

砂浆单轴抗压强度尺寸效应律研究

杨伟军,袁帅[†],杨春侠

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙,410114)

摘要:为评估尺寸效应行为对砂浆准脆性材料力学性能的影响及完善砂浆尺寸效应理论,以物理模型试验方法及理论解析方法对砂浆尺寸效应行为进行了研究.通过对 12 组几何相似的砂浆立方体试件及 12 组非几何相似的砂浆板式试件进行单轴抗压强度试验,研究砂浆尺寸效应行为及砂浆强度等级对尺寸效应的影响.研究表明,砂浆抗压强度随着试件几何尺寸的增大而减小,尺寸效应随砂浆强度等级的提高而增强.引入基于断裂力学能量释放理论尺寸效应律分析砂浆几何相似试件的尺寸效应行为,加入强度项修正 Bazant 尺寸效应律并以修正尺寸效应律分析砂浆非几何相似试件的尺寸效应行为,分别建立了砂浆抗压强度尺寸效应律计算式,其计算结果与试验结果吻合良好.该研究成果可为砂浆材料工程应用提供指导,为砌体精细化细观模型的建立提供重要依据.

关键词:板式砂浆试件;非几何相似;能量释放;抗压强度;尺寸效应

中图分类号:TU502.6

文献标志码:A

Study on Size Effect Law of Compressive Strength of Building Mortar under Uniaxial Compression

YANG Weijun, YUAN Shuai[†], YANG Chunxia

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to evaluate the size effect on the mechanical properties of mortar and to improve the size effect theory of mortar, size effect behaviours of mortar were investigated by using test method and theoretical analysis method. Based on the uniaxial compression test on 12 groups of mortar cube specimen and 12 groups of mortar plate specimen, the size effect behaviour of mortar specimen and the relationship between mortar strength grade and size effect of compressive strength were investigated. The results indicate that the mortar compressive strength decreases with the increase of the specimen size, while the degree of size effect is enhanced with the increase of mortar strength grade. The energy release based size effect law was introduced to study the size effect of mortar geometrically similar specimen. The size effect of the mortar specimen of non-geometric similarity was also analyzed by correcting the Bazant size effect law with adding intensity term. Finally, the mortar size effect laws which can predict the size effect behavior of geometrically similar specimen, as well as the non-geometrically similar specimen, are derived, respectively. The predicted results of the proposed size effect law match well with test data. The research results provide an important basis for the establishment of the fine microscopic model of masonry, and also provide guidance for the engineering application of mortar.

Key words: mortar plate specimen; non-geometrically similarity; energy release; compressive strength; size effect

* 收稿日期:2019-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678067,51808054), National Natural Science Foundation of China(51678067,51808054)

作者简介:杨伟军(1962—),男,湖南益阳人,长沙理工大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail:yuanshuai@stu.csust.edu.cn

尺寸效应是指材料的力学性能不再是一个常数,而是随着结构几何尺寸的变化而变化^[1]. 砂浆属于准脆性材料范畴,尺寸效应行为是准脆性材料的普遍现象^[2]. 砂浆作为建筑材料被广泛应用,在实际工程中结构尺寸均不同于试验室立方体模型试件,多以砌筑砂浆与抹灰砂浆等小尺度形态使用,尺寸效应问题直接关系到砂浆材料结构性能以及力学行为的评估. 随着计算机和细观力学的发展,砌体精细化细观模型数值分析方法为砌体结构的研究提供了新思路,同时也提出了亟待解决的问题,其中之一就是灰缝砂浆的强度尺寸效应行为,因此研究尺寸效应是可行且必要的.

一般而言,小尺寸试件具有较高的强度和较大的强度离散性,为了解释这种尺寸效应现象,研究者已提出不少理论. 20世纪初,Gonnerman将尺寸效应应用于混凝土材料力学特性研究中. 20世纪30年代,Weibull等人在Peirce最弱链连接模型及Tippett极值统计理论基础上建立了随机强度统计尺寸效应理论^[3]. 20世纪80年代后,Leicester认为混凝土的尺寸效应源于断裂力学,将损伤和断裂力学理论应用于混凝土材料尺寸效应研究,Bazant通过应力重分布和能量释放理论对尺寸效应现象进行了解释^[4-5]. Carpinteri等人认为结构裂纹分形特征上的差异是准脆性材料产生尺寸效应的原因,提出了多重分形尺寸效应理论^[6-7]. 混凝土强度存在非线性与一定的随机性,裂缝在发展过程中也存在分形特性,但当混凝土试件失效主要是由断裂破坏引起时,基于应力重分布和能量释放理论的尺寸效应理论占主导. 使用断裂力学能量释放理论来描述和解释混凝土材料的尺寸效应行为被越来越多的学者所接受,大量试验研究表明^[8-10],Bazant尺寸效应律^[11]能较好地描述混凝土材料尺寸效应行为.

