

文章编号: 1000-4750(2012)06-0202-09

恒压受弯无筋砌体承重墙的受弯能力 历过程特征研究

张文芳¹, 马军卫¹, 常建兰²

(1. 太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西, 太原 030024; 2. 山西省建筑科学研究院, 山西, 太原 030001)

摘 要: 为探索水平地震作用下恒压受弯无筋砌体承重墙的受弯力学性能, 研究了正截面在不同阶段弹塑性受弯能力的历过程。基于砌体正截面非均匀应力的本构关系假定及拉压区应力图形的等效化, 对不同初裂情况下各阶段的恒压受弯能力计算公式作了理论推导, 并进行了编程计算分析。结果表明: 砌体墙在通常轴压比下, 正截面边缘首先拉裂, 之后受弯能力不会退化而是逐渐增大; 达到极限受弯承载力后, 截面产生压碎, 受弯能力退化呈直线下降型; 弯曲拉裂是从截面局部开始和发展的, 受弯能力呈现类似配钢筋混凝土墙柱的延性, 拉裂和压碎的开展过程随轴压比的增大而缩短。砌体墙在高轴压比下, 正截面首先压碎, 随后受弯能力持续下降。

关键词: 无筋砌体承重墙; 恒压受弯; 正截面受弯能力; 历过程; 极限受弯承载力

中图分类号: TU362 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.09.0672

RESEARCHES ON BENDING CAPACITY COURSE OF PLAIN MASONRY BEARING WALL UNDER BENDING AND INVARIABLE AXIAL FORCE

ZHANG Wen-fang¹, MA Jun-wei¹, CHANG Jian-lan²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. Shanxi Academy of Building Research, Taiyuan, Shanxi 030001, China)

Abstract: The course route of elastic-plastic bending capacity during different phases is studied in order to investigate the mechanics properties of plain masonry bearing walls which carry bending moments and invariable axial forces under a horizontal earthquake action. The formulas for bending capacity at each stage of different circumstances of initial cracking or crushing are theoretically deduced on the basis of a constitutive relationship assumption under uneven stress and stress figure equalization on a normal section. Furthermore, programming and numerical simulating are carried out. The researches indicate that normal section cracks firstly under a usual value of axial compressive stress to strength and bending capacity will not degenerate later but increase gradually, and normal section crushes and bending capacity degenerates linearly after ultimate bending capacity is reached; bending cracking begins at local edges and gradually expands, meanwhile bending capacity exhibits some kind of ductility similar to that of a reinforced concrete wall or column; the course of tensile cracking or compressive crushing becomes shorter along with the increase of compression ratios. On the other hand, the results indicate that normal section crushes firstly under the higher value of compression ratios and course route curves of bending capacity show the trend of a continuous decline.

Key words: plain masonry bearing wall; bending under invariable axial force; bending capacity on normal section; course route; ultimate bending capacity

收稿日期: 2010-09-17; 修改日期: 2011-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978177); 太原市城建科研项目(并建管字 2008-392); 山西省科技基金项目(2010021020-1); 山西省科技攻关项目(20110313026-3)

通讯作者: 张文芳(1967—), 男, 山西壶关人, 教授, 博士, 博导, 主要从事工程结构抗震减震设计理论与应用研究(E-mail: zhangwenfang@tyut.edu.cn).

作者简介: 马军卫(1981—), 男, 陕西蒲城人, 硕士生, 从事建筑结构抗震理论研究(E-mail: sl_majunwei369@sina.com);

常建兰(1977—), 女, 山西清徐人, 工程师, 硕士, 从事工程结构抗震与加固研究(E-mail: changjianlanf@163.com).

砌体结构墙体在地震下的破坏,一般是极限受剪承载力不足而导致的剪切破坏。剪切破坏形态有四种:斜截面剪切主拉破坏、斜压破坏、剪压破坏和正截面剪切滑移破坏,这些剪切破坏是墙体的整截面相对平动错位或滑移。剪切破坏时,墙体上、下两部分几乎完全截断和错位,复位很差;承载力损失大,除了部分墙体存在构造柱拉结外,接触面基本仅存在压应力和干摩擦力。

根据汶川震害考察研究^[1],砌体承重墙的平面内破坏还存在少量的正截面弯曲开裂形态,其体现为正截面自边缘向中性轴逐渐发展的弯曲受拉开裂或继而受压压碎,在变形过程中产生弯曲转动,而非剪切平动。正截面弯曲裂缝类似于混凝土剪力墙,一般表现为可闭合的水平向或接近水平向的受拉裂缝,进一步有斜向或接近竖向的局部弯曲受压裂缝^[1-2](如图1所示)。此外,根据一些试验现象及数据^[3-4],砌体墙剪跨比较大或轴压力较小时,容易产生弯曲型开裂,且较剪切破坏的严重程度要低。



图1 正截面弯曲开裂形态地震实例

Fig.1 Configuration of normal section bending cracking

墙体弯曲破坏时,由于砌体抗拉强度对受弯承载力贡献很小,弯曲受拉裂缝可简单修补或不需修复,若有受压裂缝时可根据损坏程度作适当修复。

长期以来,认为砌体墙弯曲开裂即意味着将倾覆倒塌,认为受弯极限状态是危险的,对砌体墙“谈弯色变”。因而在砌体结构抗震设计中,虽不作平面内受弯承载力验算,但通过某些概念设计来加强受弯承载力,实质是要避免发生弯曲破坏形态。

然而,美国自21世纪以来,加强砌体结构受弯极限状态研究,并将成果引入规范^[5],不仅不限制砌体墙的地震弯曲失效形态,而且还通过引导弯

曲失效形态来抑制剪切破坏。由于弯曲裂缝一般仅发生在砌体墙截面的局部边缘,损坏程度较小,可逆性大,弯曲损坏后适修性较好,便于减少震后拆除重建量。鉴于此,应积极倡导弯曲型开裂形态,将其成为实现砌体结构高效防震防灾的重要途径。

