

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201710110

剪切破坏的配筋砌块剪力墙失效判定准则

黄艳霞^{1,2}, 黄群艺¹, 康国政², 王凤来³, 张 瑀³

(1. 西南交通大学峨眉校区 交通土建系, 四川 峨眉山 614202; 2. 西南交通大学 力学工程学院, 成都 610031;
3. 振动与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150001)

摘 要: 为建立基于受力状态的剪切破坏配筋砌体剪力墙的失效判定准则, 以低周往复荷载作用下发生剪切破坏的 290 mm 厚配筋砌块剪力墙试验数据为基础, 推导结构受力状态与外荷载之间的关系并给出相应的计算公式, 通过分析构件在不同受力阶段的破坏机理, 引入构件基于受力状态承载能力包络线的概念及相关计算方法. 结合承载能力包络线与结构受力状态-荷载关系曲线, 建立构件基于受力状态的失效判定准则, 从而确定其开裂、失效和极限荷载. 与试验的对比分析表明, 本文建立的准则能够准确预测剪切破坏配筋砌块剪力墙的开裂、失效和极限荷载. 该准则为结构分析和墙体失效荷载的确定提供了一种全新的途径, 并拓展了试验数据的应用途径.

关键词: 受力状态; 准则; 承载能力包络线; 失效荷载; 极限荷载; 剪力墙

中图分类号: TU375.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)08-0156-05

Criterion for failure judgement of reinforced masonry shear wall failed in shear

HUANG Yanxia^{1,2}, HUANG Qunyi¹, KANG Guozheng², WANG Fenglai³, ZHANG Yu³

(1. Civil Engineering Faculty in Emei, Southwest Jiaotong University, Emei 614202, Sichuan, China;

2. School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150001, China)

Abstract: Test data of reinforced masonry shear walls failed in shear with thickness of 290 mm under cyclic load were employed to establish a criterion for judging the failure loads of reinforced masonry shear walls based on stress state. The relationship between the structural stress state and external load was deduced, and the concept of bearing capacity envelop was introduced based on the failure mechanics of the wall at different stages. By combining the stress state-load relationship with the bearing capacity envelop, a stress state-based criterion was established to judge the crack, failure and ultimate loads of shear walls, which was validated through the comparison between the calculated results and the test results. The proposed criterion provides a new way for structural analysis and extents the application of test data.

Keywords: stress state; criterion; bearing capacity envelop; failure load; shear wall

配筋砌体剪力墙结构作为一种新型的结构体系, 与钢筋混凝土结构相比, 其造价低 10% ~ 18%, 节省材料 30% ~ 50%, 施工速度可提高 25% 以上, 且配筋砌体剪力墙结构强度高、延性好、耗能能力强^[1]. 对配筋砌块剪力墙的研究大致可分为三类: 1) 试验手段, 分析配筋砌体剪力墙的承载能力影响因素, 如竖向钢筋的数量及分布情况、水平钢筋、竖向压应力、边界约束情况等对构件承载力的影响^[2-6]; 2) 有限元等数值分析软件模拟配筋砌体剪力墙的破坏过程、破坏模式、破坏机理及承载能力^[7-8]; 3) 在大量试验数据的基础上统计分析构件的性能^[9]. 这些研究主要是研究构件的承载能力及耗能能力, 尚未见有人基于应变从宏观角度直接判定结构是否失效并建立相应失效判定准则.

现有研究表明, 弯曲破坏配筋砌块剪力墙竖向钢筋上归一化的应变平方和值能反应结构的受力状态^[10], 且基于结构受力状态的方法可较好预测未知墙板的失效荷载^[11]. 剪切破坏的配筋砌体剪力墙是否具有相似规律有待进一步研究. 本文以低周往复荷载作用下发生剪切破坏的 290 mm 厚配筋砌块剪力墙试验数据^[12]为研究对象, 建立基于结构受力状态的配筋砌体剪力墙剪切失效判定准则.

