

# ANSYS 在砌体结构非线性有限元分析中的应用研究\*

李英民, 韩军, 刘立平

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**在采用 ANSYS 进行砌体结构非线性有限元分析时,目前还缺乏可以借鉴的普遍性研究结论。论文根据程序特点和研究问题的本质,探讨了 ANSYS 应用于砌体有限元分析时模型建立、材料本构、破坏准则、迭代算法、收敛准则、预应力的模拟等问题,以典型试验结果为基础,通过算例分析探讨了其适用性,并提出了相关建议。

**关键词:**ANSYS; 有限元分析; 砌体结构; 非线性

**中图分类号:**TU365 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)05-0090-07

## Application of ANSYS to Finite Element Analysis for Nonlinear Masonry Structures

LI Ying-min, HAN Jun, LIU Li-ping

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** ANSYS has become an effective tool for finite element analysis of masonry structure, but there is few common conclusions for reference. According to the characteristics of ANSYS and the essence of the analysis, some key problems in finite element analysis of masonry structure with ANSYS, such as structural modelling, material constitution, the damage criterion, iterative algorithm, convergence criterion, simulation of prestressing force and so on, are discussed in this paper. Based on the test results of typical masonry structures, the applicability of ANSYS to masonry structural analysis is studied and some suggestions for the application of ANSYS are presented.

**Keywords:** ANSYS; finite element analysis; masonry structure; nonlinear

现代砌体结构正向高层、抗震方向发展。为了适应这种发展需要,应加快对现代砌体结构理论的研究。毋庸置疑,有限元分析已经成为研究的重要途径之一。近年来随着一些大型有限元分析软件的开发应用,砌体结构的有限元分析得到越来越广泛的重视,不少研究者开展了用 ANSYS 进行砌体结构有限元分析的研究,获得了一些有益的成果<sup>[1~5]</sup>。综观这些研究可以发现,由于砌体结构非线性有限元模拟的复杂性,目前在模型选取、材料本构、参数确定、迭代算法、收敛准则等有限元分析的关键问题方面尚未总结出一般性的规律和结论可供参考。为此,对 ANSYS 应用于砌体结构非线性有限元分析的适用性展开研究,讨论上述问题,并结合算例分析给出相应建议,供相关研究参考。

### 1 砌体结构有限元模型

砌体是由砌块和砂浆组成的二相复合材料,对其

进行有限元分析常有两类模型:分离模型和整体连续体模型。分离模型即是把砌块和砂浆分别建模,可采用两种处理方式:一种是不考虑砖与砂浆之间的粘结滑移,将砌块与砂浆接触面的所有节点自由度耦合在一起;另一种是考虑砖与砂浆之间的粘结滑移,将砌块与砂浆通过接触单元或非线性弹簧单元联系在一起。由于砖与砂浆之间的粘结滑移关系曲线目前研究尚不成熟,接触面的水平粘附强度常常难以得到,目前使用前一种方式的较多且较易实现。整体连续体模型即是把砂浆和砌块作为一个整体来考虑,连续体单元的材料参数可通过以下三种方式获得:一是试验实测;二是按规范取值,规范无规定时则根据现有的砌体本构关系和材料性质的有关研究选用;三是根据由复合材料力学发展起来的均质化理论,将所有组成材料的几何和本构信息融入到一个代表性体积单元(RVE)中,按计算确定 RVE 的等效材料属性<sup>[1,6]</sup>。前两种均以试验为基础,较符合实际,且容易获得,应用方便;第三种计

\* 收稿日期:2006-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50008017)

作者简介:李英民(1968-),男,山东人,博士,教授,主要从事结构抗震研究。

算 RVE 等效材料参数的过程相当繁琐<sup>[1]</sup>,且需已知砌块和砂浆的力学参数,其推广应用受到了限制。

总体来说,分离模型可以模拟砌块与砂浆之间的作用和砌体破坏机理,适用于模拟小型试验砌体的破坏行为,但计算量大,建模繁琐;整体连续体模型适于分析大规模的墙体,但对于详细的应力分析和理解砌体多样的失效机理却显得不足。采用哪种模型一般应视分析目的而定。

对于砌体组合结构,其中还包含有钢筋混凝土构件,其有限元模型可采用分离钢筋模式和整体分布钢筋模式<sup>[7]</sup>。前者可考虑粘结滑移。

ANSYS 分析时,砌体分离模型的砌块和砂浆可用三维实体单元 SOLID45 或 SOLID65 模拟,二者具有处理塑性、徐变、膨胀、应力刚化、大变形和大应变的能力,SOLID65 还可以模拟开裂和压碎以及可以考虑三个方向的配筋;接触单元可采用 CONTACT174 等;非线性弹簧单元可用 COMBIN39 等。砌体整体连续体模型可用 SOLID45 或 SOLID65,也可用三维实体壳单元 SHELL63 模拟。钢筋混凝土分离钢筋模式可用 SOLID65 + LINK8 单元,整体分布钢筋模式可用带配筋的 SOLID65 单元。

## 2 材料本构关系及破坏准则

砌体是一种非均质的、各向异性材料,砌缝是其薄弱环节,对其本构关系及破坏准则进行研究非常困难。国内外已开展的大量研究中大多限于基于试验结果的平面受力砌体破坏准则研究,至今仍没有一个被广泛认可的砌体应力应变关系及其破坏准则<sup>[12]</sup>。进行非线性有限元分析,合理选取材料的弹塑性本构关系是至关重要的,这正是进行砌体结构非线性有限元分析的难题。目前 ANSYS 尚没有能够反映砌体受砌缝影响的复杂的剪压破坏模型,只有参照类似材料的常用破坏准则,通过参数的适当选取来最大限度地模拟砌体的破坏。

