

分层壳模型在剪力墙结构计算中的应用¹

门俊, 陆新征, 宋二祥, 陈肇元
(清华大学土木工程系, 北京, 100084)

摘要 钢筋混凝土剪力墙是高层建筑中的主要抗侧力构件, 要正确模拟高层建筑的破坏行为, 就必须提出能够准确模拟剪力墙构件破坏的力学模型。本文基于复合材料力学原理, 提出了适用于剪力墙结构倒塌破坏非线性分析的分层壳单元模型, 并与纤维模型结合, 对带暗柱剪力墙的面内剪切、面内弯曲和面外弯曲行为进行了模拟计算。与相应的试验及理论结果比较的结果表明, 本文模型计算结果在受力变形规律、承载力及刚度等方面均与试验和理论吻合较好, 验证了该计算模型的可靠性, 可以将其应用于防护工程、抗震工程中实际剪力墙结构的非线性计算分析。

关键词: 剪力墙; 分层壳模型; 纤维模型; 非线性分析; 倒塌

中图分类号: TU19

Application of Layered Model in Analysis of Shear Wall Structures

Men Jun, Lu Xinzheng, Song Erxiang, Chen Zhaoyuan
(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

引言

钢筋混凝土剪力墙是高层与超高层建筑中主要的抗侧力构件, 由于剪力墙构件与梁、柱等细长构件相比, 截面尺寸大, 受力变形行为相对比较复杂, 其非线性计算模型的研究一直是防护工程及抗震工程等领域中一个重要的研究课题。

现有的研究中提出的计算模型主要包括等效梁模型、等效桁架模型、多垂直杆元模型^[1]等。等效梁模型是将剪力墙等效为一根钢筋混凝土梁单元, 这对于模拟高宽比较大、整体弯曲效果显著的剪力墙来说较为合适, 但当考虑剪力墙的非线性反应, 包括塑性、开裂的行为时, 梁模型很难准确模拟剪力墙的面内剪切破坏, 故使用受到较大限制。等效桁架模型是用一个等效的桁架系统来模拟剪力墙, 其特点是可以计算由对角开裂引起的应力重分布, 但在进入非线性后, 如何确定斜向桁架的刚度和恢复力模型存在较大难度, 故其使用范围也比较有限。多垂直杆元模型是将剪力墙视为由上下两个刚臂夹着的一串水平和垂直弹簧, 弹簧的非线性行为满足经验公式或规范公式, 该模型物理概念清晰, 可以考虑中性轴的移动, 是目前使用最广的非线性剪力墙模型。但由于其水平弹簧距墙单元底部的距离难以准确确定, 故在实际应用中依然存在很多困难, 同时, 用经验公式来描述剪力墙的屈服后行为, 这对于破坏程度较轻的地震反应而言是可行的, 但是对于结构的严重破坏甚至倒塌分析而言, 则明显存在很多不足之处。

本文基于复合材料力学原理, 提出了基于通用有限元程序MSC MARC2003提供的分层壳单元开发的墙单元, 并结合清华大学开发的纤维模型计算程序THUFIBER^[2], 可以很好的模拟带暗柱剪力墙的面内剪切破坏、面内弯曲破坏及面外弯曲破坏等各种复杂非线性行为, 并能够同时考虑墙体面内和面外受力行为的耦合效果。

本项研究得到国家人防办的资助

门俊, 1982年5月出生, 男, 清华大学土木工程系结构工程专业硕士研究生在读, 目前研究课题为“核爆冲击波下高层建筑附建人防地下室的倾覆研究”