目前国内外对混凝土力学性能的尺寸效应理论研究已有良好基础,而对砂浆力学性能的尺寸效应行为少有研究,且已有研究主要采用试验方法. Pahl和Soosaar^[12]认为:尺寸效应可以用以下的线性方程表示: $f=a+bV^c$,式中 f 为混凝土强度, V 为试件体积, a, b, c 为正值常数. Becica和Harris^[12]设计了不同尺寸立方体和圆柱体试件试验,试验得出砂浆试件强度随受力体积的减小而增加. 苏捷等^[13]通过对36组强度等级分别为M30、M50和M80且不同边长的水泥砂浆立方体试件进行抗压试验,得出了相应强度等级砂浆的尺寸效应率计算公式. 文献[14]未得到稳定的试验值,得出了试验范围内水泥砂浆强度指标随尺寸的增加而逐渐降低,存在较为

明显的尺寸效应. 上述研究对象为砂浆几何相似试件,未对砂浆非几何相似试件尺寸效应进行研究,且未对砂浆尺寸效应行为进行机理分析.

随着尺寸效应理论分析的进一步发展,砂浆尺寸效应的理论及试验研究有待完善. 基于此,本文通过设计水泥砂浆几何相似试件与非几何相似试件,以物理模型试验方法及理论解析方法对砂浆尺寸效应行为进行分析研究.

1 试验研究

1.1 试件设计

砂浆试件分为立方体试件及板式试件,立方体试件为几何相似试件,板式试件底面积尺寸相同,试件高度为变量. 砂浆立方体试件边长分别为70.7 mm、100 mm、150 mm和200 mm. 每一尺寸的试件包含M5、M10和M15三个强度等级,砂浆立方体试件每组制作3个,以确定各组砂浆试件立方体抗压强度. 砂浆板式试件底面尺寸为70.7 mm×70.7 mm,试件高度分别为30 mm、40 mm、50 mm及60 mm,试件包含M5、M10和M15三个强度等级,砂浆板式试件每组制作6个,以确定各组砂浆试件抗压强度. 立方体试件总计12组,板式试件总计9组. 根据《砌筑砂浆配合比设计规程》(JGJ98-2010),各组试件配合比见表1. 试验采用2 000 kN微机控制电液伺服万能试验机,以0.3 MPa/s的速率加载,板式试件受压面放置两层聚四氟乙烯薄膜,试验场景见图1.

表1 砂浆试件配合比

Tab.1 Mix proportions of mortar specimens

组号	强度等级	$\rho_{\text{水泥}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_{\text{天然砂}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_{\text{水}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
I	M5	240	1 450	260
II	M10	290	1 450	260
III	M15	340	1 450	260

注:中砂细度模数为2.5,配制砂浆时量测砂浆稠度及保水率,稠度为60~80 mm,保水率为85%左右.



图1 试验场景

Fig.1 Test environment

1.2 试验结果

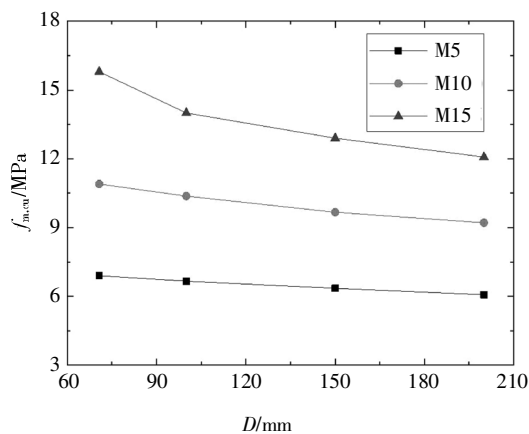
实测砂浆立方体试件及板式试件抗压强度见表 2. 由表 2 可知各组试件抗压强度的变异系数均小于 7%, 试验结果离散性较小. 图 2 给出了不同强度等级下, 砂浆试件单轴抗压强度随试件几何尺寸的变化趋势. 立方体试件抗压强度随试件尺寸的增加而降低, 板式试件抗压强度随试件高度的增加而降低, 两者变化规律一致.

表 2 抗压强度实测值

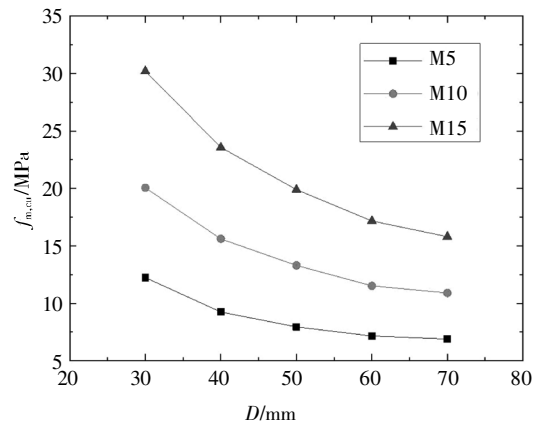
Tab.2 Compressive strength of mortar specimens

