

# 基于MVLEM考虑钢筋滑移的RC剪力墙有限元分析

陈俊清

华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2021年11月2日; 录用日期: 2021年11月16日; 发布日期: 2021年11月30日

## 摘要

钢筋混凝土剪力墙结构作为最重要的结构形式之一, 其抗震性能分析一直是研究的热点和难点。本文在多垂直杆单元模型的基础上, 提出了一种可考虑钢筋滑移影响的改进的多垂直杆单元模型, 并且基于分离式建模的思想实现了其在OpenSees平台上的建模。分别利用多垂直杆单元模型和改进的多垂直杆单元模型对整浇式RC剪力墙模型试验和装配整体式RC剪力墙模型试验进行了数值模拟分析, 通过与试验结果对比分析, 发现改进的多垂直杆单元模型不同程度地提高了数值模拟的精度, 该单元模型可用于RC剪力墙结构的弹塑性数值模拟分析。

## 关键词

装配整体式, 剪力墙, 钢筋滑移, 多垂直杆单元模型, 数值模拟, OpenSees

# Finite Element Analysis for Reinforced Concrete Shear Wall Considering Bond-Slip Based on MVLEM

Junqing Chen

Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou Zhejiang

Received: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Nov. 16<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 30<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Reinforced concrete shear wall structure is one of the most important structural forms. Seismic performance analysis of shear wall structure is the focus and difficulty point. Multi-vertical line

element model (MVLEM) considering bond-slip is developed on the basis of MVLEM. According to the method of discrete model, a refined MVLEM is built on OpenSees platform. Numerical simulation of cast-in-situ reinforced concrete (RC) shear wall tests and assembled monolithic RC shear wall tests are performed using MVLEM and refined MVLEM. The simulation results agree well with the test results in literature. The analytical results show that the refined MVLEM improves precision of simulation results. The macroscopic model is suitable for elastic-plastic analysis of RC shear wall structures.

## Keywords

Assembled Monolithic, Shear Wall, Bond-Slip, Multi-Vertical Line Element Model, Numerical Simulation, OpenSees

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

钢筋混凝土(RC)剪力墙因其强大的刚度和承载能力以及良好的延性,成为高层和超高层结构最重要的抗侧力构件。有关其抗震性能的研究一直深受国内外学者的关注。剪力墙的计算模型大致可以分为微观模型和宏观模型两种。微观模型采用实体等有限元模型[1] [2] [3]直接模拟剪力墙,理论完备但计算量大,不太适用于整体结构的分析。在对混凝土微观力学行为还有诸多不确定性的现状下,基于合理的力学行为简化的基础上提出的宏观模型[4] [5] [6],更能体现结构的整体响应,同时计算量显著减小,适用于整体结构的抗震性能分析。

本文在多垂直杆单元模型的基础上提出考虑钢筋滑移的多垂直杆单元模型,并在 OpenSees 平台上实现两类单元模型的宏观有限元模型建模。通过与模型试验的对比分析,验证改进的模型的可行性和优越性。

## 2. 考虑钢筋滑移的多垂直杆模型理论

### 2.1. 考虑钢筋滑移的 MVLEM

多垂直杆理论用多个沿墙体宽度方向竖向布置的弹簧模拟剪力墙的压弯刚度,用水平布置的弹簧模拟剪力墙的剪切刚度,进而模拟剪力墙整体的受力性能。采用已有的多垂直杆模型理论,基于分离式建模的理念,本文在 OpenSees 平台创建了 MVLEM 模型,依据配筋信息和几何尺寸,将剪力墙划分成多个条带,用竖向的零长度单元模拟剪力墙条带的拉压力学行为,用水平的零长度单元模拟剪力墙的剪切力学行为,模型示意图如图 1(a)所示。在验证基础模型切实可行的基础上,提出了可考虑钢筋滑移的 MVLEM,该模型在每个剪力墙条带底部增加一个能描述钢筋滑移的零长度单元,用来模拟剪力墙内部钢筋滑移现象,模型示意图如图 1(b)所示。

### 2.2. 拉压零长度单元的恢复力模型

模拟拉压力学性能的零长度单元的恢复力模型由剪力墙条带内的混凝土和钢筋的本构模型确定,混凝土本构模型采用修正的 Kent-Park 模型,钢筋本构模型采用理想的弹塑性模型。恢复力模型关键参数确

