

ISSN 1000-565X
CODEN HLDKEZ

华南理工大学学报

JOURNAL OF SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

自然科学版
Natural Science Edition

第36卷
第12期
2008年12月

Vol.36 No.12 (December 2008)

中国·广州 GUANGZHOU CHINA



基于 OpenSEES 的剪力墙低周往复试验的数值分析*

韩小雷 陈学伟 戴金华 郑宜 何伟球
(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为了解不同构造剪力墙的抗震性能,以广州花园酒店的框支剪力墙结构为研究对象,对不同配筋与构造的剪力墙进行了低周往复试验,并采用多竖向弹簧单元(MVLEM),通过二次开发编制了基于 OpenSEES 的剪力墙结构分析程序 SWNA,通过 SWNA 对剪力墙结构进行低周往复试验数值模拟. 结果表明:该数值方法能够较好地宏观上模拟剪力墙的弹塑性行为,包括中和轴移动、剪切变形、局部塑性状态及破坏机制等; MVLEM 单元可以通过比较少的自由度模拟剪力墙结构,比微观单元节省大量计算时间,适用于高层建筑结构的整体弹塑性分析及基于性能的抗震评定.

关键词: 剪力墙; 抗震性能; 低周往复试验; 宏观模型; 弹塑性分析
中图分类号: TU355 **文献标识码:** A

钢筋混凝土剪力墙结构是目前工业与民用建筑中最重要的结构形式之一,对其进行非线性分析是相关研究中的难点和热点.

剪力墙非线性模型包括微观模型和宏观模型. 微观模型又分为整体式模型、分离式模型及组合模型等. 宏观模型因其自由度小、计算量较小,适用于整体结构弹塑性分析,引起了研究者的广泛关注. Kabeyasawa 等^[1]通过对足尺七层框剪结构进行拟动力试验研究,将剪力墙理想化成三竖线单元(TVLEM);瑞士学者 Linda 等^[2]对 TVLEM 进行改进,提出四弹簧单元; Milev^[3]对 TVLEM 进行修正,提出了二维板模型;为解决 TVLEM 的弯曲弹簧与两边柱杆元相协调的问题, Vulcano 等^[4]提出了一个修正模型;这一模型是用多个竖向弹簧代替旋转弹簧代表压弯刚度,同时有一个水平弹簧代表剪切刚度.

本研究基于 OpenSEES 程序和多竖向弹簧单元(MVLEM)模拟剪力墙结构,通过对 OpenSEES 进行二次开发,编制了剪力墙弹塑性分析程序 SWNA,并对广州花园酒店剪力墙低周往复试验进行数值模拟,将分析结果与试验结果进行对比.

1 多竖向弹簧单元理论

MVLEM 克服了 TVLEM 中弯曲弹簧和边柱杆

元的协调关系不明确的缺点,它只需要给出拉压和剪切滞回关系,避免了使用弯曲弹簧时确定弯曲滞变特性的困难,同时可以考虑在地震反应中剪力墙截面中和轴的移动.

MVLEM 的建模方法是将剪力墙横截面划分为若干份,每个区域以拉压弹簧来模拟,拉压弹簧的属性由混凝土与钢筋的材料本构来确定. 本研究采用的拉压弹簧的恢复力模型是由 DRAIN-2D^[5]的恢复力模型改进而来,如图 1 所示.

