

文章编号: 1007-6069 (2008) 04-0076-06

OpenSEES的剪力墙宏观单元的研究

韩小雷^{1,2}, 陈学伟¹, 吴培烽¹, 郑宜¹, 杨志强¹

(1. 华南理工大学建筑学院高层建筑结构研究所, 广东 广州 510640; 2. 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:重点研究三维剪力墙单元 MVLEM3D 的数值模型及计算原理, 并采用开源非线性有限元程序 OpenSEES 进行剪力墙低周反复试验的数值分析, 探讨不同单元划分形式对结果的影响。通过二次开发编制了基于 OpenSEES 的剪力墙结构分析程序 SWNA, 对不同弹簧个数、不同竖向及水平划分方式, 建立剪力墙宏观单元模型进行分析, 对比试验结果表明该数值方法能够很好地从宏观上模拟剪力墙弹塑性行为: 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。通过单元及弹簧的划分对比, 可知该单元可通过比较少的自由度模拟剪力墙结构, 节省大量计算时间。对于强非线性分析, 增加水平划分可以考虑局部的破坏变形, 使骨架曲线下降段明显。因此该单元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: OpenSEES; 剪力墙宏观单元; 弹塑性分析

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

Research on the shear wall macro-element of OpenSEES

HAN Xiaolei^{1,2}, CHEN Xuwei¹, WU Peifeng¹, JACK Cheang¹, YANG Zhiqiang¹

(1. Tall Building Structure Research Institute, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Key Laboratory of Subtropic Architecture of Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The numerical model and calculation principle of the 3-dimension shear-wall element MVLEM3D in Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES), a open-source nonlinear finite element program, and the effect of different element divisions are researched in details in this paper. The numerical analysis of low cycle repeated loading tests of shear wall is realized by a program SWNA which is a further development for shear wall structure analysis based on OpenSEES. Macroscopic shear wall models of different spring numbers, vertical and horizontal divisions are analyzed. Comparison of the results indicate that inelastic behavior of the shear wall can be described macroscopically well by this numerical simulation, such as the shift of neutral axis, the shear deformation, local collapse and failure mechanism. The contrast of different spring and element divisions show that a small amount of freedom is needed in simulation of shear wall structure by this element, which can reduce a lot of computing time. As to strong nonlinear analysis, deformation of local collapse can be considered by increasing horizontal division which it can make a descent segment of skeleton curve more obviously. Therefore, the MVLEM3D is suitable for global inelastic analysis of tall building structure and performance based seismic evaluation.

Key words: OpenSEES; shear wall macroscopic models; inelastic analysis

收稿日期: 2008 - 03 - 10; 修订日期: 2008 - 10 - 10

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (06105416); 华南理工大学科研基金项目 (304 - E30270)

作者简介: 韩小雷 (1964 -), 男, 教授, 博士, 主要从事复杂结构的抗震研究。E-mail: xhan@scut.edu.cn

引言

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,其非线性分析是一个研究的难点和热点。剪力墙非线性分析模型可分为微观模型和宏观模型 2 种,其中微观模型按实体或者板壳单元直接模拟剪力墙,虽然原理清晰,但计算量大,试验分析校正困难,宏观模型将剪力墙用多竖向弹簧来模拟,可较好地描述整体结构非线性受力性能,计算量小,试验分析校正相对简单,适用于整体结构弹塑性分析。

本文基于 OpenSEES程序和 MVLEM3D 单元模拟剪力墙结构,通过对 OpenSEES进行二次开发,编制了剪力墙弹塑性分析程序 SWNA,建立不同弹簧数目及不同划分形式的剪力墙模型进行对比,确定满足计算精度及节省计算时间的。划分方法,再对剪力墙低周往复荷载试验结果^[1]进行数值模拟,将分析结果与试验结果进行对比,表明通过合理设计的 MVLEM3D 单元能够较精确地宏观模拟剪力墙非线性性能。