1 剪力墙模型和试验方案

1.1 剪力墙模型的制作与参数

剪力墙由哈工大集团哈特新型建材制品厂提供的 290 厚 MU20(名义值)混凝土小型空心砌块砌筑而成. 其中, 砌块的主规格为 390 mm × 290 mm × 190 mm(已开槽), 辅助块为 190 mm × 290 mm × 190 mm(已开槽), 其抗压强度平均值为 19.21 MPa; 采用抗压强度平均值为 20.86 MPa 的混合砂浆砌筑; 灌芯混凝土为微膨胀细石混凝土, 其抗压强度平

收稿日期: 2017-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(51508472, 51508132, 51508476)

作者简介: 黄艳霞(1984—), 女, 博士, 讲师

通信作者: 张 瑀, zhangyuhit@hit.edu.cn

均值为 12.85 MPa. 剪力墙试验模型高2 200 mm,宽 1 400 mm, 竖向钢筋采用 HRB335 直径 16 mm、25 mm钢筋,水平钢筋采用 HPB235 直径 8 mm、10 mm钢筋,其构造参数见表 1,尺寸及配筋见图 1.

表 1 剪力墙模型构造参数

Tab. 1 Test parameters				
试件 编号	正压力/ MPa	水平 配筋	水平配 筋率/%	竖向配 筋率/%
J1	1.5	2 φ 8@200	0.173	0.38
J2	2.0	2 φ 8@200	0.173	0.38
J3	1.5	2 φ 10@400	0.135	0.38
J4	2.0	2 φ 10@400	0.135	0.38

注:配筋率=纵向钢筋面积/截面面积.

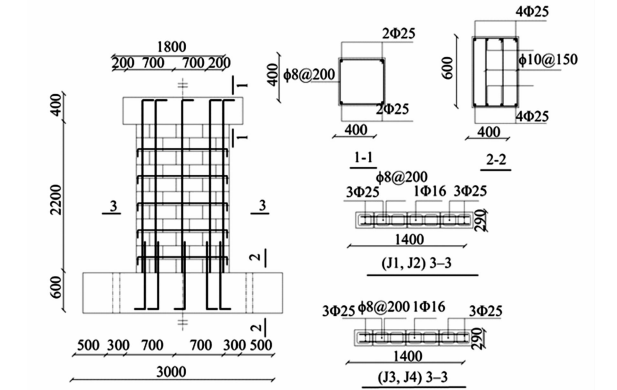
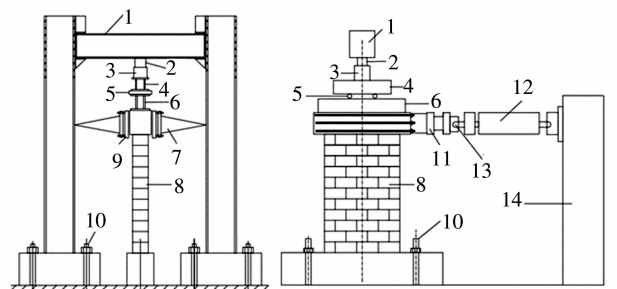


图 1 剪力墙模型构造

Fig. 1 Geometry dimension and details of reinforcement

1.2 加载装置及加载方案

采用力-位移混合控制加载机制:在剪力墙开裂之前以力控制加载,开裂之后以位移控制加载. 首先在剪力墙顶部施加竖向力,当竖向力达到预定值(600 kN/800 kN,即正压力为 1.5 MPa/2.0 MPa)时持荷,然后施加水平荷载,每级荷载增量为理论极限荷载的 20%. 在加载过程中,通过观察试件并监测位移曲线斜率是否发生变化来判断墙体是否开裂. 当剪力墙开裂后,以位移控制加载,每级加载位移为开裂位移值,当水平荷载下降到极限水平荷载的 70%或更低时,停止加载. 加载装置和方案见图 2、3.