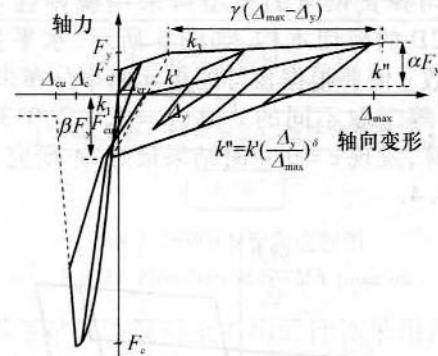


图 1 竖向弹簧恢复力模型

Fig. 1 Restoring force model of vertical spring

对于普通剪力墙结构,恢复力模型参数取值为 $\alpha = 1.0$ 、 $\beta = 1.5$ 、 $\gamma = 1.05$ 、 $\delta = 0.5$ ^[6]. 弹簧本构曲线

收稿日期: 2008-03-04

* 基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(06105416)

作者简介: 韩小雷(1964-),男,博士,教授,主要从事高层(超高层)建筑结构抗震分析研究. E-mail: xlhan@scut.edu.cn

关键点的力与变形值的求解公式如表1所示。

表1 竖向弹簧恢复力模型参数的计算公式

Table 1 Formulas of parameters of restoring force model of vertical spring

参数	描述	公式
k_1	初始弹性刚度	$k_1 = A_c E_c / L$
F_{cr}	砼开裂拉力	$F_{cr} = f_{ct} A_c$
F_y	钢筋屈服力	$F_y = f_y A_s$
Δ_y	钢筋屈服时变形	$\Delta_y = A_s E_s / L$
k_3	钢筋强化刚度	$k_3 = f_{hard} k_s$
F_c	砼极限压力	$F_c = f_{ck} A_c$
Δ_c	砼极限压力时变形	$\Delta_c = \varepsilon_c L$
F_{cu}	砼压碎后残余力	$F_{cu} = f_{cu} A_c$
Δ_{cu}	砼压碎后残余变形	$\Delta_{cu} = \varepsilon_{cu} L$

二维 MVLEM 在距离底部 cL 处设置一个剪切弹簧反映剪切变形,共3个自由度。三维 MVLEM 设置3个水平弹簧,包括双向剪切弹簧及扭转弹簧,共6个自由度,如图2所示。

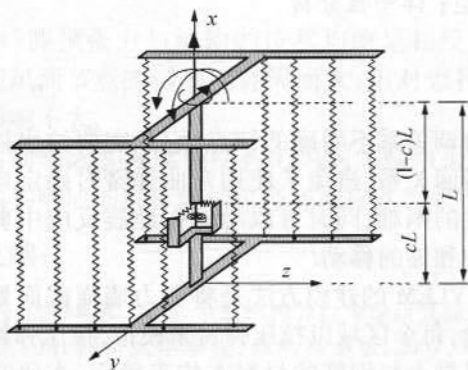


图2 MVLEM 三维单元示意图

Fig.2 Sketch of MVLEM 3D element

剪切弹簧恢复力模型可采用线弹性本构或 DRAIN-2D 的剪切本构,如图3所示。水平弹簧的高度系数 c 值要根据预计的单元曲率分布来确定, Vulcano 等^[4]取不同的 c 值 ($c = 0, 0.2, 0.3, 0.4$) 进行试算,发现 $c = 0.4$ 时结果最好。本研究采用的 c 值为 0.4。

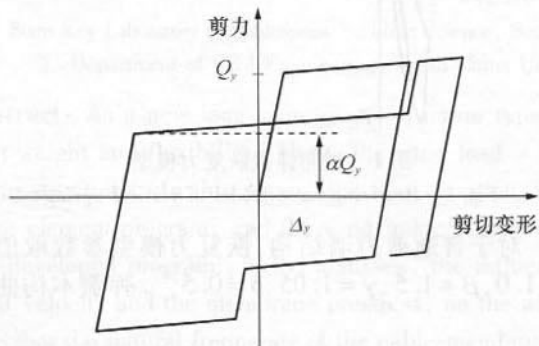


图3 水平剪切弹簧恢复力模型

Fig.3 Restoring force model of horizontal shear spring

2 OpenSEES 程序介绍

OpenSEES 全称为 Open System For Earthquake Engineering Simulation^[7],是开源的地震工程模拟系统;其程序代码是公开的,用户可以通过编程手段为系统增加新的材料本构和单元类型。程序具有丰富的材料与单元模型,适用于分析结构在地震作用下的反应。

