

钢管混凝土边缘约束叠合剪力墙抗震试验研究*

侯和涛^{1,2},程积润¹,曲哲^{2†},付玮琪¹,曲冰¹,崔士起³,石磊³,朱文灿¹,马天翔¹

(1. 山东大学 土建与水利学院,山东 济南 250061;2. 中国地震局 工程力学研究所,
河北 三河 065201;3. 山东省建筑科学研究院,山东 济南 250031)

摘要:为研究新型钢管混凝土边缘约束叠合剪力墙的抗震性能,设计制作了3片钢管混凝土边缘约束叠合剪力墙和1片现浇钢筋混凝土剪力墙足尺试件进行静力往复加载试验,试验中考虑了3种不同的墙身厚度取值,以考察高厚比对剪力墙抗震能力的影响.通过试验,对比分析了剪力墙的承载力、延性、刚度及其退化、滞回特性、耗能能力及破坏特征.建立了新型钢管混凝土边缘约束叠合剪力墙的承载力计算模型,计算结果与实测结果吻合较好.研究表明:新型钢管混凝土边缘约束叠合剪力墙结合了钢筋混凝土剪力墙侧向刚度和承载力大与钢管混凝土边缘约束延性好的优势,其承载力、刚度和耗能能力较现浇钢筋混凝土剪力墙有所提高;在所试验的参数范围内,高厚比对剪力墙的力学性能影响不大.

关键词:钢管混凝土;叠合剪力墙;拟静力试验;高厚比;抗震性能

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Experimental Study on the Seismic Behavior of Concrete Filled Tube-confined Sandwich Shear Walls

HOU Hetao^{1,2}, CHENG Jirun¹, QU Zhe^{2†}, FU Weiqi¹, QU Bing¹,
CUI Shiqi³, SHI Lei³, ZHU Wencan¹, MA Tianxiang¹

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Sanhe 065201, China;

3 Shandong Academy of Building Research, Jinan 250031, China)

Abstract: To study the seismic performance of a new concrete filled tube-confined sandwich shear wall (CFT-SSW), cyclic loading tests were carried out on three CFT-SSW specimens with different depth-thickness ratios and one conventional concrete shear wall specimen for comparison. The load-carrying capacity, ductility, stiffness and their degradation, hysteretic and energy dissipation characteristics, and failure modes of the specimens were investigated and compared. Equations for prediction of the strength of CFT-SSWs were also proposed. The calculated strengths were in good agreement with the test results. The results show that CFT-SSWs exhibited both the high lateral stiffness and strength due to reinforced

* 收稿日期:2016-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478441,51578324), National Natural Science Foundation of China(51478441,51578324);山东省墙材革新与建筑节能科研开发项目(鲁财建指(2014)139号), The 2014 Research Program of Shandong Province for Developing Inno-vative Wall Materials and Energy-Saving Construction Technology Under Award No. 139;山东省自然科学基金资助项目(ZR2016EEM07), Shandong Provincial Natural Science Foundation of China Under Award(ZR2016EEM07)

作者简介:侯和涛(1970-),男,山东临沂人,山东大学副教授,硕士生导师

† 通讯联系人, E-mail: quz@iem. ac. cn

concrete shear walls and the superior ductility due to concrete filled tubes. The strength, ductility, and stiffness of CFT-SSW specimens were greater than those of the cast-in-situ concrete shear wall specimens. In addition, the depth-thickness ratio has only marginal effects on the seismic behavior of the CFT-SSWs within the test range of the current tests.

Key words: concrete filled steel tube; sandwich shear wall; quasi-static test; depth-thickness ratio; seismic behavior

随着我国建筑产业现代化的发展,高层建筑(特别是高层住宅)中预制剪力墙的应用较为广泛.国内预制钢筋混凝土剪力墙的研究主要针对全预制混凝土剪力墙、半预制混凝土剪力墙以及叠合式剪力墙,开展了大量的试验研究和数值分析,并对装配式剪力墙进行了抗震性能试验研究,得到了大量装配式剪力墙的抗震性能试验数据^[1-5].蒋庆等提出了叠合式剪力墙的力学计算模型并对其进行耗能分析,计算结果与实测结果符合良好^[6-7];叶献国等对叠合板式剪力墙进行了水平承载力试验研究、抗震性能试验分析、不同轴压比下抗震性能试验分析,并取得了大量试验数据^[8-10];文献[11]中对边缘约束构件内配置圆钢管的剪力墙进行了拟静力试验,研究了边缘约束构件的配箍率和轴压比对其抗震性能的影响;其他学者关于钢管混凝土边缘约束构件的研究也取得了不少成果^[12-17].本文引入钢管混凝土作为叠合剪力墙的边缘约束构件,形成新型的带钢管混凝土边缘约束的叠合剪力墙(Concrete Filled Tube-confined Sandwich Shear Wall 简称 CFT-SSW).CFT-SSW的竖向钢筋可以搭接连接,省去了钢筋套筒,水平钢筋直接与钢管焊接,两侧的预制混凝土面板与钢管在工厂预制而成;钢管和混凝土板运抵现场吊装就位固定后,可以直接浇注混凝土,节省了大量的人工与模板支设工作,降低了成本.目前,对于叠合墙和 CFT 边缘约束构件的研究比较多,但尚没有对于 CFT-SSW 的研究文献,其抗震性能有待研究.

1 试验概况

1.1 试件制作

设计制作了 4 片剪力墙试件,包括 1 片现浇剪力墙 SW-1 和 3 片 CFT-SSW 墙 SW-2, SW-3 和 SW-4.试件高度均为 3 000 mm,宽度为 1 200 mm,水平荷载加载点距离剪力墙底面 2 850 mm,剪跨比为 2.38,试验轴压比为 0.15,墙身厚度分别为 160,

200 和 250 mm.墙身钢筋均为 HRB400 级变形钢筋,水平向配筋率为 0.41%,竖向配筋率为 0.57%;SW1 端部暗柱纵筋配筋率 2.01%,箍筋体积配箍率 0.91%;SW-2, SW-3 和 SW-4 的端部钢管分别为:160 mm×200 mm×4 mm,200 mm×200 mm×4.5 mm,250 mm×200 mm×5 mm,均采用 Q235B 钢材,预制与现浇混凝土均为 C30. CFT-SSW 的两块预制混凝土面板间采用 2 mm 厚的 Q235B 钢板拉结带,钢板拉结带中间开 40 mm 直径圆孔,以使两侧现浇混凝土连通,增强整体性.试件的几何尺寸、配筋和构造如图 1 所示.

