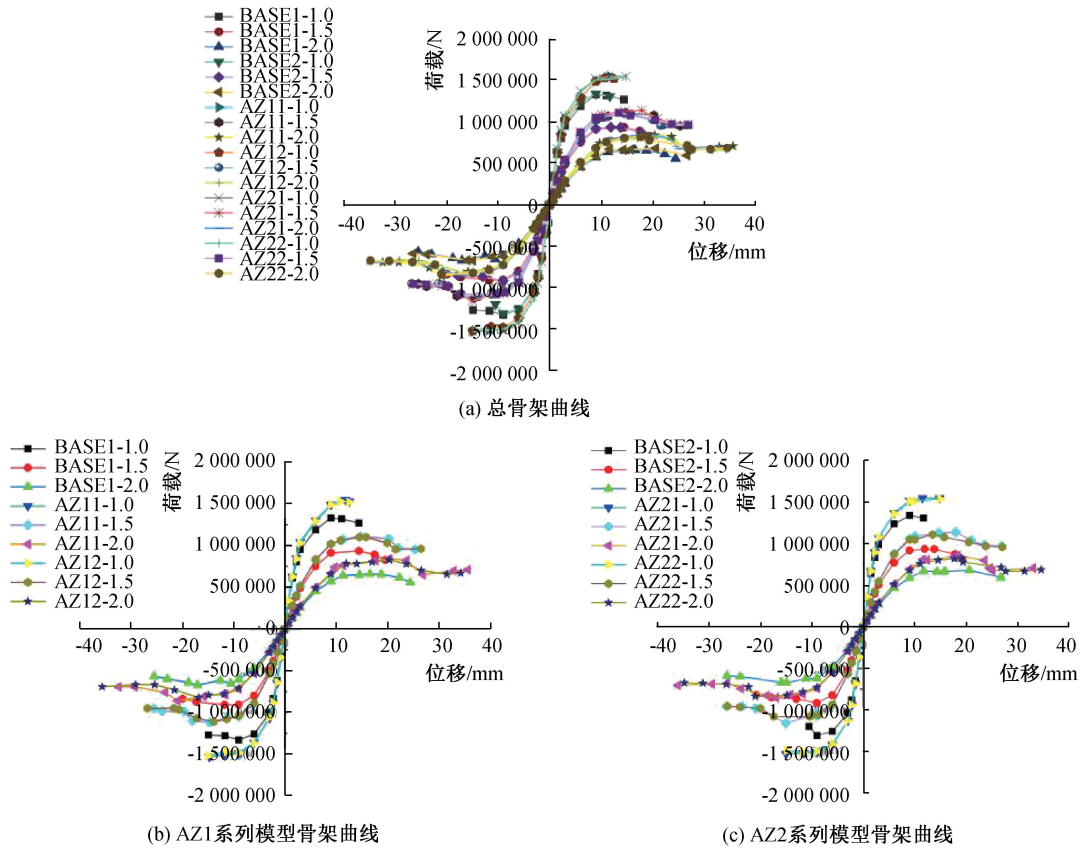


图 10 骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curve

表 3 各模型承载力特征点的有限元结果

Tab. 3 Finite element results of characteristic points of bearing capacity of each model

模型编号	屈服荷载 p_y /kN	峰值荷载 p_{max} /kN	极限荷载 p_u /kN
BASE1-1.0	1 109.43	1 330.00	1 130.50
BASE1-1.5	815.96	934.60	794.41
BASE1-2.0	604.88	671.20	570.52
BASE2-1.0	1 097.84	1 340.00	1 139.00
BASE2-1.5	819.25	937.74	797.08
BASE2-2.0	620.08	671.76	571.00
AZ11-1.0	1 249.10	1 510.00	1 283.50
AZ11-1.5	964.52	1 110.00	943.50
AZ11-2.0	760.92	841.45	715.23
AZ12-1.0	1 253.37	1 480.00	1 258.00
AZ12-1.5	966.12	1 100.00	935.00
AZ12-2.0	748.19	829.07	704.71
AZ21-1.0	1 274.01	1 550.00	1 317.50
AZ21-1.5	1 026.21	1 160.00	986.00
AZ21-2.0	762.41	853.80	725.73
AZ22-1.0	1 203.12	1 510.00	1 283.50
AZ22-1.5	975.25	1 110.00	943.50
AZ22-2.0	736.97	824.92	701.18

