

# 考虑弯剪耦合作用的剪力墙宏观单元非线性有限元分析

吴梓楠<sup>1</sup>, 罗煜<sup>2</sup>, 贺锐波<sup>2</sup>

(1、华南理工大学土木与交通学院 广州 510640; 2、广东睿博建筑设计研究有限公司 广州 510640)

**摘 要:** SFI-MVLEM 单元和分层壳单元为两种典型的考虑弯剪耦合作用的剪力墙宏观单元。通过剪力墙构件及联肢剪力墙结构两个层次,探究 SFI-MVLEM 和分层壳单元的数值模拟效果,并通过敏感性分析,探究骨料剪切互锁系数、纵筋销栓作用系数及剪力传递系数对单元力学性能的影响。分析结果表明:对于剪力墙构件,SFI-MVLEM 与分层壳均具有较好的模拟效果,其中分层壳单元一定程度低估了构件的耗能能力;对于联肢剪力墙结构,分层壳可较好预测结构的承载力,SFI-MVLEM 则明显低估了承载力;SFI-MVLEM 单元的承载力随着骨料剪切互锁系数及纵筋销栓作用系数的增大而增大,单元剪切变形量及捏缩效应均随着骨料剪切互锁系数及纵筋销栓作用系数的增大而减小;分层壳单元的承载力随着剪力传递系数的增大而增大。

**关键词:** SFI-MVLEM; 分层壳; 骨料剪切互锁系数; 纵筋销栓作用系数; 剪力传递系数

**中国分类号:** TU313.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-4563(2019)01-015-05

## Nonlinear Finite Element Analysis of Shear Wall under Shear-Flexural Interaction

Wu Zinan<sup>1</sup>, Luo Yu<sup>2</sup>, He Ruibo<sup>2</sup>

(1、School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology Guangzhou 510640, China;  
2、Guangdong Reborn Architectural Design & Research Institute Co., Ltd. Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** SFI-MVLEM and multi-layer shell are two typical shear wall elements under shear-flexural interaction. The simulation effect of SFI-MVLEM and multi-layer shell is explored through the numerical analysis of wall components and coupled shear walls. Besides, the influences of shear friction coefficient, dowel stiffness parameter as well as shear retention factor on the mechanical properties of element are investigated by sensitivity analysis. The analysis results show that both SFI-MVLEM and multi-layer shell have good simulation results for shear wall components, although the multi-layer shell element underestimates the energy dissipation capacity slightly. For coupled shear wall, multi-layer shell can predict the bearing capacity better than SFI-MVLEM. In addition, the bearing capacity of SFI-MVLEM increases with the growth of the shear friction coefficient and dowel stiffness parameter, while the shear deformation and pinch effect have the opposite changing trend. The bearing capacity of the multi-layer shell increases with the rise of shear retention coefficient.

**Key words:** SFI-MVLEM; multi-layer shell; shear friction coefficient; dowel stiffness parameter; shear retention coefficient

## 0 引言

随着我国高层建筑的迅猛发展,高层建筑结构的抗震性能逐渐成为学术界和工程界关注的热点。高层建筑结构的主要受力构件为梁、柱和剪力墙。其中,梁、柱等杆系构件的力学性能可通过纤维单元来准确模拟,而剪力墙由于受力较为复杂,目前仍未有准确且广泛运用的非线性分析单元。

Kabeyasawa 等人<sup>[1]</sup>基于以一足尺 7 层框架-剪力墙结构的振动台试验提出了三竖向弹簧单元模型(TVLEM),该模型由两端暗柱的竖向弹簧、腹板剪力墙的竖向弹簧来考虑轴向变形,中部弯曲弹簧考虑弯曲变形,中部水平弹簧考虑剪切变形。TVLEM 可模拟剪力墙的非线性力学性能,但其模型参数特别是弯曲弹簧本构难以确定,且存在腹板和暗柱变形无法协调的问题。

为解决 TVLEM 参数定义困难和变形不协调的问

题,Vulcano<sup>[2]</sup>提出了多竖向弹簧单元模型(MVLEM),该模型由多条竖向弹簧来考虑剪力墙的压弯效应,并由中部水平弹簧来考虑构件的剪切变形。MVLEM 是目前应用最为广泛的剪力墙单元,但由于单元未考虑弯剪耦合作用(SFI),因此 MVLEM 无法准确反映小剪跨比构件的力学性能。