在砌体结构中,由于无洞墙的整体高宽比或有洞墙内部墙段的局部高宽比一般较小,地震变形以剪切为主、弯曲变形成分小,特别是地震剪力较弯矩也稍占优势、剪跨比较小。为实现弯曲开裂形态,需适当采取有关结构措施,例如降低承重墙肢拉结部分(连梁)的高度及刚度、大墙肢截面设分隔缝等,以加大地震弯矩影响^[6]。

目前,我国对砌体墙抗压、抗剪性能研究多,但对正截面受弯破坏过程及其抗震性能研究很少。个别研究考虑了弯曲变形或弯曲开裂对砌体墙的地震剪力分配或抗侧能力的影响^[7-9]。现行有关规范只要求进行抗震受剪承载力分析,未作抗弯分析要求及弯曲形态引导,有关抗震受弯能力的一些规定也是为了防止先发生弯曲失效而从结构布置及抗震措施等方面规定的。

承重砌体墙在水平地震作用下的平面内受弯破坏过程,可近似视为轴力恒定不变,而在弯矩作用下正截面发生弯曲拉裂或压碎、达到受弯极限状态直到退化^[10-12]。本文将这种在平面内水平作用下承受恒定竖载及弯矩作用的砌体承重墙称为恒压受弯砌体墙。

恒压受弯砌体墙在弯曲破坏形态下受弯能力历经过程有何特征、其受弯承载力与开裂变形究竟如何呢?

考虑到无筋砌体与素混凝土类似,抗拉强度很低,应尽量避免其用于受拉构件或纯受弯构件。当无筋砌体用于受压构件时,即为无筋承重砌体墙,由于轴力的存在,即使抗拉强度很低,承重砌体墙也会具有较大的受弯承载力;若要提高其抗弯延性耗能,还需设置抗弯纵筋。为了从理论上研究恒压受弯砌体墙的受弯承载力,暂不考虑抗弯钢筋及其延性耗能作用、不考虑弯曲形态的控制方法,本文就无筋承重砌体墙,研究其在恒定轴压力下从正截面受弯初裂到极限受弯承载力、再到受弯能力退化的历经过程。

1 砌体墙恒压受弯的弹塑性计算模型

分析下列问题:矩形截面的无筋砌体承重墙,

其截面长度为 h ，墙厚为 b ，截面形心主惯性矩为 I ；砌体的抗压强度为 f ，沿通缝弯曲抗拉强度为 f_{tm} 。截面形心轴上作用有恒定的轴力 N_0 ，弯矩 M 及剪力 V 作用在墙体平面内。假定墙体不发生剪切滑移破坏或斜截面破坏等，研究正截面弯曲拉裂或压碎后受弯能力的历经变化过程。

分析采用下列假定：

1) 假定砌体墙正截面的应变保持为平面；正截面边缘局部拉裂或局部压碎后，剩余正截面的应变仍保持为平面。

2) 砌体在应变不断增大时(即应变加载工况，本文不考虑往复作用的应变卸载工况)，不均匀应力状态下应力-应变的本构关系采用脆塑性模型。如图 2(a)所示，在不超过极限应变时采用二次抛物线，超过极限应变时，应力“跌落”为 0。其中，极限抗压和抗拉强度分别为 f 和 f_{tm} ，对应的压应变和拉应变分别为 ε_0 和 ε_{0t} ，一般有 $\varepsilon_0 / \varepsilon_{0t} > 10$ ；不均匀应力状态下的受压极限应变 ε_u 和受拉极限应变 $\varepsilon_{u,t}$ 分别取 $1.5 \varepsilon_0$ 和 $1.5 \varepsilon_{0t}$ 。

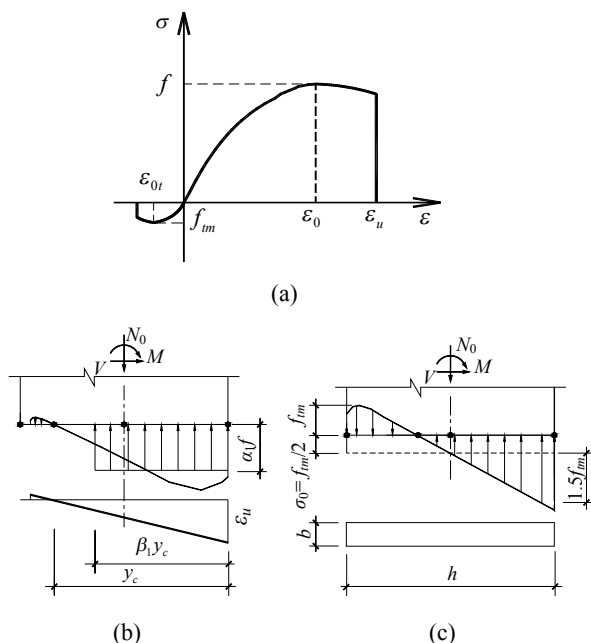


图 2 砌体墙计算模型

Fig.2 Masonry wall models

关于上述脆塑性模型，根据国内外学者的研究成果，应力-应变本构关系的数学表达式有指数型(或对数型)、多项式型(包括抛物线型)和分式型等，全过程曲线的表达方法有用一个关系式表达的或用几个关系式分别表达上升和下降段的。鉴于对砌体本构关系曲线的拟合式尚没有相对统一的认识，

且不同表达式差异主要对塑性应力分布及其力矩有一定影响，而对受弯能力的上升退化历经特征的影响不大，故本文在探索砌体承重墙的受弯能力时，为简化分析，受压本构关系式参考有关文献近似选用抛物线型^[13-14]，砌体受拉本构关系目前研究成果很少，也近似取抛物线型。并取应力降到极限强度 75% 时的应变作为极限应变；超过这个极限应变时，应力退化速度加快，对受弯能力的贡献迅速减小，故忽略其影响，对本构关系进行截断处理，应力取为 0。

