

层间位移约束下高层框架-支撑结构的单步优化法

孙飞飞¹, 马志东², 贾瑞梓²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 从虚功角度将基于层间位移约束的高层建筑规则结构多约束优化问题转化为基于顶层整体转动的单约束问题, 并提出了基于虚功的单步优化法。通过算例分析了单步优化法应用情况, 并将其优化结果与 SAP2000 有限元分析软件优化结果进行对比。结果表明: 针对层间位移约束, 采用单步优化法用钢量节省约 10%。

关键词: 高层建筑规则结构; 层间位移约束; 单步优化法
中图分类号: TU972 **文献标志码:** A

Single-step Optimization Method Under Inter-story Drift Constraints for High-rise Braced-frame Structures

SUN Feifei¹, MA Zhidong², JIA Ruizi²

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The multi-constrained optimization problem of regular high-rise structures based on inter-story displacement constraints was transformed into a single constraint problem. On this basis, the single-step optimization method (SOM) based on virtual work was proposed. The optimization results of SOM were compared with the optimization results of SAP2000. The results show that SOM based on virtual work can reduce the mass of material by 10%.

Key words: regular high-rise structures; inter-story displacement constraints; single-step optimization method

为保证高层建筑结构具有必要的刚度, 现行国家标准《高层建筑混凝土结构技术规程》^[1] 和《高层民用建筑钢结构技术规程》^[2] 均对高层建筑层间位移角限值做出规定。合理地控制结构侧移以保证结构的安全性和正常使用, 也是结构设计达到经济、合

理的重要因素^[3]。

为了解决层间位移约束下高层建筑结构的优化问题, 多种基于数学优化算法的结构优化设计方法被提出。Chan 等^[4-5] 将准则法应用于水平侧移约束下钢和混凝土框架结构的优化设计中, 通过一系列简化假定, 利用虚功原理推导准则法迭代公式, 并将该方法用于香港某高层建筑结构的初步设计中, 取得良好效果。李志强^[6] 根据最优化准则 Kuhn-Tucker 条件推导出型钢混凝土结构框架柱混凝土截面尺寸的迭代公式, 将其与层次分析遗传算法相结合, 建立了层次分析优化准则遗传算法(OC-GA)。白代春^[7] 采用离散变量分步优化的规划法对钢筋混凝土框架进行优化, 并设计了一个平面框架结构优化设计程序, 实现结构自动分析及优化。此外, SAP2000 有限元分析软件具有钢结构优化设计的辅助功能。实际工程体量大、优化问题复杂, 而工程师往往需要手动对结构进行调整, 上述各方法尚不能提供一个快捷的调整建议, 实用的成熟度还不够, 因此本文旨在提出一种单步、高效的优化方法。

本文首先考察高层建筑规则结构的变形机制, 根据结构变形规律将层间位移约束下的高层建筑规则结构多约束优化问题等效转化为单约束优化问题。在此基础上, 提出基于结构整体转动比虚应变能的单步优化法, 拟通过简单的优化过程为工程师提供高效实用的设计建议。

1 高层建筑规则结构的层间位移机制

为了简化高层建筑规则结构层间位移约束下的结构优化方法, 首先需要理解层间位移约束下高层建筑规则结构的变形机制。

1.1 算例的结构信息

算例为图 1 中 60 层 7 跨的高层框架-支撑结

收稿日期: 2017-11-09

基金项目: 上海市教委科研创新重点项目(14zz035)

第一作者: 孙飞飞(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为多高层钢结构和结构抗震、减震。

E-mail: ffsun@tongji.edu.cn

构. 结构划分为 240 个构件组, 每组构件的截面相同, 分组方式为: 每两层相对称的柱为一组, 共 120 组; 每一层的支撑为一组, 共 60 组; 每一层的梁为一组, 共 60 组. 不考虑竖向荷载作用, 风荷载简化为分布荷载施加于楼层. 位移约束条件为层间位移角, 限值为 1/400.

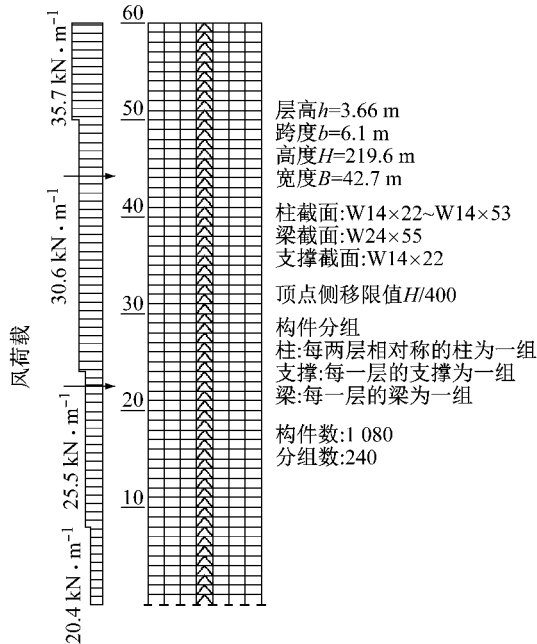


图 1 框架-支撑结构算例

Fig.1 Example of braced-frame structure

1.2 各楼层对目标楼层层间位移角的贡献规律

取整十层楼层为例, 由虚功原理计算各楼层对层间位移角的贡献, 如下所示:

$$\theta_t = \sum_j \theta_{t,j} \quad (1)$$

式中: θ_t 为目标层的层间位移角 ($t=10, 20, \dots, 60$); $\theta_{t,j}$ 为 j 层对 t 层层间位移角的贡献 ($j=1, 2, \dots, 60$).

将各楼层对整十层层间位移角的贡献分离开, 如图 2 所示.

由图 2 可知, 除接近顶部的楼层, 各楼层对本层层间位移角的贡献最为突出, 对上下相邻约 10 层范围内的贡献也较大并向外递减. 这是由楼层的局部变形协调和传力关系所致, 这种局部效应类似于弹性力学中的圣维南原理, 本文称这段区域为圣维南区域. 10 层以外, 上部贡献值较小且平缓, 下部贡献曲线基本一致, 理解为由下部楼层刚体转动所致. 因此, 60 层的层间位移角分离曲线中, 除上部 10 层的贡献由受力和变形协调决定外, 下部 50 层的贡献值即为楼层整体转动量.

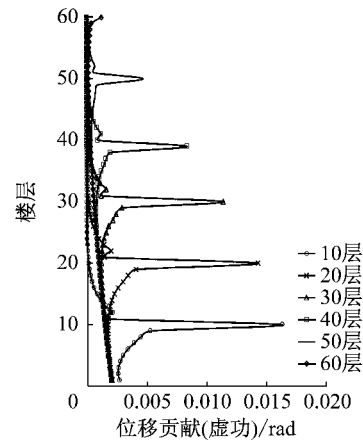


图 2 第 j 层对第 t 层层间位移角的贡献

Fig.2 Contribution of j th floor to the inter-story drift of t th floor

1.3 某一楼层对各层层间位移角的贡献规律

相似地, 可以计算出某一楼层对结构各层层间位移角的贡献. 图 3 为整十层对结构各层层间位移角贡献曲线. 由图 3 可知, 各楼层对本层层间位移角的贡献最大, 对上下相邻约 10 层范围内楼层的层间位移角贡献也较大且向外递减. 这同样是由于局部变形协调和传力关系所致. 上下 10 层范围以外, 该楼层对下部的贡献非常小, 对上部的贡献趋于一致.

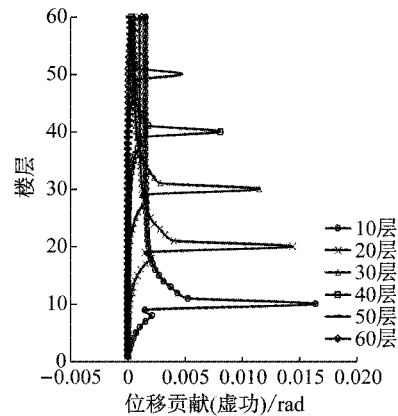


图 3 整十层对层间位移角的贡献

Fig.3 Contribution of each 10th floor to inter-story drift

1.4 整体转动对层间位移角的贡献规律

将层间位移角 θ_t 分离成由目标楼层刚体转动引起的层间位移角 θ_1 、本层受力层间位移角 θ_2 、由剪力滞后引起的附加层间位移角 θ_3 3 个部分之和, 如下所示:

$$\theta_t = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (2)$$

图 4 为结构的层间位移角分离曲线. 由图 4 可见: 在结构底部本层受力和局部变形协调的贡献很大, 整体转动的贡献不明显; 在结构中上部, 本层受

力和局部变形协调的贡献较小并向上逐渐减小,结构的整体转动在层间位移角中占主要部分.

