

文章编号:1673-2049(2011)03-0023-06

## 圆钢管混凝土边框多重组合低矮 剪力墙的抗震性能

张建伟,杨亚彬,曹万林,董宏英

(北京工业大学 建筑工程学院,北京 100124)

**摘要:**为了解钢管混凝土边框内藏钢桁架剪力墙这种新型多重组合剪力墙的抗震性能,进行了 3 个剪跨比为 1.0 的低矮剪力墙低周反复荷载试验,包括 1 个普通混凝土剪力墙、1 个圆钢管混凝土边框剪力墙和 1 个圆钢管混凝土边框内藏钢桁架剪力墙;对比分析了 3 个低矮剪力墙的实测承载力、延性、刚度及其退化过程、滞回特性、耗能能力及破坏特征;使用简化力学模型计算了各剪力墙的承载力,计算结果与试验结果吻合较好。结果表明:圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙的抗震性能比普通混凝土低矮剪力墙显著提高,比圆钢管混凝土边框低矮剪力墙明显提高。

**关键词:**圆钢管混凝土柱;钢桁架;低矮剪力墙;抗震性能;承载力

**中图分类号:**TU352.1

**文献标志码:**A

## Seismic Performance of Composite Low-rise Shear Wall with Concrete-filled Round Steel Tube Columns and Concealed Steel Trusses

ZHANG Jian-wei, YANG Ya-bin, CAO Wan-lin, DONG Hong-ying

(School of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to ascertain the seismic performance of the proposed new kind of concrete-filled-steel-tube-column shear wall, an experiment was carried out on three low-rise shear walls with a shear-span ratio of 1.0, including one traditional reinforced concrete (RC) shear wall, one composite shear wall with concrete-filled round steel tube columns, and one composite shear wall with concrete-filled round steel tube columns and concealed steel trusses. Based on the data from this experiment, the load-carrying capacity, ductility, stiffness and its attenuation, hysteretic property, energy dissipation and failure characteristic of each shear wall were contrastively analyzed. The calculated results obtained from the simplified mechanical model were in good agreement with those from the experiment. The results show that the seismic performance of the composite shear wall with concrete-filled round steel tube columns and concealed steel trusses is increased significantly over traditional reinforced concrete shear walls, while at the same time, it shows a significant improvement over composite shear walls with concrete-filled round steel tube columns.

**Key words:** concrete-filled round steel tube column; steel truss; low-rise shear wall; seismic performance; load-carrying capacity

收稿日期:2011-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(50878007);北京市科技重大项目(D08050603720000);

北京市教委科技计划重点项目(KZ200910005008)

作者简介:张建伟(1971-),男,河北丰润人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:zhangjw@bjut.edu.cn。

0 引言

近年来大地震频发,引起建筑物大量倒塌,给人类带来了巨大灾难,如何提高建筑物的抗震能力成为社会各界十分关注的问题。在高层建筑结构中,剪力墙及核心筒是抗震的关键构件,往往承担着建筑结构的大部分水平地震作用。但普通钢筋混凝土剪力墙的延性和耗能能力一般较差,对整体结构的抗震十分不利。为了改善剪力墙的抗震性能,各国学者提出了一些新型组合剪力墙,并进行了相应的试验研究与分析<sup>[1-9]</sup>。钢管混凝土边框内藏钢桁架剪力墙,是将钢管混凝土柱和内藏钢桁架剪力墙的优势进行组合,具有多道抗震防线,已在中国的一些大型复杂和超高层建筑中应用。为了解该新型多重组合剪力墙体系中圆钢管混凝土边框低矮墙的抗震性能,本文中笔者进行了 3 个剪力墙模型的低周反复荷载试验研究。

1 模型设计

以某工程核心筒的墙肢为原型,设计了 3 个剪力墙试验模型,模型按 1:5 缩尺,剪跨比为 1.0,轴压比设计值为 0.35,墙体厚 140 mm。模型分别为普通混凝土低矮剪力墙 SW1、圆钢管混凝土边框低矮剪力墙 SW2 和圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙 SW3。SW1 按抗震等级为特一级的剪力墙设计;SW2 边框柱的钢管为直径 159 mm、厚度 3.7 mm 的圆钢管,剪力墙与圆钢管界面使用 Q235 槽形型钢弯成的 U 形连接键(伸入墙 50 mm,墙厚方向 76 mm,高 28 mm)连接,其净间距为 32 mm。SW3 的边框柱和 U 形连接键与 SW2 相同,剪力墙板内设置 X 形钢支撑,钢支撑使用一字形钢板,其截面尺寸为 92 mm×12 mm。钢支撑两端与钢管焊接,钢支撑交叉处用连接板焊接。SW2 和 SW3 的钢管边框顶部均与内藏钢横梁焊接,以便形成钢框架和钢桁架。模型的配筋及配钢如图 1 所示。各模型均使用 C50 商品混凝土浇筑,实测的混凝土立方体抗压强度为 52 MPa,弹性模量为 35 GPa。钢筋及钢管的实测材料力学性能见表 1。

