

# 基于循环软化膜理论的钢筋混凝土剪力墙弹塑性分析

蒋欢军<sup>1,2</sup>, 王 斌<sup>1,2</sup>, 吕西林<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

**摘要:** 钢筋混凝土剪力墙及组合剪力墙是高层结构抗震的主要抗侧力构件之一。如何有效地模拟剪力墙构件在地震作用下的滞回性能, 是高层结构抗震性能评估的关键问题之一。针对剪力墙构件弹塑性行为的特点, 目前已经发展了多种微观和宏观分析模型。介绍了循环软化膜理论, 基于该理论并利用 OpenSees 程序提出了不同类型剪力墙构件的建模方法, 对 11 片不同破坏模式和不同配钢形式的剪力墙试件进行了低周反复加载数值模拟。计算结果表明, 该分析方法不但能够很好地模拟不同类型剪力墙的整体滞回性能, 而且可以预测局部材料应变信息, 可为高层建筑结构抗震性能评估提供参考。

**关键词:** 循环软化膜理论; 钢筋混凝土剪力墙; 内藏钢桁架组合剪力墙; 内置钢板组合剪力墙; 抗震性能

**中图分类号:** TU375.4; TU973.3

**文献标志码:** A

was introduced. Based on this theory, the modeling procedures for different kinds of shear walls were presented by using OpenSees program. The models were validated by comparing the calculated responses with the experimental results of 11 isolated walls with different failure modes and various steel-encased profiles under cyclic loadings. Numerical simulation results indicate that such analytical method can predict effectively the global and local inelastic behavior (such as overall hysteretic behavior and local material strain) of the wall system, and it provides a reference to seismic performance assessment of high-rise buildings.

**Key words:** cyclic soften membrane model; reinforced concrete shear wall; steel concealed truss-concrete composite shear walls; steel plate reinforced concrete composite shear walls; seismic performance

## Elasto-plastic Analysis of Reinforced Concrete Shear Walls Based on Cyclic Soften Membrane Model

JIANG Huanjun<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>1,2</sup>, LÜ Xilin<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The reinforced concrete (RC) shear wall and composite shear wall is one of the predominant structural components used extensively in high-rise buildings to resist lateral loads induced by earthquakes. How to simulate the hysteretic behavior of RC shear walls effectively under earthquakes is one of the key issues of seismic performance evaluation of high-rise buildings. According to the features of elasto-plastic responses of RC shear walls, several analytical models which could be classified into two groups, microscopic models and macroscopic models, were developed for RC shear walls. The theory of cyclic soften membrane model (CSMM)

剪力墙构件是高层结构重要的抗侧力构件之一。剪力墙不仅承担了大部分的地震剪力, 还起到耗散地震能量的重要作用, 是高层结构体系中抗震设计的关键构件。因此, 在高层结构的抗震性能评估中, 如何有效地对钢筋混凝土剪力墙以及组合剪力墙进行弹塑性数值模拟, 是高层结构抗震性能评估的关键问题之一。

基于剪力墙构件的弹塑性特点和计算效率等因素, 目前已经发展了多种宏观计算模型和微观计算模型。宏观模型一般以构件或结构的一部分作为一个单元, 单元的本构关系通过试验结果或理论分析得到。其中早期具有代表性的模型是 Kabeyasawa<sup>[1]</sup>提出的三垂直杆单元(TVLEM), 该模型将剪力墙单元等效为上下刚性梁和三根垂直杆组成, 其中刚性梁代表上下楼板, 两个外侧垂直杆代表墙体边缘约束构件的轴向刚度, 中间杆由垂直、水平和弯曲弹簧组成, 其模型见图 1a 所示。该模型为后期宏观模型

收稿日期: 2014-05-31

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAJ13B02)

第一作者: 蒋欢军(1973—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为高层及超高层结构抗震。E-mail: jhj73@tongji.edu.cn

通讯作者: 王 斌(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为高层结构抗震研究。E-mail: 2008wangbin@tongji.edu.cn

的发展提供了参考基础,而且在当前实际研究中还有广泛的应用<sup>[2]</sup>. Vulcano 将 TVLEM 中的轴向弹簧表示为两根并列的弹簧,用来考虑实际材料(钢与混凝土)的本构关系以及二者之间的相互作用.为了解决墙体弯曲弹簧和其他弹簧变形协调的问题,在 TVLEM 的基础上提出了多垂直杆单元模型(MVLEM),墙体的相对转动中心则由  $ch$  确定( $h$  为整个墙单元的高度)<sup>[3]</sup>. Ghobarah<sup>[4]</sup> 基于前期大部分分析模型不能考虑剪力墙的弯曲与剪切变形的耦合关系,提出了一个由四个弯曲弹簧和一个剪切弹簧组成的计算模型,其中剪切弹簧的本构关系由修正压力场理论(MCFT)确定,同时考虑轴力和弯矩对剪力的影响. Chen<sup>[5]</sup> 在原有 TVLEM 的基础上,提出了采用非线性平面单元考虑剪力墙弯剪耦合的模型. Orakcal<sup>[6]</sup> 在 MVLEM 的基础上,对钢筋和混凝土的本构关系进行了修正(如混凝土拉伸强化效应).随后,为了考虑剪力墙弯曲破坏与剪切破坏的耦合效应,Massone<sup>[7]</sup> 和 Koložvari<sup>[8]</sup> 分别对该模型进行了改进,可以实现弯剪耦合的单调加载和反复加载分析. Kante<sup>[9]</sup> 在原有 MVLEM 的基础上,将其发展到了三维 MVLEM 单元.随后 Fischinger<sup>[10]</sup> 又发展了考虑非线性剪切变形和弯剪耦合的模型,其中非线性剪切弹簧可以考虑混凝土骨料的咬合力、竖向钢筋的握裹力和水平钢筋的效果.此外,也有学者采用其他类型的宏观模型,如 Mazars<sup>[11]</sup> 和 Park<sup>[12]</sup> 采用桁架(truss)模型分析了剪力墙的滞回性能. Panagiotou<sup>[13]</sup> 也提出了一种桁架模型,并且在后来的研究中将该模型发展到三维分析模型中<sup>[14]</sup>.