为考虑剪力墙单元的弯剪耦合作用,国内外学者进行了大量的研究:Massone<sup>[3]</sup>基于 Pang<sup>[4]</sup>提出的转角软化桁架模型(RASM)实现剪力墙的弯剪耦合分析,并通过 252 个试验结果验证了强度预测的准确性,但该单元仅局限于单调加载模式;Koložvari<sup>[6]</sup>采用 Orakcal<sup>[7]</sup>提出的修正固定支撑角模型(FSAM)开发了基于弯剪耦合作用下的多弹簧单元模型(SFI-MVLEM),该单元可考虑骨料间的剪切互锁效应和钢筋的销栓作用,并分别用摩擦本构和简单的线弹性模型来模拟单元在滞回状况下的力学性能。陆新征<sup>[8]</sup>基于 OpenSees 平台开发了分层壳单元,该单元基于复合材料力学原理,考虑了面内弯曲、面内剪切和面外弯曲之间的耦合,能较全面反映剪力墙的空间力学性能。

OpenSees 作为一款开源的有限元软件已经逐渐

**作者简介:** 吴梓楠(1994-),男,硕士研究生,主要从事结构抗震方面的研究。

**E-mail:** 536548246@qq.com

得到广大研究人员的关注,依靠其强大的非线性数值模拟功能、丰富的材料库与单元库、多种高效的算法、开放的程序构架及持续集成最新研究成果的先进理念,逐渐发展成为地震工程领域最具影响力的开放科研平台之一。本文将基于 OpenSees 平台,探究 SFI-MVLEM 单元和分层壳单元对剪力墙构件和联肢剪力墙结构的数值模拟效果,并探究骨料剪切互锁系数  $\mu$ 、纵筋销栓作用系数  $\alpha$  及剪力传递系数  $\beta$  对单元力学性能的影响。

## 1 剪力墙宏观单元

### 1.1 SFI-MVLEM

考虑弯剪耦合的多弹簧单元 (SFI-MVLEM) 由 Kolozvari<sup>[6]</sup>提出,该模型包括 3 个主要假定,分别为:平截面假定;截面内剪应变均匀分布;水平应力总和为零。如图 1 所示,SFI-MVLEM 单元把钢筋混凝土平面单元引入到宏观纤维模型中,更好的模拟了弯矩和剪力共同作用时剪力墙的受力特性。SFI-MVLEM 单元采用修正固定支撑角模型(FSAM<sup>[7]</sup>),该模型可考虑骨料的剪切互锁效应和纵筋的销栓作用,从而保证该单元能够更准确地模拟剪力墙复杂的非线性行为。

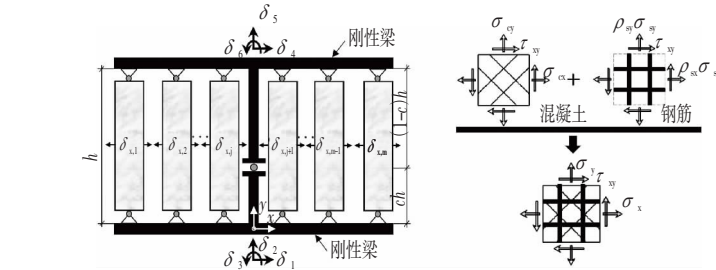


图 1 SFI-MVLEM 单元  
Fig.1 SFI-MVLEM Element

### 1.2 分层壳单元

分层壳单元基于复合材料力学原理,将一个壳单元沿厚度方向划分成若干层,各层可根据构件的实际尺寸和配筋情况赋予相应的材料和厚度,如图 2 所示。

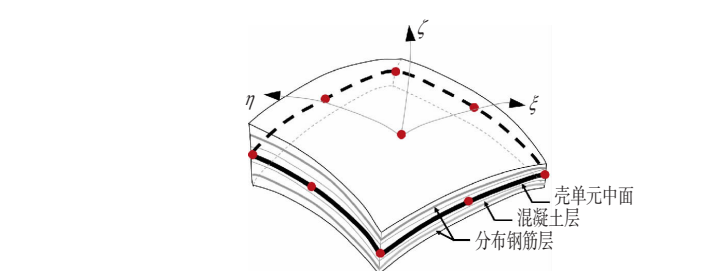


图 2 分层壳单元  
Fig.2 Multi-layer Shell Element

分层壳模型中部墙体配置的分布纵筋和箍筋采用弥散钢筋层模拟,钢筋层的厚度可根据单侧配筋率来进行计算;边缘约束构件内纵筋采用离散钢筋桁

架单元模拟,通过与壳单元共节点实现两者的变形协调共同工作。

单元分析时首先获得壳单元中心层的应变和曲率,根据各层材料之间满足平截面假定计算得到其它各层的应变,进而由各层材料本构方程得到各层积分点上的应力,最终通过数值积分得到壳单元的内力。分层壳单元考虑了面内弯曲、面内剪切、面外弯曲之间的耦合作用,能较全面的反映壳体结构的空力性能。

