

# 基于 OpenSees 的双钢板混凝土组合剪力墙数值模拟

汪士也<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1,2\*</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为实现双钢板混凝土组合剪力墙构件在地震荷载下的精细化数值模拟, 提出了可以考虑钢板局部屈曲和失效的单轴材料模型 CFSTsteel, 该模型可以隐式计算钢板在循环荷载作用下, 由于板件局部失稳所表现出的具有路径依赖特性的循环强化和软化效应。基于 OpenSees 开源计算软件, 建立了双钢板混凝土组合剪力墙的纤维模型, 并利用该模型对两个足尺双钢板混凝土组合剪力墙试件在罕遇地震动加载制度下的滞回行为进行了模拟, 计算结果表明: 相较于采用传统的不考虑循环退化的钢材单轴本构 Steel02, 采用 CFSTsteel 的纤维模型可以更好地模拟双钢板混凝土组合剪力墙构件在低周往复荷载作用下的刚度和承载力退化行为。CFSTsteel 单轴材料模型已被添加至 OpenSees 单轴材料模型库中。

**关键词:** 双钢板混凝土组合剪力墙; 抗震性能; 纤维模型; 局部屈曲; OpenSees; 循环退化; 单轴材料模型

中图分类号: TU398+.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)04-0079-08

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231029001

## Numerical Simulation of Double Skin Composite Wall Based on OpenSees

WANG Shiye<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

\*Corresponding author: weiwang@tongji.edu.cn

**Abstract:** In order to simulate the cyclic behavior of double skin composite wall (DSCW) under earthquake excitations, a uniaxial material model, named CFSTsteel, that could capture the local buckling effect and fracture of steel plate was proposed. This model can implicitly simulate the cyclic hardening and softening of steel plate under cyclic loading, which exhibit path-dependent characteristics due to local buckling. Based on the OpenSees software, the fiber model of DSCW was established. The proposed fiber model of DSCW was employed to predict the cyclic behavior of DSCW specimens under maximum considered earthquake loading protocol. The simulate results showed that, compared to the traditional uniaxial material model Steel02, which does not consider cyclic deterioration, the predicted results using CFSTsteel could more accurately capture the cyclic deterioration of stiffness and strength of DSCW under cyclic loads. The proposed uniaxial material model has been implemented in the Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) platform.

**Keywords:** double skin composite wall; seismic performance; fiber model; local buckling; OpenSees; cyclic deterioration; uniaxial material model

收稿日期: 2023-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(52078366, 52378182), “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC3801900)

作者简介:

汪士也(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事钢结构与组合结构抗震性能方面的研究。E-mail: shiyewang@tongji.edu.cn。

通信作者:

王伟(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构与组合结构抗震防灾方面的研究。E-mail: weiwang@tongji.edu.cn。

双钢板混凝土组合剪力墙由于具有较大的刚度和强度,在高层建筑、核电站基础设施和地下工程中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。双钢板混凝土组合剪力墙由两侧端柱、钢板、内填混凝土以及钢板之间的连接件组合而成。外侧的钢板对内填混凝土产生约束,使其处于复杂应力状态,从而提高内填混凝土的抗压强度和延性<sup>[2]</sup>。同时,核心混凝土可以延缓或避免外侧钢板发生局部屈曲。此外,两侧钢板可以作为混凝土浇筑的模板,方便施工。

双钢板混凝土组合剪力墙最初被应用于近海结构和抗爆设施中。WRIGHT<sup>[3]</sup>对双钢板混凝土组合剪力墙进行了静力试验。CLUBLEY等<sup>[4]</sup>、EOM等<sup>[5]</sup>对焊接连接的双钢板混凝土组合剪力墙的静力学性能展开了若干研究。2000年后,双钢板混凝土组合剪力墙逐渐被应用于高层建筑结构中,ALZENI等<sup>[6]</sup>、SHAFAEI等<sup>[7]</sup>对双钢板混凝土组合剪力墙的抗震性能和设计方法进行了研究。聂建国等<sup>[1]</sup>等对不同剪跨比和轴压比的双钢板混凝土组合剪力墙的抗震性能进行了试验研究。汪士也等<sup>[8]</sup>对带L形拉结件的新型双钢板混凝土组合剪力墙的抗震性能进行了拟静力试验和数值模拟研究。针对双钢板混凝土组合剪力墙结构体系层次的弹塑性模拟,纤维模型因其计算的简便性和高效性而被广泛应用<sup>[9-12]</sup>,传统不考虑退化的钢材单轴本构模型(如Steel02<sup>[13]</sup>)无法准确模拟该结构在循环荷载作用下由于局部屈曲和延性断裂导致的刚度和承载力退化行为。

本文提出了可以考虑钢板局部屈曲和失效的单轴材料模型CFSTsteel,该模型可以隐式计算钢板在循环荷载作用下所表现出的具有路径依赖特性的循环强化和软

化效应。设计并制作了两个双钢板混凝土组合剪力墙试件,对其进行低周往复荷载下的拟静力试验,基于OpenSees开源软件,建立了双钢板混凝土组合剪力墙的纤维模型,并采用该模型模拟了其滞回性能。

