

建 筑 情 报 资 料

第 8029 号

1980 年 8 月

空心砖砌体沿通缝截面抗剪 强度的试验研究

四川省建筑科学研究所编印



近十多年来，空心砖的生产和应用发展很快。许多地区已经广泛使用空心砖作民用房屋及一般工业厂房的承重墙体。在制订砖石结构设计规范〔1〕时，由于对空心砖砌体的弯曲抗拉、轴心抗拉和抗剪强度等尚缺少试验资料，故规范暂套用普通砖砌体的有关数据。为此，我们陆续开展了空心砖砌体有关强度指标及其变异系数的试验研究，以便验证该项规定是否适当，并为将来修订规范提供必要的依据。本文仅涉及空心砖砌体沿通缝截面的抗剪强度及其变异系数的确定问题。

通过对两批、共230个七孔空心砖砌体试件的试验，初步探讨了试件尺寸和形状及试验方法对抗剪强度的影响，建立了空心砖砌体抗剪强度的经验公式，并与规范有关公式进行了比较；对抗剪强度的变异系数，也进行了初步分析，验证了资料〔2〕中关于抗剪强度变异系数指标公式的适用性。

一、试件制作

抗剪试件采用成都市一砖厂生产的七孔砖砌制，砖的标准尺寸为 $11.5 \times 18 \times 24$ 厘米，空心率为22%。考虑到沿通缝截面的抗剪强度主要取决于砂浆与砖之间的切向粘结力，与砖的标号关系不大，故只采用了一种标号的空心砖。

对所用空心砖，经过挑选，堆在一起，浇水润湿。开始砌制试件时，砖的含水率约为8~10%，少数约为5%。

砌筑用混合砂浆的材料为400号水泥，细砂和石灰膏，按五种体积配合比配制，即第Ⅰ种为1:2(或1:3)，第Ⅱ种为1:3.5(或1:4):0.5，第Ⅲ种为1:5:0.5，第Ⅳ种为1:7:1和第Ⅴ种为1:12:1。两批试件所用砂浆配合比，略有出入。砂浆的强度以实际试验值为准。每盘砂浆，取1~3组标准砂浆试件。

第一批试件的形状和尺寸，如图1所示。其中A、C两类试件，模拟24厘米厚的墙体。试批试件，以A型为主、B、C、

D三型为辅，其目的是探讨试件尺寸对抗剪强的影响。第二批试件，是在前者的基础上，集中做A类试件的补充试验。

各类试件的数另如表1所示。

表1 试件数另

砂浆 配合比类别 试件类别	第一批试验					第二批试验					合 计
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	
A	9	9	50	9	9	10	10	50	10	10	176
B	—	9	—	9	—	—	—	—	—	—	18
C	—	—	9	9	—	—	—	—	—	—	18
D	—	—	9	9	—	—	—	—	—	—	18
共 计	9	18	68	36	9	10	10	50	10	10	230

全部试件，均由同一砖工使用铺灰口，分组分层砌筑。对同批试件，首先砌好试件的底层，这时不必严格控制砂浆配合比，然后将底层的竖向灰缝，刮去0.5~1厘米。对同一组的9个（或10个）试件，尽量使用同一盘砂浆砌筑，力争短时间之内完成。对比试验的A与B、C与D组试件，亦分别使用同一盘砂浆。这样做，一是消除了砖工技术水平差异对试件质量的影响，二是避免砂浆滞留时间过长而引起的变异（如稠度变化，水泥初凝等）。使用铺灰口，可减少漏进砖孔中的灰浆，主观上想尽量避免砖孔内形成砂浆锭。对第二批AⅢ组试件，因测定砂浆强度变异系数的需要，先后拌和五盘砂浆，大致均匀地用到50个试件上。