2 测试方案

试验采用低周反复加载方式。水平加载之前,先施加竖向荷载,模型 SW1 为 790 kN,模型 SW2 和 SW3 均为 870 kN,使试件设计轴压比达到 0.35(轴压比计算时将钢管的面积进行折算加以考虑),

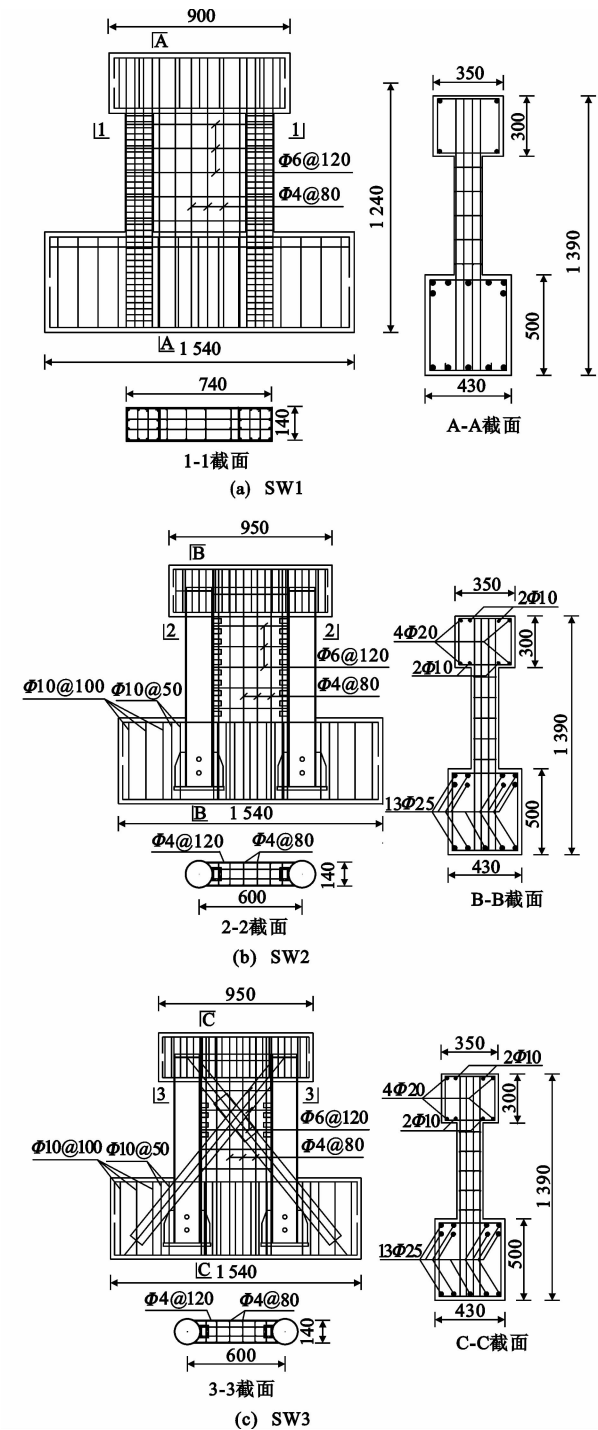


图 1 模型配筋及配钢(单位:mm)  
Fig. 1 Steel Bar and Steel Details of Models (Unit:mm)  
表 1 钢材的力学性能  
Tab. 1 Mechanical Properties of Steel

钢材型号	使用位置	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
3.7 mm 厚钢板	SW2、SW3 钢管	312.33	417.77
12 mm 厚钢板	SW3 钢支撑	365.70	536.37
Φ <sup>b</sup> 4 钢筋	墙体竖向分布钢筋		803.73
Φ <sup>b</sup> 6 钢筋	墙体水平分布钢筋		563.21

