剪力墙宏观单元开发与低周往复荷载试验数值分析

陈学伟 1 韩小雷 1,2

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

摘要:本文对剪力墙宏观单元进行理论研究,采用面向对象语言建立基于宏观单元的结构弹塑 性分析平台MESAP,并在平台上加入多竖向弹簧单元(MVLEM)与轴向弹簧滞回性能本构 (ASHM)。对不同配筋与构造的剪力墙进行低周往复荷试验,通过MESAP对剪力墙结构进行 低周往复试验数值模拟,分析结果与试验进行对比,表明该数值方法能够较精确地宏观地模拟 剪力墙弹塑性行为。MVLEM单元可以通过比较少的自由度模拟剪力墙结构,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设计。

关键词: 宏观单元 剪力墙 低周往复荷载试验 弹塑性分析

中图分类号: TU 355 **文献标识码:** A

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,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 观模型和宏观模型两种,其中微观模型按实体或者 板壳单元直接模拟剪力墙,原理清晰准确,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。

1 研究背景

宏观模型由于自由度数少,计算量较小适用于 整体结构弹塑性分析。主要有以下模型: Kabeyasawa 等人^[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),如图1(a)所示;瑞士学者Linda 等人^[2] 对TVLEM进行改进,提出四弹簧模型,如图1(b) 所示;Milev^[3]对TVLEM进行修正,提出二维板模 型,如图1(c)所示;为解决TVLEM的弯曲弹簧与 两边柱杆元相协调的问题,Vulcano和Bertero^[4]提 出了一个修正模型。这一模型是用多个竖向弹簧代 卷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,如图1(d)所示。



图1 剪力墙宏观模型

Fig.1 Macro model of shear-wall

2 竖向弹簧模型 (MVLEM) 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 的原理^[5]是将剪力墙的压弯变形与剪 切变形分开,剪切变形与压弯变形不相关。建模时 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,用于模拟剪力墙的压弯变形,而在高度 *ch*的位置上设置水平方向弹簧,用于模拟剪力墙的 剪切变形,该单元的局部自由度规定如图2所示。 MVLEM 单元的刚体位移下的刚度矩阵如式(1) 所示。

$$[\overline{K}] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} k_{i} & -\sum_{i=1}^{n} k_{i} x_{i} & \sum_{i=1}^{n} k_{i} x_{i} \\ k_{H} c^{2} h^{2} + \sum_{i=1}^{n} k_{i} x_{i}^{2} & k_{H} c (1-c) h - \sum_{i=1}^{n} k_{i} x_{i}^{2} \\ \overline{X} T \overline{X} & k_{H} (1-c)^{2} h + \sum_{i=1}^{n} k_{i} x_{i}^{2} \end{bmatrix}$$
(1)

单元抗力向量的计算如式(2)所示。

$$\{F_e\} = \begin{cases} J_H \\ -\sum_{i=1}^n f_i \\ -f_H ch - \sum_{i=1}^n f_i x_i \\ -f_H ch - \sum_{i=1}^n f_i x_i \\ -f_H \\ \sum_{i=1}^n f_i \\ -f_H (1-c)h + \sum_{i=1}^n f_i x_i \end{cases}$$
(2)

竖向弹簧的变形与单元局部变形的关系如式 (3)~(4)所示。

水平弹簧的变形与单元局部变形的关系式如

(5)~(6)所示。

$$u_H = [b]^T \cdot [\delta] \tag{5}$$

 $[b]^{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -ch & -1 & 0 & -(1-c)h \end{bmatrix}$ (6)

竖向弹簧可采用两种方法进行模拟,一种方法是基于材料应力-应变关系,其变形相关矩阵如式(4)所示。另一种方法是基于力-变形的轴向弹簧本构,式(4)中的元素中高度的 h 取 1.0。

钢筋混凝土轴向拉压弹簧本构最早是用 T. Kabeyasawa 在建立三弹簧模型(TVLEM)时提出,如 图 2 所示。



图2 Kabeyasawa弾簧本构 图3 Fischinger弹簧本构 Fig.2 Kabeyasawa spring model Fig.3 Fischinger spring model

轴向拉压弹簧在宏观模型中应用广泛,采用拉 压不对称的本构模拟一定配筋率的混凝土的轴力 与轴向变形关系,假定前提是钢筋与混凝土变形协 调。T. Kabeyasawa^[1]在剪力墙分析时发现边缘构件 的抗压曲线对分析不敏感,轴向弹簧本构的受压段 过于简化为直线段,在强非线性的情况下难以适 用,于是M. Fishinger^[6]将Kent-Park本构加入轴向弹 簧本构,其骨架曲线与加卸载轨迹如图3所示。骨 架曲线参数说明如表1所示。

