

剪力墙最优刚度及其计算机实现^{*}

王全凤

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

摘要 系统地提出高层框架-剪力墙结构中的剪力墙最优刚度的概念. 解决长期以来困扰着高层框架-剪力墙结构设计中剪力墙数量合理确定的困难, 提供一种确定剪力墙数量的科学方法. 在分析剪力墙刚度与地震作用相互关系的基础上, 建立确定剪力墙最优刚度的数学模型. 同时, 考虑剪力墙剪切变形、框架柱的轴向变形、剪力墙基础的转动, 以及剪力墙刚度沿结构高度变化对剪力墙最优刚度的影响. 计算机辅助设计采用动态数据结构、制图模式、模式填表, 以及重新分配计算机内存堆栈, 对CAD系统进行管理新技术. 最后, 给出一个工程实例, 说明该成果在工程中应用, 可用在方案和施工图设计阶段.

关键词 剪力墙, 最优刚度, 框架-剪力墙结构, 计算机辅助设计

分类号 TU 12

传统的结构优化设计, 把一类通用的结构优化问题归结为标准形式求设计变量 $\{x\}$. 使得目标函数重量最小, $w(x) \rightarrow \min$, 并满足约束条件: $g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m$ 的标准形式. 80年代, 由于计算机的硬件和图形学的发展, 优化的目标也在不断地扩展, 从最小重量、最低造价到最优结构形状、最佳受力状态等. 配置剪力墙, 是高层框架-剪力墙高层建筑结构设计遇到的第一个问题. 一直到现在, 国内对于确定剪力墙的数量是凭经验设置后再验算的方法, 有的也提出了确定剪力墙数量的简化公式. 前者需要多次耗时计算, 其设计方案的优劣又很大程度上取决于设计者的设计经验和技能; 后者采用简化的方法来减少设计工作量, 但由于传统设计方法的局限性, 难以从根本上解决这个问题. 在国外, 也只是在地震灾害宏观调查的基础上, 提出了以单位建筑面积上剪力墙的长度(或面积), 作为配置该类房屋不致破坏所需的剪力墙数量的下限指标. 由于这些都是建立在“经验”的基础上, 问题一直未得到很好的解决.

1 框架-剪力墙高层建筑剪力墙最优刚度

1.1 分析的方法

在地震区, 如果剪力墙的刚度选择过小, 就不能达到抵抗水平地震作用的预期目的. 如果增大剪力墙的刚度, 房屋的自振周期减小, 地震作用就相应加大. 因此, 这里存在着剪力墙刚度如何取值是最合理的问题, 要求其具有最小抗侧移刚度, 又能满足使用要求. 上述问题显然可以归结为结构优化问题. 找到一个最合适的剪力墙刚度, 使地震作用尽可能小, 而又能满足

结构的变形要求. 取地震作用为目标函数, 剪力墙有效刚度为设计变量. 然后, 选择适当的约束条件, 通过优化方法找到一个剪力墙最优刚度值, 使整个结构呈现最佳受力状态. 用数学模型法抽象为数学模型, 确定框架-剪力墙结构剪力墙的最优刚度^[1]. 最后, 求剪力墙最优刚度(设计变量), 使得地震作用(目标函数)为最小. 这样, 可以同时满足结构位移的约束条件, 以及作为几何约束的结构各构件的应力条件^[2], 其位移约束为

$$\left. \begin{aligned} & \frac{PH}{abc} \left[\Delta \left(1 - \frac{\text{th} \lambda}{\lambda} \right) + \frac{abc}{GA_1/\mu + c} + \frac{1}{3} \lambda^2 \left(1 - \frac{1}{b} \right) \right] + \\ & \quad \frac{1-b}{b} \beta_{a\theta_0 H} \cdot \left(\frac{\text{th} \lambda}{\lambda} - 1 + \frac{b}{1-a} \right) y, \\ & \max \left\{ \frac{P}{abc} \left[\Delta (\text{th} \lambda \cdot \text{sh}(\lambda \xi) + 1 - \text{ch}(\lambda \xi)) + \frac{abc}{GA_1/\mu + c} + \lambda^2 \left(1 - \frac{1}{b} \right) (\xi - \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \frac{\xi^2}{2}) \right] + \frac{1-b}{b} \beta_{a\theta_0} \cdot \left[\text{ch}(\lambda \xi) - \text{th} \lambda \cdot \text{sh}(\lambda \xi) + \frac{b}{1-a} - 1 \right] \right\} \frac{\delta}{h}, \\ & \quad B_w \quad 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