弹塑性本构关系通常由三部分组成:初始屈服准则、流动法则和强化规律。初始屈服准则定义了多轴应力状态下的弹性极限<sup>[8]</sup>。砌体、混凝土和岩石等材料为颗粒状,受压强度远大于受拉强度,且屈服应力受静水应力影响明显。砌体材料的屈服准则可以考虑使用岩土工程中广泛使用的 Drucker - Prager (DP) 准则或 ANSYS 专门为钢筋混凝土单元 SOLID65 开发的 CONCRETE 材料破坏准则。

DP 屈服准则是修正的 Von Mises 准则,用以逼近 Mohr - Coulomb 准则,如图 1 所示。DP 准则假设材料为理想弹塑性,无强化规律;流动法则可以使用相关流

动法则,也可以使用不相关流动法则。需输入的三个参数即粘聚力  $C$ 、内摩擦角  $\varphi$  和膨胀角  $\varphi_f$ ,一般由试验确定或根据经验选取。对于砌块、砂浆和砌体而言, $C$ 、 $\varphi$  值的选取目前还没有相关的试验资料和经验取值,但可以根据其与材料的单轴受拉屈服应力  $\sigma_t$  和受压屈服应力  $\sigma_c$  之间的关系来确定<sup>[7]</sup>:

$$\varphi = \sin^{-1} \left[ \frac{3\sqrt{3}\beta}{2 + \sqrt{3}\beta} \right], \beta = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sqrt{3}(\sigma_c + \sigma_t)} \quad (1)$$

$$C = \frac{\sigma_t \sqrt{3}(3 - \sin\varphi)}{6\cos\varphi}, \quad \sigma_y = \frac{2\sigma_c \sigma_t}{\sqrt{3}(\sigma_c + \sigma_t)} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_t$  和  $\sigma_c$  可以取试验实测值或根据其强度等级按规范选取。

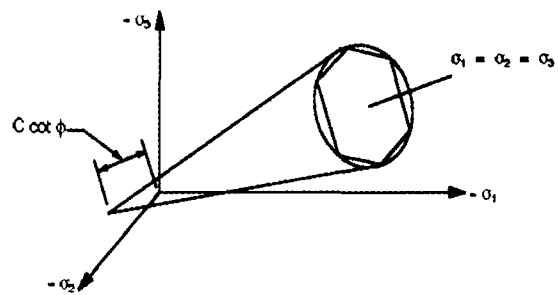


图1 Drucker - Prager 和 Mohr - Coulomb 屈服面

破坏面是加工强化区域的极限<sup>[8]</sup>,由于理想弹塑性假定,DP 材料的破坏面同屈服面。

采用 CONCRETE 材料时,可结合多线性随动强化模型 (MKIN) 来定义砌体的单轴应力应变曲线<sup>[9]</sup>; CONCRETE 材料属性表用于确定材料的强度准则,受拉失效由最大拉应力准则确定,三向受压时采用 William - Warnke 五参数失效准则,屈服面由  $f_t$ 、 $f_c$ 、 $f_{cb}$ 、 $f_1$  和  $f_2$  等 5 个参数表述;破坏面最少输入  $f_t$  和  $f_c$  这 2 个参数确定  $f_{cb}$ 、 $f_1$  和  $f_2$  等 3 个参数可取默认值,此时应力状态应满足  $|\sigma_h| \leq \sqrt{3}f_c$ ,  $\sigma_h = 1/3(\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp})$ ,  $\sigma_{xp}$ 、 $\sigma_{yp}$ 、 $\sigma_{zp}$  代表主应力,否则在高静水压力下五个失效参数都必须指定<sup>[10]</sup>。CONCRETE 属性表中还有 3 个参数用来反映材料开裂后的状态:裂缝张开时剪力传递系数,一般可取 0.3 ~ 0.5<sup>[11]</sup>;裂缝闭合时剪力传递系数,可取 0.9 ~ 1.0;拉应力释放量乘子  $T_c$ ,可取 0.6。单元开裂后垂直于开裂方向的拉应力可缓慢释放,有助于数值计算的收敛,如图 2 所示。采用 MKIN 非线性材料需输入砌体的单轴受压应力应变曲线,文献 [13] 列出了很多表达形式不一的砌体单轴受压应力应变曲线,指出各类应力 - 应变曲线的上升段相差很小,下降段相差较大;各类砖砌体的极限应变与峰值应变之比  $\varepsilon_u/\varepsilon_0$  均为 1.6 左右, $\varepsilon_0$  可按实测值或取  $\varepsilon_0 = 0.003$ ;综合各种应力 - 应变曲线,提出了以下砖砌体应力应变曲线:

$$\frac{\sigma}{f_m} = 1.96\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) - 0.96\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2 \quad 0 \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \leq 1 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma}{f_m} = 1.2 - 0.2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad 1 \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \leq 1.6 \quad (4)$$

