

# 对石墙抗震性能的研究和设计取值的建议

施景勋 卢志红 林建华 施养杭\*

(土木工程系)

**摘要** 本文总结石结构抗震课题组在料石墙砌体的拟动力抗剪试验方面的成果,并以此为基础,提出料石砌体的设计计算公式.

**关键词** 料石,抗震,设计取值

福建闽南地区盛产料石.由于料石建筑造价低,且美观,因而料石建筑遍及城乡.据估计,目前已有建筑面积为  $6 \times 10^7 \text{m}^2$ ,居住几百万人口,且不断在增加,本地区为7度地震区,因此有必要对料石砌体房屋的抗震性能进行研究.石结构抗震课题组自1984年以来,在石结构抗震各个方面做了一些工作,本文仅对墙体拟动力试验进行总结,并以此为根据,对福建省《石结构房屋抗震设计规范》的“计算要点”的取值,提出我们的建议.

## 1 料石砌体试件水平通缝的抗剪强度

### 1.1. 试验概况

试件由同样尺寸的两皮料石叠砌(见图1).试验过程采用两种料石尺寸:  $200 \times 200 \times 500$  和  $240 \times 240 \times 500$  (mm).砌筑砂浆稠度在3—7cm范围内,灰缝的厚度:有垫片砌筑在2—3cm,无垫片砌筑不大于1—2cm,每盘砂浆至少留有一组标准砂浆试块.固定一

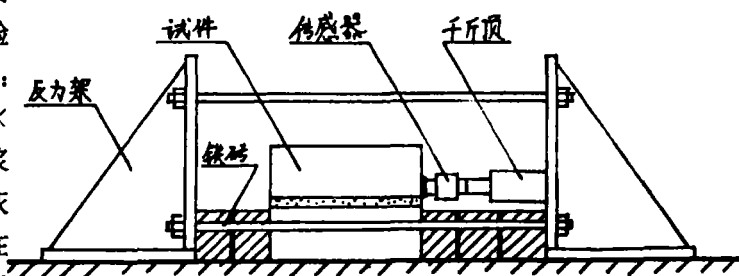


图1 砌体试件水平通缝试验装置

本文 1991-12-04 收到.

参加本文工作的还有刘木忠 黄华文 谢闽生 杨伟 裴顶平 尤晋青 黄镇国等.

名三级瓦工根据不同施工方法分别砌筑,在室内自然条件下与砂浆试块一起养护,待砂浆达到预期标号后进行试验.

## 1.2 试验结果

料石砌体试件水平通缝的抗剪强度是砌体承受横向水平荷载时的最基本的一项力学指标,试验结果见表 1. 试验表明:水平通缝的抗剪强度除随砂浆等级增大而增大外,且与砌体灰缝

表 1 砌体试件,通缝抗剪强度试验结果

序 号	无垫片试件通缝抗剪强度		有垫片试件通缝抗剪强度	
	砂浆强度等级	各组 $f_v$ 值	砂浆强度等级	各组 $f_v$ 值
	$f_2$	(MPa)	$f_2$	(MPa)
1	1.03	0.0440	1.03	0.0314
2	1.52	0.0794	1.52	0.0421
3	1.85	0.1310	1.97	0.0804
4	1.97	0.1019	3.76	0.0921
5	2.30	0.1710	4.83	0.1283
6	2.75	0.1590	6.95	0.1440
7	2.78	0.2400	8.74	0.1565
8	3.76	0.1901	12.30	0.1979
9	3.83	0.2200	1.89	0.0760
10	4.30	0.1900	2.65	0.1450
11	4.41	0.2200	2.71	0.1560
12	7.00	0.3100	5.53	0.2120
13	7.76	0.2900	10.10	0.2710
14	8.74	0.3500	8.64	0.3300
15	9.00	0.3900	13.98	0.3940
16	10.20	0.3600	2.61	0.1000
17	0.80	0.1470	3.71	0.1270
18	1.26	0.1260		
19	2.65	0.1980		
20	2.71	0.2120		
21	5.53	0.3370		
22	10.10	0.5660		
23	8.64	0.3690		
24	13.89	0.5460		
25	2.61	0.1550		
26	3.71	0.2080		

的砂浆饱满度有关,而砂浆饱满度主要取决于施工方法和砂浆的稠度。砂浆过干,饱满度往往偏少.由表 1 试验值回归得料石砌体试件的水平通缝的抗剪强度平均值  $f_m$  为

$$\text{无垫片: } f_m = 0.119 \sqrt{f_2} \text{ (MPa)}, \quad (1)$$

变异系数  $C_v=0.0553$ ; 相关系数  $\gamma=1.0000$ .

