

# CFST 边框内藏桁架高剪力墙抗震试验与有限元分析

杨亚彬<sup>1</sup>, 曹万林<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 郑州 450045; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

**摘要:** CFST 边框内藏桁架剪力墙是一种新型组合剪力墙。为研究其抗震性能和抗震机理, 进行了 3 个 1/5 缩尺高剪力墙的低周反复荷载试验。在试验研究基础上, 分析了该新型组合剪力墙的承载力、延性、刚度及其衰减过程、滞回特性、耗能能力及破坏特征, 通过 ABAQUS 有限元软件进行了弹塑性有限元分析。研究表明: CFST 边框内藏桁架剪力墙具有良好的抗震屈服机制, 抗震性能比普通混凝土剪力墙显著提高。

**关键词:** 钢管混凝土; 桁架; 剪力墙; 抗震性能; 有限元分析

中图分类号: TU 398

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.11.019

## Seismic Testing and Finite Element Analysis of Shear Wall with CFST Columns and Concealed Trusses

YANG Ya-bin<sup>1</sup>, CAO Wan-lin<sup>2</sup>

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Shear wall with CFST columns and concealed trusses is a new kind of shear wall. In order to analyse its seismic performance and seismic mechanism, experiments were carried out on three 1/5 scale high shear wall models. Based on the experimental research, load-carrying capacity, ductility, stiffness and its attenuation, process hysteretic property, energy dissipation and failure phenomena of each model were analyzed. The finite element analysis was done by using ABAQUS. The results show that the shear wall with CFST columns and concealed trusses has good seismic yielding mechanism, and the seismic performance are obviously improved compared to the normal RC shear wall.

**Key words:** CFST; trusses; shear wall; seismic performance; finite element analysis

剪力墙是高层建筑中抵抗侧向力的重要结构单元, 在结构中往往承担大部分水平力。随着钢-混凝土组合结构在国内外的逐渐推广应用, 对钢-混凝土组合剪力墙的研究也有了较大发展。Astaneh 等<sup>[1-2]</sup>提出了一种预制钢筋混凝土板-钢板的组合剪力墙, 预制混凝土板的存在, 为钢板提供了平面外支撑, 防止钢板在屈服前的屈曲变形, 试验研究表明其具有优越的延性和耗能能力。文献[3-6]对型钢混凝土组合剪力墙进行了研究, 结果表明: 型钢对墙板的约束可提高墙板的抗剪能力, 改善剪力墙的延性, 发挥型钢和混凝土的组合效应。王栋等<sup>[7]</sup>对一个 5 层、竖向刚度不连续的剪力墙模型进行了模拟地震振动台试验研究, 该模型为钢-混凝土组合结构, 研究表明, 该结构具有良好的抗震性能和适当的结构布置。钱稼茹等<sup>[8-9]</sup>对钢管

混凝土边框剪力墙进行了相关研究, 结果表明: CFST 边框剪力墙承载力高、延性好, 后期刚度大, 具有较强的抗震性能。同时曹万林等<sup>[10-11]</sup>对内藏桁架剪力墙进行了相关研究, 结果表明: 内藏桁架剪力墙具有多道抗震防线。本文将内藏桁架的抗震设计思想运用于 CFST 边框剪力墙, 提出了 CFST 边框内藏桁架剪力墙。为了解该新型剪力墙的抗震性能, 本文进行了 3 个 1/5 缩尺高剪力墙的低周反复荷载试验。试验表明, 这种设计方案显著地提高了剪力墙的抗震性能。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验共设计了 3 个试件, 采用 1/5 缩尺, 墙体厚度为 140 mm, 轴压比为 0.35, 剪跨比为 2.0。试件编号分别为 SW2.0-1 ~ SW2.0-3, 其中: SW2.0-1 为普通混凝土剪力墙, SW2.0-2 为 CFST 边框剪力墙, SW2.0-3 为 CFST 边框内藏桁架剪力墙。剪力墙模型结合某实际工程, 按特一级抗震等级设计, 墙板竖向钢筋配

基金项目: 国家自然科学基金(50878007); 华北水利水电学院高层次人才科研启动项目(201211)

收稿日期: 2013-09-23 修改稿收到日期: 2014-03-19

第一作者 杨亚彬 男, 博士, 讲师, 1980 年 10 月生

筋率为0.45%,横向钢筋配筋率为0.67%,普通混凝土边框柱纵向钢筋配筋率为1.73%,钢管混凝土边框柱的截面含钢率为0.1。

SW2.0-2和SW2.0-3的边框柱采用相同钢管,钢管截面外径为159 mm、壁厚为3.7 mm。试件SW2.0-3的下部钢板支撑截面尺寸为92 mm×12 mm,上部

