

文章编号:1671-6833(2007)03-0001-04

# 黄河淤泥多孔砖砌体正交试验的设计及分析

童丽萍, 熊凤鸣, 刘伟

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了通过有限的试验全面有效地考虑多种因素对黄河淤泥多孔砖砌体中长柱构件的影响, 运用正交试验的设计方法对黄河淤泥多孔砖砌体的中长柱构件进行抗压试验, 测量得到各个构件的极限承载力和应变数据. 通过对试验数据的整理和分析, 研究了黄河淤泥多孔砖砌体的中长柱构件在竖向荷载下的抗压承载力和变形性能, 找到各考核指标影响因素的主次关系以及客观存在的影响趋势, 为黄河淤泥多孔砖砌体结构的设计和施工提供一些依据.

**关键词:** 黄河淤泥多孔砖; 中长柱; 正交试验; 方差分析

**中图分类号:** TU522.1<sup>-4</sup> **文献标识码:** A

## 0 引言

黄河淤泥多孔砖作为一种环保、节能的新型墙体材料, 有着广阔的市场应用前景和重大的社会意义<sup>[1]</sup>. 目前, 对其材料的物理性能和基本力学性能的研究工作已经取得了一定的成果. 为更好地了解黄河淤泥多孔砖墙体的整体受压性能, 笔者开展了对中长柱构件在竖向荷载下的抗压试验研究.

中长柱构件的工作机理受多种因素影响, 诸如: 砂浆强度、构件高厚比、荷载偏心率、块体强度、施工质量、龄期等等, 采用“枚举法”对各种因素的不同水平逐一进行试验, 工作量很大. 为此, 我们对黄河淤泥多孔砖砌体的中长柱构件进行正交试验, 通过对其承载力、应变数据的整理, 综合分析其抗压承载力和变形性能, 为进一步了解黄河淤泥多孔砖砌体的整体工作性能奠定基础.

## 1 正交试验设计

### 1.1 试验设计

本次试验所用中长柱构件采用尺寸为 240 mm × 115 mm × 90 mm、强度等级为 MU10 的黄河淤泥多孔砖进行砌筑, 试件截面尺寸为 240 mm × 240 mm. 正交试验选择了对黄河淤泥多孔砖砌体中长柱构件的受压性能影响较大的 3 个因素: 砂

浆的强度、构件的高厚比以及荷载的偏心率进行探讨, 并且每个因素选取 3 个水平, 在各水平上选择的参数见表 1. 笔者选用的  $L_9(3^4)$  正交表<sup>[2-5]</sup> 列于表 2 中. L 表示正交表; 9 是试验次数; 3 是因素的水平数; 4 是列数, 表示最多能容纳因素的个数. 为了考虑试验误差的影响, 将第 4 列设计为未安排因素的空白列<sup>[6]</sup>. 此列计算得到的数据只是由正交表本身的排列对结果的整理, 并不包含因素水平间的差异, 所以仅反映了试验误差的大小. 考虑到试件可能在运输时或者试验时出现问题, 本试验的每个试件制作相同的 2 个.

### 1.2 考核指标

笔者运用正交试验法对承载力和变形这两种力学性能进行考核, 因其是衡量受力变形规律的重要参数, 并且是可测的, 所以可用来反映黄河淤泥多孔砖砌体中长柱构件自身的受力特点.

