

刘小刚,王震,章培军,等.高层抗震结构造价的改进控制模型研究——基于一恢复重建高层的实例分析[J].地震工程学报, 2019, 41(3):800-806.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.800

LIU Xiaogang, WANG Zhen, ZHANG Peijun, et al. An Improved Cost Control Model for High-rise Seismic Structures: A Case Study of a Reconstructed High-rise Building[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3):800-806.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.800

高层抗震结构造价的改进控制模型研究 ——基于一恢复重建高层的实例分析

刘小刚, 王震, 章培军, 惠小健

(西京学院理学院, 陕西 西安 710123)

摘要: 采用 WSR 模型分析建筑工程抗震结构造价控制问题时,存在造价控制效果差的弊端。通过设计的高层建筑工程抗震结构造价控制模型构建造价控制的递阶层次结构,获取高层建筑工程造价控制的多种方案,从多种方案中通过三标度法和权重向量法获取造价控制的最优方案;另外采用质量量化 QoS 调度方法进行高层建筑工程造价效益控制约束均衡设计,以获取最优方案中高层建筑工程抗震结构造价控制的结果。实验结果表明,所设计模型可有效分析高层建筑的质量化特征,可改进控制高层抗震结构工程造价,预估消耗成本可控制在 1.8 万元以下,且分析耗时均值为 0.15 h,具有节省成本和效率快的优势,控制效果较好。

关键词: 高层建筑工程; 抗震设防; 造价控制模型; 三标度法; 最优方案; 质量量化

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)03-0800-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.800

An Improved Cost Control Model for High-rise Seismic Structures: A Case Study of a Reconstructed High-rise Building

LIU Xiaogang, WANG Zhen, ZHANG Peijun, HUI Xiaojian

(School of Science, Xijing University, Xian 710123, Shaanxi, China)

Abstract: When using the WSR model to analyze the cost control problem of seismic structures in building engineering, the cost control effect is poor. A cost control model for aseismic structures of high-rise building was designed in this paper. The hierarchical structure for cost control was constructed, and various schemes for cost control of the high-rise building were obtained. The optimal scheme of cost control was selected by using the three-scale method and the weight vector method. The quality quantification QoS dispatching method was then used to obtain the optimal cost control results for high-rise buildings. The experimental results showed that the designed model can effectively analyze the qualitative characteristics of high-rise buildings and improve the

收稿日期: 2018-10-16

基金项目: 2017 年国家自然科学基金项目(11726624); 2017 年湖南省教育厅科学研究项目(17C1364); 2016 年陕西省教育厅专项科研计划项目(16JK2213)

第一作者简介: 刘小刚(1983-),男,陕西延安人,讲师,研究生,主要研究方向为数学建模。E-mail:sun8894@163.com。

通信作者: 王震(1981-),男,陕西合阳人,教授,主要研究方向为非线性动力系统。E-mail:williamwangz@yeah.net。

cost control of high-rise seismic structures. The estimated consumption cost can be controlled below 18 000 RMB, and the average analysis time is 0.15 h, indicating the model has the advantages of cost savings, high efficiency, and good control effect.

Keywords: high-rise building engineering; seismic fortification; cost control model; three-scale method; optimal scheme; quality quantification

0 引言

近些年地震灾害的次数逐渐增多,因此高层建筑的抗震性能问题也逐渐成为人们关注的重点。依据国家有关规范标准的要求,应合理调整高层建筑的抗震设防烈度,分析建筑抗震设防烈度与土建造价的关系,提高高层建筑的抗震性能和经济性。目前,相关学者提出的高层建筑工程抗震造价控制方法有:文献[1]提出通过 WSR(物理-事理-人理)系统方法论,构建施工阶段工程造价的 WSR 模型,但未能全方面分析高层建筑工程造价方案,且分析耗时较长;文献[2]提出基于 WLCS-ALA 模型的建设项目投资估算研究方法,其采用人工生命进化算法过程较为复杂,导致估算效率低下。基于以上不同方法论存在的问题,本文构建高层建筑工程抗震结