砌体试件和标准砂浆试件均在试验室内自然条件下养护，气温约为8°~15°C，由于温度偏低，适当延长了养护时间。

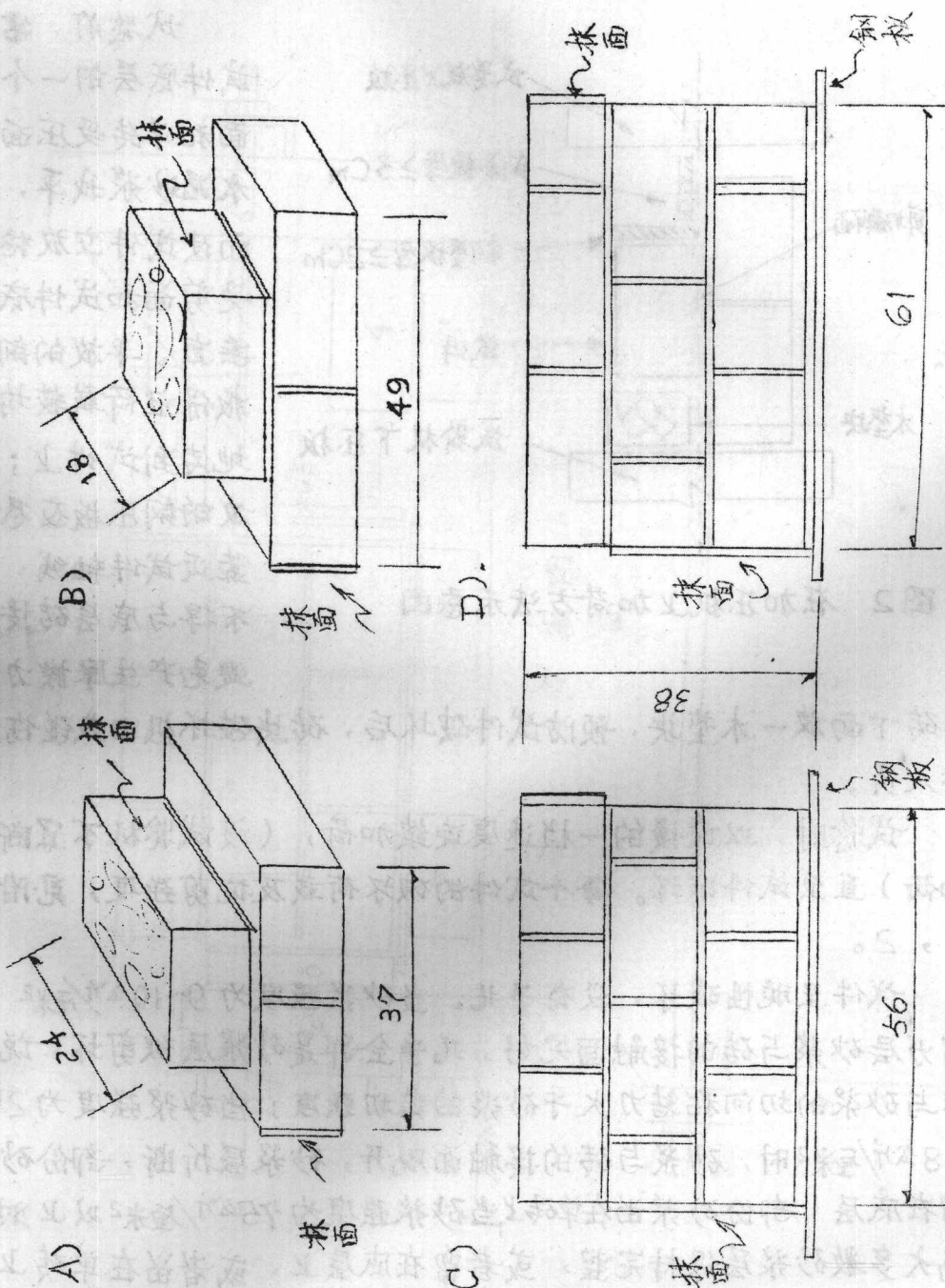


图1 试件形状和尺寸 尺寸单位：厘米

二、试验情况：

(一) 三块砖试件，包括 A、B 两类，在 5 吨压力机上 进行试验，荷载读数可精确至 5 公斤，加荷方法见图 2。

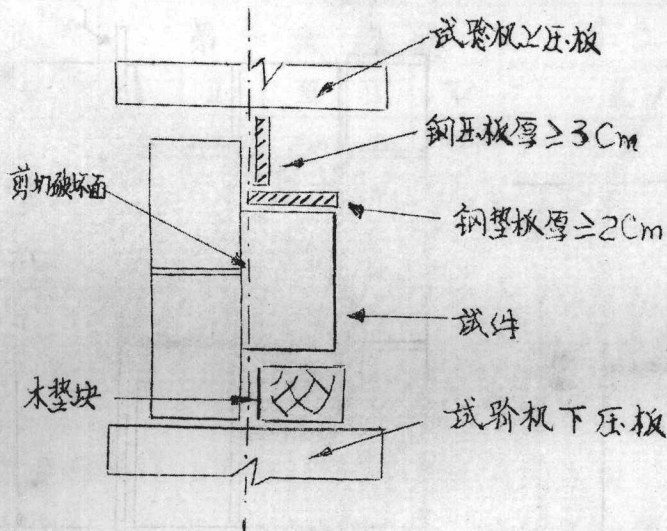


图 2 在加压机上加载方法示意图

试验前，需将试件底层的一个侧面和单砖受压面用水泥砂浆找平，从而使试件立放稳定，受剪面和试件底面垂直。平放的钢垫板保证荷载较均匀地传到试件上；立放的钢压板应尽量靠近试件轴线，但不得与底层砖接触，避免产生摩擦力。

单砖下面放一木垫块，预防试件破坏后，砖块碰坏机口或碰伤试验人员。

试验时，以最慢的一档速度连续加荷，（该试验机不宜断续加荷）直至试件破坏。每个试件的破坏荷载及抗剪强度，见附录 1，2。

试件呈脆性破坏，没有征兆。当砂浆强度为 $9 \sim 10 \text{ 公斤/厘米}^2$ 时，剪力层砂浆与砖的接触面完好，几乎全部是砂浆层被剪坏，说明砖与砂浆的切向粘结力大于砂浆的剪切强度；当砂浆强度为 $21 \sim 48 \text{ 公斤/厘米}^2$ 时，砂浆与砖的接触面脱开，砂浆层折断，部份砂浆留在底层，部份砂浆留在单砖上；当砂浆强度为 75 公斤/厘米^2 以上时，绝大多数砂浆层保持完整，或者留在底层上，或者留在单砖上，砂浆表面有一薄层红砖粉。

第一批 AⅢ组 50 个试件，开始在 50 吨压力机上试验，有 6 个试件是底层的下面一块砖折断，破坏状态如图 3。由于这 6 个试件是非剪切破坏，故其试验结果未予采用。