MITC4<sup>[9]</sup>是 OpenSees 中常用的分层壳单元,该单元为三维四节点单元,每个节点具有 5 个自由度(不含面外旋转自由度),因此需要额外增加过渡单元(如内嵌梁等)来与梁柱单元进行连接。

## 2 剪力墙构件的数值模拟

本文收集了国内外 3 个不同剪跨比的剪力墙构件<sup>[10-12]</sup>,构件参数及配筋情况分别如表 1 和表 2 所示。分析时分别利用 SFI-MVLEM 和分层壳单元来模拟剪力墙构件的受力特性,模拟时约束区混凝土采用修正的 Kent-Park 约束混凝土本构<sup>[13]</sup>,非约束区混凝土采用素混凝土本构,钢筋则采用双斜线本构来进行模拟。

表 1 剪力墙构件参数表							
Tab.1 Basic Parameters Information of Wall Components							
构件编号	截面尺寸 /mm×mm×mm	剪跨比	轴压比	混凝土强度 /MPa	纵筋强度 /MPa	箍筋强度 /MPa	
RW2 <sup>[10]</sup>	3659×1219×102	3	0.07	42.85	414	449	
RW-A15-P10-S78 <sup>[11]</sup>	1832×1221×153	1.5	0.1	55.82	476	403	
SW2-1 <sup>[12]</sup>	1000×1000×125	1	0.3	30.86	379	392	

表 2 剪力墙构件配筋情况						
Tab.2 Reinforcement Information of Wall Components						
构件编号	约束区长度 /mm	约束区配筋率 /%	约束区配箍率 /%	非约束区配筋率 /%	非约束区配箍率 /%	
RW2 <sup>[10]</sup>	191	2.90	0.50	0.30	0.30	
RW-A15-P10-S78 <sup>[11]</sup>	229	5.90	0.80	0.70	0.70	
SW2-1 <sup>[12]</sup>	200	1.90	0.90	0.40	0.40	

RW2、RW-A15-P10-S78 和 SW2-1 的模拟结果如图 3 所示。由图 3 可知,SFI-MVLEM 和分层壳单元均能极好的反应以弯曲破坏为主的剪力墙构件的力学性能;但对于以剪切破坏为主的剪力墙构件,分层壳单元一定程度低估了构件的耗能能力。

## 3 剪力墙结构的数值模拟

选取文献[14]中的联肢剪力墙 SW1 及文献[15]