有垫片: 
$$f_{vm} = 0.0731 \sqrt{f_2} \text{ (MPa)}, \tag{2}$$

变异系数  $C_v=0.0552$ ; 相关系数  $\gamma=1.0000$ . 其中,  $f_2$  为灰缝的砂浆等级.

2 料石墙体的抗剪强度

2.1 试验概况

实验采用悬臂装置(图2),由两台 JSI-50 同步液压千斤顶 1 进行竖向加载,试验开始时一次加载完毕,wy300-ⅠB 稳压器稳压,竖向千斤顶一端支撑在受力架 2 上,另一端支撑在分配梁 3 上,而分配梁则支撑在滑板 4 上,滑板将竖向力传给墙体的顶梁 5,对墙体均匀施加正压力,并使试验

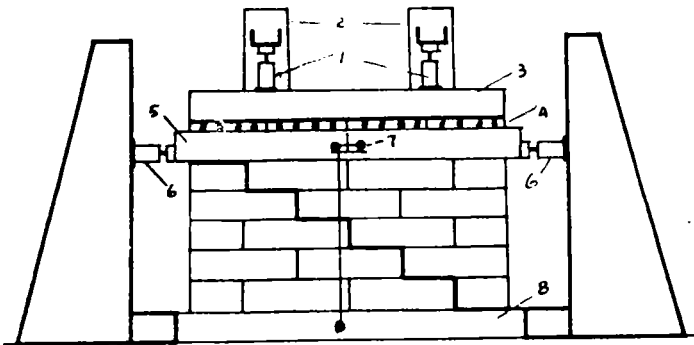


图 2 料石墙体的抗剪试验装置

过程中墙体位移不受竖向荷载的约束. 水平荷载由墙体顶梁两端各安上两台 JSI-50 同步液压千斤顶 6 双向循环加载. 在顶梁端部与千斤顶之间装有 GL-A/50T 荷载传感器,其中一个与 LZ<sub>3</sub>-304 的  $x-y$  函数仪连接,另一个与电子秤连接. 在墙体两侧面的顶端中点,各加上两个相向的 WBD-30 机电百分表 7,并与  $x-y$  函数仪相连,以量测墙的顶端位移,百分表架的底座与墙的底梁 8 相连,使所测位移为墙顶部相对于底部的位移值. 在  $x-y$  函数仪上绘出墙体试验时的滞回曲线,水平荷载由  $x-y$  函数仪和电子秤人工报数相互校核. 以位移开始急剧增大,荷载加不上去作为墙体的破坏荷载,达到破坏荷载时均出现踏步裂缝如图 2 所示.

2.2 试验结果

墙体的抗剪强度的试验值汇总于表 2 与 3.

试验一般是:当水平荷载增加到极限荷载的 80-90%时,在墙体上部的灰缝表面出现竖向或水平的细微裂缝,随着水平荷载增大,出现了断断续续的裂缝,并逐步形成贯通. 当荷载约为极限荷载的 95%左右时,竖缝逐渐变宽,形成了第一条踏步形裂缝,位移迅速增大,但这时荷载仍可少量增加,当荷载到达极限荷载时,位移急剧增大,荷载开始下降,此时墙体破坏,破坏时有的墙体有一条贯通的踏步形斜裂缝,见图 2,有的墙体有两条交叉贯通的踏步形斜裂缝,至于出现一条或两条踏步形斜裂缝尚无一定的规律性.

众所周知,墙砌体的抗剪强度符合剪摩公式的规律

$$f_{vE} = A \cdot f_v + B \cdot \sigma_0 \tag{3}$$

其中,  $f_{vE}$  为料石墙砌体的抗剪强度;  $f_v$  料石砌体试件的通缝抗剪强度;  $A$  为与墙体几何尺度

以及和通缝抗剪强度有关的系数; $\sigma_0$ 为墙体的竖向正应力, $B$ 为与几何尺度和材料摩擦系数有关的系数.

