

文章编号:1673-2049(2019)06-0018-08

页岩空心砖抗压强度分布特征统计分析

李碧雄^{1,2}, 陈 斌^{1,2}, 牟兵雄^{1,2}

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065;

2. 四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:对四川地区常用的3种页岩空心砖分别进行不同受压面的抗压强度试验,取四、五、六孔3种孔洞形式的空心砖各90块,每种空心砖大面、条面和顶面抗压强度试验试件各为30块。计算了不同孔洞形式空心砖不同受压面的抗压强度变异系数,对比分析了不同空心砖同一受压面和同种空心砖不同受压面的强度离散性。比较正态分布和Weibull分布对页岩空心砖抗压强度分布特征的反映情况。通过Weibull分布对不同空心砖相同受压面及同种空心砖不同受压面的9组试验的抗压强度进行可靠度分析。结果表明:Weibull分布比正态分布更能反映空心砖抗压强度的分布特征规律;空心砖的抗压强度离散性及其可靠度受孔洞形式影响,相同受压面的3种页岩空心砖中,四孔空心砖离散性较大,而六孔空心砖的抗压强度离散性最小,可靠度最好;同种空心砖的不同受压面也影响空心砖的抗压强度离散性和可靠度,同种空心砖的3个受压面中,顶面抗压强度明显高于条面和大面的抗压强度,且顶面抗压强度分布更集中,离散性最小,可靠度最好。

关键词:空心砖;抗压强度;变异系数;Weibull分布;离散性;可靠度

中图分类号:TU362 **文献标志码:**A

Statistical Analysis of Compressive Strength of Shale Hollow Bricks

LI Bi-xiong^{1,2}, CHEN Bin^{1,2}, MOU Bing-xiong^{1,2}

(1. College of Architecture & Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Deep Earth Science and Engineering, Ministry of Education,

Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The compressive strength tests of three kinds of shale hollow bricks widely used in Sichuan area were carried out on different compressive surfaces. 90 hollow bricks with four, five and six holes were selected, and the number of each kind of hollow brick in compressive strength tests of large, strip and top surfaces was 30. The variable coefficient of compressive strength of hollow bricks with different holes and different compressive surfaces was calculated, and the strength discreteness of different hollow bricks with the same compressive surface and the same hollow bricks with different compressive surfaces was compared and analyzed. The response of normal distribution and Weibull distribution to the compressive strength distribution characteristics of shale hollow bricks was compared. Through Weibull distribution, the reliability of 9 groups of tests on the same compressive surface of different hollow bricks and different compressive surfaces of the same kind of hollow bricks was analyzed. The results show that

收稿日期:2018-12-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508802);国家自然科学基金项目(51678379);

四川省学术带头人培养基金项目(川人社办发[2016]183-2)

作者简介:李碧雄(1970-),女,湖南安化人,教授,工学博士,E-mail:libix@126.com。

Weibull distribution can better reflect the distribution characteristics of compressive strength of hollow bricks than normal distribution; the discreteness and reliability of compressive strength of hollow bricks are influenced by the type of holes; the discreteness of four-hole hollow bricks in three kinds of shale hollow bricks with the same compressive surface is larger, while the discreteness of compressive strength of six-hole hollow bricks is the smallest. The different compressive surfaces of the same kind of hollow brick also affect the discreteness and reliability of the compressive strength of the hollow brick. Among the three compressive surfaces of the same kind of hollow brick, the compressive strength of the top surface is significantly higher than that of the strip surface and the large surface, and the distribution of the compressive strength of the top surface is more concentrated, the dispersion is the smallest and the reliability is the best.

Key words: hollow brick; compressive strength; variable coefficient; Weibull distribution; discreteness; reliability

0 引言

空心砖是应用最广泛的填充墙材料之一,但是空心砖填充墙强度低、抗震性能差,在历次地震中,即使在地震烈度相对较低的区域,空心砖填充墙都遭受了不同程度的破坏^[1-5],在装修标准日益提高的今天,由此造成的经济损失愈发巨大,填充墙严重破坏还会危及人们的生命安全。空心砖填充墙是以非结构构件存在于房屋建筑中,长期以来,对其力学性能关注较少,认识有限。随着人类生活水平的提高,非结构构件的抗震性能日益受到关注。深入系统地掌握目前中国建筑市场上使用的空心砖及其砌体力学性能不仅是解释其震害表现的需要,更是将来改善空心砖填充墙抗震性能的基础。

