

文章编号: 1000-4750(2011)05-0111-06

剪力墙非线性宏观单元的研究与单元开发

*陈学伟^{1,2}, 韩小雷^{1,2}

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

摘 要: 罕遇地震作用下剪力墙构件易进入塑性阶段而发生弹塑性损伤, 准确地模拟剪力墙构件进入非线性状态后的力学行为对评价剪力墙结构的抗震安全性及基于性能的抗震设计具有重要的意义。通过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平台 MESAP 及多竖向弹簧剪力墙单元(MVLEM), 采用材料本构及 Fischinger 学者提出的轴向弹簧本构对按我国规范设计的剪力墙低周往复荷载试验进行分析, 其滞回曲线吻合程度较高, 表明该单元能够反映剪力墙构件的强非线性行为, 且精度较高。

关键词: 宏观单元; 剪力墙; 本构关系; 低周往复荷载试验; 弹塑性分析; 滞回法则

中图分类号: TU355; O241.82 **文献标识码:** A

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE SHEAR WALL NONLINEAR MACRO-ELEMENT

*CHEN Xue-wei^{1,2}, HAN Xiao-lei^{1,2}

(1. Tall Building Structure Research Institute, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: Since the elastoplastic damage occurs in the plastic stage of shear walls under a severe earthquake, the accurate modeling of the inelastic response of shear walls is primary to assess the aseismic safety and performance-based aseismic design. A structural elastoplastic analysis program MEASP which bases on macro elements is developed with object oriented language and the multiple-vertical-line-element model (MVLEM) is implemented in MESAP. The nonlinear macro element MVLEM is adopted to simulate the nonlinear behavior of shear walls designed according to Chinese code under a cyclic reverse loading test, and according to incorporating material constitutive relations as well as the uniaxial spring constitutive relation proposed by Fischinger. The hysteretic curve agrees well with the test, which indicates that the MVLEM is suitable to simulate the strong nonlinear behavior of shear walls accurately.

Key words: macro element; shear wall; constitutive relation; cyclic reverse loading test; elastic-plastic analysis; hysteresis rule

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, 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。

1 多竖向弹簧模型(MVLEM)

相对于微观模型, 宏观模型自由度数少, 计算量较小而适用于整体结构弹塑性分析。现有的剪力墙宏观单元模型主要有: Kabeyasawa 等人^[1]通过对

收稿日期: 2009-10-27; 修改日期: 2010-05-10

基金项目: 亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究基金项目(C708086z)

作者简介: *陈学伟(1983—), 男, 广东人, 博士生, 主要从事高层建筑结构抗震分析研究(E-mail: dinochen1983@yahoo.com.cn);

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

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^[2]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2所示。

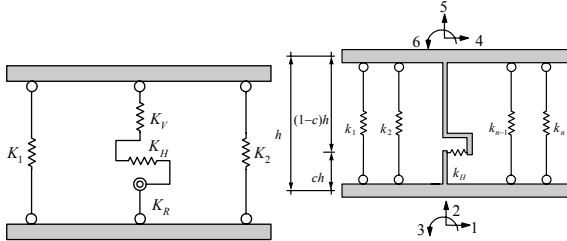


图1 TVLEM 模型示意图 图2 MVLEM 模型示意图
Fig.1 Sketch of TVLEM Fig.2 Sketch of MVLEM

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-曲率关系的恢复力准则的困难,同时可以考虑在地震反应中剪力墙截面中和轴随着加载而移动。

MVLEM 的原理^[3]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 单元的刚度位移下的刚度矩阵如下式所示:

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n k_i & -\sum_{i=1}^n k_i x_i & \sum_{i=1}^n k_i x_i \\ k_H c^2 h^2 + \sum_{i=1}^n k_i x_i^2 & k_H c(1-c)h - \sum_{i=1}^n k_i x_i^2 & \\ \text{对称} & k_H (1-c)^2 h + \sum_{i=1}^n k_i x_i^2 & \end{bmatrix} \quad (1)$$