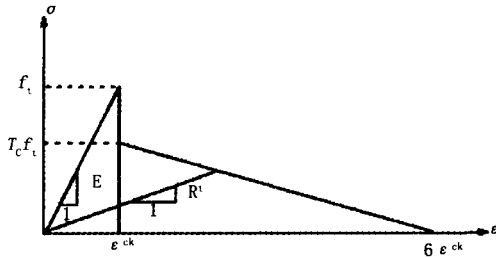


图2 开裂前后的受拉本构处理

砖和砂浆的应力应变曲线已有研究较少。同济大学得出的烧结普通砖和砂浆的受压应力应变曲线表明<sup>[14]</sup>, 砖表现为比较明显的脆性, 峰值应变  $\varepsilon_0$  和极限应变  $\varepsilon_u$  都较小, 砖的强度在 15 ~ 20 MPa 变化时,  $\varepsilon_0$  约为 0.001 ~ 0.0015,  $\varepsilon_u$  约为 0.0011 ~ 0.0023, 弹性模量约为  $1.3 \times 10^4$  MPa; 砂浆表现出一定的弹塑性,  $\varepsilon_u/\varepsilon_0$  较大, 极限应变  $\varepsilon_u$  是砖的 1.5 ~ 5 倍,  $\varepsilon_0$  约为 0.0014 ~ 0.0021,  $\varepsilon_u$  在 0.003 以上, 当砂浆的棱柱体抗压强度在 1.3 ~ 6 MPa 间时, 对应于 40% 极限强度处的割线弹性模量在  $0.28 \times 10^4 \sim 0.41 \times 10^4$  MPa。具体参数尚应根据砖和砂浆的强度等级选用。

### 3 迭代算法

非线性问题的解答最终可归结为非线性方程组的求解。纯粹的增量法不可避免地要随着每步荷载增量产生累积误差, ANSYS 提供的牛顿 - 拉普森 (NR) 法 (增量迭代法) 通过令每一步荷载增量的末端解达到平衡收敛 (在某个容限范围内) 来消除累积误差。可通过 NR 选项来控制修改刚度矩阵的频率: 完全 NR 法每次迭代都修改刚度矩阵; 修正 NR 法每级增量末修改一次刚度矩阵; 初始刚度法一直使用初始刚度矩阵, 不进行修正。完全 NR 法为平方收敛, 收敛速度快, 但计算工作量大, 较容易发散; 初始刚度法线性收敛, 迭代次数多; 修正 NR 法处于两者之间。对于砖砌体材料非线性分析可选用修正 NR 法。

当结构开裂压碎较多或塑性发展比较充分接近极限荷载时, 刚度矩阵可能变为降秩矩阵产生奇异, 导致严重的收敛问题, 计算不出负刚度下降段。收敛问题是结构非线性分析的又一难题。ANSYS 提供了一种弧长迭代法<sup>[15]</sup>, 它使得 NR 平衡迭代沿着一段弧线迭代, 可避免切线刚度接近 0 或为负值时计算发散, 理论上可求出下降段。为此, 需设置初始弧长半径及最小、最大乘数。初始弧长半径通过设置子步数 NSUBST 确

定为  $F/NSUBST$ ,  $F$  为总荷载, NSUBST 一般不宜小于 10, 最小、最大乘数可根据计算效果调整。ANSYS 中弧长法不适用于求解接触问题及理想弹塑性问题, 对于砌体、混凝土等材料非线性问题是否适用值得研究。

### 4 收敛准则

适当的收敛准则对于增量迭代求解是否有效至关重要。在增量迭代求解过程中每级增量结束时应控制解收敛到允许的误差范围内。收敛误差太大将影响解的精度, 太小将耗费机时, 且难收敛。ANSYS 提供了多种收敛准则, 可以把收敛检查建立在力、位移或其组合上, 且可以设置不同的收敛容限值。文献 [10] 指出, 单独使用位移收敛检查可能导致出错, 出现迭代早熟 (伪收敛), 应尽可能使用以力为基础的收敛准则。建议一般力加载时选用残余力的二范数控制收敛, 对于工程问题收敛误差可取的稍大些, 但一般不宜大于 5%。

非线性求解时需采取一些措施来加强收敛性。首先, 要控制单元网格划分的大小和形状, 一般尽量采用规则六面体单元, 避免使用四面体单元, 当不可避免时可将体与体交接部分单独切开划分四面体单元, 在四面体和六面体之间使用过渡单元连接。单元大小应适当, 过大精度不够, 太小易引起应力集中产生破坏, 一般不宜小于 5 cm。其次, 应设置适当的子步数, 设置一个最小和最大时间步长, 一般在计算时需不断调整时间步长。最后, 可以激活分析选项中的自适应下降、线性搜索、自动荷载步 (自动时间步长) 和二分法等功能来加强收敛。下文算例均采取了加强收敛措施。

### 5 预应力的模拟

现代砌体结构向高层方向发展, 出现了多种新的组合砌体结构, 其中集中配筋预应力砌体是有发展前景的砌体结构之一<sup>[16]</sup>。它是将预应力钢筋集中配置在构造柱中, 通过与之相连圈梁的弹性地基梁作用产生对砌体的预压应力。分析时预应力可通过三种方式模拟: 等效荷载法、降温法和初始应变法。等效荷载法将混凝土和力筋不作为一个整体考虑, 以荷载的形式取代预应力钢筋的作用, 这种方法建模简单, 但不能模拟力筋位置对整体结构的影响, 没有考虑力筋对混凝土的作用分布和方向, 不能模拟张拉过程, 也不能模拟应力损失引起的力筋各处应力不等的影。降温法和初始应变法是将混凝土和力筋作为一个整体考虑, 用 LINK 单元模拟力筋, 初始应变法通过施加初始应变来产生预应力, 但过程较复杂; 降温法实现较为简单, 只需在力筋上施加温度荷载作为一个荷载步, 其中为实

