

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.02.007



采用块体-界面体系的砌体结构简化细观模型

牛力军, 张文芳, 丁瑞彬

(太原理工大学 建筑与土木工程学院, 太原 030024)

摘要:基于 ABAQUS 装配式建模构架,提出了一种砌体结构的简化细观模型。该建模方法将块体-砂浆界面及砂浆层统一采用块体间的界面来代替。界面属性包括法向和切向的力学参数,用来模拟砌体的剪压及受拉行为。界面的法向受拉采用粘性力学参数赋值,并通过与轴心受拉本构模型的等效,推导得出控制界面损伤演化速率的无量纲指数 α 的计算方程。剪压复合受力模型基于剪摩理论建立,通过粘性属性和库伦摩擦赋值。当剪压复合受力构件处于高轴压比时,通过块体的非线性属性实现了主压应力为主控的损伤阈值。按照该方法进行剪压相关性和砖墙剪切失效的试验仿真模拟,模拟得出的失效形态及力-位移曲线与试验结果基本相符。

关键词:砌体;细观模型;剪摩理论;粘性摩擦;数值模拟

中图分类号: TU313.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)02-0051-09

A mesoscopic model of masonry structure with block-interface system

Niu Lijun, Zhang Wenfang, Ding Ruibin

(College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China)

Abstract: Based on the modular modeling framework of ABAQUS program, a simplified mesoscopic model is proposed for masonry structure. The mortar-joint and bond were replaced by a single interface. Shear-compression behaviour and tension behaviour were modeled through the normal and tangential mechanics properties of interface. Sticking mechanics property was adopted to model tensile behavior, and the evolution index α of bonding soft was obtained by equivalent with axial tensile constitutive express. Based on shear-friction theory, shear-compression model was conducted by sticking mechanics and coulomb friction, and through the nonlinear properties of block, the principal compression stress was adopted as the master damage threshold under high axial compression ratio. Simulation of the shear-compression relationship and a brick wall model with shear failure were conducted, and the corresponding failure modes and curves were similar with that theory and test results.

Keywords: masonry; mesoscopic model; shear-friction theory; sticking friction; simulation

收稿日期: 2015-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(50978177);山西省科技攻关项目(20110313026-3)

作者简介: 牛力军(1978-),男,博士生,主要从事工程结构抗震减震设计理论研究,(E-mail) niulijun@tyut.edu.cn.

张文芳(通信作者),男,教授,博士,(E-mail) zhangwenfang@tyut.edu.cn.

Received: 2015-09-06

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 50978177); Natural Science Foundation of Shanxi Province (No. 20110313026-3)

Author brief: Niu Lijun(1978-), PhD candidate, main research intrest: theory research on seismic engineering structures, (E-mail) niulijun@tyut.edu.cn.

Zhang Wenfang(corresponding author), professor, PhD, (E-mail)zhangwenfang@tyut.edu.cn.

砌体结构在现役建筑中占比较大,也是结构领域研究的重点。随着计算机仿真技术的发展,砌体结构的精细化数值分析越来越受到研究者的重视。很多文献根据不同的数值程序提出了多种精细化建模方法,一般是假定砌体是由砂浆基质、块体材料及块体-砂浆粘结界面组成的三相复合材料,各相组分的材料性质按照相应的力学本构模型来赋值^[1-4]。砂浆基质和块体材料通常采用弹塑性材料,也有文献为了简化数值计算,采用弹脆性材料模型。粘结界面通常采用以下 3 种处理方法:第 1 种方法将块体和砂浆的接触面完全耦合,该方法建模简单,但不适用于模拟块体和砂浆之间的粘结滑移行为,而粘结滑移失效是砌体结构在地震作用下的主要失效行为。第 2 种方法为了考虑块体与砂浆之间滑移行为,通过在块体和砂浆之间建立接触单元,根据接触单元的滑动摩擦属性来实现滑移行为的模拟。该方法忽略了粘结界面的粘结强度,界面开裂前的力学机理与实际不符。第 3 种方法考虑块体和砂浆之间的粘结滑移,将块体和砂浆通过弹簧单元联系在一起,又称为考虑粘结滑移的细观模型^[5]。从数值建模实践发现,按第 3 种方法建模时需要分别采用三相材料属性和相应的单元类型,并需建立大量的弹簧单元,建模工作量大,计算收敛较为困难。材料属性的准确性是数值结果可信的基础。试验研究发现,纯粹的粘结界面失效行为较少见,往往同时伴随着砂浆的损伤表现,因此,砂浆基质与粘结界面的力学行为在试验中难以甄别和单独赋值。相反,如将砂浆和粘结界面合二为一,反而更易从试验研究中获得力学模型参数,特别是对于多孔砖或带销键的块体,砂浆销键的抗剪承载力可以和界面的粘结力及摩擦力采用统一的力学属性来模拟。笔者采用的砌体细观模型将块体-砂浆粘结界面和砂浆层组合成一个界面,用该界面的力学属性代替两相材料的法向和切向属性,既可以简化建模,也利于材料的试验数据与数值计算的结合。