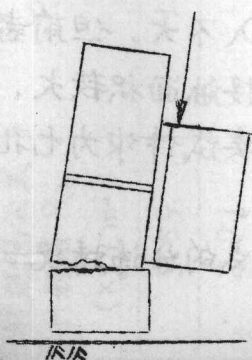


图3 非剪切破坏示意图

(二)、C、D 两类试件，加荷方法见图 4。加荷架的两端部由型钢焊接而成，并用四根钢拉杆（直径 32 毫米）连成整体。试件放在加荷架内，用下部千斤顶（4）将试件固定，用上部的千斤顶（3）施加荷载，直至试件破坏。在加荷过程中，部分试件由于下部的千斤顶水平加荷值偏小，致使

使这部份试件靠近千斤顶一端向上翘起 2~4 厘米。

试件破坏后，剪力层上部的三块空心砖仍连在一起，没有松动，说明竖向灰缝饱满，整体受力性能良好。

经过逐步检查，发现剪力层的砂浆饱满度很高。砌砖时，空心砖被放在砂浆层上后，砖工用瓦刀敲打三五下，或用力转动，使之摆正放平。由于砖的自重和砌砖时施加的外力，部份灰浆挤入砖的孔洞里，可能形成砂浆缝而增强试件的抗剪能力。

三、结果分析

两批砖砌体及砂浆试件的试验结果，分别列于附表 1 和 2。根据这些试验资料，经统计整理后，汇列于表 2 和 3，并说明如下：

(一) 截面尺寸对抗剪强度的影响。第一批试验中的 AⅢ、DⅢ两组对比，砂浆强度仅高 6 kg/cm^2 ，抗剪强度却高 1.35 kg/cm^2 。一般说来，受剪面宽度相同的试件，其长度越长，剪应力分布越不均匀，平均剪应力则越小，所以，A、B 类型试件的抗剪强度

高于C、D类试件，属于正常现象。

普通粘土砖砌体抗剪试件的受剪面积，通常为 37×37 厘米²。本试验所采用的A、B类试件，受剪面积虽然小些，但两者的长宽比例较为接近，并且用材少，砌筑、搬运、试验都比C、D类试件方便。A类和B类试件相比，试验值出入不大，但前者在试验时重心偏低，立放稳定，同试验机下压板接触面积较大，受荷过程中不易发生倾斜现象。所以，建议以A类试件作为七孔空心砖砌体沿通缝截面抗剪强度试验的标准试件。