国内外对空心砖及其砌体的研究主要集中在保温隔热性能与空心砖砌体填充墙的力学性能以及抗震性能评估,对空心砖的单砖力学性能方面的研究相对较少。牟兵雄等^[6]采用三孔页岩空心砖进行了单砖抗压试验和抗折试验,结果表明空心砖 3 个受压面的抗压强度存在明显差异,呈顶面最大、条面次之、大面最小的规律。赵祖芳等^[7]、梁鑫晓等^[8]对空心砖及其砌体进行了抗压试验,结果表明,砌体受压承载力取决于其中某皮砖的力学性能,可见单皮砖的强度极有可能控制整个砌体力学性能。Wu 等^[9-10]、Bai 等^[11-13]对 21 排孔和 29 排孔空心砌块及其砌体进行热工试验和力学性能试验,结果表明其力学性能满足实际工程要求,且具有良好的保温隔热效应,但其没有分析单砖的强度分布规律。关于空心砖力学性能的试验研究资料相对较少,研究者们更多地关注空心砖墙体、空心砖填充墙框架以及配筋等加固后页岩空心砖砌体的抗震性能或力学性

能,如 Petrone 等^[14]对空心砖隔墙进行了双向振动台试验,苏启旺等^[15-16]、Li 等^[17]通过低周循环加载的全尺寸完全填充和有开口空心砖填充框架结构的试验研究其抗震性能,Hao 等^[18]研究表明剪力墙外的空心砖保温隔热层提高了剪力墙的变形能力和抗震性能,陈万山等^[19-21]研究表明配置拉结筋可大幅提高页岩空心砖墙体的抗震能力和变形性能,Ozsayin 等^[22]研究了碳纤维加固对 RC 框架空心砖填充墙抗压、抗剪以及变形能力的影响。为了更好地研究空心砖填充墙作为非结构构件在地震中的破坏机理及其抗震性能,有必要对空心砖基本的力学性能及其强度离散性特征进行深入研究。

考虑到空心砖作为填充墙的砌筑方式多样性及在地震作用下空心砖的可能受力方向与重力荷载作用下不同,有必要对空心砖不同承压方向(大面、条面、顶面)的抗压强度进行试验研究。同时为避免孔洞形式单一带来试验结果的片面性,本文选取四川地区常用的 3 种孔洞形式空心砖进行三面抗压强度试验,对试验结果进行强度特征分析和概率统计分析,以掌握空心砖不同承压方向的抗压强度特点及其概率分布特征,为空心砖的孔洞形式改良、砌筑工序标准化和相关规范的修订完善提供理论基础和试验依据。

1 单砖抗压强度试验

1.1 试验材料

本试验所用烧结页岩空心砖为成都市吉安砖厂生产的四、五、六孔 3 种孔洞形式的空心砖。四孔空心砖的规格为 240 mm×240 mm×100 mm,孔洞率为 63.3%;五孔空心砖的规格为 240 mm×200 mm×115 mm,孔洞率为 59.1%;六孔空心砖的规格为

240 mm×200 mm×115 mm,孔洞率为 61.4%;3 种孔洞形式的空心砖如图 1 所示。

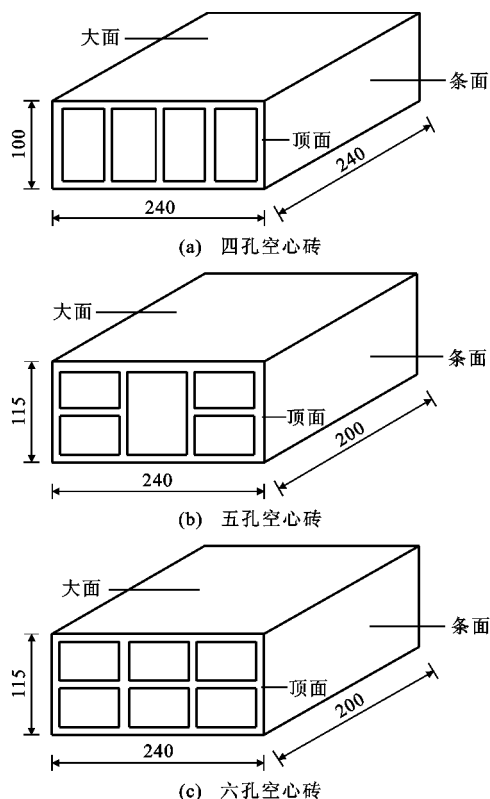


图 1 3 种孔洞形式的空心砖(单位:mm)