而应力约束为

$$\left. \begin{aligned} & K(Q_w)_{\max} \quad 0.2R_{at}(B_1 - t), \quad K(Q_z)_{\max} \quad 0.3R_{ab}h_1, \\ & \sigma_0 \quad 0.75R_a, \quad KM_{\max} \quad 0.4R_w b_2 h_2^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1)中 $\Delta = a - (1 - 1/b) - \frac{ac(1-\beta)}{GA_1/\mu + c}$, $\xi = \frac{x}{H}$, 框架-剪力墙结构刚度特征值 $\lambda = H \left(\frac{abc}{B_w} \right)^{\frac{1}{2}}$, 剪力墙剪切变形影响系数 $a = \frac{GA_1/\mu}{GA_1/\mu + c}$, 框架柱轴向变形影响系数 $b = 1 + \frac{GA_1}{\mu c} \beta$, $\beta = \frac{cQB_w}{SGA_1/\mu}$; B_w 为剪力墙总抗弯刚度, GA_1 为剪力墙抗剪刚度, μ 为剪力墙断面剪力分布不均匀系数, c 为框架的平均剪切刚度, φ 为考虑框架节点转动对框架梁支座截面转动的影响系数, S 为框架柱的组合截面惯性矩, H 为结构的总高度; P 为地震作用, y , $\frac{\delta}{h}$ 分别为房屋最大水平位移和层间相对水平位移的允许值. 式(2)中 K 为安全系数, $(Q_w)_{\max}$ 为每道剪力墙承受最大的剪力; R_a , R_w 分别为混凝土的抗压和抗弯设计强度; t , B_1 分别为剪力墙的厚度和长度, $(Q_z)_{\max}$ 为最大的结点区剪力; b_1 , b_2 分别为柱、梁的宽度, h_1 , h_2 分别为柱、梁有效高度; σ_0 为柱的平均压应力, M_{\max} 为框架梁承受最大弯矩, θ_0 为由于基础不均匀沉降引起的剪力墙基础转动. 若基础梁的长度 $l_0 > \frac{\pi}{\lambda_0}$ 及荷载作用点至梁端距离 $c < \frac{\pi}{\lambda_0}$ 时, 则 $\theta_0 = 2M_0 \lambda_0^2 \{ \text{sh}(\lambda_0 l_0) \cdot \cos(\lambda_0 l_0/2) \cdot \text{sh}(\lambda_0 l_0/2) + \text{sh}(\lambda_0 l_0) \cdot \sin(\lambda_0 l_0/2) \cdot \text{ch}(\lambda_0 l_0/2) + \sin(\lambda_0 l_0) \cdot \text{ch}(\lambda_0 l_0/2) \cdot \sin(\lambda_0 l_0/2) + \sin(\lambda_0 l_0) \cdot \text{sh}(\lambda_0 l_0/2) \cdot \cos(\lambda_0 l_0/2) \} / \{ K_0 b_0 l_0 [\text{sh}^2(\lambda_0 l_0) - \sin^2(\lambda_0 l_0)] \}$. 若荷载作用点到梁端距离 $c > \frac{\pi}{\lambda_0}$ 时, 则 $\theta_0 = \frac{2M_0 \lambda_0^2}{K_0 b_0 l_0} e^{-\lambda_0 x} \sin(\lambda_0 x)$. 若基础梁的长度 $l_0 < \frac{\pi}{4\lambda_0}$ 时, 则 $\theta_0 = \frac{M_0}{K_0 l_0}$. 其中, $\lambda_0 = [K_0 b_0 / (4B_0)]^{\frac{1}{4}}$ 为基础梁的柔度特征值, K_0 为地基系数, b_0 为基础宽度, B_0 为基础抗弯刚度, l_0 为基础长度, I_0 为剪力墙基础底面积对形心轴的惯性矩.

1.2 对数学模型的评论

结构优化设计是集专业设计理论、数学上最优化方法和计算机技术于一体. 在这一交叉领域中, 本文只是作了一些有益的尝试, 还有很多问题需要进一步探讨解决. 本优化设计的数

学模型具有个明显的特点.

1.2.1 通用性 在数学模型中,除了考虑剪力墙的弯曲变形外,还考虑剪力墙的剪切变形、框架柱轴向变形^[6]和剪力墙基础转动^[8]对剪力墙最优刚度的影响.不必分门别类,对高度超 50 m 以上,高宽比大于 4 的框-剪结构,应考虑框架柱轴向变形的影响;对高宽比小于 4 的应考虑剪力墙剪切变形的影响等.本方法还可推广到,确定变刚度的框架-剪力墙结构剪力墙的最优刚度^[6].

1.2.2 满意解 本优化设计属于经验优化范畴,所得到的解不是最优解,而是接近最优解的满意解.本优化数学模型的设计变量只取剪力墙刚度,当然与框架梁、柱及层高有关的框架平均抗剪刚度等也可同时作为设计变量.但大量的工程设计实践,已经总结出一套有规律性的东西,如房屋的高度及竖向荷载已知的情况下,柱子的断面尺寸基本可确定.文献[2]也有剪力墙刚度的变化对框架柱内力影响不大的结论.所以,把柱断面作为常量处理在理论上是容许的,这样必然给优化分析带来很大方便.同时,从优化设计理论本身来讲也是容许的,这样的优化方法叫经验优化方法.严格地讲,这种方法得到的不是最优值,但它很接近于最优值.

