

DOI: 10.7672/sgjs2025170021

# 基于 Kriging 和 NSGA2 的大型混凝土异形柱 结构模型修正研究\*

冯伟<sup>1</sup>, 凌小宝<sup>2</sup>, 陈愿<sup>3</sup>, 曾涛<sup>1</sup>, 林春涑<sup>1</sup>, 王召来<sup>1</sup>, 李鹏鹏<sup>1</sup>

(1. 中建三局集团有限公司, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074;  
3. 中国铁路上海局集团有限公司杭州铁路枢纽工程建设指挥部, 浙江 杭州 311500)

[摘要] 对复杂和高维结构进行结构模型修正, 面临求解难度高、计算量大的挑战, 提出结合 Kriging 和 NSGA2 算法的模型修正方法, 用于大型混凝土 W 异形柱结构。首先, 将 W 异形柱划分为 5 段柱进行模拟, 通过 MIDAS FEA NX 软件建立 W 异形柱有限元模型, 选取 5 段柱的弹性模量、容重、截面积  $i$  与  $j$  作为模型修正参数, 采用拉丁超立方采样法 (LHS) 生成模型修正参数组合, 计算 W 异形柱在不同参数组合下的南北两侧沉降量。将模型参数组合作为输入、南北两侧沉降量作为输出, 建立 Kriging 有限元代理模型。同时, 以实测 W 异形柱与有限元计算结果间的最小误差建立目标函数, 结合 NSGA2 多目标优化算法进行参数寻优, 最终更新 W 异形柱模型的修正参数。通过验证, 修正后的 W 异形柱南北两侧沉降量分别为 203.074 5, 203.074 8mm, 与实际测量的 217, 218mm 结果接近, 证明该方法的实用性。

[关键词] 混凝土; 异形柱; 结构模型修正; Kriging 代理模型; NSGA2 多目标优化算法; 沉降

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)17-0021-07

## Research on Model Revision of Large Concrete Special-shaped Column Structure Based on Kriging and NSGA2

FENG Wei<sup>1</sup>, LING Xiaobao<sup>2</sup>, CHEN Yuan<sup>3</sup>, ZENG Tao<sup>1</sup>, LIN Chunlai<sup>1</sup>,  
WANG Zhaolai<sup>1</sup>, LI Pengpeng<sup>1</sup>

(1. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;  
3. Hangzhou Railway Hub Construction Command Headquarters of China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311500, China)

**Abstract:** The structural model modification for complex and high-dimensional structures often faces the challenges of high solution difficulty and large amount of calculation, to solve this problem, a model modification method based on the combination of Kriging and NSGA2 algorithm is proposed for large concrete W-shaped column structures. Firstly, the W-shaped column is divided into five segments for simulation, and the finite element model of the W-shaped column is established by MIDAS FEA NX software, the elastic modulus, bulk density, cross-sectional area  $i$ ,  $j$  of the five segments are selected, as the model modification parameters, and the Latin hypercube sampling (LHS) method is used to generate the combination of model modification parameters, and the settlement of the north and south sides of the W-shaped column under different parameter combinations is calculated. Taking the combination of model parameters as the input and the settlement of the north and south sides as the output, a Kriging finite element surrogate model is established. At the same time, the objective function is established by

\* 国家重点研发计划; 结构性能智能监测、诊断与预测方法 (2021YFF0501003); 国家自然科学基金面上项目; 基于外贴压电传感器监测信息的混凝土内部深处微裂纹精准检测方法 (52078233); 湖北省自然科学基金创新群体项目; 城市轨道交通地下结构全覆盖健康监测方法研究 (2024AFA006)

[作者简介] 冯伟, 工程师, E-mail: 454598774@qq.com

[通信作者] 凌小宝, 硕士研究生, E-mail: m202271407@hust.edu.cn

[收稿日期] 2025-05-11

minimizing the error between the measured settlement of the north and south sides of the W-shaped column, the finite element calculation results, and the NSGA2 multi-objective optimization algorithm is used for parameter optimization, finally, the modified parameters of the W-shaped column model are updated. Through verification, the settlements of the north and south sides of the modified W-shaped column are 203.074 5, 203.074 8mm, respectively, which are close to the actual measured results of 217,218mm, which proves the practicability.

