

# 基于最小耗能原理的砌体抗剪强度统一模式

蔡 勇

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075)

**摘 要:** 对目前我国砌体结构设计规范(GB 50003—2001)和建筑抗震设计规范(GB 50011—2001)在砌体抗剪强度计算方法上存在的问题进行分析, 根据最小耗能原理和正交各向异性材料的破坏准则, 建立砌体在剪-压复合作用下的相关关系式, 该式计算结果与试验结果吻合较好, 能完整地表达剪摩、剪压和斜压3种破坏形态。通过对各种工况的砌体材料进行算例计算, 建立了砌体静力抗剪强度和抗震抗剪强度计算公式, 对2种规范的抗剪强度的取值进行了改进, 式中统一采用轴压比作为主要变量来表达。研究结果可使2种规范在确定砌体抗剪强度时采用统一的方法, 可供工程设计时参考。

**关键词:** 砌体; 最小耗能原理; 破坏准则; 抗剪强度

中图分类号: TU362

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2007)05-0993-07

## Masonry shear strength uniform model based on the least energy consumption principle

CAI Yong

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The problems in the shearing strength calculating method about “code for design of masonry structures”(GB 50003—2001)and “code for seismic design of building”(GB 50011—2001) was analysed. With the least energy consumption principle and the failure criteria of orthogonal anisotropic materials, the correlated formula of masonry during combined shear-compression action was established. The correlated formula with experimental results was in good agreement with each other. The three failure models about shear-friction, shear-compression, diagonal compression can completely be expressed with this correlated formula. On the base of calculating bearing capacity with various masonry material calculational examples, matching considerable experimental results, the calculation formula of the static shear strength and the aseismatic strength was established, by which the shear strength value of the two codes was improved. The calculation formula was expressed by axial compression ratio acting as main variable. The calculation method can uniformly be used by the two codes to calculate shear strength. The proposed method can provide an important reference to engineering design.

**Key words:** masonry; the least energy consumption principle; failure criterion; shear strength

砌体结构是我国使用较多的结构形式, 现代砌体结构正朝高层和抗震方向发展, 轴压比( $\sigma_0/f$ , 其中,  $\sigma_0$  为永久荷载设计值产生的水平截面平均压应力,  $f$  为砌体抗压强度设计值)完全可能大大超出一般多层房屋

在正常使用阶段时轴压比的0.2~0.3, 砌体除受水平荷载作用外, 同时还作用垂直荷载, 使砌体处于剪-压复合受力状态, 往往形成交叉的对角斜裂缝, 造成严重的灾害。了解砌体在不同轴压比下的抗剪性能变化

收稿日期: 2006-12-11; 修回日期: 2007-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478092)

作者简介: 蔡 勇(1968-), 男, 湖南益阳人, 博士后, 从事结构工程抗震理论及加固技术研究

通信作者: 蔡 勇, 男, 博士后, 工程师; 电话: 13077384358; E-mail: caiyong\_ht@yahoo.com.cn

规律, 是正确确定砌体抗剪强度的关键。库仑理论和主拉应力理论是目前国内外学者确定砌体抗剪强度的理论基础<sup>[1-2]</sup>。但我国抗震设计规范<sup>[3]</sup>和砌体结构设计规范<sup>[4]</sup>在确定砌体抗剪强度的方法互不协调, 且取值不够合理, 是工程设计亟待解决的问题。

砌体在剪-压复合受力的情况下, 往往形成阶梯形裂缝而被剪坏。当阶梯形裂缝形成后, 砌体并未因水平灰缝破坏而丧失抗剪能力, 特别在干砌(无砂浆)砌体试验时, 仍有相当大的抗剪强度。虽然采用库仑理论可以解释这一现象, 但最大主拉应力理论不能解释。反过来, 在阶梯形裂缝刚出现时, 作为砌体中某一“点”的破坏, 主拉应力理论可以解释, 而库仑理论不好解释。随着竖向压力的增加, 砌体会产生 3 种不同的破坏形态: 剪摩破坏、剪压破坏、斜压破坏。这 3 种破坏形态即为确定砌体在剪-压复合作用下破坏准则的基础。主拉应力理论和库仑理论无法划分这样的破坏阶段与形态。