- 1.门式钢架;2.压力传感器;3.千斤顶;4.钢分配梁;5.滚轴;6.钢垫梁;
- 7.侧向支撑;8.试件;9.侧向支撑滚轴;10.地锚;11 钢连接端头;
- 12.作动器;13.球铰;14.反力墙

图 2 加载装置

Fig. 2 Loading instruments

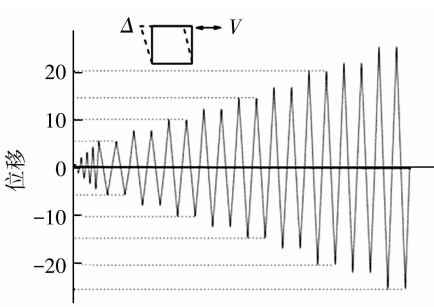


图 3 加载方案

Fig. 3 Loading steps

1.3 墙体试验现象

总体来说,4 片墙均表现出剪切破坏特征. 当荷载较小时,首先在墙体根部灰缝处出现水平拉裂缝;随着横向荷载的增加,墙上出现沿砌块灰缝与砌块接触面的阶梯型斜裂缝,且裂缝的长度和宽度随着荷载的增加而缓慢发展;随着外荷载的进一步增加,墙体上出现贯通砌块的斜裂缝,并逐渐发展形成多条平行的 X 型交叉斜裂缝;随着外荷载继续增加,墙体中下部水平钢筋屈服,墙体的承载力下降,墙体上交叉斜裂缝的数量不再增加,裂缝的宽度和长度不断发展直到贯通. 试验现象描述及分析见文献[12].

2 剪力墙受力状态分析

归一化的应变平方和值可以用来反应结构的受力状态^[10]. 为从理论上得到结构受力状态参数与荷载的关系曲线,本文分析了剪力墙在开裂前和开裂后两种状态下的受力状态. 在开裂前,剪力墙处于弹性工作阶段,其刚度及受力面积基本保持不变,受力状态参数可表示为

$$S_1 = \frac{\sum \varepsilon^2}{(\sum \varepsilon^2)_{\max}} = \frac{1}{(\sum \varepsilon^2)_{\max}} \left(\frac{F}{EA} \right)^2 = \frac{1}{(\sum \varepsilon^2)_{\max} (EA)^2} F^2. \tag{1}$$

式中: $\sum \varepsilon^2$ 为各级荷载作用下墙上各测点处的正应变平方和, $(\sum \varepsilon^2)_{\max}$ 为各级荷载作用下墙上所有测点的正应变平方和的最大值, F 为外荷载, E 为墙体的弹性模量, A 为墙体横截面面积 (即荷载的受力面积). 令

$$a_1 = \frac{1}{(\sum \varepsilon^2)_{\max} (EA)^2}, \text{ 有 } S_1 = a_1 F^2. \tag{2}$$

开裂后,墙体的刚度及受力面积均发生变化,其受力状态可表示为

$$S_2 = \frac{1}{(\sum \varepsilon^2)_{\max}} \frac{(F - F_{cr})^2}{(E'A')^2} + S_{cr} = \frac{1}{(\sum \varepsilon^2)_{\max} (E'A')^2} (F - F_{cr})^2 + S_{cr}, \tag{3}$$

式中: E' 为墙体开裂后的弹性模量, A' 为墙体开裂后

的荷载受力面积, F_{cr} 为墙体的开裂荷载, S_{cr} 为墙体开裂受力状态值.

剪力墙的弹性模量 E' 及受力面积 A' 会因为荷载的存在而持续减小, 即 $\frac{1}{(E'A')^2}$ 随着荷载的增大而增大. 为简化计算, 可用与外荷载相关的函数 $k(F)$ 来代替 $\frac{1}{(\sum \varepsilon^2)_{\max} (E'A')^2}$, 要求 $k(F)$ 随着外荷载的增大而增大. 根据函数递增的变化规律, 假设 $k(F) = a_2 F(a_2 > 0)$, 开裂后剪力墙的受力状态可表示为

$$S_2 = a_2 F (F - F_{cr})^2 + S_{cr}. \quad (4)$$

对 J1 在正负向荷载作用下的竖向钢筋上的应变数据进行拟合, 得到 $a_1 = 1 \times 10^{-6} \text{ kN}^{-2}$, $a_2 = 7 \times 10^{-8} \text{ kN}^{-3}$. 于是, 剪力墙受力状态计算公式为