中的联肢剪力墙 CW-2 作为分析对象,该模型几何参数如图 4 所示。

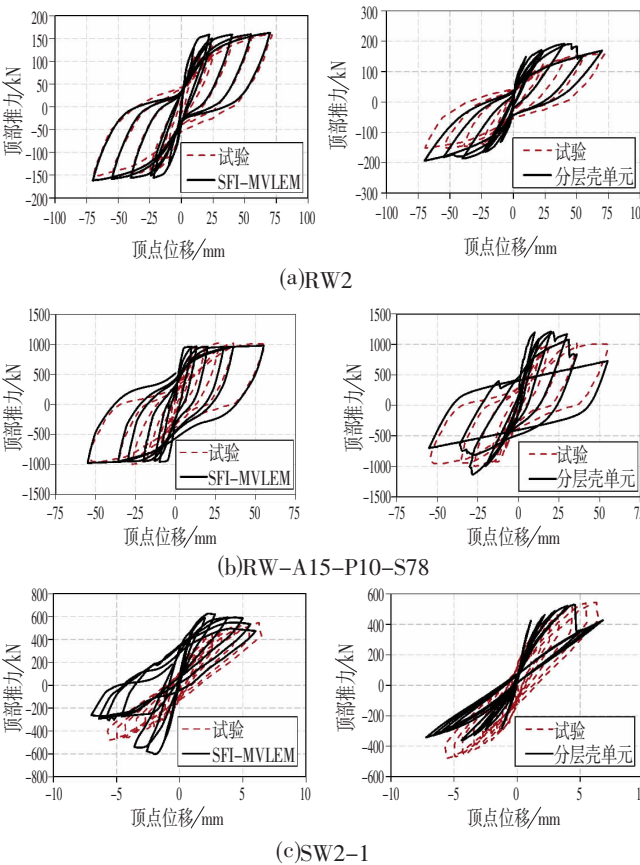


图 3 数值模拟结果

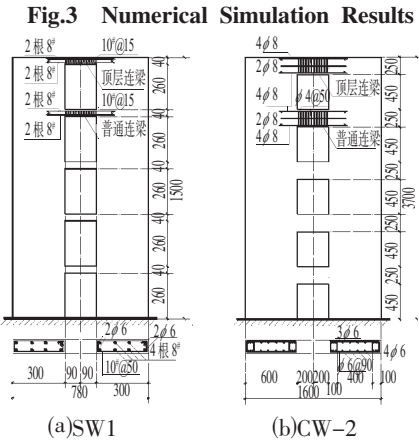


图 4 联肢剪力墙的几何尺寸及配筋情况

Fig.4 Geometry and Reinforcement Information of Coupled Shear Wall

联肢剪力墙 SW1 混凝土立方体抗压强度为 21.8 MPa,联肢剪力墙 CW-2 混凝土立方体抗压强度为 25.9 MPa,钢筋强度如表 3 所示。分析时利用位移

表 3 联肢剪力墙钢筋材料表

Tab.3 Steel Information of Coupled Shear Wall

模型	类别	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa
SW1	A6	263	367	1.88×10 <sup>5</sup>
	8#	305	408	1.94×10 <sup>5</sup>
CW2	A6	311.3	403	2.1×10 <sup>5</sup>
	A8	278.3	386	2.1×10 <sup>5</sup>

元纤维单元来模拟连梁的受力特性,剪力墙则分别利用 SFI-MVLEM 单元和分层壳单元来进行模拟。

为验证 OpenSees 几何模型建立的准确性,基于 NET 开发了 OpenSees 可视化程序 OSV,利用 OSV 将联肢剪力墙模型可视化,可视化结果如图 5 所示。其中,SFI-MVLEM 单元为两节点单元,因此需要利用刚性杆将剪力墙单元与连梁单元相连。

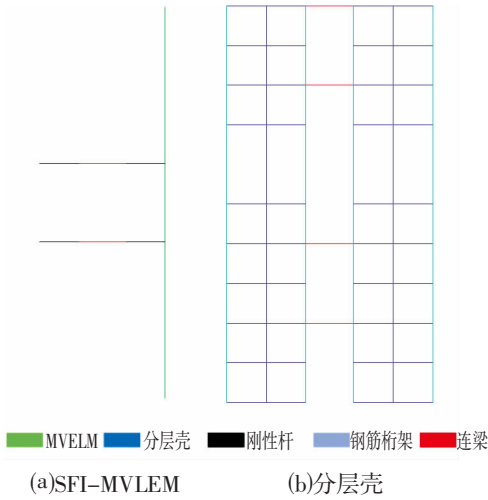


图 5 OSV 模型可视化结果

Fig.5 Visualization of Open Sees Models by OSV

模拟时剪力墙约束区混凝土采用修正的 Kent-Park 约束混凝土本构<sup>[13]</sup>,剪力墙非约束区混凝土及连梁混凝土采用素混凝土本构,所有钢筋均采用双斜线本构。SW1 和 CW-2 的模拟结果分别如图 6 所示。