1 多竖向弹簧模型 (MVLEM)理论

剪力墙非线性模型包括微观模型及宏观模型。相对于微观模型,宏观模型由于自由度数少,计算量较小而适用于整体结构弹塑性分析。主要有以下模型: kabeyasawa 等人^[3]通过对足尺 7 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)。为解决 TVLEM 的弯曲弹簧与两边柱杆元相协调的问题, Vulcano 和 Bertero^[6]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模拟压弯刚度,同时有一个水平弹簧模拟剪切刚度,如图 1 所示。MVLEM 的优点克服了 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。混凝土与钢筋的材料本构通过表 1 的计算公式转化为拉压弹簧的骨架曲线的关键点数值。恢复力曲线是由骨架曲线及恢复力模型参数共同确定,如图 2 所示。恢复力模型参数比较稳定,对于普通混凝土剪力墙结构,参数取值为 $\alpha = 1.0$ 、 $\beta = 1.5$ 、 $\gamma = 1.05$ 、 $\delta = 0.5$ ^[7]。该单元的剪切变形与压弯变形不相关,2 维 MVLEM 在距离底部 d 的地方设置一个剪切弹簧反映剪切变形,共 3 个自由度。三维 MVLEM 设置三个水平弹簧,包括双向剪切弹簧及扭转弹簧,共 6 个自由度。剪切弹簧恢复力可采用线弹性本构或 DRAIN-2D 的剪切本构,如图 3 所示,其中 Q_y 、 y 分别是剪力墙单元的剪切屈服力及剪切屈服变形。水平弹簧的高度系数 c ,要根据预计的单元曲率分布来确定, Vulcano 取不同的 c ($c=0, 0.2, 0.3, 0.4$) 进行试算,发现 $c=0.4$ 时结果最好。本文采用 c 值为 0.4。

表 1 竖向弹簧恢复力模型参数计算公式表

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	$F_y = f_y A_s$
y	钢筋屈服时变形	$y = F_y / k_s, k_s = A_s E_s / L$
k_3	钢筋强化刚度	$k_3 = f_{hard} k_s$
F_c	砼极限压力	$F_c = f_{ck} A_c$
c	砼极限压力时变形	$c = \epsilon_c L$
F_{cu}	砼压碎后残余力	$F_{cu} = f_{cu} A_c$
ϵ_{cu}	砼压碎后残余变形	$\epsilon_{cu} = \epsilon_{cu} L$

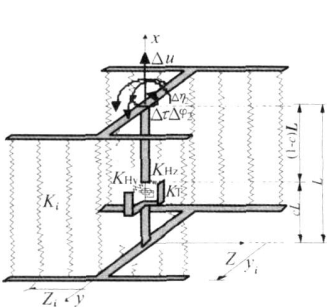


图 1 MVLEM3D 单元模型
Fig. 1 MVLEM3D model

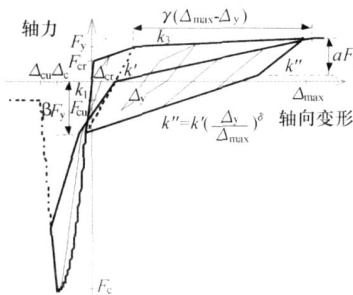


图 2 竖向弹簧恢复力模型
Fig. 2 Restoring force model of vertical spring

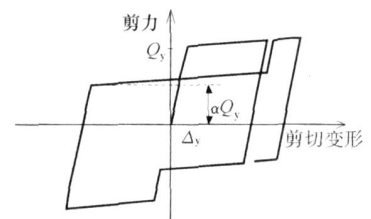


图 3 水平剪切弹簧恢复力模型
Fig. 3 Restoring force model of horizontal shear spring

2 OpenSEES程序介绍

OpenSEES全称 Open System For Earthquake Engineering Simulation^[8],是开源的地震工程模拟系统。其程序代码是公开的,用户可以通过编程为系统增加新的材料本构和单元类型。程序主要用于分析结构在地震作用下的反应。其功能包括线性分析,静力和动力非线性分析,特征值计算等功能。程序的有限元单元类型丰富,如非线性梁柱单元 nonlinear beam column,此单元是基于纤维模型的非线性单元,可应用于杆系结构的静力与动力非线性分析并且考虑 *P-Delta*效应。

Orakal^[8]等人依据 MVLEM 单元原理在 OpenSEES里写入基于材料单轴本构的 MVLEM2D 单元,并用低周往复荷载试验进行校正,发现单元能够很好地模拟剪力墙结构。Fischinger^[10]等人在 DR IAN-2D的基础上,在 OpenSEES里写入基于弹簧本构的 MVLEM3D 单元,与 1 3 剪力墙振动台试验对比后,发现 MVLEM3D 单元能很好的反映剪力墙动力特性。本文基于 MVLEM3D 单元对剪力墙低周往复试验进行全过程数值模拟。