1.2 加载装置及加载方式

试验于中国地震局工程力学研究所恢先地震工程综合实验室进行.首先进行预加载使试件各部分充分接触并检查仪器的可靠性,然后分 2,3 次加载至预定的轴压力,并使轴压力在整个试验过程中保持恒定.采用 1 000 kN 电液伺服作动器施加水平荷载.试验过程中采用钢板折架进行面外约束,钢板折架可方便地与试验体或其加载装置紧密连接而不留缝隙,能够有效地限制面外变形的发展^[18].试验加载装置见图 2.

试验加载采用位移控制,加载制度如图 3 所示.采用 7 级加载,具体的加载位移取值如下.预加载:层间位移角(D_1/HD_1 为试件的顶点位移; H 为试件的净高度, $H=2 850$ mm.)为 1/2 000,循环 1 次;剪力墙结构弹性层间位移角限值 1/1 000,循环 2 次;框架结构弹性层间位移角限值 1/550,循环一次;日本抗震设计第一水准层间位移角限值 1/200,循环一次;剪力墙结构弹塑性层间位移角限值 1/120,循环 2 次;框架结构弹塑性层间位移角限值 1/50,循环一次;层间位移角 1/30,循环一次.以观察到墙体下端截面出现肉眼可见的裂缝确定为开裂荷载 F_c ,采用基于等效弹塑性屈服法确定屈服荷载 F_y ,以骨架曲线上荷载的峰值点作为峰值荷载 F_m ,以峰值荷载的 85% 作为极限荷载 F_u 对应的位移作为极限位移.

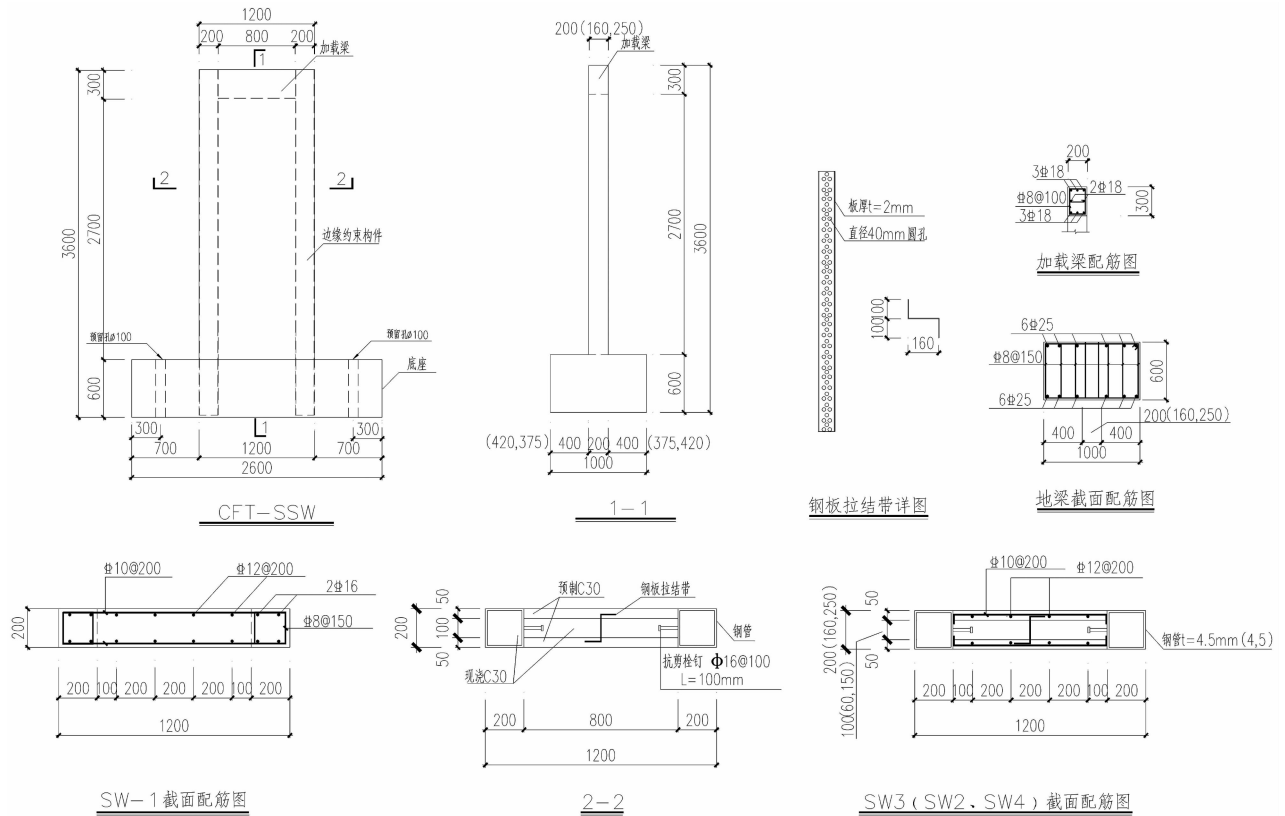


图 1 试件的几何尺寸、配筋和构造(mm)

Fig. 1 Dimensions reinforcement and detailing of specimens(mm)

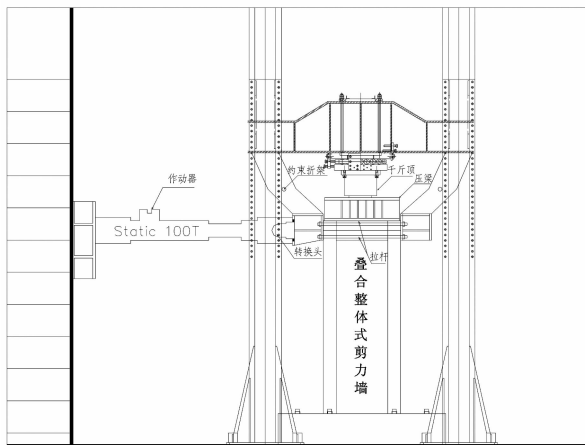


图 2 试验加载简图
Fig. 2 Loading setup of test

1.3 位移测量

位移计布置如图 4 所示.