1 分层壳剪力墙单元

1.1 单元模型

分层壳剪力墙单元的基本原理如图1所示。即将一个壳单元划分成很多层，将剪力墙中的钢筋和混凝土都分布到各层中去。通过有限元计算，可以得到壳单元中心层的应变和曲率，然后，认为壳单元各层材料在厚度方向满足平截面假定，就可以由中心层应变和曲率得到各钢筋和混凝土层的应变，进而由材料本构方程可以得到相应的应力，积分得到整个壳单元的内力。该方法可以直接将混凝土、钢筋的本构行为和剪力墙单元的非线性行为联系起来，因而在描述实际复杂非线性行为方面有着明显的优势。本文在计算中采用了MSC MARC2003中提供的分层壳75号厚壳单元。该单元为双线形四节点壳单元，每个节点有六个自由度 ($u, v, w, \Phi_x, \Phi_y, \Phi_z$)，可以考虑横向剪切效应，用户可以自定义其分层数以及每一层的材料本构关系。

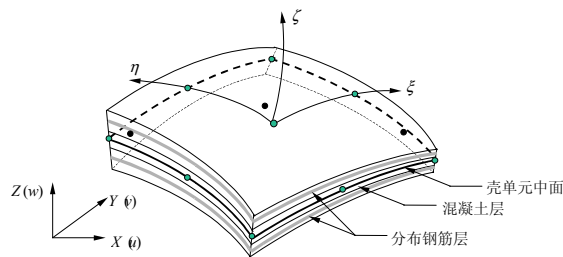


图1 分层壳单元

1.2 钢筋层本构模型

钢筋本构模型可以直接采用一般的弹塑性模型。对于纵横配筋率相同的墙体，通过设置一层各向同性的钢筋层即可同时模拟纵向钢筋与横向钢筋；对于纵横配筋率不同的墙体，可分别设置不同材料主轴方向的正交各向异性钢筋层，使其材料第一主轴方向刚度远大于其他方向刚度，来分别模拟纵向钢筋和横向钢筋，如图2所示。

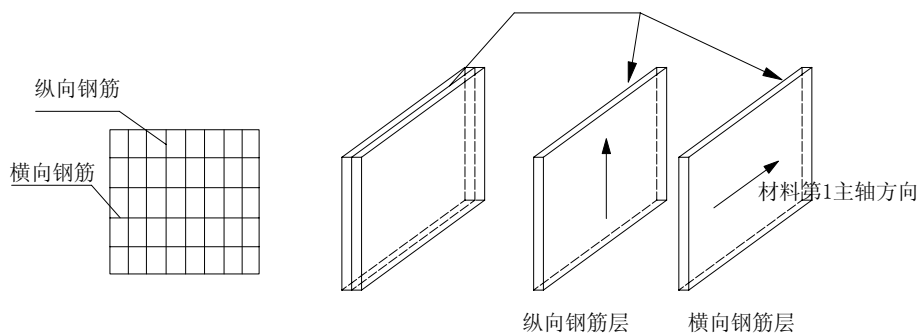


图2 钢筋层设置

1.3 混凝土层本构模型

混凝土受压行为采用基于Von Mises屈服准则的等向硬化弹塑性材料模型，该模型比较适于描述剪力墙中以平面受力为主的混凝土^[3]。混凝土初始屈服应力设定为 $1/3f_c$ ^[4]。混凝土的一维等效应力应变关系采用Rüsch建议的抛物线加水平段形式^[5]，混凝土的极限压碎应变为0.33%。达到压碎应变后，相应的混凝土积分点退出工作，混凝土的刚度和应力都降到零。

混凝土受拉行为为脆性断裂，采用固定裂缝模型^[3]。达到开裂应力后混凝土出现裂缝，垂直于裂缝方向的抗拉刚度和应力降为零。每个积分点上最多可以出现三条相互垂直的混凝土裂缝，用剪力传递系

数描述开裂后裂面混凝土的残余抗剪能力。

2 钢筋混凝土纤维模型 (THUFIBER)