定方法见表 1。恢复力模型示意图如图 2 所示。

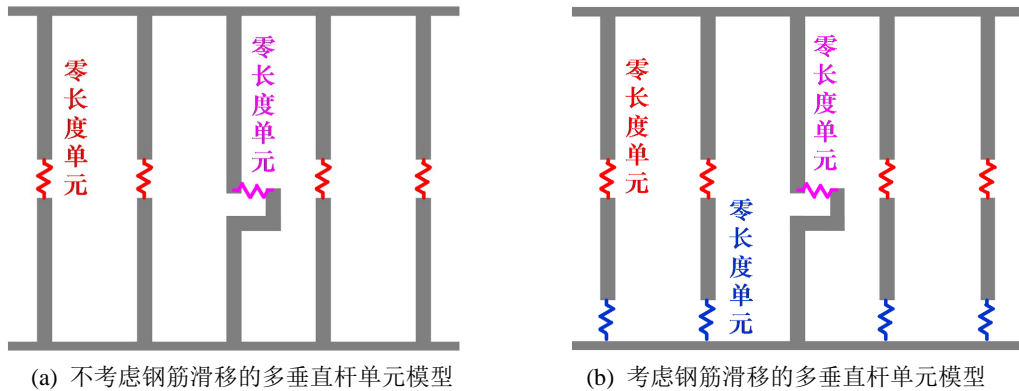


Figure 1. Multi-vertical line element model  
图 1. 多垂直杆单元模型

Table 1. Key parameters of restoring force model of zero-length element for tension and compress  
表 1. 拉压零长度单元恢复力模型关键参数

参数	初始刚度	开裂拉力	屈服拉力	屈服变形	强化刚度	峰值压力	峰值变形	极限压力	极限变形
公式	$k = A_c E_c / L$	$F_{cr} = f_{cr} A_c$	$F_y = f_y A_s$	$\Delta_y = F_y L / A_s E_s$	$k' = \alpha A_s E_s / L$	$F_c = f_{ck} A_c$	$\Delta_c = \varepsilon_c L$	$F_{cu} = f_{cu} A_c$	$\Delta_{cu} = \varepsilon_{cu} L$

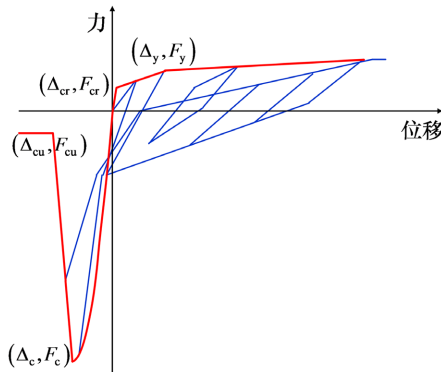


Figure 2. Restoring force model of zero-length element for tension and compress  
图 2. 拉压零长度单元恢复力模型

### 2.3. 剪切零长度单元的恢复力模型

模拟剪切力学性能的零长度单元的恢复力模型采用考虑刚度退化的三折线模型，如图 3 所示。

恢复力模型的初始弹性剪切刚度  $K_e$ ： $K_e = GA_w / xh$ 。

开裂后的剪切刚度与初始弹性剪切刚度的比值  $\alpha_s$ ： $\alpha_s = 0.14 + 0.46 \rho_{wh} / f_c$ 。

屈服后的剪切刚度取为初始弹性剪切刚度的 0.2%。

恢复力模型的开裂剪力  $V_{cr}$ ： $V_{cr} = 0.438 \sqrt{f_c} A_w$ 。

恢复力模型的屈服剪力  $V_y$  取为极限剪力  $V_u$  的 0.85 [7]。

其中， $G$  为弹性剪切模量， $A_w$  为剪力墙截面面积， $x$  为剪切变形的形状系数， $h$  为墙体高度， $\rho_{wh}$  为墙体的有效水平配筋率， $f_c$  为混凝土抗压强度。

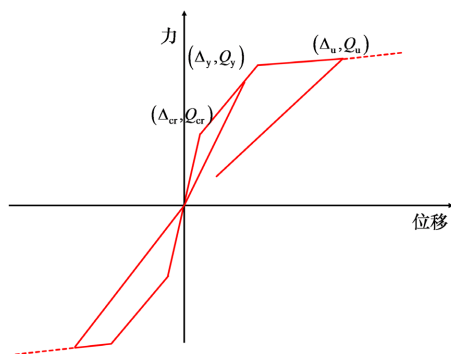


Figure 3. Restoring force model of zero-length element for shear  
图 3. 剪切零长度单元恢复力模型