国内学者对宏观剪力墙模型也做了广泛的研究,如作者<sup>[15-16]</sup> 推导了 MVLEM 的单元刚度矩阵,讨论了单元材料本构和相对转动中心高度等参数.孙景江<sup>[17]</sup>、汪梦甫<sup>[18]</sup> 和陈伯望<sup>[19]</sup> 都针对 MVLEM 单元讨论了其单元刚度矩阵形式和考虑剪切变形的分析方法等.谢凡<sup>[20]</sup> 基于经典梁理论,提出了一种精度较高的新的 MVLEM.但实际上,近年来工程应用较多的是纤维模型,其模型与 MVLEM 类似,见图 1b 所示.

微观模型是指用有限元方法来离散钢筋混凝土构件,基于材料的本构关系进行弹塑性分析.

以二维混凝土板的剪切试验为基础,Vecchio 和 Collins<sup>[21]</sup> 提出了基于修正压力场理论(MCFT)的分析模型. Mansour 和 Hsu<sup>[22-23]</sup> 和 Hsu<sup>[24]</sup> 在原有研究的基础上,提出了循环软化膜模型(CSMM). Orakcal<sup>[25]</sup> 在这两个模型的基础上,将通用的材料本

构关系应用到平面单元中,其本质和 MCFT 与 CSMM 是一样的.从目前商业有限元软件来说,常用的剪力墙单元为分层壳单元,其原理是将混凝土和钢筋设置为不同的层,然后给赋予厚度和材料属性.壳单元与材料的本构关系直接联系起来,可以较好地反映剪力墙的受力行为.

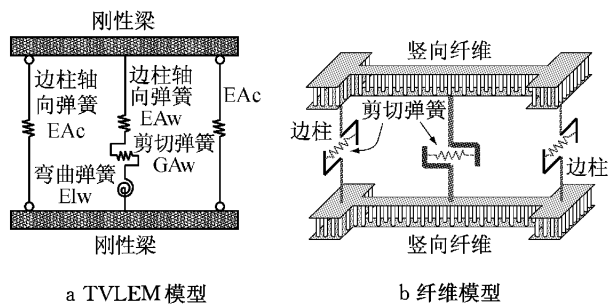


图1 剪力墙典型的宏观分析模型

Fig. 1 Typical macroscopic analysis models of shear walls

相对于微观模型而言,宏观模型在确定剪力墙构件分析参数时,大多基于试验数据和经验公式,而且分析参数因不同构件而异.微观模型力学原理清晰,但计算量较大.随着对剪力墙弹塑性行为的不断认识和计算机性能的提高,微观分析模型在当前研究中得到了进一步地发展与应用.

本文介绍了 CSMM 相关理论,基于 OpenSees 程序提出了不同剪力墙构件的建模方法,对相关研究者完成的 11 片不同破坏模式和不同配钢形式的剪力墙试件进行低周反复加载数值模拟.计算结果表明,该分析方法不但能够很好地模拟不同类型剪力墙的整体滞回性能,而且可以预测局部材料的应变信息.该方法可为高层钢筋混凝土剪力墙结构以及组合剪力墙结构的抗震性能评估提供参考.

## 1 循环软化膜(CSMM)理论

CSMM 模型是在 SMM<sup>[26]</sup> 模型基础上考虑循环加载过程中的本构关系和修正的泊松效应发展而来,而 SMM 模型则是在固定角软化桁架模型(FA-STM)<sup>[27]</sup> 的基础上,考虑了开裂混凝土泊松比效应而提出来的.

在 FA-STM 理论中,钢筋混凝土单元由混凝土单元和钢筋单元组成,混凝土单元可承担轴向正应力和剪应力,而钢筋只承担轴向应力,如图 2 所示.图中  $\sigma_i$ 、 $\sigma_i^c$ 、 $\sigma_i^t$  和  $\sigma_i^c$  为  $l$ - $t$  坐标系下钢筋混凝土单元和混凝土单元的正应力, $\tau_k$  和  $\tau_k^c$  分别为钢筋混凝土

单元和混凝土单元的剪应力,  $\rho_l f_l$  和  $\rho_t f_t$  为钢筋的轴向应力。

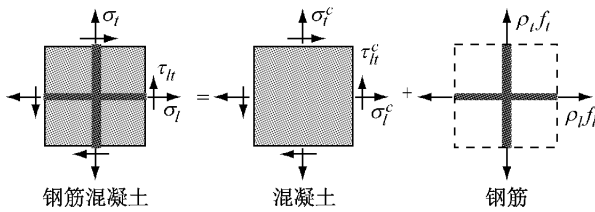


图 2 钢筋混凝土单元应力状态

Fig.2 Stress state in reinforced concrete element

FA-STM 的钢筋混凝土单元应力状态如图 3 所示. 1-2 轴为应力主轴方向, 其中 1 轴与  $l$  轴的夹角为  $\alpha_1$ , 混凝土沿 1 方向开裂, 开裂面上的正应力为  $\sigma_1^c$ , 沿开裂面的剪应力为  $\tau_{12}^c$ . 另外与开裂面垂直方向沿 2 轴的正应力为  $\sigma_2^c$ .