际需预施加的力,为钢筋弹性模量,为钢筋面积,为钢筋的线胀系数。作者曾用降温法成功模拟一工字形预应力混凝土梁。文献[17]也用降温法成功地模拟了后张法预应力混凝土箱型梁。建议模拟预应力砌体时采用降温法模拟预应力。

## 6 实例分析

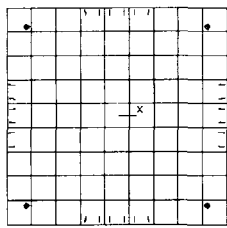
上文讨论了砌体有限元分析的若干问题,下文通过一些算例进行分析验证。

### 6.1 关于有限元模型、迭代算法和收敛准则算例——砖柱

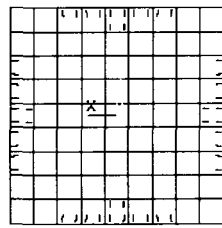
设计一砖柱,截面为  $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ ,高  $1.2\text{ m}$ ,砖和砂浆材料强度实测值为砖  $f_{1m} = 18\text{ N/mm}^2$ ,砂浆  $f_{2m} = 6.56\text{ N/mm}^2$ ,柱顶作用轴向均布面荷载,砌体极限

表1 砖柱计算结果

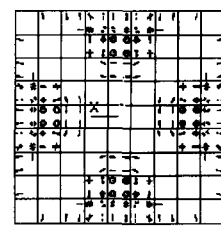
模型	迭代方法	压碎项	极限荷载/MPa
1	NR法	打开	5.71
2	弧长法	打开	4.93
3	NR法	关闭	8.40
4	弧长法	关闭	7.59



a) NR法,压碎项打开 ( $F = 5.71\text{ MPa}$ )



b) 弧长法,压碎项打开 ( $F = 4.93\text{ MPa}$ )



c) 弧长法,压碎项打开 ( $F = 3.64\text{ MPa}$ )

图4 NR法和弧长法计算裂缝(压碎)图

图5给出了该砖柱按不同收敛准则计算得的力-柱顶位移关系。显然,单独使用位移收敛准则计算所得极限承载力与实际相差较远,结果不可靠。建议求解时采用力收敛准则或以力收敛为主、位移收敛为辅。

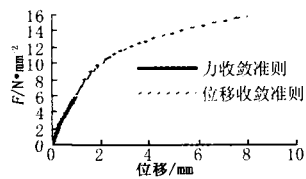


图5 不同收敛准则计算所得柱顶竖向位移

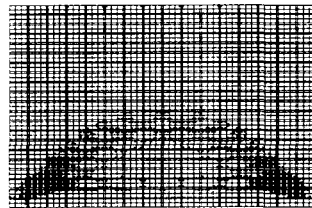


图6 分离式墙片裂缝图

为了验证整体模型和分离模型,用上述砖和砂浆参数建立分离式墙片(宽  $2.0\text{ m} \times$  高  $1.3\text{ m} \times$  厚  $0.12\text{ m}$ )进行分析。砖与砂浆采用 SOLID65 单元,材料模式采用 MKIN + CONCRETE,砖与砂浆之间不考虑粘结滑移。结果显示,计算极限荷载及破坏裂缝模式(图6)与试验相符。这表明采用分离式建模、MKIN +

承载力为  $7.56\text{ MPa}$ 。为避免约束和加力点处应力集中导致计算发散,在上下各加一弹性柱段,在顶面施加荷载,若考虑环箍效应,中间柱段承载力应稍大于  $7.56\text{ MPa}$ 。采用整体连续体模型(SOLID65 单元),材料模式为 MKIN + CONCRETE。计算得极限荷载列于表1,柱顶竖向位移示于图3,裂缝和压碎图示于图4,图中六面棱柱体表示单元压碎。可见,不管压碎项打开与否,弧长法均能计算出荷载位移的下降段,但极限荷载比 NR 迭代法略低;采用 NR 法把压碎项关闭时极限荷载最接近实际。故在此类高轴压构件极限承载力求解中,若不关心荷载-位移下降段时,可采用考虑压碎关闭的 NR 迭代法;若关心荷载-位移下降段时可采用考虑压碎关闭的弧长法,但有一定误差。

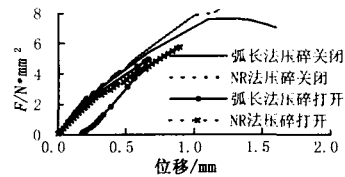


图3 NR法和弧长法计算所得柱顶竖向位移

CONCRETE 材料模式分析砌体抗压强度具有相当的精度。

### 6.2 关于材料本构及破坏准则算例——砖砌体剪压复合受力试验模拟

算例如图7<sup>[18]</sup>。材料强度实测值为砖  $f_{1m} = 18\text{ N/mm}^2$ ,砂浆  $f_{2m} = 6.56\text{ N/mm}^2$ 。采用分离式模型建模,均取 SOLID65 单元,材料模式分别采用 MKIN + CONCRETE 材料和 DP 材料,有限元模型如图8。砖和砂浆的应力-应变曲线按式(3)~(4)确定,其中砖取  $\epsilon_0 = 0.00145$ , $\epsilon_u = 0.002$ , $E_0 = 1.28 \times 10^4\text{ MPa}$ ;砂浆取