在加载梁中部布置水平位移计 D1,以测量整个墙体的水平位移;在墙体中部沿着作动器方向布置水平位移计 D2,以测量剪力墙的水平位移;在地梁的中部布置位移计 D3,D4,以监控剪力墙底座是否发生滑动;在地梁的上部布置位移计 D5,D6,

以监控地梁的转动滑移.

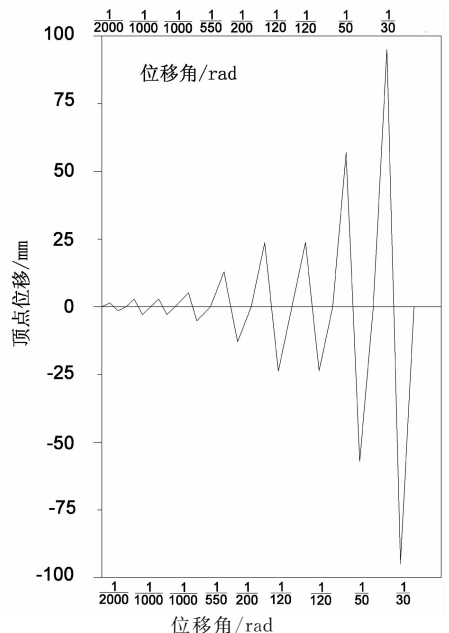


图 3 加载程序
Fig. 3 Loading process

1.4 材性试验

实测 C30 混凝土预制部分的立方体抗压强度平均值 47.6 MPa,现浇部分 33.81 MPa,HRB400

钢筋和 Q235B 钢板的力学性能实测值见表 1.

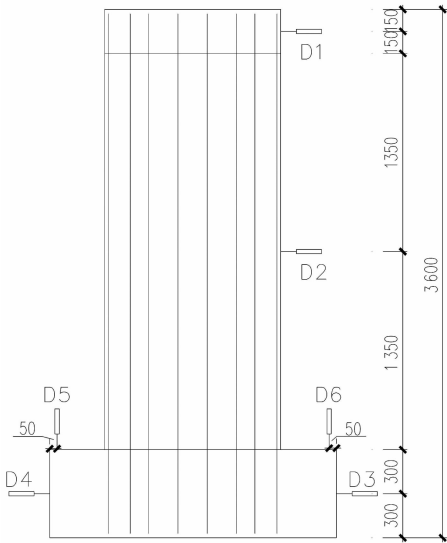


图 4 位移计布置图

Fig. 4 The arrangement diagram of displacement meter

表 1 材料力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of materials

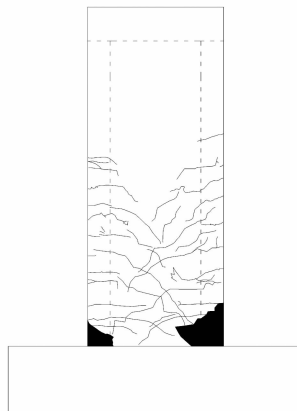
强度等级	直径(厚度)/mm	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	弹性模量 / 10^5 MPa
HRB400	Φ8	481.02	615.85	2.03
HRB400	Φ10	469.50	621.00	2.05
HRB400	Φ12	465.54	580.33	1.97
Q235B	4	292.71	406.50	1.95
Q235B	4.5	306.87	432.89	1.97
Q235B	5	272.81	393.27	2.05

2 试验现象及破坏模式

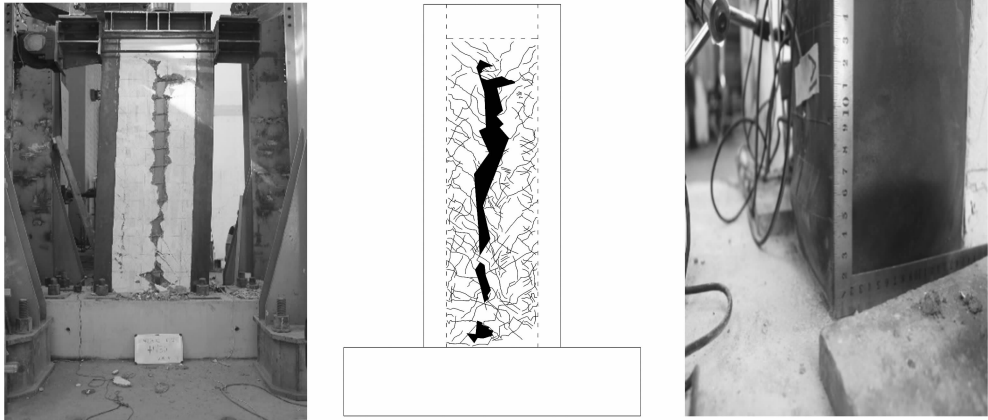
现浇混凝土剪力墙 SW-1 的裂缝数量相对较少,裂缝主要分布在墙高的 1/2 以下,当水平荷载较

小时,试件保持为弹性,未出现明显裂缝.当顶点位移角为 1/610 (对应的水平力为 245.75 kN)左右时,首先在剪力墙右下部与暗柱的交界处观察到明显的水平裂缝,如图 5(a)所示;随着荷载增大,裂缝逐渐向墙身扩展,当顶点位移角为 1/200 (对应的水平力为 424.97 kN)左右时,裂缝变宽加深,底部水平裂缝最宽达到 0.30 mm,裂缝由剪力墙左下部与暗柱的交界处沿墙体高度方向延伸;当顶点位移角为 1/120 时,墙身底座混凝土出现碎落迹象,墙身裂缝增多,且集中分布于墙身下半部分;当顶点位移角为 1/75 时,荷载达到峰值荷载 431.71 kN;当顶点位移角为 1/68 时,荷载下降至极限承载力,同时墙身底部两端的混凝土剥落严重,受力钢筋弯曲外露,试验结束,试件主要发生弯曲型破坏.