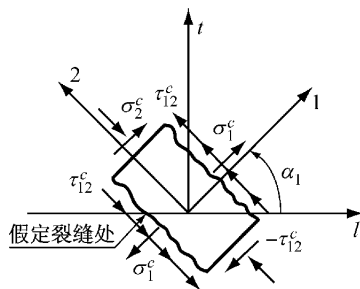


图 3 FA-STM 应力状态

Fig.3 Stress state in FA-STM

由于混凝土的应力应变定义在 1-2 坐标轴上, 所以在 FA-STM 中, 需要将  $l-t$  轴上的应变转换到 1-2 轴上, 由 1-2 轴上的应力应变关系求得混凝土的应力, 然后再转换到  $l-t$  轴. 在 FA-STM 中, 钢筋混凝土单元除了需要建立材料的应力应变关系, 还需要满足力的平衡方程和变形协调方程。

## 2 分析模型的建立

### 2.1 分析模型

采用 OpenSees 程序<sup>[28]</sup>对剪力墙构件进行数值模拟, 分析单元如图 4 所示(普通 RC 墙体模型中, 没有钢板和钢桁架单元). 试验竖向力均匀加载至分析模型顶部, 水平力的位置按照试验加载点设定. 边缘约束构件中核心区考虑约束混凝土效应. 在组合剪力墙模型中, 不考虑钢桁架、钢板与 RC 墙体之间的粘结滑移, 采用共节点建模方式. 边缘约束构件与剪力墙板之间采用 EqualDOF 命令组合, 协调二者之间的变形。

剪力墙边缘约束区域主要提供构件的抗弯承载力, 其受力特性更接近常见的梁柱单元, 在分析中采用基于刚度法的纤维单元, 混凝土材料选用 Concrete 02 本构模型, 钢筋和型钢采用 Steel 02 本构模型。

剪力墙板采用四边形单元, 单元的网格划分尺寸参考墙体塑性铰长度进行划分, 采用 CSMM 材料. 内藏钢桁架在受力性质上更接近轴向拉压行为, 采用桁架单元模拟, 材料采用 Steel02 本构模型. 内置钢板采用四边形单元, 材料为 Plane Stress Simplified J2.

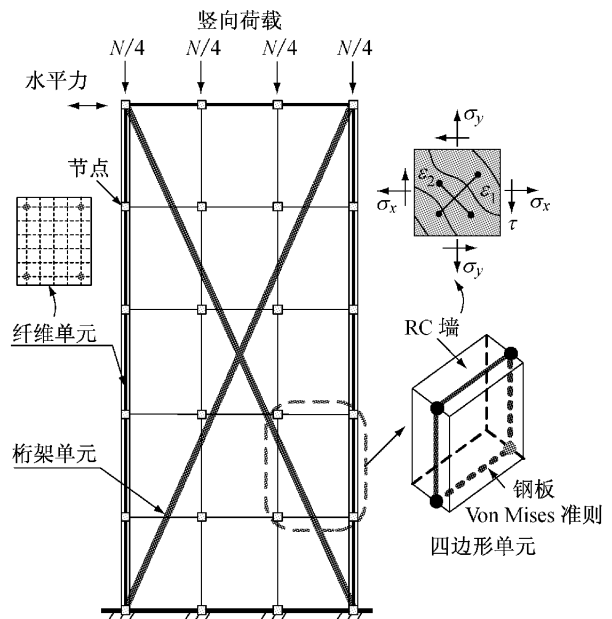


图 4 剪力墙分析模型

Fig.4 Analysis model of shear wall

### 2.2 材料本构关系

#### 2.2.1 混凝土本构关系

常用的混凝土和钢筋的本构关系大多是在单轴应力状态下得到, 但是对于钢筋混凝土二维受力单元, 其受力状态不同于材料的单轴受力。

混凝土本构关系见图 5 所示. C1 和 C2 段为受压骨架包络线, T1 和 T2 为受拉骨架包络线. C3—C7 为受压加卸载路径, T3 和 T4 为受拉加卸载路径. 其中,  $f'_c$  为混凝土轴心抗压强度;  $\epsilon_0$  为峰值压应变;  $f_{cr}$  为混凝土开裂应力;  $\epsilon_{cr}$  为开裂应变;  $\epsilon_1$  为主拉应变;  $\beta$  为钢筋混凝土单元主应力与混凝土单元主应力之间的夹角;  $\zeta$  为软化系数;  $D$  为损伤参数。

C1 阶段

$$\sigma^c = (D\zeta f'_c - f'_{cT4}) \left[ 2 \left( \frac{\epsilon}{\zeta \epsilon_0} \right) - \left( \frac{\epsilon}{\zeta \epsilon_0} \right)^2 \right] + f'_{cT4} \quad (1)$$

$$0 \leq |\epsilon| \leq |\zeta \epsilon_0|$$

C2 阶段

$$\sigma^c = D\zeta f'_c \left[ 1 - \left( \frac{\bar{\epsilon}/\epsilon_0 - 1}{4/\zeta - 1} \right)^2 \right], \quad |\bar{\epsilon}| > |\zeta\epsilon_0| \quad (2)$$

其中

$$\zeta = \left( \frac{5.8}{\sqrt{f'_c}} \leq 0.9 \right) \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 400\bar{\epsilon}_1}} \right) \left( 1 - \frac{|\beta|}{24^\circ} \right) \quad (3)$$

$$D = 1 - 0.4 \frac{\epsilon'_c}{\epsilon_0} \leq 1.0 \quad (4)$$

T1 阶段

$$\sigma^c = E_c \bar{\epsilon}, \quad 0 \leq \bar{\epsilon} \leq \epsilon_{cr} \quad (5)$$

T2 阶段

$$\sigma^c = f_{cr} \left( \frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_{cr}} \right)^{0.4}, \quad \bar{\epsilon} \geq \epsilon_{cr} \quad (6)$$

加载和卸载段

$$\sigma^c = \sigma_i^c + E_{cc}(\bar{\epsilon}_i - \bar{\epsilon}), \quad E_{cc} = \frac{\sigma_i^c - \sigma_{i+1}^c}{\bar{\epsilon}_i - \bar{\epsilon}_{i+1}} \quad (7)$$