由表 2、3 资料进行回归,得到无垫片石墙为

表 2 半细料石无垫片座浆石墙试验结果

序 号	截面尺寸 高×长×宽 (mm)	砂浆 强度 等级 $f_1$	垂直压 应力 $\sigma_0$ MPa	水平极限 剪应力 $f_{VE}$ MPa	顶点水 平极限 位 移 (mm)	面积、高 (mm <sup>2</sup> ),(mm)
1	1380×2500×240	2.19	0.120	0.1440	2.97	
2	工字墙	2.19	0.098	0.1080	2.83	765000,1380
3	工字墙	2.19	0.176	0.1430	1.96	765000,1380
4	1110×2000×240	2.42	0.160	0.2116	0.52	
5	1380×2500×240	2.80	0.176	0.1960	0.53	
6	1380×2500×240	2.80	0.176	0.2350	2.13	
7	工字墙	2.80	0.098	0.1100	3.22	765000,1380
8	1380×2500×240	6.73	0.694	0.4900	1.25	
9	1380×2500×240	6.73	0.890	0.4570	1.43	
10	1110×2000×240	9.50	0.855	0.7030	3.75	
11	1000×1600×240	5.98	0.912	0.7010	6.54	
12	1000×1600×240	5.98	1.011	0.7682	4.50	
13	1000×1600×240	4.15	0.811	0.5469	2.82	
14	1000×1600×240	4.15	0.860	0.6365	1.15	
15	1000×1600×240	4.74	0.926	0.7875	3.86	
16	1000×1600×240	4.74	1.011	0.6979	1.98	
17	1000×1700×240	3.34	0.614	0.4608	4.36	
18	1000×1700×240	3.34	0.712	0.4755	1.48	
19	1000×1700×240	1.07	0.761	0.4608	2.07	
20	1000×1700×240	11.50	1.011	0.9828	3.37	
21	1250×2500×240	1.07	0.257	0.2467	4.41	
22	1250×2500×240	2.03	0.407	0.3533	1.11	
23	1250×2500×240	4.74	0.457	0.4167	0.54	
24	工字墙	1.06	0.255	0.2048	1.85	859200,1250
25	工字墙	5.98	0.454	0.3515	1.53	859200,1250
26	工字墙	2.03	0.354	0.2886	1.94	859200,1250
27	工字墙	4.15	0.405	0.3037	1.06	859200,1250
28	1110×2000×240	6.73	0.855	0.5550	5.25	

$$f_{VEm} = 0.481 \cdot f_{cm} + 0.586\sigma_0,$$
 (4)

相关系数  $\gamma=0.958$ ;标准差  $\sigma=0.121$ . 有垫片石墙为

$$f_{VEm} = 0.465 \cdot f_{cm} + 0.580\sigma_0,$$
 (5)

相关系数  $\gamma=0.907$ ;标准差  $\sigma=0.145$ .

表3 粗料石有垫片座浆石墙试验结果

序 号	截面积尺寸 高×长×宽 (mm)	砂浆 强度 等级 $f_2$	垂直压 应力 $\sigma_0$ MPa	水平极限 剪应力 $f_{VE}$ MPa	顶点水 平极限 位 移 (mm)	面积、高 (mm <sup>2</sup> ), (mm)
1	1110×2000×240	1.65	0.412	0.2800	3.91	
2	1110×2000×240	1.65	0.202	0.1580	2.85	
3	1380×2500×240	1.65	0.422	0.3200	3.81	
4	1380×2500×240	1.65	0.206	0.1820	1.91	
5	1380×2500×240	1.65	0.206	0.1420	1.51	
6	工字墙	1.65	0.206	0.1290	2.01	796000,1380
7	工字墙	1.65	0.110	0.0860	1.55	796000,1380
8	工字墙	1.65	0.110	0.0840	1.08	796000,1380
9	1380×2500×240	2.42	0.206	0.2700	6.53	
10	1380×2500×240	2.67	0.310	0.2420	2.70	
11	1380×2500×240	6.73	0.851	0.4700	3.40	
12	1110×2000×240	6.73	0.310	0.2170	4.22	
13	1110×2000×240	9.50	1.047	0.7300	1.16	
14	1110×2000×240	9.50	0.847	0.6040	0.97	
15	1000×1600×240	3.34	0.662	0.3958	2.97	
16	1000×1600×240	3.34	0.610	0.4479	2.94	
17	1000×1600×240	3.34	0.511	0.3542	1.66	
18	1000×1600×240	1.63	0.420	0.3698	2.32	
19	1000×1600×240	1.63	0.464	0.3359	4.23	
20	1000×1700×240	3.34	0.413	0.2574	1.92	
21	1000×1700×240	3.34	0.462	0.3137	3.45	
22	1000×1700×240	1.64	0.364	0.2990	1.67	
23	1000×1700×240	4.83	0.560	0.4338	4.20	
24	1000×1700×240	4.83	0.614	0.4412	2.09	
25	1250×2500×240	11.58	0.407	0.4067	1.67	
26	1250×2500×240	11.58	0.457	0.3367	2.67	
27	工字墙	1.18	0.305	0.2048	1.19	974000,1250
28	工字墙	0.93	0.354	0.2211	2.43	974000,1250
29	工字墙	0.93	0.410	0.2211	5.76	974000,1250