## 1 双钢板混凝土组合剪力墙建模

为实现双钢板混凝土组合剪力墙构件在地震作用下的精细化数值模拟,本文基于OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation)开源平台,提出了一种基于纤维模型的双钢板混凝土组合剪力墙模拟方法。

### 1.1 双钢板混凝土组合剪力墙纤维模型

双钢板混凝土组合剪力墙的纤维模型如图1所示。该模型将构件截面划分为若干纤维,每个纤维均具备独立的坐标和面积。此外,针对不同属性的纤维,可分别定义其独特的单轴本构关系。

假定构件在变形过程中满足平截面假定,基于该假定,可以根据截面的曲率计算出每一个纤维对应的应变,再由每一个纤维的本构关系求出其应力,最终计算出截面的内力。将组合剪力墙的端柱、钢板和内填混凝土沿两个截面坐标轴方向分别划分成若干纤维。采用基于位移的梁柱单元(Displacement-Based Beam-Column Element),每两个节点之间设置5个积分点。混凝土采用Concrete01单轴本构,端柱钢管和钢板采用CFSTsteel单轴材料模型(详见1.2节),内部隔板采用Steel02单轴本构。

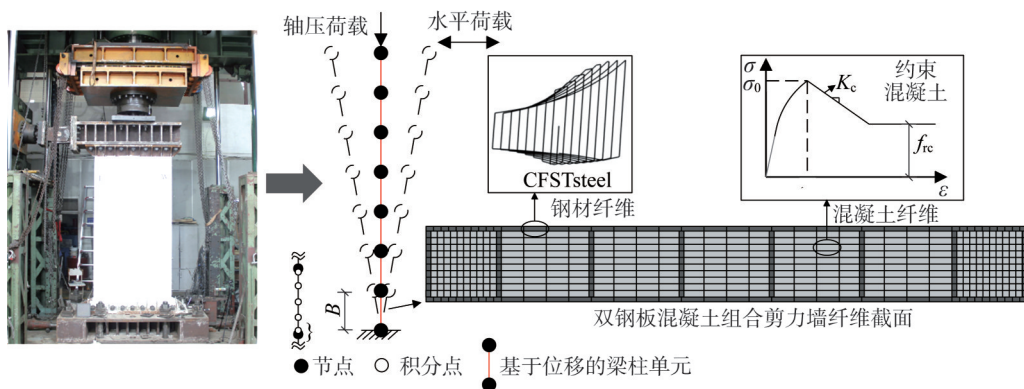


图1 双钢板混凝土组合剪力墙建模

Fig. 1 Modeling of double skin composite wall

### 1.2 CFSTsteel 钢材单轴材料模型

双钢板混凝土组合剪力墙在循环荷载作用下,端柱的钢管和墙身的钢板均会发生不同程度的局部屈曲和延性断裂,这是导致组合剪力墙构件承载力和刚度退

化的主要原因之一。为了精确描述双钢板混凝土组合剪力墙构件在循环荷载下的刚度和承载力退化行为,本文基于OpenSees开源平台,采用C++语言开发了考虑钢材局部屈曲的单轴材料模型CFSTsteel。CFSTsteel

同时适用于单调和循环加载工况,在受拉方向上,钢板的局部屈曲在拉应力作用下恢复并被拉伸至新的应变状态时,表现出应变强化特征,采用与时间-温度无关的弹塑性力学理论框架来描述钢材在此阶段的随动-各向同性强化行为。在受压和受压向受拉转化方向上,钢板的局部几何非线性和材料非线性相互耦合共同控制钢板的力学响应<sup>[14]</sup>,难以单独采用基于塑性力学的理论框架进行计算,故采用非线性唯象理论对此阶段进行定量描述。

### 1.2.1 受拉循环强化应力-应变关系

钢板在局部屈曲恢复并被拉伸至新的应变状态的过程中,其力学响应由钢材的材料非线性控制,因此,采用与时间-温度无关的弹塑性力学理论框架进行描述。

经典的弹塑性理论在小变形假设下,材料的总应变可以分解为弹性应变和塑性应变两部分:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (1)$$

式中: $\epsilon^e$ 为弹性应变部分; $\epsilon^p$ 为塑性应变部分。

应力和弹性应变之间的关系可以表示为:

$$\sigma_{\text{eff}} = E_0(\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon^p) \quad (2)$$

式中: $E_0$ 为弹性模量。

屈服条件可以表示为:

$$f = |\sigma_{\text{eff}} - X| - (R + \sigma_0) \leq 0 \quad (3)$$

式中: $X$ 为背应力,用于描述屈服面中心的平移; $R$ 为各向同性强化内变量参数,用于控制屈服面的扩张和收缩; $\sigma_0$ 为初始屈服强度。

流动法则为:

$$d\epsilon^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} = d\lambda \cdot \text{sign}(\sigma_{\text{eff}} - X) \quad (4)$$

