

文章编号 1000-5013(2000)02-0153-04

框-剪结构总框架最大水平剪力层分析

韦 鹏 生

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

摘要 从高层框-剪结构刚度特征值 λ 与侧移曲线的关系入手, 建立总框架最大水平剪力层的相对高度 ξ_{\max} 与 λ 的关系式. 用多功能求解器求解超越方程, 并给出总框架的一系列 $Q_f-\xi-\lambda$ 关系曲线和 $\lambda-\xi_{\max}$ 关系图. 得出关于框-剪结构中, 总框架最大水平剪力层特性的 4 个结论.

关键词 框-剪结构, 总框架, 剪力, 刚度特征值, 侧移

中图分类号 TU 398⁺.2

文献标识码 A

计算机技术的不断发展, 常常给土建结构分析者带来一些意外的惊喜. 美国 MathSoft 软件公司推出的多功能求解器(MCV⁺ for Windows)就是一个很好的软件. 用户可通过这种软件本身提供的一种简洁的语言来描述数学问题, 从而轻松地得到所期望的结果, 包括多种中间数据和美观实用的图表. 本文在一定的前提下, 推导出高层框-剪结构刚度特征值 λ 与总框架最大水平剪力层的相对高度 ξ_{\max} 之间的关系式. 再通过 MCV⁺ 求解有关的方程, 最后给出所需的图表. 另一方面, 本文通过相同的算例与文 [1] 的工作进行比较和分析, 从另一个角度对文 [1] 的结论进行进一步的阐述.

1 总框架最大水平剪力层的确定 [1~5]

框-剪结构刚度特征值 λ 的大小对结构的内力和变形有很大的影响. 如果 λ 取得过大, 那么结构侧移曲线将呈剪弯型. 此时由于结构的刚性较差, 为了满足文 [6] 所规定的变形要求, 框架往往是肥梁胖柱的. 反之, 如果 λ 取得太小(即剪力墙用量相对过大), 则结构水平位移曲线呈弯剪型. 这种情况已被文 [7] 证明是不妥当的. 因而剪力墙的用量显然是一个优化问题. 文 [8, 9~10] 对此作了较为深入的分析. 本文从高层框-剪结构刚度特征值 λ 与结构侧移曲线的关系入手, 确定总框架最大水平剪力层位置, 并研究其变化规律. MCV⁺ 输出的曲线表明, 总框架水平剪力 Q_f (或结构侧移曲线的斜率) 明显地表现为, 关于分析点相对高度的驻值问题. 其驻值即为总框架最大水平剪力(或侧移曲线的最小曲率半径).

本文的研究前提和基本假定可归纳为 5 点. (1) 结构质量中心与刚度中心相重合, 即不考虑整个结构绕竖轴的扭转. (2) 楼板在其自身平面内的刚度为无穷大, 平面外的刚度忽略不

计.(3) 总框架剪切刚度取为关于结构各层层高的加权平均值^[0,3],即

$$EI_w = \left(\sum_{i=1}^n EI_w^i \times h_i \right) / H,$$

从而说明,结构等刚度的情形是一种特例.(4) 考虑框架边柱(墙)的轴向变形.剪力墙的剪切变形对结构分析的影响,并认为连系梁刚接.(5) 所有连系梁两端的转角都相同,反弯点处在连系梁的中点.

根据以上假定,可得结构在侧向力作用下的位移曲线.

(1) 结构在水平均布荷载作用下的位移曲线为

$$y(x) = \frac{q_1 H^4}{EI_w} \left\{ \frac{v^2-1}{v^2} \left(\frac{\xi^2}{4} - \frac{\xi^3}{6} + \frac{\xi^4}{24} \right) + \frac{r^2}{S} \left(\xi - \frac{\xi^2}{2} \right) + \frac{v^2}{\lambda^2} \left(\frac{1}{S} - \frac{v^2-1}{v^2} \right)^2 \left[\left(\xi - \frac{\xi^2}{2} \right) + \frac{\lambda \operatorname{sh} \lambda + 1}{\lambda^2 \operatorname{ch} \lambda} (\operatorname{ch} \lambda \xi - 1) - \frac{\operatorname{sh} \lambda \xi}{\lambda} \right] \right\}. \quad (1)$$