砌体轴心受压破坏特征的第二阶段中, 当荷载约为破坏荷载的 80% ~ 90% 时, 砌体已临近破坏, 应看作是结构构件处于危险状态<sup>[7]</sup>, 而黄河淤泥多孔砖砌体也符合同样的特征<sup>[8]</sup>. 为此, 具体确定黄河淤泥多孔砖砌体中长柱构件的极限承载力 ( $P_u$ ) 和荷载为  $P_u$  的 80% 时的应变  $\epsilon_{80\% P_u}$  作为本正交试验的考核指标. 其中, 极限承载力由试验直接获得;  $\epsilon_{80\% P_u}$  通过测得的应变绘制的荷载 ~ 应变 (轴心受压构件取 4 个方向应变的平均值,

收稿日期: 2007-03-08; 修订日期: 2007-05-16

基金项目: 河南省杰出人才创新基金资助项目 (0621001000); 河南省高等学校杰出科研人才创新工程 (2005KYCX018); 郑州市重大科技攻关资助项目 (04BA60ABK01)

作者简介: 童丽萍 (1960-), 女, 陕西周至人, 郑州大学教授, 博士生导师, 河南省特聘教授, 主要从事复杂结构体系及建筑结构可持续发展的研究.

偏心受压构件取截面受压边缘处)曲线拟合出的函数关系得到。

本试验采用压力试验机进行加压,在试件的每个侧面上分别按上、中、下3个位置均匀布置6个应变片,并在试件的每个侧面安装1个百分表,测量各个试件的极限荷载及各级荷载下的应变。

表1 因素水平表

Tab.1 The table of factors and levers

水平	砂浆强度 /MPa	构件高厚比 $\beta = H_0/h$	荷载偏心率 $e/y$
水平1	5	3.3	0
水平2	7.5	4.5	0.25
水平3	10	6.2	0.5

注: $H_0$ 表示试件高度(分别为790 mm、1 090 mm、1 490 mm); $h$ 表示试件的截面高度(240 mm); $e$ 为荷载的作用点到试件截面形心的距离(分别为0 mm、30 mm、60 mm); $y$ 为截面形心到截面边缘的距离(120 mm)。

## 2 正交试验结果与分析

### 2.1 直观分析

正交试验结果示于表2中。将相同试件所得到的每个考核指标取平均值作为每个试验号的指标值进行对比(由于试验过程中的搬运和加载问题,第1和第3号试件所测得的数据各有一个不可用,直接取另一个作为有效数据),得到一些显而易见的结论。

表2 正交设计方案及试验结果

Tab.2 The design scheme and results of orthogonal experiment

因素 试验号	砂浆强度 /MPa(A)	高厚比 $\beta$ (B)	偏心率 $e/y$ (C)	空列	极限承载力 /kN	$\varepsilon_{80\%P_u}$ ( $\times 10^{-6}$ )
1	1(5)	1(3.3)	1(0)	1	305	1 329
2	1(5)	2(4.5)	2(0.25)	2	263	2 022
3	1(5)	3(6.2)	3(0.5)	3	196	2 054
4	2(7.5)	1(3.3)	3(0.5)	2	161.5	2 291
5	2(7.5)	2(4.5)	1(0)	3	230.5	1 114
6	2(7.5)	3(6.2)	2(0.25)	1	174	1 333
7	3(10)	1(3.3)	2(0.25)	3	235	3 641
8	3(10)	2(4.5)	3(0.5)	1	160.5	2 578
9	3(10)	3(6.2)	1(0)	2	184.5	758

注:3个影响因素分别以A、B、C表示,表中括号里的数据对应的是各水平参数。

极限承载力最高的是第1号 $A_1B_1C_1$ 试件,此外第2号 $A_1B_2C_2$ 、第5号 $A_2B_2C_1$ 、第7号 $A_3B_1C_2$ 试验结果也较高。通过观察它们的因素水平可以发现,这4个试验正好对应的是所有试件中不包含最高水平高厚比和偏心率的试件,说明高厚比和偏心率越小对构件的极限承载力越有利; $\varepsilon_{80\%P_u}$ 最小的是第9号 $A_3B_3C_1$ 试件,第5号 $A_2B_2C_1$ 、第1号 $A_1B_1C_1$ 、第6号 $A_2B_3C_2$ 试验结果也是较小的。其中第1、5、9号试验的试件所对应的偏心率万方数据