表 4 各模型变形能力计算的有限元结果

Tab. 4 Finite element results of the deformation capacity of each model

模型编号	屈服位移 Δ_x /mm	峰值位移 Δ_{max} /mm	极限位移 Δ_u /mm	延性
BASE1-1.0	4.98	9.00	11.06	2.22
BASE1-1.5	7.19	11.89	17.53	2.44
BASE1-2.0	9.09	16.99	22.89	2.52
BASE2-1.0	4.28	9.00	9.00	2.11
BASE2-1.5	6.98	11.89	17.83	2.55
BASE2-2.0	9.08	14.91	23.87	2.63
AZ11-1.0	4.85	11.76	11.76	2.42
AZ11-1.5	8.13	14.76	22.17	2.72
AZ11-2.0	11.33	20.42	32.94	2.91
AZ12-1.0	4.87	9.00	11.32	2.32
AZ12-1.5	8.13	14.51	21.55	2.65
AZ12-2.0	11.11	20.35	31.58	2.84
AZ21-1.0	5.04	11.49	11.49	2.28
AZ21-1.5	9.06	14.99	23.46	2.59
AZ21-2.0	11.80	16.95	31.35	2.66
AZ22-1.0	5.18	11.68	11.68	2.25
AZ22-1.5	8.35	13.46	23.59	2.83
AZ22-2.0	10.45	19.05	31.27	2.99

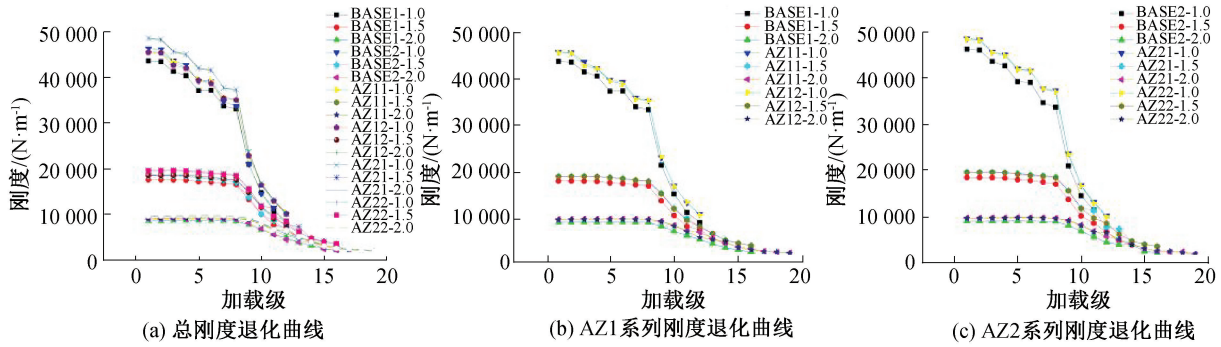


图 11 刚度退化曲线

Fig. 11 Riggeness degradation curve

3.6 耗能能力分析

等效粘滞系数、能量耗散系数和累积耗能均能反映组合剪力墙的耗能能力。本文选用等效粘滞系数来定量地分析带型钢暗柱双钢板混凝土组合剪力墙的耗能能力,等效粘滞系数越大,剪力墙在往复荷载下产生的滞变阻尼越大,剪力墙的耗能能力越好,即地震作用下的安全性更加优良,其计算简图见图 12,等效粘滞系数 h_e 按下式计算