构造价控制模型,构建高层建筑工程抗震结构造价控制的递阶层次结构,选取最优方案并分析方案的效益,最终提出低成本、高效益、高效率的高层建筑工程抗震结构造价控制方案。

1 高层建筑工程抗震结构造价控制模型研究

1.1 构建高层建筑工程抗震结构造价控制的递阶层次结构

目前在我国使用地震烈度与地震动参数的双轨制的背景下,高层建筑结构的抗震设防标准是根据抗震设防烈度与建筑使用功能来判定^[3]的。构建高层建筑工程抗震结构造价控制的递阶层次结构,不仅要分析高层建筑上的使用功能、结构中的安全合理、施工的关键条件,还要分析影响每个评估目标的因素。其详细的结构图用图 1 描述。

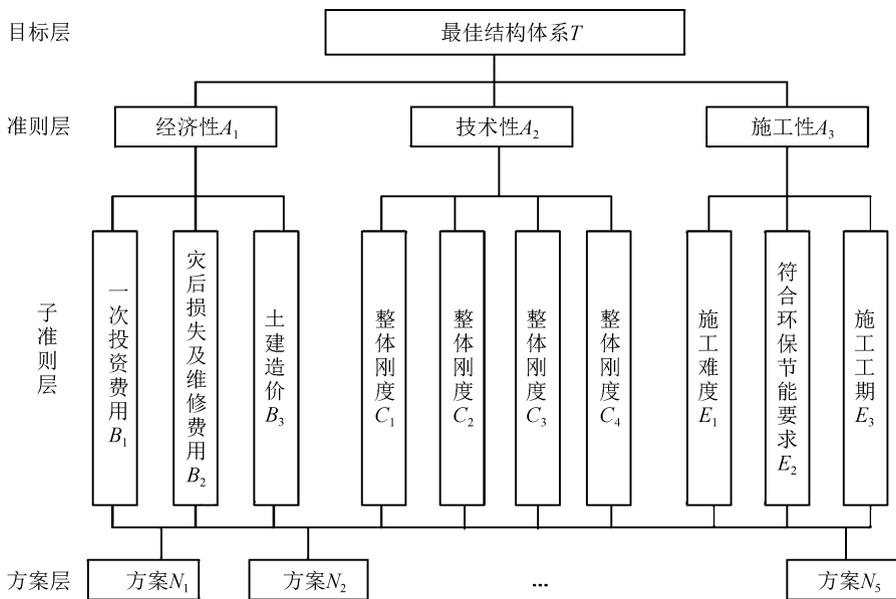


图 1 高层建筑工程抗震结构造价控制的递阶层次结构

Fig.1 Hierarchical structure of cost control for seismic structures of high-rise building

图 1 中,目标层处于第一层,是高层建筑工程抗震结构造价控制的总目标——最合理的结构方案。指标层(准则层)和子指标层(子准则层)分别处于第二层和第三层,是高层建筑工程抗震结构造价控制方案的评价指标^[4],该层次结构由高层建筑工程抗震结构造价控制方案的定量指标和定性指标构成。

定量指标为土建造价和施工工期等,将高层建筑工程原始特征值矩阵规范化处理后便可获取;高层建筑工程定性指标是指灾后损失和维修费用、整体延性和施工难度等,好、坏的程度值通过专家依据个人经验采用三标度法评价判定^[5]。方案层处于最低层,主要用于描述高层建筑工程抗震结构造价控制

的备选方案。本文设计高层建筑工程抗震结构造价控制的递阶层次结构的目的在于通过该结构获取高层建筑工程抗震结构造价控制的多种控制方案^[6]。

1.2 获取最佳高层建筑工程抗震结构造价控制方案

1.2.1 确定模糊判断矩阵

(1) 根据三标度法建立抗震结构造价控制方案中定性指标的比较矩阵

按照图1高层建筑工程抗震结构造价控制递阶层次结构图,通过各位专家从第一层到最低层逐层构建关于高层建筑工程抗震结构造价控制方案中因素间的比较矩阵,用于描述每个因素间对于上层某因素的关系^[7]。

设第*i*层里某个抗震结构造价控制因素和下层次要的抗震结构造价控制元素 E_1, E_2, \dots, E_n 间存在较高的关联性,逐次对比每两个元素的相对重要关系,采用三标度法获取高层建筑工程抗震结构造价控制因素比较矩阵 $E = (e_{ij})_{n \times n}$,其中:

$$e_{ij} = \begin{cases} 1; & E_i \text{ 比 } E_j \text{ 重要或有利} \\ 2; & E_i \text{ 与 } E_j \text{ 都重要或有利} \\ 3; & E_i \text{ 没有 } E_j \text{ 重要或有利} \end{cases} \quad (1)$$