Kutay Orakcal 等^[8]依据上述理论在 OpenSEES 里写入基于材料单轴本构的 MVLEM 2D 单元,并用低周往复试验进行校正,发现该单元能够很好地模拟剪力墙结构。Matej Fischinger 等^[9]在 DRAIN-2D 的基础上,在 OpenSEES 里写入基于弹簧本构的 MVLEM 3D 单元,与 1:3 剪力墙振动台试验对比后,发现 MVLEM 3D 单元能很好地反映剪力墙动力特性。本研究基于 Matej Fischinger 开发的 MVLEM 3D 单元对广州花园酒店的剪力墙试验进行数值模拟。

OpenSEES 是基于 Tcl/Tk 脚本语言的分析程序,该程序可通过编程实现自适应转换非线性求解方案,调整分析步长直至求解收敛为止,这解决了剪力墙非线性计算中的收敛性问题。

3 剪力墙低周往复试验

花园酒店剪力墙试验中共对 12 个剪力墙试件进行低周往复试验,本研究对试件 1 至试件 4 进行数值模拟。试件 1 至试件 4 墙高为 1.9m,其配筋、构造和轴压比等属性如表 2 所示。试件截面配筋图如图 4、5 所示。

表2 试件参数

Table 2 Parameters of specimens

试件	设计依据	轴压比	竖直配筋 ¹⁾	水平配筋 ¹⁾	端部拉筋 ¹⁾	中部拉筋 ¹⁾
1	现行规范	0.24	φ6@110	φ6@120	φ8@110 × 80	φ8@110 × 120
2	现行规范	0.36	φ6@110	φ6@120	φ8@110 × 80	φ8@110 × 120
3	原结构	0.24	φ6.5@50	φ4@80	φ4@160 × 50	0
4	原结构	0.36	φ6.5@50	φ6@120	φ4@160 × 50	φ4@160 × 100

1) 尺寸单位为 mm。

混凝土材料强度是通过混凝土试块进行取样测量获得,经材料试验测得混凝土立方体抗压强度统计平均值 $f_{cu,m} = 34.43$ MPa。试验模型结构所用的钢筋采取逐类取样,钢筋材料试验结果如

表 3 所示.

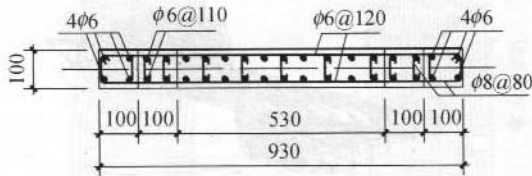


图 4 试件 1、试件 2 的截面配筋图(单位:mm)

Fig. 4 Section and reinforcement of specimen 1 and specimen 2 (unit:mm)

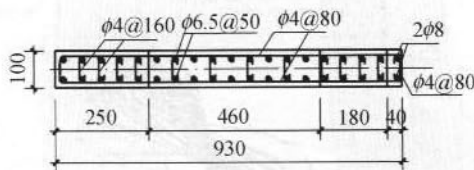


图 5 试件 3、试件 4 的截面配筋图(单位:mm)

Fig. 5 Section and reinforcement of specimen 3 and specimen 4 (unit:mm)

表 3 钢筋参数

Table 3 Parameters of reinforcement

钢筋型号	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	屈服应变/ $(\times 10^{-6})$	极限应变/ $(\times 10^{-6})$	弹性模量/MPa
φ4	345	442	1560	2000	2.21×10^5
φ6	429	533	2000	2460	2.15×10^5
φ8	425	530	2000	2460	2.14×10^5

试验加载装置如图 6 所示. 水平荷载采用美国 MTS 公司的数控拉压作动筒施加, 竖向荷载采用 50 t 液压千斤顶施加.