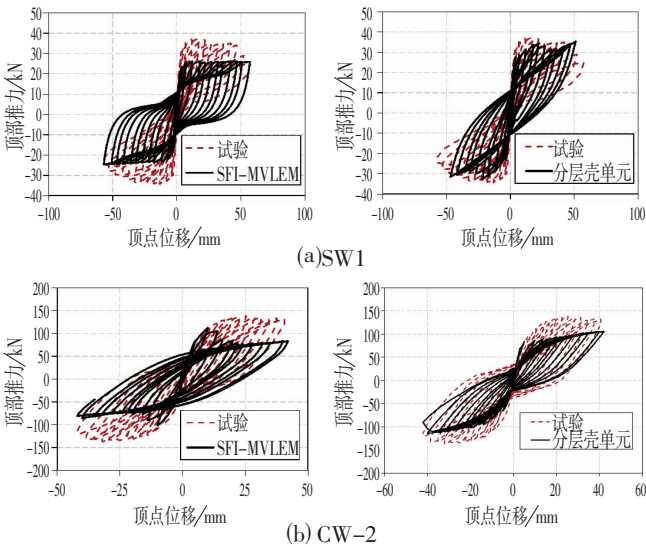


图 6 模拟结果

Fig.6 Simulation Result

由图 6 可知,分层壳单元可较好地预测联肢剪力墙的承载力,而 SFI-MVLEM 单元则明显低估了联肢剪力墙的承载力。

除此之外,在模拟的过程中可以发现,分层壳及 MVLEM 单元收敛性较好,而 SFI-MVLEM 单元收敛性较差,因此在进行结构层次的数值模拟时,宜选用分层壳单元进行模拟。



## 4 单元参数的敏感性分析

SFI-MVELM 及分层壳均含有其特有的单元参数。SFI-MVLEM 含有转心高度参数  $c$ , 该参数的相关研究<sup>[2,16]</sup>较多, 一般推荐取值为 0.4。SFI-MVLEM 单元采用修正固定支撑角模型(FSAM<sup>[7]</sup>), 因此具有两个特有参数: 骨料剪切互锁系数  $\mu$ 、纵筋销栓作用系数  $\alpha$ ; 分层壳单元由于采用平面材料, 因此在其混凝土材料中包含剪力传递系数  $\beta$ 。本小节将探究骨料剪切互锁系数  $\mu$ 、纵筋销栓作用系数  $\alpha$  及剪力传递系数  $\beta$  对单元力学性能的影响。

### 4.1 骨料剪切互锁系数 $\mu$

SFI-MVLEM 采用修正固定支撑角模型(FSAM<sup>[7]</sup>), 该模型采用简单的摩擦本构来描述骨料的剪切互锁(咬合)效应, 该本构模型的初始部分为线性区段, 取  $0.4E_c$  (0.4 倍混凝土弹性模量) 来代表混凝土的剪切模量  $G_c$ <sup>[6]</sup>。当裂缝张开(垂直于裂缝方向的正应力为拉应力)时剪应力为 0; 当裂缝闭合(垂直于裂缝方向的正应力为压应力)时, 剪应力存在且不大于系数  $\mu$  与正应力  $\sigma_c$  的乘积, 该模型剪应力包络曲线如图 7 所示(“ $\sigma_{\perp}$ ”表示正应力)。由图 7 可知, 骨料剪切互锁模型为理想弹塑性模型, 且不存在包辛格效应。

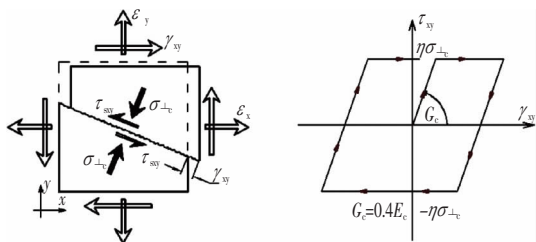


图 7 骨料剪切互锁模型

Fig.7 Shear Aggregate Interlock Model

SFI-MVELM 中的骨料剪切互锁系数  $\mu$  取值范围为 0~1.5, Orakcal<sup>[7]</sup> 根据模拟结果认为  $\mu$  取值为 0.2 时可保证较好的模拟效果。以表 1 中的构件 RW2 做为分析对象, 分别取  $\mu$  为 0、0.1、0.2, 探究骨料剪切互锁系数  $\mu$  对数值分析结果的影响。不同剪切互锁系数下构件的力位移曲线及端部单元的剪力-剪切变形分别如图 8 及图 9 所示。

由图 8 可知, 由于骨料剪切互锁系数  $\mu$  控制着混凝土的抗剪能力, 其抗剪能力随着系数  $\mu$  的增大而增大, 因此构件承载力随着骨料剪切互锁系数  $\mu$  的增大而增大。

由图 9 可知, 单元的剪切变形量随着骨料剪切互锁系数  $\mu$  的增大而减小。由于混凝土骨料剪切互锁模型的影响, 单元的捏缩效应随着骨料剪切互锁系数  $\mu$  的增大而减弱。