单元抗力向量的计算如下式所示:

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

竖向弹簧的变形与单元局部变形的关系如下式所示:

$$\{u\} = [a] \cdot \{\delta\} \quad (3)$$

$$\{a_i\} = \{0 \quad -1 \quad -x_i/h \quad 0 \quad 1 \quad x_i/h\} \quad (4)$$

水平弹簧的变形与单元局部变形的关系式如下式所示:

$$u_H = [b]^T \cdot \{\delta\} \quad (5)$$

$$[b]^T = [1 \quad 0 \quad -ch \quad -1 \quad 0 \quad -(1-c)h] \quad (6)$$

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。

2 材料本构及轴向拉压弹簧本构

2.1 工程概况

基于材料本构的弹簧模型,需要采用混凝土的应力-应变关系。本文采用修正后的 Kent-Park 模型^[4],其本构骨架曲线如图3所示。该模型的滞回法则采用 Karsan 与 Jirsa 提出直线卸载准则^[5]。钢筋材料本构采用 Menegotto 与 Pinto 提出的钢材模型^[6],如图4所示,采用渐近线进行卸载。该模型与二折线随动强化的钢筋模型相比,能较好地模拟钢筋滞回特性与包辛格效应。

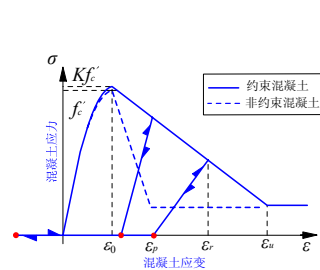


图3 Kent-Park 混凝土本构

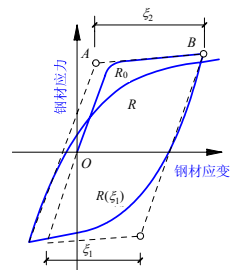


图4 Pinto 钢筋本构

Fig.3 Kent-Park concrete model

Fig.4 Pinto steel model

2.2 轴向拉压弹簧本构

钢筋混凝土轴向拉压弹簧本构最早是用 Kabeyasawa T 在建立三弹簧模型(TVLEM)时提出,如图5所示。

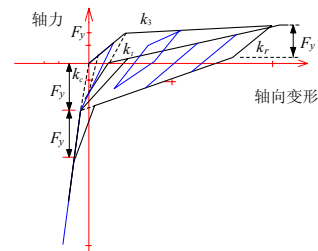


图5 Kabeyasawa 弹簧本构

Fig.5 Kabeyasawa 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。Kabeyasawa T^[7]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简化为直线段,在强非线性情况下难以适用,于是 Fishinger M^[8]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 6 所示。骨架曲线参数说明如表 1 所示。

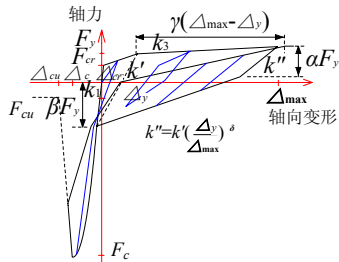


图 6 Fishinger 弹簧本构
Fig.6 Fishinger spring model

表 1 Fishinger 本构参数计算公式表

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	$k_1 = A_c E_c / h$
F_{cr}	混凝土开裂拉力	$F_{cr} = f_{ct} A_c$
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	混凝土极限压力	$F_c = f_{ck} A_c$
Δ_c	混凝土极限压力时变形	$\Delta_c = \varepsilon_c h$
F_{cu}	混凝土压碎后残余力	$F_{cu} = f_{cu} A_c$
Δ_{cu}	混凝土压碎后残余变形	$\Delta_{cu} = \varepsilon_{cu} h$

水平剪切弹簧采用简单的剪切本构,如图 7 所示。

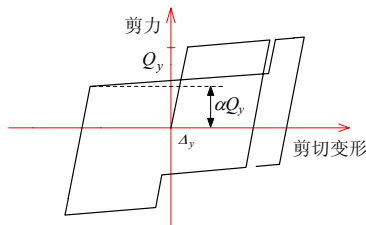


图 7 剪切本构
Fig.7 Horizontal shear spring model

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

外已经广泛应用,如 OpenSEES^[9]、Perform-3D^[10]。本文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 8 所示。