1 简化细观模型和砌体的失效行为

简化细观模型如图 1 所示。采用界面代替灰缝后,由于界面的几何厚度等于 0,则块体的计算高度相应增加,其弹性模量可采用砌体的弹性模量。

砌体构件一般作为受压构件使用,也承受剪应力或拉应力的作用,因此,砌体存在多种受力裂缝形态,不同的裂缝形态取决于墙体内部的应力场特征

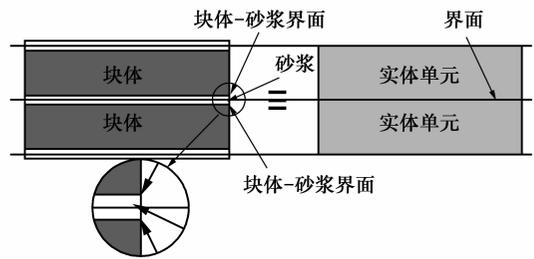


图 1 简化细观数值模型示意图

Fig. 1 Illustrate figure of simplified mesoscopic model

和组砌材料的力学性能。由于砂浆强度较低,墙体沿水平灰缝和竖向灰缝形成许多薄弱截面,在复合内力作用下,墙体裂缝往往不是沿最大应力作用面出现,而是沿薄弱截面开裂。轴心受压时通常沿竖向灰缝和块体出现竖向裂缝,受剪时一般出现阶梯形裂缝,受弯时容易形成水平通缝。简化细观模型需要能够反映不同内力作用下砌体构件的各种行为。在法向拉应力作用下,破坏主要表现为块体-砂浆界面或砂浆层的牵引分离,最大拉应力准则作为界面法向受拉的损伤阈值。在剪应力作用下,破坏主要表现为块体-砂浆界面的切向滑移,摩尔库仑准则作为界面切向损伤本构关系的损伤阈值,即界面的应力或者应变状态达到摩尔库仑准则时,认为界面开始产生滑移。界面的法向分离和切向滑移可通过 ABAQUS 程序中的接触粘性技术实现,该粘结技术包括法向和切向行为,其中,切向行为可同时考虑粘性和摩擦行为^[6]。笔者采用的简化细观模型可以模拟界面的受拉裂缝及剪切裂缝,不能模拟受压裂缝,受压失效是通过块体的压缩变形和刚度退化来表征的。

2 数值模拟方案

利用 ABAQUS 程序中的接触粘性技术,可以较好地模拟砂浆层及粘性界面的法向和切向的力学行为。对于砂浆层的法向受拉行为,可以通过界面的法向粘性属性进行模拟;对于砂浆层的切向粘结和滑移,可以通过对程序中的粘性和摩擦等相关力学参数的赋值进行模拟,该力学模式与现有的砌体受剪失效机理——剪摩理论相符。

2.1 界面法向力学行为的模拟方案

2.1.1 受压行为 砌体的受压损伤通过块体单元的受压力学属性来模拟。界面的法向受压采用“硬”接触方式,即接触对的两个接触面之间能够传递的接触压力的大小不受限制,当接触压力变为负值或

零时,两个接触面就发生分离,同时,相应结点上的接触约束失效。“硬”接触中的正应力与间隙的关系见图 2,图中坐标正负号按照拉为正、压为负的原则确定。

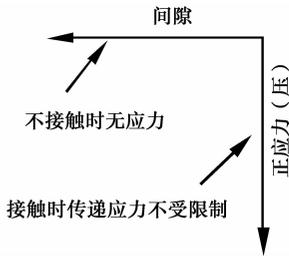


图 2 “硬”接触时正应力与间隙的关系

Fig. 2 Relationship between contact normal stress and gap

2.1.2 受拉行为 砖砌体轴心受拉试验的位移-力曲线见图 3,其本构模型可采用 Lourenco 提出的公式^[7]

$$\frac{\sigma}{f_t} = \exp\left(\frac{f_t}{G_{fl}}\omega\right) \quad (1)$$

式中: σ 为接触正应力; f_t 为抗拉强度; G_{fl} 为法向断裂能; ω 为裂缝宽度(法向位移)。

法向受拉采用基于面的粘性行为来模拟。基于面的法向粘性行为指仅仅在一个从结点处于打开状态时(即从面与主面不接触)才产生接触正应力,当应力或位移满足损伤初始准则时,法向粘性行为进入损伤演化阶段,损伤演化可以采用基于位移的演化或基于能量的演化。当损伤演化达到最大位移或断裂能时,粘性失效,块体受拉分离。基于位移的损伤演化可采用指数软化来定义其损伤失效,其损伤表达式(2)~(5)。图 3 为法向拉应力与间隙的关系曲线,该图上升段为弹性阶段,下降段为抛物线形状,与试验曲线形状类似,符合砂浆层及粘性界面法向受拉历程特征。根据既有试验的对比可知,轴心受拉初始弹性模量与轴心受压初始弹性模量基本相同,上升段弹性刚度可参考受压参数取值。图 4 为法向应力与间隙全曲线示意图。