并保持其在试验过程中恒定;然后,在距基础顶面 740 mm 高度处施加低周反复水平荷载,并使用电子位移计采集相应高度处的水平位移。试验加载装置见图 2。加载制度采用力与位移联合控制法,试验模型达到屈服荷载前采用水平力控制加载,屈服后采用水平等位移增量控制加载。用 IMP 数据采集系统采集应变、位移以及荷载等数据,并实时绘制“荷载-位移”滞回曲线进行试验监控,并人工描绘混凝土裂缝。

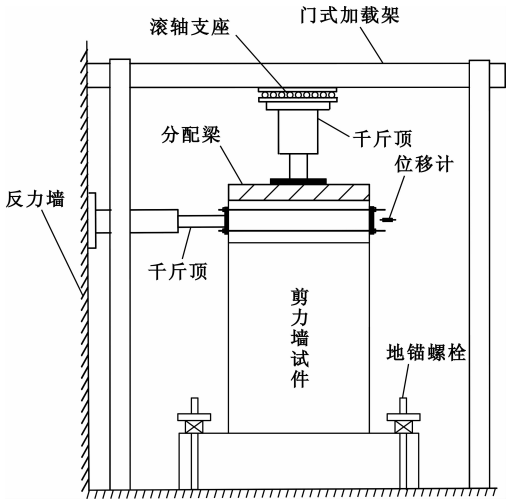


图 2 试验加载装置  
Fig. 2 Test Loading Set-up

### 3 试验结果分析

#### 3.1 承载力

各试验模型的开裂荷载  $F_c$ 、明显屈服荷载  $F_y$ 、极限荷载(峰值荷载)  $F_u$ 、屈强比  $\mu_{yu}$  ( $\mu_{yu} = F_y/F_u$ ) 的实测值见表 2,其中,开裂荷载是指剪力墙板出现第 1 条肉眼可见裂缝时的水平荷载。

表 2 承载力实测值

Tab. 2 Measured Values of Load-carrying Capacities					
模型编号	$F_c/\text{kN}$	$F_y/\text{kN}$	$F_u/\text{kN}$	$F_u$ 相对值	$\mu_{yu}$
SW1	184.64	471.60	553.97	1.000 0	0.851
SW2	239.28	725.52	872.09	1.574 3	0.832
SW3	239.77	935.09	1 167.01	2.106 7	0.801

由表 2 可见:

(1)圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙 SW3 的开裂荷载、明显屈服荷载和极限荷载比普通混凝土低矮剪力墙 SW1 分别提高了 29.86%、98.28%、110.67%,充分说明了该组合剪力墙具有很高的水平承载力。

(2)圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙 SW3 与圆钢管混凝土边框低矮剪力墙 SW2 相比,

开裂荷载接近,明显屈服荷载和极限荷载分别提高了 28.89%、33.82%,说明内藏钢桁架可明显提高钢管混凝土边框低矮剪力墙的水平承载力。

(3)圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙 SW3 的屈强比最小,说明从明显屈服到极限荷载的发展过程相对较长,即有约束的屈服段较长,这有利于实现“大震不倒”的设防目标。

#### 3.2 刚度

各试验模型的初始弹性刚度  $K_o$ 、开裂割线刚度  $K_c$ 、明显屈服割线刚度  $K_y$  及其衰减系数  $\beta_{co}$ 、 $\beta_{yo}$  ( $\beta_{co} = K_c/K_o$ ,  $\beta_{yo} = K_y/K_o$ ,  $\beta_{co}$ 、 $\beta_{yo}$  分别为开裂刚度和屈服刚度衰减系数)实测值见表 3。各试验模型的水平抗侧刚度  $K$  随位移角  $\theta$  增大而衰减的实测曲线见图 3。

表 3 刚度实测值  
Tab. 3 Measured Values of Stiffnesses

模型编号	$K_o/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	$K_c/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	$K_y/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	$\beta_{co}$	$\beta_{yo}$
SW1	797.09	174.19	80.34	0.219	0.101
SW2	1 003.21	284.86	103.35	0.284	0.103
SW3	1 079.38	299.71	116.02	0.278	0.107

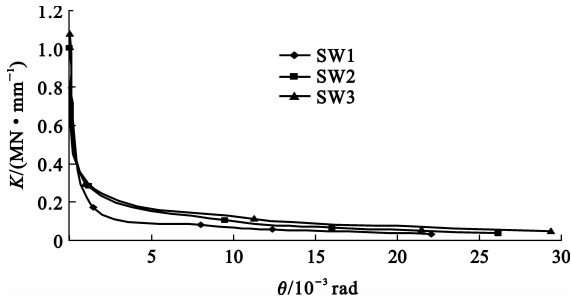


图 3  $K-\theta$  关系曲线  
Fig. 3  $K-\theta$  Relation Curves

由表 3 和图 3 可见:

(1)与普通混凝土低矮剪力墙 SW1 相比,由于组合剪力墙边缘构件配钢率和有无钢支撑的影响,圆钢管混凝土边框低矮剪力墙 SW2 和圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙 SW3 的初始弹性刚度明显提高,其中,SW2 提高了 25.86%,SW3 提高了 35.42%;开裂刚度显著提高,SW2 提高了 63.53%,SW3 提高了 72.06%;屈服刚度明显提高,SW2 提高了 28.64%,SW3 提高了 44.41%。

(2)与普通混凝土低矮剪力墙 SW1 相比,组合剪力墙开裂后,由于钢管混凝土边框柱和钢支撑的强有力约束作用,裂缝开展受到很大的限制,裂缝宽度细且发展缓慢,使得其开裂刚度衰减明显减慢,即圆钢管混凝土边框低矮剪力墙 SW2 和圆钢管混凝土

土边框内藏钢桁架低矮剪力墙 SW3 的开裂刚度衰减系数  $\beta_{co}$  值明显较大;另外,圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙 SW3 的屈服刚度衰减系数  $\beta_{yo}$  值相对较大,说明在加载后期阶段,内藏钢支撑的存在不仅能约束剪切斜裂缝的开展,还能为钢桁架自身提供一定的刚度,使得低矮剪力墙刚度衰减速度相对较慢,从而使得其后期力学性能相对于普通混凝土剪力墙和圆钢管混凝土边框剪力墙稳定,这对抗震是有利的。

3.3 延 性

各试验模型不同阶段的水平位移及延性系数实测值见表 4,其中,开裂位移  $U_c$  是试验模型加载至开裂荷载  $F_c$  时其加载高度位置处的水平位移;屈服位移  $U_y$  是加载至屈服荷载  $F_y$  时的水平位移;弹塑性最大位移  $U_d$  是加载至极限荷载(峰值荷载)  $F_u$  后,荷载下降至极限荷载的 85% 时所对应的水平位移;延性系数  $\mu=U_d/U_y$ 。

表 4 水平位移及延性系数实测值

Tab. 4 Measured Values of Horizontal Displacements and Ductility Coefficients

模型编号	$U_c/\text{mm}$	$U_y/\text{mm}$	$U_d/\text{mm}$	$U_d$ 相对值	$\mu$	$\mu$ 相对值
SW1	1.06	5.87	18.50	1.000 0	3.05	1.000 0
SW2	0.84	7.02	25.66	1.387 0	3.66	1.200 0
SW3	0.80	8.06	30.86	1.668 1	3.83	1.255 7

由表 4 可见:

(1)SW3 的弹塑性最大位移  $U_d$  比 SW1 提高了 66.81%,比 SW2 提高了 38.70%,说明圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙的弹塑性变形能力比普通混凝土低矮剪力墙显著提高,比圆钢管混凝土边框低矮剪力墙明显提高。

(2)SW3 的延性系数较大,比 SW1 提高了 25.57%,比 SW2 提高了 4.64%,说明圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙的延性明显好于普通混凝土低矮剪力墙,并且略好于圆钢管混凝土边框低矮剪力墙。

3.4 滞回特性

各试验模型的实测荷载-位移滞回曲线见图 4。由图 4 可见:与普通混凝土低矮剪力墙 SW1 相比,圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙 SW3 和圆钢管混凝土边框低矮剪力墙 SW2 的滞回环饱满,中部捏拢轻。SW3 的滞回环饱满程度达到了较理想的水平,表明其具有很好的抗震能力。