在 CSMM 中,混凝土材料受压时的应力和应变考虑由其垂直方向的拉应变、混凝土强度和钢筋混凝土单元主应力与混凝土单元主应力之间的夹角所引起的软化效应。同时模型中考虑加卸载过程中裂缝的开裂和闭合效应。

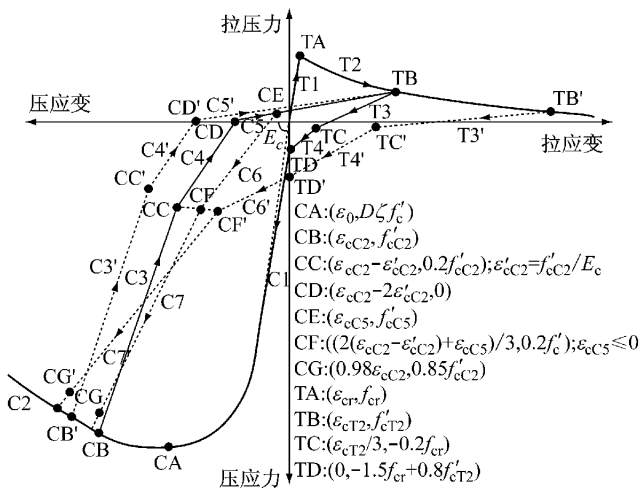


图5 混凝土的本构关系

Fig.5 Cyclic stress-strain relationship of concrete

混凝土受拉开裂之前,其应力-应变关系为线性关系。混凝土开裂后,由于钢筋和混凝土之间的粘结作用使得裂缝间的混凝土还能继续承担拉应力,所以考虑混凝土对钢筋的这种“拉伸强化”效应,开裂后的混凝土采用平均应力-应变的关系。

### 2.2.2 钢筋本构关系

在 CSMM 中,以平均应力和平均应变来定义混凝土中钢筋的应力应变关系,钢筋屈服后的强化系

数通过配筋率、钢筋强度和混凝土强度来确定。同时这种平均化的钢筋应力应变关系考虑包辛格效应。

钢筋的本构关系如图6所示。 $E_s$  为钢筋弹性模量; $f'_y$  为平均屈服应力; $\epsilon'_y$  为平均屈服应变。

1 阶段

$$f_s = E_s \bar{\epsilon}_s, \quad \bar{\epsilon}_s \leq \epsilon'_y \quad (8)$$

2 阶段

$$f_s = (0.91 - 2B)f_y + (0.02 + 0.25B)E_s \bar{\epsilon}_s, \quad \bar{\epsilon}_s \geq \epsilon'_y \quad (9)$$

4 阶段

$$f_s = -f_y, \quad f_s \leq -f_y \quad (10)$$

3 和 5 阶段

$$\bar{\epsilon}_s - \bar{\epsilon}_{si} = \frac{f_s - f_i}{E_s} \left[ 1 + A^{-R} \left| \frac{f_s - f_i}{f_y} \right|^{R-1} \right] \quad (11)$$

其中: $B = \frac{1}{\rho} \left( \frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5}$ ,  $\rho \geq 0.15\%$ ,  $A = 1.9k_p^{-0.1}$ ,  $R = 10k_p^{-0.2}$ ,  $k_p = \frac{\bar{\epsilon}_p}{\epsilon'_y}$ ,  $\epsilon'_y = (0.93 - 2B)\epsilon_y$

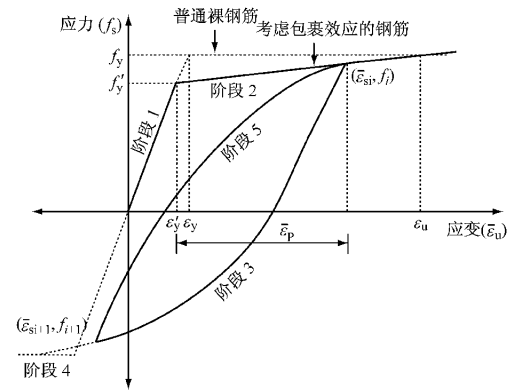


图6 钢筋的本构关系

Fig.6 Cyclic stress-strain relationship of steel

### 2.2.3 混凝土受剪本构关系

混凝土的剪应力  $\tau_{12}^c$  与剪应变  $\gamma_{12}$  在 1-2 坐标轴中的本构方程为

$$\tau_{12}^c = \left( \frac{\sigma_1^c - \sigma_2^c}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \right) \frac{\gamma_{12}}{2} \quad (12)$$

## 3 算例验证

基于剪力墙分析模型和材料本构关系,对国内外不同研究者完成的 11 片不同破坏类型和配钢形式的剪力墙试件进行数值模拟,对比了构件滞回曲线和部分试验的局部材料应变,验证了所提出的建模方法、单元选择与网格划分的合理性。

### 3.1 弯曲破坏为主的钢筋混凝土剪力墙

当试件高宽比较大,配筋合理时,其构件抗剪承载力高于抗弯承载力,其破坏模式以弯曲破坏为主. 选用 Thomsen 与 Wallace<sup>[29]</sup> 的试件 RW2 试件进行模拟分析,该试件高宽比为 3.

试验破坏以弯曲破坏为主,试件加载至 0.75% 的位移角时 (27.4 mm),边缘约束区纵筋屈服;当加载至 1% 时 (36.5 mm),边缘区混凝土有少量的压碎与剥落现象;当加载至 2.5% 时 (91.4 mm),构件达到峰值承载力. 最终破坏形态为边缘约束区域混凝土压碎剥落,纵向钢筋压屈. 采用本文的分析方法对此试件进行数值模拟,与试验结果对比如图 7 所示. 可以看出,分析模型很好地反映了剪力墙整体滞回行为,分析方法对构件峰值承载力和刚度退化都有较高的预测精度.