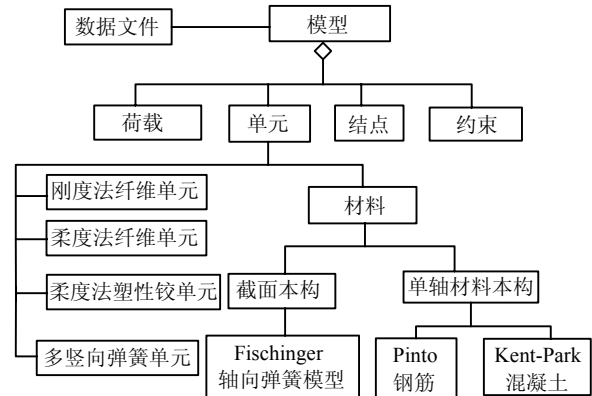


图 8 MESAP 类之间的关系图

Fig.8 The relationship diagram between classes of MESAP

程序的单元库与材料库可自由扩展,具有图形界面方便前后处理,图形界面如图 9 所示。

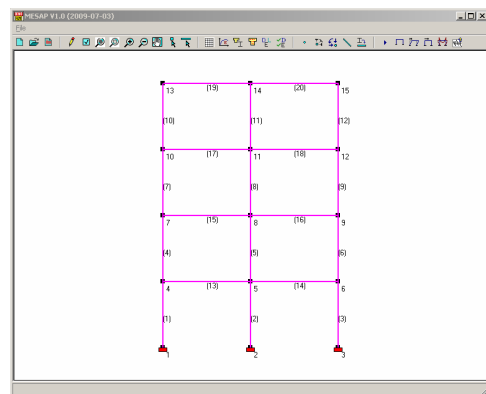


图 9 MESAP 软件界面图

Fig.9 Interface of MESAP

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 10 所示。

MESAP 还具有三种非线性梁柱模型:刚度法纤维单元、柔度法纤维单元及柔度法塑性铰单元, MESAP 的材料库具有多种材料模型,包括 Kent-Park 混凝土本构模型、Pinto 钢筋本构模型,其滞回曲线与 OpenSEES 的对比如图 11 所示。