同时有 $e_{ij} = 1 (i = 1, 2, \dots, n)$,即高层建筑工程抗震结构造价控制元素 e_{ij} 本身的对比结果是1,所以三标度比较矩阵 E 符合验证准则^[8]。

计算得到高层建筑工程抗震结构造价控制方案中每个元素的重要性排序指数 e_i 为:

$$e_i = \sum_{j=1}^n e_{ij}; i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

(2) 高层建筑工程抗震结构造价控制方案中定量指标的规范化处理

针对定量指标,差异评估指标数量级也具有差异性,需要对它们规范化处理^[9]。将高层建筑工程抗震结构造价控制的评估指标映射到 $[0, 1]$ 中,在递阶层次结构图1里,一次投资费用、土建造价与施工工期都是定量指标,它们都属于高层建筑工程抗震结构造价控制方案中的成本型指标,也是基数越小越好型指标,它的规范化公式是:

$$e'_{ij} = \frac{\max_{j=1}^{n_2}(e'_{ij})}{\max_{j=1}^{n_2}(e'_{ij}) - \min_{j=1}^{n_2}(e'_{ij})} \quad (3)$$

式中: (e'_{ij}) 描述的是高层建筑工程抗震结构造价控制方案中定量指标的原始特征值矩阵; n_2 代表定量指标数量; i 和 j 都代表计算参数。

(3) 确定高层建筑工程抗震结构造价控制方案的模糊判断矩阵

使用梯形模糊数 $(\alpha, \beta, \chi, \gamma)$ 评价高层建筑工程抗震结构造价控制方案中各指标间的相对重要性,以此统一描述高层建筑工程抗震结构造价控制方案中的模糊数、非模糊数、定量指标与定性指标。根据三标度法的原理,建立3个高层建筑工程抗震结构造价控制方案的梯形模糊数,并对其采用模糊化处理^[10]。专家评判时,对高层建筑工程抗震结构造价控制方案中元素间的相对重要性设定相应的模糊数值,将其引入极比法和极差法的对应转换公式,便能获取高层建筑工程抗震结构造价控制方案的模糊判断矩阵^[11]。

1.2.2 单一准则下每个指标相对权重的计算

使用权重向量法计算高层建筑工程抗震结构造价控制方案,获取在不同准则下相关因素指标的相对权重。经过专家评判和计算定量指标结果,获取高层建筑工程抗震结构造价控制方案的模糊判断矩阵 \tilde{A} 为:

$$\tilde{A} = (\tilde{A}_{ij})_{n \times n} \quad (4)$$

式中: n 代表数量; \tilde{A}_{ij} 代表高层建筑工程抗震结构造价控制元素集。

假定 $\tilde{A} = (\omega_{ij}, r_{ij}, k_{ij}, f_{ij}), i, j = 1, 2, \dots, n$,计算步骤为:

(1) 计算高层建筑工程抗震结构造价控制方案的判断矩阵第*i*行里每个模糊数的均值 $\tilde{A}_i = (\bar{\omega}_i, \bar{r}_i, \bar{k}_i, \bar{f}_i), 1 \leq i \leq n$,当中 $\bar{\omega}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_{ij}$,并按照这个思路求取 $\bar{r}_i, \bar{k}_i, \bar{f}_i$ 。 $\omega_{ij}, r_{ij}, k_{ij}, f_{ij}$ 均表示高层建筑工程抗震结构造价控制元素, $\bar{\omega}_i, \bar{r}_i, \bar{k}_i, \bar{f}_i$ 均表示高层建筑工程抗震结构造价控制元素均值。

(2) 对 \tilde{A}_i 里的各个元素开方,即:

$$\tilde{F}_i = (\bar{\omega}_i, \bar{r}_i, \bar{k}_i, \bar{f}_i) \quad (5)$$

式中: \tilde{F} 表示开方后的高层建筑工程抗震结构造价控制方案, $\bar{\omega}_i, \bar{r}_i, \bar{k}_i$ 和 \bar{f}_i 均表示开方后的高层建筑工程抗震结构造价控制元素。