(2) 结构在倒三角形荷载作用下的位移曲线为

$$y(x) = \frac{q_2 H^4}{2EI_w} \left\{ \frac{v^2-1}{v^2} \left(\frac{\xi^2}{3} - \frac{\xi^3}{6} + \frac{\xi^5}{60} \right) + \frac{r^2}{S} \left(\xi - \frac{\xi^3}{3} \right) + \frac{v^2}{\lambda^2} \left(\frac{1}{S} - \frac{v^2-1}{v^2} \right)^2 \left[\left(\frac{\lambda^2-2}{\lambda^2} \xi - \frac{\xi^3}{3} \right) + \frac{2}{\lambda^2 \operatorname{ch} \lambda} (\operatorname{ch} \lambda \xi - 1) + \frac{\lambda^2-2}{\lambda^2} \frac{\operatorname{sh} \lambda (1-\xi) - \operatorname{sh} \lambda}{\lambda \operatorname{ch} \lambda} \right] \right\}. \quad (2)$$

(3) 结构在顶部集中力作用下的位移曲线为

$$y(x) = \frac{PH^3}{EI_w} \left\{ \frac{v^2-1}{v^2} \left(\frac{\xi^2}{2} - \frac{\xi^3}{6} \right) + \frac{r^2}{S} \xi + \frac{v^2}{\lambda^2} \left(\frac{1}{S} - \frac{v^2-1}{v^2} \right)^2 \left[\left(\xi + \frac{\operatorname{sh} \lambda (1-\xi)}{\lambda \operatorname{ch} \lambda} - \frac{\operatorname{sh} \lambda}{\lambda \operatorname{ch} \lambda} \right) \right] \right\}. \quad (3)$$

其中 H 为结构总高, EI_w 为总剪力墙抗弯刚度, λ 为结构刚度特征值, ξ 为结构分析点相对高度, q_1 为水平布荷载值, q_2 为倒三角形荷载在结构顶部的最大集度, P 为结构顶部集中力. r 为结构总剪切系数, S 和 v 分别为剪切变形影响系数和轴向变形影响系数, 三者的表达式见文 [6]. 在计算 λ 时, 已考虑了总连系梁刚度 C_L 的影响. 如果同时考虑剪力墙剪切变形、框架柱轴向变形、联系梁刚接或铰接等因素对结构的共同影响, 可按文 [1] 的方法来计算. 在框-剪结构的协同分析过程中, 通常将框架和剪力墙离析为单一的受力体. 故对于总框架, 除了重力荷载之外, 还受到来自剪力墙的所谓“地基反力”. 这种力是由于地震作用和(或)风作用而产生的. 因此, 总框架最大水平剪力一定发生在结构侧移曲线的最小曲率半径处, 即由

$$d^2 y / d\xi^2 = 0, \quad (4)$$

可求出对应于 $Q_{f \max}$ 的 ξ_{\max} . 将式(1), (2), (3) 分别代入式(4), 得

$$\begin{aligned} & \frac{v^2-1}{v^2} \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{\xi^2}{2} \right) - \frac{r^2}{S} + \\ & \frac{v^2}{\lambda^2} \left(\frac{1}{S} - \frac{v^2-1}{v^2} \right)^2 \left(-1 + \frac{\lambda \operatorname{sh} \lambda}{\operatorname{ch} \lambda} \operatorname{ch} \lambda \xi - \lambda \operatorname{sh} \lambda \xi \right) = 0, \\ & \frac{v^2-1}{v^2} \left(\frac{2}{3} - \xi + \frac{\xi^3}{3} \right) - \frac{2r^2}{S} + \\ & \frac{v^2}{\lambda^2} \left(\frac{1}{S} - \frac{v^2-1}{v^2} \right)^2 \left(-2\xi + \frac{2\operatorname{ch} \lambda \xi}{\operatorname{ch} \lambda} + \frac{\lambda^2-2}{\lambda^2} \frac{\lambda \operatorname{sh} \lambda (1-\xi)}{\operatorname{ch} \lambda} \right) = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{v^2}{\lambda^2} \left(\frac{1}{S} - \frac{v^2-1}{v^2} \right)^2 \left(-2\xi + \frac{2\operatorname{ch} \lambda \xi}{\operatorname{ch} \lambda} + \frac{\lambda^2-2}{\lambda^2} \frac{\lambda \operatorname{sh} \lambda (1-\xi)}{\operatorname{ch} \lambda} \right) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{v^2-1}{v^2}(1-\xi) + \frac{v^2}{\lambda^2}\left(\frac{1}{S} - \frac{v^2-1}{v^2}\right)^2 \frac{\lambda \operatorname{sh} \lambda(1-\xi)}{\operatorname{ch} \lambda} = 0. \tag{7}$$