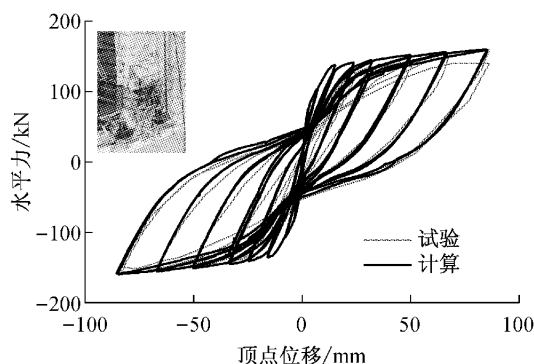


图 7 RW2 计算与试验滞回曲线

Fig. 7 Analysis and test load-displacement curves of RW2

### 3.2 剪切破坏为主的钢筋混凝土剪力墙

剪力墙剪切破坏的模拟一直是剪力墙非线性分析中的一个难点. 本文选用 Altin<sup>[30]</sup> 试验中的试件 Specimen-1 作为验证模型. 该试件高宽比为 1.5, 由于试件缺少边缘约束区域,同时腹板水平配率偏小 (配筋率为 0.14%),试件在低周反复加载过程中,墙体发生剪切脆性破坏,极限位移角为 0.65%. 计算分析与试验结果对比如图 8 所示. 可以看出,分析模型很好地反映剪力墙剪切破坏的受力特性,分析方法对剪切破坏捏拢的滞回特性和构件峰值承载力前后的强度退化及刚度退化都有较高的预测精度.

### 3.3 不同加载制度的钢筋混凝土剪力墙

不同的加载制度对构件的滞回性能有明显地影响. 选用 Lefas 与 Kotsovos<sup>[31]</sup> 中试件 SW33 作为分析试件. 该试件高宽比为 2,试件前期采用等幅加载,后期采用非等幅加载,以弯曲破坏模式为主.

计算分析与试验结果对比如图 9 所示. 可以看

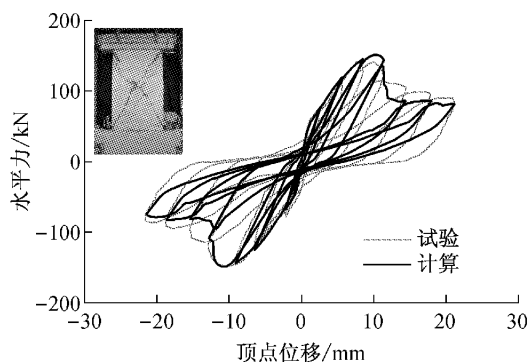


图 8 Specimen-1 计算与试验滞回曲线

Fig. 8 Analysis and test load-displacement curves of Specimen-1

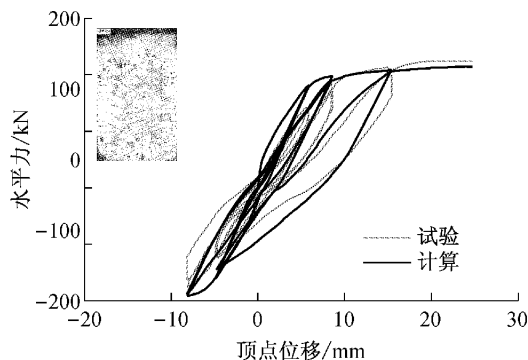


图 9 SW33 计算与试验滞回曲线

Fig. 9 Analysis and test load-displacement curves of SW33

出,分析模型能很好地模拟剪力墙变幅加载的滞回特性. 边缘约束区域中纵筋底部 1 号应变的试验与计算结果对比如图 10 所示. 可以看出,该分析能较准确地预测构件局部的材料应变,表明了分析模型中采用的材料本构关系和单元划分的合理性,可以将模拟计算的材料应变结果作为判别构件性能依据.

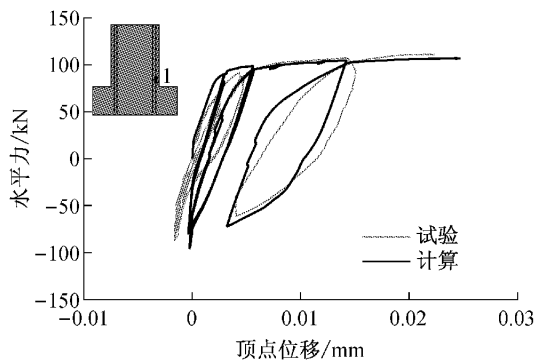


图 10 1 号纵筋应变曲线

Fig. 10 Analysis and test strain curves of rebar at No. 1 point

### 3.4 大比例尺钢筋混凝土剪力墙

瑞士苏黎士联邦理工学院在 1999 年完成了 6

片大比例尺(1:2)钢筋混凝土剪力墙低周反复加载试验<sup>[32]</sup>. 本文选取其中的试件 SW3 和试件 SW5 进行对比分析.

SW3 由于墙体边缘约束构件的配筋率和墙板纵筋的配筋率较高,最终破坏形态为边缘约束区域混凝土剥落,钢筋压屈,呈延性破坏形式. 与 SW3 相比,SW5 的边缘约束区域的配筋率和墙板纵筋配筋率约为 SW3 的 1/2,并且竖向荷载为 SW3 的 2.14 倍,加载后期边缘纵筋断裂. 较高的轴压力和较低的配筋率,使得 SW5 的滞回曲线和 SW3 相比,具有明显的捏拢效应. 计算分析与试验结果对比如图 11 和图 12 所示. 可以看出,无论对于哪种破坏模型,本文的分析方法都能较好地预测构件的滞回特性.