Fig. 1 Three Types of Hollow Bricks with Holes (Unit:mm)

1.2 抗压试验

烧结页岩空心砖单砖抗压强度试验的试件制作及测试按照《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)和《混凝土小型空心砌块试验方法》(GB/T 4111—1977)的要求进行。抗压试样是在试验用砖中随机抽取空心砖,每一种孔洞形式各 90 块,按照空心砖的 3 个不同受压面分成 3 组,即大面、条面和顶面受压,各组均包括 30 块砖。四、五、六孔砖分别用 S, W, L 表示,大面、条面、顶面分别用 B, T, D 表示,对每组试件从 1~30 编号。在受压前,每种试件选取 2 个测量其受压面的长度和宽度,计算其平均值,结果精确到毫米。试验时将受压试样平放在压力板中央,使试样轴线同压力板的中线重合,然后以 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的加载速率均匀平稳地加压,直到试件破坏,记录保存试样的荷载-位移曲线,记录最大破坏压力及破坏特征。

1.3 试验现象

3 种孔洞形式的空心砖受压破坏形态如图 2 所示。大面受压时,四孔空心砖中间的 3 条竖向肋先出现裂缝并逐渐扩展,最终贯穿整个水平面,条面孔

壁也会出现水平裂缝,最终沿裂缝发生上下错动而破坏,如图 2(a)所示;五孔空心砖大面受压时,条面孔壁或竖向肋与水平肋相交处先出现裂缝,随着裂缝贯穿水平肋脱落,条面与大面连接处出现水平裂缝,整体出现倾斜或倒塌,如图 2(b)所示;六孔空心砖在水平肋脱落后,竖向肋或孔壁发生上下错动而破坏,如图 2(c)所示。

条面受压时,其总体表现为水平肋与竖向肋或大面孔壁相交处先出现裂缝,随着裂缝逐渐贯通,孔壁失去水平肋的约束而发生失稳。

顶面受压时,在肋与孔壁相交处截面有突变,裂缝的发展始于界面突变处,大面和条面上均有竖向裂缝,随着裂缝的逐渐发展,当条面和大面裂缝贯穿并相遇,可能导致空心砖的部分分离和脱落。

1.4 实测 3 种空心砖各面抗压强度

为了更加直观地对比 3 种空心砖各承压面的抗压强度,将试验得到的 3 种空心砖各面的抗压强度按照从小到大的顺序依次排列,得到 3 种空心砖各面抗压强度分布,如图 3 所示。

从图 3 可以看出:3 种空心砖的各面抗压强度值分布范围均较广;顶面抗压强度明显高于条面、大面的抗压强度;对比不同孔洞形式空心砖相同承压面的抗压强度发现,六孔空心砖的各承压面抗压强度值分布相对于另外 2 种孔洞形式较为集中。

3 种孔洞形式空心砖各面抗压强度存在明显差异,通过观察发现不同受压面的有效受压孔壁面积占整个受压面百分比的大小影响其抗压强度。以 3 种空心砖顶面受压为例,四、五、六孔空心砖顶面受压时的有效受压孔壁面积占比分别为 40.8%, 43%, 46.2%,对应的空心砖顶面抗压强度六孔最大,五孔次之,四孔最小。

1.5 强度离散性分析

由于 3 种空心砖的各面抗压强度分布范围较广,因此需要利用变异系数对空心砖抗压强度的离散性进行分析。变异系数是标准差与平均值的比值,是对数据按其均值进行了标准化处理,没有量纲,可以用于客观比较。根据式(1),(2)计算各面抗压强度的标准差和变异系数,并将相应结果列于表 1。

$$S = \sqrt{\frac{1}{29} \sum_{i=1}^{30} (f_i - \bar{f})^2} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{S}{\bar{f}} \quad (2)$$