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 数值分析

本文作者对 12个剪力墙试件进行低周往复荷载试验,由于篇幅关系本文仅对试件 1和试件 2进行数值模拟。试件墙高为 1.9 m。试件截面配筋图如图 4所示。试件 1轴压比为 0.24,试件 2的轴压比为 0.36。

混凝土材料强度是通过试件试块对混凝土进行取样测量。经材料试验测得混凝土立方体抗压强度统计平均值为 $f_{cu,m} = 34.43\text{MPa}$ 。试验模型结构所用的钢筋采取逐类取样,钢筋材料试验结果可知 6号钢筋屈服强度为 429 MPa,极限强度为 533 MPa,屈服应变为 2 000 μ ,极限应变为 2 460 μ ,弹性模量为 2 15 $\times 10^5$ MPa。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 50t液压千斤顶施加。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。

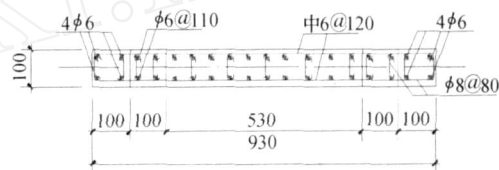


图 4 试件 1、试件 2截面配筋图

Fig 4 Section reinforcement of spec 1 and spec 2

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,前期处理工作量大。为解决上述问题,本文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 5所示,程序界面如图 6所示。



图 5 SWMA 程序流程图

Fig. 5 Flow chart of SWMA program

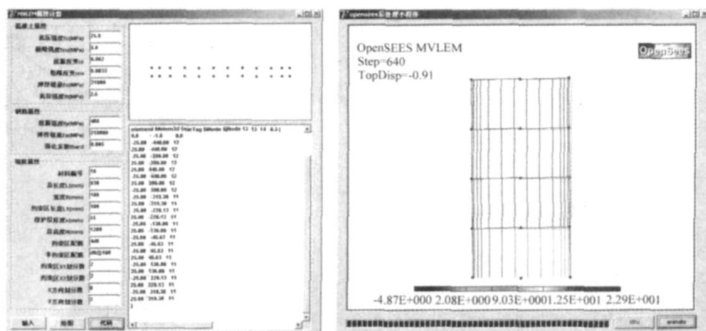


图 6 SWMA 程序前后处理界面图

Fig. 6 Prep and post interface of SWMA program

程序对试件混凝土本构的计算采用修正后 Kent-Park 模型^[12,13],如图 7 所示。考虑了箍筋对约束区混凝土强度及延性的提高。程序自动根据截面配箍情况按修正后 Kent-Park 模型公式计算得到约束区混凝土的应力-应变关系。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材料试验结果取值。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。

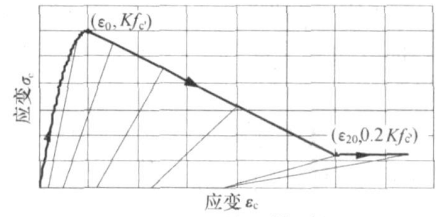


图 7 Kent-Park修正模型 (1982)

Fig 7 Kent Park modified concrete model(1982)

为考察 MVLEM3D 单元的划分精度对结果的影响性,本文按不同弹簧数目,不同水平划分,不同竖向划分把试件 1 的剪力墙进行建模,共制作 16 个算例,算例属性如表 2 所示,其中,算例 TestC 中 MVLEM3D 单元水平之间的连接是通过铰结刚臂,单元内部基于平截面假定变形,对于水平划分的剪力墙模型,通过铰结刚臂可以实现整体非平截面,以考虑剪力墙的局部变形,如图 8 所示。算例 TestB 只在塑性区的底层 1/4 进行竖向划分。