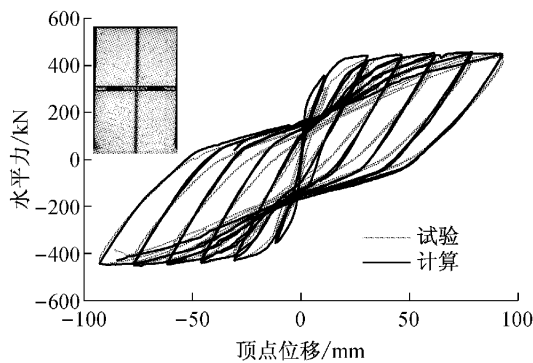


图 11 SW3 计算与试验滞回曲线

Fig. 11 Analysis and test load-displacement curves of SW3

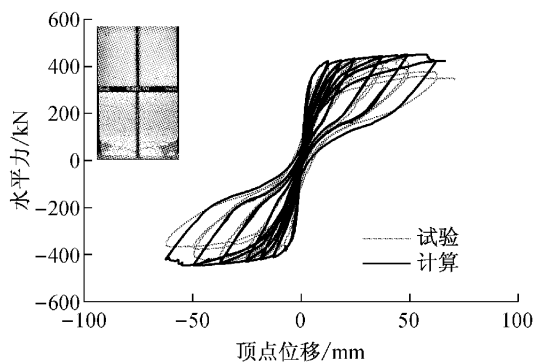


图 12 SW5 计算与试验滞回曲线

Fig. 12 Analysis and test load-displacement curves of SW5

### 3.5 斜向配筋钢筋混凝土剪力墙

为研究不同类型剪力墙腹板配筋形式对剪力墙构件抗震性能的影响,Shaingchin 等人<sup>[33]</sup>于 2007 年完成了 5 片不同配筋形式的剪力墙试验,这里选用试件 WD170 作为分析试件. 由于采用了 45°配筋形式,试验中构件的滞回曲线比传统配筋形式的剪力墙饱满,耗能能力增强,构件的剪切变形可以减少约

20%. 计算分析与试验结果对比如图 13 所示. 可以看出,该分析方法比较好地模拟了斜向配筋剪力墙的受力特性和滞回性能.

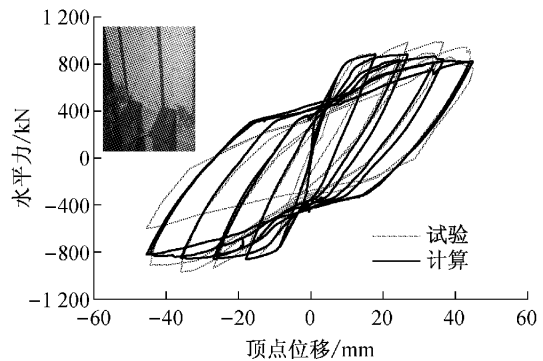


图 13 WD170 计算与试验滞回曲线

Fig. 13 Analysis and test load-displacement curves of WD170

### 3.6 型钢混凝土组合剪力墙

为了改善普通 RC 剪力墙墙肢在地震作用下易发生压溃破坏的缺点,通常会在其墙体端部配置型钢. 选用 Dan<sup>[34]</sup>试验中试件 CSRCW-4 作为分析模型. 分析模型中端部型钢离散为钢筋纤维,其余部分建模与普通剪力墙类似.

计算分析与试验结果对比如图 14 所示. 可以看出,分析模型能较好地模拟型钢组合剪力墙的承载力、强度和刚度退化,但分析的曲线比试验曲线略显饱满. 记录边缘型钢 1 号位置的型钢应变,与试验对比如图 15 所示. 可以看出,该分析模型能较好地预测构件的整体滞回性能和材料的局部应变反应.

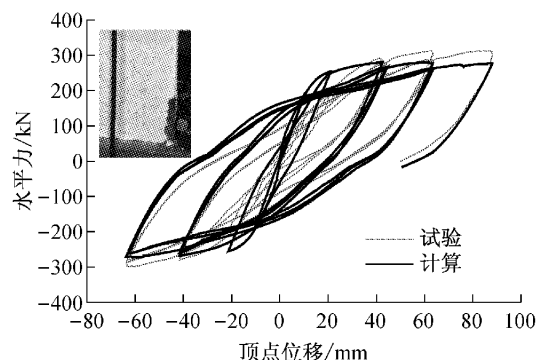


图 14 CSRCW-4 计算与试验滞回曲线

Fig. 14 Analysis and test load-displacement curves of CSRCW-4

### 3.7 内藏钢桁架混凝土组合剪力墙

为了改善剪力墙内部传力机制,通过改变剪力墙内部的配筋和配钢形式可以有效地提高剪力墙的延性和耗能能力,显著地改善墙体的抗震性能. 选用

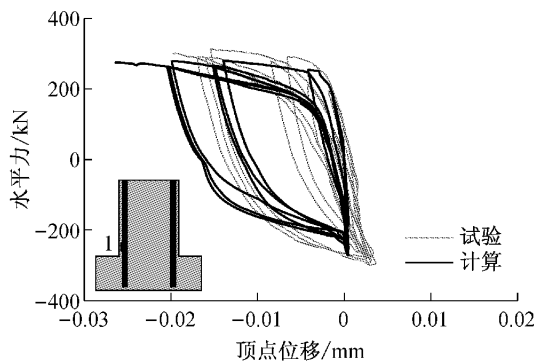


图 15 1 号型钢应变曲线

Fig. 15 Analysis and test strain curves of steel at No. 1 point

曹万林等人<sup>[35]</sup>的试件 SW1.5-5 作为分析模型。

分析模型中,内藏钢桁架采用 Truss 单元,本构关系采用 steel02,其余与普通剪力墙类似。数值模拟结果与试验结果对比如图 16 所示。从图中可以看出,所采用的分析方法能够较好地模拟此类组合剪力墙构件的滞回性能。