式中: S 为强度标准差; δ 为强度变异系数; \bar{f} 为强度



图 2 空心砖受压破坏形态

Fig. 2 Failure Modes of Hollow Bricks Under Pressure

平均值; f_i 为单块试样的强度。

根据《烧结空心砖和空心砌块》(GB/T 13545—2014)在强度等级评定中规定:当变异系数小于等于 0.21 时,按抗压强度平均值、标准值评定空心砖和空心砌块的强度等级;当变异系数大于 0.21 时,按抗压强度平均值、单块最小抗压强度值评定空心砖和空心砌块的强度等级。由表 1 中的数据可见,本次所用 3 种空心砖实际测得的各面强度变异系数均大于 0.21,表明试验所用批次空心砖抗压强度的离散性较大,因此其强度等级评定应采用后者。另外,同一种空心砖的 3 个受压面变异系数也存在较大的差异,如表 1 中 3 种空心砖各面强度变异系数总体呈条面抗压强度变异系数最大、顶面抗压强度变异系数最小的规律。由此可知,在空心砖的大面、条面、顶面抗压强度中,条面抗压强度的离散性最大,顶面抗压强度的离散性最小,故建议设计和施工环节应考虑空心砖的砌筑方向。此外,对比 9 组试验结果的变异系数可知,四孔空心砖各面抗压强度变异系数均远大于五、六孔空心砖相应受压面的变异系数,四孔空心砖的抗压强度离散性最大,地震中容易因个别空心砖强度过低引发整体失效,建议取缔该形式的空心砖。综上所述,空心砖的孔洞形式和不同受压面对其抗压强度离散性有很大影响。

2 单砖抗压强度统计分析

2.1 Weibull 统计分析方法

3 种空心砖的各面抗压强度分布范围较广,且强度离散性大,为更好地掌握其强度分布规律,对其

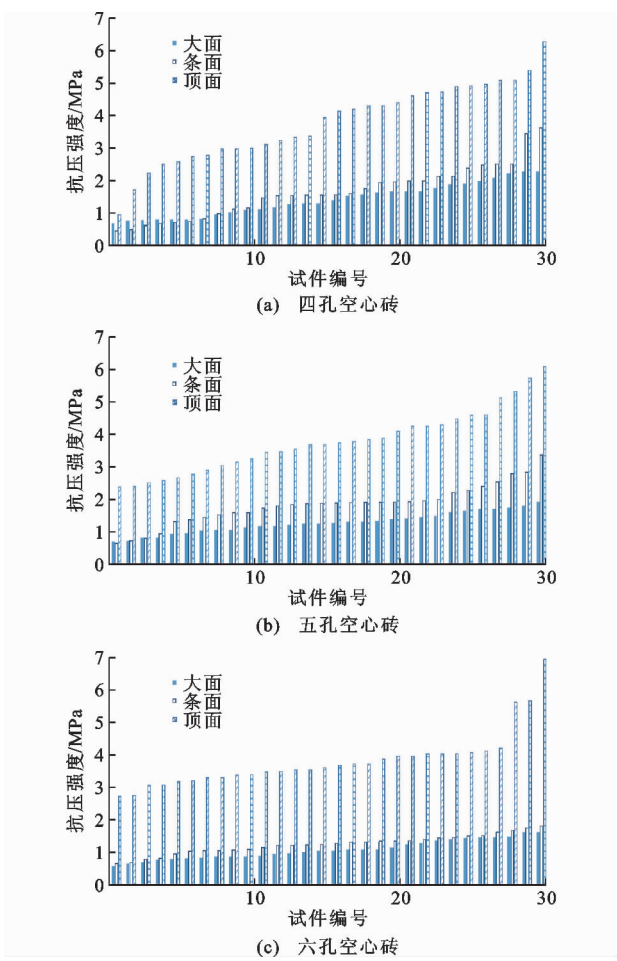


图 3 3 种空心砖各面抗压强度分布

Fig. 3 Compressive Strength Distribution of Three Types of Hollow Bricks

表 1 空心砖强度变异系数

Tab. 1 Variable Coefficient of Compressive Strength of Hollow Bricks

孔洞形式	试件组别	强度平均值/ MPa	强度标准差/ MPa	变异系数
六孔空心砖	LB	1.07	0.29	0.27
	LT	1.24	0.29	0.24
	LD	3.82	0.88	0.23
五孔空心砖	WB	1.27	0.32	0.25
	WT	1.83	0.61	0.33
	WD	3.79	0.98	0.26
四孔空心砖	SB	1.40	0.50	0.36
	ST	1.65	0.81	0.49
	SD	3.78	1.22	0.32

进行 Weibull 统计分析。Weibull 分布的概率密度函数 $f(\sigma)$ 为

$$f(\sigma)=\frac{m}{\sigma_0^m}(\sigma-\sigma_{th})^{m-1}\exp[-(\frac{\sigma-\sigma_{th}}{\sigma_0})^m]$$