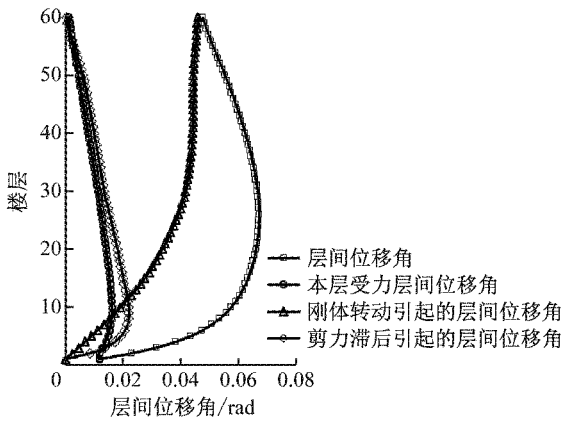


图 4 层间位移角分离曲线
Fig.4 Separation curve of inter-story drift

1.5 不同构件对结构顶部转动的贡献规律

将构件对楼层整体转动的贡献分离,可以明确各类构件的效率,确定层间位移约束下结构优化的主动变量. 各类构件对楼层整体转动的贡献可以通过在结构顶部加单位弯矩虚荷载计算得到. 分别计算柱、梁、支撑对楼层整体转动的贡献,如图 5 所示.

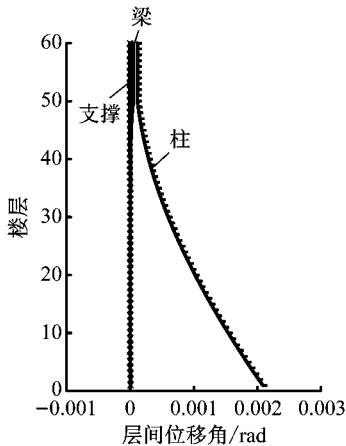


图 5 层间位移角按构件分离曲线
Fig.5 Separation curve of inter-story drift by elements

由图 5 可见,楼层整体转动以柱的贡献为主,梁和支撑的贡献非常小.

1.6 高层建筑规则结构的变形机制

综上所述,在高层建筑规则结构下部,本层的受层位移对层间位移角的贡献最为突出. 最大层间位移角往往出现在结构的中上部,在这些部位,层间位移角以结构的整体转动为主.

2 单步优化法的建立

基于第 1.6 节结构层间位移机制,将层间位移

约束下的高层建筑规则结构优化的多约束问题转化为单约束问题,在此基础上利用虚功准则法,建立结构单步优化的基本方法.

2.1 层间位移约束下结构优化问题

典型的层间位移约束下高层建筑规则结构优化问题包括优化目标和约束条件下的数学优化模型,如下所示:

$$\begin{cases} \min W = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i L_i \\ \text{s. t. } \theta_j \leq [\theta] \\ A_i \geq A_k \\ i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (3)$$

式中: W 为结构总质量; A_i 、 L_i 、 ρ_i 分别为构件 i 的截面面积、长度和材料密度; θ_j 为第 j 层的层间位移角; $[\theta]$ 为层间位移角限值; A_k 为构件截面面积最小限值; n 为相应于主动变量构件的数目; m 为楼层数. 优化目标与约束条件之间没有直接联系,需要通过建立约束条件与设计变量之间的关系以简化该模型.

2.2 基本假定

假定 1 忽略构件的剪切变形对位移的贡献量. 由虚功原理可知,结构位移为各构件对位移的贡献量之和. 构件对位移的贡献主要由弯曲和轴向分量组成,计算中忽略构件的剪切贡献分量,如下所示:

$$\theta_j = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (4)$$

$$\delta_i = \frac{F_i f_i L_i}{E_i A_i} + \int_L \frac{M_i m_i}{E_i I_i} dx \quad (5)$$

式中: δ_i 为构件 i 对位移的贡献; f_i 、 m_i 分别为构件 i 在虚荷载下的轴力、弯矩; F_i 、 M_i 分别为构件 i 在实际荷载下的轴力、弯矩; E_i 为构件 i 的材料弹性模量; I_i 为构件 i 的惯性矩.

假定 2 内力暂时不变. 由式(5)可知,构件的位移贡献量与构件面积、惯性矩成反比. 假设构件截面变化前后内力不变,则构件截面改变后,新的位移贡献量与构件面积、惯性矩的变化率成比例,如下所示:

$$\delta'_i = \frac{A_i}{A'_i} \delta_{Ni} + \frac{I_i}{I'_i} \delta_{Mi} \quad (6)$$

式中: δ'_i 为构件 i 修正后的位移贡献量; δ_{Ni} 、 δ_{Mi} 分别为构件 i 的初始轴向贡献分量和弯曲贡献分量; A_i 、 I_i 分别为构件 i 的初始面积和惯性矩; A'_i 、 I'_i 分别为构件 i 修正后的面积和惯性矩. 内力暂时不变假定是对超静定结构计算的简化,对于静定结构,式(6)是精确成立的.