式中: $d\lambda$ 为塑性流动因子。

采用VOCE<sup>[15]</sup>准则来描述各向同性强化:

$$dR = b(Q_\infty - R)d\lambda \quad (5)$$

式中: $Q_\infty$ 和 $b$ 为各向同性强化参数,分别用于控制各向同性强化的变化范围和速率。

采用CHABOCHE等<sup>[16]</sup>提出的多个背应力线性叠加形式的随动强化准则,每个背应力分量的变化规律满足Armstrong-Frederick(A-F)模型,通过赋予每个背应力分量不同的强化速率和饱和强化量,可以实现不同应变范围内强化特性的模拟。

$$dX_k = \text{sign}(\sigma_{\text{eff}} - X)C_k d\lambda - \gamma_k X_k d\lambda \quad (6)$$

$$X = \sum_{k=1}^m X_k \quad (7)$$

式中: $C_k$ 和 $\gamma_k$ 分别为用于控制随动强化速率和变化范围的参数。

### 1.2.2 受压等效应力-应变骨架曲线

当钢板的截面应力超过其屈曲后强度时,其承载力开始逐渐退化,并伴随出现负刚度现象。该阶段钢板的响应主要由板件的局部几何非线性和钢材的材料非线性共同控制。所建立的受压单轴等效应力-应变曲线如图2所示,该曲线可以分为3个阶段。

(1) 当 $-\epsilon_{y,m} \leq \epsilon < 0$ 时,钢板处于弹性阶段,其受压刚度为 $E_0$ 。

$$\sigma_{\text{eff}} = E_0 \epsilon_{\text{eff}} \quad (8)$$

(2) 当 $\epsilon_{c,m} \leq \epsilon < -\epsilon_{y,m}$ 时,钢板到达应变强化阶段,其受压刚度为 $E_b$ 。

$$\sigma_{\text{eff}} = E_b \epsilon_{\text{eff}} + \sigma_{yp,m} \quad (9)$$

$$E_b = b_2 E_0 \quad (10)$$

$$\sigma_{yp,m} = -\sigma_y + b_2 \sigma_y \quad (11)$$

(3) 当 $\epsilon < \epsilon_{c,m}$ 时,采用指数函数来计算钢板的软化特征,当压应变趋于负无穷时,钢板受压应力稳定于 $\sigma_{r,m}$ 。

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{eff}} &= \sigma_{r,m} + (\sigma_{c,m} - \sigma_{r,m}) e^{a(\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_{c,m})} \\ &= \sigma_{r,m} + \frac{\sigma_{c,m} - \sigma_{r,m}}{e^{a \cdot \epsilon_{c,m}}} e^{a \cdot \epsilon_{\text{eff}}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} &= \sigma_{r,m} + (\sigma_{cp,m} - \sigma_{r,m}) e^{a \cdot \epsilon_{\text{eff}}} \\ \sigma_{cp,m} &= \sigma_{r,m} + \frac{\sigma_{c,m} - \sigma_{r,m}}{e^{a \cdot \epsilon_{c,m}}} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $\sigma_{y,m}$ 、 $\sigma_{c,m}$ 和 $\sigma_{r,m}$ 分别为钢材的屈服强度、屈曲后强度和残余强度; $\epsilon_{y,m}$ 、 $\epsilon_{c,m}$ 和 $\epsilon_{r,m}$ 分别为 $\sigma_{y,m}$ 、 $\sigma_{c,m}$ 和 $\sigma_{r,m}$ 对应的等效应变; $E_0$ 为钢材的弹性模量; $E_b$ 为钢材强化阶段的切线模量; $a$ 为控制屈曲阶段软化速率的参数。

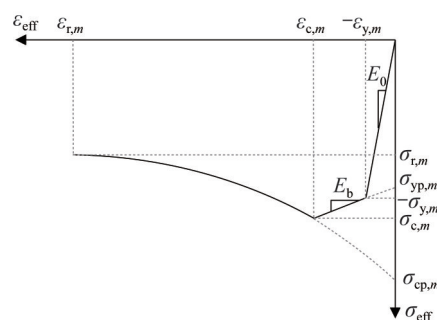


图2 受压等效应力-应变骨架曲线

Fig. 2 Compressive equivalent stress-strain skeleton curve

### 1.2.3 循环准则

在循环荷载作用下,由于钢板非弹性屈曲的形成和扩张,组合剪力墙端柱的钢管和钢面板的受压等效应力和刚度会表现出循环退化特征。在CFSTsteel模型中,采用基于能量的循环退化准则<sup>[17]</sup>,定义循环退化参数 $\beta_i$ 为:

$$\beta_i = \left( \frac{E_i}{E_t - \sum_{j=1}^{i-1} E_j} \right)^c \quad (14)$$

式中： $E_i$ 为第*i*次加载所消耗的滞回能量； $c$ 为控制指数退化速率的参数，通常假定 $c=1.0$ ； $\sum E_j$ 为第*i*次加载前所消耗的滞回能量的总和； $E_t$ 为单个钢材纤维所具有的耗能能力，可按式(15)计算。