$$\sigma = (1-d)\bar{\sigma} \leq \sigma_{c,n}^{\max} \quad (2)$$

$$\sigma_{c,n}^{\max} = k_{c,n} \cdot \delta_m^0 \quad (3)$$

$$\bar{\sigma} = k_{c,n} \cdot \delta_m^{\max} \quad (4)$$

$$d = 1 - \left\{ \frac{\delta_m^0}{\delta_m^{\max}} \right\} \left\{ 1 - \frac{1 - \exp\left(-\alpha \left(\frac{\delta_m^{\max} - \delta_m^0}{\delta_m^f - \delta_m^0} \right)\right)}{1 - \exp(-\alpha)} \right\} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{c,n}^{\max}$ 为接触临界正应力; $\bar{\sigma}$ 为有效分离时假定无损伤的接触正应力; d 为损伤因子 ($0 \leq d \leq 1$);

δ_m^0 为初始损伤时的有效分离; δ_m^{\max} 为加载中的最大有效分离; δ_m^f 为完全失效时的有效分离; $k_{c,n}$ 为界面的法向刚度; α 为定义损伤演化速率的无量纲指数。

将式(1)~(5)联立求解,可求得含有无量纲指数 α 的函数

$$e^{-\alpha B} - A e^{-\alpha} = 1 - A \quad (6)$$

$$A = 1 - \frac{f_t}{\delta_m^0} \exp\left(\frac{f_t}{G_{fl}}\delta_m^{\max}\right) \quad (7)$$

$$B = \frac{\delta_m^{\max} - \delta_m^0}{\delta_m^f - \delta_m^0} \quad (8)$$

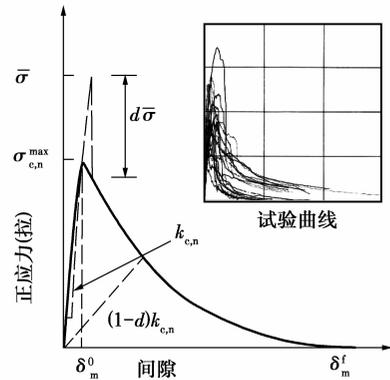


图 3 拉应力与间隙的粘性表达

Fig. 3 Sticking expression between tensile stress and gap

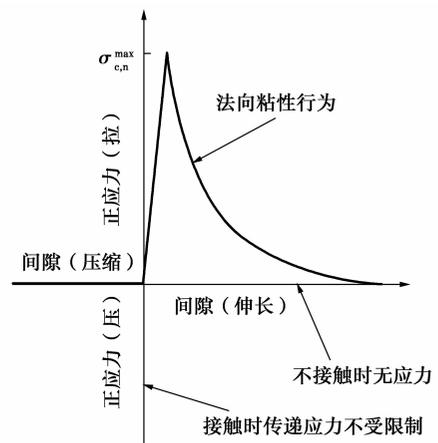


图 4 法向应力与间隙全曲线示意图

Fig. 4 Whole curve between normal stress and gap

2.2 界面的切向受剪模拟方案

2.2.1 砌体的抗剪强度理论 砌体抗剪强度理论主要有主拉应力理论和剪摩理论两种^[8]。主拉应力理论认为砌体复合受力时,当主拉应力达到抗拉强度时即开始失效。剪摩理论认为,砌体抗剪强度是砂浆的粘结强度与摩阻力之和。式(9)为文献[8]基于剪摩理论提出的砌体抗剪承载力的计算公式,该式包括两项抗力,一是砌体的抗剪强度,另外一部分

是正应力对抗剪承载的贡献。现行《砌体结构设计规范》的抗剪承载力计算公式也是基于变系数的剪摩理论建立的^[9]。

$$f_{vm} = af_{v0} + \mu\sigma \quad (9)$$

式中： f_{vm} 为砌体复合受力抗剪强度平均值； a 为参数； μ 为摩擦系数； f_{v0} 为砌体的抗剪强度。

研究表明，当轴压比较小时，剪摩理论更符合砖砌体失效机理。砌体结构处于正常使用状态时，高轴压比的情况相对较少，因此，采用的细观模型基于剪摩理论模拟抗剪行为。

2.2.2 粘性行为 采用切向粘性属性模拟砂浆层及粘性界面的切向粘结力，即无正应力时砌体的抗剪强度。切向粘性属性与法向类似，其剪应力表达分别见式(10)~(12)。当剪应力或剪位移满足损伤初始准则时，进入损伤演化阶段，损伤演化可以采用位移软化或能量软化。粘性行为采用基于位移的损伤演化时，损伤因子表达式与受拉类似。当损伤演化达到最大位移或断裂能时，粘性失效。图 5 描述了剪应力-剪切位移的粘性表达。

$$\tau_{c,t} = (1-d)\bar{\tau}_{c,t} \leq \tau_{c,t}^{\max} \quad (10)$$

$$\tau_{c,t}^{\max} = k_{c,t} \cdot \mu_m^0 \quad (11)$$

$$\bar{\tau}_{c,t} = k_{c,t} \cdot \mu_m^{\max} \quad (12)$$

式中： $\bar{\tau}_{c,t}$ 为有效分离时假定没有损伤的接触剪应力； $k_{c,t}$ 为界面的切向刚度； μ_m^0 为初始损伤时的有效接触滑移； μ_m^{\max} 为加载中的最大有效接触滑移； $\tau_{c,t}^{\max}$ 为接触临界剪应力； $\tau_{c,t}$ 为接触剪应力。