均为零,说明偏心率越小其构件发生的变形也越小。

### 2.2 极差分析

表3为正交试验结果的极差分析表, $\Sigma K_i$ 表示各因素在每个水平下的试验结果之和,而 $R_i$ 则表示各因素在每个水平下试验结果的平均值( $i=1,2,3$ )。通常用极差 $R(R_{max}-R_{min})$ 来区分因素对考核指标影响的主次,极差越大,说明这个因素对考核指标影响越大,它就是主要因素;反之,则是次要因素。

表3 极差分析表

Tab.3 The table of dispersion analysis

	极限承载力 $P_u$ /kN				$\varepsilon_{80\%P_u}$ ( $\times 10^{-6}$ )			
	A	B	C	空列	A	B	C	空列
$\Sigma K_1$	764	701.5	720	639.5	5 405	7 261	3 201	5 240
$\Sigma K_2$	566	654	672	609	4 738	5 714	6 996	5 071
$\Sigma K_3$	580	554.5	518	661.5	6 977	4 145	6 923	6 809
$R_1$	254.7	233.8	240	213.2	1 802	2 420	1 067	1 747
$R_2$	188.7	218	224	203	1 579	1 905	2 332	1 690
$R_3$	193.3	184.8	172.7	220.5	2 326	1 382	2 308	2 270
R	66	49	67.3	17.5	747	1 038	1 265	580

由表3可知,影响考核指标的主次关系如下:

极限承载力 主→次 C→A→B

$\varepsilon_{80\%P_u}$  主→次 C→B→A

在因素水平变化范围内,以极限承载力作为考核指标,各因素影响顺序为:偏心率>砂浆强度>高厚比。偏心率作为主要的影响因素是合理的:一般情况下,偏心荷载会引起构件截面的削弱、增大构件的侧向变形(挠度)等,对砖砌体的承载能力有较大的不利影响。况且,实际工程中的砌体受压构件,不可能有真正的轴心受压情况<sup>[9]</sup>,偏心率对黄河淤泥多孔砖砌体中柱构件的影响更是不容忽视。砂浆作为砌体的组成材料,其强度的改变必然会对砌体整体的承载力造成影响。而极差分析的结果则表明,砂浆强度影响较大,几乎可以和偏心率的影响相提并论。当然,这里也会有试验构件的砌筑质量(砂浆的饱满度)不同所产生的影响。

以 $\varepsilon_{80\%P_u}$ 作为考核指标,各因素的影响顺序为:偏心率>高厚比>砂浆强度。偏心受压构件截面的应力图形非均匀分布,在偏心荷载一侧的截面边缘处,应变是最大的,受偏心率的影响更加敏感。高厚比对变形的影响仅次于偏心率,是因为高厚比越大,构件越细长,在实际结构的工作过程中,由于纵向弯曲较大产生的侧向挠度会使荷载偏心率增大,侧向挠度和偏心荷载的相互作用会

越明显,从而对变形的影响也是较大的.砂浆的变形随着其弹性模量的减小而增大,与其强度等级的关系不大(和误差影响几乎相同),所以构件的变形受砂浆强度的影响小.

从上述分析中不难发现,对于不同的考核指标各因素的影响程度和效果并不一致.因此,在以提高柱体构件工作性能为目标而确定各因素的最优值时,还需兼顾其它相关性能的情况.

### 2.3 趋势分析

为了比较各因素对考核指标影响的大小、选出各因素中对指标最有利的水平,更直观地看出其影响规律,以水平数为横坐标,各指标的平均数为纵坐标绘制出因素和指标的关系图,如图1和图2所示.

图1表明,当极限承载力最大时,3因素的水平分别为 $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ ,对应的状态是砂浆强度等级为M5、高厚比为3.3和轴心受压(偏心率为零的特殊情况).A、B、C因素3个水平测值的和均以第1个水平为最大,因此, $A_1B_1C_1$ 为最佳(即极限承载力最大)试验条件.