**Keywords:** concrete; special-shaped columns; structural model correction; Kriging proxy model; NSGA2 multi-objective optimization algorithm; settlement

## 0 引言

混凝土异形柱在高层建筑、桥梁、核电站等领域应用广泛,但由于其几何形状复杂、材料性质不均匀,在制作和使用过程中易受各种外部力学和环境因素影响,导致结构发生损伤、性能退化。在内力作用下,结构可能产生裂缝、沉降,进而影响结构安全性。为及时发现和识别混凝土异形柱结构的潜在损伤,需要采取有效的维护、修复措施,对结构进行模型修正<sup>[1-3]</sup>。

结构工程领域的研究者们一直探索各种损伤识别和结构健康监测的方法。柳振海等<sup>[4]</sup>将不确定模型修正问题转化为均值和标准差的修正问题,并结合 Kriging 模型和优化算法求解待修正参数的均值和标准差,以修正海上风电结构数值模型。唐和生等<sup>[5]</sup>基于 Berman-Baruch 法修正油阻尼器钢框架结构有限元模型的质量和刚度矩阵,通过分析发现修正后的有限元模型响应与实测结构响应拟合程度很好。祁泉泉等<sup>[6]</sup>提出改进的 Berman-Baruch 法,通过定义合理的目标函数,使改进后的 Berman-Baruch 法克服对质量归一化模态振型的要求,且修正后的模型具有明确的物理意义和带状特性。Vikas 等<sup>[7]</sup>提出新的有限元模型修正方法,将阻尼模型假定为非黏性非比例模型,并采用参数指数型无黏性阻尼模型对动力系统中的阻尼进行建模,通过频响函数(FRF)更新动态系统中的非黏性非比例阻尼矩阵。Qiu 等<sup>[8]</sup>在标准粒子群优化(PSO)中引入2个额外的算子,即双角算子、多子群算子,利用多亚群粒子群优化(MSPSO)修正更新结构模型。Chen 等<sup>[9]</sup>建立以具有和不具有复杂预应力分布的有限元模型间固有频率的残差值为目标函数。最后,对焊接残余应力分布的薄圆柱壳结构进行模型修正,验证该方法的可行性和有效性。秦世强等<sup>[10]</sup>提出改进的稳态遗传算法,以获取结构模型修正的局部最优解和全局最优解。

在当前背景下,以 Kriging 模型和 NSGA2<sup>[11-14]</sup>为基础的结构模型修正方法正逐渐成为学术界关

注的焦点。Kriging 模型作为统计学插值方法,通过拟合已知数据,构建未知数据的预测模型。相比传统插值方法,Kriging 模型不仅可以预测目标函数,还能估计预测的不确定性,因此在结构优化领域具有良好的适用性。另一方面,NSGA2 是多目标优化算法,通过模拟自然选择和遗传机制,在结构设计中搜索非支配解集合,从而进行多目标结构优化。NSGA2 算法是通过维护种群,进行交叉、变异等遗传操作不断进化种群,以逼近或发现最优解的近似集。因此,本研究旨在探索基于 Kriging 模型和 NSGA2 算法的大型混凝土异形柱结构模型修正方法。

## 1 工程概况

杭衢高速铁路建德段位于浙江省衢州市柯城区姜家山乡,主线全长 130km,设计时速 350km,衢州西站位于中间,中心里程为 DK97+450.000。站房共 3 层,其中出站层为地下 1 层,距离站台层 10m,站台层与地面广场基本相平,高架候车层相比站台层高 10m。该站主要支撑结构采用 W 异形柱,将其划分为 5 段,柱编号及其初始模型参数如表 1 所示。W 异形柱的立面以及南侧 5 段柱的划分如图 1 所示。W 异形柱采用六边形变截面钢筋混凝土构造,混凝土强度等级为 C50,端部结构面标高为 24.978m。W 异形柱基础位于 9.570m 高的结构板上,该结构板厚 200mm,所用混凝土强度等级为 C40。W 异形柱的支撑架体设置在结构板上部。