国内外大量的理论分析与试验结果表明<sup>[5-9]</sup>, 砌体在剪-压复合作用下相关曲线的峰值点为  $\sigma_y/f_m \approx 0.425 \sim 0.670$  (其中,  $\sigma_y$  为永久荷载平均值产生的水平截面平均压应力,  $f_m$  为砌体抗压强度平均值), 其平均值为 0.548。当竖向压应力平均值与砌体抗压强度平均值之比小于 0.548 时, 砌体的抗剪强度将随竖向压应力的增加而增大; 当该比值大于 0.548 时, 砌体的抗剪强度将随竖向压应力的增加而减小。主拉应力破坏理论和剪摩破坏理论在剪-压复合受力过程中, 抗剪强度随  $\sigma_y/f_m$  增大而增大(主拉应力理论曲线为一不收敛曲线, 库仑理论曲线为一斜直线), 均为随竖向压应力增加的单调函数, 表明 2 种理论中  $\sigma_y/f_m$  越大, 越趋于不安全, 这对在强烈地震作用下的砌体结构产生不利影响。

施楚贤等<sup>[10]</sup>采用 MU10, Mb7.5 的厚度为 190 mm 混凝土砌块砌体墙, 其抗震抗剪承载力满足要求, 而在同条件下改用 MU10, M7.5 的厚度为 240 mm 烧结多孔砖墙时, 其抗震承载力反而不能满足要求。究其原因, 在于混凝土砌块砌体强度正应力影响系数  $\zeta_N$  的取值过大, 表明文献<sup>[3]</sup>中混凝土砌块砌体随  $\sigma_0, eq/f_{v0}$  的增大, 其抗剪强度的提高幅度过大, 偏不安全。

由以上分析可看出, 砌体在复合受力情况下, 破坏形态及破坏机理极其复杂, 如何建立合理的砌体破坏准则和砌体抗剪强度计算公式需要进一步研究。有必要从理论上寻求一个新的公式, 区分砌体在剪-压

复合作用下不同的破坏形态及砌体的抗剪强度, 且将其相互衔接起来, 使得砌体受力的破坏机理既明确, 所用的抗剪强度公式又统一。

## 1 最小耗能原理及破坏准则

周筑宝等<sup>[11-13]</sup>证明了“在线性非平衡系统中发生的任何耗能过程, 都将在与其相应的约束条件下, 以最小耗能的方式进行”。最小耗能原理可表述为: 任何耗能过程都将在与其相应的约束条件下, 以最小耗能的方式进行。对以微小单位体积所代表的各向异性材料中的任意点, 可将该点在开始发生屈服或破坏时的耗能率表示为:

$$\varphi(t)|_{t=0} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^N(t)|_{t=0} \quad (1)$$

同时, 可将导致该点发生屈服或破坏耗能所必需满足的能量蓄积程度表达式(即破坏准则)表示为

$$F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}) = 0 \quad (2)$$

对具有 3 个相互垂直弹性对称面的正交各向异性线弹性材料, 如果将  $x$ ,  $y$  和  $z$  轴选得与材料的弹性主方向重合, 则此时材料的本构关系可表示为:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = S_{11}\sigma_x + S_{12}\sigma_y + S_{13}\sigma_z, \gamma_{xy} = S_{44}\tau_{xy} \text{ 时,} \\ \varepsilon_y = S_{12}\sigma_x + S_{22}\sigma_y + S_{23}\sigma_z, \gamma_{xy} = S_{55}\tau_{yz} \text{ 时,} \\ \varepsilon_z = S_{13}\sigma_x + S_{32}\sigma_y + S_{33}\sigma_z, \gamma_{xy} = S_{66}\tau_{zx} \text{ 时.} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可见, 对于正交各向异性线弹性材料, 正应变只与 3 个正应力有关, 剪应变仅与剪应力有关。因此, 反映在外荷载作用下正交各向异性线弹性材料某点的能量蓄积程度的待定准则(即式(2)), 就可用该点名义应力的二次函数来表示:

$$\begin{aligned} F(\sigma_{ij}) = & a_1\sigma_x^2 + a_2\sigma_y^2 + a_3\sigma_z^2 + a_4\tau_{xy}^2 + a_5\tau_{yz}^2 + \\ & a_6\tau_{zx}^2 + a_7\sigma_x\sigma_y + a_8\sigma_y\sigma_z + a_9\sigma_x\sigma_z + a_{10}\sigma_x + \\ & a_{11}\sigma_y + a_{12}\sigma_z + a_{13} = 0 \quad (4) \end{aligned}$$