从趋势图可以明显看出,高厚比越大,偏心率越大,极限承载力越小,这与受压杆件因长细比和初始缺陷的影响而失稳的情况类似,并且符合一般墙体的受力规律;而砂浆强度只在第1水平(即M5)时极限承载力最大,2、3水平时对应的极限承载力较小,这与国内外的研究成果(砌体的抗压强度随着砂浆强度的提高有所提高)有一定出入,经分析,原因如下:①与后两组即4~6和7~9号试验的数据均由2个相同的构件分别做试验取得平均值后再进行分析不同,由于试验原因,表2中第1、3号试件所对应的数据(305 kN和196 kN)是一个构件的实测值,减少了样本空间,增加了数据的奇异性;②第1组(前3号)试验的加载分级过细,在一定程度上也减缓了构件的破坏,使得极限承载力水平较高;③砂浆强度、高厚比和偏心率等因素之间存在着“交互作用”,这也会在一定程度上影响构件的极限承载力.另外还可能与其他一些因素有关,其合理性有待进一步的试验研究验证.

图2表明,当3个因素的水平分别为 $A_2$ 、 $B_3$ 、 $C_1$ 时,应变指标 $\epsilon_{80\%P_u}$ 最小,分别对应砂浆强度等级为M7.5、高厚比为6.2和轴心受压的情况.因此, $A_2B_3C_1$ 为最佳试验条件,本试验未给出此种组合,需要补充试验来进一步地验证,找到最优组合,这也是正交试验的优势所在.

### 万方数据

从趋势图能够发现,高厚比越小, $\epsilon_{80\%P_u}$ 越大.此结果可从直观分析得到解释,构件高厚比的增大对其极限承载力产生不利的影响(从表2也可以发现高厚比为6.2的构件其极限承载力处于低水平),所以虽然高厚比的增大会使变形在一定程度上有所增长,但是由于极限承载力的限制,其变形增长的时间较短,故 $\epsilon_{80\%P_u}$ 反而呈现相反的趋势;偏心率只在第1水平时使 $\epsilon_{80\%P_u}$ 最小,2、3水平时对应的 $\epsilon_{80\%P_u}$ 较大且大小几乎相同,此结果说明偏心率的存在使得构件的变形较轴心受压构件大得多,这对于必定存在偏心的实际结构具有一定的指导意义.

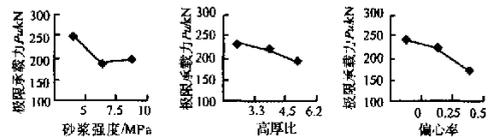


图1 极限承载力随各因素变化的趋势图  
Fig.1 The trendline of ultimate carrying capacity along with the change of factors

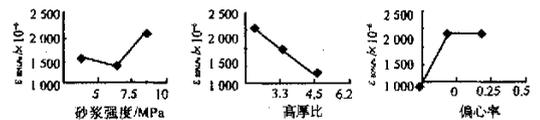


图2  $\epsilon_{80\%P_u}$ 随各因素变化的趋势图  
Fig.2 The trendline of  $\epsilon_{80\%P_u}$  along with the change of factors

### 2.4 方差分析

极差分析已经直观地表示出各因素对各考核指标影响的主次顺序,但不能估计试验过程中及结果测定时必然存在的误差的大小,无法把由试验条件改变所引起的数据波动与由试验误差所引起的数据波动严格地区别开来,所以不能确定各因素的影响程度.为弥补极差分析的不足,笔者进一步采用方差分析的方法.

方差分析结果见表4.表中,总偏差平方和 $S_T$ 反映了试验结果的差异, $S_T$ 大,说明各次试验结果之间差异大;反之则小.但因其中存在着试验误差(包括未加控制的因素变化),所以不能直接用于数据的比较.偏差平方和 $S_j$ 反映了因素 $j$ 的3个水平所引起的试验结果的差异,但是因为 $S_j$ 不但与数据本身的变动有关,还与数据的个数有关,为此引入了消除数据个数影响的均方,进而可以采用比值 $F_j$ 在 $F$ 分布表的范围来考察影响因素的主次.