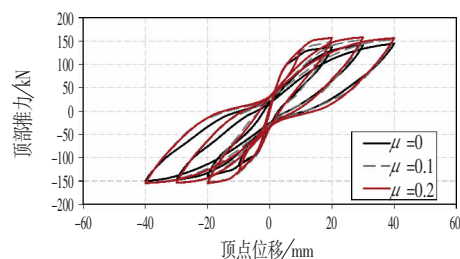


图 8 不同互锁系数下的构件力位移曲线

Fig.8 Force-displacement Curve with Different Shear Friction Coefficient

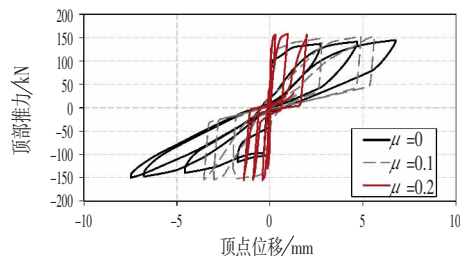


图 9 不同互锁系数下的端部单元剪切力学性能

Fig.9 Shear Mechanical Properties under Different Shear Friction Coefficient

### 4.2 销栓作用系数 $\alpha$

SFI-MVLEM 采用了弹性模量为  $\alpha E_s$  ( $\alpha$  倍钢筋弹性模量) 的线弹性钢筋销栓模型<sup>[6]</sup>, 以此来考虑纵向钢筋对构件抗剪能力的贡献。该模型如图 10 所示。

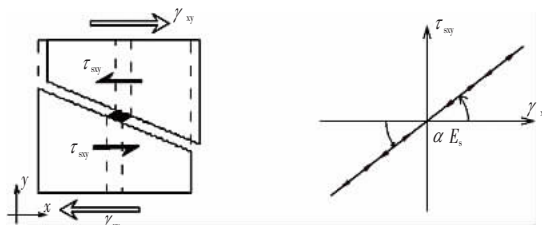


图 10 钢筋销栓模型

Fig.10 Dowel Action Model

SFI-MVELM 中的销栓作用系数  $\alpha$  取值范围为 0~0.05。以表 1 中的构件 RW2 做为分析对象, 分别取  $\alpha$  为 0、0.01、0.02, 探究销栓作用系数  $\alpha$  对数值分析结果的影响。不同销栓作用系数下构件的力位移曲线及端部单元的剪力-剪切变形分别如图 11、图 12 所示。

由图 11 可知, 由于销栓作用系数  $\alpha$  控制着纵筋的抗剪刚度, 其抗剪刚度随着系数  $\alpha$  的增大而增大, 因此在相同的水平位移下, 构件承载力随着销栓作用

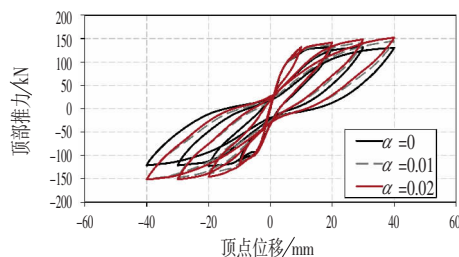


图 11 不同销栓系数下的构件力位移曲线

Fig.11 Force-displacement Curve with Different Dowel Action Model

系数  $\alpha$  的增大而增大。

由图 12 可知,单元的剪切变形量随着销栓作用系数  $\alpha$  的增大而减小。由于纵筋销栓作用模型的影响,单元的捏缩效应随着销栓作用系数  $\alpha$  的增大而减弱。

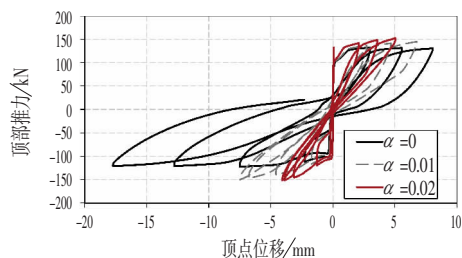


图 12 不同销栓系数下的端部单元剪切力学性能

Fig.12 Shear Mechanical Properties under Different Dowel Action Model

#### 4.3 剪力传递系数 $\beta$

分层壳单元由于采用平面材料,因此在其混凝土材料中包含剪力传递系数  $\beta$ 。剪力传递系数  $\beta$  用于考虑开裂对混凝土剪切模量的折减作用,取值范围在 0~1 之间。0 表示不传递剪力,即混凝土间的咬合作用完全丧失;1 表示剪力传递未损失,即开裂后混凝土剪切模量不发生改变<sup>[17]</sup>。