立方体试件编号	$f_{m,cu}$ /MPa	s /MPa	C_v /%	板式试件编号	$f_{m,cu}$ /MPa	s /MPa	C_v /%
I-70.7	6.9	0.15	2.14	I-30	12.24	0.67	5.47
I-100	6.66	0.15	2.27	I-40	9.25	0.9	2.89
I-150	6.35	0.34	5.32	I-50	7.95	0.48	6.04
I-200	6.07	0.25	4.2	I-60	7.16	0.72	5.96
II-70.7	10.9	0.29	2.69	II-30	20.06	1.26	6.26
II-100	10.375	0.25	2.43	II-40	15.61	2.15	3.64
II-150	9.67	0.22	2.31	II-50	13.3	0.58	4.39
II-200	9.21	0.36	3.89	II-60	11.52	0.93	2.69
III-70.7	15.8	0.4	2.56	III-30	30.21	1.06	3.51
III-100	14	0.52	3.7	III-40	23.57	3.59	4.36
III-150	12.9	0.73	5.63	III-50	19.9	1.08	5.42
III-200	12.08	0.81	6.71	III-60	17.17	1.19	2.04

注: $f_{m,cu}$ 为砂浆抗压强度; s 为标准差; C_v 为变异系数.



(a)立方体试件



(b)板式试件

图 2 抗压强度随尺寸变化趋势图

Fig.2 Size effect of compressive strength

2 几何相似试件尺寸效应分析

2.1 强度等级对尺寸效应的影响

引入尺寸效应度对砂浆试件的强度等级与抗压强度尺寸效应关系进行定量描述, 以截面边长 70.7 mm 的立方体试件为基准尺寸试件, 定义非基准尺寸试件的抗压强度与基准尺寸试件间的差值占基准尺寸试件的百分率为尺寸效应度. 边长为 d 的立方体抗压强度的尺寸效应度 γ_d 为:

$$\gamma_d = \frac{f_{m,70.7} - f_{m,d}}{f_{m,70.7}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $f_{m,d}$ 为截面边长为 d 试件的抗压强度. 将表 1 中数据代入上式, 可得砂浆立方体试件抗压强度的尺寸效应度, 如图 3 所示. 由图 2(a)及图 3 可知砂浆立方体抗压强度具有以下规律:

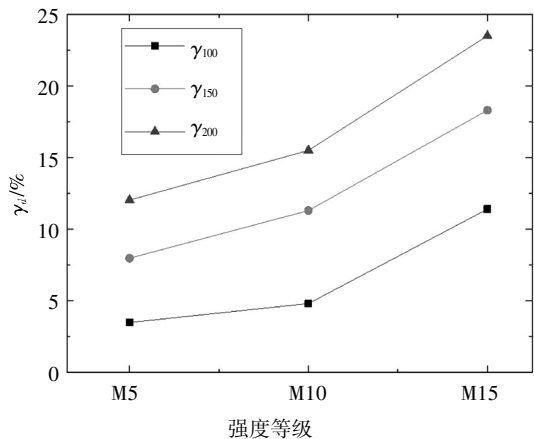


图 3 砂浆立方体试件抗压强度尺寸效应度

Fig.3 Effect of the strength grade of mortar cube specimen on size effect

1)砂浆立方体抗压强度及峰值应变具有尺寸

效应现象,表现为抗压强度随着试件几何尺寸的增大而减小.强度等级为 M5、边长为 100 mm、150 mm 及 200 mm 试件的抗压强度分别为标准试件的 97%、92%和 88%;强度等级为 M10、边长为 100 mm、150 mm 及 200 mm 试件的抗压强度分别为标准试件的 95%、89%和 85%;强度等级为 M15、边长为 100 mm、150 mm 及 200 mm 试件的抗压强度分别为标准试件的 89%、82%和 77%.

2)尺寸效应随砂浆强度等级的提高而增强. M15 砂浆试件抗压强度尺寸效应度 γ_{100} 、 γ_{150} 及 γ_{200} 分别为 M10 试件的 2.4 倍、1.6 倍和 1.5 倍,分别为 M5 试件的 3.3 倍、2.3 倍和 2 倍.

砂浆抗压强度尺寸效应现象较为明显,造成该现象的主要原因是砂浆破坏之前局部有稳定裂缝的扩展阶段,其尺寸效应主要与储存在结构中的能量释放相关的应力重分布和开裂损伤局部化有关,砂浆抗压强度随结构尺寸增加而减小以维持能量平衡.而砂浆尺寸效应随砂浆强度等级提高而增强,是因为低强度等级砂浆试件内含初始缺陷较多^[15],破坏时断裂破损区面积相对较大,从而断裂破损区耗散的能量较大,因此低强度等级砂浆尺寸效应较小.

2.2 尺寸效应分析

在裂纹经历稳定扩展后,达到最大荷载时的结构名义强度的尺寸效应行为可由能量释放的渐进分析得出.达到最大荷载有两个条件,其一为能量释放率必须与能量消耗率相等,其二为能量释放率曲线必与能量消耗率曲线相切.基于结构在恒载下的余能的变化分析结构的能量释放,可得结构名义强度表达式:

$$f = \sqrt{\frac{EG_f}{g(\alpha_0)D + \frac{1}{2}g''(\alpha_0)c_f^2D^{-1}}} \quad (2)$$

式中: α 为裂缝相对长度, $\alpha = a/D$, a 是裂缝总长度, D 为试件特征尺寸; α_0 是 α 初始值; $g(\alpha_0)$ 为无量纲能量释放率函数; E 为材料的弹性模量; G_f 为 Hillerborg 虚拟裂缝模型双线性 $\sigma-\omega$ 曲线初始退化刚度下包围的面积; c_f 为特征长度.