(二) 抗剪强度经验公式的探讨。从试验点的分佈情况，(见图5)可以假定抗剪强度按下式表达：

$$R_j = a R_2^b \text{------(1)}$$

将上式两边取对数，得：

$$\lg R_j = \lg a + b \lg R_2 \text{------(2)}$$

(2) 式在对数坐标纸上为直线方程式，用最小二乘法，求得：

$$\lg R_j = \lg 1.4 + 0.27 \lg R_2$$

$$\therefore R_j = 1.4 R_2^{0.27} \text{------(3)}$$

式中： R_j ——空心砖砌体沿通缝截面抗剪强度，以公斤/厘米²计。

R_2 ——砂浆强度，以公斤/厘米²计。

对于(3)式， R_j 与 R_2 的相关系数为0.85。尽管该式的相关性较高，但是应用起来不够方便。

参照资料[1]提出的砖砌体沿通缝抗剪强度计算公式，根据两批试验数据，求得空心砖砌体沿通缝截面抗剪强度的经验公式为：

$$R_j = 0.577 \sqrt{R_2} \text{------(4)}$$

考虑到试件的砌筑质量偏高，建议按(5)式採用：

$$R_j = 0.5 \sqrt{R_2} \text{ --- (5)}$$

这用(5)式计称的空心砖砌体沿通缝截面的抗剪强度值，比规范值〔1〕(普通砖砌体)高25%。如前所述，空心砖砌体的抗剪强度高于普通砖砌体，主要是由于空心砖的孔洞内，填充了部分砂浆，形成砂浆链，砂浆的抗剪强度高于砂浆与砖的切向粘结力。资料〔4〕中也指出，砖砌体沿水平灰缝和竖向灰缝破坏时的抗剪强度，对于孔洞砖，窄洞砖的砌体，应提高25%。

规范〔1〕规定空心砖砌体与普通粘土砖砌体采用相同的抗剪强度值，对于空心砖砌体，是偏于安全的。

如果按 R_j 与 R_2 的三次方根关系，求得的经验公式为：

$$R_j = 1.08 \sqrt[3]{R_2} \text{ --- (6)}$$

抗剪强度 R_j 随砂浆强度 R_2 的增加而增加， R_2 较低时， R_j 增加速度较快； R_2 较高时 R_j 增加速度较慢；当 R_2 超过 75 公斤/厘米² 后， R_j 增加得极为缓慢，在这种情况下，砖表面的粉状物严重削弱了两者的粘结力。(6)式能较好地表达这一客观情况，表达式也不复杂，可供将来修改砖石结构设计规范时参考。

抗剪强度 R_j 的试验值及其与按(5)式、(6)式计称结果的对比情况，一併绘于图5。从图中看出，按(6)式计称结果较按(5)式计称结果更接近于试验值。

(三) 变异系数。两组试件(分别为44个和50个)抗剪强度的变异系数的试验值分别为0.228和0.197(见表2和表3)。这与资料〔2〕通过计称分析，建议的砖与空心砖砌体抗剪强度的变异系数值0.24基本一致。

