

石砌体结构的分析与应用^{*}

施 养 杭

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

摘要 具有悠久发展历史的石结构是混合结构的重要组成部分. 为弘扬中国的石文化, 而致力于石结构研究, 运用数学手段并结合工程实践, 进行广泛的调查研究和充分的试验分析. (1) 提出反映石砌体实际抗剪性能的抗剪强度计算理论公式, 以及反映石砌体结构动力特性的自振周期、阻尼和基本振型. (2) 提出符合现行的结构极限状态设计原理的石砌体抗震抗剪设计强度, 以及反映石结构安全性的模糊抗震可靠度. (3) 将以上成果应用于工程实践中, 均得到满意的结果. 这不但为石结构理论的发展奠定了良好的基础, 而且为石结构的应用和保护提供了科学依据.

关键词 石砌体结构, 强度理论, 动力特性, 可靠度

分类号 TU 363

石砌体结构是我国产石地区常见的结构形式, 它以其美观和经济而长期为人们所保留和发展, 构成了独树一帜的中国石文化. 然而, 石砌体的抗震抗剪强度较差, 且产石地区多数地处地震区, 因此石砌体结构的抗震性能、可靠度及其应用, 一直是人们所关注但又悬而未决的工程问题. 对此, 近年来作了一些研究工作.

1 石砌体抗剪强度计算的理论公式

石结构由砂浆和料石经组砌而成. 试验表明, 灰缝是石砌体中最薄弱的环节, 通常在该部位发生剪切破坏. 因此, 粘结处抗剪强度是研究石砌体抗剪强度最重要的内容. 以往在对砌体抗剪计算时, 沿用经典的剪摩公式 $KQ = AR = A(R_i + f\sigma)$. 但该式基于单一材料而提出, 它对石砌体这种组合材料不适用. 石砌体抗剪强度由粘结力、摩擦力和咬结力构成. 经研究得知, 粘结力与摩擦力、咬结力不能直接叠加, 因粘结力达到最大值时摩擦力没有达到最大值. 为此设 $R = R_{\tau} + L(C + f\sigma)$, 式中 R 为粘结力和摩擦力与咬结力的叠加值, L 为叠加系数. 即 $R = R_{\tau} + LR_{\tau}$. 为确定 L , 对石砌体在分别施加不同的垂直压力下做剪切破坏试验, 测得在粘结力和摩擦力共同作用下的抗剪极限强度 R_u , 则 $L = (R_u - R_{\tau}) / R_{\tau}$. 研究发现抗剪强度在垂直压力较大的情况下可能会小于 R_{τ} . 所以, 石砌体的极限抗剪强度应表示为 $R_u = \max\{R_{\tau} + L(C + \sigma f), C + \sigma f\}$. 考虑到石砌体实际截面积 A 和砂浆饱满度之后, 上式可写成

$$Q_u = \max \left\{ \begin{array}{l} [(R_{\tau} B + L B C) + L B f \sigma] A \\ (C B + B f \sigma) A \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} (R_i + f \sigma) A, \\ (R_i + f \sigma) A, \end{array} \right. \quad (1)$$

式中 $R_j = R_{\text{墙}}B + LB C, R_j = CB, f = LB f, f = Bf$. 为记忆方便, 称 R_j 和 R_j 为广义粘结力, f 和 f 为广义摩擦系数. 并称式(1)为改进剪摩公式.