3.5 耗 能

结构构件的耗能能力可由其滞回环所包含面积

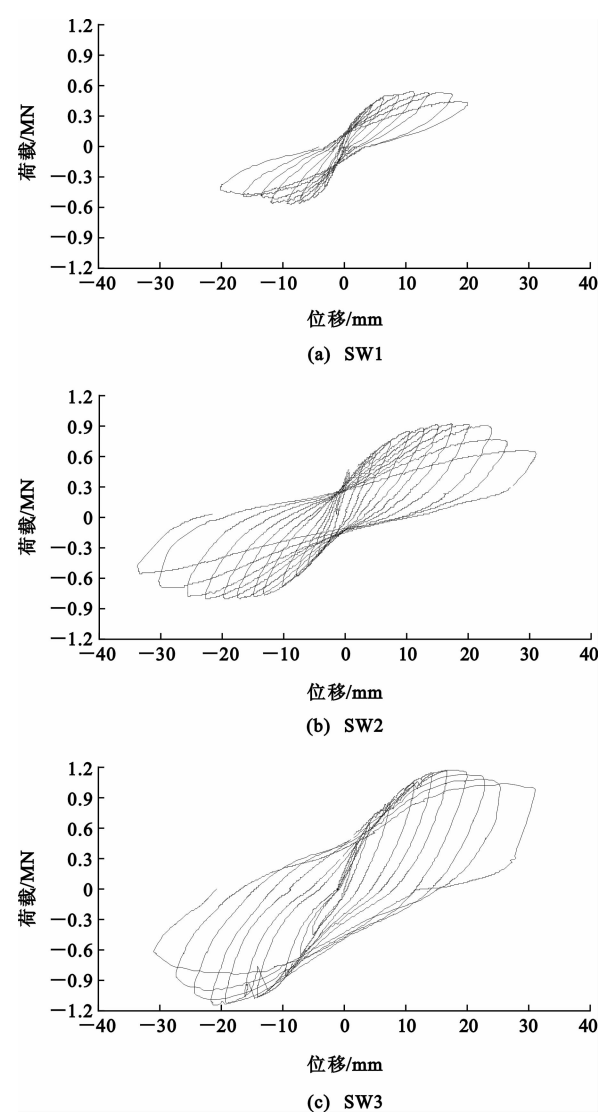


图 4 各模型的荷载-位移滞回曲线  
Fig. 4 Load-displacement Hysteretic Curves of Models

大小来反映,滞回环越饱满,构件的耗能能力越强。由于试验模型的加载历程存在差异,为便于比较,取各试验模型滞回曲线的外包络线与位移坐标轴所围面积作为其耗能  $E_p$  大小的比较值,其实测结果见表 5。

表 5 各模型耗能实测值

Tab. 5 Measured Values of Energy Dissipations of Models

模型编号	$E_p/(\text{kN} \cdot \text{mm})$	$E_p$ 相对值
SW1	14 587.74	1.000 0
SW2	33 696.15	2.310 0
SW3	62 112.02	4.257 8

由表 5 可见:与普通混凝土低矮剪力墙 SW1 相比,SW2 的耗能值提高了 131%,SW3 的耗能值提高了 325.78%,说明圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙的耗能显著高于普通混凝土低矮剪力

墙,并明显高于圆钢管混凝土边框低矮剪力墙。

3.6 破坏特征

各试验模型达到极限荷载(峰值荷载)时的破坏特征如图 5 所示,最终破坏形态如图 6 所示。各剪力墙的破坏特征具有以下特点:

(1)普通混凝土低矮剪力墙斜裂缝出现较早且

发展较快,随着荷载和位移的增加,墙板裂缝逐渐增多,反复加载形成交叉。加载后期,墙体两侧根部混凝土出现脱落,暗柱主筋外露,构件逐渐丧失承载能力,如图 6(a)所示。