本文采用 Fishinger 轴向弹簧本构模型,其滞回曲线如图 12 所示。

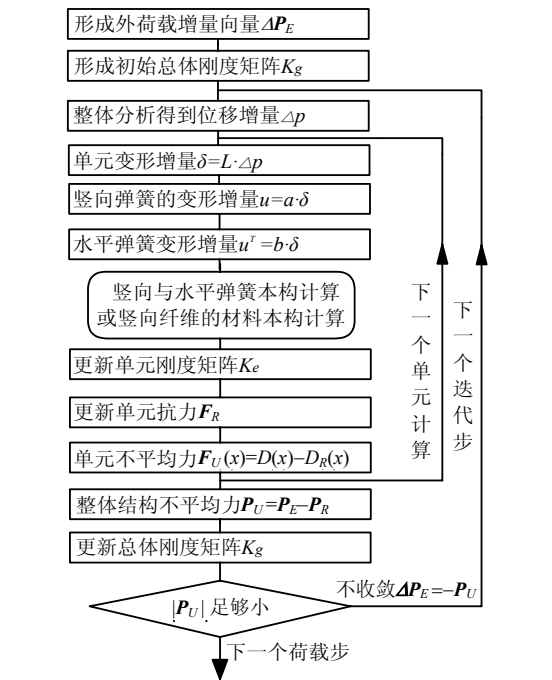


图 10 MVLEM 单元内迭代流程图
Fig.10 Iterative flowchat of MVLEM element

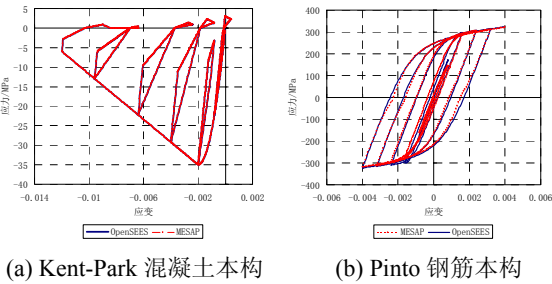


图 11 材料模型滞回曲线
Fig.11 Hysteretic curve of the material model

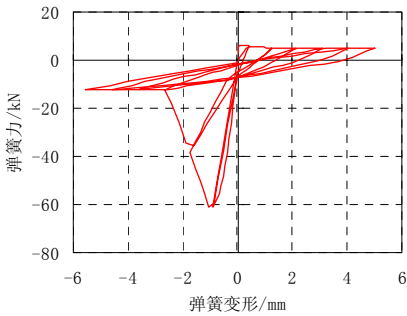


图 12 Fischinger 轴向弹簧本构滞回曲线
Fig.12 Hysteretic curve of Fischinger spring model

4 算例分析

4.1 矩形剪力墙低周往复荷载试验分析

Thomsen 与 Wallace^[11](1995 年)为详细地研究剪力墙的非线性性能,对一系列剪力墙进行低周往复荷载试验,本文采用 MESAP 软件对该试验试件 RW2 进行了数值模拟,分别采用基于材料与基于弹

簧本构的模型,研究基于 Fischinger 弹簧本构的 MVLEM 单元的适用性。试件 RW2 的截面配筋图如图 13 所示。

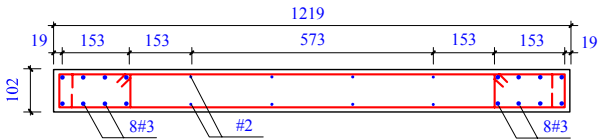


图 13 试件 RW2 配筋图
Fig.13 Details of specimen Spec.RW2

文献[11]已经列出详细的材料本构参数,如表 2 所示。

表 2 本构参数表
Table 2 Parameters of material constitutive

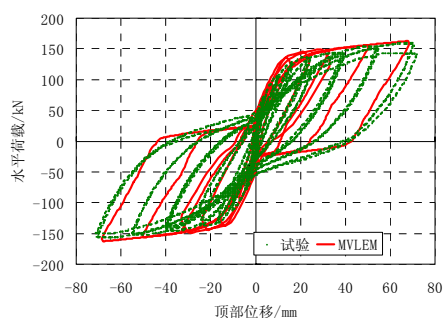
材料参数(N,mm)			竖向弹簧骨架参数(N,mm)		
约束区混凝土	f'_c	47.60	k_1	约束区	非约束区
	ϵ'_c	0.0033	k_3	93744.18	390112.09
	f'_{20}	9.52	F_y	6366.50	17786.45
	ϵ'_{20}	0.0050	A_y	37548.39	8508.36
非约束区混凝土	f'_c	42.80	F_{cr}	1.81	1.54
	ϵ'_c	0.0021	F_c	384.18	193.62
	f'_{20}	8.56	A_c	-141610.00	-375005.04
	ϵ'_{20}	0.0033	F_{cu}	-3.02	-1.92
#2 钢筋	f_y	336	A_{cu}	-28322.00	-75001.01
	E_s	200000	k_1	-4.58	-3.02
	b	0.0350	α	1.0	1.0
	f_y	395	β	1.5	1.5
#3 钢筋	E_s	200000	γ	1.05	1.05
	b	0.0185	δ	0.5	0.5