剪力墙边缘暗柱采用清华大学土木系在MARC2003程序基础上开发的针对钢筋混凝土杆系结构的钢筋混凝土纤维模型 (THUFIBER)^[2]模拟。在THUFIBER中, 每个钢筋混凝土杆件截面被划分成36个混凝土纤维和4个钢筋纤维, 如图3所示。用户可以分别定义每个纤维的位置、截面积和本构关系。程序自动根据平截面假定得到每个纤维的应变, 并迭代计算确保截面应力平衡。THUFIBER提供的混凝土本构关系如图2所示, 其滞回关系为原点指向型。由于本文在研究分层壳模型与纤维模型模拟带暗柱剪力墙结构的力学行为时, 均为单向加载。此时, 混凝土骨架线决定其刚度和承载力, 卸载行为并不影响本文结果。故本文在进行有限元计算时, 为了简化计算模型, 提高计算收敛能力, 采用了原点指向型卸载曲线, 同时不考虑混凝土的抗拉强度。该程序可以较好的模拟钢筋混凝土柱在不同轴压条件下的弯矩曲率关系, 以及相应的软化行为^[2]。

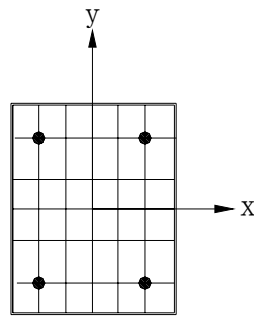


图3 柱截面纤维划分

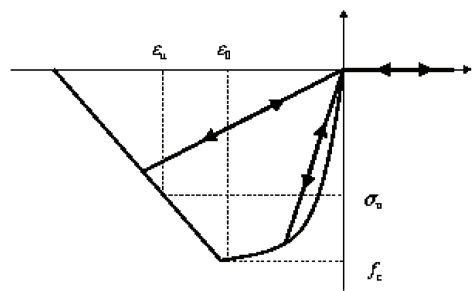


图4 纤维模型混凝土本构关系

3 计算模型及算例验证

剪力墙在面内方向高宽比一般不是很大, 属于二维受力构件, 故其面内受力既要考虑弯曲又要考虑剪切变形。而剪力墙在面外方向高厚比很大, 故不必考虑剪切变形, 只要考虑弯曲变形。因此, 本文采用分层壳墙单元和纤维柱单元对带暗柱剪力墙分别进行了面内剪切、面内弯曲和面外弯曲的计算分析, 并和相应的试验结果进行了比较。

3.1 面内剪切受力分析

对于高宽比不是很大的矮墙, 在侧向力作用下, 会有较大的面内剪切变形。如何准确模型剪力墙的剪切变形一直是剪力墙有限元分析的难点, 特别是当要考虑剪力墙的开裂、屈服、破坏等复杂非线性行为时, 目前各类剪力墙模型都有着较大的困难^[1]。而本文建议的分层壳墙模型则可以较好的分析剪力墙的面内剪切非线性行为。

以文献[6]所做剪力墙模型试验W1^[6]为例, 试件尺寸如图5, 墙肢及暗柱配筋如图6, 试件基本参数如表1和表2。

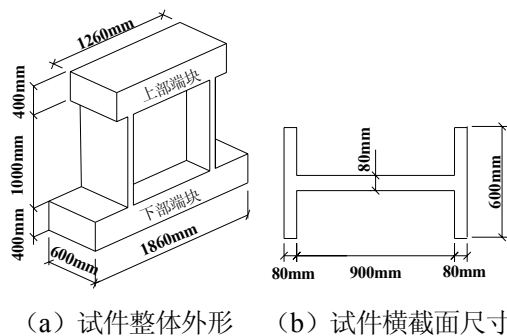


图5 试件外形及尺寸

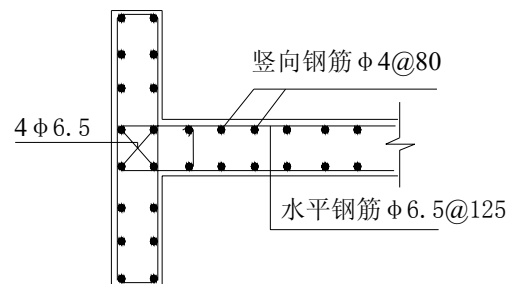


图6 墙肢及暗柱配筋

表1 试件基本参数 N/mm²

构件名称	轴压比	f_{cu}	f_c	f_t	翼缘配筋率/%		腹板配筋率/%	
					ρ_{fh}	ρ_{fv}	ρ_{wh}	ρ_{wv}
W-1	0.2	18.8	14.3	1.84	0.39	0.59	0.83	0.39

