

超高层结构基于刚重比敏感性的优化设计方法

赵 昕^{1,2}, 蔡锦伦¹, 秦 朗¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 结构整体稳定是超高层建筑结构设计的基本要求。为控制超高层建筑结构的重力 $P-\Delta$ 效应(结构的水平变形引起的重力附加效应)不至于过大, 提出一种基于刚重比敏感性的单驱动约束优化设计方法。刚重比, 即结构的刚度和重力荷载之比, 是影响重力 $P-\Delta$ 效应的重要参数。依据虚功原理和等增量分析方法, 分别推导敏感性系数公式, 并以两层平面框架为例计算其敏感性系数, 从理论上说明了方法的可行性。将该优化方法用于建筑高度 468 m 的某超高层建筑, 调整构件尺寸后共计节约成本 939.1 万元, 从工程实践上说明了方法的可行性。研究表明, 针对以刚重比为驱动约束的超高层建筑结构, 该方法能合理地将材料分配到不同的构件组中, 可实现经济有效的结构设计。

关键词: 结构设计; 超高层建筑; 敏感性分析; 刚重比优化; 等增量分析

中图分类号: TU973+2

文献标志码: A

Optimal Design of Super-Tall Structures Based on the Sensitivity of Stiffness-Weight Ratio

ZHAO Xin^{1,2}, CAI Jinlun¹, QIN Lang¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd, Shanghai 200092, China)

Abstract: The overall stability is the essential requirement of the structural design of super-tall buildings. A single driven constraint optimization design method based on the sensitivity of the stiffness-weight ratio was proposed to control the $P-\Delta$ effect (additional effect of gravity caused by horizontal deformation of structure) of super-tall buildings. Stiffness-weight ratio, the ratio of stiffness to gravity load, is an important parameter that affects the $P-\Delta$ effect. Based on the principle of virtual work and the method of equal increment analysis, the formulas of sensitivity

coefficients were deduced, and the sensitivity coefficients of a two-story plane frame were calculated as an example. The feasibility of the proposed method was verified theoretically. Finally, the proposed method was applied to a super-tall building with a building height of 468 meters. And after adjusting the dimensions of components, a total cost of 9.391 million yuan was saved. The feasibility of the proposed method was illustrated by this engineering case. The results show that the proposed method can reasonably distribute the materials to different component groups for a super-tall building structure with the stiffness-weight ratio as a driven constraint, which can realize the economical and practical structural design.

Key words: structural design; super-tall building; sensitivity analysis; optimization of stiffness-weight ratio; equal increment analysis

超高层结构优化是一个复杂的过程, 以往结构优化主要依赖于工程师的概念和经验, 具有一定的盲目性, 费时费力。近年来, 随着敏感性分析方法的不断发展, 设计约束对材料成本的敏感性大小可定量计算, 使结构优化逻辑更加明确。

Arora 等^[1]总结了计算敏感性的三种方法, 即虚功方法、伴随变量方法和直接法。Adelman 等^[2]针对离散结构, 分析了对多个约束条件下的敏感性。但上述论文提到的方法均需对结构的刚度矩阵求导, 对于刚度矩阵维数较多的超高层结构难以推广。Velivasakis 等^[3]首次采用虚功原理建立结构整体刚度与构件的关系。Charney^[4]认为当所有构件的敏感性系数一致时, 结构达到理论上的最优设计, 但实际工程受多因素的限制, 无法达到理论最优设计。Sherbourne 等^[5]基于最优准则法的数值优化方法, 在

收稿日期: 2019-11-15

基金项目: 上海市优秀技术带头人计划(14XD1423900)

第一作者: 赵 昕(1975—), 男, 教授级高工, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高性能工程结构系统设计、控制与优化。E-mail: 22zx@tjadri.com



论文
拓展
介绍

层间位移角和构件承载力约束条件下优化了结构重量。Park等^[6]研究了地震作用下结构顶点位移、层间位移角和构件应力约束条件下多层建筑结构重量的优化。Hyun等^[7]研究了运用振型分解反应谱法计算地震响应时支撑框架结构的算法优化。

约束敏感性在国内也不乏应用。Yu等^[8]、董耀旻^[9]、江祥^[10]分别以风荷载下层间位移角、风荷载下层间位移角和一阶周期、风荷载下顶点加速度为约束条件推导敏感性计算公式,以实际工程为案例优化了结构造价。赵昕等^[11]以地震作用下层间位移角和一阶周期为约束,对构件材料成本的敏感性系数计算公式做了推导,提出了双约束条件下结构优化组合排序法。但以上论文均未涉及整体稳定性(包括刚重比)这一超高层结构的重要指标。

结构整体稳定是超高层建筑结构设计的基本要求。结构水平变形引起的重力附加效应称为重力 $P-\Delta$ 效应^[12]。研究表明, $P-\Delta$ 效应可能使结构位移和构件受力增大25%~30%^[13]。美国建筑荷载规范^[14]和欧洲规范^[15]都规定了稳定系数 θ 的限值以确保结构稳定,中国规范采用侧向刚度与重力荷载的比值,即刚重比作为整体稳定的控制指标^[16]。