2 石砌体结构动力特性

石结构房屋的抗震性能及其破坏形式与其动力特性密切相关. 因影响动力特性的因素多, 直接从理论上求解十分困难. 在用脉动测试其动力特性的基础上, 经分析得到经验公式以供应用. (1) 自振周期. 据实测数据, 经回归分析得到石砌体房屋自振周期的经验公式为 $T_{\text{横}} = 0.0152(H + 7.5), r = 0.59; T_{\text{纵}} = 0.0149(H + 6.4), r = 0.55$. 当考虑房屋三维尺寸对基本周期的影响时, 则得 $T_{\text{横}} = 0.137 + 0.027H / \sqrt[3]{B}, r = 0.50; T_{\text{纵}} = 0.167 + 0.032H / \sqrt[3]{L}, r = 0.42$, 式中 H 为房屋的总高度, B 为房屋的宽度, L 为房屋总长度. 上述各式的相关系数较大, 变异系数较小. (2) 阻尼. 采用共振曲线法进行测试, 将测得的共振曲线以折合粘滞阻尼的概念求得房屋的阻尼比. 其公式为 $\eta = (\omega^2 - \omega_0^2) / 4\omega$, 式中 η 为房屋的阻尼比, ω 为房屋的自振频率, ω 和 ω_0 为在共振曲线上振幅为共振振幅的 0.707 倍处的频率. 研究发现石砌体房屋的阻尼比与一般刚性结构的阻尼比大致相同. (3) 基本振型. 实测和分析均表明, 一般多层石砌体房屋的基本振型近似于悬臂梁的剪切振动, 并伴有整体空间振动和扭转振动现象. 故其基本振型归纳为 3 点: (a) 一般多层石砌体房屋振动时以剪切变形为主; (b) 刚性内隔墙较少, 并采用木楼(屋)盖的房屋, 弯曲变形较为明显; (c) 一般多层石砌体房屋, 其顶层(墙顶)的层间位移(当 $H/B \geq 2$ 时), 一般比其它层的层间位移大些(但不包括底层).

3 石砌体抗震抗剪设计强度

由文献[1]知平均强度 f_m 、标准强度 f_k 和设计强度之间的关系为 $f_k = f_m(1 - 1.645\delta)$; $f_v = f_k / \gamma_k$. 由文献[2]可得 $\delta = 0.20, \gamma = 1.5$ 代入上述两式, 得 $f_k = 0.671f_m, f_v = 0.45f_m$. 由此, 经试验及分析得到沿水平通缝的抗剪设计强度^[6]: (1) 无垫片石砌体 $f_v = 0.054 f_2$; (2) 有垫片石砌体 $f_v = 0.033 f_2$. 考虑垂直压应力影响后, 得到石砌体的抗震抗剪设计强度(1) 无垫片石砌体 $f_{vE} = 0.481f_v + 0.264\sigma_0$; (2) 有垫片石砌体 $f_{vE} = 0.465f_v + 0.261\sigma_0$.

4 石砌体结构抗震可靠度

4.1 多层结构抗震可靠度

地震作用具有很强的随机性, 为合理评价抗震结构的可靠度, 应考虑地震烈度和地面加速度峰值的随机性, 并对结构进行概率性的动力分析, 求得结构的条件破坏概率 $P_{jk}(R > S/E_{I_j} A_{jk})$. 经对本地区地震资料及其危险性分析, 求得发生烈度为 I_j 的地震时加速度在 K 子区段的概率 $f(A_{jk}/I_j)$, 及在使用期限内发生地震烈度 I_j 的概率 $f(I_j)$. 因此, 结构抗震可靠度为

$$P_R = 1 - P_f,$$

$$P_f = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^N P_{jk}(R > S/E_{I_j} A_{jk}) f(A_{jk}/I_j) f(I_j),$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^N f(A_{jk}/I_j) = 1^{[6]}$$

在以上各式中, P_R 为结构可靠概率, P_f 为结构失效概率, R 和 S 分别为结构破坏指数和界限值, $E_{I_j A_{jk}}$ 为发生地震烈度为 I_j 且加速度值在 A_j 区间的 K 子段的地震事件. 则结构的可靠指标 $\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f)$.

4.2 石结构抗震性能的模糊可靠度

结构抗震可靠度已是结构抗震理论的重要组成部分. 结构的动力不确定性包含了随机性和模糊性, 它们均影响结构的抗震可靠性. 为此, 从地震地面运动的模糊随机模型

$$S_a(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2(\omega' \omega_k)^2}{[1 - (\omega' \omega_k)^2]^2 + 4\xi_g^2(\omega' \omega_k)^2} \frac{2\xi_g(\omega_k^2 + 2\xi_g \omega \omega_k + \omega_k^2)}{\pi \omega_k \omega (4\omega_k^2 \omega + 2\xi_g \omega_k + \omega)} \alpha_k^2$$