弹簧的恢复力参数参考文献 [7] 取值。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。

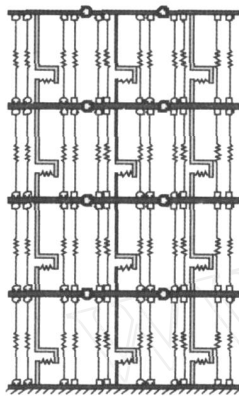


图 8 试件有限元模型图

Fig 8 Finite element model of specimen

表 2 算例单元划分属性表

Table 2 Parameters of element divisions

划分形式	模型	水平划分单元数	竖向划分单元数	每个单元弹簧数	弹簧总数
弹簧划分	TestA - 1	1	4	24	96
	TestA - 2	1	4	36	144
	TestA - 3	1	4	60	240
	TestA - 4	1	4	180	720
竖向划分	TestB - 1	1	4	24	96
	TestB - 2	1	5	24	120
	TestB - 3	1	6	24	144
	TestB - 4	1	7	24	168
水平划分	TestC - 1	2	4	16	128
	TestC - 2	3	4	16	192
	TestC - 3	4	4	16	256
	TestC - 4	5	4	16	320

经过 OpenSEES 的分析得到剪力墙水平力与水平位移滞回曲线与骨架曲线,由于骨架曲线呈对称形状,本文只列出正值部分,如图 9、图 10 所示。

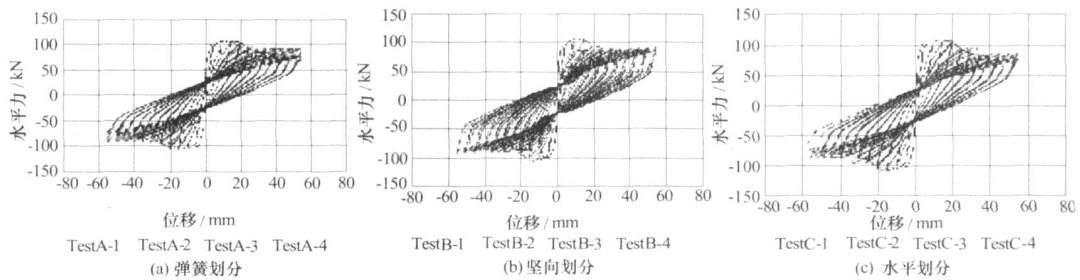


图 9 不同剪力墙划分得到水平力与水平位移滞回曲线

Fig.9 Comparison of force-deformation curve between the results of different divisions of shear walls

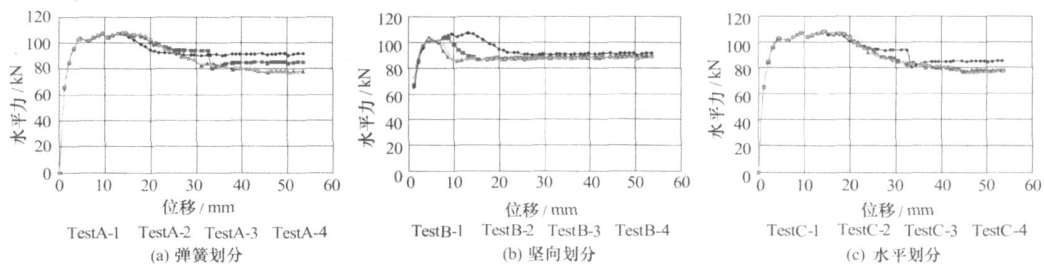


图 10 不同剪力墙划分得到水平力与水平位移骨架曲线

Fig. 10 Comparison of force-deformation skeleton curve between the results of different divisions of shear walls

从图 10(a)曲线可知,弹簧划分直接影响计算精度,当弹簧数量达到 60时计算结果已趋于稳定。从图 10(b)曲线可知竖向划分越细,分析结果越偏离试验值,因此竖向划分长度应大于剪力墙的塑性区长度 L_p 。从图 11(c)曲线可知水平划分越细,分析结果越趋向合理。由于水平划分,在强非线性时,单元内虽然是保持平截面,但整体截面可以出现弯曲,出现局部破坏。当剪力墙水平划分为 3段以上时,剪力墙的力-位移曲线出现平滑的下降段而不会产生突变。SWNA 程序对 OpenSEES计算结果进行图形后处理,显示剪力墙单元每根弹簧的弹塑性状态,如图 11所示。