$$E_t = \Lambda \sigma_y \quad (15)$$

式中： $\Lambda$ 为单个钢材纤维的累积应变变能力。

$\beta_i$ 的取值范围为 $0 \leq \beta_i < 1.0$ 。当 $\beta_i \geq 1.0$ 时，表示钢材纤维的滞回能量被消耗殆尽；当 $\beta_i$ 趋近于0时，表示钢材纤维的等效应力和刚度几乎没有退化。如图3所示，受拉等效应力 $\sigma_{t,c}^i$ 和受拉卸载刚度 $E_{tu,c}^i$ 可分别由式(16)、式(17)计算得到。

$$\sigma_{t,c}^i = (1 - \beta_i) \sigma_{vc}^i \quad (16)$$

$$E_{tu,c}^i = E_{tu,c}^{i-1} = E_0 \quad (17)$$

式中： $\sigma_{vc}^i$ 为相同循环下Voce-Chaboche模型计算得到的等效应力。

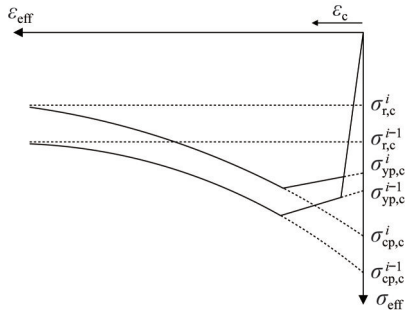


图3 受压等效应力-应变曲线退化

Fig. 3 Degradation of compressive equivalent stress-strain curves

如图4所示，在受压状态下， $\sigma_{cp,c}$ 、 $\sigma_{yp,c}$ 和 $\sigma_{r,c}$ 可由式(18)计算得到，刚度 $E_{sh,c}$ 、 $E_{cu,c}$ 和 $E_{pb,c}$ 可由式(19)和式(20)计算得到。

$$\begin{cases} \sigma_{cp,c}^i = (1 - \beta_i) \sigma_{cp,c}^{i-1} \\ \sigma_{yp,c}^i = (1 - \beta_i) \sigma_{yp,c}^{i-1} \\ \sigma_{r,c}^i = (1 - \beta_i) \sigma_{r,c}^{i-1} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} E_{sh,c}^i = (1 - \beta_i) E_{sh,c}^{i-1} \\ E_{cu,c}^i = (1 - \beta_i) E_{cu,c}^{i-1} \end{cases} \quad (19)$$

$$E_{pb,c}^i = a^i (\sigma_{cp,c}^i - \sigma_{r,c}^i) e^{d^i \cdot \epsilon_{eff}} \quad (20)$$

式中： $a$ 为控制钢材纤维在负刚度段的退化速率的参数。

参数 $a$ 通过式(21)进行更新：

$$a^i = (1 - \beta_i) a^{i-1} \quad (21)$$

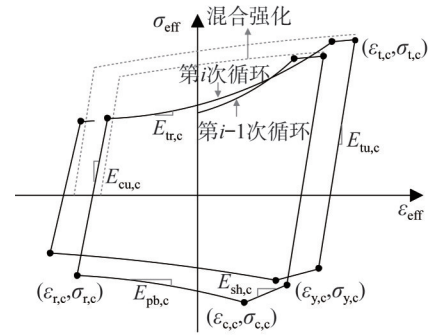


图4 等效应力-应变曲线循环退化

Fig. 4 Cyclic deterioration of equivalent stress-strain curve

受拉卸载刚度可以由式(22)计算得到：

$$E_{tr,c}^i = -b_3 E_{pb,c}^i \quad (22)$$

式中： $b_3$ 为用户输入参数。

CFSTsteel模型的使用说明可见：<https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/>。

### 1.3 混凝土单轴材料模型

双钢板混凝土组合剪力墙内的混凝土采用Concrete02模型模拟，考虑到四周钢板对内填混凝土的约束作用，Concrete02模型的峰值应力及其对应的应变可根据韩林海等<sup>[2]</sup>提出的约束混凝土本构关系计算得到：

$$\sigma_0 = \left[ 1 + \left( -0.0135 \xi^2 + 0.1 \xi \right) \left( \frac{24}{f_c'} \right)^{0.45} \right] f_c' \quad (23)$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_{cc} + \left[ 1330 + 760 \cdot \left( \frac{f_c'}{24} - 1 \right) \right] \xi^{0.2} \quad (24)$$

$$\epsilon_{cc} = 1300 + 12.5 f_c' \quad (25)$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (26)$$

式中： $\sigma_0$ 和 $\epsilon_0$ 分别为混凝土峰值应力及其对应的应变； $\xi$ 为约束效应指标； $A_s$ 为钢材的截面面积； $A_c$ 为混凝土的截面面积； $f_y$ 为钢材的屈服强度； $f_{ck}$ 为混凝土的轴心抗压强度。

如图5所示，混凝土的下降段刚度和残余强度可由式(27)~(30)计算得到。

$$K_c = -332.75 R_{eq} f_c' + 9.60 f_c' \quad (27)$$

$$f_{rc} = 0.32 R_{eq}^{-0.5} f_c' \quad (28)$$

$$R_{eq} = \left( D_{eq} / t \right) \sqrt{f_y / E_0} f_c' / f_y \quad (29)$$

$$D_{eq} = 2B / \sqrt{\pi} \quad (30)$$

式中： $K_c$ 为混凝土的下降段刚度； $f_c'$ 为混凝土的圆柱体抗压强度； $f_{rc}$ 为混凝土的残余强度； $B$ 为钢管截面的宽度； $t$ 为钢管的壁厚。