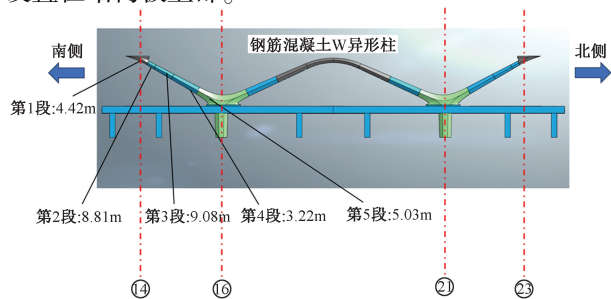


图 1 W 异形柱 5 段柱划分

Fig. 1 Division of the five-segment column for W-shaped column

表 1 W 异形柱初始模型参数设计

Table 1 Design of the initial model parameters for W-shaped column

柱编号	弹性模量 $E/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	容重 $\gamma/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	截面积 $i/\text{mm}^2$	截面积 $j/\text{mm}^2$
第 1 段	34 554	$2.336 \times 10^{-5}$	1 508 600	1 025 513.60
第 2 段	34 554	$2.336 \times 10^{-5}$	2 749 600	1 508 645.55
第 3 段	34 554	$2.336 \times 10^{-5}$	4 414 200	2 749 602.17
第 4 段	34 554	$2.336 \times 10^{-5}$	5 099 500	4 414 152.12
第 5 段	34 554	$2.336 \times 10^{-5}$	7 240 800	5 099 548.55

## 2 Kriging 模型的提出

为提高有限元模型的分析能力及其计算效率,提出有限元代理模型法,以估计未知点的响应。该方法采用 Kriging 插值方法,即基于最小二乘法的插值方法,有效估计空间数据趋势,并考虑数据噪声和不确定性。

在有限元模型中,常需要估计部分未知点的响应,如节点位移、应力等。直接对这些未知点进行插值可能导致插值函数在某区域内的局部误差较大,从而影响估计结果准确性。为解决这个问题,采用 Kriging 方法构建有限元代理模型,以提高估计结果精度,其核心思想是在估计未知点响应时,不仅考虑已知点的数据,还考虑这些数据的不确定性。因此,Kriging 法能够有效估计未知点的响应,且给出这些响应的不确定性估计。

Kriging 模型表示如下:

$$y(x) = \sum_{i=1}^k \beta_i f_i(x) + z(x) \quad (1)$$

式中: $\beta_i$  为第  $i$  个功能函数对应的回归参数; $f_i(x)$  为第  $i$  个功能函数; $z(x)$  为随机过程。对任意 2 个  $z(x_i)$  和  $z(x_j)$  间的协方差计算如下:

$$E[z(x_i), z(x_j)] = \sigma^2 R(\theta, x_i, x_j) \quad (2)$$

式中: $E$  表示随机过程的方差; $R(\theta, x_i, x_j)$  为参数  $\theta$  的相关模型,包括多项式类型、指数类型、线性类型、高斯类型等,此处选用指数类型函数; $\theta$  为 Kriging 模型的相关参数。Kriging 模型在样本点  $x'$  处,其预测值  $\hat{y}$  表示如下:

$$\begin{cases} \hat{y} = f^T \beta^* + r^T(x') R^{-1}(Y - F\beta^*) \\ \beta^* = (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} Y \\ r^T(x') = [R(\theta, x', x_1), R(\theta, x', x_2), \dots, \\ R(\theta, x', x_{n_0})]^T \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\hat{y}$  为预测值; $f$  为基函数; $\beta^*$  为广义最小二乘估计的系数向量; $r$  为预测点与已知点间的相关性向量; $R$  为沿对角线正定的协方差矩阵; $Y$  为响应值  $n_0$  对应的列向量,其中  $n_0$  为每个样本点对应的响应值; $F$  为含  $n_0$  个分量的列向量。

根据 Kriging 模型预测未知点  $x'$  处的均方误

差  $s^2$ :

$$\begin{cases} s^2(x') = \hat{\sigma}_2^2 [1 + \mu^T (F^T R^{-1} F)^{-1} \mu - r^T R^{-1} r] \\ \hat{\sigma}_2^2 = (Y - F\beta^*)^T R^{-1} (Y - F\beta^*) / n_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $s^2$  为均方误差; $\mu$  为辅助向量,用于计算预测误差的修正项,反映预测点与已知数据点在回归意义上的偏差, $\mu = F^T R^{-1} r - f$ ;  $s^2(x')$  为 Kriging 代理模型与有限元模型实际响应间的预测偏差<sup>[14]</sup>。