3) 当中和轴位于正截面内、且受压区边缘达到极限应变时，将其应力等效为矩形均匀分布的应力，从极限应变纤维处开始，均匀等效应力值为 $\alpha_1 f$ ，等效分布长度为 $\beta_1 y_c$ ，如图 2(b)，其中 y_c 为受压区的原始长度。按应力的合力及力矩等效原则，得到等效参数为 $\alpha_1 = 0.82$ ， $\beta_1 = 0.92$ 。当截面中和轴在正截面边缘时，对应的轴力达到界限轴力 $N_b = \alpha_1 f \cdot \beta_1 h b = \alpha_1 \beta_1 f b h$ ，比值 $\zeta_b = N_b / (f b h) = \alpha_1 \beta_1 = 0.75$ 。

当中和轴位于正截面之外、且 $\zeta = N_0 / (f b h) \geq 1.0$ 时，截面轴力近似为均匀分布，故取 $\alpha_1 = 1.0$ ， $\beta_1 = 1.0$ 。

当中和轴位于正截面之外、且 $\zeta_b < \zeta < 1.0$ 时， α_1 、 β_1 采用内插法取值，从而 $\alpha_1 = 0.73 \zeta + 0.27$ ， $\beta_1 = 0.33 \zeta + 0.67$ 。

4) 当截面边缘受弯压碎时或者当砌体墙恒压轴力下的压应力 σ_0 与抗拉强度 f_{tm} 之比 $\sigma_0 / f_{tm} \geq 0.5$ 时，受压区的压应力合力远大于受拉区，可偏安全地忽略受拉区应力对受弯能力的贡献。例如在图 2(c)中，当 $\sigma_0 = 0.5 f_{tm}$ 时，受压区压应力合力大于受拉区拉应力合力的 4 倍以上，故可忽略受拉区应力。由于工程结构中的砌体承重墙一般均有 $\sigma_0 / f \geq 0.05$ 、 $f_{tm} / f < 1/10$ ，亦即 $\sigma_0 / f_{tm} \geq 0.5$ ，因此按假定 4)，一般砌体承重墙均可忽略受拉区应力对受弯能力的贡献。

轴力 N 作用下的截面均匀应力 σ_0 为： $\sigma_0 = N_0 / (h b)$ 。将 $\zeta = \sigma_0 / f = N_0 / (f b h)$ 称为砌体的轴压比，其中 f 是指砌体抗压强度实际值，与通常采用的抗压强度设计值不同。

2 初裂弯矩的计算方法

砌体墙在轴向恒压和不断增大的弯矩共同作

用下, 截面产生首先拉裂或压碎形成初裂。将初裂时截面承受的弯矩称为初裂弯矩 M_{cr} 。

1) 截面的初裂为首先压碎时。

当正截面受压边缘先达到极限压应变而发生首先压碎时, 忽略受拉区应力, 设等效受压区长为 y , 有:

$$y \cdot b \cdot \alpha_1 f = N_0 \quad (1)$$

从而

$$y = \frac{N_0}{\alpha_1 f b} = \zeta h / \alpha_1 \quad (2)$$

假定中和轴位于正截面内, 按 $\alpha_1=0.82$ 、 $\beta_1=0.92$ 计算 y , 当受压区长度 $y_c = y / \beta_1 = \zeta h / (\alpha_1 \beta_1) \leq h$ 时, y 采用该计算值; 当 $y_c = y / \beta_1 = \zeta h / (\alpha_1 \beta_1) \geq h$ 时, 中和轴位于正截面外, 应按式(2)和 $\alpha_1=0.73\zeta+0.27$ 重新计算 y 。

初裂受弯能力为:

$$M_c = N_0 [h/2 - y/2] = 3fW\zeta(1 - \zeta/\alpha_1) \quad (3)$$

式中, $W = bh^2/6$ 。

2) 截面的初裂为首先拉裂时。

当正截面受拉边缘先达极限拉应变而发生首先拉裂时, 由于受压边缘未达极限状态, 受压区的等效应力参数 α_1 不能采用上述计算模型中的数值, 其初裂受弯能力近似按线弹性计算, 即:

$$M_t = (f_{tm} + \sigma_0)I / (h/2) = fW(f_{tm}/f + \zeta) \quad (4)$$

3) 初裂判断及初裂弯矩 M_{cr} 。

按式(1)~式(4)进行计算, 当 $M_t \leq M_c$ 时, 初裂是受拉边缘先拉裂, 取 $M_{cr} = M_t$; 否则初裂是受压边缘先压碎, 取 $M_{cr} = M_c$ 。

下面进一步研究初始拉裂或压碎之后, 砌体墙正截面受弯能力 M_R 的历过程程和极限受弯承载力。

3 极限受弯承载力的计算公式

砌体墙正截面的初裂为首先压碎时, 随着压碎长度的增加, 受弯能力将逐渐降低, 因而初裂弯矩即为极限受弯承载力 M_u ; 若初裂为首先拉裂时, 拉裂长度将逐渐发展, 最终使受压边缘达到极限压应变而压碎, 此时截面达到极限受弯承载力 M_u 。

为此, 将砌体墙截面达到极限压应变 ε_u 作为达到承载能力极限状态的标志。在承载能力极限状态下, 忽略受拉区应力, 只考虑受压应力, 计算公式同式(1)~式(3)。

4 正截面压碎后受弯能力计算公式

受压边缘初始压碎之后, 压碎区长度逐渐发展并退出工作, 剩余正截面逐渐缩小, 正截面受拉区的拉应力变为 0 再变为受压应力(如图 3(a)), 或者轴压力 N_0 较大时正截面上的压应力逐渐增大, 直到剩余截面不足以承受竖向恒定轴力(如图 3(b)), 或者直到计算的受弯能力 M_R 趋于 0 时, 结束计算。