其中:  $a_i$  (1, 2, ..., 13) 为待定系数。因为对于正交各向异性材料, 沿弹性主方向的材料抗拉强度、抗压强度通常不等, 而抗剪强度与剪应力的正负无关, 所以, 式(4)仅包含正应力的 1 次项而无剪应力的 1 次项。设由试验测得该种材料的基本强度分别为  $f_{xt}$ ,  $f_{xc}$ ,  $f_{yt}$ ,  $f_{yc}$ ,  $f_{zt}$ ,  $f_{zc}$ ,  $f_{xyb}$ ,  $f_{yzb}$  和  $f_{zxb}$  (它们分别表示沿 3 个弹性主方

向  $x$ ,  $y$  和  $z$  的单轴抗拉强度、抗压强度及与弹性主方向垂直面内的剪切强度), 于是, 根据强度准则的基本性质, 当沿  $x$  轴方向单轴拉、压时, 由式(4)有:

$$a_1\sigma_x^2 + a_{10}\sigma_x + a_{13} = 0。$$

所以,

$$f_{xt} = \frac{-a_{10} + \sqrt{a_{10}^2 - 4a_1a_{13}}}{2a_1},$$

$$-f_{xc} = \frac{-a_{10} - \sqrt{a_{10}^2 - 4a_1a_{13}}}{2a_1};$$

或

$$f_{xt} = \frac{-a_{10} - \sqrt{a_{10}^2 - 4a_1a_{13}}}{2a_1},$$

$$-f_{xc} = \frac{-a_{10} + \sqrt{a_{10}^2 - 4a_1a_{13}}}{2a_1}。$$

由此可确定  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_{10}$  和  $a_{11}$ , 进行公式转换可得<sup>[14]</sup>:

$$F(\sigma_{ij}) = \frac{\sigma_x^2}{f_{xt}f_{xc}} + \frac{\sigma_y^2}{f_{yt}f_{yc}} + \frac{\sigma_z^2}{f_{zt}f_{zc}} + \frac{\tau_{xy}^2}{f_{xyb}^2} + \frac{\tau_{yz}^2}{f_{yzb}^2} + \frac{\tau_{zx}^2}{f_{zxb}^2} + A_1\sigma_x\sigma_y + A_2\sigma_y\sigma_z + A_3\sigma_z\sigma_x + \frac{f_{xc} - f_{xt}}{f_{xt}f_{xc}}\sigma_x + \frac{f_{yc} - f_{yt}}{f_{yt}f_{yc}}\sigma_y + \frac{f_{zc} - f_{zt}}{f_{zt}f_{zc}}\sigma_z - 1 = 0。 \tag{5}$$

式(5)即为正交各向异性线弹性情况下的破坏准则。其中:  $A_1, A_2$  和  $A_3$  为待定系数。

根据最小耗能原理, 式(1)应在满足式(5)的条件下取驻值, 引入 Lagrange 乘子  $\lambda^*$  后, 有:

$$\partial[\varphi(t)]_{t=0} + \lambda^* F(\sigma_x, \dots, \tau_{xy}) / \partial\sigma_{ij} = 0。 \tag{6}$$

继而可推导出待定系数  $A_1, A_2$  和  $A_3$ 。

## 2 砌体破坏准则与抗剪强度平均值

砌体是由力学性能相差悬殊的块体和砂浆组成的复合材料, 砌体具有明显的各向异性性能, 不同方向的单轴压拉及剪切强度均不相同, 因此, 可以应用式(5)建立砌体的破坏准则。

a. 在单轴拉、压情况下, 显然有  $\sigma = f_t, \sigma = -f_c$ 。表明在单轴加载时, 采用该破坏准则的计算结果与试验结果将总是吻合的。

b. 在平面剪拉、剪压情况下, 一般  $\sigma_x$  很小, 由式(5)可得破坏准则为

$$\frac{\sigma_y^2}{f_{yt}f_{yc}} + \frac{\tau_{xy}^2}{f_{xyb}^2} + \frac{f_{yc} - f_{yt}}{f_{yc}f_{yt}}\sigma_y - 1 = 0。 \tag{7}$$

c. 抗剪强度计算公式为

$$\tau_{xy} = f_{xyb} \sqrt{1 - \frac{\sigma_y^2}{f_{yc}f_{yt}} - \frac{f_{yc} - f_{yt}}{f_{yc}f_{yt}}\sigma_y}。 \tag{8}$$

$\sigma_y$  受拉时为正值, 受压时为负值。由于在实际工程中很少出现受拉的情况, 并且与现行砌体结构设计规范相一致, 在此规定  $\sigma_y > 0$ 。根据文献[15]和[16],  $f_t = 0.05f_c$ , 由式(5)可得砌体抗剪强度平均值的表达式:

$$f_{v,m} = f_{v0,m} \sqrt{1 + 19 \frac{\sigma_y}{f_m} - 20 \left( \frac{\sigma_y}{f_m} \right)^2}。 \tag{9}$$