为了探讨按不同计称方法计称的变异系数与试验值的差异，现根据第二批试验中AⅢ组试件的有关数据($n=50$ ，砂浆强度

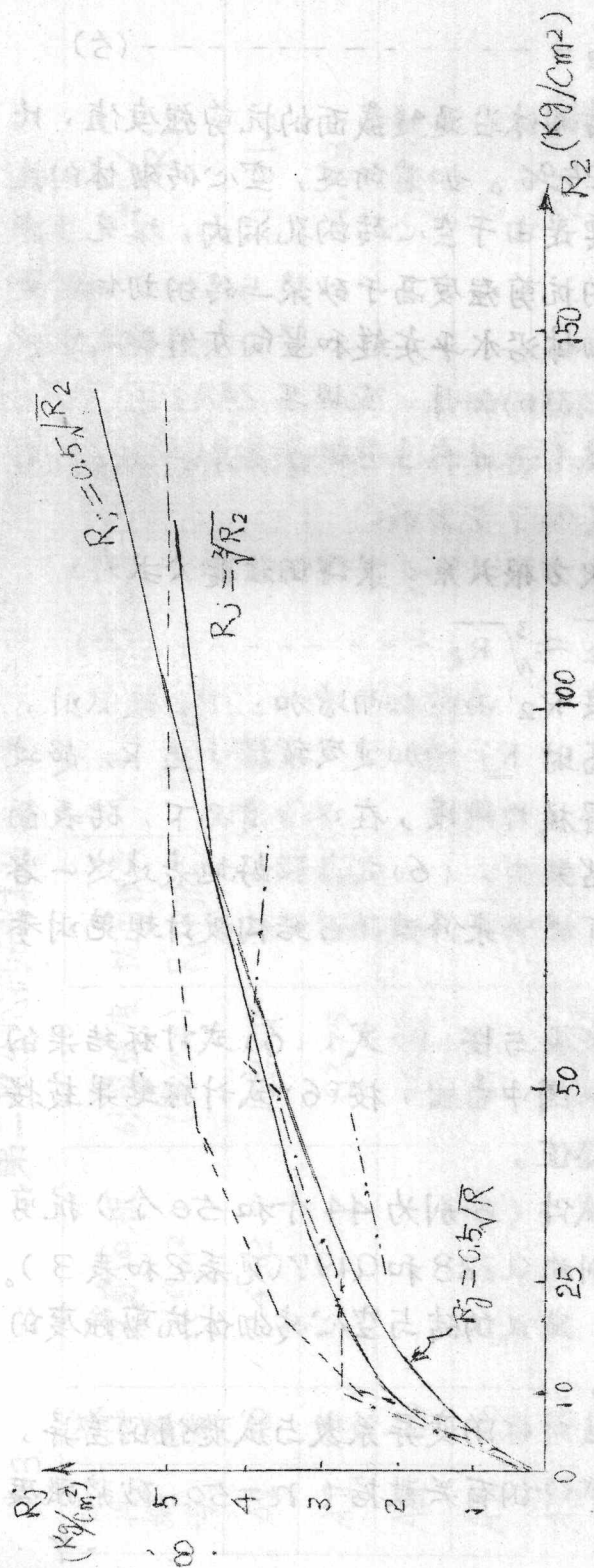


图 5 空心砖砌体沿通缝截面抗剪强度 R_j 与砂浆强度 R_2 的关系

- 第一批 A. B 型试件的试验结果
- 第一批 C. D 型试件的试验结果
- 第二批 A 型试件的试验结果

平均值 $\bar{R}_2 = 46.39$ 公斤/厘米², 变异系数 $V_{R_2} = 0.129$; 砌体抗剪强度平均值 $\bar{R}_j = 4.63$ 公斤/厘米², 实测变异系数 $V_{R_j} = 0.197$ 采用下列两种方法进行计称:

1. 参照资料 [3], 在推导空心砖砌体沿通缝截面抗剪强度 R_j 的变异系数计称公式时, 抗剪强度 R_j 采用下式表达:

$$R_j = 0.5\sqrt{R_2} (B^2 + 1.77B) \text{-----} (7)$$

式中: B 为砂浆饱满度, 其平均值 $\bar{B}$ 取 0.45, 变异系数 V_B 取 0.2。

根据 (7) 式, 可求得 R_j 的变异系数计称公式

$$V_{R_j}^2 = \frac{\alpha^2 \bar{R}_2^2 V_{R_2}^2 + \beta^2 \bar{B}^2 V_B^2}{\bar{R}_j^2} \text{-----} (8)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } \alpha &= \frac{0.5}{2\sqrt{\bar{R}_2}} (\bar{B}^2 + 1.77\bar{B}) = \frac{0.5}{2\sqrt{46.39}} (0.45^2 + 1.77 \times 0.45) \\ &= 0.0367 \end{aligned}$$

$$\beta = 0.5/\bar{R}_2 (2\bar{B} + 1.77) = 0.5/46.39 (2 \times 0.45 + 1.77) = 9.093$$

$$\begin{aligned} \therefore V_{R_j}^2 &= \frac{0.0367^2 \times 46.39^2 \times 0.129^2 + 9.093^2 \times 0.45^2 \times 0.2^2}{(0.5/46.39 (0.45^2 + 1.77 \times 0.45))^2} \\ &= \frac{0.7179}{3.4^2} \end{aligned}$$

$$\therefore V_{R_j} = \frac{\sqrt{0.7179}}{3.4} = 0.249$$

(2) 参照资料 [2], 抗剪强度采用下式表达:

$$R_j = 0.5\sqrt{R_2} (1.2B^2 + 0.5B) \text{-----} (9)$$

式中: 砂浆饱满度 B 的平均值 $\bar{B}$ 取 0.732; B 的变异系数 V_B

取 0.122。

根据(9)式,可求得 R_j 的变异系数计称公式为:

$$V_{R_j} = \frac{1}{\bar{R}_j} (a^2 \bar{R}_2^2 V_R^2 + b^2 \bar{B}^2 V_B^2)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中: $\bar{R}_j = 0.5 / \bar{R}_2 = 0.5 \times 6.811 = 3.4 \text{ Kg/cm}^2$

$$a = \frac{0.25}{\sqrt{\bar{R}_2}} = \frac{0.25}{\sqrt{46.39}} = 0.0367$$

$$b = \bar{R}_j (2.4 \bar{B} + 0.5) = 3.4 (2.4 \times 0.732 + 0.5) = 7.673$$

$$\begin{aligned} \therefore V_{R_j} &= \frac{1}{3.4} (0.0367^2 \times 46.39^2 \times 0.129^2 + 7.673^2 \times 0.732^2 \times 0.122^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= 0.212 \end{aligned}$$

比较两种方法的计称值,按第二种方法计称的结果较接近于试验值。从计称过程中,不难看出,砂浆饱满度对计称结果影响很大。如前所述,尽管七孔空心砖的空心率为22%,但大部分孔洞内填充了部分砂浆,因而饱满度可能达到73.2%以上,资料(3)采用45%,似觉偏低。因此,建议按(10)式计称抗剪强度 R_j 的变异系数。

四、小 结

通过两批共230个试件的沿通缝截面抗剪强度试验,证明砖石结构设计规范所采用的空心砖砌体抗剪强度值,是偏于安全的。为了充分发挥材料的性能,建议今后修改规范时,考虑按(5)式或(6)式计称确定空心砖砌体沿通缝截面的抗剪强度值。

建议以三块砖试件(见图1中A型)作为七孔空心砖砌体沿通缝截面抗剪强度试验的标准试件。

抗剪强度变异系数的试验值,与资料(2)的计称结果基本吻合,因而验证了该资料关于砌体沿通缝截面抗剪强度变异系数计

称方法的适用性。

参 考 资 料

1. 砖石结构设计规范 GBJ3-73 (试行), 1973。

2. 砖石砌体强度的平均值和变异系数的确定

本所《建筑情报资料》8011号

3. 空心砖砌体沿通缝截面的弯曲抗拉强度及其变异系数
的试验研究

本所《建筑情报资料》7901号

4. 砖石及钢筋砖石结构 (高等学校试用教科书, “工程
结构”教材选编小组选编) 1961年

参加人员: 叶钟琼, 周 丽, 李成银

执笔人: 侯汝欣.

附录1. 第一批空心砖砌体沿通缝截面抗剪
强度试验结果

试件编号	试件受剪面积 (Cm^2)	砂浆强度 (Kg/cm^2)	破坏荷载 (Kg)	抗剪强度 (Kg/cm^2)	备 注
AI—1	439.45	82.67	1570	3.57	
2	430.05	"	2030	4.72	
3	437.1	"	1600	3.66	
4	439.2	"	1690	3.85	
5	434.75	"	1380	3.17	
6	437.92	"	1690	3.86	
7	432	"	1460	3.38	
8	423	"	1120	2.65	
9	432	"	2010	4.65	$\bar{R}_j = 3.72 \text{ Kg}/\text{cm}^2$
AII—1	432.4	48.00	1330	3.08	
2	434.75	"	1770	4.07	
3	433.71	"	1520	3.50	
4	434.75	"	1470	3.38	
5	441.6	"	1580	3.58	
6	434.75	"	1660	3.82	
7	444	"	1890	4.26	
8	434.75	"	1110	2.55	