采用拉丁超立方采样,收集 5 段柱的弹性模量、容重、截面积  $i, j$  的数据,采样范围为初始值  $\pm 50\%$ 。根据 5 段柱参数采样空间,生成 75 个样本,如图 2 所示。通过软件计算后,得到 W 异形柱南北两侧的沉降量。将这些样本作为输入、W 异形柱南北两侧沉降量作为输出,构建 Kriging 有限元代理模型。由图 2 可知,由于初始值和采样范围相同,因此 5 段柱的弹性模量和容重分布空间大致相似,取样相对均匀。而其截面积  $i, j$  由于是变截面,随着高程不断降低、截面积增大,取值仍相对均匀。

## 3 融合 NSGA2 的 W 异形柱模型修正

### 3.1 目标函数建立

NSGA2 是用于解决多目标优化问题的进化算法。多目标优化问题指同时优化 2 个或多个冲突的目标函数,通常不存在单一最优解,而存在 1 组被称为帕累托最优解的解集。NSGA2 具有非支配排序、拥挤度计算、选择、交叉和变异、精英策略等特点。

在非支配排序中,算法会对种群进行快速非支配排序,将种群划分为不同等级,每个等级中的个体不被其他等级中的个体所支配,即在所有目标中都不劣于其他个体。

在拥挤度计算阶段,针对每个非支配层,计算个体间的拥挤度,以评估个体周围的拥挤程度。拥挤度考虑个体在目标函数空间的分布,有助于保证解的多样性。

通过二元锦标赛,在当前种群中进行选择、交叉和变异操作,以生成新种群。选择过程基于非支配层次进行,在同一层次内基于拥挤度进行。

NSGA2 采用精英策略保持父代和子代中的最

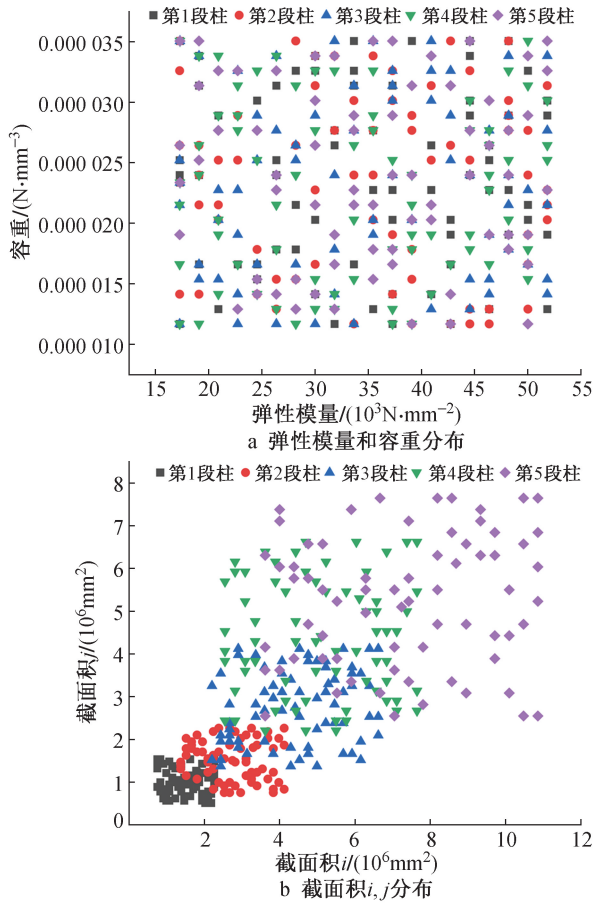


图 2 拉丁超立方采样模型参数分布

Fig.2 Distribution of model parameters for Latin hypercube sampling

佳个体,将当前种群和生成的子代进行合并后,再次进行非支配排序和拥挤度计算,从合并种群中选择最优个体构成新种群。该算法特别适用于解决目标函数多、约束条件多、变量维度高的复杂优化问题。与 NSGA 相比,NSGA2 算法的参数设置更少,大大减少需要设定的参数数量,能更有效逼近真实的帕累托前沿,且保持前沿中解的多样性,使该算法更易于实践应用,在工程设计、经济学、水资源管理等领域得到广泛应用和认可。