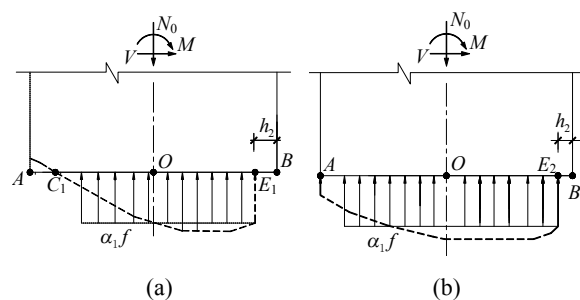


图 3 首先压碎后的受弯发展阶段

Fig.3 Bending development stages after initial crushing

设压碎区长度为 h_2 , 则剩余截面长度为 $h-h_2$; 并设等效受压区长为 y , 忽略受拉应力, 同理有:

$$y = \frac{N_0}{\alpha_1 f b} = \zeta h / \alpha_1 \quad (5)$$

假定中和轴位于正截面之内, 按 $\alpha_1=0.82$ 、 $\beta_1=0.92$ 计算 y , 当受压区长度 $y_c = y / \beta_1 = \zeta h / (\alpha_1 \beta_1) \leq h-h_2$ 时, y 采用该计算值; 当 $y_c = y / \beta_1 = \zeta h / (\alpha_1 \beta_1) \geq h-h_2$ 时, 中和轴位于正截面之外, 按 $\alpha_1=0.73\zeta+0.27$ 、 $\beta_1=0.33\zeta+0.67$ 重新计算 y 和 y_c 。当重新计算的受压区长度 $y_c = y / \beta_1 = \zeta h / (\alpha_1 \beta_1) \leq h-h_2$ 时, y 采用该计算值; 否则剩余截面不足以承受竖向轴力 N_0 , 结束计算。

由所计算的 y , 得受弯能力 M_R 为:

$$M_R = N_0 [h/2 - h_2 - y/2] = 3fW\zeta(1 - 2h_2/h - \zeta/\alpha_1) \quad (6)$$

计算的受弯能力 M_R 趋于 0 时, 结束计算。

5 正截面首先拉裂后受弯能力计算

5.1 初始拉裂后至极限受弯承载力的历经阶段

该阶段指正截面首先拉裂后, 拉裂长度不断发展, 直到受压边缘刚好压碎而达到受弯承载力极限状态。

在受拉区初始拉裂之后、受压区边缘压碎之前, 设拉裂长度为 h_1 , 剩余截面为 DB 段。当剩余截面 DB 段的受拉边缘继续开裂、而受压边缘未压碎时, 由于受压边缘未达极限状态, 受压区的等效

应力参数 α_1 不能按上述计算模型中的数值采用, 在这一过程中, 其受弯能力 M_{Rt} 近似按线弹性计算, 如图 4(a), 即以剩余截面为基准按下式计算:

$$\frac{M_{lt}}{I_l} y_{lt} = f_{tm} + \frac{N_l}{A_l} \quad (7)$$

其中:

$$N_l = N_0, \quad M_{lt} = M_{Rt} - N_l e, \quad A_l = (h - h_1)b,$$

$$I_l = (h - h_1)^3 b / 12, \quad y_{lt} = (h - h_1) / 2, \quad e = h_1 / 2$$

将上述公式代入式(7)得:

$$M_{Rt} = \frac{fbh^2}{6} \left[\frac{f_{tm}}{f} \left(1 - \frac{h_1}{h} \right)^2 + \frac{N_0}{fhb} \left(1 - \frac{h_1}{h} + 3 \frac{h_1}{h} \right) \right] = fW \left[\frac{f_{tm}}{f} \left(1 - \frac{h_1}{h} \right)^2 + \zeta \left(1 - \frac{h_1}{h} + 3 \frac{h_1}{h} \right) \right] \quad (8)$$

按式(8)计算的 M_{Rt} 不大于按式(1)~式(3)计算的 M_c 时, 取受弯能力 $M_R = M_{Rt}$; 否则受弯能力按下一阶段计算。

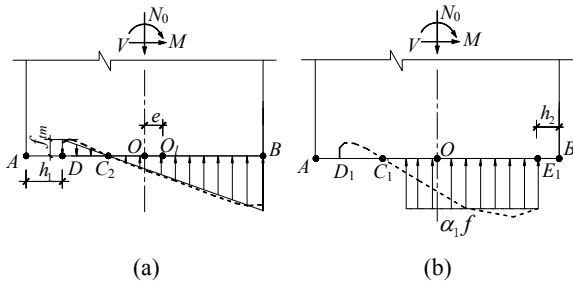


图 4 首先拉裂后的受弯发展阶段

Fig.4 Bending development stages after initial cracking

5.2 受弯能力的退化阶段

该阶段是指正截面边缘刚好压碎而达到受弯承载能力极限状态后, 随着压碎区长度 h_2 的逐渐发展并退出工作, 同时, 截面的受拉区由拉应力变为 0 再变为受压应力, 或者截面的拉裂区裂缝闭合并进一步受压, 直到剩余截面减小到不足以承受竖向恒定轴力, 如图 4(b)所示, 其中计算的受弯能力 M_R 趋于 0 时, 结束计算。

受压边缘出现压碎后, 设压碎区长度为 h_2 , 则剩余可受压的截面最大长度为 $h - h_2$; 并设等效受压区长为 y , 同理, y 可按式(5)计算, 受弯能力 M_R 按式(6)计算。