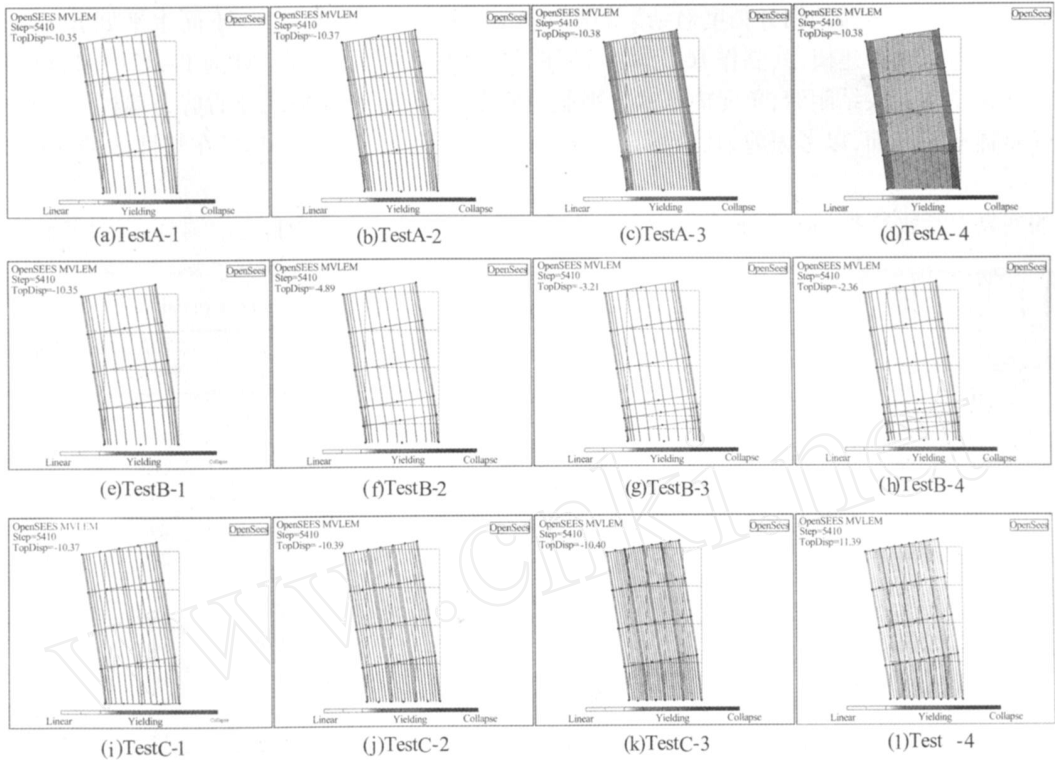


图 11 SWNA 后处理显示剪力墙单元破坏过程

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

(注:绿色线表示钢筋进入屈服段,红色线表示混凝土被压碎)

从图 11可见, MVLEM 单元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 与试件 2 的试验值与按 TestC-2划分的模型电算结果的滞回曲线对比如图 12所示,骨架曲线如图 13所示。

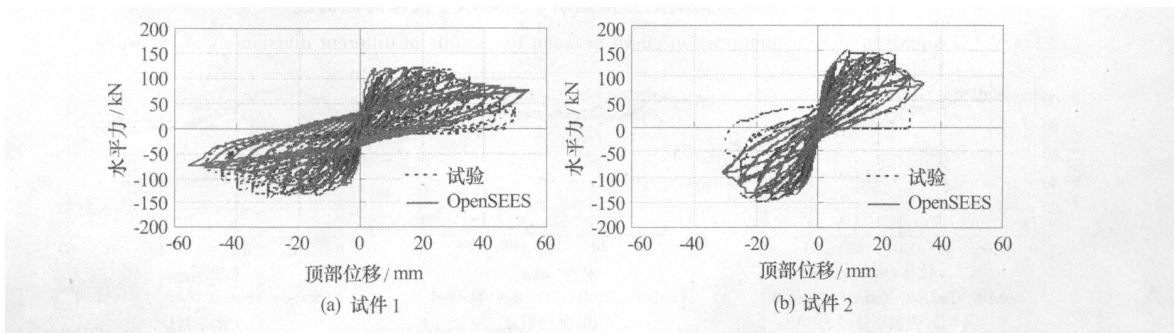


图 12 OpenSEES分析得到水平力-位移曲线与试验结果对比

Fig 12 Comparison of force-deformation curve between experiment results and OpenSEES

通过对比,表明滞回曲线与骨架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良好。该单元可通过比较少的自由度模拟剪力墙结构,节省大量计算时间。对于强非线性阶段分析,适当水平划分可以宏观考虑局部的破坏变形,使骨架曲线下降段平滑。因此该单元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。