(3)

Weibull 分布函数的一般表达式为

$$F(\sigma)=1-\exp[-(\frac{\sigma-\sigma_{th}}{\sigma_0})^m]$$

(4)

式中： $F(\sigma)$ 为试件在应力 σ 时的失效概率； m 为形状参数 (Weibull 模量)，决定失效概率密度曲线的形状特征； σ_0 为尺度参数，代表失效概率为 63.2% 所对应的强度； σ_{th} 为位置参数，即最小强度。

当位置参数 σ_{th} 取 0 时概率密度函数为二参数 Weibull 分布，将其代入公式 (4) 后移项得

$$1-F(\sigma_i)=\exp[-(\frac{\sigma_i}{\sigma_0})^m]$$

(5)

对公式 (5) 取 2 次自然对数即可得

$$\ln[\ln(\frac{1}{1-F(\sigma_i)})]=m\ln(\sigma_i)-m\ln(\sigma_0)$$

(6)

然后以公式 (6) 中 $\ln[\ln(\frac{1}{1-F(\sigma_i)})]$ 作为 Y 轴，

以 $\ln(\sigma_i)$ 作为 X 轴，通过线性拟合得 $Y=mX+b$ ，所对应的直线斜率即是 Weibull 模量 m 。

2.2 正态分布与 Weibull 分布的对比

Weibull 分布和正态分布是材料科学中应用最广泛的统计分布，为了了解实测空心砖的抗压强度分布更适合用哪些统计分布来描述，将 3 种孔洞形式空心砖的抗压强度分别采用正态分布和 Weibull 分布进行统计分析。如前所述，3 种孔洞形式的空心砖均是顶面抗压强度高于大面和条面抗压强度，再加之在实际工程中空心砖通常是顶面承压，因此首先对 3 种孔洞形式空心砖的顶面抗压强度进行统计分布对比，将试验所得的四、五、六孔空心砖的顶面抗压强度直方图、相应的正态分布失效概率密度和 Weibull 分布失效概率密度随抗压强度值变化的曲线绘制于一幅图中，如图 4 所示。

由图 4 可知，空心砖各面抗压强度试验结果同时服从正态分布和 Weibull 分布。进一步对比图 4 中正态分布概率密度曲线和 Weibull 分布概率密度曲线不难发现，2 条曲线都有自己的峰值，但是取得峰值所在强度范围略有不同，相比之下 Weibull 分布的概率密度曲线取得峰值所在强度范围与实际频率更高的范围更加接近。例如如图 4(b) 中五孔空心砖抗压强度的 2 条概率密度曲线，正态分布概率密度曲线峰值在 3.07~3.74 MPa 这个强度范围内取得，Weibull 分布概率密度曲线峰值在 3.74~4.42 MPa 这个强度区间取得，而实际情况中频率最高的强度区间也是 3.74~4.42 MPa。不难发现图 4(a)，(c) 中也有类似的现象，因此相比于正态分布，Weibull 分布更能反映实际情况的强度分布特征。

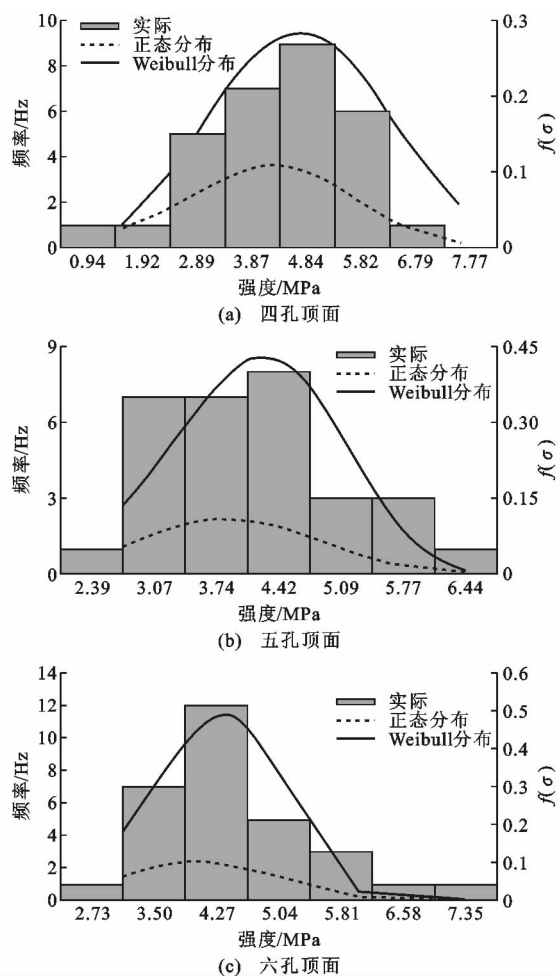


图 4 空心砖顶面失效概率密度
Fig. 4 Failure Probability Densities of Hollow Brick Top Surfaces