表 4 方差分析表

Tab.4 The table of variance analysis

考核指标	方差来源	偏差平方和 $S_j$	自由度 $f_j$	均方	$F_j$	临界值	显著性	贡献率/%
极限承载力	A	8 139.56	2	4 069.78	17.57	$F_{0.01}(2,2) = 99$	(*)	38.81
	B	3 751.72	2	1 875.86	8.10	$F_{0.05}(2,2) = 19$		16.62
	C	7 424.89	2	3 712.45	16.02	$F_{0.10}(2,2) = 9$	(*)	35.20
	误差 $e$	463.38	2	231.69				9.37
	总和 $S_T$	19 779.56	8					100
$\varepsilon_{80\% P_u}$	A	880 545.1	2	440 272.5	1.44	$F_{0.01}(2,2) = 99$		4.29
	B	1 618 841	2	809 420.6	2.64	$F_{0.05}(2,2) = 19$		16.10
	C	3 140 260	2	1 570 130.0	5.13	$F_{0.10}(2,2) = 9$		40.44
	误差 $e$	612 211.4	2	306 105.7				39.17
	总和 $S_T$	6 251 857	8					100

注:  $S_j = [(\sum K_1)_j^2 + (\sum K_2)_j^2 + (\sum K_3)_j^2] / (n/p) - CT, CT = G^2/n, G$  为指标值的总和,  $n$  为试验次数,  $p$  为水平数

自由度就是独立的数据个数, 其中,  $f_j$  为因素  $j$  的水平数 - 1,  $f_B =$  总的试验次数 - 1,  $f_c = f_B - \sum f_j$

均方(平均偏差平方和) =  $S_j/f_j, F_j = (S_j/f_j)/(S_e/f_e), j = A, B, C$

贡献率是用因素的偏差平方和减去误差的平均偏差平方和与自由度的乘积, 再除以总偏差平方和  $S_T$  而得到。

对极限承载力,  $19 > F_A > F_C > 9 > F_B$ , 表明, 砂浆强度和偏心率这两种因素有一定的影响, 高厚比的影响没有显著差异, 其因素的主次次序为: A→C→B。

对于  $\varepsilon_{80\% P_u}$ ,  $9 > F_C > F_B > F_A$ , 3 个因素在不同水平间变化时, 无显著影响, 可以说其影响程度几乎被误差淹没, 因素的主次次序为: C→B→A。比较 2 考核指标在极差和方差分析中影响因素主次关系的结果, 仅极限承载力的 A、C 因素关系有变化, 二者基本相同, 说明结果是可靠的。

另外, 我们也可用表 4 中贡献率的大小比较各因素的影响程度, 它是反映效应(因素某水平数据的平均值与总平均值的差)对试验结果影响大小的一种度量。它的方便之处在于, 能够很容易地观察出各因素影响的比例, 所得的结果与比值  $F_j$  的分析结果相同, 不再论述。

### 3 结论

(1) 对极限承载力而言, 各因素对黄河淤泥多孔砖砌体中长柱构件的影响依次为: 砂浆强度 > 偏心率 > 高厚比(以考虑了误差的方差分析结果为准), 且砂浆强度和偏心率的影响程度相当, 比高厚比更显著。高厚比和偏心率越小对构件的极限承载力越有利, 砂浆强度只在第 1 水平时使极限承载力最大, 其影响趋势有待进一步的研究确定。

(2) 以  $\varepsilon_{80\% P_u}$  作为考核指标, 各因素对黄河淤泥多孔砖砌体中长柱构件的影响依次为: 偏心率 > 高厚比 > 砂浆强度, 但是误差的贡献率为 39.