由式(9)可给出完整的剪-压相关曲线。从现有的试验数据看, 采用该式所得计算值与试验值基本吻合<sup>[5,7]</sup>, 且将剪摩、剪压、斜压 3 种破坏形态用一个公式表达出来, 抗剪强度的峰值点在  $\sigma_y/f_m = 0.475$  处。

## 3 砌体静力抗剪强度

### 3.1 砌体静力抗剪强度设计值

通过可靠度校准, 并与较大的试验结果相拟合, 考虑  $\gamma_G$  为 1.20 和 1.35 这 2 种荷载效用组合, 由式(9)可得如下砌体静力抗剪强度设计值计算公式。

当  $\gamma_G = 1.20$  时, 对于砖砌体, 有

$$f_v = f_{v0} \sqrt{1 + 7.1 \left( \frac{\sigma_0}{f} \right) - 2.8 \left( \frac{\sigma_0}{f} \right)^2}; \tag{10}$$

对于混凝土砌块砌体, 有

$$f_v = f_{v0} \sqrt{1 + 18 \left( \frac{\sigma_0}{f} \right) - 0.1 \left( \frac{\sigma_0}{f} \right)^2}; \tag{11}$$

当  $\gamma_G = 1.35$  时, 对于砖砌体, 有

$$f_v = f_{v0} \sqrt{1 + 6.2 \left( \frac{\sigma_0}{f} \right) - 2.2 \left( \frac{\sigma_0}{f} \right)^2}; \quad (12)$$

对于混凝土砌块砌体, 有

$$f_v = f_{v0} \sqrt{1 + 14 \left( \frac{\sigma_0}{f} \right) - 0.1 \left( \frac{\sigma_0}{f} \right)^2}. \quad (13)$$

式中:  $f_v$  为砌体的抗剪强度设计值;  $f_{v0}$  为砌体纯剪作用时的抗剪强度设计值;  $\sigma_0/f$  为轴压比, 在工程结构上, 为了防止斜压破坏的产生, 如同文献[4]那样, 规定  $\sigma_0/f \leq 0.8$ 。

### 3.2 取值比较与分析

对 M2.5~M15 和 MU10~M30 的砖砌体及 Mb5~Mb15 和 MU5~MU20 的混凝土砌块砌体的材料强度组合的各种工况进行计算, 按本文推导的砌体静力抗剪强度公式所得计算值与按文献[4]中公式所得计算值相吻合, 其平均比值为 0.955~1.034。表 1 列出了以 M5 和 MU10 的砖砌体( $f=1.5$  MPa,  $f_{v0}=0.11$  MPa) 和 Mb7.5 和 MU10 的砌块砌体( $f=2.5$  MPa,  $f_{v0}=0.08$  MPa)在不同轴压比( $\sigma_0/f$ )时, 按文献[4]与本文公式计算的比较结果(见表 1)。

由表 1 可知: 随着轴压比的增加, 按本文公式计算的砌体抗剪强度的增加幅度减小, 尤其是轴压比较大时, 本文公式取值较砌体结构设计规范的值减小, 这

与文献[8]的论点一致, 是较合理的; 本文公式避免了文献[4]在砌体抗剪计算公式中对不同砌体的修正系数  $\alpha$  取值依据的不足。

## 4 砌体抗震抗剪强度

### 4.1 砌体抗震抗剪强度设计值

在对砖砌体和混凝土砌块砌体的抗震抗剪强度计算公式各种工况算例进行计算的基础上, 确定砌体抗震抗剪强度设计值计算公式为

$$f_{vE} = \zeta_N^1 f_{v0}. \quad (14)$$

对于砖砌体, 有

$$\zeta_N^1 = 0.8 \sqrt{1 + 10 \left( \frac{\sigma_{0,eq}}{f} \right) - 2.8 \left( \frac{\sigma_{0,eq}}{f} \right)^2}; \quad (15)$$

对于混凝土砌块砌体, 有

$$\zeta_N^1 = 0.8 \sqrt{1 + 42 \left( \frac{\sigma_{0,eq}}{f} \right) - 2.8 \left( \frac{\sigma_{0,eq}}{f} \right)^2}. \quad (16)$$

式中:  $f_{vE}$  为砌体沿阶梯形截面破坏的抗震抗剪强度设计值;  $\sigma_{0,eq}$  为对应于重力荷载代表值的砌体水平截面平均压应力;  $\zeta_N^1$  为砌体抗震抗剪强度的正应力影响系数, 如表 2 所示。