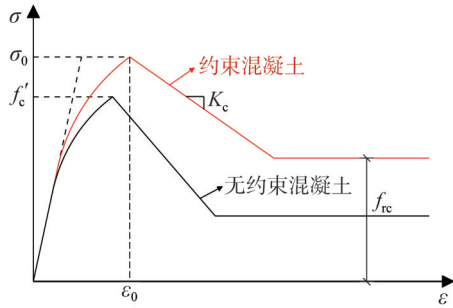


图5 约束混凝土本构

Fig. 5 Constitutive relationship of confined concrete

## 2 双钢板混凝土组合剪力墙拟静力试验

### 2.1 试件设计

本次试验分别设计和制作了两个双钢板混凝土组合剪力墙试件,变化参数为轴压比。两个试件均由端柱、钢面板、内隔板和内填混凝土组成。所有试件的构造及参数如图6和表1所示,计算高度(从加载点至墙体底部加劲肋上边缘的距离)均为2 880 mm。所有试件的截面尺寸均为1 280 mm×160 mm,内隔板的间距为196 mm,端柱的尺寸均为160 mm×160 mm。试件DSCW-1和DSCW-2的轴压比分别为0.3和0.6,其计算公式为:

$$n = \frac{1.2N_d}{f_c A_c / 1.4 + f_y A_s / 1.1} \quad (31)$$

式中: $N_d$ 为施加的轴力; $f_y$ 为钢材的实测屈服强度; $f_c$ 为混凝土的轴心抗压强度。

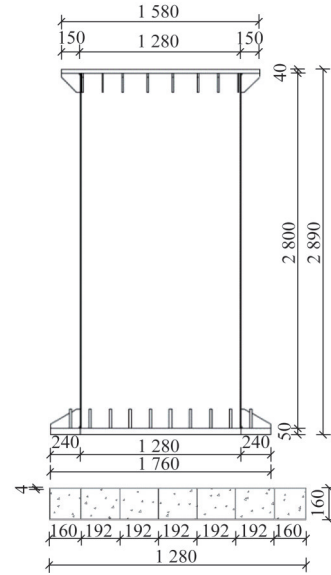


图6 试件构造(单位:mm)

Fig. 6 Details of specimens (unit: mm)

表1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	墙宽/mm	计算高度/mm	厚度/mm	钢面板壁厚/mm	端柱壁厚/mm	连接件壁厚/mm	轴压比	剪跨比
DSCW-1	1 280	2 880	160	4	4	4	0.3	2.25
DSCW-2	1 280	2 880	160	4	4	4	0.6	2.25

### 2.2 加载制度

文献[18]表明加载制度所表征的加载历程需要能够代表试件在地震激励下的抗震需求,这是因为构件的刚度和承载力在循环荷载作用下会表现出具有路径依赖特性的循环强化或软化特征,相同构件在不同加载历程下会拥有不同的承载力和延性。本文采用文献[18]提出的针对双钢板混凝土组合剪力墙在罕遇地震下的拟静力加载制度,如图7所示。

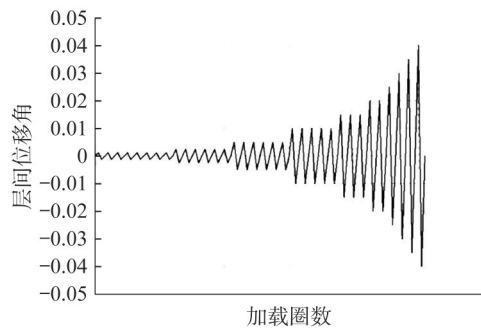


图7 加载制度

Fig. 7 Loading system

### 2.3 材料性能

双钢板混凝土组合剪力墙试件均采用Q355B钢材制作,根据标准《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)<sup>[19]</sup>测得钢材的材料性能如表2所示。在组合剪力墙试件浇筑的同时,制作3个150 mm×150 mm×150 mm立方体混凝土试块,其28 d立方体抗压强度平均值为25.4 MPa。

### 2.4 试验结果

试件DSCW-1、DSCW-2的破坏现象和破坏模式基本一致,均表现为典型的压弯破坏模式,如图8~9所示,其中 $\theta$ 为位移角。试件的破坏全过程可以划分为3个阶段。(1)弹性阶段。加载初期,试件没有明显现象,水平

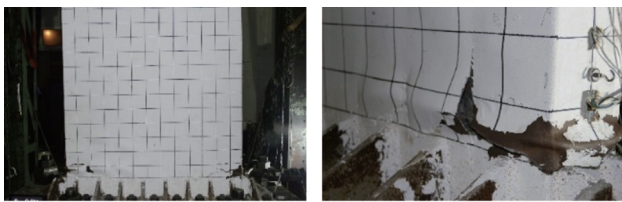
表2 钢材材性试验结果  
Table 2 Material property test results of steel