### 2.4. 钢筋滑移的恢复力模型

Sritharan 和 Zhao [8] [9]认为钢筋滑移是由于一定锚固范围内钢筋应变渗透引起的，提出了考虑初始应变硬化率的钢筋滑移模型，其骨架曲线和滞回曲线示意图如图 4 所示。

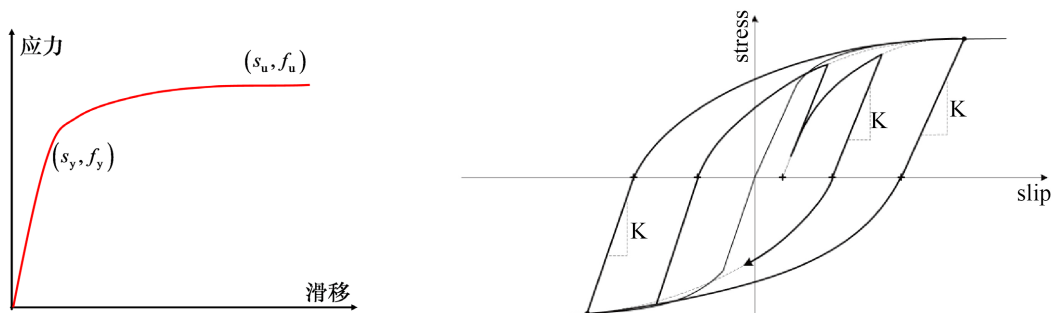


Figure 4. Restoring force model of bond-slip  
图 4. 钢筋滑移的恢复力模型

钢筋屈服时的滑移量  $s_y$  :

$$s_y = 0.1 \left( \frac{d}{4000} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} (2\alpha + 1) \right)^{1/\alpha} + 0.013 \tag{1}$$

式中， $d$  为钢筋直径， $f_y$  为钢筋屈服强度， $f'_c$  为混凝土抗压强度， $\alpha$  为局部粘结滑移系数。

屈服后刚度取为初始刚度的 30%~50%。

## 3. RC 剪力墙试验数值模拟

采用多垂直杆单元模型和本文提出的考虑钢筋滑移的改进的多垂直杆单元模型，利用 Matlab 计算模型的关键参数，分别对现浇 RC 剪力墙模型试验和装配整体式 RC 剪力墙模型试验进行数值模拟分析。

### 3.1. 文献[10]现浇 RC 剪力墙试验

现浇 RC 剪力墙模型试验，选取文献[10]中的试件 RW2 作为分析对象，模型配筋信息如图 5 所示。模型示意图如图 6 所示。混凝土材料强度为 27.4 MPa，钢筋屈服强度为 414 MPa。不考虑钢筋滑移的数值模拟分析结果如图 7 所示，通过与试验结果的对比，验证了本文在 OpenSees 平台实现多垂直杆单元模