表 2 中, f'_c 为混凝土残余抗压强度,即为抗压强度 f'_{20} 的 20%, ϵ'_{20} 为对应残余抗压强度时的混凝土应变值。

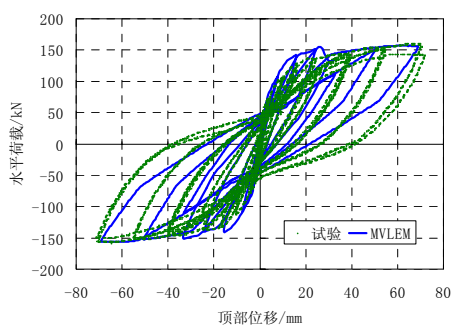
试件底端固定,上端自由,试件高度为 3.66m。试验加载方案为先施加竖向荷载,其值为 378kN,加载至设定的荷载值以后进行水平力控制加载,随后进行位移加载,每级位移约为 5mm、10mm、15mm、20mm、30mm、40mm、60mm、80mm。基于材料本构的模型中,钢筋采用 Pinto 钢筋模型,混凝土采用 Kent-Park 混凝土模型,高度系数 c 取 0.4,剪切弹簧的初始刚度取 GA/L 。剪力墙总高度为 3658mm,竖向划分为 4 个单元。MVLEM 单元的 Fischinger 弹簧本构参数根据材料参数计算得到,如表 2 所示。两种分析得到的滞回曲线与试验结果的对比如图 14 所示。

从图 14 中可见,两种模型与试验结果基本吻合,滞回曲线的饱满程度是基于材料的模型较好,

但是基于材料本构的模型在应变为零处的捏缩效应比试验偏大,而基于 Fischninger 本构的模型的捏缩效应与试验结果吻合,但其卸载段偏陡,原因是滞回法则是以直线指向应变极值卸载。总体而言, Fischninger 本构能较好地模拟剪力墙中轴向弹簧的滞回性能。



(a) 基于材料本构模型



(b) 基于 Fischninger 弹簧本构

图 14 试件 RW2 水平力-顶点侧移关系曲线

Fig.14 Base shear-top displacement relationship of specimen Spec.RW2

4.2 按我国规范设计的剪力墙弹塑性分析

上述算例是对按美国规范设计构造的剪力墙试件进行了分析,表明了 MVLEM 单元及 Fischninger 本构的适用性。算例中滞回曲线没有出现下降段的趋势,而 Fischninger 本构的优点在于能够模拟剪力墙的混凝土受压软化性能。本文作者还进一步^[12]对 12 个剪力墙试件进行全过程(包括剪力墙倒塌破坏阶段)的低周往复荷载试验,由于篇幅关系本文对仅试件 1 和试件 2 进行数值模拟。试件墙高为 1.9m。试件截面配筋图如图 15 所示。

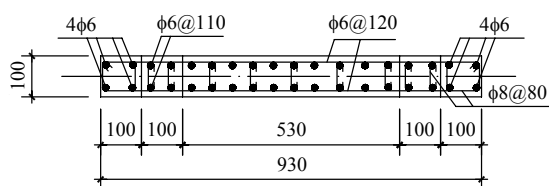
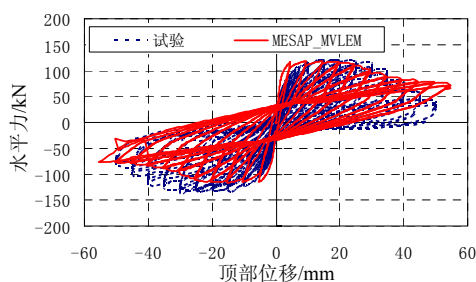


图 15 试件 1、试件 2 配筋图

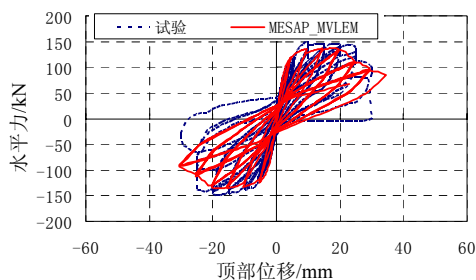
Fig.15 Dimension and details of specimen Spec.1 and Spec.2

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 429MPa,极限强度为 533MPa,屈服应变为 $2000\mu\epsilon$,极限应变为 $2460\mu\epsilon$,弹性模量为 $2.15\times 10^5\text{MPa}$ 。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,每级控制位移进行 3 个循环,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。