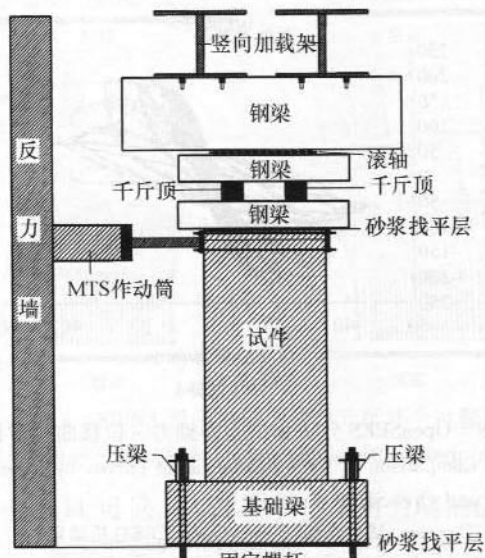


图 6 试验装置图

Fig. 6 Figure of experiment device

竖向荷载采用千斤顶一次施加到剪力墙所需轴压比, 并在试验过程中保持不变; 水平荷载采用拉压

作动筒低周往复加载, 在结构构件达到屈服荷载前采用力控制循环加载方式, 每级荷载增量约为结构承载力的 10%, 直至试件屈服; 试件屈服后, 采用位移控制循环加载方式, 以试件屈服位移作为每级循环位移增加量, 每级控制位移做 3 次循环, 当试件承载力下降到极限承载力的 60% ~ 75% 或试件破坏明显时停止试验.

4 数值分析

OpenSEES 程序是高效非线性有限元分析程序, 但是现阶段没有可视化操作界面, MVLEM 的每根弹簧的位置与本构属性都需要文本输入, 前处理工作量大. 为解决上述问题, 本研究采用面向对象语言对 OpenSEES 进行二次开发, 编制了剪力墙非线性分析程序 SWNA. 该程序计算流程如图 7 所示.

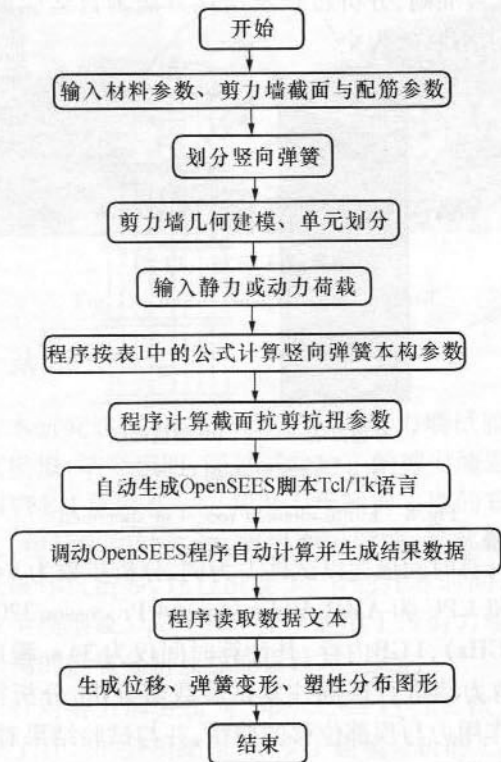


图 7 SWNA 程序流程图

Fig. 7 Flowchart of SWNA program

程序对试件混凝土本构的计算采用修正后的 Kent-Park 模型^[10]. 该模型考虑了箍筋对约束区混凝土强度及延性的提高. 程序根据截面配筋情况按下式计算得到约束区混凝土的应力-应变关系.

$$\sigma_c = \begin{cases} Kf'_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], & \varepsilon < \varepsilon_0 \\ Kf'_c [1 - Z(\varepsilon - \varepsilon_0)], & \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{20} \\ 0.2Kf'_c, & \varepsilon > \varepsilon_{20} \end{cases} \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = 0.002K \quad (2)$$

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c} \quad (3)$$

$$Z = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f'_c}{145f'_c - 1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{h'}{s_b}} - 0.002K} \quad (4)$$

钢筋材料采用二折线本构,钢筋硬化系数为1/1000,弹性模量及屈服强度按表3取值.程序将计算得到的材料本构参数按表1中的公式计算生成竖向弹簧的恢复力模型.