试件编号	$f_y$ /MPa	$f_y$ 平均值/MPa	$f_u$ /MPa	$f_u$ 平均值/MPa	强屈比	断后伸长率
Tbc-M-4-1	304.33	301.16	456.81	451.33	1.50	0.35
Tbc-M-4-2	297.99		445.85			
Tfp-M-4-1	393.22	389.00	534.52	533.68	1.37	0.20
Tfp-M-4-2	393.37		537.72			
Tfp-M-4-3	380.40		528.80			

注: $f_y$ 为钢材屈服强度; $f_u$ 为钢材极限强度。

荷载-加载点位移曲线基本呈线性变化,处于弹性状态。(2) 塑性发展阶段。在此阶段,试件底部的端柱和钢面板上出现离散的局部屈曲半波,随着加载点位移的增大,局部屈曲的程度不断增加。试件的水平荷载-加载点位移滞回曲线的刚度逐渐退化,滞回曲线包围的面积不断增大。(3) 破坏阶段。在此阶段,组合剪力墙端柱和钢面板的局部屈曲程度不断增加,端柱和部分钢面板发生断裂,端柱内部混凝土被压碎。试件的骨架曲线开始下降。

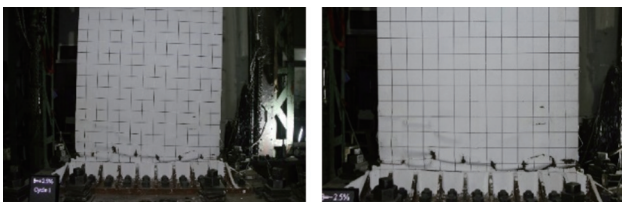
件两侧的端柱和部分钢面板逐渐发生断裂,内填混凝土被压碎,试件刚度迅速退化且承载力不断下降,滞回曲线表现出明显的滑移现象。相比于试件 DSCW-1 ( $n=0.3$ ),试件 DSCW-2 ( $n=0.6$ )的滞回曲线更加饱满,这是因为对于高轴压比试件,其在整个加载过程中端柱的钢板都处于受压状态,未发生受拉断裂,且试件 DSCW-2的峰值承载力略有提升,但是滞回曲线的延性明显下降。



a) 钢面板局部屈曲( $\theta=-2.5\%$ , 第1圈循环) b) 端柱钢管屈曲( $\theta=3.0\%$ , 第1圈循环)

图8 试件 DSCW-1 破坏现象

Fig. 8 Failure phenomena of specimen DSCW-1

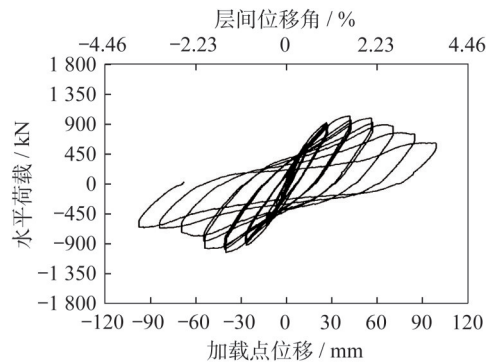


a) 钢面板局部屈曲( $\theta=2.0\%$ , 第1圈循环) b) 钢面板局部屈曲( $\theta=-2.5\%$ , 第1圈循环)

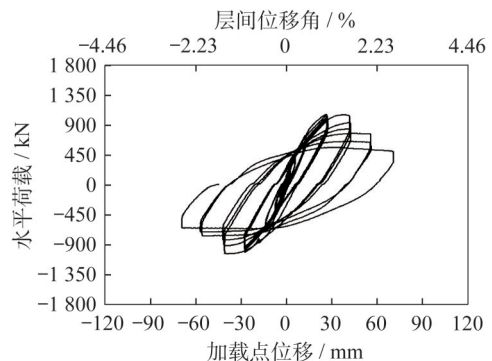
图9 试件 DSCW-2 破坏现象

Fig. 9 Failure phenomena of specimen DSCW-2

试件 DSCW-1、DSCW-2的滞回曲线如图10所示。由图可知:加载初期,试件处于弹性状态,滞回曲线基本呈线性往复,卸载时基本没有塑性变形产生,试件刚度也未有明显变化。随着荷载的增加,试件端柱和钢面板发生局部屈曲,滞回曲线的刚度逐渐下降,同时滞回曲线表现出略微的滑移效应。达到极限荷载后,试



a) DSCW-1



b) DSCW-2

图10 试件滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curves of specimens

### 3 模拟结果

采用纤维模型对双钢板混凝土组合剪力墙试件进行建模,其中端柱和钢面板的钢材纤维采用CFSTsteel单

轴材料模型,模型参数取值如表3所示。试验与模拟结果的对比如图11所示。由图可知,所提出的有限元模型可以较好地模拟双钢板混凝土组合剪力墙的滞回性能,能够准确捕捉组合剪力墙在低周循环荷载下出现的刚度和承载力退化行为。当位移角较大时,传统不考虑退化的钢材本构 Steel02 模型无法模拟双钢板混凝土组合剪力墙的刚度和承载力退化特征。数值模拟与试验得到的