表 1 混凝土静力抗剪强度比较

$\gamma_G$		$\sigma_0/f$								平均 比值	
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8		
1.20	砖砌体	文献[4]中 $f_v^1$	0.133	0.155	0.173	0.194	0.208	0.227	0.236	0.254	1.034
		本文式(10)中 $f_v$	0.143	0.167	0.187	0.203	0.216	0.227	0.236	0.243	
		比值 $f_v/f_v^1$	1.075	1.077	1.081	1.046	1.038	1.000	1.000	0.957	
	砌块砌体	文献[4]中 $f_v^1$	0.120	0.160	0.193	0.230	0.255	0.275	0.308	0.320	
		本文式(11)中 $f_v$	0.134	0.172	0.200	0.229	0.252	0.274	0.295	0.303	
		比值 $f_v/f_v^1$	1.117	1.075	1.036	0.996	0.988	0.996	0.958	0.947	
1.35	砖砌体	文献[4]中 $f_v^1$	0.131	0.152	0.169	0.188	0.208	0.218	0.236	0.242	1.038
		本文式(12)中 $f_v$	0.139	0.162	0.181	0.196	0.209	0.220	0.254	0.237	
		比值 $f_v/f_v^1$	1.061	1.066	1.071	1.043	1.000	1.010	1.076	0.979	
	砌块砌体	文献[4]中 $f_v^1$	0.118	0.150	0.185	0.210	0.243	0.275	0.290	0.320	
		本文式(13)中 $f_v$	0.124	0.156	0.182	0.205	0.226	0.245	0.262	0.279	
		比值 $f_v/f_v^1$	1.051	1.040	0.983	0.976	0.930	0.891	0.900	0.872	

表2 砌体抗震抗剪强度的正应力影响系数  $\zeta_N^1$

Table 2 Vertical compressive stress coefficient of brick masonry aseismic shear strength

砌体类别	$\sigma_{0,eq}/f$									
	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
普通砖、多孔砖	0.8	0.978	1.123	1.36	1.549	1.766	1.842	1.958	2.060	2.148
混凝土砌块	0.8	1.407	1.819	2.438	2.903	3.320	3.692	4.215	4.310	4.582

抗剪强度峰值点取本文推导的  $\sigma_y/f_m=0.475$ , 其对应的  $\sigma_{0,eq}/f=1.6\sigma_y/f_m=0.76$ , 为避免斜压破坏的发生, 偏安全地限定轴压比  $\sigma_{0,eq}/f < 0.8$ , 如表2所示。

4.2 砌体抗震抗剪强度取值比较与分析

对 M5~M15 和 MU10~MU30 砖砌体及 Mb7.5~Mb15 和 MU7.5~MU20 混凝土砌块砌体的材料强度组合的各种工况进行计算。表3和表4列出了按本文提出的砌体抗震抗剪强度计算公式中正应力影响系数与现行抗震规范<sup>[3]</sup>的比较结果。

通过比较表3和表4可知:

a. 按本文公式与文献[3]公式计算的砖砌体抗震抗剪强度正应力影响系数比较吻合, 其平均比值为0.904~1.082, 总体上与现行抗震规范的可靠度接近。

b. 将砖砌体的  $\sigma_{0,eq}/f_{v0}$  限制在15时<sup>[3]</sup>, 若砖砌体材料等级较低, 则大部分强度等级的砖砌体轴压比  $\sigma_{0,eq}/f > 1$ , 这在设计中显然是不可能的; 而对于高强材料M15和MU30的砖砌体, 其轴压比  $\sigma_{0,eq}/f$  为0.647,  $\sigma_y/f_m=0.404$ , 不能充分利用高强材料的承载能力。当抗震规范把混凝土砌块砌体的  $\sigma_{0,eq}/f_{v0}$  限制在20时, 若采用高强材料 Mb15 和 MU20 的混凝土砌块砌体,