(3) 对 \tilde{F} 实行归一化操作,获取高层建筑工程抗震结构造价控制方案中每个指标的相对权重 $\tilde{\omega} = (\omega_i, r_i, k_i, f_i), 1 \leq i \leq n$ 。 ω_i, r_i, k_i, f_i 均代表高层建筑工程抗震结构造价控制方案中各个评价指标的权重。

1.2.3 层次总排序

设高层建筑工程抗震结构造价控制方案的递阶

层次模型具有 v 层,有 x 个备选方案,假定第 $(v-1)$ 层上共有 n^{v-1} 个元素和第 $(v-2)$ 层上的高层建筑工程抗震结构造价控制方案的递阶层次结构中的子准则 Y 有关联,层次单排序计算获取第 $(v-1)$ 层上的 n^{v-1} 个元素的模糊数排序权重向量 $\tilde{\omega}^{v-1}$ 是:

$$\tilde{\omega}^{v-1} = (\tilde{\omega}_1^{(v-1)} \tilde{\omega}_2^{(v-1)} \dots \tilde{\omega}_{n_{k-1}}^{(v-1)})^T \quad (6)$$

式中: $\tilde{\omega}^{v-1} = w_i, r_i, k_i, f_i, 1 \leq i \leq n_{k-1}$ 。

高层建筑工程抗震结构造价控制方案中每个备选方案对于第 $(v-1)$ 层中的 n_{k-1} 个元素的模糊数评估指标矩阵 $\tilde{H}_{m \times n_{k-1}} = (e_{ij})_{m \times n_{k-1}}$ 。 m 和 n 分别表示 m 个评价指标和 n 个评价因素。

依据上述过程计算出高层建筑工程抗震结构造价控制方案中每个评判因素对于子准则 Y 的模糊数排序值 \tilde{I}_Y 为:

$$\tilde{I}_Y = \tilde{H}_{m \times n} \otimes \tilde{\omega}^{v-1} \quad (7)$$

使用相同的方法获取备选方案对于第 $(v-2)$ 层中的全部元素的模糊数排序值,以此上推就可获取高层建筑工程抗震结构造价控制方案对于高层建筑工程抗震结构造价控制总目标的模糊排序值^[12-13]。根据模糊排序值便可获取高层建筑工程抗震结构造价控制最优方案。

1.3 质量量化 QoS 调度和高层建筑工程造价效益分配优化控制

1.3.1 质量量化 QoS 调度方法

基于上小节获取的高层建筑工程抗震结构造价控制最优方案,本文使用质量量化 QoS 调度方法进行高层建筑工程造价效益分析约束均衡设计^[14-15]。获取最优方案中高层建筑工程抗震结构造价效益分配动态方程是:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\partial} a \\ \frac{1}{b} \otimes \bar{a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{\partial} \rho \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \kappa \\ \nu \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

式中: a, b 表示输出矢量的高层建筑工程造价线性回归归一化的特征向量; ∂, ρ, κ 和 ν 分别表示高层建筑工程造价效益历时数据观测矢量的测量数据。对于效益类指标,使用 QoS 调度决策模型,获取高层建筑工程质量量化 QoS 相对移动矢量的观测值 c_{k+1}^a 与 c_{k+1}^m ,使用高斯牛顿迭代算法计算质量量化 QoS 的效率阈值,迭代式是:

$$\begin{cases} c_{k+1} = \phi_k c_k - \frac{\Delta t}{2_k} \rho_k \\ \begin{bmatrix} c_{k+1}^a \\ c_{k+1}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_r^{c(c_{k+1})} & 0 \\ 0 & S_r^{c(c_{k+1})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{k+1}^a \\ u_{k+1}^m \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

式中: u_{k+1}^a 和 u_{k+1}^m 描述的是高层建筑工程抗震结构造价的最大预算成本阈值与最低生产质量可靠性阈值; k 描述的是高层建筑工程效益的经验测量矢量; $S_r^{c(c_{k+1})}$ 描述的是将高层建筑工程成本作为经济型指标后实际成本水平的感知信息; ϕ 表示高层建筑工程抗震结构造价成本的约束条件; e_a 与 e_m 表示高层建筑工程抗震结构造价的最小预算成本阈值和最高生产质量可靠性阈值; α 和 m 表示阈值; Δt 表示系数。经过以上迭代设计实现高层建筑工程抗震结构造价的质量量化 QoS 调度。