(2)圆钢管混凝土边框低矮剪力墙裂缝多、分布域广,首先在墙体左上角出现第 1 条斜裂缝,裂缝与

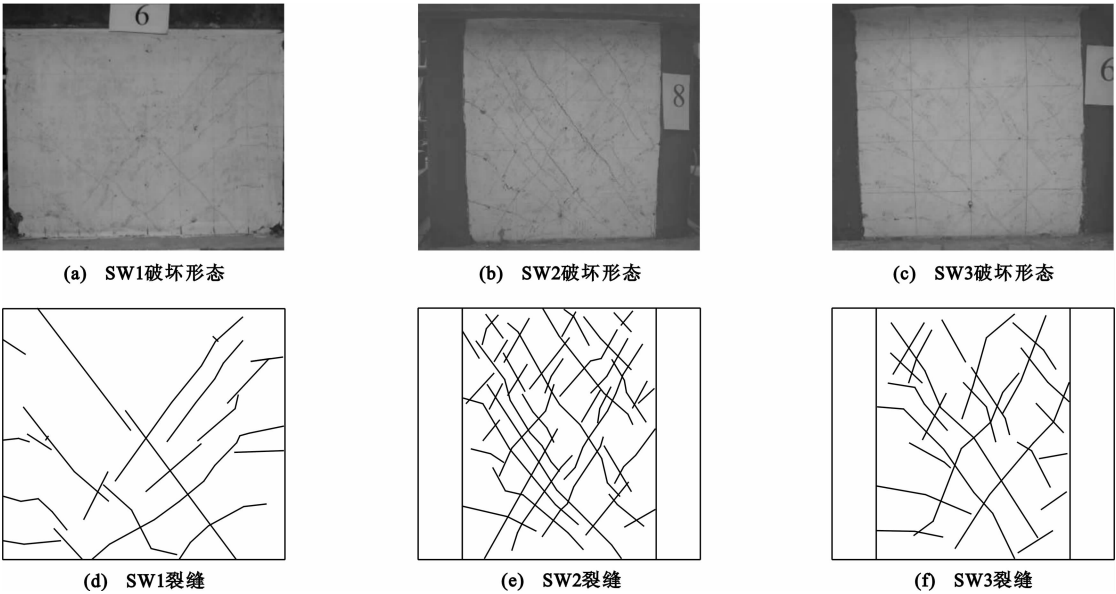


图 5 极限荷载下模型的破坏特征

Fig. 5 Failure Characteristics of Models Under Ultimate Load

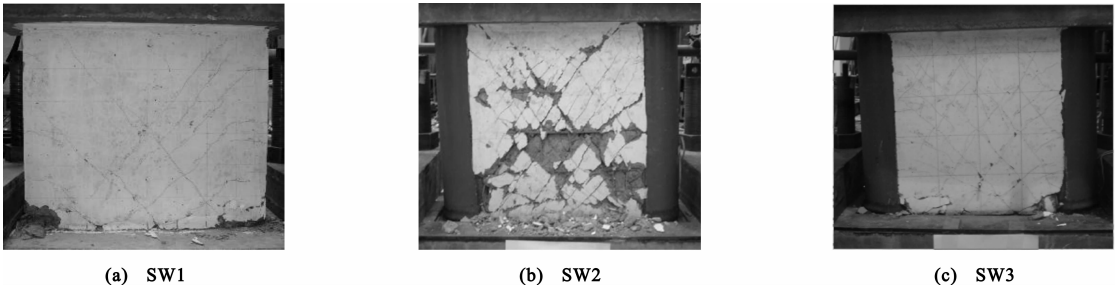


图 6 模型最终破坏形态

Fig. 6 Final Failure Modes of Models

水平夹角约为  $45^\circ$ ,沿墙板对角线向右下角发展。加载中期,出现若干条交叉斜向下裂缝,随后裂缝宽度不断加大,并在墙板对角方向出现几条宽度较大的主斜裂缝。加载后期,墙板主斜裂缝间的混凝土开始剥落,产生类似斜压杆的效应,两侧的钢管边框柱脚处钢管鼓屈,最终墙体中下部区域的混凝土被大面积压溃脱落而丧失承载能力,如图 6(b)所示。

(3)圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙裂缝多而细、分布域广,由于钢管混凝土边框和内藏钢支撑的存在,裂缝开展缓慢。加载后期,两侧钢管底部首先在与水平力平行的侧面鼓凸,随着反复加载,鼓起处反复拉压变形,随后钢管底部在与水平力

垂直的 2 个正面亦出现鼓凸,随着加载次数的增加,鼓凸程度逐渐加大,形成较为集中的耗能区域。因钢支撑对斜裂缝的有效约束和自身承压作用,墙板斜裂缝的分布和开展相对较均匀,没有形成宽度明显较大的主斜裂缝,墙体最终因底部混凝土被大面积积压溃而丧失承载能力,如图 6(c)所示。

4 承载力计算

剪力墙在水平荷载与竖向荷载共同作用下,墙肢内部产生弯矩、剪力和轴向压力。试验结果表明,圆钢管混凝土边框多重组合低矮剪力墙在达到极限荷载时,主要表现为剪切破坏特征,故其极限荷载主

要取决于斜截面抗剪承载力。基于钢管混凝土边框剪力墙的力学特性,本文将钢管混凝土边框剪力墙的抗剪承载力  $V$  分为钢筋混凝土墙板和钢管混凝土柱 2 个部分加以考虑,即

$$V=V_w+V_{col} \tag{1}$$

式中: $V_w$  为钢筋混凝土墙板的水平抗剪承载力; $V_{col}$  为钢管混凝土柱的水平抗剪承载力。

$V_w$  考虑 3 个方面的贡献(图 7):混凝土剪压区承担的剪力  $V_c$ <sup>[10]</sup>;与斜裂缝相交的水平分布钢筋的抗剪承载力  $V_s$ ;与斜裂缝相交的钢支撑的抗剪承载力  $V_{sb}$ ,即