型的可行性和正确性。考虑钢筋滑移的数值模拟结果如图 8 所示，通过与试验结果的对比，验证了本文提出的改进的多垂直杆单元模型相比多垂直杆单元模型，具有更高的精度。

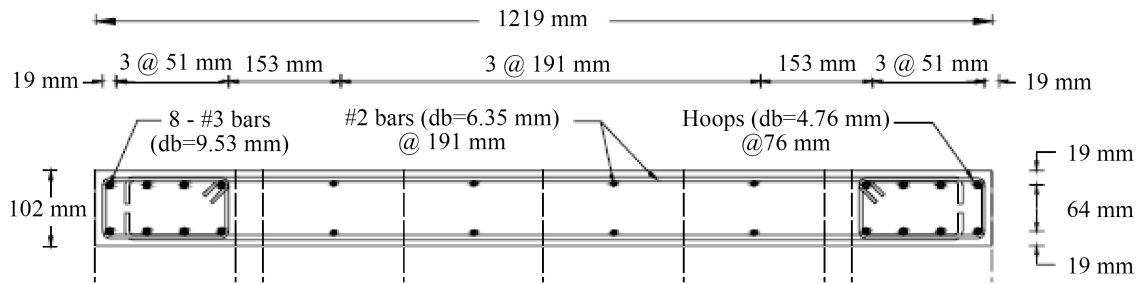


Figure 5. Section dimension and reinforcement of RW2  
图 5. RW2 截面尺寸及配筋图

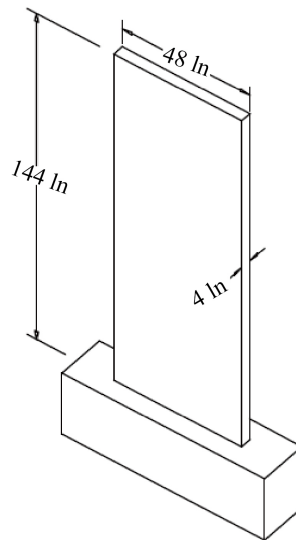


Figure 6. Sketch of RW2  
图 6. RW2 示意图

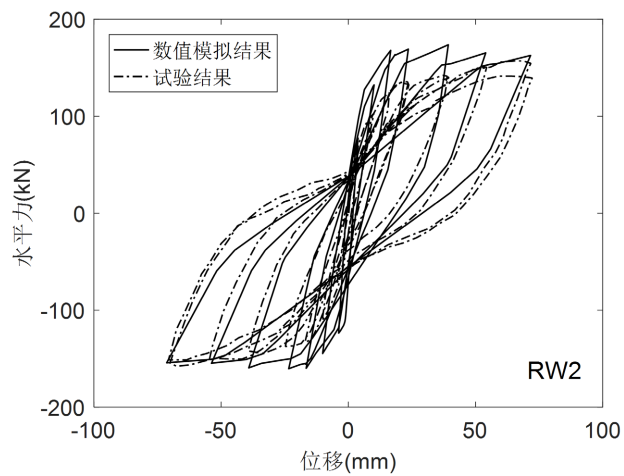


Figure 7. Numerical simulation without bond-slip of RW2  
图 7. RW2 不考虑钢筋滑移的数值模拟

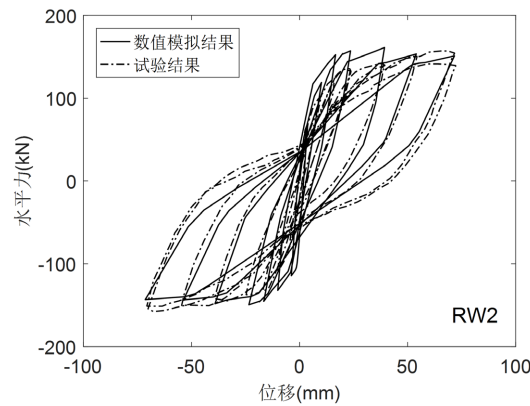


Figure 8. Numerical simulation with bond-slip of RW2  
图 8. RW2 考虑钢筋滑移的数值模拟

### 3.2. 文献[15]装配整体式 RC 剪力墙试验

装配式整体 RC 剪力墙作为重要的抗侧力构件，在我国建筑工业化向着更高更广维度发展进程中，起着不可替代的作用，得到了广泛的应用[11] [12] [13] [14]。本节针对采用国内自主研发的插入式预留孔灌浆钢筋连接的剪力墙模型试验[15]进行了数值模拟。试件尺寸及配筋信息如图 9 所示。根据钢筋直径的不同，搭接长度分别为 380、440、505 mm，钢筋采用 HRB335 钢筋，混凝土选用 C30。实测的材料性能见表 2。试验采用循环往复加载，前期采用力控制，后期采用位移控制。不考虑钢筋滑移的数值模拟分析结果如图 10 所示，通过与试验结果的对比，验证了本文在 OpenSees 平台实现多垂直杆单元模型的可行性和正确性。考虑钢筋滑移的数值模拟结果如图 11~13 所示，通过与试验结果的对比，验证了本文提出的改进的多垂直杆单元模型相比多垂直杆单元模型，具有更高的精度。