本研究将剪力墙模型沿高度划分为4段进行数值模拟,剪力墙截面共划分为48个弹簧,结点数5,单元数为4,自由度数为30,模型如图8所示.若预期分析法不符合平截面假定,可沿水平方向划分单元.弹簧的恢复力参数不进行调整,按默认值输入.收敛准则、分析步长及迭代方法为自适应调节,直到求解收敛为止.

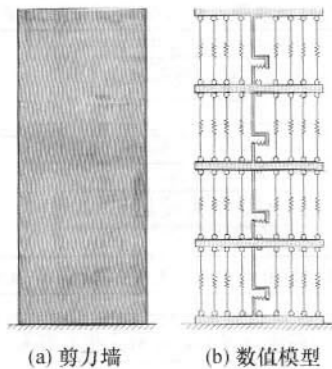


图8 试件的有限元模型

Fig.8 Finite element model of specimen

计算时间描述以试件1为例,分析步数为5410,计算机CPU为AMD Athlon(tm)64 Processor 3200+(2.1GHz),1GB内存,其计算时间仅为34s.程序对4片剪力墙进行低周往复试验数值分析,分析得到水平作用力与顶部位移的曲线,并与试验结果对比,如图9所示.

由图9可见,试验和分析得到的滞回曲线能够较好地吻合;按现有规范设计的试件1与试件2的滞回曲线吻合程度高,试件3与试件4的下降段部分比试验结果要陡一些,但在总体上的强度及延性方面的模拟情况良好.由于单个MVLEM基于平截面假定,所以在弹塑性阶段吻合情况良好,到强非线性破坏阶段吻合程度较差.在基于性能的抗震设计中,要求保证剪力墙处于生命安全状态或防止倒塌状态,上述两个状态均不处于强非线性破坏阶段.因此,相对较粗的MVLEM就可应用于基于性能的抗震设计与分析.