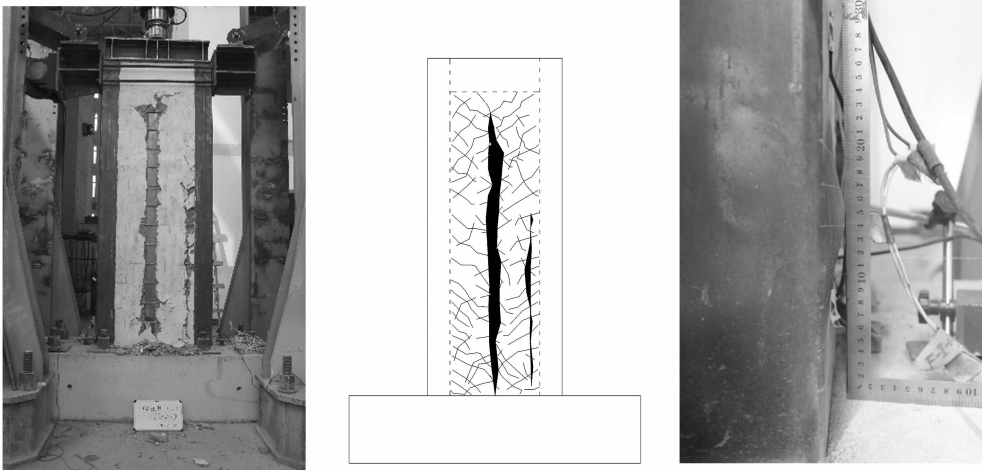
SW-2 加载初期未出现裂缝,当位移角为正向 1/550 时,距地梁顶面 250 mm 高处出现肉眼可见的水平裂缝;当位移角为正向 1/120 时,达到峰值承载力 561.68 kN,此时裂缝已基本贯穿整个剪力墙;当顶点位移角为正向 1/50 时,试件承载力急剧下降,试件裂缝数量急剧增加,布满整个混凝土剪力墙.当试件承载力下降到峰值承载力的 85%,即 477.42 kN 时,极限位移角约为 1/49.6,试件发生弯曲破坏.在 CFT-SSW 中,为了增强外侧预制混凝土面板之间的拉结,在剪力墙中央沿竖向增设贯穿墙高的 Z 形钢板拉结带,当位移角为正向 1/200 时,沿该钢板拉结带自下而上形成细小裂缝;当顶点位移角为正向 1/120 时,钢板拉结带裂缝加宽,最大裂缝宽度达到 0.2 mm,形成一条竖向裂缝带并有少量混凝土剥落;当位移角为正向 1/50 时,沿钢板拉结带有大面积混凝土脱落;当位移角为正向 1/30 时,钢板拉结带处混凝土整体脱落,钢板拉结带外露. SW-3 和 SW-4 的破坏现象与 SW-2 基本相同,破坏以弯曲型破坏为主,并伴随钢板拉结带处的竖向裂缝.



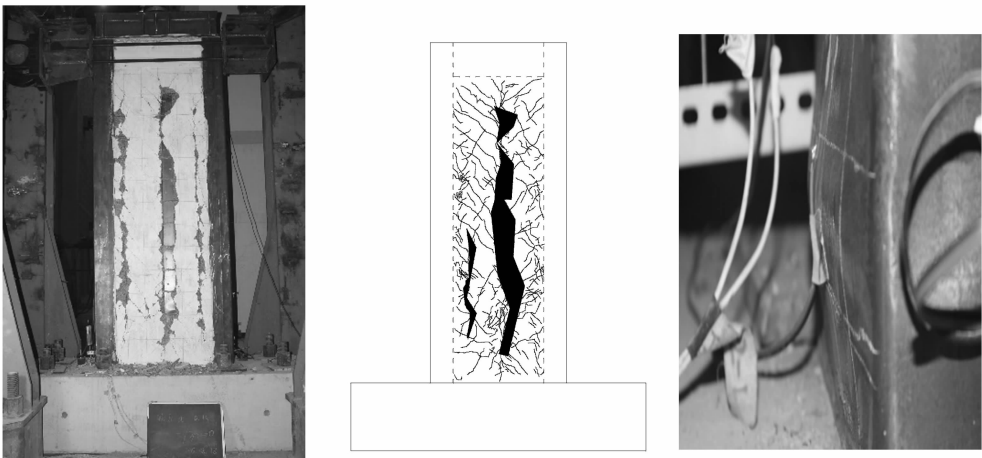
(a)SW-1 破坏形式与裂缝分布



(b)SW-2 破坏形式与裂缝分布、钢管外鼓



(c)SW-3 破坏形式与裂缝分布、钢管外鼓



(d)SW-4 破坏形式与裂缝分布、钢管外鼓

图 5 试件的破坏形式与裂缝分布、钢管外鼓

Fig. 5 Photographs of specimens after failure and crack patterns, steel tube bulge

在本文试验中,CFT-SSW 中混凝土墙身的裂缝分布与现浇混凝土剪力墙(SW-1)有较大差异,主要表现为裂缝数量相对较多,分布范围广,几乎遍布整个钢管混凝土剪力墙,这主要与 Z 形钢板拉结带的构造有关;由于 Z 形钢板拉结带贯穿墙身全高,Z 形钢板附近成为墙身的薄弱环节,因而混凝土墙身

沿着 Z 形钢板拉结带发生严重破坏,尽管如此,从图 5 的照片可以看出 CFT-SSW 中的钢管已经发生了外鼓,外鼓位移达到 15~20 mm,说明除了 Z 形板处薄弱层的破坏外,CFT-SSW 的破坏仍主要集中在试件底部,为弯曲破坏.在随后的研究中,应注意改进预制混凝土板的拉结构造,避免形成明显的

薄弱部位。

3 试验结果与分析

3.1 承载力与位移

试件的承载力与相应的位移见表 2。由表 2 可以看出,CFT-SSW 的开裂荷载均大于现浇混凝土剪力墙;屈服荷载和极限荷载也有明显提高;3 个 CFT-SSW 试件的延性系数 m 比现浇混凝土剪力墙

分别提高了 37.41%,38.55% 和 38.78%;3 个 CFT-SSW 试件的延性系数 m' 比现浇混凝土剪力墙分别提高了 36.15%,29.39% 和 40.54%; 屈强比也均比现浇混凝土剪力墙小,说明从明显屈服阶段到极限荷载阶段的发展过程很长,这对于实现“大震不倒”的抗震性能目标是有利的。SW-2 与 SW-1 相比,极限位移角为 1/50 时,水平荷载明显高于 SW-1;在配钢率相同的条件下,CFT-SSW 随着高厚比的减小,承载力逐渐增大。