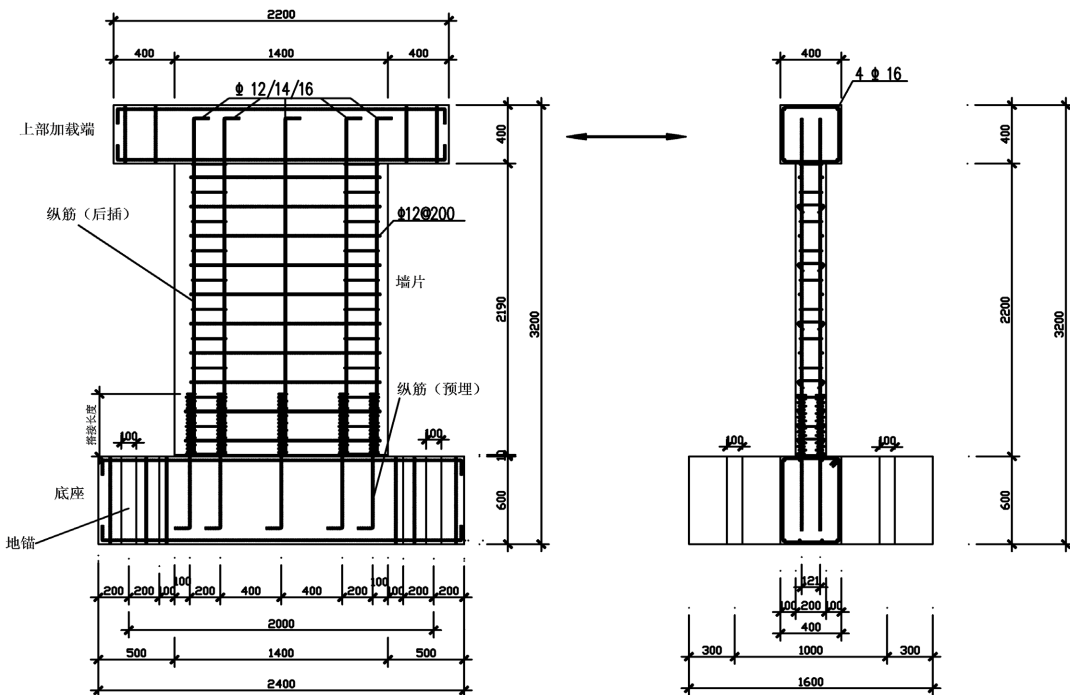
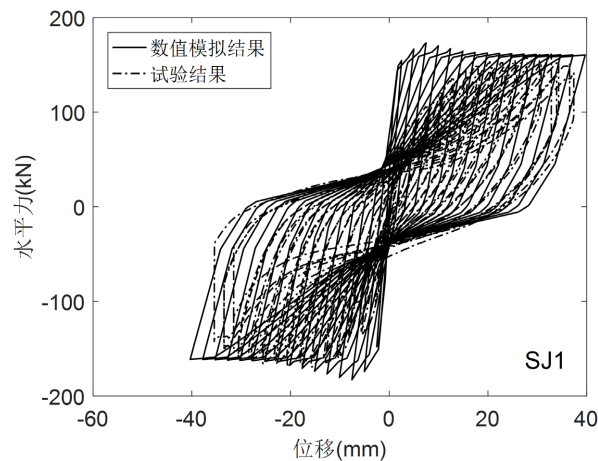


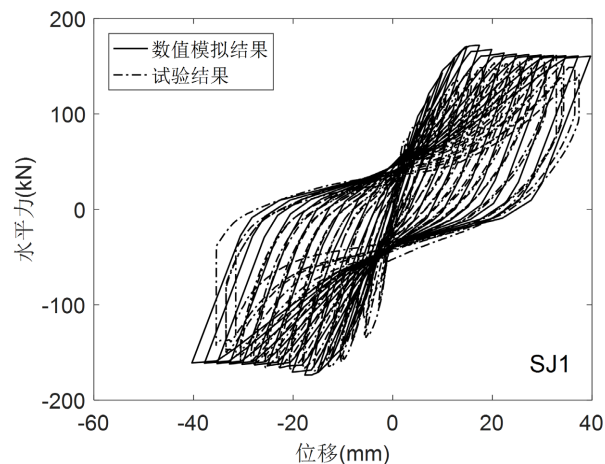
Figure 9. Dimension and reinforcement of specimens  
图 9. 试件尺寸及配筋信息