刘南乡^[17]根据实际体型和荷载分布,采用修正算法推算了超高层结构刚重比公式。陆天天等^[18]采用上述公式研究了上海中心大厦结构整体稳定性。杨学林等^[19]针对复杂体型高层建筑,引入楼层竖向荷载分布系数,对规范指标进行了修正。武云鹏等^[20]推导了可用于一般水平荷载的刚重比计算公式,并进行了计算机软件数值试验。安东亚^[21]推导了适用于塔式刚性连体高层结构的刚重比限值,并指出采用规范方法将偏于保守。李少成等^[22]探讨了刚重比与重力二阶效应增幅和临界屈曲荷载因子的关系。

本文依据虚功原理和等增量分析方法,分别推导刚重比约束下敏感性系数公式,并分别以两层平面框架和某超高层建筑为例计算敏感性系数,从理论和工程实践上说明了本文优化设计方法的可行性。

1 敏感性分析方法

1.1 敏感性系数

约束条件关于设计变量的敏感程度可用敏感性系数表示。敏感性系数是在其他设计变量不变的情况下,某设计变量发生变化给某约束条件带来变动的程度。敏感性系数定义如下:

$$s_{i,k} = \frac{\Delta g_i}{\Delta v_k} \quad (1)$$

式中: $s_{i,k}$ 为第*i*个约束条件关于设计变量*k*的敏感性系数; Δg_i 为第*i*个约束条件的变化量; Δv_k 为第*k*个设计变量的变化量。

1.2 虚功敏感性系数分析方法

通过虚功原理可以建立设计变量与约束条件之间的显式关系。变形体处于平衡时,结构受到的外力发生虚变化,位移所作虚功之和等于变形体所接受的虚变形功。变形体虚功方程如下:

$$\delta W_e = \delta W_i \quad (2)$$

式中: δW_e 为外虚功之和; δW_i 为整个变形体所接受的虚变形功。

$$\delta W_e = \delta F \Delta \quad (3)$$

式中: δF 为虚外力; Δ 为位移。

变形体接受的虚变形功 δW_i 与设计变量相关, δW_i 可写成所有构件虚变形功之和,如下式所示:

$$\delta W_i = \sum_{k=1}^P e^k \quad (4)$$

式中: k 为构件编号; P 为构件的总数; e^k 为第*k*个构件的虚变形功。

由式(2)、(4)可得

$$\delta W_e = \sum_{k=1}^P e^k \quad (5)$$

将外虚功之和 δW_e 看成关于约束条件的函数,则约束条件和设计变量之间的显式关系得到建立。

线单元与壳单元内力如图1所示。

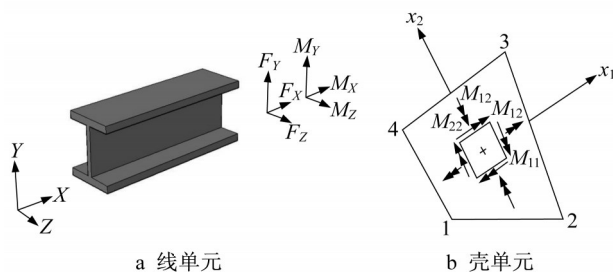


图1 内力示意图

Fig.1 Internal force diagram

线单元 e^k 的计算公式如式(6)所示,壳单元 e^k 的计算公式如式(7)所示。

$$e^k = \int_0^l \left(\frac{F_x f_x}{EA} + \frac{F_y f_y}{GA_y} + \frac{F_z f_z}{GA_z} + \frac{M_x m_x}{GI_x} + \frac{M_y m_y}{EI_y} + \frac{M_z m_z}{EI_z} \right) dx \quad (6)$$

式中: E 为单元材料的弹性模量; G 为单元材料的剪

切模量; L 为第 k 个线单元的长度; $F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z$ 为真实荷载作用下单元的内力; $f_X, f_Y, f_Z, m_X, m_Y, m_Z$ 为虚拟荷载作用下单元的内力; A 为线单元的横截面积; A_Y 和 A_Z 为线单元的剪切面积; I_X, I_Y 和 I_Z 为惯性力作用下线单元的扭转和弯曲惯性矩。

$$e^k = \int_0^h \int_0^d \left[\frac{1}{E} \left(\frac{F_{11}f_{11}}{B} + \frac{12M_{11}m_{11}}{B^3} + \frac{F_{22}f_{22}}{B} + \frac{12M_{22}m_{22}}{B^3} - \nu \frac{F_{11}f_{22}}{B} - \nu \frac{12M_{11}m_{22}}{B^3} - \nu \frac{F_{22}f_{11}}{B} - \nu \frac{12M_{22}m_{11}}{B^3} \right) + \frac{1}{G} \left(\frac{F_{12}f_{12}}{B} + \frac{12M_{12}m_{12}}{B^3} \right) + \frac{6}{5G} \left(\frac{V_{23}v_{23} + V_{13}v_{13}}{B} \right) \right] dx_1 dx_2 \quad (7)$$