表2 钢筋实测力学指标 N/mm²

构件名称	钢筋类别	屈服强度	极限强度	弹性模量×10 ⁵
W-1	Φ6.5	271.0	451.0	1.86
	Φ4	341.0	485.5	1.62

计算模型中采用分层壳单元模拟墙体及翼缘，纤维模型模拟暗柱。墙体为四节点空间壳单元，暗柱为二节点空间梁单元，两种单元的节点都有六个自由度，在暗柱与墙连接处，两种单元节点上的六个自由度完全协调。模型底部加固端约束，得到有限元模型如图7。计算得到的结构骨架线与试验骨架线的比较如图8。从图中可以看到，计算结果与试验结果符合良好。由于计算时采用单调加载，而试验中是循环往复加载，故计算骨架线略微比试验骨架线偏高。

图9给出了计算得到的结构破坏时腹的开裂情况与试验结果的比较，图中用开裂应变云图标识裂缝宽度。计算过程中，模型在0.67倍屈服荷载下出现第1条大致沿45°方向的斜剪切裂缝，并在0.8倍屈服荷载下出现沿工字形墙肢底边的第1条正截面弯曲裂缝。在纵筋屈服后，随着水平位移的逐步增大，斜裂缝根数增多，加宽，细小裂缝增多。斜裂缝有从下角部向斜上方放射的趋势。最后由于腹板下角被斜裂缝分割的混凝土斜向压溃（角部主压应变达到设定压碎应变0.33%）而发生典型的剪压破坏，同一侧翼缘混凝土也被压碎。计算模型的破坏过程与试验结果一致，说明本模型可以很好的模拟墙体的面内剪切变形，准确计算剪力墙的面内剪切破坏行为。

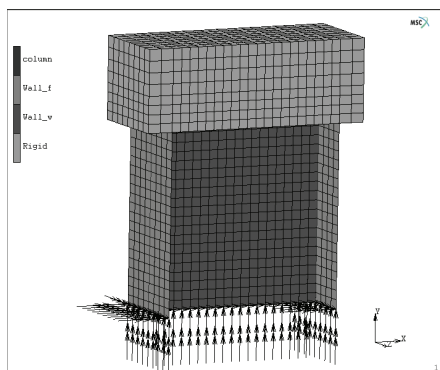


图7 计算模型

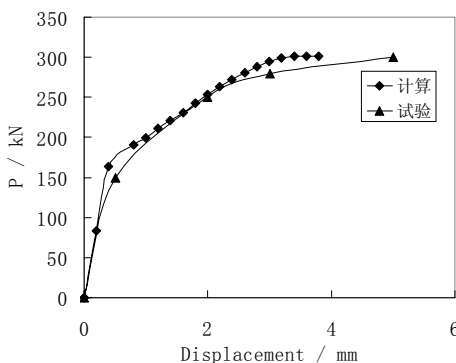
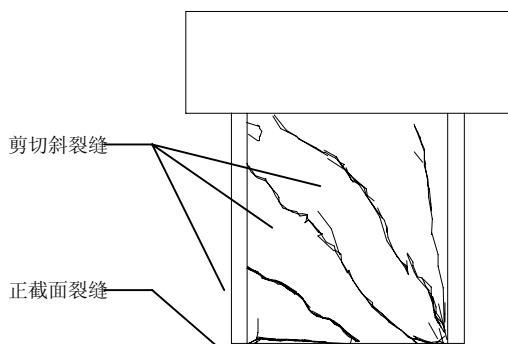
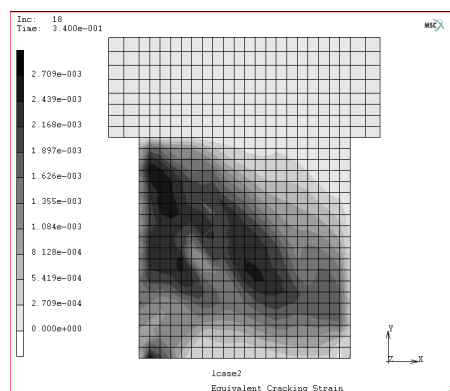