钢板支撑截面尺寸60 mm×12 mm,支撑钢板穿透钢管壁并与其焊接,支撑交叉处采用连接板焊接;混凝土剪力墙与圆钢管边框采用U形连接键(伸入墙50 mm×墙厚方向76 mm×高28 mm)连接,其连接键净距为32 mm。各试件的几何尺寸与配筋图见图1。

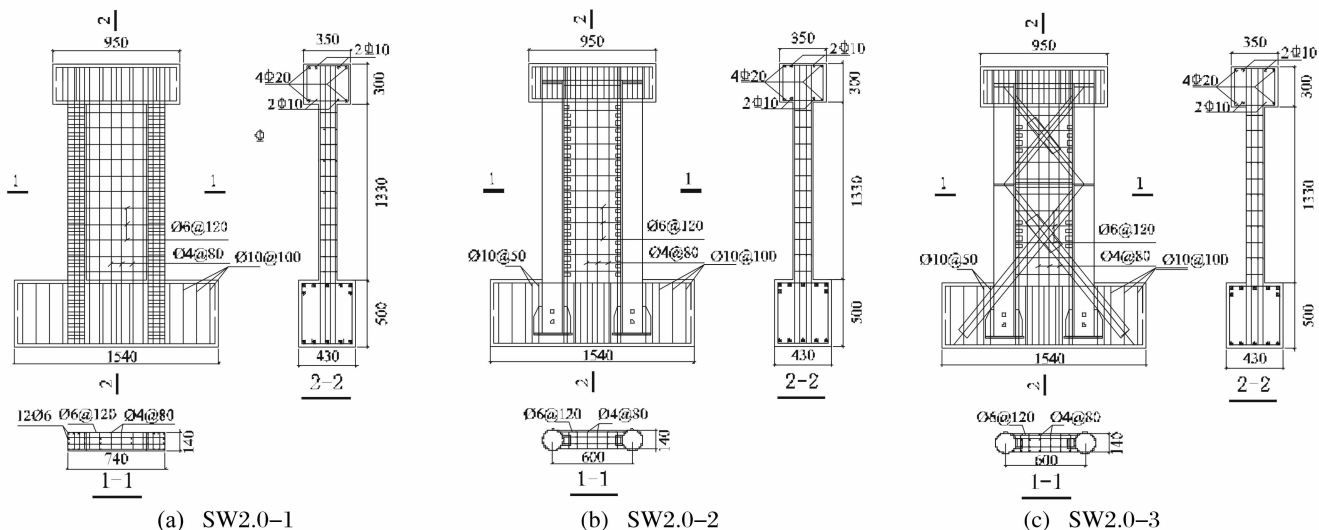


图1 试件配筋图

Fig. 1 Steel bar details of models

3个试件均采用C50混凝土浇筑,混凝土实测立方体抗压强度为52 MPa,弹性模量为 $3.5 \times 10^4$  MPa、钢筋及钢管的材料力学性能见表1。

表1 钢筋及钢材力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of steel bar and steel

钢材类型	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	延伸率/%	弹性模量 $\times 10^5$ / MPa
3.7 mm 厚钢管	312.33	417.77	27.50	1.91
12 mm 厚钢板	365.70	536.37	29.17	2.11
Φ4 冷拔钢筋	-	803.73	10.00	1.80
Φ6 冷拔钢筋	-	563.21	8.30	1.70

## 1.2 试验加载制度

试验采用低周反复加载方法。首先施加竖向荷载,并保持其在试验过程中不变。轴压比为0.35,该轴压比的计算考虑了钢管的折算面积。SW2.0-1的轴力为790 kN,SW2.0-2和SW2.0-3的轴力为870 kN。竖向荷载施加后,在距基础顶面1480 mm高度处施加低周反复水平荷载,在弹性阶段采用荷载控制加载,弹塑性阶段采用荷载与位移联合控制的加载方法。用IMP数据采集系统采集钢筋和钢管待测点的应变、水平位移、水平荷载,并用其绘制滞回曲线。

加载现场照片见图2。试验的加载装置包括:刚性加载横梁,水平、竖向千斤顶,油压控制系统。模型基础通过地锚螺栓与试验室台座锚固。

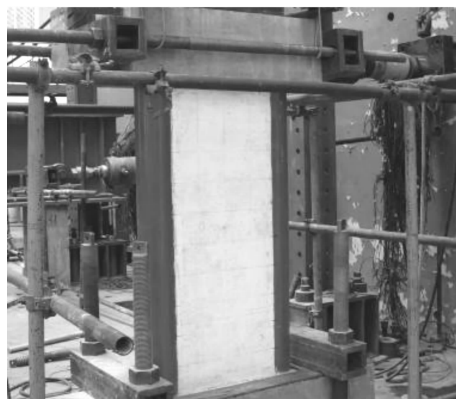


图2 试件加载图

Fig. 2 Test setup

## 2 试验结果及分析

### 2.1 承载力

表2为各试件的开裂荷载、明显屈服荷载、极限荷载的实测值。其中,屈强比 $\mu_{yu} = F_y/F_u$ 。

由表2中数据的对比可知:

(1) SW2.0-3的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载比SW2.0-1分别提高了65.48%、112.15%、103.89%。充分说明了该新型剪力墙具有良好的抗震性能。

(2) SW2.0-3与SW2.0-2相比,开裂荷载接近,屈服荷载和极限荷载分别提高了20.69%、18.58%。说明内藏桁架后,试件的抗震性能得到了

提高。

### 2.2 刚度

剪力墙试件的刚度与应力水平和反复次数有关,在加载过程中刚度为变值,为了地震反应分析需要,采用割线刚度代替切线刚度。试件的刚度实测值及各阶段刚度衰减系数见表 3。表 3 中  $\beta_{yo} = K_y / K_o$ ,为从初始弹性到明显屈服的刚度衰减系数。图 3 为各试件的刚度  $K$  随位移角  $\theta$  增大而衰减的全过程。

表 2 各试件开裂荷载、明显屈服荷载、极限荷载实测值

Tab.2 Experimental results of cracking load, yield load and ultimate load of each specimen

试件编号	开裂荷载 $F_c/kN$	明显屈服荷载 $F_y/kN$	极限荷载 $F_u/kN$	$F_u$ (相对值)	屈强比 $\mu_{yu}$
SW2.0-1	91.05	223.37	304.58	1.00	0.73
SW2.0-2	142.27	392.65	523.68	1.72	0.75
SW2.0-3	150.67	473.88	621.00	2.04	0.76

由表 3 和图 3 可见:

(1) 由于配钢率的影响,SW2.0-2 和 SW2.0-3 的初始弹性刚度比 SW2.0-1 有所提高。

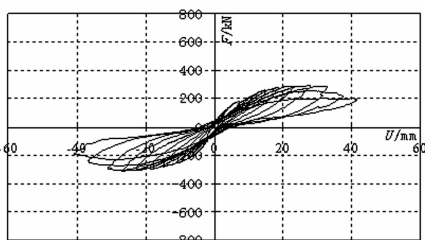
(2) SW2.0-3 的屈服刚度比 SW2.0-2 提高了 18.08%,说明内藏桁架在约束斜裂缝开展的同时,其自身也能够提供一定的刚度,从而使结构后期的刚度和性能较为稳定。

(3) SW2.0-3 刚度衰减系数比 SW2.0-1 提高了 43.75%。说明 SW2.0-3 刚度衰减较慢,后期刚度大,这对抗震有利。

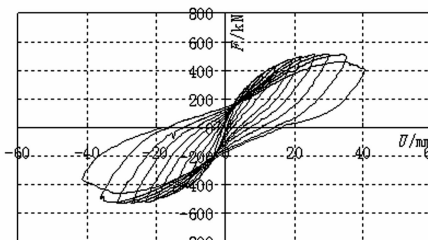
表 3 各试件刚度实测值及其衰减系数

Tab.3 Experimental results of stiffness and its attenuation coefficient of each specimen

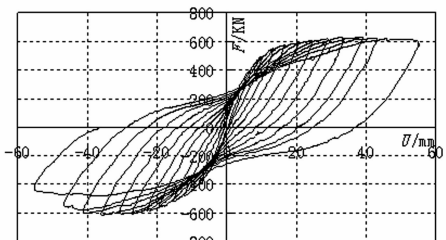
试件编号	初始弹性刚度 $K_o/(kN \cdot mm^{-1})$	开裂割线刚度 $K_c/(kN \cdot mm^{-1})$	明显屈服割线刚度 $K_y/(kN \cdot mm^{-1})$	$\beta_{yo}$
SW2.0-1	140.21	47.58	22.89	0.16
SW2.0-2	186.30	66.48	39.54	0.21
SW2.0-3	199.26	90.34	46.69	0.23



(a) SW2.0-1



(b) SW2.0-2



(c) SW2.0-3

图 4 各试件“荷载-位移”滞回曲线图

Fig.4 Hysteretic curves of “load-displacement” of each Specimen

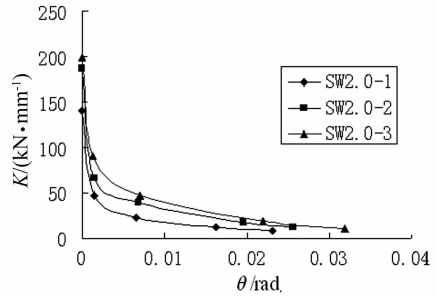


图 3 “刚度-位移角”关系曲线图

Fig.3 Curves of “stiffness-displacement shift”