式中: h 为第 k 个壳单元的长度; d 为第 k 个壳单元的高度; $F_{11}, F_{22}, F_{12}, V_{13}, V_{23}, M_{11}, M_{22}$ 和 M_{12} 为真实荷载作用下单元的内力; $f_{11}, f_{22}, f_{12}, v_{13}, v_{23}, m_{11}, m_{22}$ 和 m_{12} 为虚拟荷载作用下单元的内力; B 为壳单元的厚度; ν 为单元材料的泊松比。

1.3 等增量敏感性分析方法

等增量敏感性分析方法采用通用结构分析软件,依次等增量增加各构件组的材料体积或材料成本,计算设计约束的变化量,之后带入式(1)可计算出敏感性系数。

2 刚重比敏感性分析原理

2.1 刚重比的计算

刚重比是影响重力 $P-\Delta$ 效应的重要参数,通过控制结构刚重比来保证结构的整体稳定性。将超高层建筑结构等效为匀质悬臂杆后, E 为悬臂杆的弹性模量, J_d 为等效惯性矩,故结构弹性等效侧向刚度为 EJ_d 。超高层混凝土、钢结构的整体稳定性应分别满足公式(8)、(9)。

$$EJ_d \geq 1.4H^2 \sum_{i=1}^M G_i \quad (8)$$

$$EJ_d \geq 0.7H^2 \sum_{i=1}^M G_i \quad (9)$$

式(8)、(9)中: EJ_d 为结构一个主轴方向的弹性等效侧向刚度; H 为房屋高度; M 为楼层总数; G_i 为第 i 层重力荷载设计值,取1.2倍的永久荷载标准值与1.4倍的楼面可变荷载标准值的组合值。

可近似按倒三角形分布荷载作用下结构顶点位移相等原则,将结构的侧向刚度折算为竖向悬臂受弯构件的等效侧向刚度。 EJ_d 可按式(10)计算。

$$EJ_d = 11qH^4/120u \quad (10)$$

式中: q 为倒三角形分布荷载的最大值; u 为倒三角形分布荷载作用下结构顶点质心的弹性水平位移。

定义刚重比 λ 为

$$\lambda = EJ_d/H^2 \sum_{i=1}^M G_i \quad (11)$$

刘南乡^[17]考虑了高层建筑体型和荷载分布的不均匀,建议修正刚重比,修正系数为

$$\beta = \frac{1}{3G_M} \sum_{i=1}^M G_i \quad (12)$$

式中: G_M 为竖向质量分布修正的重力荷载设计值,可表示为

$$G_M = \sum_{i=1}^M \left[G_i \left(\frac{H_i}{H} \right)^2 \right] \quad (13)$$

式中: H_i 为第 i 层楼板距离地面的高度。

故修正后的刚重比 λ' 为

$$\lambda' = \beta \lambda = 11qH^2/360uG_M \quad (14)$$

由式(14)可以看出,在结构总高度和楼层总高度不变的情况下,结构的刚重比与两个量有关:倒三角荷载下顶点位移 u 、竖向质量分布修正的重力荷载设计值 G_M 。应该注意的是,当结构刚度一定时, q/u 一定,故倒三角形分布荷载的大小 q 并不影响刚重比的大小。

2.2 顶点位移项与构件成本的关系

由式(5)可得

$$F_M u = \sum_{k=1}^P e_u^k \quad (15)$$

式中: F_M 为施加在 M 层(结构顶层)质心的虚拟单位力; e_u^k 为第 k 个构件对应 u 的虚变形功。真实工况、虚拟工况如图2所示。

对于线单元,在构件长度一定的情况下,若构件

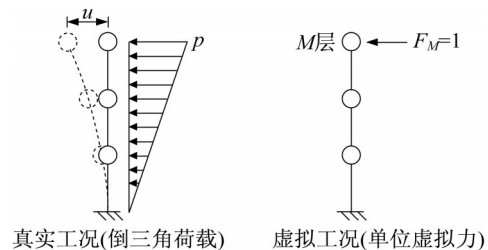


图2 真实工况、虚拟工况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of real working condition and virtual working condition

截面尺寸在优化设计过程中保持一定比例,则 A_Y 、 A_Z 、 I_X 、 I_Y 、 I_Z 与截面面积 A 的关系就能建立起来,也就能建立起与构件成本 c 的关系。

$$A_Y = A_Z = \frac{5}{6}BH = \frac{5}{6}A = \frac{5}{6} \frac{c}{CL} \quad (16)$$

$$I_X = 0.2B^3H = \frac{0.2A^2}{\alpha} = \frac{0.2c^2}{\alpha C^2 L^2} \quad (17)$$

$$I_Y = \frac{B^3H}{12} = \frac{A^2}{12\alpha} = \frac{c^2}{12\alpha C^2 L^2} \quad (18)$$

$$I_Z = \frac{BH^3}{12} = \frac{\alpha A^2}{12} = \frac{\alpha c^2}{12C^2 L^2} \quad (19)$$