6 计算分析

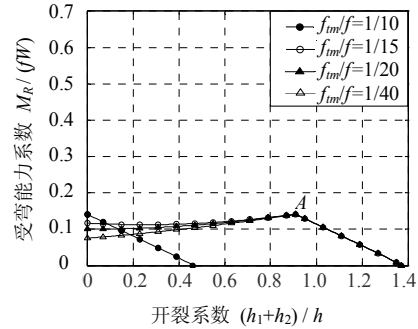
根据前述正截面弹塑性受弯能力的理论研究结果, 初裂弯矩 M_{cr} 按本文第 2 目中第 3)项的方法计算; 首先压碎后的 M_R , 可依次按式(5)、式(6)

计算, 首先拉裂后的受弯能力 M_R , 依次按式(3)、式(8)、式(5)、式(6)计算。从这些公式看出, M_R 随着拉裂、压碎区相对长度比 h_1/h 、 h_2/h 的发展而变化, 且与轴压比 ζ 、 f_{tm}/f 等有关。据此进行了编程分析, 计算中 h_1/h 及 h_2/h 的增量步长取 0.01。

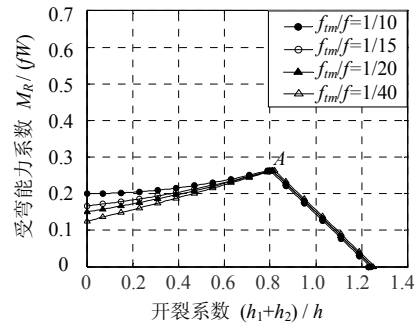
由于受弯能力 M_R 与常量 fW 的比值 $M_R/(fW)$ 为一无量纲系数, 用受弯能力系数 $M_R/(fW)$ 代表受弯能力, 用开裂系数 $(h_1 + h_2)/h$ 代表正截面的拉裂与压碎长度。

6.1 受拉边缘初始拉裂后的受弯能力历过程计算

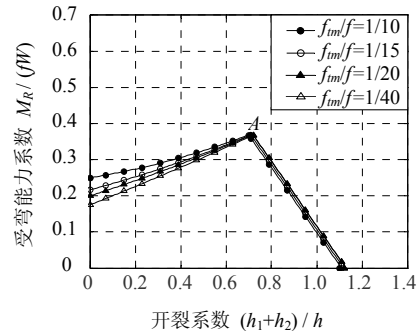
根据前面的理论分析, ζ 取 0.05、0.10、0.15、0.20、0.30、0.40, 在上述 ζ 值下, f_{tm}/f 分别取 1/10、1/15、1/20、1/40, 其正截面首先发生拉裂。对该 24 种工况分别计算, 得到弹塑性受弯能力历过程如图 5 所示。



(a) $\zeta=0.05$



(b) $\zeta=0.10$



(c) $\zeta=0.15$

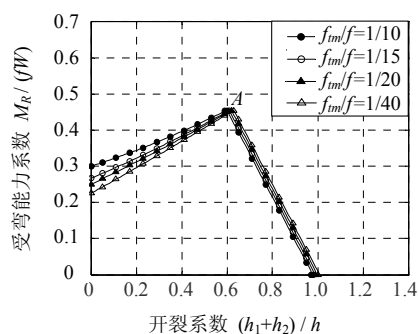
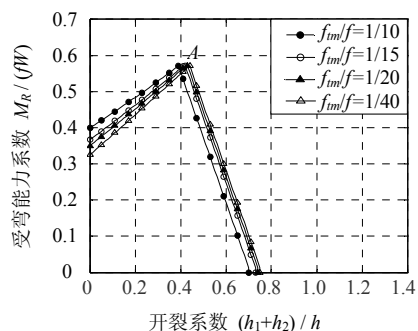
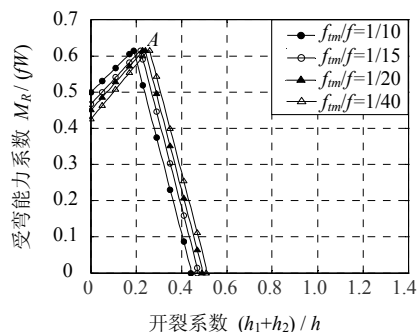
(d) $\zeta=0.20$ (e) $\zeta=0.30$ (f) $\zeta=0.40$

图5 受弯能力的历过程计算结果之一

Fig.5 Result 1 of bending capacity course

由上述计算结果可看到:

1) 受拉边缘初始拉裂情况下, 历经曲线存在一个拐点 A 。到达拐点 A 前, 为截面拉裂长度比 h_1/h 的发展阶段, 总拉裂长度比 h_1/h 在 $0 \sim 0.95$, 该阶段受弯能力逐渐增加。在到达拐点 A 时, 达到极限受弯承载力; 超过 A 点后, 为截面压碎且压碎长度比 h_2/h 的发展阶段, 压碎长度比在 $0.2 \sim 0.45$ 之间, 该阶段受弯能力降低, 且近似呈直线退化, 退化速度随 ζ 增大而加快。

因而, 正截面初始弯曲拉裂后, 受弯能力不会如纯受弯构件那样迅速退化, 反而是逐渐增大; 其中 A 点代表极限受弯承载力, 其值往往要大于初裂弯矩。

2) 受弯能力呈现类似配筋混凝土墙柱的延性。

且随着轴压比 ζ 的增大, 拐点 A 逐渐向左侧移动, 墙体截面的拉裂过程随 ζ 增大而缩短; 同时压碎长度也随 ζ 增大而缩短。

3) 在竖轴方向, 随着轴压比 ζ 的增大, 拐点 A 向上方移动。这表明, 边缘初始为拉裂情况下, 截面极限受弯承载力随 ζ 增大而提高。

4) $M_R/(fW)$ 的历过程及特征参数主要受轴压比 ζ 的影响; f_{tm}/f 对受弯能力历过程的影响较小, 基本可忽略其影响。由于砌体抗压强度较抗剪、抗拉强度的离散性小, 故受弯承载力的离散性会低于受剪承载力的离散性, 且会受到轴压力离散性的控制。