峰值承载力、剩余承载力和初始刚度结果对比分别如表4~6所示。由表可知,采用 Steel02 模型会低估剪力墙的峰值承载力并高估其剩余承载力,而采用 CFSTsteel 模型可以更加准确地计算双钢板混凝土组合剪力墙在循环荷载下的峰值承载力和退化行为。Steel02 模型和 CFSTsteel 模型均可以较好地模拟双钢板混凝土组合剪力墙构件的初始刚度。

表3 CFSTsteel单轴材料模型输入参数

Table 3 Input parameters for CFSTsteel uniaxial material model

构件	$b_2$	$\sigma_{c,m}/\text{MPa}$	$a$	$\sigma_{r,m}/\text{MPa}$	$b_3$	$\Lambda_1$	$\Lambda_{cp}$	$\Lambda_a$	$\Lambda_{yp}$	$\Lambda_r$	$Q_\infty/\text{MPa}$	$b$	$C_1/\text{MPa}$	$\gamma_1$
端柱	0.02	-326.8	16.6	-70.4	2.1	11.0	1.25	3.0	2.3	2.5	22.4	7.2	2 500.0	19.0
钢面板	0.02	-420.6	15.3	-50.0	3.2	11.0	1.23	3.0	3.9	4.5	22.4	7.2	2 500.0	19.0

注: $b_2$ 为受压骨架曲线中应变强化阶段的应变强化率; $\sigma_{c,m}$ 为受压骨架曲线中的峰值等效应力; $a$ 为局部屈曲后退化段刚度的控制参数; $\sigma_{r,m}$ 为受压骨架曲线中的残余等效应力; $b_3$ 为局部屈曲后刚度 $E_{pb,c}$ 与受压侧卸载并反向受拉刚度 $E_{tr,c}$ 的比例常数; $\Lambda_1$ 、 $\Lambda_r$ 分别为表征受拉等效应力、残余等效应力的固有累积耗能能力的参数; $\Lambda_{cp}$ 、 $\Lambda_{yp}$ 分别为表征受压局部屈曲段、受压应变强化段的固有累积耗能能力的参数; $\Lambda_a$ 为表征受压局部屈曲段斜率的固有累积耗能能力的参数; $Q_\infty$ 为各向同性强化幅值控制参数; $b$ 为各向同性强化饱和速率控制参数; $C_k$ 为随动强化线性项的演化速率控制参数; $\gamma_k$ 为随动强化非线性项的演化速率控制参数。

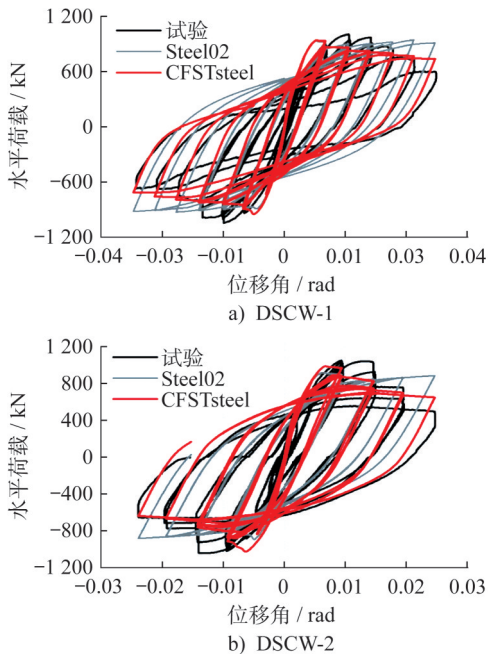


图11 试件荷载-位移角曲线的试验与模拟结果对比

Fig. 11 Comparison of load-displacement angle curves between test and simulation results of specimens

为了进一步验证所提出的 CFSTsteel 单轴材料模型的准确性,对文献[7]中开展的双钢板混凝土组合剪力墙拟静力试验进行模拟,模拟结果如图12所示。由图可知,所提出的模型可以较好地模拟双钢板混凝土组合剪力墙在循环荷载作用下的承载力和刚度退化行为。

表4 试件峰值承载力对比

Table 4 Comparison of peak load-bearing capacity of specimens

试件编号	加载方向	CFSTsteel	Steel02	试验
DSCW-1	正向	947.2	939.6	1 012.6
	负向	-950.7	-889.9	-1 047.8
DSCW-2	正向	989.5	921.1	1 053.1
	负向	-1 029.7	-898.8	-1 047.8

表5 试件剩余承载力对比

Table 5 Comparison of residual load-bearing capacity of specimens

试件编号	加载方向	CFSTsteel	Steel02	试验
DSCW-1	正向	743.6	919.1	605.3
	负向	-714.2	-919.7	-667.2
DSCW-2	正向	649.9	886.4	494.1
	负向	-641.0	-885.6	-658.0

表6 试件初始刚度对比

Table 6 Comparison of initial stiffness of specimens

试件编号	加载方向	CFSTsteel	Steel02	试验
DSCW-1	正向	59.2	61.2	56.6
	负向	59.2	61.2	64.3
DSCW-2	正向	63.9	70.4	72.1
	负向	63.9	70.4	65.5