17%, 仅次于偏心率 40.44% 的贡献率, 说明这 3 个因素对  $\varepsilon_{80\% P_u}$  的影响很小, 其他因素如砂浆和块体的弹性模量对变形也有不可忽视的影响。各因素的影响趋势为: 偏心率越大、高厚比越小, 其构件发生的变形越大, 砂浆强度无明显规律。

(3) 为使黄河淤泥多孔砖砌体中长柱构件在实际结构中有较好的性能表现, 必须综合平衡各项因素, 还需兼顾其它相关指标(如经济指标)以最终确定最佳性能的范围。

(4) 黄河淤泥多孔砖砌体中长柱构件在一定程度上反映其墙体的受力变形规律, 从笔者的分析来看, 符合一般砌体共同的受力特征: 承载力和变形均受到砂浆强度、高厚比和偏心率的影响, 但其影响程度各不相同。

(5) 砂浆强度、高厚比、偏心率等因素之间的“交互作用”也是一种比较重要的影响因素, 笔者在试验方案设计阶段, 为简化试验暂时没有考虑, 只研究了各因素单独的影响, 交互影响结果有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 董丽萍, 吴本英. 利用黄河淤泥研制承重烧结多孔砖[J]. 新型建筑材料, 2003, (11): 26-27.
- [2] 侯化国, 王玉民. 正交试验法[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1985. 5-6.
- [3] 北京大学数学力学系数学专业概率统计组. 正交设计——一种安排多因素试验的数学方法[M]. 北京: 人民教育出版社, 1976. 16-17.

(下转第 8 页)

## Study on the Physical Phase Changes of Geopolymer After Exposure to High Temperature

ZHENG Juan-rong, LIU Li-na

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A research program is carried out to investigate the physical phase changes of geopolymer after exposure to high temperature up to 1 000 °C. DSC and TG analyses indicate that the geopolymer dried at 65 °C retains about 14% water, the most of which is lost at 300 °C, the remainder continues to evolve gradually up to 600 °C. XRD analyses indicate that the geopolymer remains X-ray amorphous in the 20 °C ~ 800 °C temperature ranges. By 1 000 °C, the geopolymer begins to form potassium aluminum silicate ( $KAlSiO_4$ ), silicon oxide ( $SiO_2$ ) and aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ). Water removal or depolymerization of geopolymer after exposure to high temperature reduces cementing strengths of the geopolymer.

**Key words:** geopolymer; physical phase changes after exposure high temperature; three-dimensional networking structure; XRD; DSC and TG analyses

(上接第4页)

- [4] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 42 - 43.
- [5] 薛鹏飞,毛达岭,刘立新. 改性砂浆砌体受剪性能的试验研究[J]. 郑州大学学报(理学版), 2006, 27(1): 48 - 50.
- [6] 上海市科学技术交流站 组编. 正交试验设计法——多因素的试验方法[M]. 上海: 上海人民出版社, 1975. 38 - 39.
- [7] 刘立新. 砌体结构(第2版)[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003. 11 - 13.
- [8] 童丽萍,贺萍. 黄河淤泥承重砖砌体结构整体受压变形性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(5): 56 - 58.
- [9] 施楚贤. 砌体结构理论与设计(第2版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. 142 - 143.

## Design and Analysis of Orthogonal Experiment for Yellow River Silt Cellular Bricks

TONG Li-ping, XIONG Feng-ming, LIU Wei

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to consider the elements affecting the slender high column members made of Yellow River silt cellular bricks through finite experiments, this paper uses the design method of orthogonal experiment to conduct compressive strength tests to these post members and through measurement get the limit bearing power and strain data of each member. In terms of the treatment of test data and analysis for the results, the authors study the compressive bearing capacity and deformation performance of slender high column members under the vertical load and find the influence relationship between checking considerations and the influence factors so as to provide some useful reference for the design and construction of Yellow River silt bricking structures.

**Key words:** Yellow River silt cellular brick; slender high column; orthogonal experiment; analysis of variance