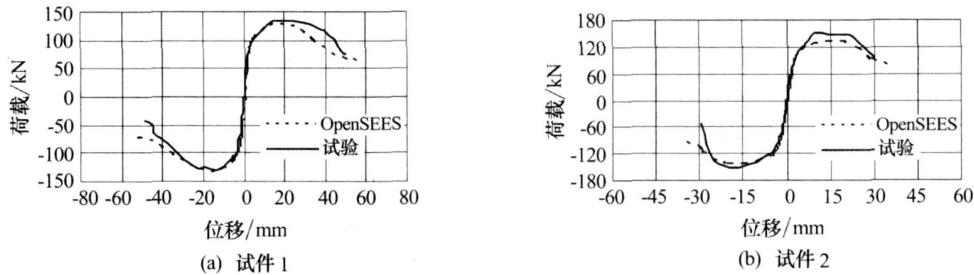


图 13 OpenSEES分析得到剪力墙骨架曲线与试验结果对比

Fig 13 Comparison of force-deformation skeleton curve between experiment results and OpenSEES

4 结论

开源有限元程序 OpenSEES是研究结构整体非线性分析一个很好的平台。现阶段 OpenSEES具有大量的宏观单元模型来分析梁柱及剪力墙结构。通过对 MVLEM3D 剪力墙单元进行技术研究,评估单元划分与弹簧数量对分析结果的影响。

本文对剪力墙宏观单元的不同划分形式对计算结果的影响进行的对比研究,发现剪力墙宏观单元的划分对计算精度的影响规律,划分原则总结如下:

- (1) 弹簧数量应足够多,以保证通过离散面积叠加计算得到的截面惯性矩等于连续积分得到的截面惯性矩。
- (2) 对于弱非线性的剪力墙分析,水平可以不需要划分,对于强非线性的剪力墙分析,水平划分需要增加。
- (3) 竖向划分要保证单元长度大于剪力墙构件塑性区长度,竖向划分太密会造成计算结果错误。

采用上述划分原则可以使计算精度提高并节省计算量,本文通过数值分析结果与剪力墙试验进行对比,表明通过合理划分,剪力墙宏观单元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。优化划分形式可以减少自由度,节约计算时间。该数值模型及 OpenSEES程序适用于带剪力墙的高层结构的整体非线性分析,这对基于性能的抗震设计具有重大意义。

参考文献:

- [1] 韩小雷,季静. 广州花园酒店西塔“白金五星级酒店”改造结构抗震试验研究报告[R]. 广州:华南理工大学建筑学院, 2006.
- [2] 李兵,李宏男. 钢筋混凝土剪力墙弹塑性分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 75 - 81.
- [3] Kaybasawa T, Shinohara H, Kabeyasawa S. US-Japan cooperative research on R/C full-scale building test, Part 5: Discussion of dynamic response system[C]//Proc. 8th of WCEE, 1984.
- [4] Linde P, Bachmann H. Dynamic modeling and design of earthquake-resistant walls[J]. EESD, 1994, 23(12): 1331 - 1350.
- [5] Milev J I. Two dimensional analytical model of reinforced concrete shear walls[C]. Proc. 11th of WCEE, 1996.
- [6] Vulcano A, Bertozzi V V. Analytical model for predicting the lateral response of RC shear wall: evaluation of their reliability[R]. EERC - 87/19.
- [7] Fischinger M, Isakovic T. Benchmark analysis of structural wall[C]//Proc. 12th of WCEE 2000.
- [8] McKenna F, Fenves G L. The OpenSees Command Language Primer[Z]. PEER, University of California, Berkeley, <http://OpenSees.Berkeley.edu> 2000.
- [9] Orakcal K, Massone L M, Wallence J W. Analytical modeling of reinforced concrete walls for predicting flexural and coupled-shear-flexural responses[R]. PEER, University of California, 2006.
- [10] Fischinger M, Isakovic T, Kante P. Implementation of a macro model to predict seismic response of RC structure walls[J]. Computers and Concrete, 2004, 1(2): 55 - 73.
- [11] 韩小雷,季静. 广州花园酒店西塔“白金五星级酒店”改造结构抗震试验研究报告[R]. 广州:华南理工大学建筑学院, 2006.
- [12] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete[J]. ASCE Journal of the structural Division, 1971. 97(ST7): 1969 - 1990.
- [13] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates[J]. Journal of the American Concrete Society, 1982, 79(1): 13 - 27.