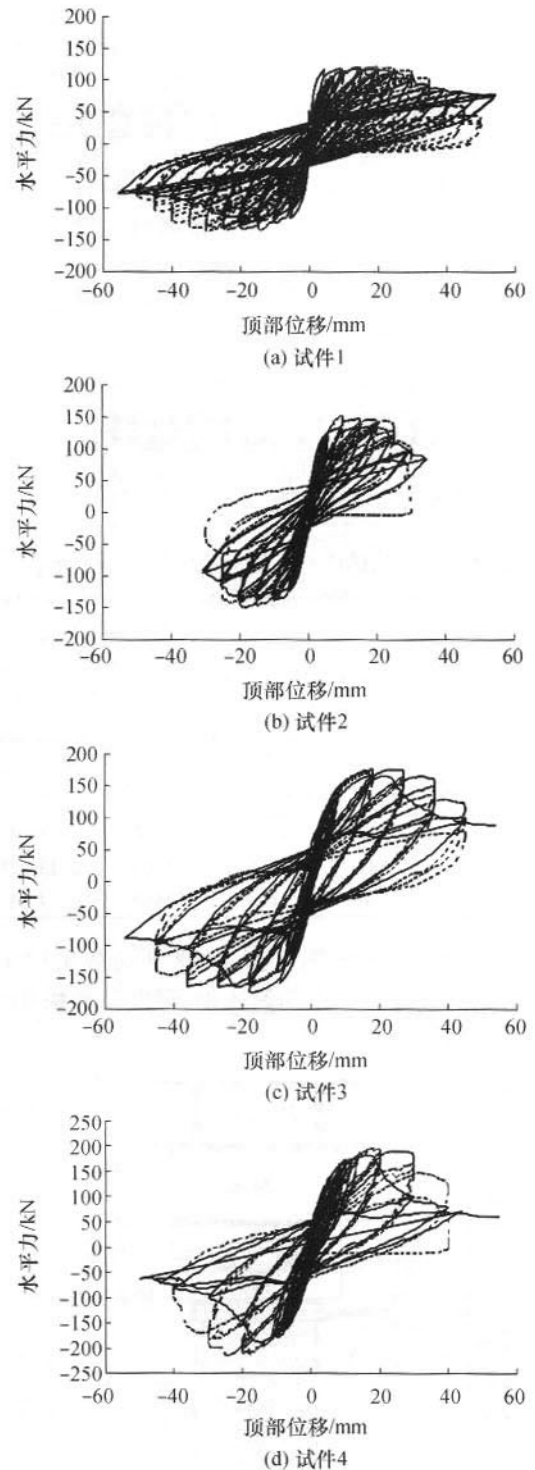


图9 OpenSEES分析和试验得到力-位移曲线对比
Fig.9 Comparison of force-displacement curves by experiment and OpenSEES analysis

····· 试验结果 ——— OpenSEES分析结果

用SWNA程序对OpenSEES计算结果进行后处理,可以得到剪力墙结构的变形、弹簧变形及弹簧非线性状态的全过程,试件1的数值分析结果如图10~11所示.由图10可见,MVLEM表述的剪力墙在往复荷载作用下,由于受到压弯作用,中和轴不断移动.