对式(2)在点 α_0 处作泰勒级数展开,可得如下结构名义强度级数展开式

$$f = \frac{Ef'_i}{\sqrt{D}} (D_0^{-1} + D^{-1} + \kappa_2 D^{-2} + \kappa_3 D^{-3} + \dots)^{-1/2} \quad (3)$$

式中: f'_i 为抗拉强度; $D_0, D, \kappa_2, \kappa_3, \dots$ 为常数,由函数

g 及其偏导数在点 α_0 处的取值决定.

由式(3)前两项可导出统一的表达式^[4]

$$f = \frac{Bf'_i}{\sqrt{1+\beta}}, \beta = \frac{D}{D_0} \quad (4)$$

式中: B 和 D_0 是依赖于结构的几何参数; f'_i 为标准试件抗拉强度,在此引入以平衡量纲.

对式(4)变化得到如下表达式

$$\left(\frac{f_i}{f}\right)^2 = \frac{D}{B^2D_0} + \frac{1}{B^2} \quad (5)$$

令 $Y = (f_i/f)^2, X = D, C = 1/B^2, A = C/D_0$, 式(5)可变换为

$$Y = AX + C \quad (6)$$

将表 1 中数据代入 $Y = (f_i/f)^2$ 得出 γ 值,以式(6)为基准公式对水泥砂浆单轴受压试验结果进行线性回归分析,如图 4 所示,回归分析后 B 和 D_0 参数值见表 3.

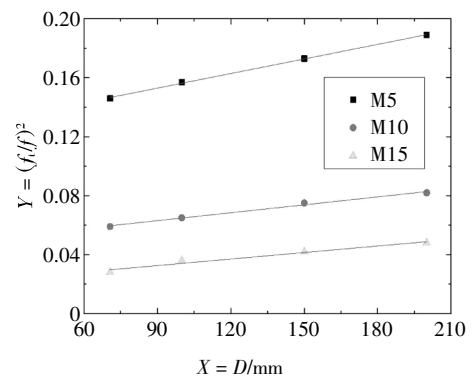


图 4 抗压强度尺寸效应线性回归分析

Fig.4 Linear regression analysis of size effect in compressive strength

表 3 线性回归 B, D_0 参数值

Tab.3 Linear regression parameter values of B and D_0

组号	$X=D$	$Y = (f_i/f)^2$	A	C	$B = \frac{1}{\sqrt{1/C}}$	$D_0 = C/A$	R^2
I-70.7	70.7	0.146					
I-100	100	0.157	3.3E-4	0.123 3	2.85	373.64	0.999
I-150	150	0.173					
I-200	200	0.189					
II-70.7	70.7	0.059					
II-100	100	0.065	1.8E-4	0.046 9	4.62	260.56	0.989
II-150	150	0.075					
II-200	200	0.082					
III-70.7	70.7	0.028					
III-100	100	0.036	1.5E-4	0.019 3	7.2	128.67	0.947
III-150	150	0.042					
III-200	200	0.048					

参考学者 Bazant 研究^[16]对式(4)再次转换得到如下表达式

$$\frac{f}{Bf_i} = \sqrt{1 + \beta} \tag{7}$$

以 $\log \beta$ 和 $\log(f/Bf_i)$ 分别为 x 和 y 作双对数图, 并与 Bazant 尺寸效应律进行对比分析. 各项参数计算结果见表 4, 对比分析如图 5 所示.

表 4 双对数图参数计算值

Tab.4 The parameter value of double logarithm graph

组号	D	B	D_0	$\beta=D/D_0$	$\log \beta$	$\log(f/Bf_i)$
I-70.7	70.7			0.189	-0.724	-0.03
I-100	100	2.85	373.64	0.268	-0.572	-0.053
I-150	150			0.401	-0.397	-0.062
I-200	200			0.535	-0.272	-0.093
II-70.7	70.7			0.271	-0.567	-0.049
II-100	100	4.62	260.56	0.384	-0.417	-0.07
II-150	150			0.576	-0.24	-0.101
II-200	200			0.768	-0.115	-0.122
III-70.7	70.7			0.549	-0.26	-0.08
III-100	100	7.2	128.67	0.777	-0.11	-0.133
III-150	150			1.166	0.048	-0.168
III-200	200			1.554	0.191	-0.197