对 W 异形柱结构模型进行修正时,通过定义南北两侧沉降量偏差最小建立目标函数,构造的目标函数如下:

$$F_1 = \min\left[\frac{(x_1^a - x_1^b)}{x_1^a}\right] \quad (5)$$

$$F_2 = \min\left[\frac{(x_2^a - x_2^b)}{x_2^a}\right] \quad (6)$$

式中:  $x_1^a, x_1^b$  分别为 W 异形柱南侧实际沉降值和 Kriging 代理模型计算沉降值;  $x_2^a, x_2^b$  分别为 W 异形柱北侧实际沉降值和 Kriging 代理模型计算沉降值。

将 NSGA2 算法相关参数设置为种群个数 100, 迭代 200 次,交叉概率 0.9,突变概率 0.05,5 段柱累计的 20 个模型参数步长及寻优范围如表 2 所示。

表 2 W 异形柱模型参数步长及寻优范围

Table 2 Step size and optimization range of the model parameters for W-shaped column

模型参数	步长	寻优范围
第 1 段柱弹性模量 $E_1/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	173	[17 300, 51 800]
第 1 段柱容重 $\gamma_1/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	$1.17\times 10^{-7}$	[ $1.17\times 10^{-5}$ , $3.5\times 10^{-5}$ ]
第 1 段柱截面积 $i_1/\text{mm}^2$	7 540	[754 000, 2 260 000]
第 1 段柱截面积 $j_1/\text{mm}^2$	5 130	[513 000, 1 540 000]
第 2 段柱弹性模量 $E_2/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	173	[17 300, 51 800]
第 2 段柱容重 $\gamma_2/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	$1.17\times 10^{-7}$	[ $1.17\times 10^{-5}$ , $3.5\times 10^{-5}$ ]
第 2 段柱截面积 $i_2/\text{mm}^2$	13 700	[1 370 000, 4 120 000]
第 2 段柱截面积 $j_2/\text{mm}^2$	7 540	[754 000, 2 260 000]
第 3 段柱弹性模量 $E_3/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	173	[17 300, 51 800]
第 3 段柱容重 $\gamma_3/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	$1.17\times 10^{-7}$	[ $1.17\times 10^{-5}$ , $3.5\times 10^{-5}$ ]
第 3 段柱截面积 $i_3/\text{mm}^2$	22 100	[2 210 000, 6 620 000]
第 3 段柱截面积 $j_3/\text{mm}^2$	13 700	[1 370 000, 4 120 000]
第 4 段柱弹性模量 $E_4/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	173	[17 300, 51 800]
第 4 段柱容重 $\gamma_4/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	$1.17\times 10^{-7}$	[ $1.17\times 10^{-5}$ , $3.5\times 10^{-5}$ ]
第 4 段柱截面积 $i_4/\text{mm}^2$	25 500	[2 550 000, 7 650 000]
第 4 段柱截面积 $j_4/\text{mm}^2$	22 100	[2 210 000, 6 620 000]
第 5 段柱弹性模量 $E_5/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	173	[17 300, 51 800]
第 5 段柱容重 $\gamma_5/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	$1.17\times 10^{-7}$	[ $1.17\times 10^{-5}$ , $3.5\times 10^{-5}$ ]
第 5 段柱截面积 $i_5/\text{mm}^2$	36 200	[3 620 000, 10 900 000]
第 5 段柱截面积 $j_5/\text{mm}^2$	25 500	[2 550 000, 7 650 000]

### 3.2 帕累托解的选取

将 NSGA2 算法迭代 200 次后,100 个种群个体对应 5 段柱的弹性模量、容重、截面积  $i, j$  如图 3 所示,其均在特定数值范围内上下波动,表明修正结果具有一定稳定性。第 2 段柱的弹性模量经修正后达最大值,而第 1 段柱的弹性模量最小。第 4 段柱的容重修正后达到最大值,而第 3 段柱的容重最小。第 5 段柱的截面积  $i$  经修正后达到最大值,而第 1