图8 结构荷载位移曲线



(a) 试验腹板破坏情况



(b) 腹板开裂应变云图

图9 结构开裂情况比较

3.2 面内弯曲受力分析

由于剪力墙在面内高宽方向的尺寸相差并不悬殊, 在发生面内弯曲变形时同样伴随较大的剪切变形, 利用平截面假定, 将其视为一维构件进行分析可能会带来较大的误差。而分层壳墙模型, 可以更准确地考虑面内弯曲变形和剪切变形的共同作用,

计算模型选取同济大学所做的比例尺为1/4的剪力墙模型试验^[7]。墙体试件厚60mm, 宽1000mm, 层高750mm, 总高4层。墙体带暗柱和翼缘, 纵向与横向配筋均为 $2\Phi 4@100$, 折合配筋率为0.418%。混凝土实测抗压强度 $f_c=15\text{MPa}$, 弹性模量 $E_c=1.67\times 10^4\text{MPa}$; 钢筋屈服强度 $f_y=452.9\text{MPa}$, 弹性模量 $E_s=1.875\times 10^5\text{MPa}$ 。试件尺寸及配筋详图参见文献[7]。试验中在结构顶部用千斤顶循环加载。取全结构进行模拟计算, 剪力墙墙体用分层壳墙单元模拟, 边缘暗柱与每层暗梁用纤维模型模拟。由于分层壳模型不能考虑钢筋和混凝土之间的粘结滑移现象, 可能会过高估计构件的刚度, 因此将钢筋的弹性模量做适当折减以考虑粘结滑移对构件刚度的影响^[8]。

计算得到的结构骨架线与试验骨架线的比较如图10。图11为计算得到的不同荷载下的结构水平变形曲线。由图中可以看到, 结构的变形以弯曲线为主, 最后的破坏是钢筋受拉屈服以及受压区混凝土压碎的弯曲破坏, 与试验结果相符, 且模型的计算骨架线与试验骨架线吻合良好, 说明本模型可以很好地模拟剪力墙的面内弯曲行为。

剪力墙边缘暗柱不仅对墙体本身起到约束的作用, 在结构发生弯曲行为时, 其对结构的整体抗弯能力还有一定贡献。图12为暗柱轴力随结构顶点位移的变化关系, 从图中可以看到, 在剪力墙发生面内弯曲的过程中, 两端暗柱一侧受拉, 一侧受压, 形成一个抗弯力偶。当结构位移发展到约10mm时, 受拉侧暗柱与受压侧暗柱钢筋均发生屈服, 此后随着位移继续发展受拉侧暗柱轴力保持不变, 受压侧暗柱的轴力略有提高。当结构位移达到38mm左右时, 受压柱混凝土压碎, 承载力开始下降, 这一过程与结构的整体受力变形规律是一致的。为分析暗柱对结构抗弯能力的贡献, 将两端暗柱的抗弯贡献与结构整体抵抗弯矩绘出如图13, 从图中可以看到在结构整体抗弯能力中, 暗柱的贡献达到了50%以上。为验证有限元计算结果, 我们运用经验公式^[9]对暗柱及墙肢的抵抗弯矩进行了计算。计算结果发现, 由于本模型端部集中配筋较强, 暗柱对结构整体抗弯能力的贡献大约达到了60%, 与有限元计算结果相吻合。