2.3 虚功准则法

根据第 2.2 节的基本假定,令 $\frac{F_i f_i L_i}{E_i} = \tau_i$,

$\int_L \frac{M_i m_i}{E_i} dx = \nu_i$, 可得

$$\delta_i = \frac{\tau_i}{A_i} + \frac{\nu_i}{I_i} \quad (7)$$

$$\theta_j = \sum_i \frac{\tau_i}{A_i} + \sum_i \frac{\nu_i}{I_i} \quad (8)$$

优化问题可以转化为与设计变量之间的直接关系,如下所示:

$$\begin{cases} \min W = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i L_i \\ \text{s. t. } \theta_j = \sum_i \frac{\tau_i}{A_i} + \sum_i \frac{\nu_i}{I_i} \leq [\theta] \\ A_i \geq \underline{A}_k, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (9)$$

构造拉格朗日函数并引入库-塔克法则^[8],若 A_k 为最优设计,对于主动变量,即 $A_k > \underline{A}_k$,有

$$-\frac{\partial \theta}{\partial A_k} / \frac{\partial W}{\partial A_k} = \frac{1}{\lambda} \quad (10)$$

分子 $-\frac{\partial \theta}{\partial A_k}$ 表示当 A_k 有单位增值时,层间位移角 θ_j 减小,即结构的刚度收益;分母 $\frac{\partial W}{\partial A_k}$ 表示当 A_k 有单位增值时结构质量 W 的支出. 因此,优化准则的物理意义为:在最轻结构设计中,相应于主动变量的构件质量发生单位变化所引起的结构整体单位质量支出的刚度收益应彼此相等,即在最轻结构中,主动变量都被调整到具有相等的优化效率.

根据式(10),对于主动变量,可得

$$\left(\frac{\tau_k}{A_k} + \frac{\nu_k}{I_k} \right) / \rho_k L_k A_k = \gamma_k = \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

式中:分子表示构件 k 对层间位移角 θ 的贡献量,也是构件 k 的虚应变能;分母中 $L_k A_k$ 表示构件 k 的体积; γ_k 表示构件 k 的比虚应变能. 因此,式(11)可以理解为最轻结构中,相应于主动变量的构件中单位体积的虚功即构件的比虚应变能 γ_k 相等.

2.4 单步优化法的提出

基于层间位移约束的单步优化法的提出是为了给工程师提供快速实用的优化建议,但假如简单地以结构最大层间位移角作为优化的主要约束进行单步优化,那么仅本层及相邻层构件的尺寸将被加强,得到结构局部过刚的不合理结果. 因此,单步优化法的有效约束与比虚应变能的选择将对优化结果的合理性产生重要影响.

2.4.1 约束条件的转换

为了避免结构局部过刚的问题,本节提出层间位移约束下结构优化的设计思想:如果结构整体转动的比虚应变能均匀并且最大层间位移角满足约束条件,相应结构对于层间位移约束问题是一个较优解. 由第 1 节可知,将层间位移约束下高层建筑规则结构的优化转化为针对结构整体转动的优化,即通过结构顶部整体转动的减小来满足结构所需的位移角减小量,从而排除局部虚功突出的影响,保证优化结果的合理性.

2.4.2 单步优化问题

基于以上分析,优化问题即可转化为可执行的形式,如下所示:

$$\begin{cases} \min W = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i L_i \\ \text{s. t. } \theta_{\text{rtop}} \leq [\theta_{\text{rtop}}] \\ A_i \geq \underline{A}_k, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (12)$$

式中: θ_{rtop} 为结构顶部的整体转动量; $[\theta_{\text{rtop}}]$ 为结构顶部的整体转动量限值.

在将层间位移约束下高层建筑规则结构的优化约束条件进行转换之后,就需要解决 $[\theta_{\text{rtop}}]$ 的取值问题,以确定结构所需的位移角减小量.

为此,考察结构顶部整体转动所需的减小量 θ_d ,其值可由结构最大层间位移角所需的位移角减小量换算而来. 具体来说,如图 6 所示,假设结构的最大层间位移角 θ_{max} 出现在第 n 层,第 n 层所需的位移角减小量为 $(\theta_{\text{max}} - [\theta])$,根据下式换算出结构顶部整体转动所需的位移角减小量:

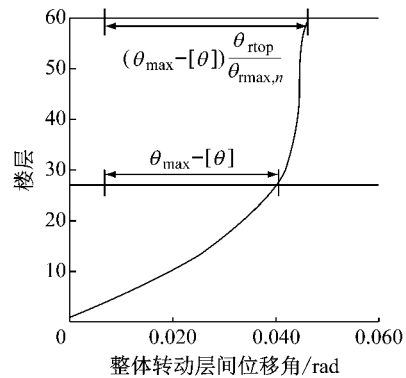


图 6 结构整体转动曲线

Fig. 6 Rigid body rotation curve of the structure

$$\theta_d = (\theta_{\text{max}} - [\theta]) \frac{\theta_{\text{rtop}}}{\theta_{\text{max},n}} \quad (13)$$

式中: $\theta_{\text{max},n}$ 为最大层间位移角楼层处结构整体转动量. θ_d 确定, $[\theta_{\text{rtop}}]$ 也就相应确定,如下所示:

$$[\theta_{\text{rtop}}] = \theta_{\text{rtop}} - \theta_d \quad (14)$$

由于仅考虑结构的整体转动减小量,故 θ_d 也是结构顶部层间位移角的减小量,可得

$$[\theta_{\text{top}}] = \theta_{\text{top}} - \theta_d \quad (15)$$

式中: θ_{top} 为初始结构顶层层间位移角.