3 料石墙砌体抗震剪切强度设计公式

按照《砌体结构设计规范》的规定,平均强度  $f_m$  和标准强度  $f_k$ ,设计强度  $f_d$  之间的关系为

$$f_k = f_m (1 - 1.645\delta_f),$$

(6)

$$f_v = f_k/\gamma_f, \tag{7}$$

其中,  $\delta_f$  砌体强度的标准差. 对于抗剪强度而言, 它与砌体强度变异、砂浆强度变异和水平灰缝饱满度变异有关;  $\gamma_f$  为砌体结构的材料性能分项系数.

按照《砌体结构设计规范》规定, 取  $\delta_f=0.20$  和  $\gamma_f=1.5$ , 代入式(6). (7)即得

$$f_k = 0.671f_m, \tag{8}$$

$$f_v = 0.45f_m, \tag{9}$$

因此, 公式(1)和(2)化成设计强度得其无垫片通缝抗剪强度为

$$f_v = 0.054 \sqrt{f_2}, \tag{10}$$

有垫片通缝抗剪强度为

$$f_v = 0.033 \sqrt{f_2}, \tag{11}$$

式(10)和(11)列于表 4.

表 4 沿石砌体灰缝截面破坏时抗剪设计强度  $f_v(\times 10^{-2}\text{MPa})$

砌 体 种 类	砂 浆 强 度 等 级		
	$M_{10}$	$M_{7.5}$	$M_{5.0}$
无垫片细料石, 半细料石砌体	17.1	14.8	12.1
有垫片粗料石及毛料石砌体	10.4	9.0	7.4

而式(4)和式(5)考虑式(9)、(10)、(11)得料石砌体的设计强度, 其无垫片料石墙为

$$f_{VE} = 0.481 \cdot f_v + 0.264\sigma_0, \tag{12}$$

有垫片料石墙: 为

$$f_{VE} = 0.465 \cdot f_v + 0.261\sigma_0, \tag{13}$$

式(12)式(13)写成通用公式, 料石砌体在抗震验算时沿阶梯形截面破坏的抗剪设计强度  $f_{VE}$ :  
无垫片料石墙为

$$f_{VE} = [0.481 + 0.264(\sigma_0/f_v)] \cdot f_v = \xi_N f_v, \tag{14}$$

有垫片料石墙

$$f_{VE} = [0.465 + 0.261(\sigma_0/f_v)] \cdot f_v = \xi_N f_v. \tag{15}$$

截面正应力对设计强度的影响系数  $\xi_N$ : 无垫片料石墙

$$\xi_N = 0.481 + 0.264(\sigma_0/f_v) \tag{16}$$

有垫片料石墙

$$\xi_N = 0.465 + 0.261(\sigma_0/f_v) \tag{17}$$

考虑到试验墙体不同高宽比效应和缺乏料石砌体的地震经验以及实验室与实际施工的差别对  $\xi_N$  乘上 0.9 拆减系数, 因此无垫片料石墙为

$$\xi_N = 0.43 + 0.24(\sigma_0/f_v) \tag{18}$$

有垫片料石墙

$$\xi_N = 0.42 + 0.23(\sigma_0/f_v) \tag{19}$$

式(18)、(19)可列表 5.

表 5 石砌体强度的正应力影响系数  $\epsilon_N$

砌体种类	$\sigma_0/f_0$							
	0.0	1.0	3.0	5.0	7.0	10.0	15.0	20.0
无垫片细料石、半细料石砌体	0.43	0.67	1.14	1.62	2.09	2.80	3.99	5.17
有垫片粗料石及毛料石砌体	0.42	0.65	1.12	1.59	2.06	2.77	3.94	5.12

4 粗料石、毛料石浆砌砌体

如上所述,石砌体的抗剪强度与施工方法关系极大.干砌甩浆的施工方法由于抗剪强度太低建议不要使用.为提高石砌体的抗剪强度且不增加施工难度,我们进行粗料石、毛料石浆砌砌体新的施工方法的研究.