$$S = \begin{cases} a_1 F^2, & F \leq F_{cr}; \\ a_2 F (F - F_{cr})^2 + S_{cr}, & F > F_{cr}. \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)得到 J1 ~ J4 的结构受力状态 - 荷载关系曲线, 与试验结果对比见图 4 ~ 7. 按照式(5)计算得到的结构受力状态曲线与试验得到的受力状态曲线变化趋势一致, 理论受力状态 - 荷载曲线与试验受力状态 - 荷载曲线略有差异, 主要因为: 1) 进行理论推导的时候假定构件开裂前钢筋与砌体是完全刚性黏结的, 未考虑两者之间的滑移; 2) 实测数据中包含着各种其他因素造成的误差; 3) 试验过程中有部分测点失效. 式(5)能有效反映剪力墙整体的实时受力状态.

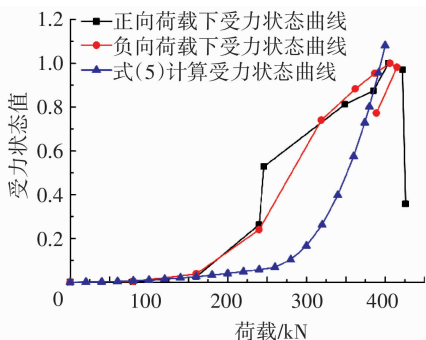


图 4 剪力墙 J1 的受力状态曲线

Fig. 4 Stress state curve of Wall J1

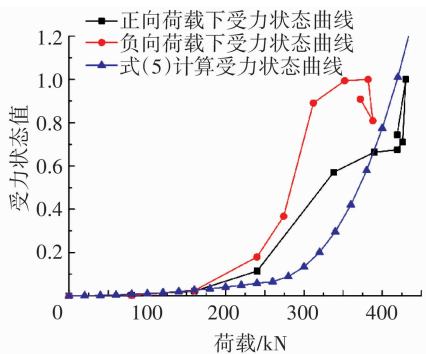


图 5 剪力墙 J2 的受力状态曲线

Fig. 5 Stress state curve of Wall J2

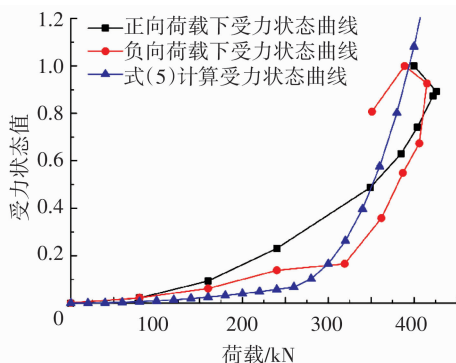


图 6 剪力墙 J3 的受力状态曲线

Fig. 6 Stress state curve of Wall J3

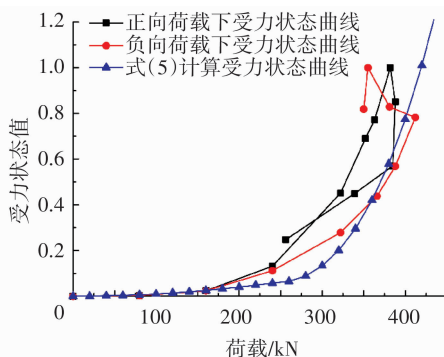


图 7 剪力墙 J4 的受力状态曲线

Fig. 7 Stress state curve of Wall J4

3 剪力墙失效荷载判定准则

得到剪力墙的受力状态随外荷载的变化规律后, 需要确定剪力墙的开裂荷载、失效荷载及极限荷载. 剪力墙开裂时, 主要表现为混凝土受拉破坏; 剪力墙剪切失效是以墙体上产生斜裂缝为判定标准的, 即墙上的主拉应力超出墙体的抗拉强度; 而极限承载力则与墙体中水平钢筋的布置密切相关. 本文根据构件不同受力阶段的破坏机理, 提出基于受力状态的开裂、失效及承载能力包络线的概念, 一旦剪力墙的受力状态曲线超出相应的包络线范围, 则剪力墙开裂、失效或达到极限承载力. 根据量纲分析方法, 基于受力状态的剪力墙开裂包络线 S_{cr} 定义为

$$S_{cr} = \frac{C_{cr}}{kF}. \quad (6)$$

式中: C_{cr} 为剪力墙开裂承载能力值, 其量纲为 $[N]$; S_{cr} 为剪力墙开裂受力状态值, 是一个无量纲的物理量; F 为外荷载, 其量纲为 $[N]$; k 为无量纲系数.