式(16)~(19)中: B 为单元横截面的宽; H 为单元横截面的高; C 为单位体积的成本; L 为单位的长度; α 为常数,其值为 H/B 。

将式(16)~(19)代入式(6),可得

$$e_u^k = \frac{C_{u1}}{c} + \frac{C_{u2}}{c^2} \quad (20)$$

式中: C_{u1} 、 C_{u2} 为倒三角荷载下的构件内力、顶层质心受到虚拟单位力时与构件内力、材料特性、截面尺寸比例、构件长度、材料单位体积成本相关的常数。

式(20)对构件成本 c 求偏导,则有

$$\frac{\partial e_u^k}{\partial c} = \frac{\partial e_u^k}{\partial c} = -\frac{C_{u1}}{c^2} - \frac{2C_{u2}}{c^3} \quad (21)$$

对于壳单元,在构件高度、长度一定的情况下,构件成本 c 的改变正比于构件厚度 B 的改变量。由式(7)可得

$$e_u^k = \frac{C_{u3}}{c} + \frac{C_{u4}}{c^3} \quad (22)$$

式中: C_{u3} 、 C_{u4} 为倒三角荷载下的构件内力、顶层质心受到虚拟单位力时与构件内力、材料特性、构件高度、构件长度、材料单位体积成本相关的常数。式(22)对构件成本 c 求偏导,则有

$$\frac{\partial e_u^k}{\partial c} = \frac{\partial e_u^k}{\partial c} = -\frac{C_{u3}}{c^2} - \frac{3C_{u4}}{c^4} \quad (23)$$

在优化设计中,只需求得 C_{u1} 、 C_{u2} 、 C_{u3} 、 C_{u4} ,就可得到顶点位移关于构件成本的敏感性。

2.3 质量与构件成本的关系

以二层平面框架为例,计算简图如图3所示。第一层梁的质量以及一层、二层柱的一半质量聚集于一层质点,第二层梁的质量以及二层柱的一半质量聚集于二层质点。

质量矩阵 M 与构件成本的关系,可转换为各层质量 M_i 与构件成本的关系。在优化过程中,构件尺寸发生变化,仅影响相邻楼层质量。设构件 k 所在楼层为 K 层。

根据图3,对于水平构件有

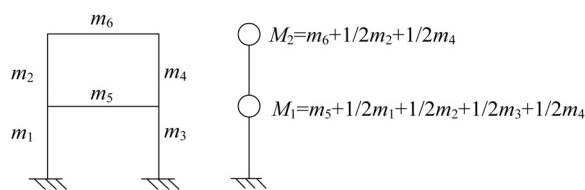


图3 计算模型

Fig.3 Calculation model

$$\begin{cases} \frac{\partial M_{KH}}{\partial c_H} = \rho_H^k / C_H^k \\ \frac{\partial M_{LH}}{\partial c_H} = 0 \quad (L \neq K) \end{cases} \quad (24)$$

式中: M_{KH} 、 M_{LH} 为别为 K 层、 L 层水平构件质量; ρ_H^k 为水平构件 k 的质量密度; C_H^k 为水平构件 k 单位体积的成本; c_H 为水平构件 k 的成本。

根据图3,对于竖向构件有

$$\begin{cases} \frac{\partial M_{K-1,V}}{\partial c_V} = \frac{\partial M_{KV}}{\partial c_V} = 0.5\rho_V^k / C_V^k \\ \frac{\partial M_{LV}}{\partial c_V} = 0 \quad (L \neq K-1 \text{ 且 } L \neq K) \end{cases} \quad (25)$$

式中: M_{KV} 、 $M_{K-1,V}$ 、 M_{LV} 分别为 K 层、 $K-1$ 层、 L 层竖向构件的质量; ρ_V^k 为竖向构件 k 的质量密度; C_V^k 为竖向构件 k 单位体积的成本; c_V 为竖向构件 k 的成本。

在优化设计中,只需知道构件位置、材料密度、材料单位成本,就可得到各质点质量关于构件成本的敏感性。

2.4 重量修正项与构件成本的关系

在结构总高度和楼层总高度不变的情况下,竖向质量分布修正的重力荷载设计值 G_M 仅与第 i 层重力荷载设计值 G_i 相关。当构件成本发生变化时,楼层永久荷载改变,则有

$$\frac{\partial G_M}{\partial c} = \sum_{i=1}^M \left[\frac{\partial G_i}{\partial c} \left(\frac{H_i}{H} \right)^2 \right] = \sum_{i=1}^M \left[\frac{\partial M_i}{\partial c} g \left(\frac{H_i}{H} \right)^2 \right] \quad (26)$$

2.3节推导了 i 层的质量 M_i 与构件成本的关系。当水平构件 k 所在楼层为 K 层时,则有

$$\frac{\partial G_M}{\partial c_H} = \frac{\partial M_{KH}}{\partial c_H} g \left(\frac{H_K}{H} \right)^2 = 1.2\rho_H^k g / C_H^k \left(\frac{H_K}{H} \right)^2 \quad (27)$$