### 2.3 延性

各试件位移及延性系数实测值见表 4。其中:  $U_c$  为开裂位移;  $U_y$  为屈服位移;  $U_d$  为弹塑性最大位移,其取值为荷载下降至极限荷载的 85% 时所对应的位移;  $\mu = U_d / U_y$  为试件的延性系数。  $\theta_p$  为试件的弹塑性位移角。

表 4 各试件位移及延性系数实测值

Tab.4 Experimental results of displacement and ductility coefficient of each specimen

试件编号	开裂位移 $U_c/mm$	屈服位移 $U_y/mm$	弹塑性最大位移 $U_d/mm$	延性系数 $\mu$	$\mu$ (相对值)	位移角 $\theta_p$
SW2.0-1	2.19	9.76	34.19	3.50	1.00	1/43
SW2.0-2	2.14	10.29	38.01	3.63	1.04	1/39
SW2.0-3	2.04	10.49	47.19	4.59	1.31	1/31

由表 4 可知:

(1) SW2.0-3 延性系数较大,比 SW2.0-1 和 SW2.0-2 分别提高了 31.14%、26.45%,说明 CFST 边框内藏桁架高剪力墙具有较好的延性性能。

(2) SW2.0-3 的弹塑性最大位移比 SW2.0-1 和 SW2.0-2 分别提高了 38.02%、24.15%,SW2.0-3 破坏时的弹塑性位移角达到了 1/31,说明其弹塑性变形能力较强。延性和弹塑性变形能力是剪力墙抗震性能的重要指标。

### 2.4 滞回特性和耗能能力

图 4 为实测的各试件的“荷载  $F$  - 位移  $U$ ”滞回曲线。由图 4 可见:CFST 边框内藏桁架剪力墙比 CFST 边框剪力墙和普通钢筋混凝土剪力墙相比,滞回环饱满,中部捏拢轻,承载力和延性显著提高。

滞回环所包含的面积反映了结构弹塑性耗能的大小。滞回环越饱满、捏拢现象越轻,抗震性能越好。取滞回环的外包络线所包围的面积作为比较各试件耗能能力的一个指标。实测所得各剪力墙的耗能情况见表5。由表5可知,SW2.0-3的耗能值比SW2.0-1提高了286.75%,比SW2.0-2的耗能值提高了93.45%,说明CFST边框内藏桁架高剪力墙的耗能显著高于普通混凝土高剪力墙,并明显高于CFST边框高剪力墙,有较强的抗震优势。

表5 耗能实测值

Tab.5 Experimental results of energy dissipation

试件编号	耗能 $E_p$ / kN · mm	耗能相对值
SW2.0-1	16 031.23	1.00
SW2.0-2	32 048.95	2.00
SW2.0-3	62 000.00	3.87

### 2.5 破坏特征及分析

各剪力墙试件的破坏形态如图5所示,裂缝分布图如图6所示。观察各剪力墙的破坏特征有以下特点:

(1) 普通混凝土高剪力墙裂缝相对较少,分布范围主要在墙体下部1/2墙高范围内。其斜裂缝出现较早且发展快,加载末期,墙体侧向根部混凝土压碎脱落,端部竖向受力钢筋被拉断,构件丧失承载力。

(2) CFST边框高剪力墙较普通钢筋混凝土高剪力墙裂缝多、分布区域大。裂缝首先出现在墙体底部1/3高度范围内,并从墙体中部斜向下发展。加载中期,钢管底部形成鼓凸,随着反复加载鼓凸程度逐渐加大,从而形成较为集中的耗能区域。

(3) CFST边框内藏桁架高剪力墙裂缝分布均匀。主斜裂缝出现较晚且裂缝延伸缓慢,说明桁架延缓了裂缝的开展、充分发挥了混凝土在开裂闭合过程中的耗能能力、提高了试件的承载力。同时,桁架的存在使结构上部也能充分发挥耗能的作用。加载中期钢管底部形成鼓凸,进而形成较为集中的耗能区域。