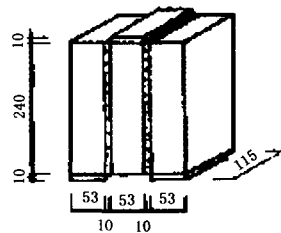


图7 模型试件

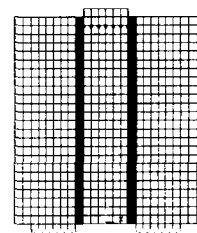


图8 有限元模型

$\varepsilon_0 = 0.002, \varepsilon_u = 0.005, E_0 = 0.4 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。系数  $C, \varphi$  按式(1)、(2)计算得到,其中取  $\sigma_r = 0.1 \sigma_c$ , 计算得到砖的  $C = 2.36352 \text{ MPa}, \varphi = 60.57^\circ$ , 砂浆的  $C = 0.955 \text{ MPa}, \varphi = 57.54^\circ$ 。迭代法采用修正 NR 法。在试件两侧施加轴力  $N$ , 在中间砖顶施加剪力  $V$ , 两侧砖底砂浆底面竖向和  $Y$  向(由外向里)自由度约束。计算时在

轴力施加完毕后再按第二载荷步施加  $V$ 。

各模型极限承载力计算结果与试验值对比列于表 2。采用 MKIN + CONCRETE 材料, 极限承载力计算值较试验值略低。采用 DP 材料, 膨胀角取 0 即采用不关联的流动法则时, 极限承载力计算值较试验值偏高,  $\varphi \neq 0$  时计算值较试验值明显偏大。

表 2 砖砌体剪压复合受力试件承载力计算结果

模型	材料模式	$N/N_u$	$V/\text{kN}$	$\varphi_f$	$N_{uc}/\text{kN}$	$N_{ud}/\text{kN}$	$N_{uc}/N_{ud}$
1	MKIN + CONCRETE	0.5	150	0	117.4	138.18	0.85
2	DP	0.5	150	0	147.77	138.18	1.07
3	DP	0	150	0	63.84	42.21	1.51
4	DP	0	150	$\varphi$	147.84	42.21	3.50
5	MKIN + CONCRETE	0	150	0	39.86	42.21	0.94
6	MKIN + CONCRETE	0.8	150	0	126.76	132.30	0.96
7	DP	0.8	150	0	147.84	132.30	1.12

图 9 给出了各模型的裂缝(压碎)图及塑性应变图。可见, 当  $N/N_u$  较小时, 裂缝破坏集中于灰缝处(图 9c、d、e), 抗剪承载力较低; 当  $N/N_u$  较大, 采用 MKIN + CONCRETE 材料时, 破坏主要体现在砖体出现大量裂缝(图 9a、f), 抗剪承载力大幅提高, 这是由

于  $N/N_u$  变大使砖和砂浆间摩擦力增大, 且砂浆与砖共同作用时砂浆的变形对砖产生较大拉应力所致, 这与试验现象相吻合; 当  $N/N_u$  较大, 采用 DP 材料时, 计算所得破坏主要集中在灰缝上下端, 这与试验现象不符。

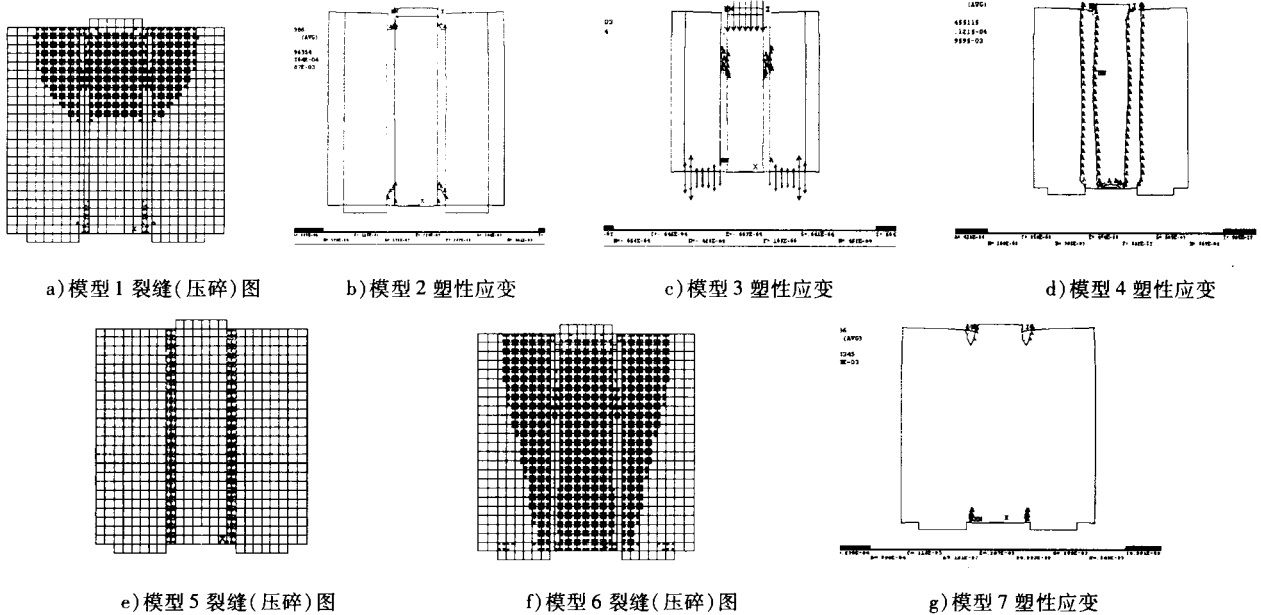


图 9 剪压复合受力试件裂缝(压碎)及塑性应变图

因此, 砌体承载力分析采用 MKIN + CONCRETE 材料计算值比试验值稍低, 具有较好的精度, 且破坏现象符合实际; 采用 DP 材料时建议  $\varphi_f$  取 0, 其计算值比试验值偏高, 纯剪时误差较大, 精度不及 MKIN + CONCRETE 材料模式。