**Table 2.** Material parameters of specimens  
**表 2.** 试件材料参数

试件	试件尺寸(mm)	钢筋				混凝土	
		直径(mm)	搭接长度(mm)	屈服强度(MPa)	极限强度(MPa)	弹性模量(MPa)	抗压强度(MPa)
SJ1	2200 × 1400 × 200	12	380	369.6	580.9	$2.09 \times 10^5$	32.7
SJ2	2200 × 1400 × 200	14	440	343.7	507.5	$2.03 \times 10^5$	32.7
SJ3	2200 × 1400 × 200	16	505	346.6	555.4	$2.10 \times 10^5$	32.7



**Figure 10.** Numerical simulation without bond-slip of SJ1  
**图 10.** SJ1 不考虑钢筋滑移的数值模拟



**Figure 11.** Numerical simulation with bond-slip of SJ1  
**图 11.** SJ1 考虑钢筋滑移的数值模拟

### 3.3. 试验与数值模拟的对比

本文对数值模拟结果和试验结果的相对误差进行了定量评价。因为本文数值模拟分析采用的是位移加载模式，所以未单独对位移、延性等变形指标做定量对比，只对比了承载能力和耗能能力。试件加载过程中，试件的峰值承载力表征承载能力，滞回环累计包围的面积表征耗能能力，它能综合描述构件在

地震中的耗能能力。相对误差定义： $(\text{数值模拟结果} - \text{试验结果}) / \text{试验结果}$ ，结果为正值表示高估了试件的能力，负值表示低估了试件的能力。对比结果见表 3。从表中可以看出，考虑钢筋滑移的模型不同程度地提高了数值模拟结果的精度，尤其对于能综合表征力和变形指标的耗能能力。只有 SJ3 的分析结果不尽理想，主要原因是本文未对钢筋滑移模型做深入的研究。

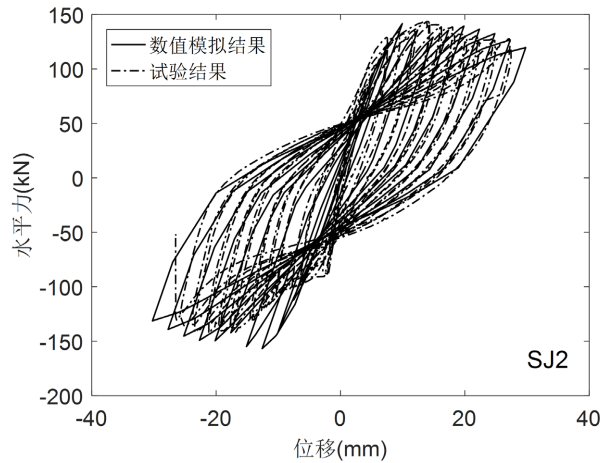


Figure 12. Numerical simulation with bond-slip of SJ2  
图 12. SJ2 考虑钢筋滑移的数值模拟

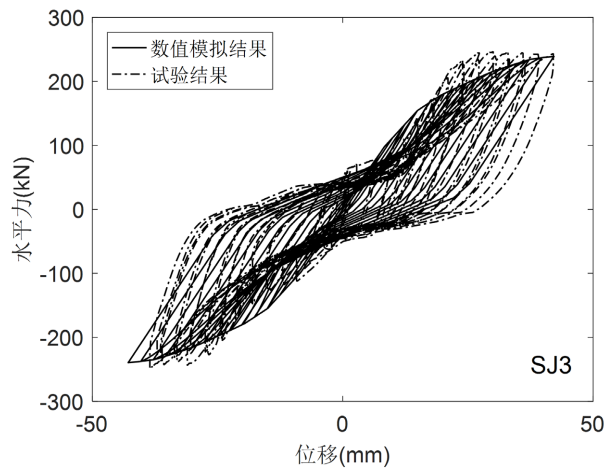


Figure 13. Numerical simulation with bond-slip of SJ3  
图 13. SJ3 考虑钢筋滑移的数值模拟

Table 3. Relative error between numerical simulation and test results  
表 3. 数值模拟结果与试验结果的相对误差

	RW2		SJ1		SJ2		SJ3	
	不考虑滑移	考虑滑移	不考虑滑移	考虑滑移	不考虑滑移	考虑滑移	不考虑滑移	考虑滑移
承载能力 相对误差(%)	10.6	2.7	7.0	6.1	2.8	-1.4	1.8	-3.1
耗能能力 相对误差(%)	7.4	5.8	20.9	8.2	13.3	4.2	-10.7	-15.4