对于竖向构件有

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_M}{\partial c_V} &= \frac{\partial M_{K-1,V}}{\partial c_V} g \left(\frac{H_{K-1}}{H} \right)^2 + \frac{\partial M_{KV}}{\partial c_V} g \left(\frac{H_K}{H} \right)^2 = \\ &0.6\rho_V^k g / C_V^k \left(\frac{H_{K-1}^2 + H_K^2}{H^2} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

在优化设计中,只需知道构件位置、材料密度、材料单位成本,就可得到重量修正项关于构件成本

的敏感性。

2.5 刚重比约束与构件成本的关系

由式(14)可得

$$s_{\lambda}^k = \frac{\partial \lambda'}{\partial c} = -\frac{\lambda'}{u} \frac{\partial u}{\partial c} - \frac{\lambda'}{G_M} \frac{\partial G_M}{\partial c} \quad (29)$$

式中: s_{λ}^k 为刚重比约束关于构件 k 的成本 c 的敏感性系数。可将式(29)写为

$$s_{\lambda}^k = s_{\lambda u}^k + s_{\lambda G_M}^k \quad (30)$$

$$s_{\lambda u}^k = -\frac{\lambda'}{u} \frac{\partial e_u^k}{\partial c} \quad (31)$$

$$s_{\lambda G_M}^k = -\frac{\lambda'}{G_M} \frac{\partial G_M}{\partial c} \quad (32)$$

式(30)~(32)中: $s_{\lambda u}^k$ 为刚重比约束敏感性的顶点位移影响项; $s_{\lambda G_M}^k$ 为刚重比约束敏感性的重量修正影响项。

式(30)、(31)、(32)综合考虑了构件成本改变对倒三角荷载下顶点位移 u 、竖向质量分布修正的重力荷载设计值 G_M 的影响。

2.6 二层平面框架

图4为两层平面框架的布置,层高4 m,跨度8 m。采用C30混凝土,成本取为 $400 \text{元} \cdot \text{m}^3$ 。每层附加的恒载质量设为20 t。C1和C2柱的初始截面尺寸为 $400 \text{mm} \times 400 \text{mm}$,B1和B2梁的初始截面尺寸为 $500 \text{mm} \times 300 \text{mm}$ 。修正后刚重比为4.99。

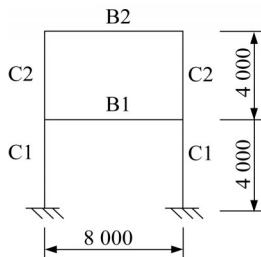


图4 两层平面框架(单位:mm)

Fig. 4 Two-story plane frame(unit: mm)

2.6.1 虚功敏感性系数分析

利用虚功敏感性系数分析方法得到的修正后刚重比关于构件成本的敏感性系数见表1。

由表1可以看出,顶点位移影响项为正,表示构件尺寸增大,顶点位移减小,刚重比数值增大;重量修正影响项为负,表示构件尺寸增大,竖向质量分布修正的重力荷载设计值 G_M 增大,刚重比数值减小。顶点位移影响较大,重量修正影响较小。综合考虑两项之和的敏感性系数都为正值。

C1、B1的顶点位移影响项较大,C2、B2的顶点位移影响项较小。说明在此案例中,对于控制倒三角荷载下顶点位移,增大C1、B1的尺寸较为有效。C2、B2的重量修

表1 虚功原理计算下的两层平面框架敏感性系数

Tab. 1 Sensitivity coefficient of two-story plane frame calculated by virtual work principle

构件	敏感性系数/ (10^{-12}元^{-1})		总计/ (10^{-12}元^{-1})
	顶点位移影响项	重量修正影响项	
C1	7.61	-0.07	7.54
C2	2.70	-0.35	2.35
B1	7.05	-0.14	6.91
B2	2.54	-0.56	1.99

正影响项绝对值较大,C1、B1的重量修正影响项绝对值较小。说明增大C2、B2的尺寸,竖向质量分布修正的重力荷载设计值 G_M 增大较多。由式(14)可以得出,重量改变的楼层高度越高, G_M 改变量越大。故构件所在楼层越高,重量修正影响项绝对值越大。综合考虑,C1、B1最敏感,其次为C2、B2。

由表1可以看出,对于此案例,重量修正的影响很小,可忽略重量修正对结果的影响。但对于超高层建筑结构,一些构件所在楼层数较高且构件对刚度贡献不大,对此类构件,重量修正项可能起控制作用,故不可忽略重量修正影响项。

2.6.2 等增量敏感性分析与对比

为验证虚功敏感性系数分析方法结果的正确性,用等增量敏感性分析方法也可求得敏感性系数,即依次增加C1、C2、B1和B2的截面尺寸,且构件成本变化量相等。

当构件体积分别增大 0.0322m^3 和 0.3400m^3 时,等增量敏感性分析计算出的敏感性系数见表2。由表2可以看出,增量为 0.0322m^3 时,等增量敏感性分析的结果与敏感性系数方法的计算结果极为接近,相对误差小于5%,可以验证虚功敏感性系数分析的准确性。增量为 0.3400m^3 时,等增量敏感性分析的结果与敏感性系数方法的计算结果相对误差总体较增量为 0.0322m^3 时大,相对误差小于30%。