2.4.3 单步优化过程

当优化问题由式(9)转化为式(12)之后,同理通过引入库-塔克法则,优化准则即转换为结构整体转动比虚应变能均匀.通过构件初始比虚应变能 γ_i 与目标比虚应变能 γ_g 关系,确定与主动变量对应的构件修正系数 β_i ,如下所示:

$$\beta_i = \sqrt{\frac{\gamma_i}{\gamma_g}} \quad (16)$$

β_i 一旦确定,初始结构的构件尺寸需要被加强的程度也就确定,以此实现单步优化,使结构以较高的效率满足层间位移约束条件.具体实现过程如下所示:

(1)确定初始结构,构件尺寸取满足强度要求的最小截面.

(2)在结构顶部加单位弯矩虚荷载.

(3)提取初始结构的层间位移角曲线和整体转动曲线,计算构件比虚应变能 γ_i 、结构平均比虚应变能 γ_{ave} .

(4)计算结构顶部转角的目标位移角减小量 θ_d 和结构放大系数 α (α 的推导过程见第 3.2 节),确定结构的目标比虚应变能 γ_g .

(5)由比虚应变能 γ_i 和 γ_g 计算构件修正系数 β_i ,那么构件面积修正为 $\beta_i A_i$.若构件修正面积 A'_i 大于截面最大限值 $[A_{\text{max}}]$,取 $A'_i = [A_{\text{max}}]$.

(6)根据构件修正后面积,在构件库中选择新截面.

(7)重新运行结构分析,检查强度和位移约束.

3 单步优化法的关键算法

3.1 构件修正系数 β_i 的计算方法

构件修正系数 β_i 将结构调整为目标比虚应变能均匀的目标结构,本节解决利用构件比虚应变能 γ_i 和目标比虚应变能 γ_g 确定构件修正系数 β_i 的问题,并推导 β_i 的计算公式.

由第 2.2 节提出的基本假定 2,构件 i 修正后的位移贡献如下所示:

$$\delta'_i = \frac{A_i}{A'_i} \delta_{N_i} + \frac{I_i}{I'_i} \delta_{M_i} \quad (17)$$

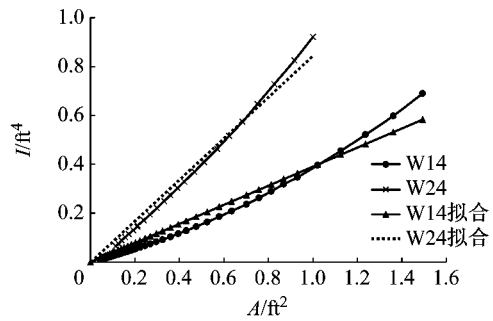
对于型钢构件,截面惯性矩 I 与面积 A 的关系由精确计算公式表示过于复杂.结构设计中同一类构件截面相似,可以采用线性回归的方法确定 I 与

A 的简单近似关系,以便简化计算.美国钢结构规范(AISC)提供的型钢截面中,W14 系列(W14×22~W14×730)、W24 系列(W24×55~W24×492)型钢的惯性矩 I 与面积 A 的关系如图 7a 所示,可见 I 与 A 分别成近似线性关系.图 7 中,1 ft=0.305 8 m.用方程 $I=\eta A$ 进行拟合,W14 系列拟合方程为

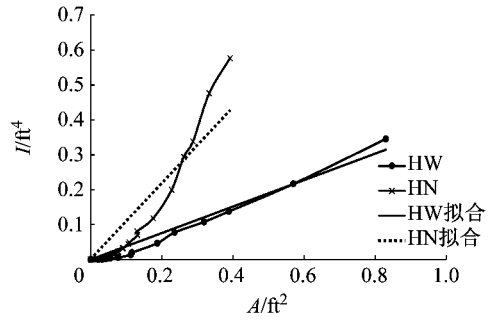
$$I = 0.390 9A \quad (18)$$

W24 系列拟合方程为

$$I = 0.845 6A \quad (19)$$



a AISC 型钢截面



b GB 型钢截面

图 7 AISC 型钢与 GB 型钢截面 I 与 A 线性拟合
Fig.7 Linear fitting of inertia and area of steel section in AISC and Chinese code