6.3 关于预应力算例 - 预应力砌体墙模型试验模拟

该试验采用如图 10 所示的 1:2 缩尺模型<sup>[19]</sup>, 分非预应力墙(W-1, W-2)和预应力墙(PW-1, PW-2)两类。截面尺寸及配筋详图 10, 材料性能见表 3、表 4 所示。

表 3 模型用材料强度等级或实测值/ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$

材料	砖	砂浆	混凝土			钢筋		
			柱	非预应力圈梁	预应力圈梁	冷拔 $\Phi 4$	$\Phi 8$	冷拉 $\Phi 12$
强度等级	$\geq \text{MU10}$	4.71	C20	C20	C30	340	235	335
和实测值						470	448	480

表 4 材料弹性模量/ $N \cdot mm^{-2}$

材料	C20 混凝土	C30 混凝土	砖砌体	冷拔 $\Phi 4$ 钢筋	$\Phi 8$ 钢筋	冷拉 $\Phi^I$ 钢筋
弹性模量 $E_0$	$2.55 \times 10^4$	$3.0 \times 10^4$	1 914	$2.0 \times 10^5$	$2.1 \times 10^5$	$1.8 \times 10^5$

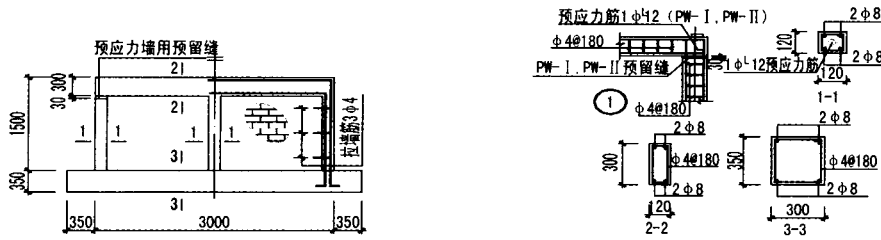


图 10 试验试件的构造和配筋图

以该试验模型为对象,建立有限元模型 FW-1 (非预应力约束墙,对应于试验中 W-I 和 W-II)、FPW(预应力墙,对应于试验中 PW-I 和 PW-II)和 FW-2(取消构造柱和圈梁后的非约束纯砌体模型,以对比约束砌体与非约束砌体的受力性能),如图 11 所示。混凝土和砌体均采用 SOLID65 单元,材料模式采用 MKIN + CONCRETE。混凝土取强度平均值,C20 抗压强度为 19.04 MPa,抗拉强度取为 1.9 MPa,C30 抗压强度为 26.11 MPa,抗拉强度取为 2.61 MPa,应力应变曲线按混凝土规范采用;砌体采用按砌体规范计算出的强度平均值,抗压强度为 3.19 MPa,抗拉强度为

0.29 MPa,应力应变曲线按式(3)、(4)采用。钢筋采用 LINK8 单元,材料模式为双线性随动强化模型 BKIN。加载采用荷载步法,FW-1 和 FW-2 第一荷载步施加竖向荷载  $\sigma_0 = 0.333 N/mm^2$ ,第二荷载步在圈梁左端施加水平推力 360 kN。预应力墙 FPW 第一荷载步施加竖向荷载  $\sigma_0 = 0.333 N/mm^2$ ,第二荷载步施加预应力,第三荷载步在圈梁左端施加水平推力 360 kN。预应力采用降温法施加,模型中预应力钢筋除上下两节点分别与锚具和压浆节点耦合,其它节点和周围混凝土节点在 X、Y 向位移通过约束方程耦合在一起,Z 向自由。

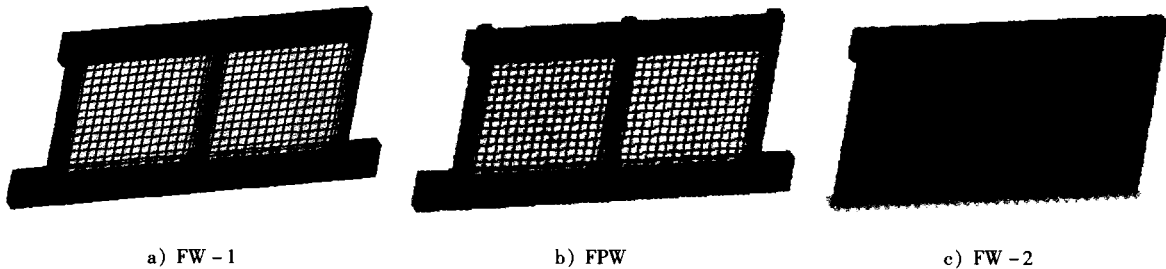


图 11 墙体有限元模型

各模型计算结果及与试验的对比情况见表 5,图 12 给出了各模型墙顶荷载位移 ( $P-\Delta$ ) 曲线图。可见,非预应力约束墙体 FW-1 完全开裂荷载和极限荷载的计算值与试验值较为接近,具有较好的精度。预应力约束墙体 FPW-1 开裂荷载和极限荷载的计算值较试验值略低。非预应力约束砌体 FW-1 与非预应力纯砌体墙 FW-2 相比,开裂荷载提高 47%,极限荷载提高 96%;预应力约束砌体 FPW-1 与 FW-2 相比,开裂荷载和极限荷载分别提高 83% 和 105%;预应