表2 等增量计算下的两层平面框架敏感性系数

Tab. 2 Sensitivity coefficient of two-story plane frame calculated by equal increment

构件组	增量为 0.0322m^3		增量为 0.3400m^3	
	敏感性系数/ (10^{-12}元^{-1})	相对 误差/%	敏感性系数/ (10^{-12}元^{-1})	相对 误差/%
C1-1	7.46	0.97	6.93	8.06
C2-1	2.28	3.00	1.72	27.08
B1-1	6.86	0.68	6.34	8.23
B2-1	1.92	3.27	1.41	29.13

若3种结果都取敏感性系数最大值为100,其余构件的敏感性系数按比例放大,则可比较3种结果敏感性系数的相对值,如图5所示。在优化设计中,由敏感性系数相对值可以判断优化顺序。等增量的取值会影响敏感性系数,但基本不会改变各构件的敏感性系数相对值。

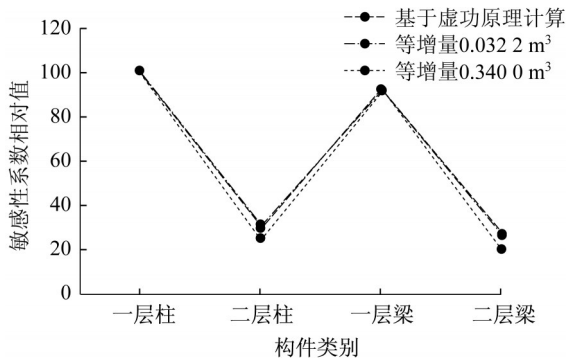


图5 两层平面框架敏感性系数相对值对比
Fig.5 Comparison of relative value of sensitivity coefficient of two-story plane frame

3 单驱动约束结构优化策略

驱动约束是指基于约束敏感性优化设计,考虑设计变量对其影响,将其作为设计变量求解过程中的约束条件而列入的设计约束。

3.1 结构优化设计原理

结构优化设计的数学模型包括三大要素:设计变量、约束条件和优化目标。设计变量为构件成本,构件成本与构件截面面积、构件长度、材料成本相关。约束条件指优化设计问题必需满足的给定条件,通常和所需的结构性能指标有关。本文中考虑的约束条件为刚重比,属整体稳定性约束。工程结构优化设计的目标主要为结构成本的最优。结构成本可分为建造成本和生命周期成本两类,本文中优化目标是建造成本。

3.2 单驱动约束优化设计策略

单驱动约束优化设计的流程见图6。

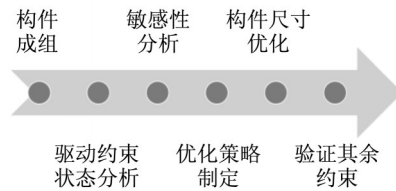


图6 单驱动约束优化设计流程
Fig.6 Flow chart of single-driven constraint optimization design

4 单驱动约束优化设计工程案例

4.1 项目简介

以某塔楼为分析对象,该塔楼共101层,总建筑面积468 m。结构三维模型见图7,采用核心筒-劲性钢骨柱-外伸臂结构体系。设置3道伸臂桁架,相邻钢骨柱之间布有外围斜撑。该项目抗震设防烈度7度,设计基本地震加速度0.1g,设计地震分组为第三组,场地类别为II类,场地特征周期 T_g 为0.45 s。

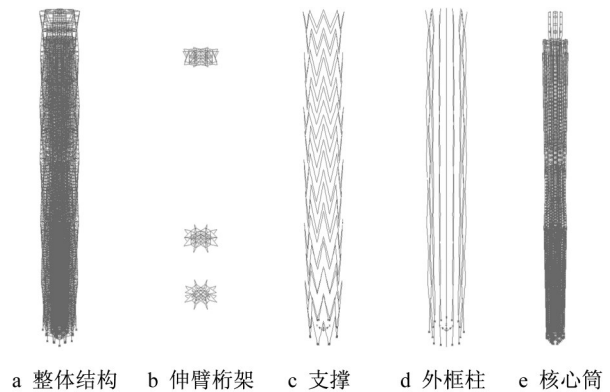


图7 案例结构体系
Fig.7 Structural system of the case study

4.2 单驱动约束优化设计

4.2.1 构件成组

为减少优化问题求解所需的时间,现将待优化构件成组,结果见表3。

表3 构件组的位置与命名

Tab.3 Location and naming of component groups

构件组	布置位置	命名
伸臂桁架	23F~26F、47F~50F和98F~100F	O1~O3
外围斜撑	1F~26F、27F~50F、51F~70F、71F~84F和85F~101F	B1~B5
劲性钢骨柱	1F~26F、27F~50F、51F~70F、71F~84F和85F~101F	C1~C5
核心筒剪力墙	翼墙(1F~13F、14F~26F、27F~50F、51F~70F和71F~101F)	翼墙 F1~F5
	腹墙(1F~26F、27F~50F、51F~70F和71F~101F)	腹墙 W1~W4