类似地,我国 GB/T 11263—1998 提供的型钢中,HW 系列(HW100×100~HW400×400)型钢的惯性矩 I 与面积 A 的关系和拟合直线如图 7b 所示. HW 系列拟合方程为

$$I = 1.094 0A \quad (20)$$

HN 系列拟合方程为

$$I = 0.379 4A \quad (21)$$

基于上述 I 与 A 的线性化回归,有

$$\frac{I'_i}{I_i} = \frac{\eta A'_i}{\eta A_i} = \beta_i \quad (22)$$

$$\delta'_i = \frac{\delta_{N_i}}{A'_i/A_i} + \frac{\delta_{M_i}}{I'_i/I_i} = \frac{1}{\beta_i} \delta_i \quad (23)$$

修正后构件的比虚应变能

$$\gamma'_i = \frac{\delta'_i}{V'_i} = \frac{\beta_i \delta_i}{\beta_i V_i} = \frac{1}{\beta_i} \gamma_i \quad (24)$$

式中: V_i 和 V'_i 分别为初始和修正后构件体积。

令修正后的构件比虚应变能 γ'_i 等于目标比虚应变能 γ_g , 可得构件修正系数

$$\beta_i = \sqrt[2]{\frac{\gamma'_i}{\gamma_g}} \quad (25)$$

对于 I 与 A 成线性关系的构件库来说, 无论构件位移贡献以轴向分量为主还是弯曲分量为主, 修正系数 β_i 的表达式是统一的。实际上, 除了规格确定的型钢构件外, 对其他自行设计的截面形式, 选取构件库时, 还可以按照 I 与 A 成线性关系的目标确定截面参数, 或者对于一组构件, 通过回归的方法建立 I 与 A 的其他关系, 达到减少优化变量、简化计算的目的。

3.2 结构放大系数 α 的计算方法

结构优化中, 相应于主动变量的构件根据整体转动比虚应变能均匀的原则被修正, 使得结构的层间位移角满足约束限值。主动变量为初始比虚应变能 γ_i 较大、对位移起控制作用的构件, 通过加强这些构件以补偿结构刚度的不足。

结构顶层初始层间位移角 θ_{top} 表达式为

$$\sum \gamma_i A_i L_i + \sum \gamma A L = \theta_{top} \quad (26)$$

相应于主动变量构件的目标比虚应变能为 γ_i , 修正后的截面面积为 $\beta_i A_i$, 按照内力暂时不变假定, 设计后结构位移角表达式为

$$\sum \frac{\gamma_{ave}}{\alpha} \beta_i A_i L_i + \sum \gamma A L = \theta_{top} - \theta_d \quad (27)$$

式(26)减去式(27), 得

$$\alpha = \left(\frac{\sum \sqrt{\gamma_{ave} \gamma_i A_i L_i}}{\sum \gamma_i A_i L_i - \theta_d} \right)^2 \quad (28)$$

由式(28)可知, α 为相应于主动变量构件的比虚应变能、体积和结构所需的位移角减小量 θ_d 的函数。通过 α 控制结构的放大程度, 加强主动变量来补偿结构刚度不足。

4 算例分析

4.1 算例

采用单步优化法对图 1 中结构进行层间位移约束下的优化。楼层整体转动以柱的贡献为主, 确定框架柱截面尺寸作为优化设计的主动变量。满足强度和稳定性要求的初始结构最大层间位移角为 0.013 1, 出现在第 25 层, 故需对该结构进行优化使其满足层间位移约束。

4.2 单步优化法的优化结果

单步优化法的截面结果如表 1 所示, 位移角结

果如图 8 所示, 最大层间位移角为 0.003 81, 出现在第 26 层, 而 25 层的层间位移角为 0.003 80。由优化结果可见, 最大层间位移角位置发生变化, 与初始最大层间位移角的位置靠近, 层间位移角最大的区域均接近位移角限值。楼层整体转动曲线相比初始结构更加趋于平缓, 这是“结构整体转动的比虚应变能均匀”的结果。

表 1 构件截面优化结果

楼层	柱截面	梁截面	支撑截面
1~10	W14×145	W24×58	W14×22
11~20	W14×120	W24×94	W14×38
21~30	W14×99	W24×76	W14×43
31~40	W14×61	W24×68	W14×30
41~50	W14×48	W24×62	W14×33
51~60	W14×30	W24×55	W14×22