定义剪力墙失效和极限承载能力包络线 S_{fail} 、 S_u :

$$S_{fail} = \frac{C_{fail}}{kF}, \quad (7)$$

$$S_u = \frac{C_u}{kF}, \quad (8)$$

式中 C_{fail} 、 C_u 表示剪力墙的失效及极限承载能力值.

剪力墙的开裂、失效和极限承载能力值是计算包络线的关键。本文根据剪力墙在不同阶段的破坏机理,给出相应的承载力计算公式。

当剪力墙上的拉应力超出了混凝土的抗拉强度时,剪力墙开裂,即

$$\sigma_t - \sigma_N = f_t, \quad (9)$$

式中: σ_t 为由横向力在剪力墙底部产生的拉应力, σ_N 为剪力墙竖向压应力, f_t 为剪力墙的抗拉强度设计值。

由试验现象知道,第一条裂缝通常出现在墙体底部的灰缝处,于是有

$$\sigma_{\vee c} = \frac{M}{W} = \frac{6FH}{bB^2}. \quad (10)$$

式中: b 为墙体厚度, B 为墙体宽度, H 为水平力的作用点到墙底灰缝处的距离, $\sigma_{\vee c}$ 为由横向力产生的拉/压应力。将式(10)带入式(9)可得到剪力墙开裂承载力值计算式为

$$C_{cr} = \frac{bB^2(f_t + \sigma_N)}{6H}. \quad (11)$$

当剪力墙失效时,剪力墙上的剪应力超过灌芯砌体的抗剪强度,同时考虑竖向压应力对墙体抗剪强度的影响有

$$\sigma_v = f_{vg,m} + \alpha\sigma_N. \quad (12)$$

式中: σ_v 为剪切应力, σ_N 为竖向压应力, α 为竖向压应力对剪切强度的影响系数, $f_{vg,m}$ 为灌芯砌体抗剪强度。于是,截面上失效承载力值为

$$C_{fail} = \sigma_v A = (f_{vg,m} + \alpha\sigma_N)bh_0, \quad (13)$$

式中 h_0 为墙体的有效高度。

当达到承载能力极限时,墙体中水平钢筋屈服,极限承载力为

$$C_u = C_{fail} + f_{yh}A_{sh}. \quad (14)$$

式中: f_{yh} 为水平钢筋的抗拉强度设计值, A_{sh} 为水平钢筋的面积。

根据砌体结构设计规范^[13],混凝土灌芯砌块砌体的抗拉强度 f_t 和抗剪强度分别为:

$$f_t = 0.056\sqrt{f_{ce}}, \quad (15)$$

$$f_{vg,m} = 0.2f_{gm}^{0.55}. \quad (16)$$

式中: f_{ce} 为砂浆的抗压强度设计值, f_{gm} 为灌芯砌体的抗压强度。

将 J1 在正负向荷载下的开裂荷载平均值带入式(6),再结合式(11)计算剪力墙开裂承载能力 C_{cr} 及式(5)计算剪力墙开裂受力状态值 S_{cr} ,可以确定无量纲系数 $k = 4.25$ 。同样的将 J1 在正负向荷载作用下的剪力墙失效荷载平均值带入式(5)、(7)并结合式(13)有 $\alpha = 0.2$ 。

综上有剪力墙基于受力状态的开裂、失效及极限承载力包络曲线为

$$\begin{cases} S_{cr} = \frac{C_{cr}}{kF} = \frac{bB^2(f_t + \sigma_N)}{6kHF}, \\ S_{fail} = \frac{C_{fail}}{kF} = \frac{(f_{vg,m} + 0.2\sigma_N)bh_0}{kF}, \\ S_u = \frac{C_u}{kF} = \frac{(f_{vg,m} + \alpha\sigma_N)bh_0 + kFf_{yh}A_{sh}}{kF}. \end{cases} \quad (17)$$