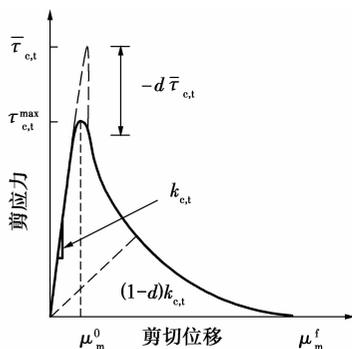


图 5 剪应力与剪切位移的粘性表达

Fig. 5 Sticking expression of shear displacement-shear stress

2.2.3 摩阻行为 采用库仑摩擦模拟砂浆层的切向摩阻行为。库仑摩擦采用摩擦系数来表征接触面之间的摩擦特性，计算表达式见式(13)。在剪应力达到临界剪应力之前，摩擦面之间不会发生相对滑动。当剪应力等于临界剪应力后，接触面开始滑动，此时摩阻力与正应力成正比例关系。图 6 为基于库

伦摩擦的剪应力与剪切位移关系曲线示意。

$$\tau_{crit} = \mu \times \sigma \quad (13)$$

式中： τ_{crit} 为临界剪应力； μ 为摩擦系数； σ 为正应力。

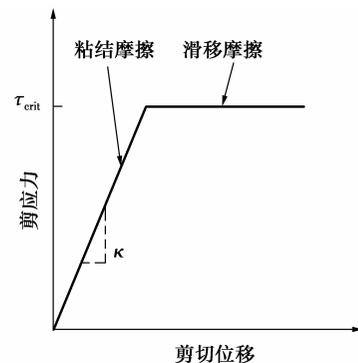


图 6 基于库伦摩擦的剪切位移-剪应力关系示意

Fig. 6 Relationship figure of shear displacement-stress based on coulomb friction

2.2.4 粘性及摩擦组合行为 砌体的抗剪承载力由粘结力和摩阻力组合而成。当剪力较小时，切向粘性刚度没有损伤，切向粘性行为有效而摩擦行为无效，剪力由处于弹性状态的粘性刚度承担，此时剪应力的表达见式(14)、(15)。

$$\tau = \tau_{c,t} \quad (14)$$

$$\tau = k_{c,t} \cdot \delta_m^{\max} \leq \tau_{c,t}^{\max}, 0 \leq \delta_m^{\max} \leq \delta_m^0 \quad (15)$$

式中： τ 为界面剪应力； τ_f 为摩擦剪应力。

当剪力增大后，一旦切向粘性刚度开始退化，摩阻力即开始参与抗剪，从切向粘性刚度开始退化到界面产生滑移前，由切向粘结力和摩阻力共同承担抗剪承载力，其力学计算表达见公式(16)~(18)。

$$\tau = \tau_{c,t} + \tau_f \quad (16)$$

$$\tau_{c,t} = k_{c,t} (1-d) \delta_m^{\max} \leq \tau_{c,t}^{\max}, \delta_m^0 < \delta_m^{\max} < \delta_m^f \quad (17)$$

$$\tau_f = \kappa \cdot (\delta_m^{\max} - \delta_m^0) \leq \tau_{crit}, \delta_m^0 < \delta_m^{\max} < \delta_m^f \quad (18)$$

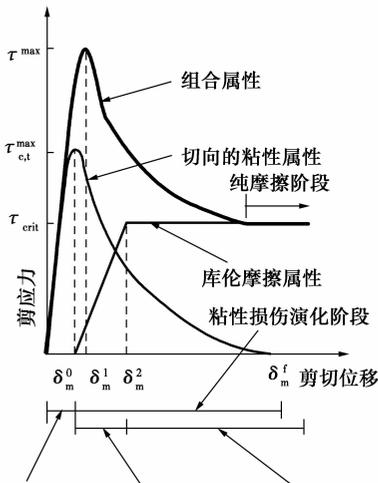
式中： κ 为摩擦剪应力随剪切位移的增长速率，如图 6 所示。

当界面产生滑移后，粘性刚度完全退化，不再提供抗剪承载力，此时抗剪承载全部由摩阻力承担，其力学表达见式(19)~(20)。

$$\tau = \tau_f \quad (19)$$

$$\tau_f = \kappa \cdot (\delta_m^{\max} - \delta_m^0) \leq \tau_{crit}, \delta_m^{\max} \geq \delta_m^f \quad (20)$$