1.3.2 高层建筑工程造价效益分配优化控制的实现

为提高高层建筑工程造价效益分配优化控制的精度,加大高层建筑的施工效益,基于上述内容建立高层建筑工程抗震结构造价控制模型,根据加权平均方法计算获取建筑工程造价效益分配的 QoS 质量量化聚类速度。计算方法为:

$$\theta_{\text{簇}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_i \theta_{ij}}{n} \quad (10)$$

式中: $\theta_{\text{簇}}$ 表示建筑工程造价效益分配的 QoS 质量量化聚类速度; θ_{ij} 表示高层建筑工程造价效益分配控制的第 i 条建筑施工线第 j 每个作业点的瞬时造价消耗; σ_i 代表第 i 个高层建筑施工线上的建筑成本度占的权重; n 表示聚类速度计算中的数量。

使用自适应模糊系统学习控制方法,描述城市高层建筑工程抗震结构造价效益分析模型的关联度是:

$$\pi_{L_i} = \theta_{\text{簇}} (\alpha_{L_i} + \beta_{L_i} \Delta + \epsilon_{L_i} \phi) \quad (11)$$

式中: π_{L_i} 表示高层建筑工程抗震结构造价效益分析模型的整体关联度; α, β, ϵ 分别表示高层建筑工程抗震结构造价控制的各因素关联度; Δ 和 ϕ 表示高层建筑工程抗震结构造价成本的约束条件。

本文使用质量量化 QoS 调度的高层建筑工程造价效益分配迭代方程为:

$$R_{k+1/k+1} = \zeta_k \frac{\partial_k}{\partial_{k+1}} \phi_k R_{k/k} \phi_k + \frac{1}{\partial_{k+1}} \alpha \pi_{L_i} \quad (12)$$

式中: $R_{k/k}$ 代表 k 时刻高层建筑工程抗震结构造价控制效益结果; ζ 表示高层建筑工程抗震结构造价实际成本水平; ∂ 表示高层建筑工程抗震结构造价控制效率。

2 实验分析

为了验证本文模型的有效性,对某地高层建筑抗震结构造价情况进行控制分析。仿真实验开发环境通用 PC 机,计算机的 CPU 为 IntelCore™ i7-2600@3.40 GHz,计算机内存是 4 * 4 GB DDR3@1600 9-9-9-24,仿真语言是 Matlab7.0。考虑到高层建筑抗震结构造价控制模型受到工程里的标价、税金、利润、施工单位的管理水平的影响,设置市场材料价格与人工费、机械设备费用等对工程造价的影响权重依次为 $\frac{4}{7}$ 、 $\frac{2}{7}$ 、 $\frac{1}{7}$ 。依据该参数设置,将 5 个工程设为实验对象,其质量水平与效率水平对工程造价效益分配控制的数值实验结果用表 1 来描述。

表 1 高层建筑工程中 5 个工程代号的参数范围

Table 1 Range of parameters for 5 engineering projects

工程代号	高层建筑质量水平(100%)	施工效率水平(100%)	单位建筑平方成本/百元
1	[0.61 1.00]	[0.55 1.10]	[22.0 21.0]
2	[0.51 1.00]	[0.35 1.14]	[32.0 44.0]
3	[0.74 1.00]	[0.97 1.11]	[55.0 60.0]
4	[0.33 1.00]	[0.94 1.14]	[21.0 25.0]
5	[0.61 1.00]	[0.93 1.01]	[20.1 29.99]

依据上述设置,采用本文模型对该地高层建筑工程中的 5 个工程进行质量量化 QoS 调度。使用本文模型实行建筑工程造价分析约束均衡设计,获取不同建筑单元的质量量化 QoS 调度应变控制结果(等效塑性拉应变)用图 2 描述,不同建筑单元的等效塑性拉应变波动情况,反映了其质量化特征。