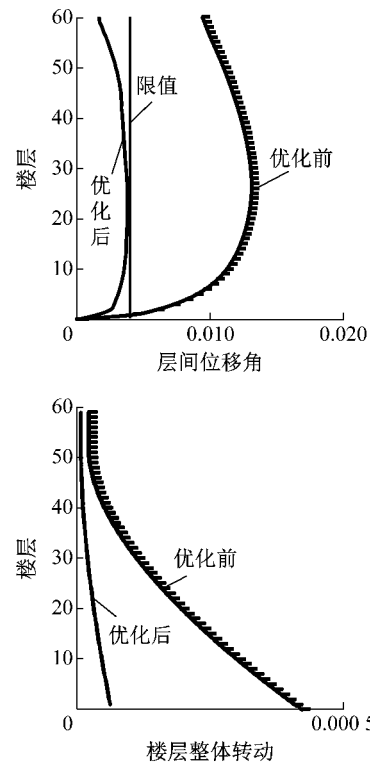


图 8 单步优化法优化结果

Fig. 8 Results of single-step optimization method

应用实例表明, 所提出的方法达到了预定的设计目标, 稳定承载力也满足要求, 结果合理, 方法可行。

4.3 不同优化方法优化结果对比

SAP2000 作为强大的结构设计软件, 为用户提供了以位移或者周期为目标的钢结构自动优化功能。对于位移优化, SAP2000 软件预测哪个构件需要增加尺寸, 以控制基于构件内单位体积能量的位移。单位体积能量更多的构件比能量更少的构件需要增

加更大的比例尺寸. 只要所考虑的强度允许, 有些单位体积能量小的构件是可以减小尺寸的^[9]. 在 SAP2000 软件“设计”菜单中, 通过对“钢框架设计”设置风荷载工况下的侧向位移目标. 基于上述位移目标, SAP2000 软件可以提供对结构的构件截面自动校核与设计.

本文将单步优化法的优化结果与 SAP2000 软件的优化结果进行对比, 结构优化结果的总质量分布如表 2 所示, 结构质量分布如图 9 所示. 结果表明: 结构总质量相近, 质量分布趋势总体一致, 证明了单步优化法的有效性; 相比于 SAP2000 软件的优化结果, 采用单步优化法用钢量降低了约 10%.

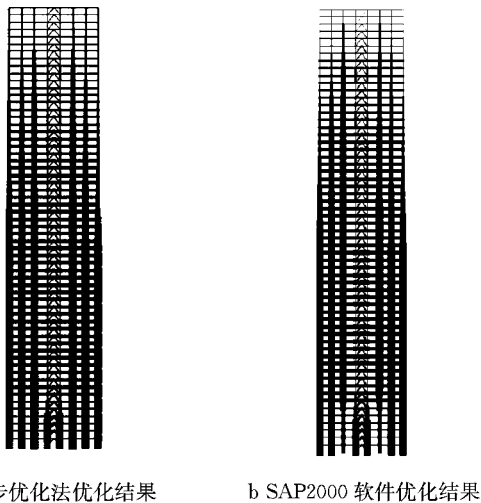


图 9 优化结果质量分布

Fig. 9 Mass distribution of optimized structures

表 2 优化设计结果质量对比

方法	质量/t	相对值/%
单步优化法	2 396.5	90.54
SAP2000 软件	2 646.9	

单步优化法与 SAP2000 软件优化后的楼层侧移及层间位移角分布对比如图 10 所示. 虽然 2 种方法的结果都使层间位移角达到限值要求, 2 种方法优化过程耗时也没有显著的区别, 但是 SAP2000 软件优化结果对层间位移角限制得更严格, 这对结构效率以及经济性来说是不利的. 单步优化法优化后, 结构的最大层间位移角更接近层间位移角限值.

5 结论

(1) 通过将高层建筑规则结构层间位移的多约束问题转化为单约束问题实现结构的单步优化.

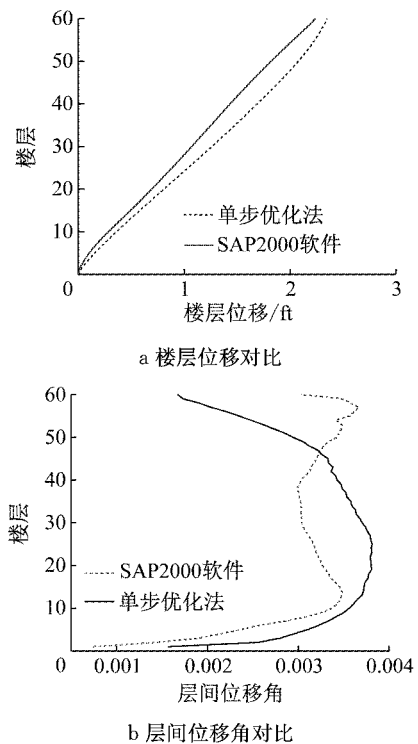


图 10 单步优化法与 SAP2000 软件优化结果对比

Fig. 10 Comparison of optimization results between single-step optimization method and SAP2000 software

(2) 在高层建筑规则结构中, 最大层间位移角往往出现在结构的中上部, 而在这些部位, 层间位移以结构的整体转动为主, 这是实现结构单步优化的基础.