图 7 描述了界面的粘性属性和库仑摩擦组合后的剪应力与剪切位移力学本构关系。



粘性损伤初始阶段 粘结摩擦阶段 滑动摩擦阶段

图 7 剪应力与剪切位移的组合表达
Fig. 7 The combined expression of shear stress- displacement

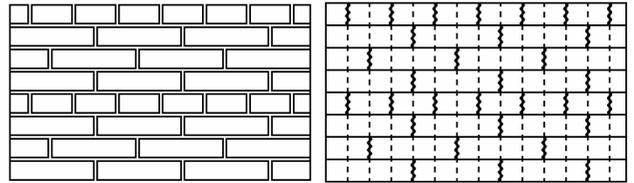
2.3 块体的模拟方案

块体在砌体中处于压弯剪复合受力状态,且砂浆使块体横向受拉,因此,砌体的抗压强度一般小于块体的强度。由于数值模型无法表征由于砂浆的不均匀性而导致的强度降低,且块体-界面体系中受压行为由块体的受压本构来表征,因此,模型中块体的受压本构曲线按砌体本构赋值,其力学模型可采用 ABAQUS 程序中的混凝土塑性损伤模型。

2.4 墙体模型

2.4.1 墙体模型界面 砌体砌筑时根据丁砖、顺砖的不同排列,有多种组砌方法,砌筑时还要求砖错缝搭接。建立墙体模型应符合砖墙的砌筑特征,因此在墙体模型中设置 3 种类型界面,分别是水平灰缝

界面、竖向灰缝界面和砖缝界面。在模型块体单元内设置砖缝界面,相当于在砖中设置预制裂缝,从而可以模拟砖的受拉开裂行为。砖缝界面的位置和数量可根据计算精度和砌筑特征设置,以三顺一丁砖墙为例,可按图 8 建立块体-界面体系模型,该数值模型界面属性植入方便,主从面接触关系明确,便于计算收敛。



图例: —水平灰缝 {竖向灰缝} 砖缝

图 8 墙体中 3 种界面类型

Fig. 8 Arrangement of three interface types in a wall model

2.4.2 界面参数 水平灰缝和砖缝界面参数可根据相关材料试验确定。竖向灰缝由于饱满度较差且砂浆硬化时会收缩,使粘结强度降低。试验研究表明,竖缝砂浆是否饱满对砌体抗压强度影响不大,对抗剪强度会产生明显的影响。竖向灰缝对墙体抗剪强度的贡献可采用对角受压或直接推覆抗剪试验进行分析。文献[10-11]分别采用两种试验方法,得出了砖墙竖缝灌浆或掏空时抗剪强度的变化情况,试验基本参数及试验结果见表 1。按照主拉应力理论,砖墙的抗剪承载力取决于墙体的斜拉强度。表 1 试验砖墙平面基本为正方形,可按照 45°对角线为主拉应力迹线推算竖向灰缝与水平灰缝的强度比值。竖缝灌浆后认为其强度与水平灰缝相同,掏空竖缝后墙体的斜拉强度仅由水平灰缝提供。

表 1 竖向灰缝强度/水平灰缝强度

Table 1 Strength ratio between head joints and bed joints

试验类型	试件尺寸(宽×高×厚)	竖缝处理方法	抗剪强度变化	强度比值
斜压	1 000 mm×1 000 mm ×240 mm	竖缝灌浆	10%~20%	0.67~0.82
	1750 mm×1 750 mm ×240 mm	掏空竖缝	-33%	0.49
推覆	1 650 mm×1 450 mm ×110 mm	掏空竖缝	-39%	0.64

根据表 1 推算结果,竖向灰缝与水平灰缝的强度比值在 0.49~0.82 区间,一般砌筑条件下,取其中位数 0.65 较为合理。如竖向灰缝饱满程度很差,则可不设置竖向灰缝界面参数。

3 简化细观模型的数值模拟验证

为了验证简化细观模型的可行性,分别进行砖砌体抗剪和弯曲抗拉的数值模拟。采用三砖双剪面

试件为研究单元,进行剪压相关曲线的数值模拟^[12];对砖墙模型进行推覆抗剪模拟。砖采用空间三维实体单元,单元类型为 8 节点 C3D8R 缩减单元。界面粘性行为采用位移演化准则。

3.1 剪压相关性模拟

文献[13]通过三砖双剪面砖砌体试验对剪压复合受力的相关性进行了较为深入的研究。研究表明,试件剪压复合受力时分别出现剪摩破坏、剪压破坏、斜压破坏、压酥破坏和局压破坏等破坏形态。砖砌体以抗压强度为对比参数的剪压相关曲线见图 9。