6.2 受压边缘首先压碎后的受弯能力历过程计算

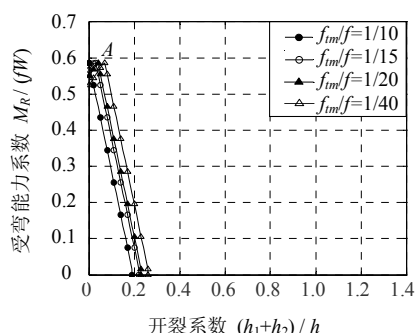
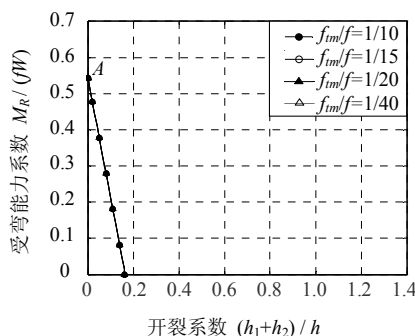
ζ 取 0.50 、 0.55 、 0.60 、 0.70 、 0.80 、 0.90 , 在上述 ζ 值下, f_{tm}/f 分别取 $1/10$ 、 $1/15$ 、 $1/20$ 、 $1/40$, 其正截面首先发生压碎。对该 24 种工况分别计算, 得到受弯能力历过程计算结果如图 6 所示。可见:

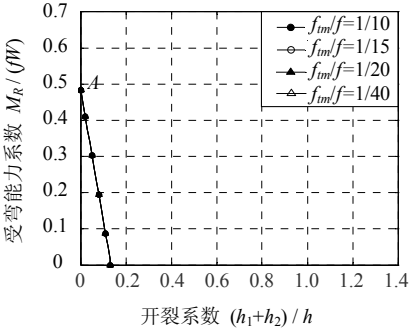
1) 边缘首先发生压碎情况下, 受弯能力历过程曲线只有下降段, 极限受弯承载力即等于初裂弯矩。

2) 随着轴压比 ζ 的增大, 压碎长度缩短, 总压碎长度比 h_2/h 在 $0 \sim 0.2$ 之间。

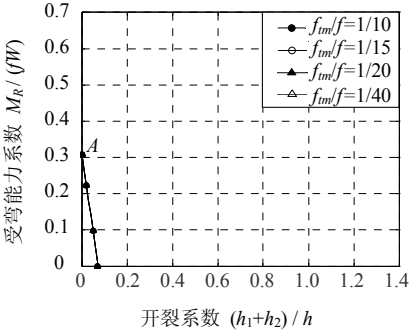
3) 在竖轴方向, 随轴压比 ζ 的增大, A 点向下移动, 这表明, 极限受弯承载力降低。

4) $M_R/(fW)$ 变化过程仅与轴压比 ζ 有关。

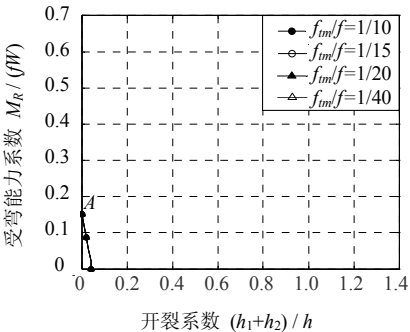
(a) $\zeta=0.50$ (b) $\zeta=0.55$



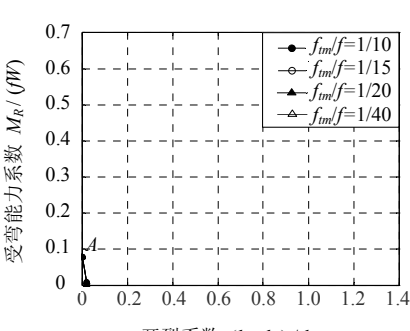
(c) $\zeta=0.60$



(d) $\zeta=0.70$



(e) $\zeta=0.80$



(f) $\zeta=0.90$

图 6 受弯能力的历过程计算结果之二
Fig.6 Result 2 of bending capacity course

6.3 极限受弯承载力 M_u 与 M_{cr} 比值分析

将受弯能力历过程中的最大值称为极限受弯承载力, 简称受弯承载力, 记作 M_u 。图 5 和图 6 中, 点 A 代表极限受弯承载力, 起点代表初裂

弯矩 M_{cr} 。
极限受弯承载力与初裂弯矩的比值 M_u / M_{cr} 为一无量纲系数, 称为受弯强化比, 其随 ζ 及 f_{fm} / f 的变化见表 1 和图 7。

表 1 M_u / M_{cr} 和 $M_u / (fW)$ 随 ζ 、 f_{fm} / f 的变化
Table 1 Values of M_u / M_{cr} or $M_u / (fW)$ with ζ and f_{fm} / f

轴压比 ζ	M_u / M_{cr}						$M_u / (fW)$					
	f_{fm} / f						f_{fm} / f					
	1/10	1/15	1/20	1/40	平均值		1/10	1/15	1/20	1/40	平均值	
0.05	1.00	1.21	1.41	1.88	1.38		0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	
0.10	1.32	1.58	1.76	2.11	1.69		0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	
0.15	1.47	1.70	1.84	2.10	1.78		0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	
0.20	1.51	1.70	1.81	2.02	1.76		0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	
0.25	1.50	1.65	1.75	1.90	1.70		0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	
0.30	1.43	1.56	1.63	1.76	1.60		0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	
0.35	1.34	1.44	1.50	1.60	1.47		0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	
0.40	1.23	1.32	1.37	1.45	1.34		0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	
0.45	1.11	1.18	1.22	1.28	1.20		0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	
0.50	1.00	1.03	1.06	1.12	1.05		0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	
0.55	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	
0.60	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	
0.65	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	
0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	
0.75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
0.80	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	
0.85	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	
0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	
0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	