求解方程(5), (6), (7), 即得对应于三种水平荷载作用下的 ξ_{\max} . 其求解方法, 可通过 Newton 迭代法向 MCV^+ 描述. 迭代格式为 $\xi_{n+1} = \xi_n - f(\xi_n)/f'(\xi_n)$, $n = 0, 1, \dots, \xi_0 = 1$, 其中函数 $f(\xi_n)$ 分别取式(5), (6), (7) 的等号左边项.

2 算例

算例仍取文 [1] 中的例子. 剪力墙惯性矩 I_w 分别取 $I_{w1} = 25.32 \text{ m}^4, I_{w2} = 32.28 \text{ m}^4, I_{w3} = 24.69 \text{ m}^4, I_{w4} = 17.81 \text{ m}^4, I_{w5} = 15.62 \text{ m}^4, I_{w6} = 27.12 \text{ m}^4$. ($I_{w1}, I_{w2}, \dots, I_{w6}$ 分别代表轴向变形、剪切变形和连系梁刚(铰)接等三个因素的不同组合类型的剪力墙最优惯性矩, 详见文 [1]). 所对应的结构刚度特征值依次为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6$. 将文 [1] 计算所得的各层地震作用, 按倒三角形荷载作用于相应的结构上. MCV^+ 输出的 $Q_f-\xi-\lambda$ 关系(公式推导详见文 [6]), 如图 1 所

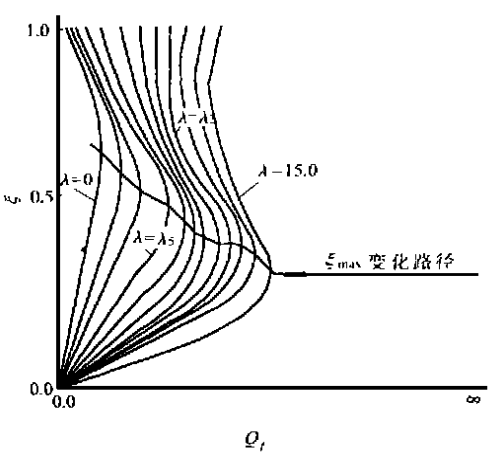


图 1 $Q_f-\xi-\lambda$ 关系图

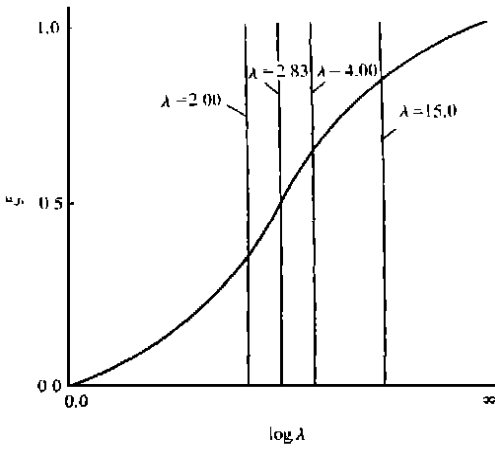


图 2 $\lambda-\xi_{\max}$ 关系图

示. $\lambda-\xi_{\max}$ 关系如图 2 所示. 图 1 中由左向右, 在 $\lambda = 0$ 至 $\lambda = \lambda_5$ 之间的三条曲线对应的 λ 值分别为 0.3, 0.7 和 0.9. λ_5 与 λ_6 之间的 λ 值分别为 $\lambda_4, \lambda_3, \lambda_1, \lambda_6$. 在 $\lambda = \lambda_6$ 至 $\lambda = 15.0$ 之间的两条曲线分别对应于这一区段的两个 λ 三分点. $\lambda = 15.0$ 至 λ_2 之间的两条曲线分别对应于这一区段的 2 个 λ 三分点.