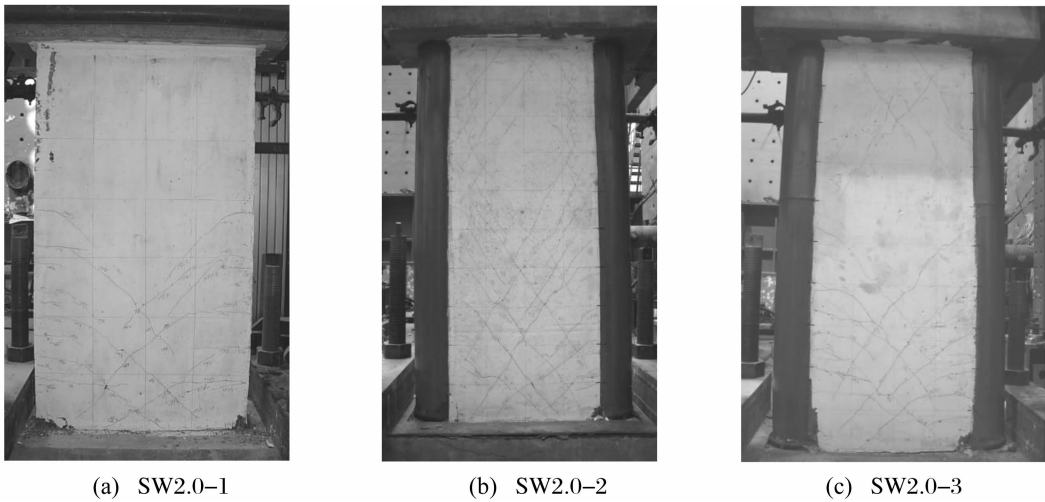


图5 破坏形态图

Fig.5 Failure modes of each specimen

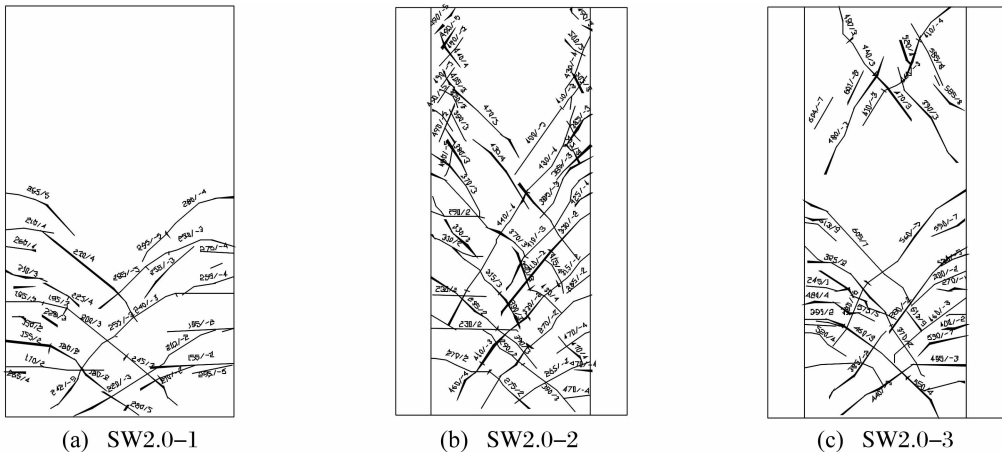


图6 裂缝分布图

Fig.6 Crack distribution of each specimen

### 3 有限元计算

本文利用 ABAQUS 软件对 CFST 边框内藏桁架高剪力墙进行弹塑性有限元分析,从而全面的认识其受力机理。

#### 3.1 本构关系

试验中钢管和钢支撑的钢材采用 Q235 钢。钢材的应力-应变关系曲线一般可分为弹性段、弹塑性段、塑性段、强化段和二次塑流等 5 个阶段<sup>[12]</sup>,模型的数学表达式如下:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_e \\ -A\varepsilon_s^2 + B\varepsilon_s + C & \varepsilon_e < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e1} \\ f_y & \varepsilon_{e1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e2} \\ f_y \left[ 1 + 0.6 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}} \right] & \varepsilon_{e2} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e3} \\ 1.6f_y & \varepsilon_s > \varepsilon_{e3} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon_e = 0.8f_y/E_s$ ,  $\varepsilon_{e1} = 1.5\varepsilon_e$ ,  $\varepsilon_{e2} = 10\varepsilon_{e1}$ ,  $\varepsilon_{e3} = 100\varepsilon_{e1}$ ,  $A = 0.2f_y/(\varepsilon_{e1} - \varepsilon_e)^2$ ,  $B = 2A\varepsilon_{e1}$ ,  $C = 0.8f_y + A\varepsilon_e^2 - B\varepsilon_e$

试件墙体分布钢筋采用的是冷拔钢筋,其应力-应变关系曲线与硬钢相似,本文采用文献[13]建议的公式:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_p & \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_s \\ \varepsilon_s > \varepsilon_p & \quad \sigma_s = Af_b - \frac{B}{\sigma_s} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $f_b$  为钢筋抗拉极限强度, $\varepsilon_p$  为钢筋比例极限对应的应变,取  $2.5 \times 10^{-3}$ , $A, B$  为根据钢筋拉伸试验所确定的常数,根据极限强度不同, $A$  取  $1.025 \sim 1.125$ , $B$  取  $0.6$ 。