试件编号	试件受剪面积 (cm^2)	砂浆强度 (kg/cm^2)	破坏荷载 (kg)	抗剪强度 (kg/cm^2)	备 注
9	432.4	48.00	1680	3.88	$\bar{R}_j = 3.57 \text{ kg/cm}^2$
BII-1	424.8	48.00	1320	3.11	
2	445.9	"	1610	3.61	
3	430.76	"	1620	3.76	
4	428.34	"	1680	3.92	
5	428.8	"	1690	3.94	
6	428.8	"	1490	3.47	
7	428.75	"	1350	3.15	
8	408	"	1310	3.21	
9	430.11	"	1350	3.14	$\bar{R} = 3.48 \text{ kg/cm}^2$
AIII-1	432	52.66	1350	3.12	
2	438.45	"	1270	2.90	
3	438.45	"	1060	2.42	
4	432.4	"	1960	4.53	
5	440.3	"	1630	3.70	
6	432.4	"	1460	3.38	
7	428.22	"	1610	3.76	
8	438.45	"	1690	3.85	
9	432	"	1360	3.15	
10	434.75	"	1360	3.13	
11	434.75	"	1370	3.15	

试件编号	试件受剪面积 (Cm^2)	砂浆强度 (Kg/Cm^2)	破坏荷载 (Kg)	抗剪强度 (Kg/Cm^2)	备注
12	432	52.66	1590	3.68	
13	441.6	"	1690	3.83	
14	426.6	"	1160	2.72	1-1B
15	434.75	"	1790	4.12	
16	436.08	"	1160	2.66	
17	432	"	1860	4.30	
18	430.05	"	1890	4.39	
19	434.75	"	1560	3.59	
20	432.4	52.66	1710	3.95	
21	434.75	"	1370	3.15	8
22	434.75	"	1760	4.05	
23	441.8	"	1560	3.53	
24	432.4	"	1560	3.61	1-1A
25	436.6	"	980	2.24	
26	434.75	"	2040	4.69	
27	444	"	1860	4.19	
28	423	"	2310	5.46	
29	430.05	"	1060	2.46	
30	430.05	"	1580	3.67	
31	456	"	1860	4.08	8
32	425.35	"	1420	3.34	
33	441.6	"	2110	4.78	
34	439.45	"	1730	3.94	

试件编号	试件受剪面积 (cm^2)	砂浆强度 (kg/cm^2)	破坏荷载 (kg)	抗剪强度 (kg/cm^2)	备 注
35	440.3	52.66	2250	5.11	
36	436.6	"	1540	3.53	
37	424.8	"	1920	4.52	
38	436.08	"	2400	5.50	
39	437.58	"	2370	5.42	
40	434.75	"	2320	5.34	
41	444	"	2680	6.04	
42	439.2	"	2310	5.26	
43	446	"	1800	4.04	
44	434.75	"	1680	3.86	$\bar{R} = 3.91 \text{ kg}/\text{cm}^2$
					$\sigma_n = 0.093 \text{ kg}/\text{cm}^2$ $V = 0.228 \text{ kg}/\text{cm}^2$
ATV-1	431.34	21.33	1110	2.57	
2	432	"	1208	2.80	
3	414	"	1710	4.13	
4	426.6	"	1200	2.81	
5	434.75	"	1230	2.83	
6	436.8	"	1410	3.23	
7	437.1	"	1055	2.41	
8	427.7	"	1100	2.57	
9	450.12	"	1235	2.74	$\bar{R}_j = 2.91 \text{ kg}/\text{cm}^2$
BIV-1	432.54	21.33	1180	2.73	
2	420	"	825	1.96	

试件 编号	试件受剪面积 (cm^2)	砂浆强度 (kg/cm^2)	破坏荷载 (kg)	抗剪强度 (kg/cm^2)	备 注
BIV-3	424.8	21.33	1228	2.89	
4	422.4	"	860	2.04	
5	433.65	"	1354	3.12	
6	432	"	1305	3.02	
7	432	"	1205	2.80	
8	428.34	"	1095	2.56	
9	428.34	"	936	2.18	$\bar{R}_j = 2.59 \text{ kg/cm}^2$
AV-1	434.75	9.00	1295	2.98	
2	430.05	"	1296	3.01	
3	434.75	"	1030	2.37	
4	434.75	"	970	2.23	
5	444	"	1345	3.03	
6	434.75	"	1110	2.55	
7	423	"	1200	2.84	
8	444	"	1080	2.43	
9	436.8	"	1040	2.38	$\bar{R}_j = 2.65 \text{ kg/cm}^2$
CIII-1	1344	44.78	3460	2.57	
2	1344	"	3080	2.29	← 因加载点对中不准而舍弃
3	1344	"	2460	1.83	
4	1344	"	2840	2.11	
5	1344	"	3320	2.47	