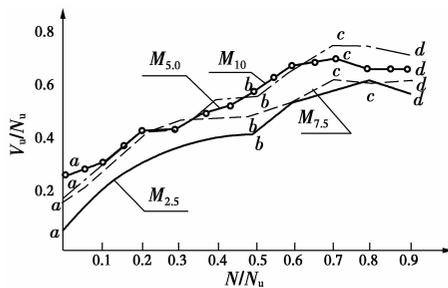
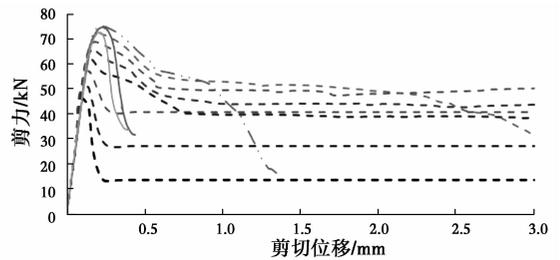


图 9 剪压相关实测曲线

Fig. 9 Tested curve of relationship of shear and compression

参考文献[13]建立三砖双剪面试验试件的数值模型,材料强度按照该文献取值,砖强度为 13.7 MPa,砂浆强度为 16.78 MPa。根据砖和砂浆的材料强度按照文献[8-9]换算砌体的强度。切向粘性刚度取 36 N/mm^3 。按照试件抗压承载力的 10% 分级增加压力,并分别采用位移控制方式对中间砖进行侧向加载。不同轴压力时剪切位移-剪力曲线及破坏形态见图 10。数值模拟典型的破坏形态有剪摩破坏、剪压破坏和斜压破坏。各种破坏类型的典型变形图见图 11,由图 11 可知,剪摩破坏时抗剪承载力由界面的切向粘结力和摩阻力组成;斜压破坏承载力取决于材料的抗压强度;剪压破坏的承载力由界面的抗剪承载力和砖的抗压承载力共同组成。数值模拟得出的以抗压强度为对比参数的剪压相关曲线及其与图 9 中 M10 实测曲线的对比见图 12。上述模拟结果表明,简化细观模型得出的三砖双剪面砌体的破坏形态及剪压相关曲线均与试验结果类似,说明该简化细观模型符合砌体结构剪压复合受力力学特征,可适用于砌体结构的抗震受力分析^[13-17]。



注: --- 轴压比0纯剪失效 --- 轴压比0.1纯剪失效
 --- 轴压比0.2纯剪失效 --- 轴压比0.3纯剪失效
 --- 轴压比0.4纯剪失效 --- 轴压比0.5纯剪失效
 --- 轴压比0.6纯剪失效 --- 轴压比0.7纯剪失效
 --- 轴压比0.8斜压失效 --- 轴压比0.9斜压失效

图 10 不同轴压力时剪力-剪切位移曲线及破坏类型

Fig. 10 Failure mode and shear displacement-shear force curve in variational pressure

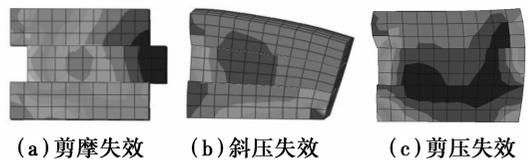


图 11 3 种典型失效形态

Fig. 11 Simulation figure of three failure modes

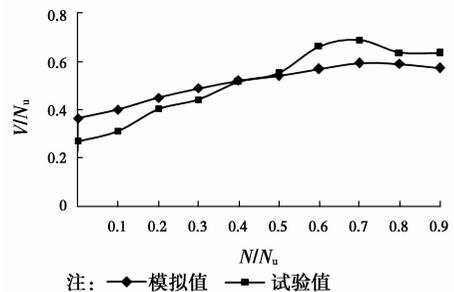


图 12 剪压相关曲线模拟结果

Fig. 12 Simulation figure of relationship of shear-compression

3.2 砖墙抗剪承载试验模拟

按照文献[18]墙体抗剪试验进行数值仿真模拟。试验砖墙试件宽 870 mm,高 500 mm,厚 100 mm,采用全顺砖(砖尺寸为 $210 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$)砌筑而成,灰缝厚度为 10 mm。试验装置及砖-砂浆界面强度试验示意图如图 13 所示。砖抗拉强度为 7.62 MPa,砂浆抗拉强度为 0.91 MPa,界面切向抗剪强度为 0.09 MPa,界面法向抗拉强度为 0.19 MPa,摩擦系数为 0.58。试验墙体竖向荷载为 20 kN(平均压应力为 0.23 MPa),水平荷载通过 L 形加载钢梁施加,水平加载高度在墙高中部,从而使墙体沿高度方向形成反向弯曲的应力场特征。根据强度试验结果可知,砖-砂浆界面强度的试验

值较低,特别是界面切向抗剪强度很低,因此,该试件属于强砖-弱界面组合体系,预期裂缝出现在灰缝截面处。由于试件的高宽比较小,试验最终形成了典型的阶梯形受剪裂缝失效形态,相关结果见图 15。