表3 砖砌体正应力影响系数比较

Table 3 Comparison of brick masonry vertical compressive stress coefficients

		$\sigma_0/f_{v0}$								平均 比值
		0	1	3	5	7	10	15	20	
规范中 $\zeta_N$		0.800	1.00	1.28	1.50	1.70	1.95	2.32	2.635	
M5MU10, $f=1.5$ MPa, $f_{v0}=0.11$ MPa	$\sigma_0/f$ 本文中 $\zeta_N^1$ $\zeta_N^1/\zeta_N$		0.073 1.048 1.048	0.220 1.400 1.094	0.367 1.658 1.105	0.513 1.858 1.093	0.733 2.090 1.072	1.100		1.082
M5MU15, $f=1.83$ MPa, $f_{v0}=0.11$ MPa	$\sigma_0/f$ 本文中 $\zeta_N^1$ $\zeta_N^1/\zeta_N$		0.060 1.010 1.010	0.180 1.317 1.029	0.301 1.550 1.033	0.421 1.737 1.022	0.601 1.960 1.005	0.902 2.226 0.959	1.202	1.010
M7.5MU15, $f=2.07$ MPa, $f_{v0}=0.14$ MPa	$\sigma_0/f$ 本文中 $\zeta_N^1$ $\zeta_N^1/\zeta_N$		0.068 1.033 1.033	0.203 1.366 1.067	0.338 1.612 1.075	0.473 1.810 1.065	0.676 2.036 1.044	1.104		1.057
M7.5MU20, $f=2.39$ MPa, $f_{v0}=0.14$ MPa	$\sigma_0/f$ 本文中 $\zeta_N^1$ $\zeta_N^1/\zeta_N$		0.059 1.010 1.010	0.176 1.310 1.023	0.293 1.537 1.025	0.410 1.721 1.012	0.586 1.943 0.996	0.879 2.210 0.953		1.003
M10MU10, $f=1.89$ MPa, $f_{v0}=0.17$ MPa	$\sigma_0/f$ 本文中 $\zeta_N^1$ $\zeta_N^1/\zeta_N$		0.090 1.096 1.096	0.270 1.500 1.172	0.450 1.777 1.185	0.630 1.990 1.171	0.900 2.225 1.141	1.350		1.153
M10MU15, $f=2.31$ MPa, $f_{v0}=0.17$ MPa	$\sigma_0/f$ 本文中 $\zeta_N^1$ $\zeta_N^1/\zeta_N$		0.074 1.050 1.050	0.221 1.402 1.095	0.368 1.723 1.149	0.515 1.860 1.094	0.746 2.100 1.077	1.104		1.093
M15MU30, $f=3.94$ MPa, $f_{v0}=0.17$ MPa	$\sigma_0/f$ 本文中 $\zeta_N^1$ $\zeta_N^1/\zeta_N$		0.043 0.955 0.955	0.129 1.198 0.936	0.216 1.392 0.928	0.302 1.552 0.913	0.431 1.751 0.898	0.647 2.010 0.866	0.863 2.197	0.904

表 4 混凝土砌块砌体正应力影响系数比较

Table 4 Comparison of concrete block masonry vertical compressive stress coefficient

		$\sigma_0/f_{v0}$										平均 比值	
		0	1	3	5	7	10	15	20	25	30		35
	规范中 $\zeta_N$	1.25	1.75	2.25	2.60	3.10	3.95	4.80	5.65				
Mb7.5MU7.5,	$\sigma_0/f$	0.041	0.124	0.207	0.290	0.415	0.622	0.829					
$f=1.93$ MPa,	本文中 $\zeta_N^1$	0.80	1.318	1.986	2.475	2.878	3.389	4.082	4.657				
$f_{v0}=0.08$ MPa	$\zeta_N^1/\zeta_N$	1.054	1.135	1.100	1.107	1.093	1.033	0.970					1.070
Mb7.5MU10,	$\sigma_0/f$	0.032	0.096	0.160	0.224	0.320	0.480	0.640	0.800				
$f=2.5$ MPa,	本文中 $\zeta_N^1$	0.80	1.224	1.791	2.212	2.563	3.010	3.611	4.136	4.582			
$f_{v0}=0.08$ MPa	$\zeta_N^1/\zeta_N$	0.979	1.023	0.983	0.986	0.971	0.914	0.862	0.811				0.941
Mb10MU10,	$\sigma_0/f$	0.032	0.097	0.161	0.226	0.323	0.484	0.645	0.806				
$f=2.79$ MPa,	本文中 $\zeta_N^1$	0.80	1.224	1.797	2.218	2.574	3.022	3.637	4.151	4.598			
$f_{v0}=0.09$ MPa	$\zeta_N^1/\zeta_N$	0.979	1.027	0.986	0.990	0.975	0.921	0.865	0.814				0.945
Mb10MU15,	$\sigma_0/f$	0.022	0.067	0.112	0.157	0.224	0.336	0.448	0.560	0.672	0.784		
$f=4.02$ MPa,	本文中 $\zeta_N^1$	0.80	1.110	1.562	1.910	2.204	2.580	3.110	3.560	3.96	4.320	4.656	
$f_{v0}=0.09$ MPa	$\zeta_N^1/\zeta_N$	0.888	0.893	0.849	0.848	0.832	0.787	0.742	0.700				0.817
Mb15MU15,	$\sigma_0/f$	0.020	0.059	0.098	0.137	0.195	0.293	0.390	0.49	0.586		0.781	
$f=4.61$ MPa,	本文中 $\zeta_N^1$	0.80	1.085	1.490	1.805	2.071	2.411	2.892	3.294	3.658	3.972	4.532	
$f_{v0}=0.09$ MPa	$\zeta_N^1/\zeta_N$	0.868	0.851	0.802	0.797	0.778	0.732	0.686	0.647				0.770
Mb15MU20,	$\sigma_0/f$	0.016	0.048	0.079	0.111	0.158	0.238	0.317	0.396	0.475		0.633	
$f=5.68$ MPa,	本文中 $\zeta_N^1$	0.80	1.034	1.388	1.659	1.898	2.201	2.634	2.997	3.317	3.610	4.115	
$f_{v0}=0.09$ MPa	$\zeta_N^1/\zeta_N$	0.827	0.793	0.737	0.730	0.710	0.667	0.624	0.587				0.710