2.3 基于 Weibull 分布的抗压强度统计分析

对比分析可知,Weibull 分布与实际的抗压强度分布更吻合,故将 3 种空心砖抗压强度的测定结果用 Weibull 统计的分析步骤计算 Weibull 模量 m 和特征强度 σ_0 ,可以得到不同孔洞形式空心砖各面抗压强度 Weibull 统计计算结果,做 $Y=mX+b$ 拟合曲线(图 5),根据每一条直线的斜率计算得到相应的 Weibull 模量 m ,而特征强度 σ_0 可以由直线与 X 轴的交点求出。

3 种空心砖大面、条面、顶面的 Weibull 模量 m 分别为:四孔 3.18,2.12,3.14,五孔 4.63,3.18,4.71,六孔 4.42,5.43,4.85。显然六孔空心砖的 Weibull 模量比五孔和四孔空心砖更高一些,说明六孔空心砖的抗压强度分布范围更小、更集中,强度离散性更小。这也与图 4(c)中六孔空心砖抗压强度分布更集中相吻合。

由图 5 中各面对应直线与 X 轴的交点位置可

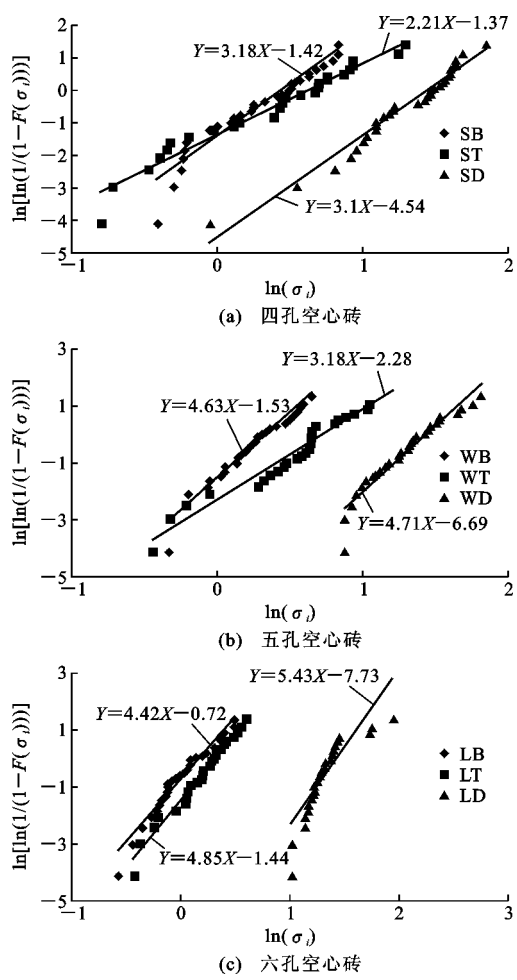


图 5 Weibull 分布失效概率拟合曲线
Fig. 5 Fitting Curves of Weibull Distribution Failure Probability

以看出,3 种孔洞形式空心砖顶面抗压强度的特征强度 σ_0 明显要高于另外 2 个受压面的 σ_0 ,表明空心砖顶面的平均抗压强度要比条面和大面的平均抗压强度高,这也与第 1.3 节中各面强度分布情况一致。分析同一种孔洞形式空心砖 3 个受压面的 Weibull 模量,发现四孔空心砖的顶面与大面的 Weibull 模量很接近,五孔和六孔空心砖均是顶面具有最大的 Weibull 模量,这说明顶面抗压强度分布范围更小、更集中,强度离散性更小。

2.4 可靠度分析

根据《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)规定,结构在规定设计使用年限以内应具有足够的可靠度。结构构件的可靠度是指其在规定的条件下和规定的时间内,完成预定功能的概率。本文空心砖的可靠度是其不发生失效的概率。公式(4)得到 Weibull 分布的失效概率 $F(\sigma)$,因此可以得到可靠度 $R(\sigma_i)$ 与 Weibull 模量 m 的关系式为

$$R(\sigma_i) = 1 - F(\sigma_i) = \exp\left[-\left(\frac{\sigma - \sigma_{th}}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (7)$$