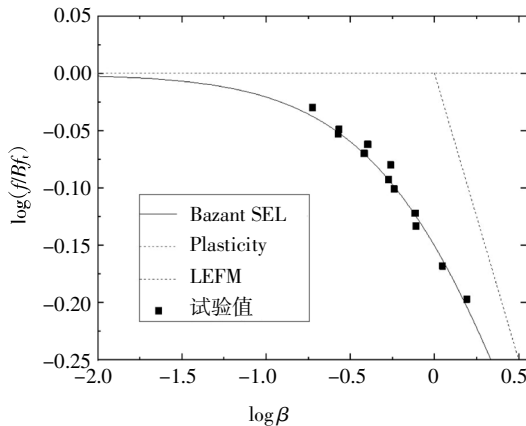


图 5 抗压强度随试件尺寸变化的双对数曲线图
Fig.5 Comparison of test results and size effect law

由双对数曲线图可知, Bazant 尺寸效应律能较好地描述水泥砂浆立方体抗压强度尺寸效应行为, 且立方体试件尺寸较小时其抗压强度趋近基于塑性理论确定的强度上限, 尺寸较大时趋近基于断裂力学线弹性理论确定的斜率为-1/2 的强度界限. 通过对试验数据回归分析分别给出不同强度等级水

泥砂浆尺寸效应率建议参数值, 可为混凝土结构及砌体结构工程应用提供参考.

3 非几何相似试件尺寸效应分析

3.1 强度等级对尺寸效应的影响

不同高度的板式试件抗压强度的尺寸效应度 γ_h 为:

$$\gamma_h = \left| \frac{f_{mc,70.7} - f_{mc,h}}{f_{mc,h}} \right| \times 100\% \tag{8}$$

式中: $f_{mc,h}$ 为高度为 h 试件的抗压强度, 将表 2 中数据代入上式可得砂浆板式试件尺寸效应度, 如图 6 所示.

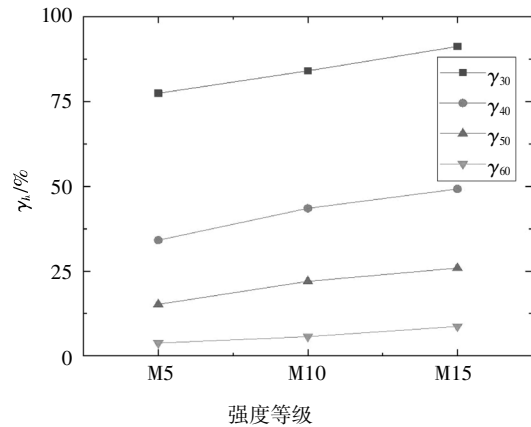


图 6 砂浆板式试件抗压强度尺寸效应度
Fig.6 Effect of the strength grade of mortar plate specimen on size effect

由图 2(b)及图 6 可知砂浆板式试件抗压强度具有以下规律:

1) 板式试件尺寸效应行为显著, 抗压强度随着试件几何尺寸的减小而明显提高. 强度等级为 M5, 高度为 60 mm、50 mm、40 mm 及 30 mm 试件的抗压强度与标准试件抗压强度比值 $f_{mc,h} / f_{mc,70.7}$ 分别为 1.04、1.15、1.34 及 1.77; 强度等级为 M10, 高度为 60 mm、50 mm、40 mm 及 30 mm 试件 $f_{mc,h} / f_{mc,70.7}$ 分别为 1.06、1.22、1.43 及 1.84; 强度等级为 M15, 高度为 60 mm、50 mm、40 mm 及 30 mm 试件 $f_{mc,h} / f_{mc,70.7}$ 分别为 1.09、1.26、1.49 和 1.91.

2) 尺寸效应度随砂浆强度等级的提高而增大. M15 砂浆试件抗压强度尺寸效应度 γ_{30} 、 γ_{40} 、 γ_{50} 及 γ_{60} 分别为 M10 试件的 1.09 倍、1.13 倍、1.18 倍和 1.53 倍, 分别为 M5 试件的 1.18 倍、1.44 倍、1.7 倍和 2.29 倍.

3.2 尺寸效应分析

Bazant 尺寸效应率基于断裂力学能量平衡的概念推导而成,基本假定为峰值荷载前几何相似的结构或构件断裂失效模式相同.板式试件尺寸变量是试件单轴受压方向高度,为非几何相似试件,式(4)不再适用.本文参考学者 Kim 和 Eo^[17]的研究,在 Bazant 尺寸效应率基础上提出增加一项与试件尺寸无关的强度项,用以对非几何相似试件的强度做出预测.修正后的尺寸效应率如式(9)所示.

$$f = \frac{Bf_t}{\sqrt{1 + D/D_0}} + \alpha f_t \quad (9)$$

式中: α 为与尺寸无关的强度系数,通过试验数据拟合确定.

以式(9)为基函数分别拟合表 1 中各组数据,其中参数 $D_0 = \lambda d_0 = 3 \times 5 = 15$, d_0 为砂浆细骨料最大粒径值,拟合结果见表 5,对比分析如图 7 所示.