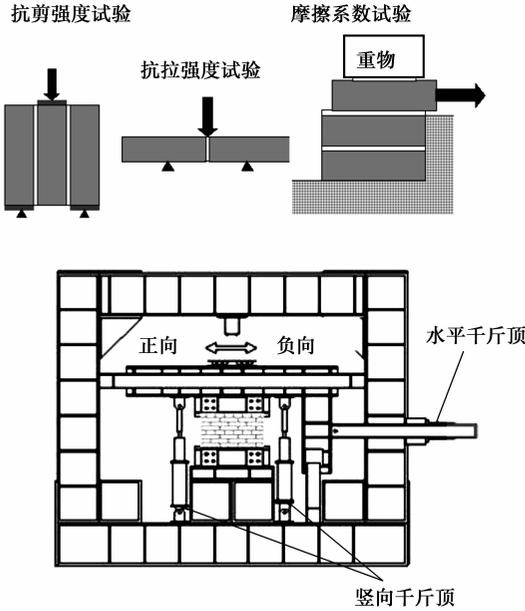


图 13 试验装置及界面强度试验示意图

Fig. 13 Loading system and test schematic for evaluating bonding strengths

参考相关文献资料,取界面法向受拉和切向受剪的峰值拉应变和剪应变均为 0.003,界面法向受拉和切向受剪本构曲线的上升段均接近于直线,则可近似取 $k_{c,n} = 333\sigma_{c,n}^{\max} \text{mm}^{-1}$, $k_{c,t} = 333\tau_{c,t}^{\max} \text{mm}^{-1}$ 。

粘性阶段界面卸载时刚度退化用总/塑性位移比值来表征,参考砌体重复加卸载试验资料,卸载后残余位移与加载位移的比值可取 0.76,则总/塑性位移取 1.33,预制砖缝该参数适当减小。由于试验没有提供断裂能参数,演化指数取 $\alpha = 1$ 。模型中输入的主要参数见表 2,建好后的模型见图 14。

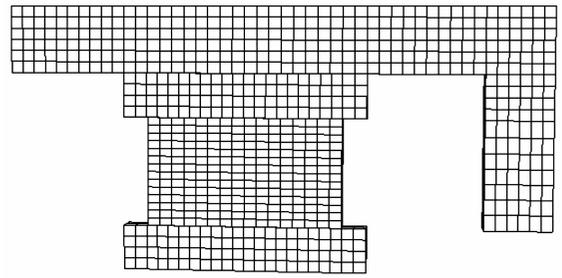


图 14 试验砖墙数值模型

Fig. 14 Simulation model for experimental brick wall

对模型分别进行单调加载和往复加载的数值模拟,采用隐式动力求解器进行计算。单调加载得到的裂缝形态见图 15(b),图 15(b)沿对角线出现阶梯形受剪裂缝,其与图 15(a)试验裂缝形态相同。图 15(b)中模型端角还出现水平受拉张开裂缝(图中方框处),而试验时采用了两个竖向千斤顶控制竖向荷载,使得墙体截面压应力分布更为均匀,此处并未开裂。由于模型受拉张开裂缝延伸长度较小,且抗剪承载力取决于阶梯形受剪裂缝的演化,因此,墙体端部张开裂缝对侧向抗剪承载力影响不大。图 15(b)既存在弯曲受拉张开裂缝又存在剪切滑移裂缝,符合弯剪内力作用下最终形成剪切失效的裂缝形态特征,也充分体现了块体-界面体系中界面受拉张开和受剪滑移的行为特征。图 15(c)为试验滞回曲线,图 15(d)为往复加载模拟曲线,模拟曲线与试验曲线形状类似,滞回环均接近于矩形,符合低强度砂浆墙体抗剪承载力的退化规律。试验得出的水平侧向力峰值为 17.2 kN,名义抗剪强度为 0.20 MPa;模拟得出的水平侧向力峰值为 18.1 kN,相对应的名义抗剪强度为 0.21 MPa;按照公式(9)计算的抗剪强度为 0.22 MPa(取参数 $\alpha = 1$),则模拟值、公式计算值与试验值的误差分别为 +5.2% 和 +10%。

表 2 界面主要参数表

Table 2 Parameters adopted for bonding properties

类型	$k_{c,n} /$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-3}$)	$k_{c,t} /$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-3}$)	$\sigma_{c,n}^{\max} /$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$\tau_{c,t}^{\max} /$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	总/塑性位移	指数参数 α
水平灰缝	63	30	0.19	0.09	1.33	1
竖向灰缝	40	20	0.12	0.06	1.33	1
预制砖缝	2 500	2 500	7.62	7.62	1.15	1