表 2 试验结果
Tab. 2 Testing result

试件编号	F_c	Δ_c	F_y	Δ_y	F'_y	Δ'_y	F_m	Δ_m	F_u	Δ_u	μ	μ'	θ_u	μ_{ym}
SW-1	245.75	4.65	366.58	14.09	374.21	14.02	418.86	23.53	357.17	41.43	2.94	2.96	1/69	0.88
SW-2	266.79	4.57	484.58	14.21	489.89	14.24	561.68	23.67	477.46	57.42	4.04	4.03	1/50	0.86
	(1.09)	(0.98)	(1.32)	(1.01)	(1.31)	(1.02)	(1.34)	(1.01)	(1.34)	(1.39)	(1.37)	(1.36)	(1.38)	(0.98)
SW-3	293.76	7.10	515.73	14.05	525.39	14.95	632.34	23.53	537.90	57.23	4.07	3.83	1/50	0.82
	(1.20)	(1.53)	(1.41)	(1.00)	(1.40)	(1.07)	(1.51)	(1.00)	(1.51)	(1.38)	(1.39)	(1.29)	(1.38)	(0.93)
SW-4	397.52	6.13	578.69	14.07	596.93	13.80	691.27	23.26	587.58	57.39	4.08	4.16	1/50	0.84
	(1.62)	(1.32)	(1.58)	(1.00)	(1.60)	(0.98)	(1.65)	(0.99)	(1.65)	(1.39)	(1.39)	(1.41)	(1.38)	(0.95)

注: F_y, Δ_y 分别表示由最远点法确定的屈服荷载、屈服位移; $\mu = \Delta_u / \Delta_y$; $\mu' = \Delta_u / \Delta'_y$; $\theta_u = \Delta_u / H$, H 为测点距离墙底的截面高度; $\mu_{ym} = F_y / F_m$; 括号内的数字为 CFT-SSW 与现浇试件 SW-1 的比值。

3.2 滞回曲线

各试件的水平荷载-位移角滞回曲线如图 6 所示, SW-1 在屈服前,滞回环狭长,滞回环面积很小;试件屈服后,滞回环面积明显增大,并在加载后期滞回环有向

反 S 形过渡的趋势,滞回环出现一定程度的捏拢现象。试件 SW-2, SW-3 和 SW-4 的滞回曲线也表现出比较明显的捏拢现象,此处由于 Z 形板的不良构造,对 CFT-SSW 的耗能能力造成了一定的影响。

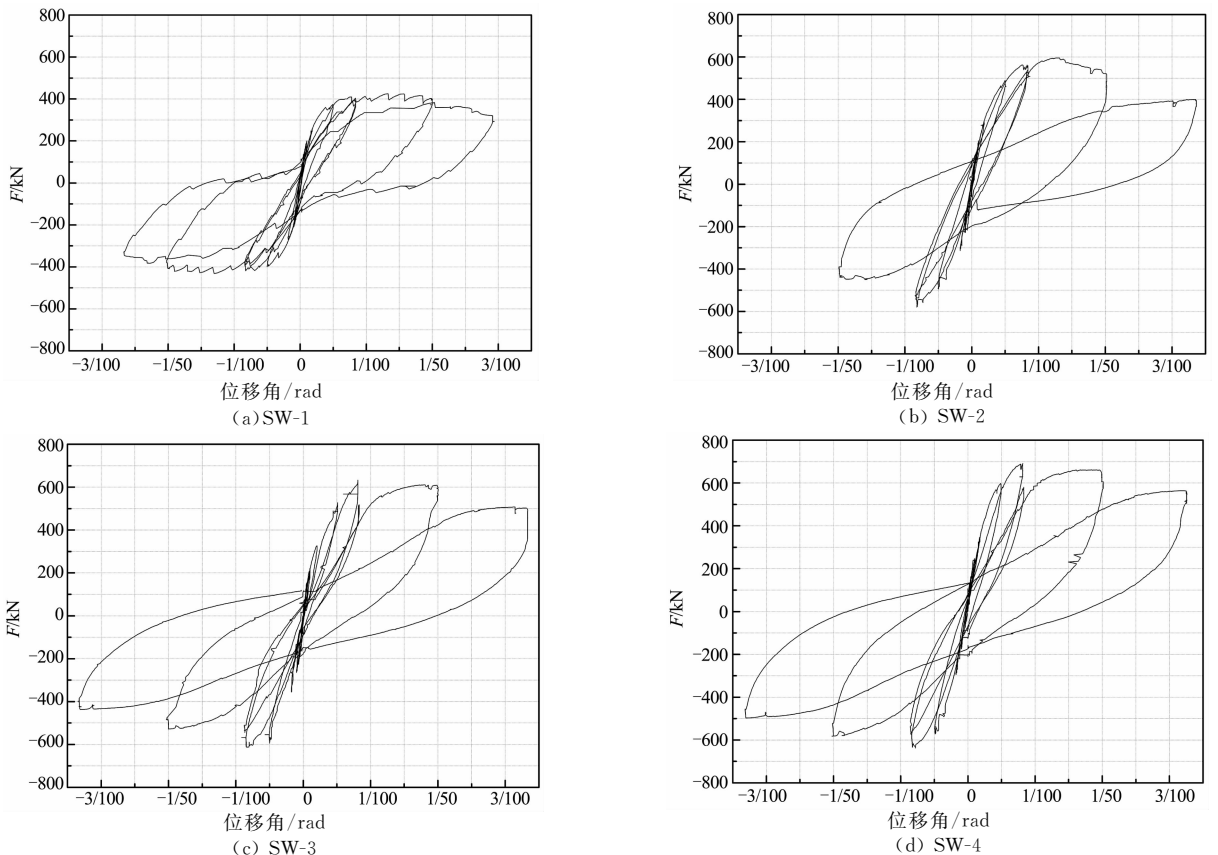


图 6 试件的滞回曲线
Fig. 6 Hysteretic responses of specimens

3.3 骨架曲线

根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101-96)规定,图 7 给出了骨架曲线特征点的确定方法,定义结构的极限荷载 $F_u=0.85F_m$, 相应的位移为极限位移 Δ_u ; 图 8 给出了一种屈服点定义的简化方法,最远点法:曲线上距离原点和峰值点连线最近的点为屈服点;如果有多个点,一般可按照这些点的荷载取平均,对应到曲线上得到屈服点. 图 8 中在构件力-变形曲线上,以原点与峰值点连线的平行线与力-变形曲线的切点为屈服点,且要求平移的距离 d 值不得过小,当有多个切点时一般取 d 值最大的点为屈服点:

$$(F_{ys}, \Delta_{ys}) = \max_{(F_{ys}, \Delta_{ys})=(F, \Delta)} d = \frac{|F_p \cdot \Delta - \Delta_p \cdot F|}{\sqrt{F_p^2 + \Delta_p^2}}$$