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (3)$$

式中: $S_{ABC}+S_{CDA}$ 为一个滞回环包围的面积, $S_{OBE}+S_{ODF}$ 为相应的三角形面积,见图 12。

由图 13 可知,各组构件随着位移的增大,等效

粘滞系数快速增长至峰值后趋于平缓。由图 13 (a)、(b)、(c) 可知,同等条件下,配工字型钢 AZ

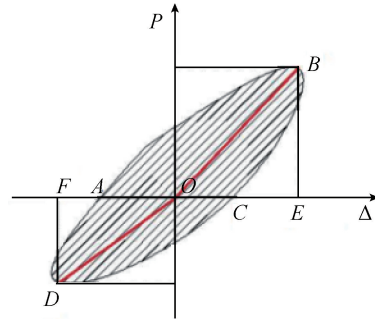


图 12 等效粘滞系数示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the equivalent viscosity coefficient

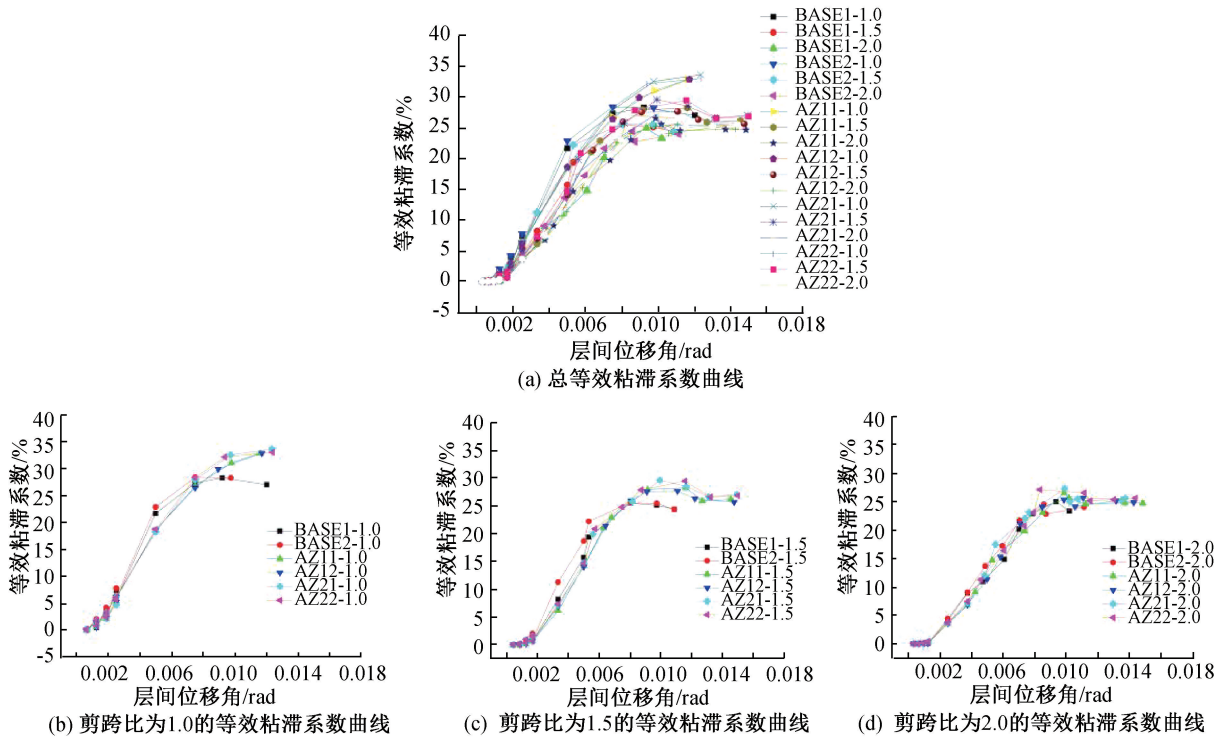


图 13 耗能能力对比图

Fig. 13 Comparison diagram of energy consumption capacity

系列构件的等效粘滞系数峰值普遍高于普通构件BASE系列,低剪跨比和中剪跨比对构件的粘滞系数提升较大,高剪跨比对构件粘滞系数略有提升,暗柱的截面形式和工字型钢尺寸对等效粘滞系数影响不大。构件的累计耗能也随着层间位移角的增加而稳定增加,表明构件的耗能能力良好。