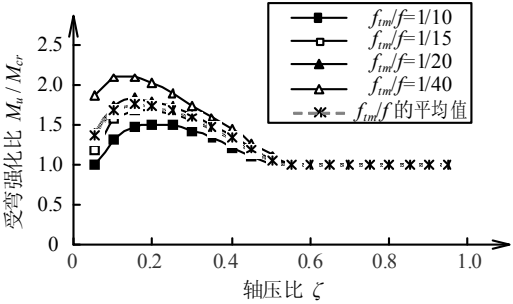


图 7 M_u / M_{cr} 随 ζ 、 f_{fm} / f 的变化曲线
Fig.7 Curves of M_u / M_{cr} with ζ and f_{fm} / f

可见 M_u / M_{cr} 的比值约在 1.0~2.3 之间。随 ζ 的增大, M_u / M_{cr} 先增大后减小, 约在 $\zeta = 0.15$ 附近, M_u / M_{cr} 取得最大值。 ζ 一定时, M_u / M_{cr} 一般随 f_{fm} / f 减小而增大。

6.4 极限受弯承载力与 ζ 的关系

从上述分析知, 极限受弯能力系数 $M_u / (fW)$ 受 f_{fm} / f 的影响较小, 而受 ζ 影响明显, $M_u / (fW)$ 值随 ζ 的变化如表 1。

还计算了 ζ 取其他值, f_{tm}/f 分别取 1/10、1/15、1/20、1/40 时, $M_u/(fW)$ 的值, 见表 1。

将表 1 中同一 ζ 值、不同 f_{tm}/f 值下 $M_u/(fW)$ 的平均值随 ζ 的变化绘于图 8 中。

图 8 中明显看到, 随轴压比 ζ 的增大, 墙体的极限受弯承载力先增大后减小, $M_u/(fW)$ 约在 $\zeta = 0.35 \sim 0.50$ 时取得最大值约为 0.60。此外, $M_u/(fW)$ 在 $\zeta = 0.75$ 处存在一个拐点, 这是由于中和轴从截面内移到了截面外, 受弯承载力的降低速度减缓了。

将图 8 的计算离散点进行拟合, 其中, 当 $0 < \zeta < 0.75$ 采用二次抛物线拟合, 当 $0.75 \leq \zeta < 1$ 用直线拟合, 结果如下式:

$$M_u/(fW) = \begin{cases} -3.66\zeta^2 + 3.00\zeta, & 0 < \zeta < 0.75 \\ -0.76\zeta + 0.76, & 0.75 \leq \zeta < 1 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)的拟合曲线绘在图 8 中。可见, 拟合结果与计算数据十分逼近。因而, $M_u/(fW)$ 与 ζ 的关系, 在 $\zeta \leq 0.75$ 时, 可用二次抛物线来近似, 在 $0.75 < \zeta < 1$ 时可用直线来近似。

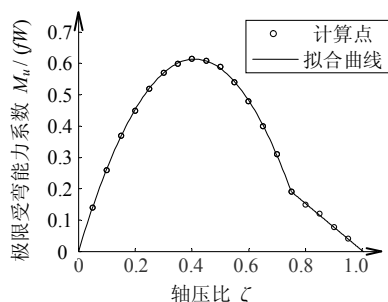


图 8 极限受弯承载力随轴压比的变化趋势

Fig.8 Curve of ultimate bending capacity with axial compressive ratio

6.5 计算与试验结果对比分析

文[4]的 W-5、W-7 无筋砌体墙, 砂浆强度等级 M7.5, 恒压应力为 0.3MPa, 轴压比 $\zeta = 0.08$, 其高宽比分别为 0.77、1.6。试验时在墙体顶部往复拟静力加载, 墙体底部产生水平或接近水平的受拉裂缝(图 9), 属于弯曲型破坏, 最后在墙底最终滑移破坏, 试验停止。试验的滞回曲线及骨架曲线见该文献中的图 1 和图 2(限于篇幅, 该图从略), 其骨架曲线与本文相应轴压比 ζ 下图 5(b)~图 5(c)的曲线特征相似, 特别是试件 W-7 骨架曲线有一个较长的接近水平向发展的阶段。其中, W-5、W-7 拐点 A 的 $M_u/(fW)$ 试验值分别为 0.3、0.29; 砌体抗压强度 f 取均值 3.8MPa, 按本文计算结果为 0.22, 较试

验值略小偏安全。分析认为原因是计算模型中将截面边缘纤维达到极限压应变 ϵ_u 时的受弯能力作为受弯极限值, 此时截面应力已有衰减, 更主要的是, 抗压强度 f 计算取值与实际值之间偏差可能较大。



图 9 试件 W-5 的弯曲破坏

Fig.9 Bending failure figure of specimen W-5

7 结论

通过建立计算模型, 研究了恒压受弯无筋砌体墙不同初裂情况下各历经阶段的受弯能力计算方法, 对受弯能力变化过程作了分析, 得出下列结论:

(1) 砌体墙在通常轴压比(即 $\zeta \leq 0.50$) 情况下, 恒压受弯时正截面将产生初始拉裂; 且拉裂后受弯能力不会退化, 而是逐渐增大。在达到极限受弯承载力后, 承载力的退化近似呈直线型, 退化速度随 ζ 增大而加快, 与钢筋混凝土小偏压构件的退化类似。

弯曲拉裂是从截面局部开始和逐渐发展的, 具有较大延性。 $M_R/(fW)$ 的历过程受轴压比 ζ 影响较大。随着 ζ 的增大, 正截面拉裂、压碎长度均缩短, 极限受弯承载力增大。

(2) 砌体墙在较高轴压比(即 $\zeta > 0.50$) 情况下, 恒压受弯时正截面将产生初始压碎; 之后, 受弯能力历过程呈持续下降, 初裂弯矩即为极限受弯承载力; 极限受弯承载力随 ζ 增大而降低。

(3) 受弯能力系数 $M_R/(fW)$ 在 $\zeta = 0.35 \sim 0.50$ 时取得最大值约为 0.60。此外, M_u/M_{cr} 的值在 1.0~2.3 之间, 在 $\zeta = 0.15$ 时取得最大值。

(4) 受弯承载力的离散性要低于受剪承载力的离散性, 且会受到轴压力离散性的控制。

上述基于正截面不同应变阶段的受弯能力研究结果, 为估计往复作用下砌体墙受弯破坏的滞回骨架特征及即将开展的专题试验提供了理论指导。

参考文献:

- [1] 张文芳. 砌体墙的面内受弯损坏形态及其抗震优势实例剖析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊 1): 130—135.