力约束砌体在柱顶施加 30 kN 预应力与施加 10 kN 预应力相比,开裂荷载提高 36%,极限荷载提高 6%。由图 12 可知,砌体的刚度和抗裂性能以预应力约束砌体最好,普通约束砌体次之,非约束纯砌体最差。

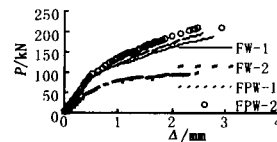


图 12 各模型墙顶荷载位移图

表 5 墙片计算结果及试验结果对比/ $N \cdot mm^{-2}$

模型	模型描述	(完全)开裂荷载/kN		极限荷载/kN		开裂位移/mm 计算值/试验值
		计算值/试验值	误差	计算值/试验值	误差	
FW-1	非预应力约束砌体墙	121/135	10.3%	187.0/191.8	2.5%	1.05/0.86
FW-2	非预应力纯砌体墙	82.4/无		95.6/无		0.85/无
FPW-1	预应力墙,10 kN	151/180	16.1%	196.0/224.0	12.5%	1.54/1.9
FPW-2	预应力墙,30 kN	206/无		208/无		2.44/无

图13给出了部分模型最终墙体裂缝图。如图13a所示,FW-1裂缝首先出现在加载一侧柱(左柱)内侧砖墙内以及中柱中间部位墙体,随着水平荷载增大,左柱裂缝向柱内延伸贯通,中柱附近裂缝向两边沿约45°方向斜向发展,并贯穿中柱,最终导致破坏(图13b),这与试验现象基本吻合<sup>[19]</sup>;FW-1的裂缝

发展过程与FW-1类似,FPW-2比FW-1的墙体裂缝发展更加充分(图13d、e、f);FW-2裂缝沿墙体底部贯通及墙体中部沿约45°方向斜向发展,裂缝发展不充分,裂缝少而集中(图13c),表现出明显的脆性。

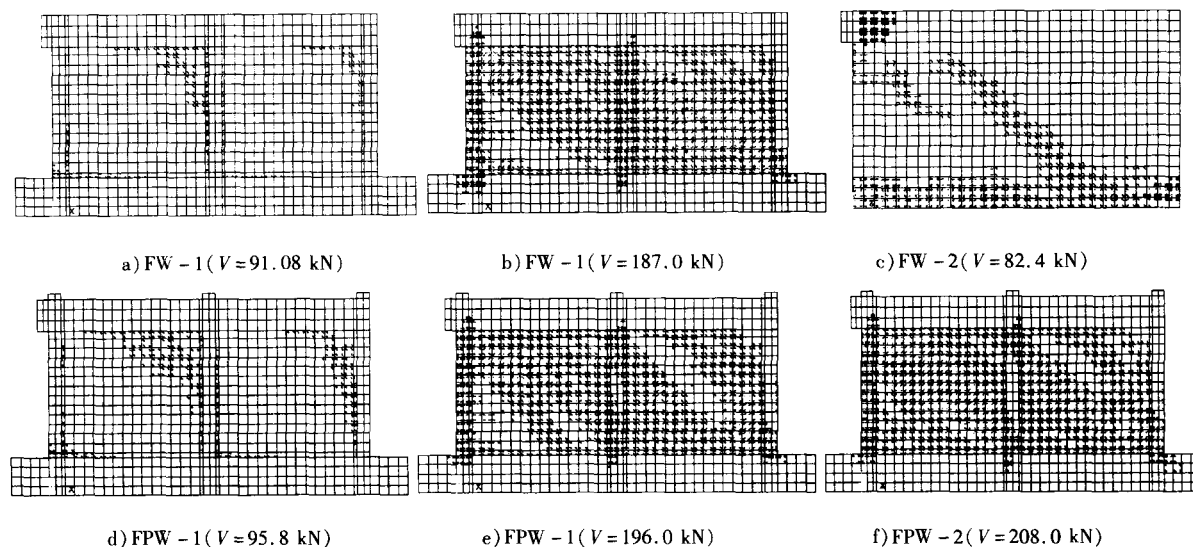


图13 各模型最终墙体裂缝图

可见,采用上述建模方式、材料本构、降温法施加预应力、参数选取及NR算法等可以较好地模拟预应力及约束砌体的静力单调加载受力性能。

## 7 结语

探讨了用ANSYS进行砌体结构非线性有限元分析的适用性及相关问题。主要结论有:

1) 进行砌体极限承载力分析,采用整体连续体模型比分离模型精度稍差,但分离模型计算量大,分析规模较大时建议采用整体连续体模型。

2) 弧长法极限承载力计算值较NR法偏低,在高轴压构件极限承载力求解中,若不关心荷载-位移下降段,可采用压碎项关闭的NR法;否则,可采用压碎项关闭的弧长法,但有一定误差。