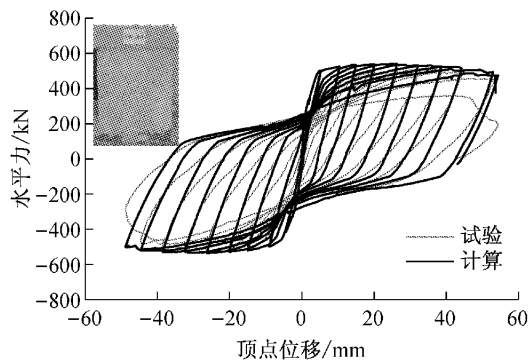


图 16 SW1.5-5 计算与试验滞回曲线

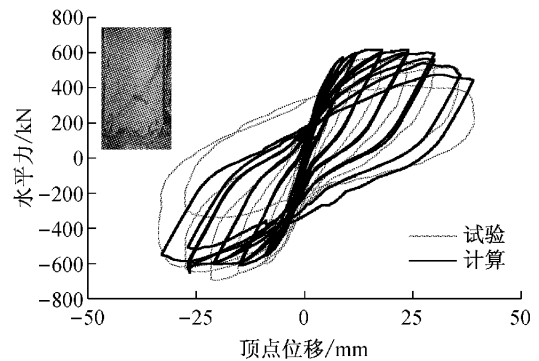
Fig. 16 Analysis and test load-displacement curves of SW1.5-5

### 3.8 内置钢板混凝土组合剪力墙

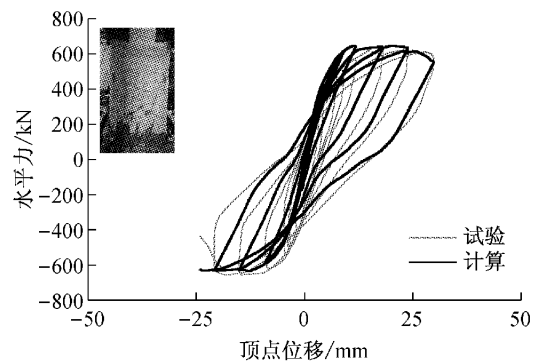
相比普通 RC 剪力墙而言,内置钢板可以使墙体轴压承载力大幅提高。外围混凝土的存在能够在一定程度上抑制钢板在强震作用下发生屈曲破坏,充分发挥钢板的力学性能,保证剪力墙在侧向荷载作用下的承载力和耗能能力,同时还可起到对钢板的防火和防腐作用。

选用蒋冬启等人<sup>[36]</sup>的高强混凝土组合剪力墙试验中 SPRCW1、SPRCW2 和 SPRCW3 作为钢板组合剪力墙分析模型。试件墙厚 150 mm,截面高度 800 mm,墙高 2 160 mm。其中钢板采用四边形单元,材料本构采用 Plane Stress Simplified J2,其余与普通剪力墙类似。数值模拟结果与试验结果对比见图 17 所示。从图中可以看出,所采用的分析方法能够较

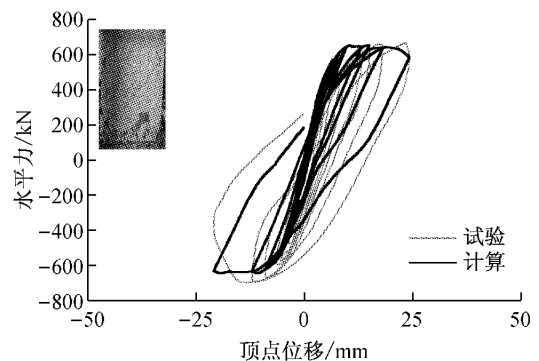
好地模拟构件的滞回性能。



a SPRCW1 试件



b SPRCW2 试件



c SPRCW3 试件

图 17 钢板组合剪力墙计算与试验滞回曲线

Fig. 17 Analysis and test load-displacement curves of steel plate reinforced concrete composite shear walls

## 4 结论

通过介绍 CSMM 的理论,并利用 OpenSees 分析程序,对相关研究者完成的 11 片不同破坏模式和不同配钢形式的剪力墙试验构件进行低周反复加载下的数值模拟,得到主要结论如下:

(1) 计算结果表明,该分析方法能够较好地预测不同破坏模式和不同配钢形式的剪力墙构件的峰值承载力以及强度和刚度退化等滞回性能,验证了本文所提出的建模方法的合理性和可靠性。

(2) 该分析方法可以较准确地预测构件局部的材料应变反应,表明了采用的分析模型中材料的本构模型和单元划分的合理性,可以将模拟计算的材料应变结果作为评价构件性能的依据,可为高层建筑结构抗震性能评估提供参考。