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[13]论述按不同弹簧数目,不同水平划分,不同竖向划分对试件 1 的剪力墙进行建模,共建立 16 个模型。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 L_p 。最终确定,试件模型沿高度方向划分 4 个单元,弹簧本构采用 Fischninger 本构。试件 1 与试件 2 的试验值分析结果的滞回曲线对比如图 16 所示。



(a) 试件 1



(b) 试件 2

图 16 MESAP 分析得到水平力-位移曲线与试验结果对比

Fig.16 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 1 与试件 2 的滞回曲线吻合程度较高, Fischinger 本构对 Kabeyasawa 的本构修正后可以得到与试验吻合的下降段。MVLEM 单元可通过比较少的自由度较好的模拟剪力墙滞回特性,对于大型剪力墙结构的计算具有工程价值。对于强非线性阶段分析,以宏观的弹簧本构考虑局部破坏变形,使骨架曲线下降段平滑。MESAP 软件的后处理显示 MVLEM 的轴向弹簧变形状态变化过程表述了剪力墙随着加载而破坏的过程,如图 17 所示。

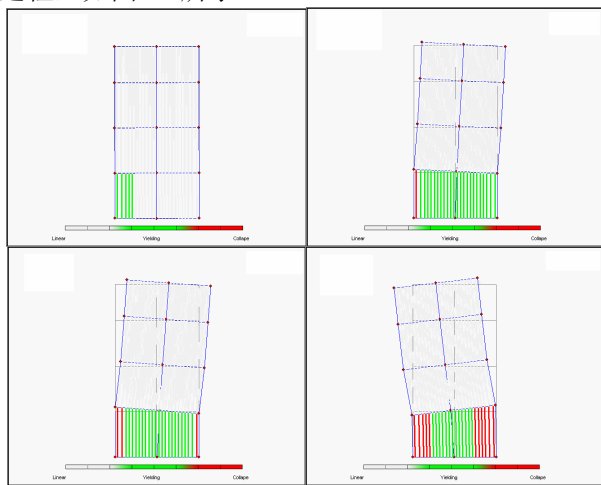


图 17 MVLEM 轴向弹簧变形状态全过程

Fig.17 The whole process of MVLEM axial spring deformation

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而退出工作,压坏部分从两侧向中间扩展,最后出现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。

5 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,并在此基础上编制了 MVLEM 单元。结合材料本构及弹簧本构对剪力墙进行低周往复试验的数值模拟,采用由 Fischinger 学者提出的具有混凝土受压软化段的竖向弹簧本构对剪力墙进行分析,并与基于材料本构的模型进行对比,结果表明,基于 Fischinger 本构的分析结果中捏缩效应更接近试验结果。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:

- [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, 1984.
- [2] Vulcano A, Bertero V V. Analytical models for predicting the lateral response of RC shear walls: evaluation of their reliability [R]. Berkeley, California: EERC Report No. UCB/EERC-87/19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1987.
- [3] Kutay Orakcal, Lenonardo M Massone, John W Wallance. Analytical modeling of reinforced concrete walls for predicting flexural and coupled-shear-flexural responses [R]. California, USA: PEER, Berkeley, University of California, 2006.
- [4] Kent D C, Park R. Flexural members with confined-concrete [R]. California: ASCE, 1971, 97: 1969—1990.
- [5] Karsan I D, Jirsa J O. Behavior of concrete under compressive loadings [J]. ASCE Journal of the Structural Division, 1971, 97(7): 1969—1990.
- [6] Menegotto M, Pinto P E. Method of analysis of cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under normal force and bending [R]. California, USA: Preliminary Report, IABSE, 1973, 13: 15—22.
- [7] Kabeyasawa T, Shiohara H, Otani S. Analysis of the full-scale seven-story reinforced concrete test structure [J]. Journal of the Faculty of Engineering, 1997, 37(2): 431—478.
- [8] 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.
- [9] 韩小雷, 陈学伟, 戴金华. 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 Xiaolei, Chen Xuewei, Dai Jinhua. 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. (in Chinese)
- [10] 韩小雷, 陈学伟, 林生逸. 基于纤维模型的超高层钢筋混凝土结构弹塑性时程分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(2): 13—16.
Han Xiaolei, Chen Xuewei, Lin Shengyi. Elasto-plastic time-history analysis of super high-rise RC structure based on fiber model [J]. Building Structure, 2010, 40(2): 13—16. (in Chinese)