式中: (F, Δ) 为构件力-变形曲线上任一点坐标; (F_{ys}, Δ_{ys}) 为由最远点法确定的屈服点坐标; (F_p, Δ_p) 为峰值点坐标,且有 $0 \leq \Delta \leq \Delta_p$, 且根据滞回曲线得到的各试件骨架曲线如图 9 所示.

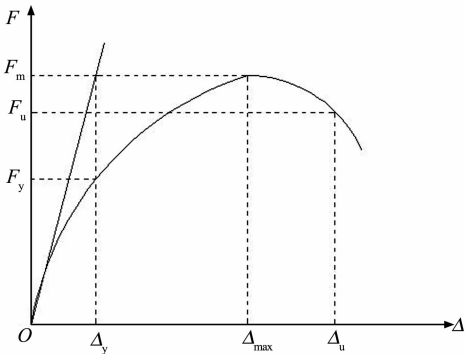


图 7 确定构件屈服点的规程方法
Fig. 7 Determination of feature points

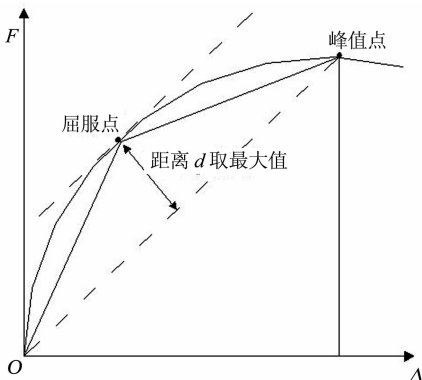


图 8 确定构件屈服点的最远点法
Fig. 8 Farthest point method for determination of yield points of members

由图 9 可见,各试件初始刚度基本一致,墙体开裂前,骨架曲线基本为直线,开裂后,墙体的刚度开始出现明显的下降,墙体进入弹塑性工作阶段,墙体刚度降低,荷载增长减缓,达到峰值荷载后,曲线开始下降. SW-2, SW-3 和 SW-4 的峰值荷载均高于 SW-1, 分别提高了 34.10%, 50.97% 和 65.04%.

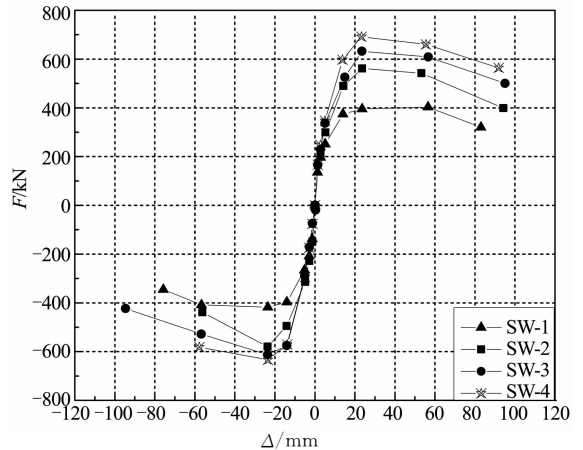


图 9 试件的骨架曲线
Fig. 9 Skeleton curves of specimens

采用文献[13]中的钢管混凝土边框组合剪力墙承载力计算方法,计算模型见图 10, 计算公式如下.

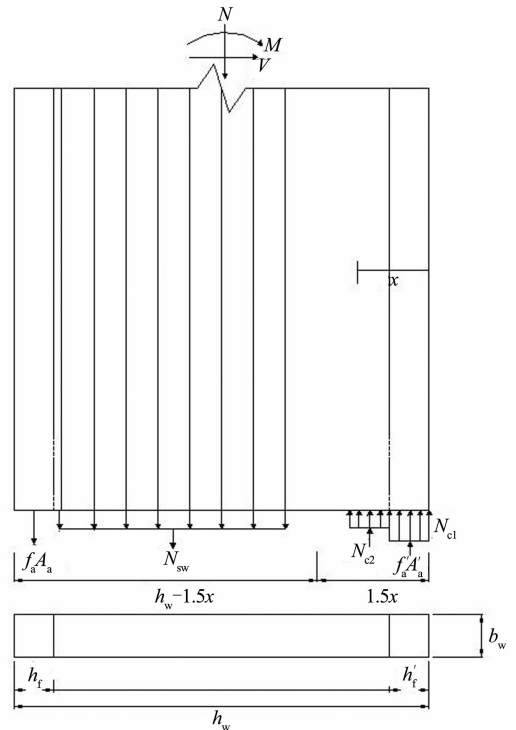


图 10 承载力计算模型
Fig. 10 Mechanical model of capacity

根据平截面假定,当 $x \leq h_{w0}$ 时,墙体为大偏心受压破坏,经检验,本文的 CFT-SSW 均为大偏心受

压破坏,计算时受压区钢筋达到屈服应力,在中和轴附近的钢筋应力较小,不计入,只计算 $h_w - 1.5x$ 范围内的受拉钢筋. 根据平衡条件可得到式(1)、式(2)如下.

$$N = f'_a A'_a + N_{c1} + N_{c2} - f_a A_a - N_{sw} \quad (1)$$

$$N \left(e_0 - \frac{h_w}{2} + \frac{h'_f}{2} \right) = f_a A_a \left(\frac{h_f}{2} - \frac{h'_f}{2} \right) + N_{sw} \left(\frac{h_w - h'_f - h_f}{2} + \frac{3x}{4} \right) - N_{c2} \frac{x}{2} \quad (2)$$

$$N_{sw} = f_{yw} b_w \rho_w (h_w - 1.5x - h_f) \quad (3)$$

$$N_{c2} = f_c b_w (x - h'_f) \quad (4)$$

$$N_{c1} = \alpha f_c A_c \quad (5)$$

式中: x 为混凝土受压区高度; f_{yw} 为墙体竖向分布筋屈服强度; f_a, f'_a 分别为钢管混凝土边框柱受拉、受压钢管的屈服强度; A_a, A'_a 分别为钢管混凝土边框柱中受拉、受压钢管的面积; A_c 为钢管混凝土边框柱中混凝土的面积; f_c 为混凝土轴心受压强度; α 为钢管内混凝土强度提高系数,取值为 1.2; N 为轴力; h_{wo}, h_w, b_w 分别为截面的有效高度、截面的总高度和墙板厚度; h_f, h'_f 为钢管混凝土边框柱截面高度; e_0 为偏心距, r_w 为剪力墙竖向分布筋配筋率.