表 5 非线性拟合 B 、 α 参数值

Tab.5 Nonlinear fitting parameter values of B and α					
组号	$x = \log D$	$y = \log f$	B	α	R^2
I-30	1.477	1.088			
I-40	1.602	0.966			
I-50	1.699	0.9	9	-8.2	0.96
I-60	1.778	0.855			
I-70.7	1.849	0.839			

II-30	1.477	1.302			
II-40	1.602	1.193			
II-50	1.699	1.124	9.7	-8.8	0.98
II-60	1.778	1.061			
II-70.7	1.849	1.037			

III-30	1.477	1.48			
III-40	1.602	1.372			
III-50	1.699	1.299	10.2	-9.2	0.99
III-60	1.778	1.235			
III-70.7	1.849	1.197			

由表 5 拟合相关系数值可知修正尺寸效应律能较好地预测砂浆板式试件尺寸效应行为,图 7 双对数曲线图直观地反映出修正尺寸效应律的适用性.通过拟合试验数据分别给出不同强度等级水泥砂浆尺寸效应率建议参数值,可为混凝土结构及砌体结构工程应用提供参考,且在实际工程中砂浆材料多应用于非几何相似结构,故基于 Bazant 尺寸效应律所做出的修正尺寸效应律应用范围将更广泛.

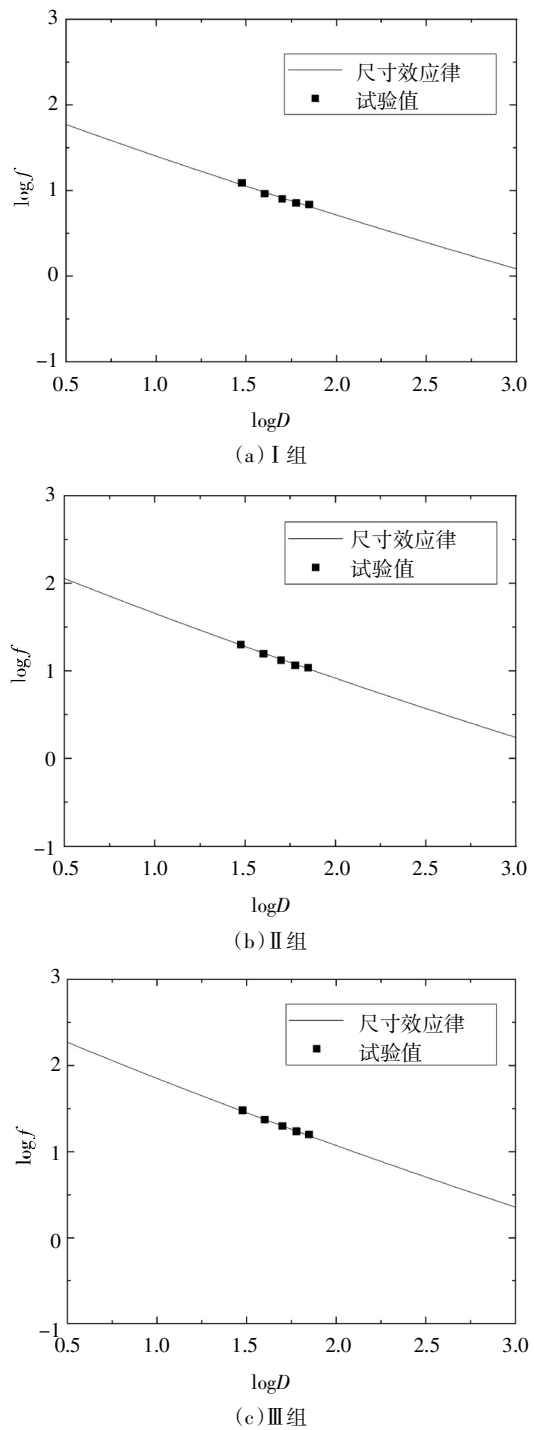


图 7 板式试件抗压强度尺寸效应律拟合曲线

Fig.7 Fitting results of size effect law of mortar plate specimen

4 考虑砂浆尺寸效应的砌体抗压强度

砂浆特性是砌体结构受压性能的影响因素之一,我国现行《砌体结构设计规范》(GB 50003-2001)^[18]在分析国内外砌体抗压强度公式的基础上提出形式统一的砌体抗压强度计算公式:

$$f_m = k_1 f_t^\alpha (1 + 0.07 f_2) k_2 \quad (10)$$

式中: f_m 为砌体抗压强度平均值; f_1 为块体抗压强度平均值; f_2 为砂浆抗压强度平均值;参数 k 、 α 、 k_2 取值参考规范^[18]. 砂浆抗压强度平均值以边长 70.7 mm 标准立方体试件受压试验测得. 结合文献[19]、[20]、[21]、[22]及[23]中蒸压粉煤灰实心砖砌体、灰砂砖砌体和混凝土砌块砌体试验数据,采用本文建议砂浆

尺寸效应律公式(9),根据灰缝厚度修正灰缝砂浆抗压强度,再将灰缝砂浆强度代入式(10)计算砌体抗压强度,进而对比分析多种砖砌体轴压强度的试验值 \bar{f}_m 、规范计算值 f_m 及修正值 f'_m ,计算分析结果见表 6.