本文采用文献[14]提出的适用于 ABAQUS 软件有限元分析的钢管中核心混凝土单轴应力-应变关系。其是在总结以往有关采用 ABAQUS 对钢管混凝土进行有限元分析结果的基础上,考虑到核心混凝土受钢管被动约束的特点,通过大量钢管混凝土轴压算例的计算分析,修正了素混凝土单轴应力-应变关系曲线的峰值应变和下降段提出的。

墙板混凝土模型采用文献[15]提出的模型,此模型在模拟钢筋混凝土柱、型钢混凝土柱、剪力墙板中均取得了不错的效果,具有形式简单,适用范围广等优点。

#### 3.2 接触模拟

本文采用钢管与混凝土的界面模型由截面法线方向的接触和切线方向的粘结滑移构成。本文钢管混凝土界面法向的接触采用硬接触,接触单元传递界面压

力  $P$ ,垂直于接触面的压力可以完全地在界面间传递。钢管于混凝土界面切向力模拟采用库仑摩擦模型,界面可以传递剪应力直到剪应力达到临界值  $\tau_{crit}$ ,界面之间产生相对滑动,滑动过程界面剪应力保持为  $\tau_{crit}$  不变。

#### 3.3 单元选取及求解方法

钢管中核心混凝土与墙板混凝土、钢管均采用三维实体单元 C3D8R。墙体分别钢筋采用三维杆单元 T3D2,钢支撑采用壳单元 S4R。非线性求解方法采用增量迭代法。

#### 3.4 计算结果分析

通过本构关系的确定、钢管与混凝土的接触模拟、单元选取和求解方法的确定,计算出 CFST 边框内藏桁架高剪力墙试件的荷载位移曲线,如图 7 所示。从试验所得的滞回曲线和骨架曲线可知,在试件加载点位移达到 40mm(位移角达到  $1/37$ )前,试件正负向的曲线对称性较好,因此选取正向的实测骨架曲线和有限元模拟的荷载位移曲线进行对比。由图可见,计算结果与实测值符合较好。

为了比较研究 CFST 边框内藏桁架高剪力墙的应力、应变等微观受力状态在不同阶段的发展情况,本文选取了 3 个典型时刻的特征点进行分析,分别为:混凝土墙板出现初始裂缝时对应的点,CFST 边框柱脚处钢管达到屈服应力时对应的点,剪力墙试件达到极限荷载时对应的点。

CFST 边框内藏桁架高剪力墙的实测开裂荷载和极限荷载分别为 150.67 kN 和 621.00kN,有限元模拟的开裂荷载和极限荷载分别为 149.06 kN 和 615.23 kN。计算与实测符合较好。

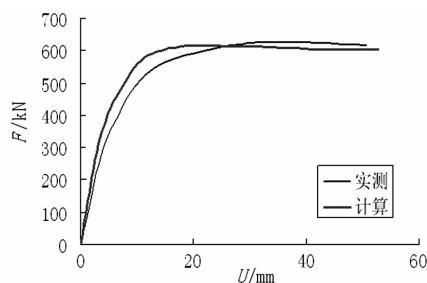


图 7 计算与实测对比图

Fig. 7 Comparison of the result of calculation and test

通过 ABAQUS 后处理系统中提供的主塑性应变矢量图可以近似得到混凝土墙板裂缝的分布及宽度等特征。剪力墙试件墙板的主塑性应变矢量图见图 8,随着荷载的增大,墙板中最大主塑性应变的区域扩大,混凝土裂缝不断开裂。墙板底部裂缝开展至受压侧,受压区高度较小。