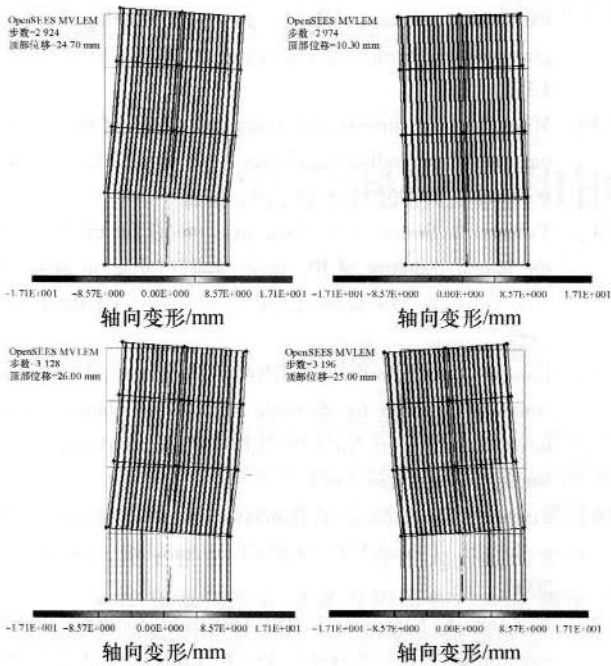


图 10 SWNA 显示的剪力墙单元竖向弹簧变形

Fig. 10 Deformation of vertical springs of shear-wall elements shown in SWNA

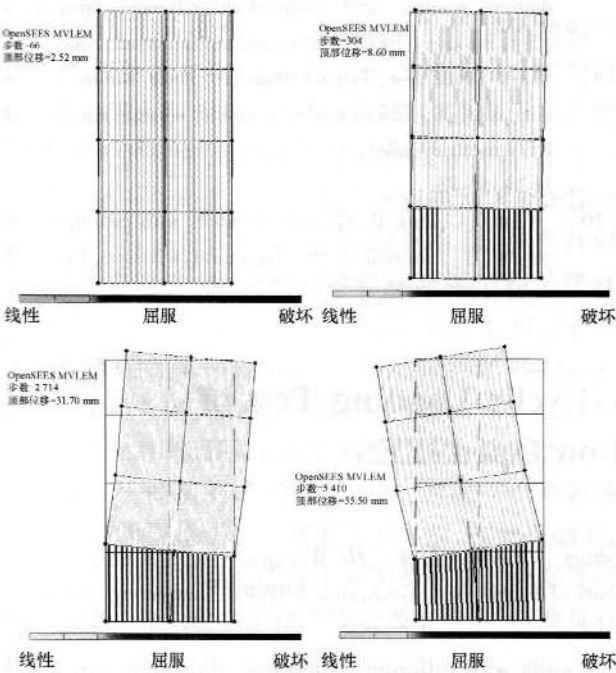


图 11 SWNA 显示的剪力墙单元破坏全过程

Fig. 11 Collapse process of shear-wall elements shown in SWNA

由图 11 可见, MVLEM 表述了剪力墙的破坏机制, 塑性变形主要发生在底部, 塑性变形时, 先是钢筋进入屈服阶段, 然后两侧混凝土被压坏退出工作, 压坏部分从两侧向中间扩展, 最后由于底部大部分混凝土被压坏, 钢筋屈服, 抗侧能力下降, 导致整片墙破坏. 试件 1 最终破坏形态的试验与模拟结果对比如图 12、13 所示. 可见, MVLEM 表述的剪力墙混

凝土破坏区范围与试验现象基本一致.

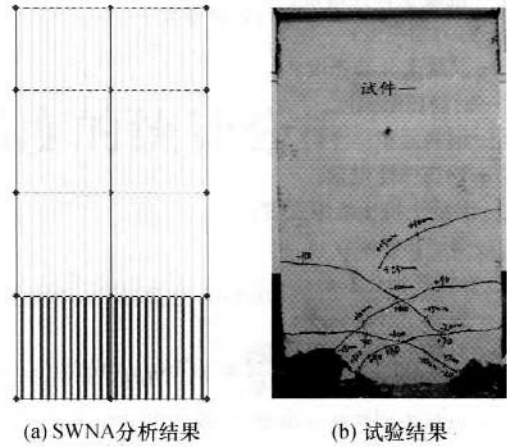


图 12 试件 1 数值分析与试验结果的塑性区对比

Fig. 12 Comparison of plastic zones of specimen 1 by numerical analysis and test

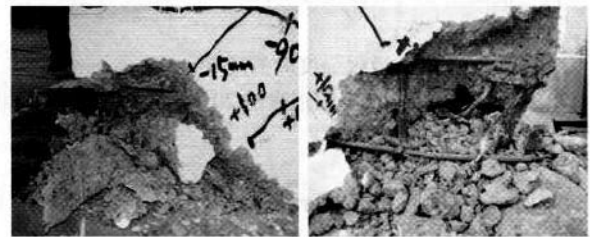


图 13 试件 1 局部破坏

Fig. 13 Local collapse of specimen 1

5 结语

本研究通过 OpenSEES 平台对剪力墙试验进行数值模拟, 结果表明, 经过试验校正的剪力墙宏观单元 MVLEM 能够在一定精度上反映剪力墙的非线性行为, 包括中和轴移动、剪切变形影响、局部塑性状态及破坏机制等, 且自由度少、节约计算时间, 因此该数值模型及 OpenSEES 程序适用于带剪力墙的高层结构的抗震分析及性能设计.

针对剪力墙分析对 OpenSEES 进行二次开发, 提供了直观的分析结果, 减少了建模分析的工作量. 基于 OpenSEES 的 SWNA 程序可应用于大量不同构造与配筋的剪力墙结构的静力和动力性能分析, 从而以数值分析代替试验, 回归分析得到剪力墙定量化的抗震性能指标, 这对基于性能的抗震设计具有一定的意义.