1.3 主要创新

首次,提出了在框架-剪力墙高层建筑中,剪力墙刚度不是愈大愈好,而是有一个合适的刚度.其次,在分析剪力墙刚度与地震作用相互关系的基础上,把确定框架-剪力墙高层建筑结构在地震作用下剪力墙合适刚度问题,归结为结构优化设计问题.同时,也建立了确定剪力墙最优刚度的数学模型.第三,第一次提出了与日本人不同的度量指标,提出了以单位建筑面积上剪力墙惯性矩作为高层房屋不致破坏的度量指标.这样,可在选择高层建筑结构方案,以及在施工图设计中应用.

2 框架-剪力墙高层结构剪力墙优化 CAD 软件系统

80 年代,结构优化设计的另一个重要突破,是在整体结构优化设计过程中采用数据库管理.因此,优化技术才能成为计算机辅助设计(CAD)的一个不可缺少部分,真正实现从 Computer Aided Drafting 到 Computer Aided Design 的过渡.从发展上看,使优化手段为工程设计人员接受,就必须建立一个现成的、实用的优化程序系统.当然,这里的程序系统是指接近于优化、花费少的程序,而不是高精度、花费大的程序.因为,框架-剪力墙高层结构属于高次超静定空间结构.地震作用(目标函数)与剪力墙有效刚度(设计变量)的关系、位移(约束条件)与设计变量的关系等,都是复杂的非线性函数关系.整个数学模型属于非线性规划问题.

2.1 软件系统结构

任何一个完整的 CAD 系统都应包括图形通讯系统、数据管理系统、分析程序库和 CAD 系统管理软件 4 个部分.为了实现本文的工作目标,系统的结构框图如图 1 所示.其主要包括结构分析与优化、建立图形数据库、图形数据库与图形支撑软件的接口和计算机绘图 4 个方面.

2.2 采用的新技术^[6]

(1) 利用最优化理论,建立在地震作用下,框架-剪力墙高层建筑剪力墙优化设计的数学模型.(2) 在结构分析及优化设计中采用动态数据结构技术,对内存进行动态分配和管理.用数据结构中的环形链表实现整刚矩阵的动态存储,大大增加了程序的通用性,使计算机的有限

效果会更明显. 剪力墙的布置靠人工干预解决.

框-剪结构是目前我国高层建筑结构中相当常见的结构体系. 该软件系统已在建设部建筑设计院海南分院、长江航运规划设计院晋江分院等单位得到实际应用. 本软件系统的进一步推广应用, 必定带来更为显著的经济效益.

参 考 文 献

- 1 王全凤. 高层结构剪力墙最优刚度的数学模型法. 华侨大学学报(自然科学版), 1994, 15(2): 189~191
- 2 王全凤, 施工升. 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. 土木工程学报, 1981, 14(3): 1~12
- 3 王全凤. 框架柱轴间变形对剪力墙最优刚度的影响. 基建优化, 1990, 11(3): 37~46
- 4 王全凤. 剪力墙基础转动对剪力墙最优刚度的影响. 建筑科学, 1986, (4): 32~37
- 5 王全凤. 变刚度框架-剪力墙结构抗地震荷载剪力墙数量的优化分析. 建筑结构学报, 1983, 4(5): 45~56
- 6 韦鹏生, 王全凤. 计算力学及其在工程中的应用——框架-抗震墙高层建筑抗震墙的计算机辅助设计. 合肥: 中国科技大学出版社, 1992. 358~365
- 7 北京建筑工程学院, 南京工学院编. 建筑结构抗震设计. 北京: 地震出版社, 1981. 191~202

Optimal Stiffness of Shear Wall and Its Implementation on Computer

Wang Quanfeng

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

Abstract With the purpose of conquering the difficulty in reasonably determining the amount of shear walls used for designing a tall frame-shear wall structure, the author formulates a concept of optimal stiffness of shear wall in a tall frame-shear wall structure; and offers a scientific method for determining the amount of shear walls. An analysis is made on the relation between stiffness of shear wall and seismic excitation as the first step. Based on which, a mathematical model is constructed for the optimal stiffness of shear wall, taking into account of the effects of such factors influencing optimal stiffness as shearing deformation of shear wall, axial deformation of framed column, rotation of the base of shear wall and change of stiffness of shear wall along the height of structure. In computer-aided design, such new technologies as dynamic data structure, mode of drawing, mode charting, and redistribution of memory stacks are adopted for running CAD system. An engineering example given finally accounts for the fact that the present work can be applied to the stage of scheme and construction drawing design.

Keywords shear wall, optimal stiffness, frame-shear wall structure, computer-aided design