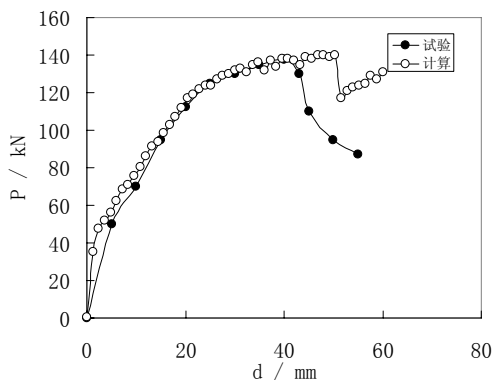


图10 计算骨架线与试验骨架线比较

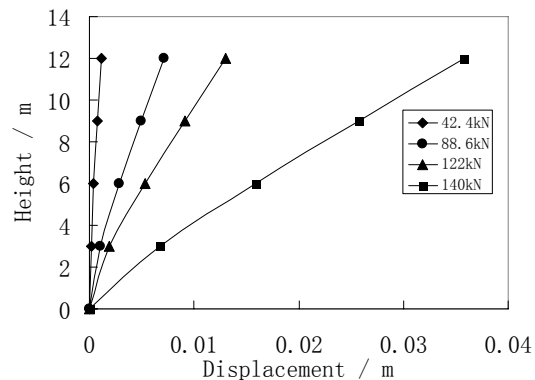


图11 不同荷载下结构沿高度水平位移

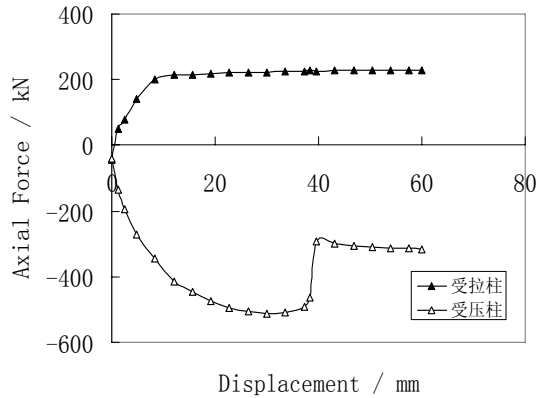


图12 暗柱轴力位移关系曲线

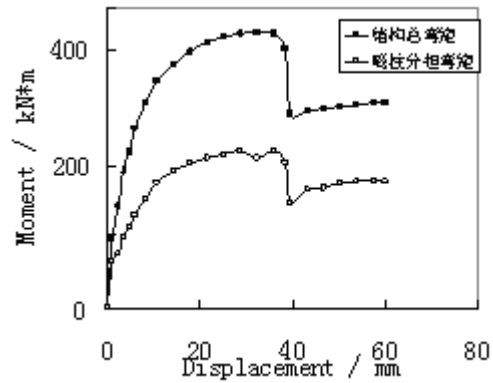


图13 结构弯矩位移关系曲线

3.3 面外弯曲受力分析

剪力墙发生面外弯曲时,由于墙体的厚度与其高度相比很小,其行为与一维梁构件的弯曲行为相近。

计算模型仍参考文献[7],取其翼缘剪力墙做面外弯曲计算分析。建立有限元计算模型如图14,墙底部加固端约束,顶部加轴向压力以及面外的侧向力以研究其在不同轴压下的面外弯曲行为。

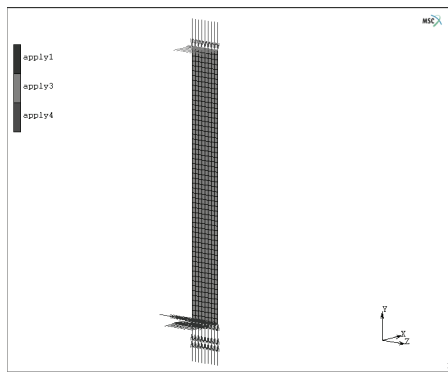


图 14 面外弯曲计算模型

计算得到的不同轴压下墙体的荷载位移曲线如图 15。从图中可以看到随着轴压的提高,墙体的开裂荷载逐渐增加。屈服荷载随着轴压的提高而增加,在轴压为 8MPa 左右达到峰值,然后开始降低。轴压为 0 的纯弯状态下计算得到的开裂弯矩为 719N·m,屈服弯矩为 1010N·m。而按理论公式^[9]计算得到的开裂弯矩值为 700N·m,屈服弯矩值为 1000N·m,可见分层壳模型计算结果与理论值非常接近。图 16 为根据相应工况绘出的弯矩—轴力相关性曲线。可以看到计算结果与理论关系吻合得很好,说明本模型可以准确模拟剪力墙的面外弯曲行为。