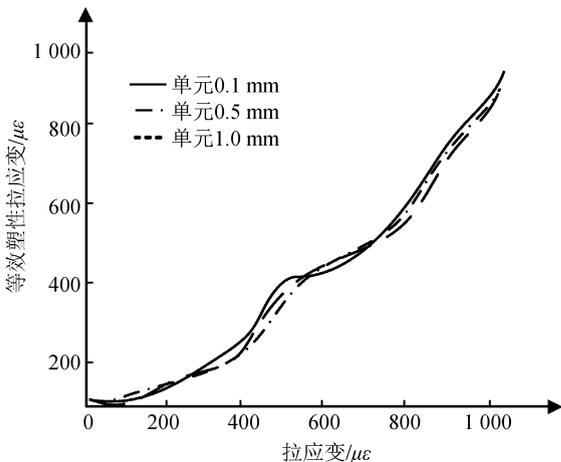


图 2 不同高层建筑单元的质量化 QoS 调度应变控制结果

Fig.2 Strain control results of quality quantification QoS dispatch for different high-rise buildings

分析图 2 可知,在不同高层建筑单元的质量化 QoS 调度应变控制结果中,当不同高层建筑单元分别为 0.1 mm、0.5 mm 和 1 mm 时,三者等效塑性拉应变波动情况相似,说明三者质量化特征方向和趋势基本一致,说明使用本文模型都可有效分析它们的质量化特征,符合高层建筑质量需求。在此基础上采用本文模型、WSR 模型和 WLCS-ALA 模型进行对比仿真实验,共进行 27 次工程造价分析,获取工程造价分析结果用图 3 来描述。

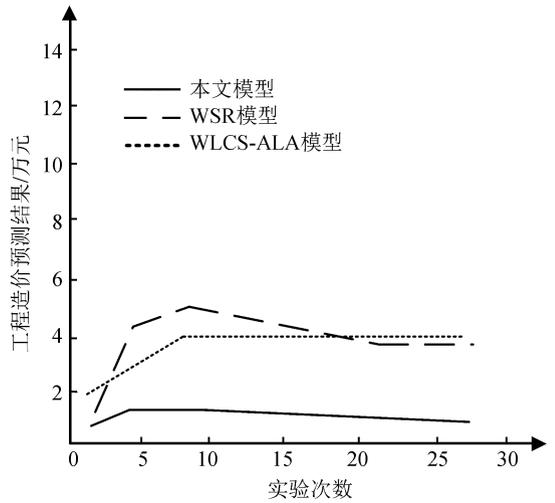


图 3 三种模型高层建筑工程造价效益分析结果

Fig.3 Cost-benefit analysis results of three models

分析图 3 可知,本文模型控制下,高层建筑工程的造价预估结果在 0.9~1.8 万元之间;WSR 模型对高层建筑工程造价分析结果最大值为 5.1 万元,最小值为 1.2 万元;WLCS-ALA 模型对高层建筑工程造价分析结果最大值为 4.1 万元,最小值为 2.0 万元。由此可见,本文模型能大幅降低工程造价开销,节省成本,造价控制效果较好。

随机抽取上述实验中三种模型的 10 次分析耗时,并用表 2 来描述。

分析表 2 可知,随机抽取的 10 次耗时数据中,本文模型研究高层建筑工程抗震结构造价的耗时均值为 0.15 h,WSR 模型的耗时均值为 0.24 h,WLCS-ALA 模型的耗时均值为 0.28 h。由此可见,本文模型的耗时最短、效率最高。

3 结论

地震灾害的破坏性使恢复重建具有复杂性、不确定性,本文设计的高层抗震结构造价改进控制模型,能够选择出适合高层建筑工程抗震设防的最佳造价控制方案,并采用质量量化 QoS 调度方法提升

高层建筑工程质量量化分析水平,提高工程造价的合理规划与预算水准,增加建筑施工效益、节省成本。

表 2 三种模型分析耗时对比结果

Table 2 Time-consuming comparison of three models

实验次数	耗时/h		
	本文模型	WSR 模型	WLCS-ALA 模型
1	0.1	0.25	0.32
2	0.1	0.24	0.35
3	0.2	0.24	0.11
4	0.1	0.26	0.23
5	0.3	0.26	0.22
6	0.1	0.28	0.34
7	0.1	0.26	0.32
8	0.1	0.28	0.24
9	0.3	0.27	0.33
10	0.1	0.27	0.13
均值	0.15	0.24	0.28