其轴压比  $\sigma_0, eq/f=0.633$ ,  $\sigma_y/f_m=0.396$ , 也不能充分利用高强度材料的承载能力。本文将砌体抗剪强度正应力影响系数的取值, 限定在轴压比低于  $\sigma_0, eq/f=0.8$  是合理的。

c. 与文献[3]相比, 适当提高了低材料强度等级砌体的正应力影响系数, 降低了高材料等级砌体的正应力影响系数。文献[3]中, 砂浆强度等级  $\geq M10$ , 对应于  $f_{v0}$  的取值砖砌体恒为 0.17 MPa, 混凝土砌块砌体恒为 0.09 MPa, 将造成随正应力  $\sigma_0, eq$  增大, 正应力影响系数单调增加, 并且造成当砂浆强度等级  $\geq M10$  时, 各强度等级砌体的正应力影响系数的取值相同。尤其是混凝土砌块砌体  $f_{v0}$  取值较低,  $\sigma_0, eq/f_{v0}$  相对较高, 必然造成正应力影响系数取值过高。在正应力  $\sigma_0, eq$  相等的条件下, 对于采用高强度材料的砖砌体轴压比  $\sigma_0, eq/f$  比低材料强度的砖砌体的轴压比小, 正应力影响系数的取值必然小于低材料等级砖砌体的取值, 而不会取值相同。对应于抗震规范中  $\sigma_0, eq/f_{v0}$  的每个正应力影响系数的取值, 按本文公式的轴压比  $\sigma_0, eq/f$  控

制时, 取值必然会减小, 是合理的。

d. 规范采用  $\sigma_0, eq/f_{v0}$  控制砌体抗剪强度, 由于  $f_{v0}$  取值的离散性太大, 取值数据有限, 势必造成砌体抗剪强度计算值精度不高。而采用  $\sigma_0, eq/f$  控制砌体抗剪强度, 抗压试验数量较多, 取值离散性较小。

## 5 结 论

a. 根据最小耗能原理提出了砌体在剪-压复合受力下的相关曲线, 从理论上推导了砌体在剪-压复合受力下砌体静力抗剪强度和抗震抗剪强度的计算公式, 对现有的通过以试验结果拟合的抗剪强度计算公式有较大的改进。

b. 提出的砌体抗剪强度计算公式实现了将砌体静力抗剪强度与抗震抗剪强度用统一的公式来表达, 既反应了剪摩、剪压、斜压 3 种破坏形态, 且有望规范 GB 50003—2001 和 GB 50011—2001 在确定砌体抗

剪强度时采用一致的方法, 同时避免了确定砖砌体和混凝土砌块砌体的抗震抗剪强度时采用库仑理论和主拉应力理论的不足。并且砌体抗剪强度计算公式中统一用轴压比( $\sigma_0/f$ 或 $\sigma_{0,eq}/f$ )来表示, 物理概念明确, 改进了目前抗震规范用 $\sigma_{0,eq}/f_{v0}$ 控制砌体抗剪强度的不足。

c. 在大量工况计算及算例分析的基础上, 确定了砌体抗震抗剪强度的正应力影响系数, 并将其取值限定在 $\sigma_{0,eq}/f < 0.8$ , 避免了随竖向正应力 $\sigma_{0,eq}$ 增加, 砌体抗震抗剪强度单调增加的缺陷, 也防止了在确定的混凝土砌块砌体抗震抗剪强度正应力影响系数低轴压比时取值偏低, 高轴压比时取值过高的不合理现象。