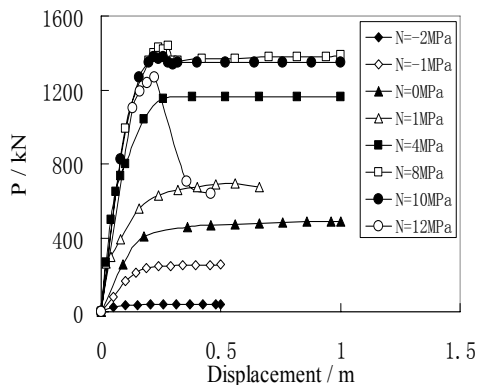


图 15 不同轴压下结构荷载位移曲线

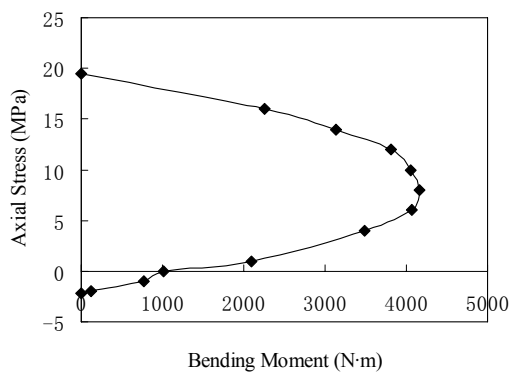


图 16 M-N 关系曲线

4 结论

本文基于复合材料力学原理, 提出了适用于剪力墙结构倒塌破坏非线性分析的分层壳墙单元模型, 与纤维模型结合, 可以很好地模拟带暗柱剪力墙的面内剪切、面内弯曲和面外弯曲行为, 计算结果与试验结果以及理论结果进行比较具有吻合较好, 说明分层壳墙单元计算模型是正确有效的, 并且在模拟剪力墙结构非线性行为时可以同时考虑面内与面外的耦合效果, 因此可以应用于地震工程及防护工程等领域中大型剪力墙结构的非线性计算分析。

致谢: 在本文完成过程中, 得到清华大学土木工程系刘华北博士, 张正威同学、蔡钦佩同学的指导与帮助, 特此感谢!

[参考文献]

- [1] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析. 第一版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] 陆新征, 缪志伟, 江见鲸, 叶列平. 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟, 山西地震, 126(2), 2006, 7-11.
- [3] 陆新征, 江见鲸. 考虑不同破坏模式的二维混凝土本构模型. 土木工程学报, 2003. 36(11): 70-74.
- [4] Lu XZ., Ye LP, Teng JG, Jiang JJ. Meso-scale finite element model for FRP sheets/ plates bonded to concrete. Engineering Structures. 2005. 27(4): 564- 575.
- [5] 天津大学, 同济大学, 东南大学主编. 混凝土结构. 第二版. 中国建筑工业出版社, 1998.
- [6] 傅剑平, 吴雁江, 皮天祥, 白绍良. 工字形截面延性剪力墙肢抗震抗剪性能试验. 重庆大学学报(自然科学版), v27, n12, 2004.
- [7] 姬守中, 高层钢筋混凝土框-剪结构在地震作用下的弹塑性时程反应分析. 同济大学博士论文, 2002.
- [8] 黄羽立, 叶列平, 碳纤维布受弯加固 RC 梁粘结性能的非线性有限元分析, 工程力学. 2003. 21 (2) : 54-61.
- [9] 方鄂华, 钱稼茹, 叶列平. 高层建筑结构设计. 第二版. 中国建筑工业出版社, 2003.