试件水平承载力可按式(6)计算.

$$F = (N e_0) / H \quad (6)$$

式中: $e_0 = M / N, M$ 为截面的弯矩设计值; H 为试件水平加载点至基础顶面的距离.

取混凝土和钢筋实测强度进行计算,各试件峰值承载力实测值和计算值见表 3.

表 3 各剪力墙承载力计算值与实测值

Tab. 3 Comparison of experimental and calculated results of maximum strength

试件	实测值	计算值	相对误差/%
SW-1	418.86	—	—
SW-2	561.68	551.97	2
SW-3	632.34	603.74	5
SW-4	691.27	654.90	6

由表 3 可见,CFT-SSW 的承载力计算值与实测值相差 2%~6%,两者吻合较好.

3.4 刚度退化

刚度退化曲线上的特征点包括初始点、开裂点、屈服点、峰值点和极限点,根据剪力墙衰减的 3 个阶段,试件的初始弹性刚度、开裂点割线刚度、屈服点割线刚度、峰值点割线刚度和极限点割线刚度退化与位移关系见图 11. 可见各个试件的刚度退化过程类似,随着位移的增加,试件的刚度降低,钢管混凝土

土边缘约束剪力墙的刚度始终大于现浇混凝土剪力墙.

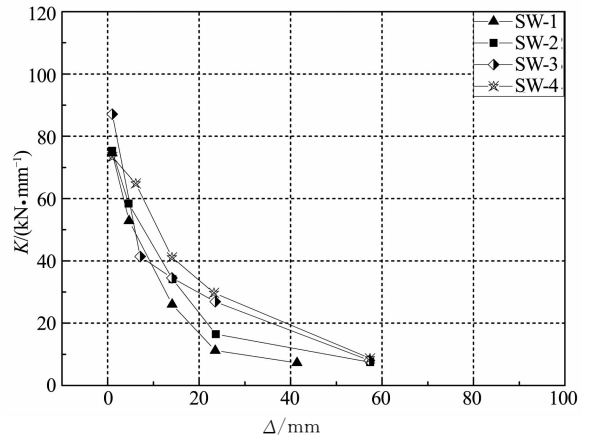


图 11 刚度退化曲线

Fig. 11 Rigidity degradation curves

3.5 耗能能力

本文采用等效黏滞阻尼系数 ξ_e 来评价结构的耗能能力. 以图 12 为例,滞回环的等效黏滞阻尼系数

$$\xi_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{\Delta OBE} + S_{\Delta ODF}} \quad (7)$$

试件的耗能能力如表 4 所示. 在峰值荷载时,SW-1 的等效黏滞阻尼系数为 0.382,与 SW-2 (0.384) 相当,但大于 SW-3 (0.370) 和 SW-4 (0.372),此时 SW-1 的耗能能力稍优于 CFT-SSW;在极限荷载时,CFT-SSW 的等效黏滞阻尼系数均大于 SW-1,此时 CFT-SSW 的耗能能力优于 SW-1;高厚比对试件耗能能力影响不大,3 个试件等效黏滞阻尼系数之间的偏差不超过 10%.

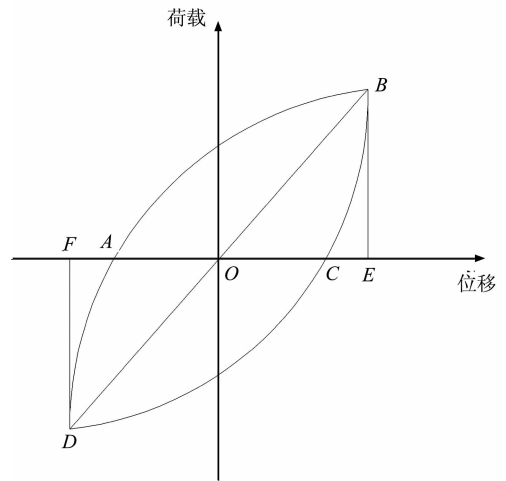


图 12 能量耗散指标的确定

Fig. 12 Determination for energy dissipated coefficient

表4 试件的等效黏滞阻尼系数
Tab.4 Equivalent viscous damping coefficient of specimens

试件编号	SW1		SW2		SW3		SW4	
状态	峰值	极限	峰值	极限	峰值	极限	峰值	极限
位移比 Δ/Δ_y	23.53	41.43	23.67	57.42	23.53	57.23	23.26	57.39
单个加载循环耗能/(N·m)	21 576	61 417	30 654	67 115	31 312	72 474	33 520	79 602
累积滞回耗能/(N·m)	120 679		151 099		164 691		165 652	
等效黏滞阻尼系数 ξ_e	0.382	0.397	0.384	0.440	0.370	0.398	0.372	0.403

4 结 论

通过本文的试验和相关讨论分析,可以得到以下结论。

1)现浇混凝土短肢剪力墙的裂缝主要分布在墙高的1/2以下,破坏发生在墙体底部,以弯曲破坏为主;CFT-SSW的裂缝虽然几乎贯穿整个墙体,但其破坏仍以底部的弯曲破坏为主。