### 参考文献:

- [1] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
SHI Chu-xian. Masonry structure theory and design[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [2] ACI530.1-02/ASCE6-02/TMS602-02. Building code requirements for masonry structures (ACI530-02/ASCE5-02/TMS402-02) and specification for masonry structures[S].
- [3] GB 50011—2001, 建筑抗震设计规范[S].  
GB 50011—2001, Code for seismic design of buildings[S].
- [4] GB 50003—2001, 砌体结构设计规范[S].  
GB 50003—2001, Code for design of masonry structures[S].
- [5] 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 Wan-kang, ZHU Xi-cheng, LIAO Chun-seng. A review on the study on shear strength of masonry and a new calculating method[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1995, 17(4): 41-49.
- [6] 骆万康, 王 勇. 砌体剪压复合受力的动力特性研究[J]. 重庆建筑大学学报, 1999, 21(5): 57-63.  
LUO Wan-kang, WANG Yong. The study on the response of brick masonry under shear-compression dynamic loading[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1999, 21(5): 57-63.
- [7] 骆万康, 朱希诚, 王 勇. 砌体规范抗剪与抗震抗剪强度公式的统一模式[C]//施楚贤. 现代砌体结构. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 31-38.  
LUO Wan-kang, ZHU Xi-cheng, WANG Yong. Uniform model of code for masonry shear strength and aseismic shear strength formula[C]//SHI Chu-xian. Modern Masonry Structures. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000: 31-38.
- [8] 李晓文, 王庆霖, 梁兴文. 无筋墙体抗剪计算[C]//施楚贤. 现代砌体结构. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 59-65.  
LI Xiao-wen, WANG Qing-lin, LIANG Xing-wen. Shear calculation of plain wall[C]//SHI Chu-xian. Modern Masonry Structures. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000: 59-65.
- [9] 黄尚安, 邹银生, 周福霖. 底部框剪上部混凝土砌块结构在水平地震作用下的动力响应[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(3): 500-505.  
HUANG Shang-an, ZOU Yin-sheng, ZHOU fu-lin. Dynamic responses of concrete masonry building supported by frame shear wall structure at bottom two stories under horizontal earthquake action[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(3): 500-505.
- [10] 施楚贤, 梁建国. 砌体结构学习辅导与习题精解[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.  
SHI Chu-xian, LIAN Jian-guo. Masonry structure study tutorship and exercise solution[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [11] 周筑宝. 最小耗能原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
ZHOU Zhu-bao. Least energy consumption principle[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [12] 周筑宝, 卢楚芬, 郑学军. 按能量原理建立强度理论的新探索与展望[J]. 长沙铁道学院学报, 1996, 14(4): 1-9.  
ZHOU Zhu-bao, LU Chu-feng, ZHENG Xue-jun. The new exploration and prospects for the strength theory based on energy principle[J]. Journal of Changsha Railway University, 1996, 14(4): 1-9.
- [13] 周筑宝, 卢楚芬, 郑学军. 最小耗能原理及其验证和应用前景展望[J]. 长沙铁道学院学报, 1997, 15(4): 57-64.  
ZHOU Zhu-bao, LU Chu-feng, ZHENG Xue-jun. Principle of least energy consumption and its verification and application prospects[J]. Journal of Changsha Railway University, 1997, 15(4): 57-64.
- [14] 周筑宝, 卢楚芬. 正交各向异性材料的强度理论[J]. 长沙铁道学院学报, 1998, 16(3): 77-82.  
ZHOU Zhu-bao, LU Chu-feng. Strength theory for orthogonal anisotropic materials[J]. Journal of Changsha Railway University, 1998, 16(3): 77-82.
- [15] 王庆霖. 无筋墙体的抗震剪切强度[C]//钱义良. 砌体结构研究论文集. 长沙: 湖南大学出版社, 1989: 103-115.  
WANG Qing-lin. Aseismic shear strength of plain wall[C]//QIAN Yi-liang. Masonry Structure Research Collection of Thesis. Changsha: Hunan University Press, 1989: 103-115.
- [16] 骆万康. 砌体抗剪强度建议公式与砌体规范和抗震规范的拟合[C]//施楚贤. 现代砌体结构. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 52-58.  
LUO Wan-kang. Masonry shear strength suggested by matching with code for masonry and aseismic design[C]//SHI Chu-xian. Modern Masonry Structures. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000: 52-58.