3) 建议求解时采用力收敛准则或以力收敛为主、位移收敛为辅,不宜单独使用位移收敛准则。

4) 采用MKIN+CONCRETE材料模式计算值比试验值稍低,具有较好的精度,破坏现象较符合实际;采用DP材料时建议 $\varphi_f$ 取0,其计算值比试验值偏高,纯剪时误差较大。

5) 可采用降温法模拟预应力。

处理好上述砌体的建模、材料本构和破坏准则等问题,按照本文方法确定参数及算法,将ANSYS用于砌体结构的非线性有限元分析应是可行的。

## 参考文献:

- [1] 王达谔,武建华. 砌体RVE均质过程的有限元分析[J]. 重庆建筑大学学报,2002,24(4):35-39.
- [2] 孙伟民. 预应力混凝土砌块砌体抗裂性能的有限元分析[J]. 四川建筑科学研究,2003,29(4):88-91.
- [3] 秦杰,朱炯. 砌体房屋受地表变形的有限元分析[J]. 工业建筑,2002,32(5):41-44.
- [4] 全成华,唐岱新. 配筋砌块砌体剪力墙抗剪非线性分析[J]. 低温建筑技术,2002,90(4):49-50.
- [5] 苏益声,郑宏宇,邓志恒. 约束刚度对砌体结构中现浇楼板裂缝影响的试验分析[J]. 建筑结构,2002,32(10):66-68.
- [6] 刘振宇,叶燎原,潘文. 等效体积单元(RVE)在砌体有限元分析中的应用[J]. 工程力学,2003,20(2):31-35.
- [7] 郝文化. ANSYS土木工程应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [8] 陈惠发, A. F. 萨里普. 混凝土和土的本构方程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [9] 周岑,孙利民. 钢筋混凝土结构弹性分析在ANSYS中的实现[A]. 2002 ANSYS中国用户年会论文集[C]. 2002:464-468.
- [10] ANSYS公司. ANSYS使用手册[Z]. 2000.
- [11] 江见鲸. 钢筋混凝土非线性有限元分析(第1版)[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1994.

(下转第105页)

当应力强度因子代表拉剪应力综合作用下裂纹端部场强特征值。危岩体加锚后主控裂隙面尖端相当应力强度因子显著减小,随着锚杆水平角增加,相当应力强度因子呈抛物线变化,在 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 可获得最优锚固效果。

### 参考文献:

- [1] 陈洪凯,王蓉. 三峡库区危岩稳定性计算方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(4):614-619.
- [2] 陈洪凯,王蓉,唐红梅. 三峡库区危岩体锚固计算方法及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2002,13(4):59-62.
- [3] 叶四桥. 危岩损伤-断裂联合机理研究[D]. 重庆交通学院,2002.
- [4] 陈洪凯,唐红梅,王蓉等. 锚固岩体参数的等效方法研究[J]. 应用力学和数学,2001,22(8):862-868.
- [5] 陈洪凯,唐红梅,刘光华等. 危岩锚固-支撑联合计算方法研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(3):383-388.
- [6] DB5029-2004,地质灾害防治工程设计规范[S].
- [7] 李术才. 加锚节理岩体裂纹扩展失稳的突变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(10):1661-1666.
- [8] 伍佑伦,王元汉,许梦国. 拉剪条件下节理岩体中锚杆的力学作用分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(5):769-772.
- [9] 李术才,朱维申. 三峡船闸高边坡岩体稳定性断裂损伤模型研究[J]. 人民长江,1998,29(12):3-6.
- [10] 中国航空研究院. 应力强度因子手册(增订版)[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [11] 洪起超. 工程断裂力学基础[M]. 上海:上海交通大学出版社,1987.
- [12] 王思敬. 坝基岩体工程地质力学分析[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [13] 周维垣,杨延毅. 节理岩体的损伤断裂力学模型及其在坝基稳定分析中的应用[J]. 水利学报,1990,(11):48-52.
- [14] 周维垣,杨延毅. 节理岩体的损伤断裂力学模型及验证[J]. 岩石力学与工程学报,1991,10(1):43-54.
- [15] 陶纪南. 岩石断裂韧度测试中的几个问题-裂纹亚临界扩展的研究[J]. 岩石力学与工程学报,1990,9(4):319-327.
- [12] 应付钊. 非线性有限元法分析预应力砌体墙结构[D]. 四川大学,1999.
- [13] 刘桂秋,施楚贤. 砌体受压应力-应变关系[A]. 现代砌体结构. 2000年全国砌体结构学术会议论文集[C]. 中国建筑工业出版社,2000.
- [14] 朱伯龙. 砌体结构设计原理[M]. 上海:同济大学出版社,1991.
- [15] 郑颖人,赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩土力学与工程学报,2004,23(19):3381-3388.
- [16] 骆万康,王天贤. 预应力开洞砖墙抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构,1998,172(4):12-16.
- [17] 晏致涛. 后张法预应力混凝土空心板梁张拉有限元分析[J]. 重庆建筑大学学报,2003,25(6):62-66.
- [18] 朱希成. 砖砌体剪压复合受力性能研究[D]. 重庆建筑大学,1997.
- [19] 骆万康,王天贤. 预应力砖墙在低周反复荷载下抗裂及承载力试验研究[J]. 重庆建筑大学学报,1994,16(4):52-66.

(上接第96页)