4.2.2 控制约束状态分析

《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)规定结构刚重比不应小于1.4,初始模型按式(14)计算出的X向刚重比为1.48,Y向刚重比1.47,冗余度分别为5.71%和5.00%。故Y向刚重比为控制约束,处于约束过度状态。

4.2.3 构件敏感性分析

参考平面二层框架案例,采用虚功敏感性系数分析方法计算敏感性系数;同时,采用等增量敏感性分析方法,各构件组分别增加200万元的造价计算刚重比约束关于各构件组成本的敏感性。

图8比较了两种方法的敏感性系数相对值,两种方法的结果较为吻合。部分高区构件敏感性为负,增大构件尺寸则刚重比减小;中区、低区构件敏感性为正,增大构件尺寸则刚重比增大。总体来说,成本敏感性由大到小排序为:剪力墙、劲性钢骨柱、伸臂桁架、外围斜撑。

4.2.4 优化策略制定

依据敏感性系数相对值将构件组分为4类,如表4所示,对相对敏感性系数取绝对值,大于30的构件定义为敏感构件,其余为不敏感构件。

第一个优化步,应先减小 N_a 、 N_b 的构件尺寸,使刚重比增大,冗余度进一步增大;第二个优化步,减小 P_a 的构件尺寸,使刚重比减小,冗余度减小;第三个优化步,检查约束数值,若仍有冗余,再减小 P^a 的构件尺寸,使刚重比减小,若约束不足,增大 P^a 的构

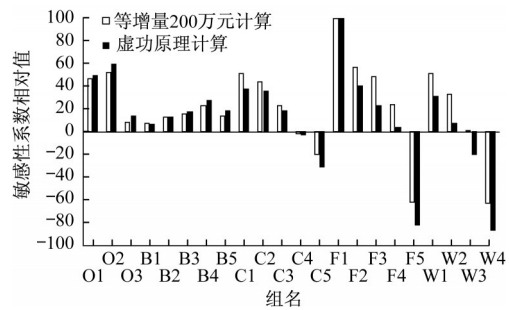


图8 刚重比敏感性系数相对值比较

Fig.8 Comparison of relative values of sensitivity coefficients of stiffness-weight ratio

表4 刚重比约束条件下构件组分类

Tab.4 Components group classification under stiffness-weight ratio constraint

类别	敏感性系数相对值范围	构件组及敏感性系数相对值
N^a	[-100~30)	W4 (-63.38), F5 (-62.85)
N_b	[-30~0)	C5 (-20.52), C4 (-1.63)
P_a	[0~30)	F4 (23.57), C3 (22.99), B4 (22.73), B3 (16.05), B5 (13.60), B2 (12.86), O3 (8.08), B1 (7.70), W3 (0.47), F1 (100.00), F2 (57.13), O3 (52.58),
P^a	[30~100]	W1 (51.90), C1 (51.84), F3 (48.96), O1 (47.26), C2 (44.35), W2 (33.44)

件尺寸。

4.2.5 构件尺寸优化

三个优化步刚重比和成本改变见表5。

表5 三优化步刚重比和成本改变

Tab.5 Change of stiffness-weight ratio and cost in three optimal steps

优化步	优化前刚重比	优化后刚重比	刚重比改变量	累计刚重比改变量	成本优化/万元	累计成本优化/万元
一	1.47 (5.20%)	1.49 (6.78%)	0.02	0.02	330.7	330.7
二	1.49 (6.78%)	1.43 (2.03%)	-0.06	-0.04	1 019.6	1 350.3
三	1.43 (2.03%)	1.40 (0.00%)	-0.03	-0.07	286.1	1 636.4

注:括号中数值为刚重比冗余度。

4.2.6 验证其余约束

首先检查整体约束:周期8.10 s,剪重比1.40%,满足要求;最大层间位移角1/490(出现在Y向79层),不满足要求。调整构件尺寸后,一阶周期7.97 s,最大层间位移角1/503(出现在Y向80层),刚重比1.46,剪重比1.41%,都满足要求。再检查组件约束(外框承担剪力比)和构件约束,都满足要求。最终构件优化结果见表6,共计优化939.1万元。

表6 刚重比约束下的优化结果

Tab.6 Optimization results under stiffness-weight ratio constraint

构件类型	钢材优化量/	混凝土优化	钢筋优化	成本优化/
	t	量/m ³	量/t	万元
伸臂桁架	149.8	0	0	74.9
外围斜撑	875.7	0	0	437.9
劲性钢骨柱	354.4	1 175.8	96.8	253.3
剪力墙	-50.2	2 253.3	36.0	173.1
总计	1 329.8	3 429.1	456.8	939.1

5 结论

基于刚重比敏感性的超高层结构优化设计方法是一种有效的优化设计方法,采用该方法可以有效降低刚重比约束下超高层建筑的经济成本。该优化设计方法为基于敏感性的超高层结构优化设计自动化的进一步发展提供了良好基础。采用虚功敏感性系数分析方法,利用推导所得公式可编程计算敏感性系数,结果精确。等增量敏感性分析方法对于不同的约束条件,都可利用通用结构分析软件计算敏感性系数,且增量越小,精度越高。虚功敏感性系数分析方法对于不同的约束条件需重新推导公式;等增量敏感性分析方法试算模型多、计算量大,且结果精确程度受构件分组的影响。工程应用需考虑实际情况灵活选用不同方法。