新施工方法是在下皮料石上满铺混合砂浆(厚度不应小于 40mm),然后摆上上皮料石,用锤击将上皮料石调平,然后在石砌体两侧的灰缝中塞入不少于四块的垫片,严禁锤击垫片和撬动上皮料石.新施工方法的料石砌体试件的水平通缝的抗剪强度  $f_{\text{m}}$  的实验值列于表 6.

表 6 新施工方法料石试件抗剪强度试验

序 号	砂浆强度等级	每组平均抗剪强度 $f'_0$ (MPa)
	$f_2$	
1	0.93	0.048
2	1.10	0.064
3	2.50	0.118
4	2.80	0.194
5	3.10	0.217
6	3.70	0.193
7	4.00	0.245
8	5.30	0.255
9	6.50	0.274
10	7.40	0.282
11	7.90	0.306
12	8.50	0.470
13	11.80	0.539

通过回归得料石砌体试块的水平通缝的抗剪强度  $f_{\text{m}}$  的表达式为

$$f_{\text{m}} = 0.116 \sqrt{f_2}. \tag{20}$$

新施工方法的石墙抗剪强度  $f_{VE}$  试验结果列于表 7.

表 7 新施工方法石砌体试验结果

序 号	截面尺寸 高×长×宽 (mm)	砂浆强 度等级 $f_2$	垂直压力 $\sigma_0$ (mpa)	水平极限 剪应力 $f_{Vx}$ (mpa)	顶点水平 极限位移 (mm)
1	1380×2500×240	1.90	0.196	0.242	1.13
2	840×1600×240	1.90	0.402	0.487	1.55
3	840×1600×240	1.90	0.430	0.510	2.01
4	1110×2000×240	2.53	0.432	0.520	2.51
5	1110×2000×240	4.41	0.677	0.610	2.44
6	1110×2000×240	4.41	0.677	0.642	2.20
7	1380×2500×240	4.80	0.694	0.602	2.90
8	1380×2500×240	6.10	0.890	0.712	1.23

通过回归得料石砌体抗剪强度  $f_{VEm}$  表达式为

$$f_{VEm} = 1.084f_{Vm} + 0.590\sigma_0. \tag{21}$$

如上所述,考虑到式(9)得新施工方法的试件水平通缝的设计抗剪强度为

$$f_o = 0.052 \sqrt{f_2}. \tag{22}$$

式(22)列于表 8

表 8 浆砌砌体灰缝截面破坏时抗剪强度  $f_o(\times 10^{-2}MPa)$

砌 体 种 类	砂 浆 强 度 等 级		
	$M_{10}$	$M_{7.5}$	$M_{5.0}$
浆砌粗料石及毛料石	16.4	14.2	11.6

式(21)考虑墙体不同高宽比效应和实验室与实际施工的差别以及式(9)和式(22),得料石砌体在抗震验算时沿阶梯形截面破坏的抗剪设计强度

$$f_{vE} = \xi_N \cdot f_o,$$

$$\xi_N = 0.98 + 0.24(\sigma_0/f_o). \tag{23}$$

式(23)列于表 9.

表 9 浆砌砌体强度的正应力影响系数  $\xi_N$

砌 体 种 类	$\sigma_0/f_o$							
	1.0	3.0	5.0	7.0	10.0	15.0	20.0	25.0
浆砌粗料石、毛料石砌体	1.22	1.69	2.17	2.65	3.37	4.56	5.76	6.95



## 参 考 文 献

- (1) 建筑结构设计统一标准,GBJ68—84.
- (2) 砌体结构设计规范,GBJ3—88.
- (3) 杨玉成、杨亚玲等,砖墙体抗剪强度试验结果的统计分析,全国地震工程会议论文选集,(1984)上海 D—11.

## Study on the Antiseismic Behaviour of Stone Wall and Proposal of the Short—Cut Process in Its Design

Shi Jingxun      Lu Zhihong  
Lin Jianhua      Shi Yanghang  
(*Department of Civil Engineering*)

**Abstract** In this paper, the results of quasi-dynamic shearing tests made one stone building are summed up. These results are obtained by a research group of antiseismic stone structure in Hua gao University. On this basis, a calculating formula is given for the aniseismic design of stone structure.

**Wey words** material stone, antiseismic, short-cut process in design