受力状态曲线(式(5))与式(17)交点对应的外荷载即为剪力墙的开裂、失效、极限荷载。

为进一步验证上述判定准则的准确性,剪力墙 J1~J4 的受力状态-荷载关系曲线及包络线见图 8~11。

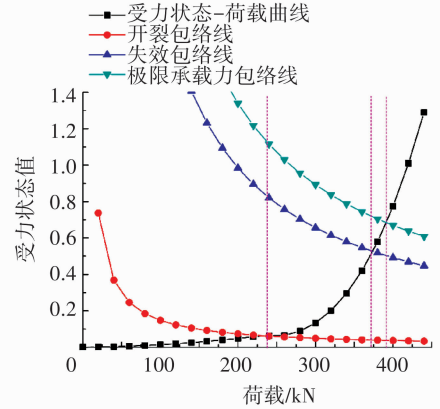


图 8 剪力墙 J1 受力状态曲线与包络曲线

Fig. 8 Stress state curve and capacity envelopes of Wall J1

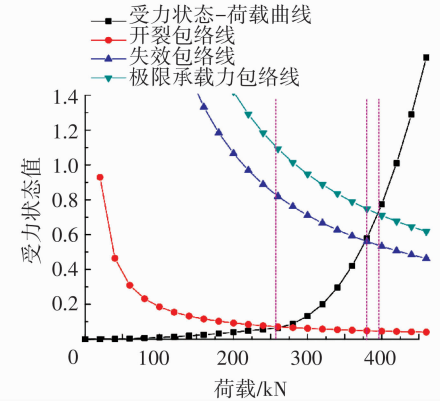


图 9 剪力墙 J2 受力状态曲线与包络曲线

Fig. 9 Stress state curve and capacity envelopes of Wall J2

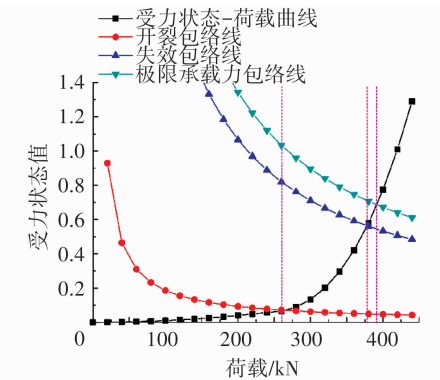


图 10 剪力墙 J3 受力状态曲线与包络曲线

Fig. 10 Stress state curve and capacity envelopes of Wall J3

根据剪力墙的受力状态-荷载曲线与包络线相

交得到的开裂、失效及极限荷载,与试验结果的对比见表 2,且用式 (18) 来判断准则的预测精度:

$$e = \left| \frac{F - F_{ave}}{F_{ave}} \right| \times 100\%, \quad (18)$$

式中: F 为曲线相交得到的荷载, F_{ave} 为正负向荷载下的试验荷载平均值.

由表 2 可看出,基于受力状态曲线结合包络曲线计算得到的荷载与试验结果的误差均在 10% 以内.

本文提出的方法与现有的基于截面应力状态的分析方法有着本质的区别:该方法主要是得到构件在外荷载作用下的实时受力状态,判断构件的受力状态与各种承载力(包络线)之间的关系来确定相应的开裂、失效和极限荷载.一旦构件的受力状态超

过相应的包络线,则构件发生相应的破坏,因此该方法也为结构健康监测提供一个新途径.