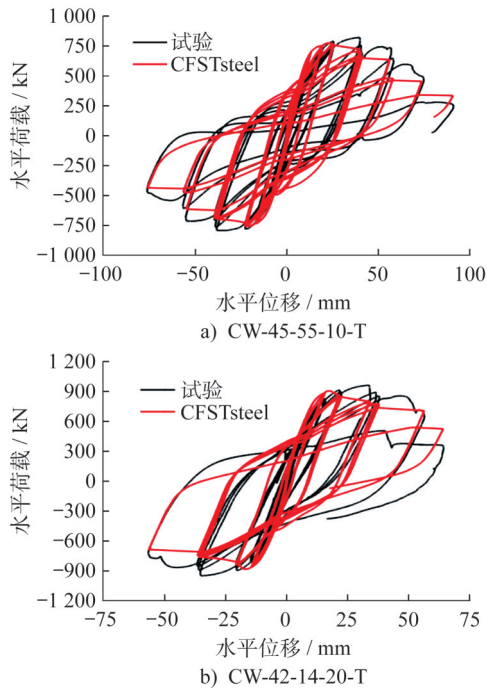


图12 试件荷载-位移曲线的试验与模拟结果对比  
Fig. 12 Comparison of load-displacement curves between test and simulation results of specimens

#### 4 结论

本文提出了可以考虑钢板局部屈曲和失效的单轴材料模型CFSTsteel,基于OpenSees开源软件,建立了双钢板混凝土组合剪力墙的纤维模型,并采用该模型对双钢板混凝土组合剪力墙在低周往复荷载作用下的滞回性能进行了模拟,主要结论如下:

(1) 基于塑性力学和唯象理论框架,提出了考虑局部屈曲的钢材单轴材料模型CFSTsteel,其可以计算局部失稳导致的钢板在拉压方向上所表现出的具有路径依赖特性的循环强化和软化效应。

(2) 基于开源软件OpenSees,建立了双钢板混凝土组合剪力墙的纤维模型,该模型能够较好地模拟双钢板混凝土组合剪力墙的滞回性能,并精确捕捉组合剪力墙在循环荷载作用下由于钢板局部屈曲和延性断裂导致的刚度和承载力退化特征。

#### 参考文献:

[1] 聂建国,陶慕轩,樊健生,等. 双钢板-混凝土组合剪力墙研究新进展[J]. 建筑结构, 2011, 41(12): 52-60. DOI: 10.19701/j.jzjg.2011.12.008.  
NIE Jianguo, TAO Muxuan, FAN Jiansheng, et al. Research advances of composite shear walls with double steel plates and filled concrete[J]. Building Structure, 2011, 41(12): 52-60. DOI: 10.19701/j.jzjg.2011.12.008. (in Chinese)

[2] 韩林海,陶忠,刘威. 钢管混凝土结构:理论与实践[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 24-34. DOI: 10.3969/

j.issn.1000-2243.2001.06.004.

- HAN Linhai, TAO Zhong, LIU Wei. Concrete filled steel tubular structures from theory to practice[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Sciences Edition), 2001, 29(6): 24-34. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2243.2001.06.004. (in Chinese)
- [3] WRIGHT H. The axial load behaviour of composite walling[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 45(3): 353-375. DOI: 10.1016/S0143-974X(97)00030-8.
- [4] CLUBLEY S K, MOY S S J, XIAO R Y. Shear strength of steel-concrete-steel composite panels. Part I: testing and numerical modelling [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(6): 781-794. DOI: 10.1016/S0143-974X(02)00061-5.
- [5] EOM T S, PARK H G, LEE C H, et al. Behavior of double skin composite wall subjected to in-plane cyclic loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(10): 1239-1249. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000057.
- [6] ALZENI Y, BRUNEAU M. In-plane cyclic testing of concrete-filled sandwich steel panel walls with and without boundary elements [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(9): 04017115. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001791.
- [7] SHAFAEI S, VARMA A H, SEO J, et al. Cyclic lateral loading behavior of composite plate shear walls/concrete filled [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(10): 04021145. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003091.
- [8] 汪士也,陈丽华,娄宇,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): 216-226. DOI: 10.13197/j.eeev.2020.04.216.wangsy.025.  
WANG Shiye, CHEN Lihua, LOU Yu, et al. Experimental study and numerical simulation on double skin composite walls [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(4): 216-226. DOI: 10.13197/j.eeev.2020.04.216.wangsy.025. (in Chinese)
- [9] 解琳琳. 基于OPENSEES的RC构件抗震性能数值模拟及验证[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.  
XIE Linlin. Numerical simulation and verification of seismic behavior for RC components based on OPENSEES [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [10] SHAFAEI S, VARMA A H, BROBERG M, et al. Modeling the cyclic behavior of composite plate shear walls/concrete filled (C-PSW/CF) [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 184: 106810. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106810.
- [11] 解琳琳,黄羽立,陆新征,等. 基于OpenSees的RC框架-核心筒超高层建筑抗震弹塑性分析[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 64-71. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.07.0591.  
XIE Linlin, HUANG Yuli, LU Xinzheng, et al. Elasto-plastic analysis for super tall rc frame-core tube structures based on OpenSees [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 64-71. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.07.0591. (in Chinese)