于是将 3 种空心砖各面强度的 Weibull 模量 m 和特征强度 σ_0 代入公式(7),即可得到 3 种空心砖试样各面可靠度随强度变化的曲线,如图 6 所示。

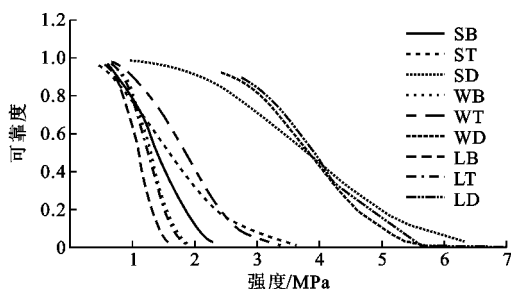


图 6 空心砖各面可靠度随强度变化曲线

Fig. 6 Variation Curves of Reliability with Strength of Different Hollow Brick Surfaces

从图 6 可以看出,在强度较低时可靠度接近 1,此时空心砖 3 个面都具有较好的可靠性,但随着强度的增加,可靠度急剧降低。

对比 3 种空心砖同一受压面的可靠度曲线易看出相同强度所对应的可靠度不同,且对应曲线下降段的斜率存在明显差异,表明空心砖的孔洞形式会影响其强度可靠度。同一种空心砖各受压面对应的可靠度也存在很大差异,易看出顶面抗压强度的可靠度曲线下降明显缓于大面和条面可靠度,顶面可靠度的下降过程更加平缓。

3 结 语

(1)空心砖抗压强度的离散性明显受孔洞形式影响,相比较而言,六孔空心砖的抗压强度分布最集中,离散性最小,四孔空心砖的强度离散性过大,建议取缔该形式的空心砖。

(2)Weibull 分布比正态分布更能反映空心砖的强度分布特征。

(3)空心砖不同承压方向抗压强度的离散性有较大差异,顶面抗压强度离散性最小,不同孔洞形式空心砖强度可靠度不同,同种空心砖不同受压面强度可靠度亦存在差异,顶面抗压强度的可靠度最佳,因此设计和施工时应考虑空心砖的砌筑方向。

参考文献:

References:

[1] 彭娟,李碧雄,邓建辉.芦山地震和汶川地震中空洞填充墙震害反思[J].世界地震工程,2014,30(2):186-193.

PENG Juan, LI Bi-xiong, DENG Jian-hui. Rethink of Damage to Hollow-brick Infill Walls During Lushan Earthquake and Wenchuan Earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(2): 186-193.

[2] 李碧雄,谢和平,邓建辉,等.汶川地震中房屋建筑震害特征及抗震设计思考[J].防灾减灾工程学报,2009,29(2):224-230,236.

LI Bi-xiong, XIE He-ping, DENG Jian-hui, et al. Characteristic Analysis of Performance and Damage of Buildings in Wenchuan Earthquake and Considerations in Aseismic Design of Buildings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(2): 224-230, 236.

[3] 李碧雄,彭娟.框架结构中的空心砖填充墙震害反思与建议[J].成都工业学院学报,2014,17(2):73-76.

LI Bi-xiong, PENG Juan. Lessons and Suggestions for Hollow-brick Infill in Frame Structure from the Damage Caused by Recent Earthquakes [J]. Journal of Chengdu Technological University, 2014, 17(2): 73-76.

[4] 曹进,李碧雄,邓建辉,等.芦山地震砌体结构震害分析[J].建筑结构,2013,43(24):28-32.

CAO Jin, LI Bi-xiong, DENG Jian-hui, et al. Seismic Damage Analysis of Masonry Structures During Lushan Earthquake [J]. Building Structure, 2013, 43(24): 28-32.

[5] 清华大学,西南交通大学,北京交通大学土木工程结构专家组.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1-9.

Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Xinan Jiaotong University and Beijing Jiaotong University. Analysis on Seismic Damage of Buildings in the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9.

[6] 牟兵雄,李碧雄,彭娟,等.烧结页岩空心砖力学性能试验研究[J].建筑结构,2016,46(18):113-117.

MOU Bing-xiong, LI Bi-xiong, PENG Juan, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Sintered Shale Hollow Bricks [J]. Building Structure, 2016, 46(18): 113-117.