表 6 轴心受压砌体抗压强度值

Tab.6 Compressive strength of masonry under axial compression

参考文献	砌体种类	灰缝厚度/mm	f_1 /MPa	f_2 /MPa	f'_2 /MPa	\bar{f}_m /MPa	f_m /MPa	f'_m /MPa	f'_m/\bar{f}_m	f'_m/f_m
[19]	蒸压粉煤灰砖	6	19.6	4.19	7.76	7.18	4.47	5.33	0.74	1.19
[19]		9	19.6	4.19	6.67	7.97	4.47	5.07	0.64	1.13
[19]		11	19.6	4.19	6.07	7.64	4.47	4.92	0.64	1.1
[20]		10	16.8	9.26	21.88	8.51	5.27	8.09	0.95	1.53
[21]	灰砂砖	3	15.2	5.5	22.49	9.19	4.21	7.83	0.85	1.86
[21]		5	15.2	5.7	18.58	7.87	4.25	7	0.89	1.65
[21]		8	15.2	5.5	12.56	7.59	4.21	5.71	0.75	1.35
[21]		10	15.2	5.4	10.63	6.33	4.19	5.3	0.84	1.26
[22]	混凝土砌块	10	13.78	12.6	21.73	15.86	11.71	15.69	0.99	1.34
[23]		10	13.18	16.3	23.1	11.82	9.4	11.49	0.97	1.22
平均值									0.83	1.36
变异系数									0.15	0.17

注: f'_2 为砂浆尺寸效应律修正灰缝砂浆抗压强度.

从表 6 中可知,由砂浆尺寸效应律修正砂浆抗压强度后计算所得砌体抗压强度修正值高于规范公式计算值,低于砌体抗压强度试验值,并在安全的范围内比规范值更接近实测值.由此可知,非几何相似砂浆尺寸效应律能较好地描述灰缝厚度对砌体抗压强度的影响规律,也能较好地预测砌体结构中灰缝砂浆实际强度.

5 结 论

通过物理模型试验方法及理论解析方法对砂浆尺寸效应律进行分析研究,建立了适用于砂浆材料的尺寸效应律以预测砂浆尺寸效应律,具体结论如下:

1)砂浆立方体试件抗压强度尺寸效应现象较为明显,抗压强度随着试件几何尺寸的增大而减小,尺寸效应随砂浆强度等级的提高而增强.立方体试件强度等级为 M5、边长为 100 mm、150 mm 及 200 mm 试件的抗压强度分别为标准试件的 97%、92%和 88%;M10 试件的抗压强度分别为标准试件的 95%、89%和 85%;M15 试件的抗压强度分别为标准试件的 89%、82%和 77%. M15 砂浆试件抗压

强度尺寸效应度 γ_{100} 、 γ_{150} 及 γ_{200} 分别为 M10 试件的 2.4 倍、1.6 倍和 1.5 倍,分别为 M5 试件的 3.3 倍、2.3 倍和 2 倍.

2)砂浆板式试件抗压强度尺寸效应律行为显著,抗压强度随试件高度的减小而增大,尺寸效应随砂浆强度等级的提高而增强.强度等级为 M5,高度为 60 mm、50 mm、40 mm 及 30 mm 试件的抗压强度分别为标准试件的 1.04、1.15、1.34 及 1.77 倍;M10 试件的抗压强度分别为标准试件的 1.06、1.22、1.43 及 1.84 倍;M15 试件抗压强度分别为标准试件的 1.09、1.26、1.49 和 1.91 倍. M15 砂浆试件抗压强度尺寸效应度 γ_{30} 、 γ_{40} 、 γ_{50} 及 γ_{60} 分别为 M10 试件的 1.09 倍、1.13 倍、1.18 倍和 1.53 倍,分别为 M5 试件 1.18 倍、1.44 倍、1.7 倍和 2.29 倍.

3)试验验证了基于断裂力学能量释放理论的尺寸效应律适用于砂浆材料. Bazant 尺寸效应律能较好地描述砂浆立方体抗压强度尺寸效应现象,以最小二乘法线性回归试验数据得到尺寸效应律建议参数值,理论公式与试验数据吻合良好.

4)建立了基于 Bazant 尺寸效应律的修正尺寸效应律,以修正尺寸效应律拟合砂浆板式试件试验数据,得出不同强度等级砂浆相应建议参数值,理

论公式与试验数据吻合良好. 实际工程中砂浆材料多应用于非几何相似结构, 故修正尺寸效应律较 Bazant 尺寸效应律计算结果更接近实际, 应用范围更为广泛.