## 参考文献:

- [1] Kabeyasawa T, Shiohara H, Otani S, *et al.* Analysis of the full-scale seven-story reinforced concrete test structure [J]. Journal of the Faculty of Engineering, 1983, 37(2): 431.
- [2] Kim Y, Kabeyasawa T, Matsumori T, *et al.* Numerical study of a full-scale six-story reinforced concrete wall-frame structure tested at E-Defense [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(8): 1217.
- [3] Vulcano A, Bertero V V, Colotti V. Analytical modeling of R/C structural walls [C]//Proceedings, 9th World Conference on Earthquake Engineering. [S.l.]: IAEE, 1988: 41-46.
- [4] Ghobarah A, Youssef M. Modelling of reinforced concrete structural walls [J]. Engineering Structures, 1999, 21(10): 912.
- [5] Chen S, Kabeyasawa T. Modeling of reinforced concrete shear wall for nonlinear analysis [C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand: IAEE, 2000: paper number 1596.
- [6] Orakcal K, Wallace J W, Conte J P. Flexural modeling of reinforced concrete walls-model attributes [J]. Structural Journal, 2004, 101(5): 688.
- [7] Massone L M, Orakcal K, Wallace J W. Modeling of squat structural walls controlled by shear [J]. Structural Journal, 2009, 106(5): 646.
- [8] Kolozvari K, Tran T, Wallace J, *et al.* Modeling of cyclic shear-flexure interaction in reinforced concrete structural walls [C] //Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering. Portugal: IAEE, 2013: paper number 2471.
- [9] Kante P. Seismic vulnerability of RC structural walls [D]. [S.l.]: Ljubljana University, 2005.
- [10] Fischinger M, Rejec K, Isaković T. Modeling inelastic shear response of RC walls [C]//Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon: IAEE, 2013: paper number 2120.
- [11] Mazars J, Kotronis P, Davenne L. A new modelling strategy for the behavior of shear walls under dynamic loading [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(4): 937.
- [12] Park H, Eom T. Truss model for nonlinear analysis of RC members subject to cyclic loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(10): 1351.
- [13] Panagiotou M, Restrepo J I, Schoettler M, *et al.* Nonlinear cyclic truss model for reinforced concrete walls [J]. Structural Journal, 2012, 109(2): 205.
- [14] Lu Y, Panagiotou M. Three-dimensional cyclic beam-truss model for non-planar reinforced concrete walls [J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(3): 04013071.
- [15] 蒋欢军, 吕西林. 用一种墙体单元模型分析剪力墙结构[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(3): 40.  
JIANG Huanjun, LÜ Xilin. Analysis of shear wall structures using a type of wall element [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(3): 40.
- [16] 蒋欢军, 吕西林. 一种宏观剪力墙单元模型应用研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(1): 38.  
JIANG Huanjun, LÜ Xilin. Research on application of macroscopic shear wall model [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(1): 38.
- [17] 孙景江, 江近仁. 高层建筑抗震墙非线性分析的扩展铁木辛哥分层梁单元[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(2): 78.  
SUN Jingjiang, JIANG Jinren. Extended timoshenko layered beam element for nonlinear analysis of RC high-rise buildings with structural walls [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(2): 78.
- [18] 汪梦甫, 周锡元. 钢筋混凝土剪力墙多垂直杆非线性单元模型的改进及其应用[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 38.  
WANG Mengfu, ZHOU Xiyuan. The improved parallel multi component model for the nonlinear seismic response analysis of RC walls and its application [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 38.
- [19] 陈伯望, 王海波, 沈蒲生. 剪力墙多垂直杆单元模型的改进及应用[J]. 工程力学, 2005, 22(3): 183.  
CHEN Bowang, WANG Haibo, SHEN Pusheng. An improved multi-vertical-truss-element model of shear wall and its application [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(3): 183.
- [20] 谢凡, 沈蒲生. 一种新型剪力墙多垂直杆单元模型: 原理和应用[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 154.  
XIE Fan, SHEN Pusheng. A new type of multi-vertical-line-element model of shear wall: principle and application [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 154.
- [21] Vecchio F J, Collins M P. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear [J]. Structural Journal, 1986, 83(2): 219.
- [22] Mansour M, Hsu T. Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. I: experiments [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 44.
- [23] Mansour M, Hsu T. Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. II: theoretical model [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 54.
- [24] Hsu T T C, Mo Y L. Unified theory of concrete structures [M]. New York: John Wiley & Sons, 2010.
- [25] Orakcal K, Ulugtekin D, Massone L M. Constitutive modeling of reinforced concrete panel behavior under cyclic loading [C]//Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering. Portugal: IAEE, 2013: paper number 3573.
- [26] Hsu T T C, Zhu R R H. Softened membrane model for reinforced concrete elements in shear [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(4): 460.
- [27] Pang X B D, Hsu T T C. Fixed angle softened truss model for reinforced concrete [J]. Structural Journal, 1996, 93(2): 196.
- [28] OpenSees. Open system for earthquake engineering simulation [EB/OL]. [2013-12-15]. <http://opensees.berkeley.edu>. 2013.
- [29] Thomsen IV J H, Wallace J W. Displacement-based design of



- slender reinforced concrete structural walls-experimental verification [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(4): 618.
- [30] Altin S, Anil O, Koprman Y, *et al.* Hysteretic behavior of RC shear walls strengthened with CFRP strips [J]. *Composites: Part B*, 2013, 44(1): 321.
- [31] Lefas L D, Kotsovos M D. Strength and deformation characteristics of reinforced concrete walls under load reversals [J]. *Structural Journal*, 1990, 87(6): 23.
- [32] Dazio A, Beyer K, Bachmann H. Quasi-static cyclic tests and plastic hinge analysis of RC structural walls [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(7): 1556.
- [33] Shaingchin S, Lukkunaprasit P, Wood S L. Influence of diagonal web reinforcement on cyclic behavior of structural walls [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(4): 498.
- [34] Dan D, Fabian A, Stoian V. Nonlinear behavior of composite shear walls with vertical steel encased profiles [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(10): 2794.
- [35] 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. CAO Wanlin, ZHANG Jianwei, TAO Junping, *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.
- [36] 蒋冬启, 肖从真, 陈涛, 等. 高强混凝土钢板组合剪力墙压弯性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2011, 45(3): 17. JIANG Dongqi, XIAO Congzhen, CHEN Tao, *et al.* Experimental study of the compression-bending behavior of high-strength concrete steel composite shear walls [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 45(3): 17.

• 下期文章摘要预报 •

## 基于结构健康监测的苏通大桥实测强风演变功率谱

王 浩, 程怀宇, 茅建校, 李爱群

对基于小波变换的非平稳时间序列演变功率谱密度函数的估计方法进行了总结. 以苏通大桥结构健康监测系统实测的台风达维、海葵以及冬季强北风数据为研究对象, 基于 Morlet 小波计算了上述 3 个实测典型强风的演变功率谱密度函数. 实测风演变谱在时域内的均值与傅里叶谱吻合良好, 验证了演变谱估计结果的准确性. 实测强风的演变功率谱分析结果表明, 脉动风的能量主要集中在低频部分, 且脉动风速功率谱随时间变化显著, 具有较强的非平稳特性. 基于平稳随机过程假设的传统风谱计算方法无法准确描述实测强风风谱的非平稳特征. 研究结论可为桥址区三维非平稳脉动风场的准确模拟以及强/台风作用下苏通大桥的非平稳抖振分析提供实测参考.