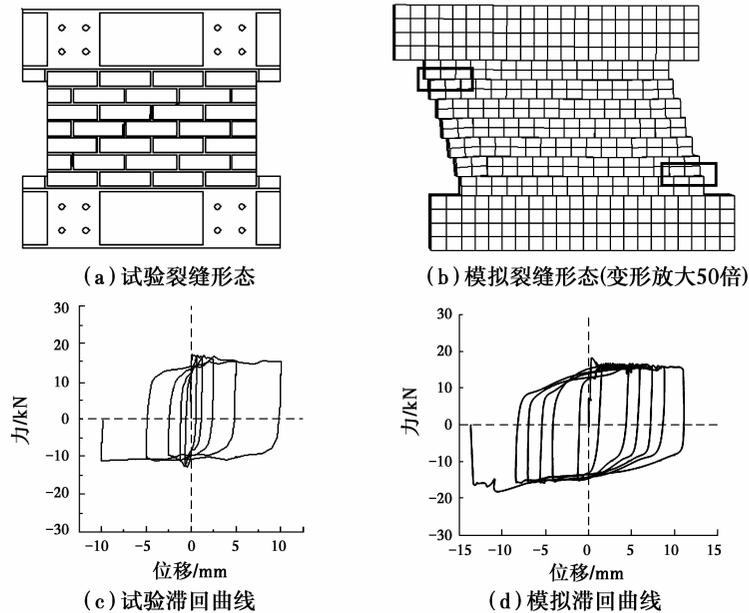


图 15 模拟结果与试验对比图

Fig. 15 Comparison between simulation and experimental results

4 结 论

1) 提出的砌体结构简化细观模型符合砌体破坏强度理论,建模方法简单,并且能够与材料试验参数取得较好的结合。

2) 通过对三砖双剪试件和砖墙剪切失效的数值模拟,计算得出的裂缝形态及相关曲线与理论及试验相符。对于不同的砌体类型,应输入相应的界面力学参数,以便取得可靠结果。

参考文献:

- [1] RAFFA M L, LEBON F, SACCO E, et al. A multi-level interface model for damaged masonry [C]// International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Sep 2013, Cagliari, Italy.
- [2] FURUKAWA A, KIYONO J, TOKI K. Numerical simulation of the failure propagation of masonry buildings during an earthquake [J]. Journal of Natural Disaster Science, 2012, 33(1): 11-36.
- [3] LOURENÇO P B. Computational strategies for masonry structures [D]. Netherlands: Delft University of Technology, 1996.
- [4] MOHAMAD G, LOURENÇO P B, ROMAN H R, et al. Numerical simulation of concrete block masonry under compression [C]//15th International Brick and

Block Masonry Conference, Brazil, 2012.

- [5] 尚守平, 雷敏, 奉杰超. 砌体结构分离式有限元模型的参数反演[J]. 广西大学学报, 2013, 38(1): 1-8.
SHANG S D, LEI M, FENG J C. Parameter inversion of micro-model of masonry structure [J]. Journal of Guangxi University, 2013, 38(1): 1-8. (in Chinese)
- [6] HIBBITT, KARLSSON, SORENSEN Inc. ABAQUS Standard user's Manual; ABAQUS CAE User's Manual; ABAQUS Keywords Manual [M]. American: HKS Company, 2002.
- [7] VAN DER PLUIJM R. Non-linear behaviour of masonry under tension [J]. Heron, 1997, 42(1): 25-48.
- [8] 施楚贤. 砌体结构理论与设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 1-93.
SHI C X. The theory and design of masonry structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003: 1-93. (in Chinese)
- [9] 砌体结构设计规范: GB 50003—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for design of masonry structures: GB 50003—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [10] 砌体结构工程施工质量验收规范: GB 50203—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for acceptance of constructional quality of masonry structures: GB 50203—2011 [S]. Beijing:

- China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [11] NAJAFGHOLIPOUR M A, RAJABI A R. The influence of mortar head joints on the in-plane and out-of-plane seismic strength of brick masonry walls [C]// The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China October 12-17, 2008.
- [12] 砌体基本力学性能试验方法标准:GB/T 50129—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. Standard for test method of basic mechanics properties of masonry: GB/T 50129—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [13] 骆万康,朱希诚,廖春盛. 砌体抗剪强度研究的回顾与新的计算方法[J]. 重庆建筑大学学报,1995, 17(4): 41-49. LUO W K, ZHU X C, LIAO C S. Review of research on masonry shear strength and a new calculation method [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1995, 17(4): 41-49. (in Chinese)
- [14] FOUCHAL F, LEBON F, RAFFA M L, et al. An interface model including cracks and roughness applied to masonry [J]. Open Civil Engineering Journal, 2014, 8: 263-271.
- [15] PARISI F, AUGENTI N. A shear response surface for the characterization of unit-mortar interfaces [C]//15th International Brick and Block Masonry Conference, Brazil, 2012.
- [16] 徐春一,刘明,张吉松. 蒸压粉煤灰砖砌体抗剪性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011, 27(2): 221-226. XU C Y, LIU M, ZHANG J S. Experimental study on shear behavior of autoclaved fly ash brick masonry [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2011, 27(2):221-226. (in Chinese)
- [17] RAFFA M L, LEBON F. On damaged interfaces in masonry buildings: a multi-scale approach [C]//2nd International Conference on Protection of Historical Constructions, Antalya-Turkey, 2014.
- [18] SANADA Y, NAKAMURA Y, YAMAUCHI N, et al. Seismic performance of masonry walls using interlocking units [C]//First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 2006.

(编辑 胡英奎)