4 结论

本文在双钢板混凝土组合剪力墙两端设置钢管暗柱,并在暗柱内配工字型钢,建立了AZ系列有限元模型。研究并模拟钢管暗柱截面形式包括矩形截面钢管暗柱(150 mm×120 mm)和方形截面钢管暗柱(120 mm×120 mm)、工字型钢尺寸和剪跨比对其抗震性能的影响,可以得出以下结论:

1)端部加强型构件相比普通构件在承载能力、延性、刚度退化、耗能能力方面均有较大的提升。

2)同等条件下,钢管的截面形式和工字型钢的尺寸对构件峰值荷载、屈服荷载、延性、初始刚度、等效粘滞系数影响不太显著。

3)钢管的截面形式和工字型钢的尺寸对构件抗震性能不太显著,但剪跨比影响显著。同等条件下,随着剪跨比增大,构件的峰值荷载、屈服荷载、延性、初始刚度、等效粘滞系数的峰值有所提升,构件在剪跨比2.0时,峰值荷载提升幅度较大,提升了27.1%;屈服荷载提升幅度达到了25.8%;延性提升了15.48%,且构件AZ22-2.0延性达到较优,延性为2.99,刚度退化较慢,耗能能力较稳定,AZ22-2.0构件抗震性能较为优越。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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):61-66.

[3] 聂建国,卜凡民,樊健生. 高轴压比、低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙拟静力试验研究[J]. 工程力学,2013,30(6):60-66+76.

[4] 黄圣恩,陈丽华,夏登荣,等. 设置C形连接件的双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究[J]. 工业建筑,2019,

49(5):139-145.

[5] 夏登荣,陈丽华,吴晓枫,等. 不同连接构造双钢板混凝土组合剪力墙试验研究[J]. 建筑结构,2019,49(14):36-41.

[6] 汪士也,陈丽华,姜宇,等. 双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验及数值模拟[J]. 地震工程与工程振动,2020,40(4):217-224.

[7] 袁朝庆,代晓辉,章桀,等. 水泥基复合材料双钢板组合剪力墙最佳ECC高度研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2021,38(3):38-45.

[8] 纪晓东,蒋飞明,钱稼茹,等. 钢管-双层钢板-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(6):75-83.

[9] 武晓东. 带方钢管混凝土端柱隔板连接双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2019(40):41-50.

[10] 邓明科,刘俊超,张阳玺,等. 钢板-高延性混凝土组合低矮剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2021,38(3):40-46.

[11] 宋维国. 两侧带加劲肋的钢管束-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[D]. 烟台:烟台大学,2021.

[12] 李云,王甜,陈凯. 多腔式双钢板组合剪力墙结构的抗震性能研究[J]. 建筑结构,2021,51(Z1):1557-1561.

[13] YAN Jiabao, LI Zhongxian, WANG Tao. Seismic Behaviour of Double Skin Composite Shear Walls with Overlapped Headed Studs[J]. Construction and Building Materials,2018,191:590-607.

[14] HAN Jianhong, SHU Ganping, QIN Ying, et al. Experimental Seismic Behavior of T-Shaped Double Skin Composite Wall with Steel Truss[J]. Journal of Constructional Steel Research,2021,184:1-12.

[15] HUANG Shaoteng, HUNG Yansheng, HE An, et al. Experimental Study on Seismic Behaviour of An Innovative Composite Shear Wall[J]. Journal of Constructional Steel Research,2018,148:165-179.

[16] JIANG Tao, LI Jinbao, XU Wenping. Static Elastoplastic Analysis of the Composite Shear Wall of the Grid-tube-type Double Steel Plate Wall with Infilled Concrete[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020.

[17] 邱丽秋. 开洞双层钢板内填混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 上海:同济大学,2014.

[18] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2007.

(责任编辑 周雪梅)