Huyse 和 Hemmaty<sup>[18]</sup>建议在分析混凝土结构时,剪力传递系数  $\beta$  取 0.05~0.25。Damian 和 Thomas<sup>[19]</sup>等认为剪力传递系数  $\beta$  的取值小于 0.2 时计算难以收敛,故建议取值宜大于 0.2。江见鲸<sup>[20]</sup>建议在取值时考虑梁高跨比的影响,如普通的钢筋混凝土梁  $\beta$  取 0.5,钢筋混凝土深梁取 0.25。

以表 1 中的构件 RW2 做为分析对象,分别取剪力传递系数  $\beta$  为 0.05、0.25、0.5,探究剪力传递系数  $\beta$  对数值分析结果的影响。不同剪力传递系数下构件的力位移曲线如图 13 所示。

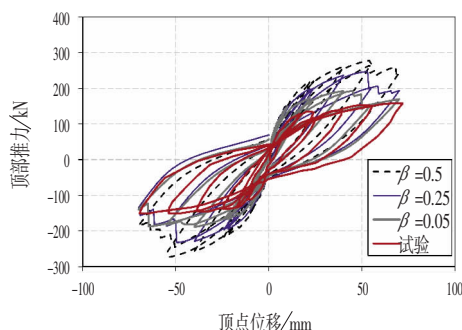


图 13 不同剪力传递系数下的构件力位移曲线

Fig.13 Force-displacement Curve with Shear Retention Factor

由图 13 可知,由于剪力传递系数  $\beta$  控制着混凝土开裂后的剪切模量,其剪切模量随着剪力传递系数  $\beta$  的增大而增大,因此在相同的水平位移下,构件承载力随着剪力传递系数  $\beta$  的增大而增大。

根据图 13 的分析结果可知,当剪力传递系数  $\beta$  取值较小时,分层壳的模拟结果与试验分析结果更为

接近。因此当采用分层壳进行剪力墙的数值模拟时,宜在保证分析收敛的前提下,尽量减小剪力传递系数  $\beta$  的取值。

## 5 结论

本文通过剪力墙构件及联肢剪力墙结构两个层次,探究 SFI-MVLEM 和分层壳单元的数值模拟效果,并通过敏感性分析,探究骨料剪切互锁系数  $\mu$ 、纵筋销栓作用系数  $\alpha$  及剪力传递系数  $\beta$  对单元力学性能的影响。本文得出以下结论:

对于剪力墙构件,SFI-MVLEM 及分层壳单元均具有较好的模拟效果,其中,分层壳单元一定程度低估了构件的耗能能力;对于联肢剪力墙结构,分层壳单元可较好的预测承载力,SFI-MVLEM 则明显低估了结构的承载力。因此,从模拟效果和收敛速率的角度出发,宜选用分层壳单元进行模拟。

SFI-MVLEM 单元的承载力随着骨料剪切互锁系数  $\mu$  及纵筋销栓作用系数  $\alpha$  的增大而增大;单元剪切变形量及捏缩效应均随着骨料剪切互锁系数  $\mu$  及纵筋销栓作用系数  $\alpha$  的增大而减小。

分层壳单元的承载力随着剪力传递系数  $\beta$  的增大而增大,当剪力传递系数  $\beta$  取值较小时,分层壳的模拟结果与试验分析结果更为接近。因此当采用分层壳进行剪力墙的数值模拟时,宜在保证分析收敛的前提下,尽量减小剪力传递系数  $\beta$  的取值。

## 参 考 文 献

- [1] Kabeyasawa T, Shiohara H, Otani S, et al. Analysis of the Full-Scale Seven-Storey Reinforced Concrete Test Structure [J]. Journal of the Faculty of Engineering, 1983, 37(2): 431-478.
- [2] Vulcano A, Bertero V V, Colotti V. Analytical Modeling of R/C Structural Walls: 9th World Conference on Earthquake Engineering [C]. Tokyo: University of Tokyo, 1988: 41-46.
- [3] Massone, Leonardo M. Strength Prediction of Squat Structural Walls via Calibration of a Shear-Flexure Interaction Model [J]. Engineering Structures, 2010, 32(4): 922-932.
- [4] Pang X D, Hsu T T C. Behavior of Reinforced Concrete Membrane Elements in Shear [J]. ACI Structural Journal, 1995, 92(6): 665-679.
- [5] Vecchio F J, Collins M P. The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear [J]. ACI Journal, 1986, 83(2): 219-231.