表1 Fischinger本构参数计算公式表 Table 1 Formulas of parameters of restoring force model of vertical spring

vertiear spring					
参数	描述	公式			
k_1	初始弹性刚度	$k_1 = A_c E_c / h$			
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	$\Delta_y = F_y / k_s, k_s = A_s E_s / h$			
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	$\Delta_c = \mathcal{E}_c h$			
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	$\Delta_{cu} = \mathcal{E}_{cu}h$			

水平剪切弹簧采用简单的剪切本构,如图4所

示。



Fig.7. Horizontal shear spring model

3 MESAP 的编制及单元开发

基于宏观模型的结构非线性分析方法在国内 外已经应用很多,如OpenSEES^[7]、Perform-3D^[8]。 笔者为了更好的研究宏观模型理论及程序实现方 法,通过面向对象语言Delphi开发了基于宏观单元 理论的弹塑性分析软件MESAP(Macro Element Structural Analysis Program)。软件基于类来编写, 如图5所示。



Fig.5. The relationship diagram between classes of MESAP

可不断扩展单元库与材料本构库,配有图形化 的前后处理,图形界面如图6所示。

笔者根据上述理论,将多竖向弹簧单元 MVLEM加入MESAP的单元库,MVLEM单元迭代 计算过程图如图7所示。



图6 MESAP软件界面图 Fig.6. Interface of MESAP





本文用的Fishinger轴向弹簧本构模型,其滞回 曲线如图8所示。



图8.Fischinger轴向弹簧本构滞回曲线 Fig.8 Hysteretic curve of Fischinger spring model

4 剪力墙低周往复荷载试验

花园酒店剪力墙试验^[9]共对12个剪力墙试件进 行低周往复荷载试验,本文对试件一至试件四进行 数值模拟。试件一至试件四墙高为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9~10所示。



图 9 试件一、试件二截面配筋图 Fig.9 Dimension and details of Spec.1 and Spec.2



图 10 试件三、试件四截面配筋图

Fig.10 Dimension and details of Spec.3 and Spec.4

表2 试件参数表

ruble 2 ruhumeters of speenmens

编号	试件一	试件二 试件三		试件四
设计	四仁拘共	四仁拘共	唇体的	原结构
依据	现们苏妃	现们苏始视	原珀构	
轴压	0.24	0.26	0.04	0.36
比	0.24	0.36	0.24	
竖直	0(@110	0(@110	06.5050	Ø6.5@50
配筋	06@110	06@110	06.3@30	
水平	06@120	06@120	Ø4@80	Ø6@120
配筋	00@120	00@120	04@80	
端部	08@110v80	08@110×80	Q4@1(0×50	Ø4@160×50
拉筋	Do@110×80	Do@110×80	£94@100×30	
中部	08@110×120	@@110×120	0	@4@160×100
拉筋	120 wow110×120	120 wow 110×120	0	£4@100×100

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}=34.43MPa。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。

表3 钢筋性能指标

Table 3 Parameters o	of reinforcement
----------------------	------------------

钢筋 型号	屈服	极限	屈服	极限	弹性		
	强度	强度	应变	应变	模量		
	(MPa)	(MPa)	(με)	(με)	(N/mm ²)		
Ø 4	345	442	1560	2000	2.21×10 ⁵		
Ø 6	429	533	2000	2460	2.15×10 ⁵		
Ø 8	425	530	2000	2460	2.14×10 ⁵		

试验加载装置如图11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50t 液压千斤顶施加。



图 11 试验加载装置图

Fig.11 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,每级控制位移做三次循环, 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。

5 数值分析

为考察MVLEM单元的划分精度对结果的影响 性,本文作者在文献[10]论述按不同弹簧数目,不 同水平划分,不同竖向划分对试件一的剪力墙进行 建模,共制作16个算例。试算结果表明弹簧划分直 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。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Lp。 最终确定,试件模型沿高度方向划分四个单元,截 面共划分为24个弹簧,结点数为5,单元数为4,自 由度数为30,模型如图12所示。



图 12 试件有限元模型图

Fig.12 Finite element model of specimen

程序对四片剪力墙进行低周往复荷载数值分 析,分析得到水平作用力与顶部位移的曲线与试验 结果对比如图13所示。















(d)试件四

图13 MESAP分析得到力-位移曲线

与试验结果对比

Fig.13 Comparison of force-deformation curve between

experiment results and MESAP

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一与试件二的滞回 曲线吻合程度高,试件三与试件四的下降段部分比 试验结果要陡一些,但在总体的强度及延性的模拟 情况良好。由于单个MVLEM基于平截面假定,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。若沿水平方向剖分单元,可改善该情 况。在基于性能的抗震设计中,要求保证剪力墙处 生命安全状态或防止倒塌。上述两个状态均不处于 强非线性破坏阶段^[14]。因此,相对较粗的MVLEM 就可适用于基于性能的抗震设计与分析。