参考文献

- [1] PLANAS J, GUINEA G V, ELICES M. Generalized size effect equation for quasi-brittle materials [J]. *Materials and Structures*, 1997, 20(50): 671—687.
- [2] 杨璐, 沈新普. 大体积混凝土结构的损伤理论与应用 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2016: 16.
YANG L, SHEN X P. Damage theory and application of mass concrete structure [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2016: 16. (In Chinese)
- [3] WEIBULL W. A Statistical theory of the strength of materials [J]. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 1939, 151(5): 1034—1034.
- [4] BAZANT Z P, CHEN E P. Scaling of structures failure [J]. *American Society of Mechanical Engineers*, 1997, 50(12): 593—672.
- [5] BAZANT Z P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1984, 110(4): 518—535.
- [6] CARPINTERI A, FERRO G. Size effects on tensile fracture properties—a unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure [J]. *Materials and Structures*, 1994, 27: 563—571.
- [7] CARPINTERI A. Scaling laws and renormalization groups for strength and toughness of disordered materials [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1994, 31(3): 291—302.
- [8] 李冬. 混凝土及钢筋混凝土柱尺寸效应分析 [D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2017: 138—140.
LI D. Research on size effect of concrete and RC columns [D]. Beijing: College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, 2017: 138—140. (In Chinese)
- [9] 苏捷. 混凝土受压与受拉性能的尺寸效应研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2013: 79—84.
SU J. The research on the size effect of concrete behavior in compression and tension [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2013: 79—84. (In Chinese)
- [10] 张颖, 刘昌永, 王玉银, 等. 基于随机骨料模型的混凝土抗压强度尺寸效应研究 [J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(S1): 493—501.
ZHANG Y, LIU C Y, WANG Y Y, *et al.* Mesoscale modeling based numerical study on size effect of concrete compressive strength [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(S1): 493—501. (In Chinese)
- [11] BAZANT Z P, PLANAS J. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials [M]. Boca Raton: CRC Press, 1998: 138—139.
- [12] 萨布尼斯 G M, 哈里斯 H G, 怀特 R N, 等. 结构模型和试验技术 [M]. 朱世杰, 童岳生, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1989: 147—150.
GAJANAN M S, HARRY G H, RICHARD N W, *et al.* Structural modeling and experimental techniques [M]. Translated by ZHU S J, TONG Y S, *et al.* Beijing: China Railway Publishing House, 1989: 147—150. (In Chinese)
- [13] 苏捷, 方志. 水泥砂浆立方体抗压强度尺寸效应的试验研究 [J]. *中国工程科学*, 2014, 16(2): 88—92.
SU J, FANG Z. Experimental study on dimensional effect of mortar cubic compressive strength [J]. *Engineering Sciences*, 2014, 16(2): 88—92. (In Chinese)
- [14] 管俊峰, 姚贤华, 白卫峰, 等. 水泥砂浆断裂韧度与强度的边界效应和尺寸效应 [J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(4): 556—560.
GUAN J F, YAO X H, BAI W F, *et al.* Boundary effect and size effect of fracture toughness and strength of mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(4): 556—560. (In Chinese)
- [15] 于蕾. 水泥混凝土的微观性能 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 60—61.
YU L. Micro-properties of cement concrete [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017: 60—61.
- [16] BAZANT Z P. Scaling of quasibrittle fracture: asymptotic analysis [J]. *International Journal of Fracture*, 1997, 83(1): 41—49.
- [17] KIM J K, EO S H. Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1990, 42(153): 233—238.
- [18] GB 50003—2011 砌体结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 112.
GB 50003—2011 Code for design of masonry structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011: 112. (In Chinese)
- [19] 汤峰, 梁建国, 彭茂峰. 砂浆水平灰缝厚度对蒸压粉煤灰砌体抗压强度的影响 [C] // 中国工程建设标准化协会砌体结构委员会. 新型砌体结构体系与墙体材料: 上册—工程应用. 北京: 中国工程建设标准化协会砌体结构委员会, 2010: 8.
TANG F, LIANG J G, PENG M F. Effect of horizontal slurry thickness of mortar on compressive strength of autoclaved fly ash masonry [C] // Branch of Masonry Structures, China Association for Engineering Construction Standardization. *New Masonry Structure System and Wall Material (Volume 1)—Engineering Application*. Beijing: Branch of Masonry Structures, China Association for Engineering Construction Standardization, 2010: 8. (In Chinese)
- [20] 徐春一. 蒸压粉煤灰砖砌体受力性能试验与理论研究 [D]. 大连: 大连理工大学建设工程学部, 2011: 30—32.
XU C Y. Experimental and theoretical research on the mechanics behavior of autoclaved fly ash brick masonry [D]. Dalian: Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, 2011: 30—32. (In Chinese)
- [21] 林文修, 夏克勤. 灰砂砖厚度和灰缝厚度对砌体力学性能的影响 [J]. *建筑节能*, 1993(3): 19—22.
LIN W X, XIA K Q. Effect of thickness of mortar brick and mortar joint on mechanical properties of masonry [J]. *Building Energy Efficiency*, 1993(3): 19—22. (In Chinese)
- [22] 万智, 黄靓, 刘燕, 等. 灌孔 N 式砌块砌体抗压强度理论研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(4): 20—24.
WAN Z, HUANG L, LIU Y, *et al.* Research on the compressive behaviors of grouted n-type block masonry [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2011, 38(4): 20—24. (In Chinese)
- [23] 黄靓, 陶承志, 陈良, 等. N 式砌块砌体受压性能研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2008(9): 19—22.
HUAN L, TAO C Z, CHEN L, *et al.* Research on the compressive behaviors of n-type block masonry [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2008(9): 19—22. (In Chinese)