符号说明:

- Δ_{max} —最大受拉变形;
- Δ_{cr} —开裂时混凝土的变形;
- k' —加载刚度;
- k'' —卸载刚度;

A_c —混凝土面积;
 E_c —混凝土弹性模量;
 L —剪力墙高度;
 f_{ct} —混凝土开裂强度;
 f_y —钢筋屈服强度;
 A_s —钢筋面积;
 E_s —钢筋弹性模量;
 f_c —混凝土抗压极限强度;
 k_s —钢筋初始刚度;
 f_{hard} —钢筋强化系数;
 f_{ck} —混凝土开裂强度;
 ε_c —混凝土抗压极限应变;
 ε_{cu} —混凝土抗压残余应变;
 f_{cu} —混凝土抗压破坏强度;
 Q_y —剪切屈服力;
 σ_c —混凝土应力;
 K —混凝土约束强度提高系数;
 f'_c —混凝土非约束极限强度;
 ε —混凝土应变;
 ε_0 —混凝土达到极限强度时的应变;
 ε_{20} —混凝土退化至极限强度的20%时的应变;
 ρ_s —体积配箍率;
 f_{yh} —箍筋屈服强度;
 h' —混凝土截面有效高度;
 s_h —箍筋间距.

参考文献:

- [1] Kabeyasawa T, Shiohara H, Otani Kabeyasawa S. US-Japan cooperative research on R/C full-scale building test [C]//Proc 8th of WCEE. San Francisco; [s. n.], 1984.
- [2] Linda P, Bachmann H. Dynamic modeling and design of earthquake-resistant walls[J]. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 23(12): 1331-1350.
- [3] Milev J I. Two dimensional analytical model of reinforced concrete shear walls [C]//Proc 11th of WCEE. Acapulco; [s. n.], 1996.
- [4] Vulcano A, Bertero V V. Analytical model for predicating the lateral response of RC shear wall; evaluation of their reliability [R]. Berkeley: EERC, University of California, 1987.
- [5] Kanaan A E, Powell G H. DRAIN-2D-a general purpose computer program for dynamic analysis of planar structures[R]//Report No. UBC/EERC-73/6. Berkeley; University of California, 1973.
- [6] Fischinger M, Isaković T. Benchmark analysis of structural wall [C]//Proc 12th of WCEE. Auckland; [s. n.], 2000.
- [7] McKenna F, Fenves G L. The OpenSees command language primer [R]. Berkeley: PEER, University of California, 2000.
- [8] Kutay Orakcal, Lenonardo M Massone, John W Wallace. Analytical modeling of reinforced concrete walls for predicting flexural and coupled-shear-flexural responses [R]. Berkeley: PEER, University of California, 2006.
- [9] Matej Fischinger, Tatjana Isakovic, Peter Kante. Implementation of a macro model to predict seismic response of RC structure walls [J]. Computers and Concrete, 2004, 1(2): 55-73.
- [10] Kent D C, Park R. Flexural members with confined-concrete [J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(7): 1969-1990.

Numerical Analysis for Low-Cyclic Loading Test of Shear Walls Based on OpenSEES

Han Xiao-lei Chen Xue-wei Dai Jin-hua Cheang Jack He Wei-qiu

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: In order to reveal the seismic performances of shear walls with different structures, the frame-supported shear wall structure of the Garden Hotel in Guangzhou was used as the research object to perform low-cyclic loading tests in different reinforcement and construction conditions. Then, the shear-wall nonlinear analysis program SWNA was secondarily developed based on OpenSEES and MVLEM, and was used to numerically simulate the low-cyclic loading of shear walls. The results indicate that the proposed numerical method macroscopically simulate the elastic-plastic behaviors of shear walls in terms of the shifting of natural axis, the shear deformation, the local plastic state and the collapse mechanism, and that MVLEM is suitable for the global elastic-plastic analysis and the seismic performance assessment of high-rise buildings because it saves the calculation time cost due to its low consumption of degree of freedom for the simulation of shear walls.

Key words: shear wall; seismic performance; low-cyclic loading test; macroscopic model; elastic-plastic analysis