(下转第 58 页)

(1) 沈阳该高校办公楼水源热泵系统耗电量主要用于采暖期,水源热泵系统节能改造应优先考虑降低采暖期的能耗。

(2) 气象因素中,室外干球温度、降水量、相对湿度、日照时数与水源热泵系统耗电量之间均呈现负相关性。

(3) 室外干球温度、降水量对水源热泵系统耗电量的影响显著,在分析水源热泵系统能效时,应充分考虑室外干球温度、降水量两个因素的影响;而相对湿度、日照时数对水源热泵系统耗电量的影响不显著,在分析水源热泵系统能效时可忽略。

(4) 水源热泵系统监测平台中,提前预测系统供水温度及水量应考虑室外干球温度、降水量、相对湿度及日照时数4个因素,室外干球温度、降水量应作主要因素考虑。

### 参 考 文 献

- [1] 韩传璞. 开式地表水源热泵系统动态性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [2] 马勇. 地源热泵系统运行能效测评与能效影响因素的研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2013.
- [3] 张超. 影响湖水源热泵系统制冷供热能力若干因素的研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2012.
- [4] 彭亚美. 地下水热泵系统的模拟分析与运行优化研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
- [5] 王芳. 地下水热泵系统的实验与模拟研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003.
- [6] 高伟. 地表水水源热泵系统节能问题及适用性研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [7] 姜宝石. 水源热泵机组性能的模拟与实验[D]. 重庆:重庆大学,2011.
- [8] 陈晓. 地表水源热泵系统的运行特性与运行优化研究[D]. 长沙:湖南大学,2006.
- [9] 杨志伟,于瑾,李奎波,等. 基于 DeST-C 的通风对办公建筑能耗影响的模拟分析[J]. 江西理工大学学报,2015,36(5):67-73.
- [10] 于瑾,杨志伟,王程,等. 基于 DeST-C 的办公建筑能耗模拟分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(4):689-697.
- [6] Kolozvari K. Analytical Modeling of Cyclic Shear-Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls [D]. State of California:Department of Civil and Environmental Engineering,University of California,2013.
- [7] Orakcal K.,Massone L.M.,Ulugtekin D. Constitutive Modeling of Reinforced Concrete Panel Behavior Under Cyclic Loading;15th World Conference on Earthquake Engineering[C]. Lisbon,Portugal,2012.
- [8] Lu X,Xie L,Guan H,et al. A Shear Wall Element for Nonlinear Seismic Analysis of Super-tall Buildings Using OpenSees[J]. Finite Elements in Analysis and Design,2015,98:14-25.
- [9] Eduardo N,Dvorkin,Klaus-Jurgen Bathe. A Continuum Mechanics Based Four-Node Shell Element for General Non-Linear Analysis [J]. Engineering Computations,1984,1(1):77-88.
- [10] Thomsen J.H.,Wallace J.W. Displacement-Based Design of Reinforced Concrete Structural Walls;an Experimental Investigation of Walls With Rectangular and T-Shaped Cross-Sections [R]. No. CU/CEE-95/06,Department of Civil Engineering,Clarkson University,Potsdam,NY,1995.
- [11] Tran T.A. and Wallace J.W. Experimental Study of Non-linear Flexural and Shear Deformations of Reinforced Concrete Structural Walls;15th World Conference on Earthquake Engineering[C]. Lisbon,Portugal,2012.
- [12] 章红梅. 剪力墙结构基于性态的抗震设计方法研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [13] Scott H. D,Park R. Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rate[J]. Journal of the American Concrete Institute,1982,79(1):13-27.
- [14] 韩小雷. 带刚性连梁的双肢剪力墙及其结构控制性能的研究[D]. 广州:华南理工大学,1991.
- [15] 陈云涛,吕西林. 联肢剪力墙抗震性能研究 -- 试验和理论分析[J]. 建筑结构学报,2003(4):25-34.
- [16] Orakcal K, Wallace J W. Flexural Modeling of Reinforced Concrete Walls-Experimental Verification[J]. ACI Structural Journal,2006,103(2):196-206.
- [17] 左晓明,叶献国,杨启龙. 钢筋混凝土非线性有限元中剪力传递系数及其数值试验[J]. 建筑结构,2009,39(3):14-16+33.
- [18] Huyse L,Hemmaty Y,Vandewalle L. Finite Element Modeling of Fiber Reinforced Concrete Beams [C]. Proceeding of the ANSYS Conference,Vol.2. Pittsburgh,1994.
- [19] Damian K,Thomas M,Solomony. Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates[R]. Salem:Oregon Department of Transportation,2001.
- [20] 江见鲸,陆新征,叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

~~~~~  
(上接第19页)