参考文献:

- [1] ARORA J S, HAUG E J. Methods of design sensitivity analysis in structural optimization[J]. *Aiaa Journal*, 2015, 17(9): 970.
- [2] ADELMAN H M, HAFTKA R T. Sensitivity analysis of discrete structural systems[J]. *Aiaa Journal*, 2012, 24(5): 823.
- [3] VELIVASAKIS E E, DESCENZA R. Design optimization of lateral load resisting frameworks[C]// *Proceedings of the 8th Conference on Electronic Computation*. Houston: ASCE, 2010: 130-143.
- [4] CHARNEY F A. Economy of steel framed buildings through identification of structural behavior [C]// *National Steel Construction Conference*. Orlando: American Institute of Steel Construction, 1993:1-33.
- [5] SHERBOURNE A N, CHAN C M, GRIERSON D E. Automatic optimal design of tall steel building frameworks[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(5): 838.
- [6] PARK H S, KWON J H. Optimal drift design model for multistory buildings subjected to dynamic lateral forces[J]. *Structural Design of Tall & Special Buildings*, 2003, 12(4): 317.
- [7] HYUN S J, PARK H S. Drift design method for high-rise buildings using dynamic resizing algorithm[C]// *CTBUH 2004 Seoul Conference*. Seoul: CTBUH, 2004: 1052-1056.
- [8] YU T Y, ZHAO X. Virtual work sensitivity method for the optimization design of tall buildings[C/CD]// *13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. Sapporo: Hokkaido University Collection of Scholarly Academic Papers, 2013.
- [9] 董耀旻. 超高层建筑结构抗侧力系统多约束优化设计[D]. 上海: 同济大学, 2015.
DONG Yaomin. Optimal design for structural lateral system of super tall buildings under multiple constraints [D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [10] 江祥. 超高层结构舒适度性能动力修正优化设计方法[D]. 上海: 同济大学, 2016.
JIANG Xiang. Dynamic modification based human comfort performance optimization for super tall structures[D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [11] 赵昕, 李浩, 秦朗. 周期与层间位移角双约束条件下超高层结构优化设计方法[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(1): 129.
ZHAO Xin, LI Hao, QIN Lang. Optimal design method for super tall buildings under period and story drift constraints[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(1): 129.
- [12] SMITH B S, COULL A. Tall building structures: analysis and design [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1991.
- [13] WILSON E L, HABIBULLAB A. Static and dynamic analysis of multi-story buildings, including P-Delta effects[J]. *Earthquake Spectra*, 1987, 3(2): 289.
- [14] American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for building and other structures: ASCE 7-10[S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [15] The Institution of Structural Engineers. Manual for the seismic design of steel and concrete buildings to Eurocode 8[S]. London: The Institution of Structural Engineers, 2010.
- [16] 徐培福, 肖从真. 高层建筑混凝土结构的稳定设计[J]. *建筑结构*, 2001, 31(8): 69.
XU Peifu, XIAO Congzhen. Stability design of high-rise building concrete structure[J]. *Building Structure*, 2001, 31(8): 69.
- [17] 刘南乡. 带伸臂桁架的超高层混合结构施工阶段性能分析与控制[D]. 上海: 同济大学, 2011.
LIU Nanxiang. Performance research and control during construction of high-rise mixed structure with outriggers [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [18] 陆天天, 赵昕, 丁洁民, 等. 上海中心大厦结构整体稳定性分析及巨型柱计算长度研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(7): 8.
LU Tiantian, ZHAO Xin, DING Jiemin, *et al.* Stability analysis of the Shanghai Tower and research on effective length of super column[J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(7): 8.
- [19] 杨学林, 祝文畏. 复杂体型高层建筑结构稳定性验算[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(11): 16.
YANG Xuelin, ZHU Wenwei. Stability checking of the complicated-shape tall building structure [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(11): 16.
- [20] 武云鹏, 韩博, 郭峰, 等. 结构刚重比算法研究及软件实现[J]. *建筑结构*, 2015, 45(18): 71.
WU Yunpeng, HAN Bo, GUO Feng, *et al.* Research on algorithm and software implementation of stiffness-weight ratio of buildings[J]. *Building Structure*, 2015, 45(18): 71.
- [21] 安东亚. 复杂连体高层结构整体稳定研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(3): 100.
AN Dongya. Study on overall stability of complex high-rise connected structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(3): 100.
- [22] 李少成, 刘畅. 质量分布不均匀的高层建筑整体稳定性分析[J]. *建筑结构*, 2019, 49(S1): 213.
LI Shaocheng, LIU Chang. Overall stability analysis of high-rise structure with the uneven mass distribution [J]. *Building Structure*, 2019, 49(S1): 213.