(参考文献[11]—[13]转第 123 页)

对其进行全概率抗震设计,具体步骤是通过对反复修正结构构件尺寸,并同时验算此时结构构件和结构体系的抗震可靠度,直至使其满足目标可靠指标的要求。上述方法具有很强的操作性,是对结构全概率抗震设计方法的有益探索,也可为相关规范的修订提供一定的借鉴。

参考文献:

- [1] Collins K R, Eeri M. A reliability-based dual level seismic design procedure for building structures [J]. *Earthquake Spectra*, 1995, 11(3): 417—429.
- [2] Collins K R, Wen Y K, Han S W, Elwood K J. Dual-level designs of buildings under seismic load [J]. *Structural Safety*, 1996, 18(2-3): 195—224.
- [3] Collins K R, Wen Y K, Foutch D A. Dual-level seismic design: a reliability-based methodology [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1996, 25(12): 1433—1476.
- [4] Collins K R. Reliability-based seismic design procedures for buildings in the context of performance-based design [EB/OL]. <http://www-personal.engin.umich.edu/~kevinrc/reliability.html>, 1996.
- [5] Han S W, Wen Y K. Method of reliability in seismic design, I: Equivalent nonlinear systems [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1997, 123(3): 256—263.
- [6] Bertero R D, Bertero V V. Performance-based seismic engineering: The need for a reliable conceptual comprehensive approach [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, 31(3): 627—652.
- [7] Foschi R O, Li H, Zhang J. Reliability and performance-based design: a computational approach and applications [J]. *Structural Safety*, 2002, 24(2): 205—218.
- [8] 高小旺, 鲍蔼斌. 抗震设防标准及各类建筑物抗震设计中“小震”与“大震”的取值[J]. *地震工程与工程振动*, 1989, 9(1): 58—66.
Gao Xiaowang, Bao Aibin. Anti-seismic level and values of ‘moderate’ and ‘major’ earthquake for various types of building in aseismic design [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1989, 9(1): 58—66. (in Chinese)
- [9] GBJ68-84, 建筑结构设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
GBJ68-84, Uniform standards in building structure design [S]. Beijing: China Building Industry Press, 1983. (in Chinese)
- [10] 高小旺, 鲍蔼斌. 用概率方法确定抗震设防标准[J]. *建筑结构学报*, 1986, 7(2): 55—63.
Gao Xiaowang, Bao Aibin. Determination of anti-seismic level by probabilistic method [J]. *Journal of Building Structures*, 1986, 7(2): 55—63. (in Chinese)
- [11] 侯纲领. 结构可靠指标矢量、概率 Pushover 分析与体系可靠度[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
Hou Gangling. Structural reliability indicator vector, probability Pushover analysis and system reliability [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001. (in Chinese)
- [11] Wallace John W. Modelling issues for tall reinforced concrete core wall buildings [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2007, 16: 615—632.
- [12] 韩小雷, 季静, 何伟球. 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.
Han Xiaolei, Ji Jing, He Weiqiu. The seismic experiment research report of Guangzhou Garden Hotel west tower structure [R]. Guangzhou: South China University of Technology, Architecture Collage, 2006. (in Chinese)
- [13] 韩小雷, 陈学伟, 吴培烽. 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 Xiaolei, Chen Xuewei, Wu Peifeng. Research on the shear wall macro-element of OpenSEES [J]. *World Earthquake Engineering*, 2008, 24(4): 76—81. (in Chinese)

(上接第 116 页)