出发, 并根据场地土特征参数的模糊评定

$$\bar{\xi}_g = \frac{\sum \xi_{gi} \mu^2(X_i)}{\sum \mu^2(X_i)},$$

$$\bar{\omega}_k = \frac{\sum \omega_{ki} \mu^2(X_i)}{\sum \mu^2(X_i)}.$$

建立地震动模糊烈度随机模型为

$$(\sigma_a, S_a, a) = \sup_{\sigma_a} \mu_{\sigma_a}(\sigma_a) / (\sigma_a, S_a, a),$$

求得石结构模糊随机地震反应的解为

$$(\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_x, \bar{\alpha}_l) = \left(\frac{\sigma_2 \int [\sigma_x(\sigma_a), \alpha(\sigma_a), \alpha_l(\sigma_a)] \mu^2(\alpha) d\sigma_a}{\sigma_1 \int \mu^2(\sigma_a) d\sigma_a} \right).$$

进而, 可以得到石结构层和整体的动力可靠性分别为

$$P_{sj}(T) = \min_{k=1}^m P_{sjk}(T) \text{ 和 } P_s(T) = \min_{j=1}^n P_{sj}(T).$$

5 工程实例

(1) 工程概况^[6]. 某 3 层石结构住宅楼, 建筑平面和剖面分别见图 1 和图 2. 现浇钢筋混凝土楼(屋)盖, 纵、横墙联合承重. 承重墙用 M5 混合砂浆铺浆砌筑有垫片粗料石, 墙厚 240 mm; 非承重墙为 100 mm 厚煤屑水泥空心砖. 楼层高 3.12 m, 每层建筑面积为 320 m². 类场地, 抗震设防烈度为 7 度.

(2) 应用 I——抗震设计验算. 据震害经验, 选顶层 B、D 轴墙体进行验算. (a) 建筑物总重力荷载代表值 G_E 的计算. 1~3 层楼(屋)盖处质点分别为 $G_{1E} = 4\,877\text{ kN}$, $G_{2E} = 4\,877\text{ kN}$; $G_{3E} = 3\,225\text{ kN}$; 则 $G_E = \sum_{i=1}^3 G_{iE} = 12\,979\text{ kN}$. (b) 水平地震作用计算. 房屋底部总水平地震作用标准值 $F_{Ek} = \alpha_1 G_{eq} = \alpha_{max} \times 0.85 \times G_E = 0.08 \times 0.85 \times 12\,979 = 882.572(\text{kN})$; 顶层水平地震作用标准值 F_3 及地震剪力标准值 V_3 均为 349.086 kN; 顶层 B、D 轴纵墙的地震剪力分别为 57.250 kN 和 50.268 kN. (c) 顶层 B、D 轴纵墙墙肢地震剪力, 见表 1. 表中 h/b 为墙肢高宽比, K_{lim} 为墙肢刚度($\times E_t$), V_{lim} 为墙段地震剪力. (d) 顶层 B、D 轴纵墙墙段(肢)的抗震抗剪强

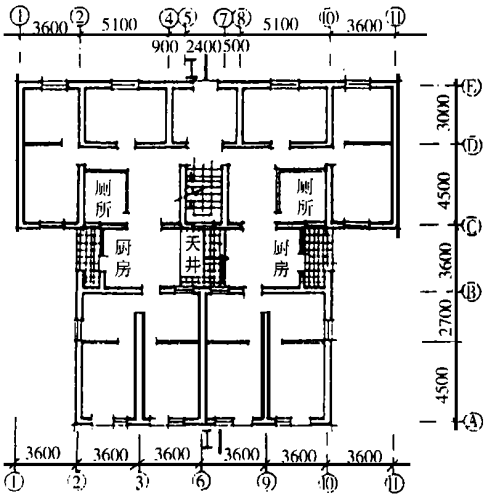


图 1 平面图

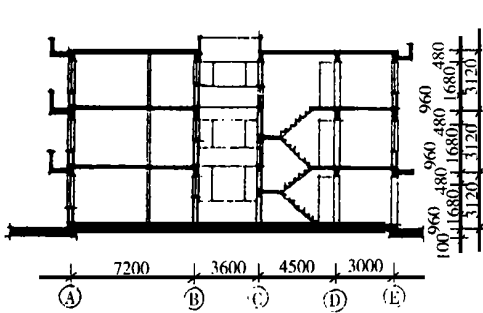


图 2 剖面图

度设计值,如表 2 所示.(e) 顶层 B, D 轴纵墙墙肢抗震抗剪强度验算(表 3). 表中 A 为墙肢横截面积, V_0 为墙肢抗震抗剪承载力.