(3) 基于虚功准则法的单步优化法根据结构整体转动比虚应变能调整构件截面尺寸, 使结构整体转动比虚应变能趋于均匀分布并满足层间位移约束, 算法物理意义明确, 易于掌握.

(4) 将单步优化法的优化结果与 SAP2000 软件的优化结果进行对比, 在都能达到位移限值优化目标下, 基于虚功的单步优化法用钢量降低约 10%.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2010. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ3—2010 Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ99—2015 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2016.

的路线上,该算法能够较好地逼近轨迹并计算方位角,为移动测量车的 IMU 方位角标定提供一个比较精准的原始值。

(2)随着紧支系数 δ 的增大,移动最小二乘坐标拟合的精度(标准差)逐渐下降,而方位角拟合的精度逐渐上升。

(3)权函数能够提高坐标拟合的精度,但对方位角拟合的作用十分有限。

综上所述,在选择紧支系数 δ 时,本文建议充分考虑实验的具体情况。根据实验中移动测量系统的最大车速、GNSS 的频率,选择满足整体最小二乘拟合要求的紧支系数 δ ,且不宜过大;然后,配以适当的权函数模型,对弯曲程度较小的轨迹切线方位角进行拟合计算,以此进行 IMU 粗对准标定等相关应用。

参考文献:

- [1] GROVES P D. GNSS 与惯性及多传感器组合导航系统原理[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
GROVES P D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [2] 张玲. 基于三次样条曲线拟合公路平面线形方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2007.
- [3] ZHANG Ling. Analysis of fitting method on plan curve based on cubic spline [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [4] 姚连璧,周小平. 基于 MATLAB 的控制网平差程序设计[M]. 上海:同济大学出版社,2006.
YAO Lianbi, ZHOU Xiaoping. Design of control net adjustment software based on MATLAB[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006.
- [5] 曾清红,卢德唐. 基于移动最小二乘法的曲线曲面拟合[J]. 工程图学学报,2004(1): 84.
ZENG Qinghong, LU Detang. Curve and surface fitting based on moving least squares[J]. Journal of Engineering Graphics, 2004(1): 84.
- [6] 齐林,张芳,陈恩庆. 基于移动最小二乘曲线拟合的 LFM 信号参数估计[J]. 郑州大学学报(工学版),2011(3): 95.
QI Lin, ZHANG Fang, CHEN Enqing. Parameter estimation of LFM signal via MLS approximation[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2011(3): 95.
- [7] SHEPARD D. A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data[C]//Proceedings of the Twenty Third ACM National Conference. New York:ACM, 1968: 517-524.
- [8] LANCASTER P, ALKAUSKAS K. Curve and surface fitting [M]. New York: Academic Press, 1986.
- [9] 程玉民. 移动最小二乘法研究进展与述评[J]. 计算机辅助工程,2009(6): 5.
CHENG Yumin. Advances and review on moving least square methods[J]. Computer Aided Engineering, 2009(6): 5.
- [10] AMIRFAKHRIAN M, MAFIKANDI H. Approximation of parametric curves by Moving Least Squares method[J]. Applied Mathematics and Computation, 2016,283: 290.
- [11] 汪大绥,周建龙,包联进. 超高层建筑结构经济性探讨[J]. 建筑结构,2012,42(5): 1.
WANG Dasui, ZHOU Jianlong, BAO Lianjin. Analysis on the cost of structural construction in super-tall buildings [J]. Building Structure, 2012, 42(5): 1.
- [12] CHAN C. Optimal lateral stiffness design of tall buildings of mixed steel and concrete construction[J]. The Structural Design of Tall Buildings, 2001, 10(3): 155.
- [13] CHENG L, CHAN C. Optimal lateral stiffness design of composite steel and concrete tall frameworks[J]. Engineering Structures, 2009, 31(2): 523.
- [14] 李志强. SRC 框架-RC 核心筒混合结构多目标抗震优化设计研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
LI Zhiqiang. Research on multi-objective seismic optimization of SRC frame-RC core wall hybrid structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2013.
- [15] 白代春. 钢筋混凝土平面框架优化及程序设计[D]. 重庆:重庆大学,2011.
BAI Daichun. The optimization and program design of reinforced concrete frame structures [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [16] 秦学志,唐焕文. 实用最优化方法 [M]. 3 版. 大连:大连理工大学出版社,2004.
QIN Xuezhi, TANG Huanwen. Practical method of optimization [M]. 3rd ed. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2004.
- [17] Computers and Structures I. SAP2000 help file [DB/CD]. Berkeley: Computers and Structures I, 2016.

(上接第 1500 页)

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ99—2015 Technical specification for steel structures of tall building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.