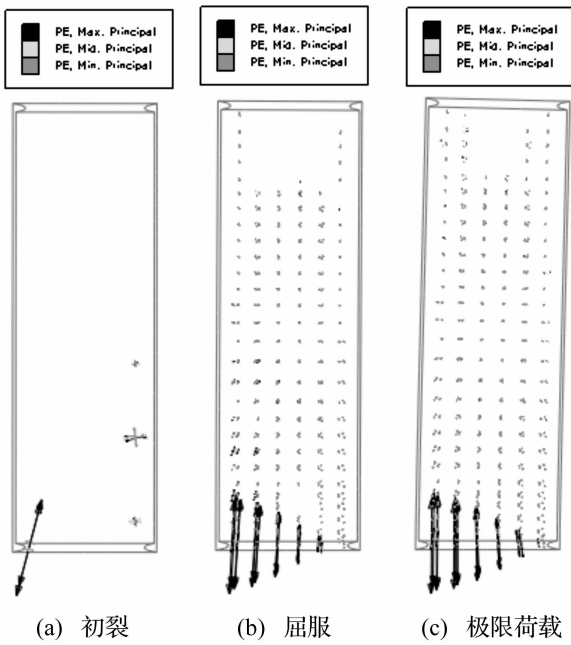


图8 SW2.0-3 墙板主塑性应变矢量图  
Fig.8 Principal plastic strain figure of SW2.0-3

钢筋应力云图见图9,墙板开裂时,墙板中分布钢筋的应力较小,最大压应力均大于最大拉应力。墙板中的横向分布钢筋均为受拉应力状态,竖向分布钢筋从左侧到右侧的应力状态为由受拉应力状态过渡为受压应力状态,最大拉应力分布在墙板左侧角部,最大压应力分布在墙板右侧角部。当试件达到峰值荷载时,大部分竖向分布钢筋底部受拉屈服,右侧底部钢筋受压屈服。墙板中其他分布钢筋未达到屈服。

钢桁架应力云图见图10,应力较大的区域分布在钢管混凝土柱脚,斜撑应力较大的部位出现在端部。同时钢管和斜撑结合部易出现应力集中,因此在实际应用中应保证二者的可靠连接。

受力过程分析:施加水平荷载后,混凝土墙板受拉侧首先出现开裂;随着水平荷载的不断加大,墙板的裂缝不断增多,钢管底部出现屈服,钢支撑和分布钢筋的应力也逐渐增大,此时墙板中相近部位的钢支撑应力大于钢筋的应力,说明钢支撑通过其弹塑性变形消耗能量,增强了剪力墙的耗能能力,同时有效地控制了斜