## 4. 结论

本文在多垂直杆单元模型的基础上,提出了考虑钢筋滑移的多垂直杆单元模型,并在 OpenSees 平台上实现了两类模型的有限元建模,通过与试验结果的对比,对模型的可行性和准确性进行了评定。主要得出如下结论:

(1) 在 OpenSees 平台中基于分离式建模的思想,建立多垂直杆单元模型和考虑钢筋滑移的多垂直杆单元模型是合理可行的。同时通过与已有试验结果的对比分析,验证了其模拟结果的准确性。该宏观剪力墙模型可用于高层、超高层等剪力墙结构体系的数值模拟,尤其对于装配整体式结构体系分离式建模具有重要的意义。

(2) 通过与试验结果的对比发现,钢筋滑移模型对数值模拟结果有重要影响,有关装配整体式剪力墙中的钢筋滑移模型等问题,还有待做更进一步的深入研究。

## 参考文献

- [1] Lefas, I.D. and Kotsovos, M.D. (1990) NLFE Analysis of RC Structural Walls and Design Implications. *Journal of Structural Engineering*, **116**, 146-164. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:1\(146\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:1(146))
- [2] Kotsovos, M.K., Pavlovic, M.N. and Lefas, I.D. (1992) Two and Three Dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Structural Walls. In: Fajfar, P. and Krawinkler, H., Eds., *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, Elsevier Applied Science, New York, 215-217.
- [3] Vecchio, F.J. (1992) Finite Element Modeling of Concrete Expansion and Confinement. *Journal of Structural Engineering*, **118**, 2390-2406. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:9\(2390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:9(2390))
- [4] Linde, P. and Bachmann, H. (1994) Dynamic Modeling and Design of Earthquake Resistant Walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23**, 1331-1350. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290231205>
- [5] Kaybeyesawa, T., Shinohara, H. and Kabeyesawa, S. (1984) US-Japan Cooperative Research on R/C Full-Scale Building Test, Part 5: Discussion of Dynamic Response System. *Proceedings 8th of WCEE*, San Francisco, 24-28 July 1984, 1-4.
- [6] Vulcano, A. and Bertero, V.V. (1987) Analytical Model for Predicating the Lateral Response of RC Shear Wall: Evaluation of Their Reliability. EERC.
- [7] 孙景江, 江近仁. 框架-剪力墙型结构的非线性随机地震反应和可靠性分析[J]. 地震工程与工程振动, 1992, 12(2): 59-68.
- [8] Sritharan, S., Priestley, N. and Seible, F. (2000) Nonlinear Finite Element Analyses of Concrete Bridge Joint Systems Subjected to Seismic Actions. *Finite Elements in Analysis and Design*, **36**, 215-233. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(00\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(00)00034-2)
- [9] Zhao, J. and Sritharan, S. (2007) Modeling of Strain Penetration Effects in Fiber-Based Analysis of Reinforced Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, **104**, 133-141. <https://doi.org/10.14359/18525>
- [10] Orakcal, K., Massone, L.M. and Wallace, J.W. (2006) Analytical Modeling of Reinforced Concrete Walls for Predicting Flexural and Coupled-Shear-Flexural Responses. PEER, University of California, San Diego.
- [11] 刘继良, 王宝民, 初明进, 王博, 张鹏飞, 安宁, 李祥宾. 不同轴压比下榫卯接缝装配整体式剪力墙受弯性能试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(11): 79-87.
- [12] 周赫, 赵倚榕, 张建伟, 李宜达, 曹万林. 边缘配置高强纵筋的高强再生混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J/OL]. 建筑结构, 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2833.TU.20211110.1751.004.html>, 2021-11-14.
- [13] 庞瑞, 刘晓怡, 张海东, 魏金桥, Diakhate Adama. 轴压比对带 PC 填充墙的装配式联肢剪力墙受力性能影响分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S2): 40-46.
- [14] 张盼吉, 江春, 王晓飞, 胡建明, 李钊. 装配式高层剪力墙结构与同条件现浇式振动模态对比分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(S2): 385-388.
- [15] 姜洪斌, 张海顺, 刘文清, 闫红纓. 预制混凝土插入式预留孔灌浆钢筋搭接试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(10): 18-23.