以某地高层建筑抗震结构造价作为实况模拟,充分考虑了在实际工程造价中易出现的可变因素,如标价、税金、利润、施工单位的管理水平等。实验数据说明,本文模型能有效分析高层建筑的质量化特征,可大幅度降低工程造价开销,节省成本,控制效果较好,且在多次实验中,本文模型分析耗时均值仅有 0.15 h,使用效率较高。在实际高层建筑抗震结构造价控制中,由于本文设计模型考虑了多种现实影响的不确定因素,使其具有一定的实际应用价值。

鉴于论文篇幅所限,完成时间有限,有关详细的技术环节,在此恕不能做更多详述,有兴趣的读者可与作者联系讨论。作者水平有限,文中遗漏之处及错误难免,望请阅者给予批评指正。

参考文献(References)

[1] 陈志鼎,张晓芸,郭琦.基于 WSR 的施工阶段工程造价控制[J].人民长江,2015,46(18):59-61.
CHEN Zhiding,ZHANG Xiaoyun, GUO Qi. Project Cost Control in Construction Phase Based on WSR[J]. Yangtze River, 2015,46(18):59-61.

[2] 段晓晨,吕倩,张小平,等.基于 WLCS-ALA 模型的建设项目投资估算研究[J].铁道学报,2016,38(7):117-123.
DUAN Xiaochen,LÜ Qian,ZHANG Xiaoping, et al. Research on Estimating Whole Life Cost-significant Based on the Artificial Life Evolution[J]. Journal of the China Railway Society, 2016,38(7):117-123.

[3] 张晓东,杨圣祥.基于 PCA 与 NARX 的市政工程造价组合预测[J].控制工程,2017,24(12):2485-2490.
ZHANG Xiaodong,YANG Shengxiang. Forecasting the Cost of Municipal Engineering Based on PCA and NARX[J]. Control Engineering of China, 2017,24(12):2485-2490.

[4] 范重,马万航,赵红,等.超高层框架-核心筒结构体系技术经济性研究[J].施工技术,2015,44(20):1-10.
FAN Zhong, MA Wanhong, ZHAO Hong, et al. Research on the Structural and Economical Efficiency of Super High-rise Frame-corewall Systems[J]. Construction Technology, 2015, 44(20):1-10.

[4] 范重,马万航,赵红,等.超高层框架-核心筒结构体系技术经济性研究[J].施工技术,2015,44(20):1-10,31.
FAN Zhong, MA Wanhong, ZHAO Hong, et al. Research on the Structural and Economical Efficiency of Super High-Rise Frame-Corewall Systems[J]. Construction Technology, 2015, 44(20):1-10,31.

[5] 纪晓东,王彦栋,马琦峰,等.可更换钢连梁抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(10):1-10.
JI Xiaodong,WANG Yandong, MA Qifeng, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Replaceable Steel Coupling Beams[J]. Journal of Building Structures, 2015,36(10):1-10.

[6] 吕西林,姜淳,蒋欢军.超高层建筑结构 benchmark 模型及其地震反应分析[J].结构工程师,2015(4):100-107.
LÜ Xilin,JIANG Chun,JIANG Huanjun. A Benchmark Model of Mega-tall Buildings and Analysis of its Seismic Responses [J]. Structural Engineers, 2015(4):100-107.

[7] 张楚汉,金峰,王进廷,等.高混凝土坝抗震安全评价的关键问题与研究进展[J].水利学报,2016,47(3):253-264.
ZHANG Chuhan, JIN Feng, WANG Jinting, et al. Key Issues and Developments on Seismic Safety Evaluation of High Concrete Dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(3): 253-264.

[8] 胡好,赵作周,钱稼茹.高烈度地区框架-核心筒结构中美抗震设计方法对比[J].建筑结构学报,2015,36(2):1-9.
HU Yu,ZHAO Zuozhou, QIAN Jiuru. Comparison of Chinese and American Seismic Design Methods for Frame-core Wall Structures in High Seismic Zone[J]. Journal of Building Structures, 2015,36(2):1-9.