3 结束语

- (1) 在框-剪结构中, 框架和剪力墙的不同变形特性, 使框架存在最大水平剪力层. 只有当 $\lambda =$ 时该层才位于首层, 此时结构已退变为纯框架结构.
- (2) 结构刚度特征值 λ 增大(即剪力墙刚度减小), 可使框架最大水平剪力层的相对高度 ξ_{\max} 减小; 反之, ξ_{\max} 增大.
- (3) 当结构刚度特征值 $\lambda = 2.0 \sim 4.0$ 时, 框架最大水平剪力层的相对高度 $\xi_{\max}-\lambda$ 近似呈线性关系.
- (4) 分别由 I_{w1} 和 I_{w2} 计算所得的 ξ_{\max} 相差仅为 4.6%. I_{w1} 为同时考虑弯曲变形、剪切变形

和连系梁刚接影响时, 剪力墙的最优惯性矩^[1]. I_{opt} 为只考虑弯曲变形, 不考虑其它影响因素时, 剪力墙的最优惯性矩^[1]. 这进一步证明了文[1]结论的正确性.

参 考 文 献

- 1 韦鹏生, 王全凤. 多因素对剪力墙最优刚度影响的综合分析[J]. 工程力学, 1996, 13(2): 61 ~ 68
- 2 程文壤. 框剪结构中剪力墙用量的确定法[J]. 建筑结构, 1988, (2): 22 ~ 26
- 3 同济大学. 多层及高层房屋结构设计(下册)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982. 1 ~ 61
- 4 方鄂华. 多层及高层建筑结构设计[M]. 北京: 地震出版社, 1992. 99 ~ 122
- 5 Shabrooz B M, Remmetter M E, Qin F. Seismic design and performance of coupled walls[J]. J. of Struc. Eng., 1993, 119(11): 35 ~ 48
- 6 中华人民共和国国家标准. GBJ 11 ~ 98 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989
- 7 王全凤, 施士升. 框架-剪力墙高层建筑结构抗地震荷载剪力墙数量的优化分析[J]. 土木工程学报, 1981, 14(3): 1 ~ 12
- 8 韦鹏生, 王全凤. 框架-抗震墙高层建筑抗震墙的计算机辅助设计[A]. 见: 王秀喜主编. 计算力学及在工程中的应用[C]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992: 361 ~ 365
- 9 韦鹏生. 剪力墙优化 CAD 系统 SWCAD() [J]. 工程力学, 1995, (增刊): 2073 ~ 2077
- 10 韦鹏生. 考虑二阶效应时高层筒体结构的刚度优化分析[J]. 土木工程学报, 1996, 29(5): 18 ~ 23

An Analysis of the Floor Having Maximum Horizontal Shear within General Frame of Frame-Shear Wall Structure

Wei Pengsheng

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

Abstract Starting with the relation between λ as eigenvalue of the stiffness of high-rise frame-shear wall structure and curve of lateral displacement, a relational expression is established between λ and ξ_{\max} , the relative height of the floor having maximum horizontal shear within general frame. A transcendental equation is solved by applying multi-functional solver; and a series of Q_f - ξ - λ relation curves and λ - ξ_{\max} relation diagram are given, where Q_f denotes horizontal shear of general frame. On the characteristic of the floor having maximum horizontal shear within general frame of frame-shear wall structure, four conclusions are obtained.

Keywords frame-shear wall structure, general frame, shear force, eigenvalue of stiffness, lateral displacement