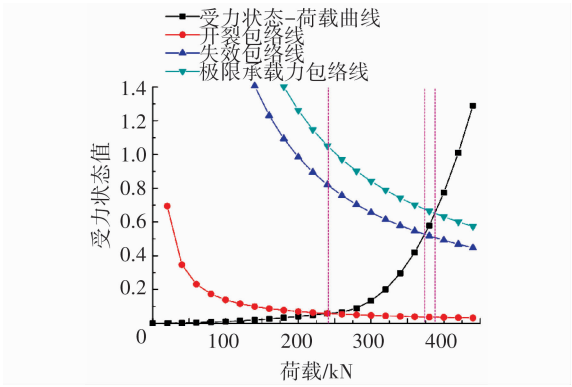


图 11 剪力墙 J4 受力状态曲线与包络曲线

Fig. 11 Stress state curve and capacity envelopes of Wall J4

表 2 计算结果与试验结果对比

Tab. 2 Comparison between calculated and test results

试件编号	加载方向	开裂荷载/kN		误差/%	失效荷载/kN		误差/%	极限荷载/kN		误差/%
		试验结果	计算结果		试验结果	计算结果		试验结果	计算结果	
J1	正	244			382			406		
	负	237	240	—	367	375	—	377	390	0.4
J2	正	241			403			430		
	负	242	260	7.7	351	380	0.8	388	395	3.4
J3	正	246			386			426		
	负	242	260	6.6	363	380	1.5	415	390	7.3
J4	正	243			353			388		
	负	243	240	1.2	366	375	4.3	412	385	3.8

4 结 论

- 1)墙体中竖向钢筋上的归一化的应变平方和值可以用来从宏观上反应构件的受力状态.
- 2)基于结构受力状态曲线结合承载力包络线可以用来确定剪切破坏的配筋砌块剪力墙的开裂荷载、失效荷载及极限荷载,且有较高精度.
- 3)研究结果进一步拓展了结构受力状态分析理论的应用,并拓展了试验数据在结构分析中的应用方式.

参考文献

[1] 王凤来,张厚,唐岱新. 论我国墙用混凝土砌块产业发展的教训和砌块整浇墙技术[J]. 建筑砌块与砌块建筑,2010(6):4-9.
WANG Fenglai, ZHANG Hou, TANG Daixin. Lessons of concrete masonry blocks industry applied in walls and the technology of fully grouted concrete masonry wall [J]. Construct masonry block and masonry buildings, 2010(6):4-9.

[2] 新型砌体结构体系与墙体材料(上册)[M]. 哈尔滨:中国建材工业出版社,2010.

[3] 赵艳,王凤来,张厚,等. 砌块整浇墙骨架曲线影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(8):16-22.
ZHAO Yan, WANG Fenglai, ZHANG Hou, et al. Analysis of influencing factors on the skeleton curve for fully grouted reinforced masonry shear walls [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2013, 45(8):16-22.

[4] ZHAO Y, WANG F L. Experimental studies on behavior of fully grouted reinforced-concrete masonry shear walls [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015,14:743-757.

[5] BANTING B, EI-DAKHAKHNI W. Seismic design parameters for special masonry structural wall detailed with confined boundary elements [J]. Journal of Structural Engineering,2014,140(10):04014067.

[6] EHSAN M, FRANKLIN L M, AHMAD A H. Nonlinear finite element modeling of reinforced masonry shear walls for bidirectional loading response[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2014, 84:44-53.

[7] EZZELDIN M, WIEBE L D, EI-DAKHAKHNI W. Numerical modelling of reinforced concrete block structural wall buildings under seismic [C]//International structural specialty conference. London: [s. n.], 2016:1-10.

[8] AHMAD S S, WESSAM M H, EI-DAKHAKHNI W. Scoring models for reinforced masonry shear wall maximum displacement prediction under seismic loads[J]. Engineering Structures, 2017,136: 511-522.

[9] VOON K C, INGHAM J M. Experimental In-plane shear strength investigation of reinforced concrete masonry walls [J]. Journal of structural engineering, 2006,132(3):400-408.

[10] 黄艳霞. 基于结构受力状态的砌体墙片细胞自动机分析方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
HUANG Yanxia. Cellular automata method of masonry structure analysis based on structural stressing state [D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2014.

[11]HUANG Y X, ZHANG Y, ZHANG M, et al. Method for predicting the failure load of masonry wall panels based on generalized strain-energy density[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 140(8): 4014061-4014066.

[12]丁向奎. 低周往复荷载下 290 厚砌块整浇墙剪切破坏模式试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
DING Xiangkui. Experimental study on shear failure mode of 290 concrete-block casting wall under low-cyclic loading [D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2014.

[13]砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

(编辑 赵丽莹)