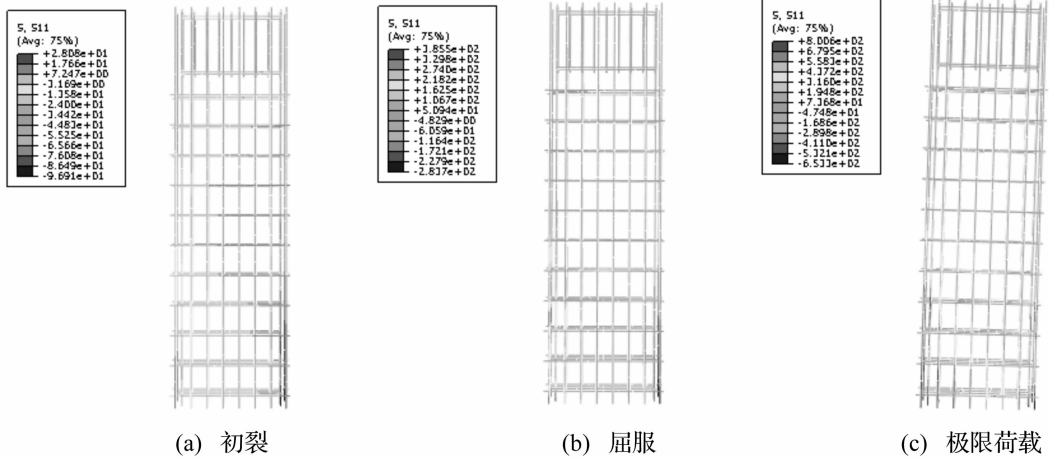


图9 SW2.0-3 钢筋应力云图  
Fig.9 Bars stress distribution of SW2.0-3

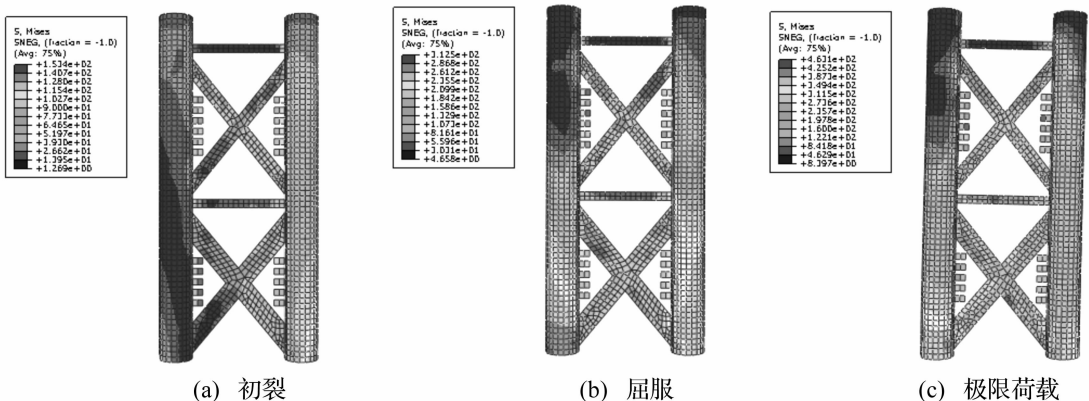


图10 SW2.0-3 钢桁架应力云图  
Fig.10 Truss stress distribution of SW2.0-3

裂缝的开展与分布;之后,钢管底部应力继续增大,墙板混凝土裂缝继续发展,墙板底部裂缝开展至接近受压侧,受压区高度较小,多排竖向分布钢筋受拉屈服,受压侧竖向分布钢筋受压屈服,剪力墙的承载力达到峰值状态,受压侧钢管底部被压鼓凸,支撑未出现屈曲现象,和剪力墙变形协调,峰值荷载后,剪力墙仍呈现出承载力下降慢,后期刚度退化平稳,具有较好的延性,剪力墙总体呈现弯曲破坏的状态。

## 4 结 论

(1) CFST 边框内藏桁架高剪力墙的承载力、延性、耗能能力比普通混凝土高剪力墙显著提高,比 CFST 边框高剪力墙明显提高。CFST 边框内藏桁架高剪力墙刚度退化慢,后期刚度大,对抗震有利。

(2) CFST 边框内藏桁架高剪力墙的破坏程度比普通混凝土高剪力墙和 CFST 边框高剪力墙较轻,裂缝分布图显示,桁架的存在引导了裂缝的发展趋势、限制了主裂缝的宽度。

(3) 有限元分析表明,混凝土墙板、钢支撑、钢管混凝土柱分别作为抗震防线,提高了剪力墙的抗震性能。

### 参 考 文 献

[ 1 ] Astaneh A. Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls [ R ]. Steel Tips Report. Structural Steel Educational Council, Moraga, CA, 2002.

[ 2 ] QiuHong Z. Experimental and analytical studies of cyclic behavior of steel and composite shear wall systems [ D ]. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy. University of California, Berkeley, 2006.

[ 3 ] 冯鹏, 初明进, 叶列平, 等. 冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙受剪性能试验研究 [ J ]. 建筑结构学报, 2010, 31(11): 83 - 91.  
FENG Peng, CHU Ming-jin, YE Lie-ping, et al. Experimental study on shear behavior of cold-formed thin-walled steel reinforced concrete shear walls [ J ]. Journal of Building Structures, 2010, 31(11): 83 - 91.

[ 4 ] Dan D, Fabian A, Stoian V. Theoretical and experimental study on composite steel - concrete shear walls with vertical steel encased profiles [ J ]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(5): 800 - 813.

[ 5 ] Zhou Ying, Lu Xi-lin, Huang Zhi-hua, et al. Seismic behavior of composite shear walls with multi - embedded steel sections [ J ]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2010, 19(6): 637 - 655.

[ 6 ] Liao F Y, Han L H, Tao Z. Performance of reinforced concrete shear walls with steel reinforced concrete boundary columns [ J ]. Engineering Structures, 2012 ( 44 ): 186 - 209.

[ 7 ] 王栋, 卢文胜, 吕西林. 某高位转换框支剪力墙超限高层结构模拟地震振动台试验研究 [ J ]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 142 - 149.  
WANG Dong, LU Wen-sheng, LÜ Xi-lin. Shaking table test of a high - rise frame - supported shear wall structure with a high transfer floor [ J ]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(21): 142 - 149.

[ 8 ] Qian J, Jiang Z, Ji X D. Behavior of steel tube - reinforced concrete composite walls subjected to high axial force and cyclic loading [ J ]. Engineering Structures, 2012 ( 36 ): 173 - 184.

[ 9 ] 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.

[ 10 ] Cao W L, Zhang Y Q, Zhang J W, et al. Study on seismic performance of shear walls with concealed steel truss [ J ]. The 14th World Conference on Earthquake Engineering ( 14WCEE ), Beijing, 2008, 05 - 01 - 0553.

[ 11 ] 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.

[ 12 ] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2004.

[ 13 ] 成文山. 配置无明显屈服点钢筋的混凝土受弯构件截面的弯矩与曲率分析 [ J ]. 土木工程学报, 1982, 15(4): 1 - 10.  
CHENG Wen-shan. Cross-section moment and curvature analysis of concrete flexural members that applied no obvious yield point steel [ J ]. Civil Engineering Journal, 1982, 15 ( 4 ): 1 - 10.

[ 14 ] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究 [ D ]. 福州: 福州大学, 2005.

[ 15 ] Attard M M, Setunge S. Stress-Strain relationship of confined and unconfined concrete [ J ]. ACI Materials Journal, 1996, 93(5): 432 - 442.