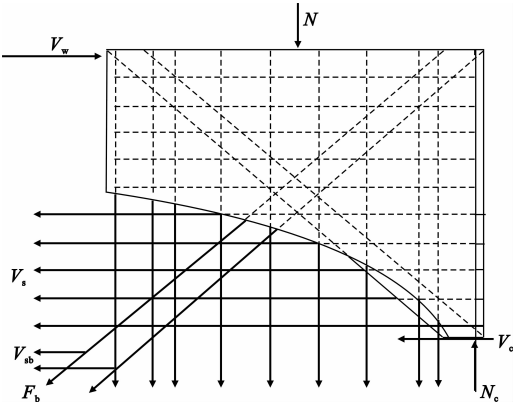


图 7 钢筋混凝土墙板抗剪承载力计算模型  
Fig. 7 Calculation Model of Reinforced Concrete Panels Shear Load-carrying Capacity

$$V_w=V_c+V_s+V_{sb}$$
$$\left. \begin{aligned} V_c &= \frac{1}{\lambda-0.5} (0.5f_t b_w h_{w0} + 0.13N \frac{A_w}{A}) \\ V_s &= f_{yh} \frac{A_{sh}}{S} h_{w0} \\ V_{sb} &= f_{yb} A_{sb} \cos \beta \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

式中: $\lambda$  为计算截面处的剪跨比,  $\lambda=M/Vh_{w0}$ ,  $h_{w0}$  为墙肢截面有效高度,  $M$  为与剪力设计值  $V$  相应的弯矩设计值,当  $\lambda<1.5$  时,取  $\lambda=1.5$ ,当  $\lambda>2.2$  时,取  $\lambda=2.2$ ;  $b_w$  为墙肢截面宽度;  $A$ 、 $A_w$  分别为截面的全截面面积和腹板面积;  $N$  为剪力墙轴向压力设计值;  $f_{yh}$  为墙肢水平分布钢筋的抗拉屈服强度;  $A_{sh}$  为配置在同一水平截面内的水平分布钢筋的总截面面积;  $S$  为水平分布钢筋的间距;  $f_{yb}$  为钢支撑的抗拉屈服强度;  $A_{sb}$  为钢支撑的横截面面积;  $\beta$  为钢支撑的倾角;  $f_t$  为混凝土轴心抗拉强度设计值。

图 7 中,  $F_b$  为钢支撑的受拉合力,  $F_b=f_{yb}A_{sb}$ ;  $N_c$  为剪压区混凝土的受压合力。

钢管混凝土柱的抗剪承载力<sup>[11]</sup>

$$V_{col}=\gamma_v A_{st} \tau_{scy} \tag{3}$$

式中: $\gamma_v$  为抗剪承载力的计算系数,  $\gamma_v=0.97+0.2\ln \xi$ ,  $\xi$  为约束效应系数,  $\xi=\alpha f_y/f_{ck}$ ,  $f_{ck}$  为混凝土轴心的抗压强度标准值,  $\alpha$  为钢管混凝土柱截面的含钢率,  $\alpha=A_s/A_c$ ,  $A_s$ 、 $A_c$  分别为截面钢筋的面积和混凝土的面积;  $A_{st}$  为截面的总面积;  $\tau_{scy}$  为抗剪屈服极限,  $\tau_{scy}=(0.422+0.313\alpha^{2.33})\xi^{0.134}f_{scy}$ ,  $f_{scy}=(1.14+1.02\xi)f_{ck}$ 。

各试验模型的承载力实测值与计算值比较见表 6。可以看出,计算值与实测值吻合较好。

表 6 承载力实测值与计算值比较  
Tab. 6 Comparisons of Measured Values and Calculated Values of Load-carrying Capacities

模型编号	实测值/kN	计算值/kN	相对误差/%
SW1	553.97	524.32	-5.35
SW2	872.09	907.63	4.08
SW3	1 167.01	1 161.71	-0.45

5 结 语

(1)圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙的抗震性能比圆钢管混凝土边框低矮剪力墙明显提高,比普通混凝土低矮剪力墙显著提高。

(2)圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙和圆钢管混凝土边框低矮剪力墙的破坏形态明显不同于普通混凝土低矮剪力墙,钢管混凝土边框柱和钢支撑的存在限制了斜裂缝的开展,提高了混凝土墙板的变形能力,提高了剪力墙的后期刚度和综合抗震能力。