表 1 顶层 B 和 D 轴纵墙墙肢地震剪力

轴号	墙肢号	片数	$h \cdot b^{-1}$	K_{ms}	V_{in}/kN	V_{ms}/kN
B	1	2	0.695	0.360	57.250	22.525
	2	2	1.826	0.075		4.693
	3	1	2.333	0.045		2.816
D	4	2	1.142	0.165	50.268	10.772
	5	2	0.932	0.220		14.362

表 2 顶层 B 和 D 轴纵墙墙(段)肢抗震抗剪强度设计值 $f_{\text{VE}}(\text{MPa})$

轴号	B	D	轴号	B	D
σ_0	0.055	0.057	ξ_N	0.560	0.566
σ_0/f_y	0.745	0.772	f_{VE}	0.041	0.042

表 3 顶层 B 和 D 轴纵墙墙肢抗震抗剪强度验算

轴号	墙肢号	片数	A/mm^2	f_{VE}/MPa	V_0/kN	V_{ms}/kN	$V_0 \cdot V_{\text{ms}}^{-1}$
B	1	2	945 600	0.041	38.770	22.525	1.721
	2	2	220 800		9.053	4.693	1.929
	3	1	172 800		7.085	2.816	2.516
D	4	2	576 000	0.042	24.192	10.772	2.246
	5	2	705 600		29.635	14.362	2.063

由此可知 $V_0 = \frac{f_{\text{VE}} A}{\gamma_{\text{RE}}} > V_{\text{ms}}$, 即顶层 B, D 轴纵墙的抗震抗剪强度均满足要求.

(3) 应用 ——模糊抗震抗剪可靠性验算(选取顶层进行验算). 据该地区的地质构造和地震危险性, 可得在未来 50 年基准期内该地区的模糊预测烈度 I 的支集为 $[6.5, 7.5]$. 地震

地面运动参数 ω_0 为 $15.8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, ξ_g 为 0.81, T 为 10.5 s. 石结构抗剪强度破坏等级论域为 $[B_1, B_2, B_3] = [\text{基本完好}, \text{中等破坏}, \text{严重破坏}]$, 记墙体“不发生 B_1 或更高等级破坏”的模糊安全域为 B_i^* . 经验算得, 纵向 $P_s(B_3^*, T) = 0.69$, 横向 $P_s(B_3^*, T) = 0.72$. 可见若平面布局合理、施工质量可靠, 石结构也有较高的可靠度.

6 结束语

本文在试验、分析和研究的基础上, 提供了目前在石结构理论方面研究已取得的若干进展. 它为促进石结构理论的完善奠定基础, 并供工程实践应用.

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国国家标准. GBJ 68~84 建筑结构设计统一标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984. 9~42
- 2 中华人民共和国国家标准. GBJ 3~88 砌体结构设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988. 2~14
- 3 施景勋, 施养杭. 对石墙抗震性能的研究和设计取值的建议. 华侨大学学报(自然科学版), 1993, 14(2): 85~90
- 4 林建华, 王全凤, 施养杭. 石砌体结构抗震性能及其模糊抗震可靠度的研究. 土木工程学报, 1998, 31(6): 41~48
- 5 施养杭. 石结构房屋抗震设计计算. 工程抗震, 1994, (2): 30~35

Analysis and Application of Stone Masonry Structure

Shi Yanghang

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract A study is made on stone masonry structure by combining with engineering practice. Based on wide investigations and fully tests and analyses and also on mathematical means, the following results are obtained. Firstly, a theoretical formula is proposed for calculating shear strength of stone masonry structure so as to reflect its actual shear-resistant performance; and self-vibration cycle and damping and basic model of vibration of stone masonry structure are given for reflecting its dynamic characteristics. Secondly, design values of antiseismic strength and shear strength of stone masonry structure are given in line with design principle of present structure in limit state; and fuzzy antiseismic reliability of stone masonry structure is given for reflecting its safety. Thirdly, to apply these results to engineering practice has led to satisfactory effect. This not only lays a good foundation for developing theory of stone structure but also offers a scientific basis for its application and protection.

Keywords stone masonry structure, theory of strength, dynamic characteristics, reliability