- Zhang Wenfang. Researches on in-plane flexural destruction modes and earthquake resistant advantages by way of representative examples [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Suppl 1): 130—135. (in Chinese)
- [2] 中国建筑科学研究院. 2008 年汶川地震建筑震害图片集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 205—220.
China Academy of Building Research. Photo collection of 2008 Wenchuan earthquake damage to buildings [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 205—220. (in Chinese)
- [3] 张文芳, 程文灏, 李爱群, 税国斌. 九层房屋滑移隔震的试验、分析及应用研究[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(3): 60—68.
Zhang Wenfang, Cheng Wenrang, Li Aiqun, Shui Guobin. Experiments, theoretical analyses and applied research on base sliding isolation of multi-storey buildings [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(3): 60—68. (in Chinese)
- [4] 郝彤, 刘立新, 王仁义. 混凝土多孔砖墙体抗震性能试验研究[C]// 杨伟军, 高连玉, 梁建国. 砌体结构理论与新型墙材应用. 北京: 中国城市出版社, 2007: 240—244.
Hao Tong, Liu Lixin, Wang Renyi. Experimental researches on seismic performance of concrete perforated brick masonry [C]// Yang Weijun, Gao Lianyu, Liang Jianguo. Masonry Structure Theory and New Type Wall Material Application. Beijing: China City Press, 2007: 240—244. (in Chinese)
- [5] ACI 530-05/ASCE 5-05/TMS 402-05, Building code requirements for masonry structures [S]. Boulder: The Masonry Standards Joint Committee, 2005.
- [6] 张文芳, 武玉龙, 常建兰, 等. 免剪切破坏型抗震抗倒砌体房屋及其建造方法[P]. 中国: 200810079314.X, 2008-8-27.
Zhang Wenfang, Wu Yulong, Chang Jianlan, et al. Seismic masonry structures escaping from shear breakage and construction methods [P]. China: 200810079314.X, 2008-8-27. (in Chinese)
- [7] 张文芳, 莫振宝, 常建兰. 砌体房屋无洞独立墙段层间侧移刚度的转角影响研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(6): 36—40.
Zhang Wenfang, Mo Zhenbao, Chang Jianlan. Research of influence of end rotation angle on equivalent lateral stiffness of wall segment of masonry structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(6): 36—40. (in Chinese)
- [8] 孟钢, 周晓夫, 王菁, 高小旺, 孙嘉瑞. 砖墙与钢筋砼墙组合结构弯曲对砖墙承载力影响[J]. 工程力学, 1997, 14(增刊 II): 119—123.
Meng Gang, Zhou Xiaofu, Wang Jing, Gao Xiaowang, Sun Jiarui. The influence on brick walls' bearing capacity of composite structure bending made of brick and reinforced concrete [J]. Engineering Mechanics, 1997, 14(Suppl II): 119—123. (in Chinese)
- [9] 郭瑞峰, 奚肖凤, 蔡贤辉, 等. 弯曲对组合墙体抗侧力的影响[J]. 建筑结构, 1997, 27(2): 14—18.
Wu Ruifeng, Xi Xiaofeng, Cai Xianhui, et al. The influence of bending on the lateral loading capacity of composite masonry walls [J]. Building Structure, 1997, 27(2): 14—18. (in Chinese)
- [10] 蔡贤辉, 郭瑞峰, 奚肖凤, 等. 组合砌体剪力墙的抗弯承载能力[J]. 建筑结构, 1999, 29(3): 3—6.
Cai Xianhui, Wu Ruifeng, Xi Xiaofeng, et al. Bending bearing capacity calculation of composite masonry shear wall [J]. Building Structure, 1999, 29(3): 3—6. (in Chinese)
- [11] 张文芳, 程文灏, 李爱群. 地震倾覆力矩对多层砌体结构墙体的影响[J]. 建筑结构, 1998, 28(9): 8—11.
Zhang Wenfang, Cheng Wenrang, Li Aiqun. Influence of overturning moment on wall in multi-storey masonry structure under earthquake [J]. Building Structure, 1998, 28(9): 8—11. (in Chinese)
- [12] 梁建国, 张望喜, 郑勇强. 钢筋混凝土-砖砌体剪力墙抗震性能[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(3): 61—69.
Liang Jianguo, Zhang Wangxi, Zheng Yongqiang. Seismic performance of composite walls made of reinforced concrete and brick masonry [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(3): 61—69. (in Chinese)
- [13] 杨伟军, 施楚贤. 砌体受压本构关系研究成果的述评[J]. 四川建筑科学研究, 1999, 25(3): 52—55.
Yang Weijun, Shi Chuxian. Comment on research achievement of constitutive relationship of compressive brickwork [J]. Building Science Research of Sichuan, 1999, 25(3): 52—55. (in Chinese)
- [14] 易伟建, 李鹏. 轴心受压砌体本构关系的试验研究[J]. 中国科技论文在线, 2006, 1(2): 153—156.
Yi Weijian, Li Peng. Experiments Study of Masonry Constitutive Relationship under Axial Compression [J]. Science Paper Online, 2006, 1(2): 153—156. (in Chinese)