(3)圆钢管混凝土边框内藏钢桁架低矮剪力墙可用于抗震要求较高的复杂高层建筑结构,本文的研究结果可供设计参考。

参考文献:

References:

[1] 廖飞宇,陶 忠,韩林海. 钢-混凝土组合剪力墙抗震性能研究简述[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5):129-135.  
LIAO Fei-yu, TAO Zhong, HAN Lin-hai, A State-of-the-art Review of Composite Shear Walls Under Cyclic Loading[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(5):129-135.  
[2] GOEL S C. United States-Japan Cooperative Earthquake Engineering Research Program on Composite and Hybrid Structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2):157-158.  
[3] ANWAR H K M. Experimental and Theoretical Behavior

- 然科学版,2007,26(6):43-45,114.
- CHEN Yu-feng, LUO Ling, WANG Wei-hong, et al. Mechanism and Precautionary Measures for Cracking of Pre-stressed Concrete Continuous Box Girder of Continuous and Rigid Frame Bridges in Service Phase [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2007, 26(6): 43-45, 114.
- [5] 顾凯锋, 彭卫. 预应力混凝土连续箱梁桥腹板斜裂缝研究[J]. 公路, 2004(7): 35-38.
- GU Kai-feng, PENG Wei. Research on Inclined Cracks in Webs of Prestressed Concrete Continuous Box-girder [J]. Highway, 2004(7): 35-38.
- [6] 鄢芳华. 悬臂浇注连续箱梁腹板下弯束的设置分析[J]. 北方交通, 2007(12): 41-44.
- YAN Fang-hua. Analysis of Arrangement of Web's Bent-down Tendon of Continuous Box Beam in Cantilever Cast [J]. Northern Communications, 2007(12): 41-44.
- [7] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- JTG D62—2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S].
- [8] 潘大荣. 大跨度预应力混凝土桥梁长期变形控制技术研究[D]. 南京: 中国人民解放军理工大学, 2009.
- PAN Da-rong. Research on Control Technology for Long-term Deformation of Long-span Prestressed Concrete Bridges [D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2009.
- [9] 吉林, 赵启林, 丁勇. 预应力箱梁桥腹板主应力计算探讨[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6): 85-90.
- JI Lin, ZHAO Qi-lin, DING Yong. Discuss on Calculation of Principal Stress About Webs of Pre-stressed Box-girder Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6): 85-90.
- (上接第28页)
- of Composite Walling Under In-plane Shear [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 60(1): 59-83.
- [4] YAMADA M. Steel Panel Encased RC Composite Shear Walls [C]//ASCE. Composite Construction in Steel and Concrete II. New York: ASCE, 1992: 899-912.
- [5] 曹万林, 张建伟, 陶军平, 等. 内藏桁架的混凝土组合低剪力墙试验[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(2): 195-200.
- CAO Wan-lin, ZHANG Jian-wei, TAO Jun-ping, et al. Experimental Study on Low-rise RC Shear Wall with Concealed Truss [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(2): 195-200.
- [6] 常卫华, 曹万林, 赵长军, 等. 内藏钢桁架混凝土核心筒抗震试验及计算分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(4): 379-386.
- CHANG Wei-hua, CAO Wan-lin, ZHAO Chang-jun, et al. Experiment and Analysis on Seismic Behavior of RC Composite Core Walls with Concealed Steel Truss [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(4): 379-386.
- [7] 曹万林, 王敏, 王绍合, 等. 高轴压比下钢管混凝土边框组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 85-90.
- CAO Wan-lin, WANG Min, WANG Shao-he, et al. Seismic Behavior Research on Composite Shear Wall with Concrete Filled Steel Tube Columns in High Axial-load Ratio [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(1): 85-90.
- [8] 曹万林, 曾彬, 王敏, 等. 钢管混凝土边框与剪力墙连接键工作性能试验[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(5): 603-610.
- CAO Wan-lin, ZENG Bin, WANG Min, et al. Experiment on Working Performance of Connection Constructional Measure Between Concrete Filled Steel Tube Columns and Shear Wall [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(5): 603-610.
- [9] 郭健, 刘伟庆. 钢筋混凝土异形柱框架-短肢剪力墙结构振动台试验与理论分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(5): 610-615.
- GUO Jian, LIU Wei-qing. Shaking Table Test and Theoretical Analysis on RC Frame-short Pier Shear Wall Structure with Special-shaped Columns [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(5): 610-615.
- [10] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures [S].
- [11] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- HAN Lin-hai, YANG You-fu. Technique of Modern Concrete-filled Steel Tube Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.