[9] ETEDALI S, TAVAKOLI S. PD/PID Controller Design for Seismic Control of High-Rise Buildings Using Multi-Objective Optimization: A Comparative Study with LQR Controller[J]. Journal of Earthquake & Tsunami, 2017,11(3):1750009.

[10] 许大卫,陈天华,陈建华,等.地区电网与新能源无功电压协调控制[J].江苏电机工程,2015,34(2):41-44.
XU Dawei, CHEN Tianhua, CHEN Jianhua, et al. The Coordination Control of Reactive-Power and Voltage in the Regional Grid with New Energy Resources[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015,34(2):41-44.

[11] 熊琛,许镇,曾翔,等.适用于区域震害模拟的混凝土高层结构损伤预测方法[J].自然灾害学报,2016,25(6):69-78.
XIONG Chen, XU Zhen, ZENG Xiang, et al. Damage Prediction Method Suitable for Regional Seismic Damage Simulation of Concrete Highrise Building Structures[J]. Journal of Natural Disasters, 2016,25(6):69-78.

[12] 梁喜,刘雨.基于模糊神经网络的建筑工程造价预测模型[J].技术经济,2017,36(3):109-113.

- LIANG Xi, LIU Yu. Predicting Model for Construction Engineering Cost Based on Fuzzy Neural Network[J]. Technology Economics, 2017, 36(3): 109-113.
- [13] 胡晓娟. 多元线性回归模型参数的 STLS 估计法及其在工程造价预测中的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42(4): 142-147.
- HU Xiaojuan. Structured Total Least Squares Method for Multivariable Linear Regression Model and Its Application in Engineering Cost Prediction [J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(4): 142-147.
- [14] 王刚. 差异沉降下多层砖砌体建筑结构抗震加固技术优化[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(30): 194-200.
- WANG Gang. Optimization of Seismic Strengthening Technology for Multi-storey Brick Masonry Structure under Differential Settlement[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(30): 194-200.
- [15] 王飞剑, 刘如山, 马朝晖. 窑洞外形特征对结构抗震性能影响研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 43-51.
- WANG Feijian, LIU Rushan, MA Zhaohui. Effect of Cave Dwelling Shape on the Seismic Performance of Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 43-51.
- *****
- (上接第 792 页)
- [9] 段志慧, 窦远明, 王建宁, 等. 软土地基盾构隧道地震动力响应振动台模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(2): 111-115.
- DUAN Zhihui, DOU Yuanming, WANG Jianning, et al. Shaking Table Test for Seismic Responses of Shield Tunnel in Soft Soil Foundation[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(2): 111-115.
- [10] 郭继东, 杨月巧. 地震应急物资需求预测的模糊案例推理技术[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(2): 176-180.
- GUO Jidong, YANG Yueqiao. Study on Fuzzy Case-based Reasoning (FCBR) for Demand Forecast of Emergency Material in Earthquake[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(2): 176-180.
- [11] OLIVETO N D, SIVASELVAN M V. Nonlinear Finite Element Analysis of Three-Dimensional Free and Harmonically Forced Vibrations of Stranded Conductor Cables[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(14): 2199-2216.
- [12] 王东明, 刘欢, 李永佳. 基于砖混结构废墟救援安全评估专家系统研究[J]. 地震研究, 2016, 39(4): 656-663.
- WANG Dongming, LIU Huan, LI Yongjia. Research on Expert System of Ruins Relief Safety Assessment for Brick-concrete Structure[J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(4): 656-663.
- [13] 王甜甜, 王颖. 物联网信息传输数据精确性优化仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(10): 258-261.
- WANG Tiantian, WANG Ying. Internet Information Transmission Data Accuracy Optimization Simulation Research[J]. Computer Simulation, 2016, 33(10): 258-261.
- [14] 李强, 张景发. 道路震害遥感提取方法现状与应急应用展望[J]. 地震, 2017, 37(4): 80-92.
- LI Qiang, ZHANG Jingfa. Extraction Method of Road Seismic Damage from Multi-source Remote Sensing Images and Application Prospect for Earthquake Emergency[J]. Earthquake, 2017, 37(4): 80-92.
- [15] SILK A, LENTON G, SAVAGE R, et al. Job Task Characteristics of Australian Emergency Services Volunteers during Search and Rescue Operations[J]. Ergonomics, 2018, 61(2): 265-272.