[7] 赵祖芳,李碧雄,唐甜,等.三种孔洞形式空心砖砌体力学性能试验研究[J].建筑结构,2018,48(6):40-45.

ZHAO Zu-fang, LI Bi-xiong, TANG Tian, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Three Different Types of Hole Forms of Hollow Brick Masonry [J]. Building Structure, 2018, 48(6): 40-45.

[8] 梁鑫晓,李碧雄,彭娟.烧结空心砖砌体力学性能的

- 试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(12): 90-95.
- LIANG Xin-xiao, LI Bi-xiong, PENG Juan. Experimental Study on Mechanical Properties of Fired Hollow Brick Masonry[J]. Building Structure, 2015, 45(12): 90-95.
- [9] WU J, BAI G L, KANG K W, et al. Compressive Strength and Block-mortar Bond of a New-type of Insulation Hollow Block[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 381: 1-8.
- [10] WU J, BAI G L, ZHAO H Y, et al. Mechanical and Thermal Tests of an Innovative Environment-friendly Hollow Block as Self-insulation Wall Materials[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 342-349.
- [11] BAI G L, DU N J, XU Y Z, et al. Study on the Thermal Properties of Hollow Shale Blocks as Self-insulating Wall Materials[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 1-12.
- [12] 白国良, 秦朝刚, 吴 健, 等. 矩形孔页岩烧结保温砌块砌体基本力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(12): 83-89.
- BAI Guo-liang, QIN Chao-gang, WU Jian, et al. Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Shale Fired Heat-insulation Block Masonry[J]. Building Structure, 2015, 45(12): 83-89.
- [13] 白国良, 浮广明, 权宗刚, 等. 烧结保温空心砌块薄灰缝砌体基本力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 151-158.
- BAI Guo-liang, FU Guang-ming, QUAN Zong-gang, et al. Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Fired Heat-insulation Hollow Block Thin Mortar Joint Masonry[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 151-158.
- [14] PETRONE C, MAGLIULO G, MANFREDI G. Shake Table Tests for the Seismic Assessment of Hollow Brick Internal Partitions[J]. Engineering Structures, 2014, 72: 203-214.
- [15] SU Q W, CAI G C, CAI H R. Seismic Behaviour of Full-scale Hollow Bricks-infilled RC Frames Under Cyclic Loads[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(7): 2981-3012.
- [16] 苏启旺, 张 言, 许子宜, 等. 空心砖填充墙 RC 框架抗震性能足尺试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 523-539.
- SU Qi-wang, ZHANG Yan, XU Zi-yi, et al. Full-scale Tests on Seismic Behavior of RC Frames Infilled with Hollow Bricks [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(3): 523-539.
- [17] LI H N, ZHANG J W, LIU L. Seismic Behavior of Insulated Hollow-brick Cavity Walls Using Quasi-static Experimentation[J]. Experimental Mechanics, 2004, 44(4): 396-406.
- [18] HAO Y H, HE L J. Experimental Study on Seismic Stability of Shear Wall by Laying Insulated Shale Hollow Brick Outside[J]. Advanced Materials Research, 2012, 446-449: 269-273.
- [19] 陈万山, 杨德健, 姚 猛. 配筋页岩空心砖墙体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(4): 29-32.
- CHEN Wan-shan, YANG De-jian, YAO Meng. Experimental Analysis on Seismic Behavior of Reinforced Shale Cavity Brick Masonry Walls[J]. Building Structure, 2009, 39(4): 29-32.
- [20] 陈万山, 杨德健, 姚 猛. 非承重页岩空心砖墙体变形性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2008(4): 1-5.
- CHEN Wan-shan, YANG De-jian, YAO Meng. Experimental Study on the Transformative Behavior of Non-bearing Shale Cavity Brick Masonry Walls[J]. New Building Materials, 2008(4): 1-5.
- [21] 陈万山, 杨德健. 局部配筋对页岩空心砖墙体抗震性能影响试验研究[J]. 施工技术, 2011, 40(14): 102-105, 109.
- CHEN Wan-shan, YANG De-jian. Experimental Study on Seismic Behavior of Shale Hollow Brick Masonry Walls Influenced by Partial Reinforcement[J]. Construction Technology, 2011, 40(14): 102-105, 109.
- [22] OZSAYIN B, YILMAZ E, ISPIR M, et al. Characteristics of CFRP Retrofitted Hollow Brick Infill Walls of Reinforced Concrete Frames[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10): 4017-4024.