剪力墙结构的变形,弹簧变形及弹簧非线性状态全过程如图14~15所示。从图14可见,MVLEM表述剪力墙的往复荷载作用下,由于受到压弯作用,中和轴不断移动。



图14 MESAP显示剪力墙单元弹簧变形云图 (注:黑色线表示轴向变形接近0的弹簧,即中和轴) Fig.13 Deformation of vertical springs of shear-wall elements





图15 MESAP显示剪力墙单元破坏整过程 (注:绿色线表示钢筋进入屈服段,红色线表示混凝土被压碎) Fig.14 Collapse process of shear-wall elements shown in

MESAP

从图15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。试件一最终破坏形态对比如图16所 示。



图16 试件一最终破坏形态 Fig.16 collapse status of specimen 1

6 结论

采用面向对象语言编制了基于宏观单元的结构弹塑性分析软件MESAP,并在这基础上编制了 MVLEM单元。采用基于Fischinger本构的MVLEM 单元对按我国抗震规范设计的剪力墙进行低周往 复试验数值分析,结果与剪力墙试验进行对比,滞 回曲线(包括下降段部分)吻合程度较高,表明该 剪力墙宏观单元与弹簧本构能够在一定程度上反 映剪力墙的强非线性行为。

参考文献:

 T Kabeyasawa, H. Shiohara, S. Otani Kabeyaawa. US-Japan cooperative research on R/C full - scale building test[C]//Proc. 8th of WCEE, San Francisco, 1984.

- [2] Linda P. Bachmann H. Dynamic modeling and design of earthquake - resistant walls[J]. EESD, 1994.Vol23:P1331~1350.
- [3] Milev J I. Two dimensional analytical model of reinforced concrete shear walls [C]. Proc. 11th of WCEE.
 1996.
- [4] Vulcano A, V V Bertero. Analytical models for predicting the lateral response of RC shear walls: evaluation of their reliabilitity[R]. EERC Reprot No. UCB/EERC-87/19, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California.Berkeley, California:1987.
- [5] Kutay Orakcal, Lenonardo M. Massone, John W Wallance. Analytical modeling of reinforced concrete walls for predicting flexural and coupled-shear-flexural responses[R]//PEER, Berkeley, University of California, 2006.
- [6] Matej Fischinger, Tatjana Isakovic, Peter Kante. Implementation of a macro model to predict seismic response of RC sturecture walls[J]. Computers and

Concrete, 2004, 1(2):55-73.

[7] 韩小雷,陈学伟,戴金华等.基于 OpenSEES 的剪力墙低 周往复试验的数值分析[J].华南理工大学学报(自然科 学版),2008,36(12):7-12.

Han Xiao-lei, Chen Xue-wei, Dai Jin-hua et al. Numerical Analysis for Low-Cyclic Loading Test of Shear Walls Based on OpenSEES[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(12):7-12.

- [8] 韩小雷,陈学伟,林生逸等.基于纤维模型的超高层钢筋 混凝土结构弹塑性时程分析及工程应用[J]. 建筑结 构,2010.
- [9] 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].华南理工大学建筑学院.2006.
- [10] 韩小雷,陈学伟,吴培烽等. OpenSEES 的剪力墙宏观单元的研究[J].世界地震工程,2008, 24(4):76-81.
 Han Xiao-lei, Chen Xue-wei, Wu Pei-feng et al. Research on the shear wall macro-element of OpenSEES[J]. World Earthquake Engineering, 2008, 24(4):76-81.

Development of the Shearwall Nonlinear Macro-element and Numerical

Analysis of Cyclic Loading Test of Shear Walls based

CHEN Xue-wei¹, HAN Xiao-lei^{1,2}

(1.Tall Building Structure Research Institute, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;2. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper studies the theory of macro element for shear wall on the macro element based nonlinear analysis platform named MESAP which is complied with object oriented language. Multiple vertical lines element model (MVLEM) and axial spring hysteretic model are implemented in MESAP to perform low-cyclic loading tests of shear walls in different reinforcement and construction conditions. Comparison of numerical simulation and test indicates that the proposed numerical method macroscopically simulate the elastic-plastic behaviors of shear walls. Due to low consumption of degree of freedom, MVLEM is suitable for the global elastic-plastic analysis and performance assessment of tall buildings for high calculation efficiency.

Keywords: macro element; shear wall; low-cyclic loading test; elastoplastic analysis;