2)CFT-SSW结合了钢筋混凝土剪力墙侧向刚度和承载力大与钢管混凝土边缘约束延性好的优势,其承载力、刚度和延性均较现浇钢筋混凝土剪力墙有所提高。

3)在所试验的参数范围内,高厚比对剪力墙的力学性能影响不大,通过现有的计算公式,可以比较准确地估算CFT-SSW的承载力。

参考文献

- [1] 初明进,刘继良,崔会趁,等.不同构造竖缝的装配式空心模板剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(1):13-22.
CHU Mingjin, LIU Jiliang, CUI Huichen, *et al.* Experimental study on seismic behaviors of assembled monolithic concrete shear walls built with precast two-way hollow slabs with various details[J]. Journal of Building Structures, 2014,35(1):13-22. (In Chinese)
- [2] 初明进,刘继良,崔会趁,等.装配整体式双向孔空心模板剪力墙受剪性能试验研究[J].工程力学,2013,30(7):219-229.
CHU Mingjin, LIU Jiliang, CUI Huichen, *et al.* Experimental study on shear behaviors of assembled monolithic concrete shear walls built with precast two-way hollow slabs[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(7):219-229. (In Chinese)
- [3] 刘家彬,陈云钢,郭正兴,等.竖向新型连接装配式剪力墙抗震性能试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2014,41(4):16-24.
LIU Jiabin, CHEN Yungang, GUO Zhengxing, *et al.* Test on

the seismic performance of precast shear wall with vertical reinforcement lapping in Pore-forming on steel plate[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014,41(4):16-24. (In Chinese)

- [4] 薛伟辰,古徐莉,胡翔,等.螺栓连接装配整体式混凝土剪力墙低周反复试验研究[J].土木工程学报,2014,47(S2):221-226.
XUE Weichen, GU Xuli, HUXiang, *et al.* Experimental study of assembled monolithic concrete shear wall with bolted connection under low reversed cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2014,47(S2):221-226. (In Chinese)
- [5] 朱张峰,郭正兴,汤磊,等.考虑不同预拉力的新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(11):41-48.
ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing, TANG Lei, *et al.* Seismic performance experiments on new hybrid precast concrete shear walls under different prestress forces[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015,42(11):41-48. (In Chinese)
- [6] 蒋庆,叶献国,种迅.叠合板式剪力墙的力学计算模型[J].土木工程学报,2012,45(1):8-13.
JIANG Qing, YE Xianguo, CHONG Xun. Calculation model for superimposed slab shear walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2012,45(1):8-13. (In Chinese)
- [7] 蒋庆,叶献国,连星,等.叠合板式剪力墙的耗能分析[J].江苏大学学报:自然科学版,2010,31(4):483-487.
JIANG Qing, YE Xianguo, LIAN Xing, *et al.* Analysis on energy dissipation of super imposed slab shear walls[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science, 2010,31(4):483-487. (In Chinese)
- [8] 叶献国,张丽军,王德才,等.预制叠合板式混凝土剪力墙水平承载力实验研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2009,32(8):1215-1218.
YE Xianguo, ZHANG Lijun, WANG Decai, *et al.* Experimental study on horizontal carrying capacity of super imposed slab shear walls[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2009,32(8):1215-1218. (In Chinese)
- [9] 连星,叶献国,王德才,等.叠合板式剪力墙的抗震性能试验分

- 析[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2009, 32(8): 1219—1223.
- LIAN Xing, YE Xianguo, WANG Decai, *et al.* Experimental analysis of seismic behavior of super imposed slab shear walls [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2009, 32(8): 1219—1223. (In Chinese)
- [10] 任军, 叶献国. 不同轴压比下叠合板式剪力墙的抗震性能研究 [J]. 结构工程师, 2010, 26(5): 66—72.
- REN Jun, YE Xianguo. Seismic behavior research on the superimposed slab shear walls for different axial-load ratios [J]. Structural Engineers, 2010, 26(5): 66—72. (In Chinese)
- [11] 钱稼茹, 江枣, 纪晓东. 高轴压比钢管混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2010, 31(7): 5—13.
- QIAN Jiaru, JIANG Zao, JI Xiaodong. Experimental study on seismic behavior of steel tube-reinforced concrete composite shear walls with high axial compressive load ratio [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(7): 5—13. (In Chinese)
- [12] 钱稼茹, 魏勇, 赵作周, 等. 高轴压比钢骨混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 43—50.
- QIAN Jiaru, WEI Yong, ZHAO Zuozhou, *et al.* Experimental study on seismic behavior of SRC shear walls with high axial force ratio [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 43—50. (In Chinese)
- [13] 方小丹, 李青, 韦宏, 等. 钢管高强混凝土剪力墙压弯性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(8): 72—81.
- FANG Xiaodan, LI Qing, WEI Hong, *et al.* Experimental study on axial-flexural behavior of shear walls with steel tube-confined high performance concrete [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8): 72—81. (In Chinese)
- [14] 曹万林, 王敏, 王绍合, 等. 矩形钢管混凝土边框组合剪力墙及筒体结构抗震研究 [J]. 工程力学, 2008, 25(S1): 58—70.
- CAO Wanlin, WANG Min, WANG Shaohu, *et al.* Aseismic research of composite shear walls with rectangular concrete filled steel tube columns [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(S1): 58—70. (In Chinese)
- [15] 方小丹, 韦宏, 刘庆辉. 钢管高强混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(9): 1—8.
- FANG Xiaodan, WEI Hong, LIU Qinghui. Experimental study on seismic behavior of shear walls with steel tube-confined high strength concrete [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(9): 1—8. (In Chinese)
- [16] QIAN Jiaru, JIANG Zao, JI Xiaodong. Behavior of steel tube-reinforced concrete composite walls subjected to high axial force and cyclic loading [J]. Engineering Structures, 2012, 36: 173—184.
- [17] HU Hongsong, NIE Jianguo, FAN Jiansheng, *et al.* Seismic behavior of CFST-enhanced steel plate-reinforced concrete shear walls [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 119: 176—189.
- [18] 解晋珍, 曲哲, 王涛. 折架在平面结构试验面外约束中的应用 [C]//第 24 届全国结构工程学术会议论文集(第 I 册), 北京: 工程力学, 2015: 152—156.
- XIE Jinzhen, QU Zhe, WANG Tao. Pantographs for out-of-plane constraints in structural experiments [C]//Proceedings of the Twenty-fourth National Conference on Structural Engineering (Volume I). Beijing: Engineering Mechanics Press, 2015: 152—156. (In Chinese)