段柱的截面积  $j$  最小。

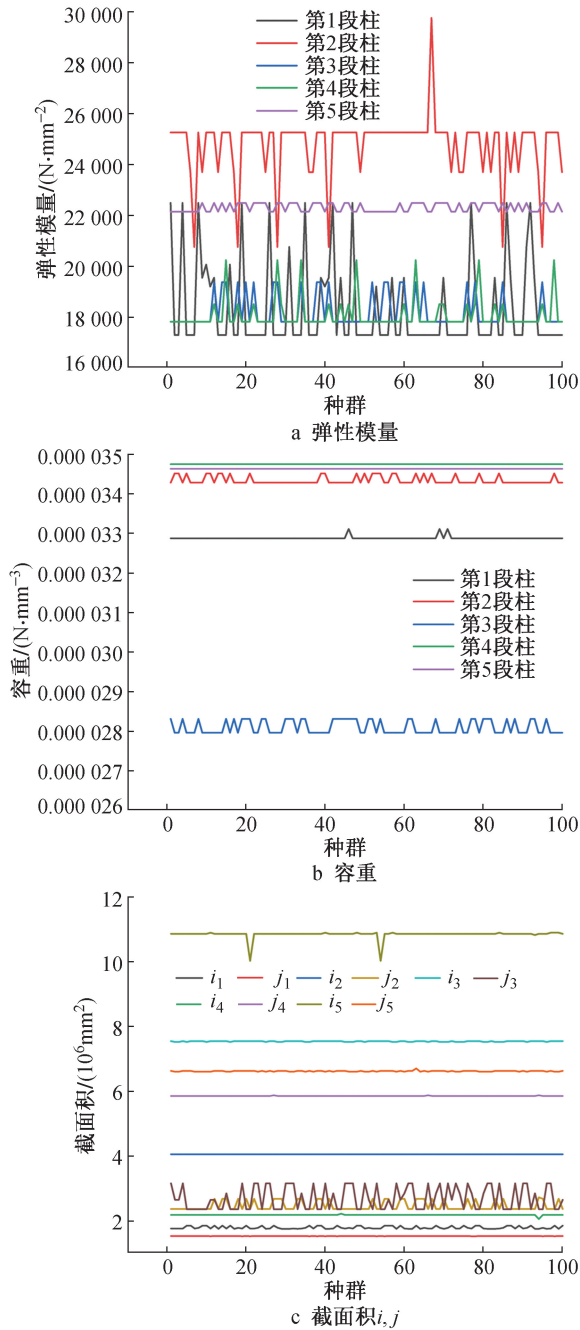


图 3 100 个种群 5 段柱的参数

Fig. 3 Parameters of the five-segment column for 100 populations

根据最后一次迭代结果,选取 100 个种群个体 5 段柱的弹性模量、容重、截面积  $i, j$  平均值作为最终模型参数修正值,如表 3 所示。

4 修正结果验证

为验证结合 Kriging 和 NSGA2 修正方法对 5 段柱模型参数修正结果的正确性,将 5 段柱修正前后的模型参数输入 MIDAS FEA NX 软件中进行分析,得到南北侧的沉降量。即 W 异形柱模型修正前,其

表 3 模型参数修正值及其比较结果

Table 3 Corrected values of model parameters and their comparison results

模型参数	修正值	初始值	相差/%
第 1 段柱弹性模量 $E_1/(N \cdot mm^{-2})$	18 322.43	34 554	-46.97
第 1 段柱容重 $\gamma_1/(N \cdot mm^{-3})$	$3.288 4 \times 10^{-5}$	$2.336 5 \times 10^{-5}$	40.74
第 1 段柱截面积 $i_1/mm^2$	1 795 123.2	1 508 600	18.99
第 1 段柱截面积 $j_1/mm^2$	1 533 203.1	1 025 513.6	49.51
第 2 段柱弹性模量 $E_2/(N \cdot mm^{-2})$	24 768.41	34 554	-28.32
第 2 段柱容重 $\gamma_2/(N \cdot mm^{-3})$	$3.434 0 \times 10^{-5}$	$2.336 5 \times 10^{-5}$	46.97
第 2 段柱截面积 $i_2/mm^2$	4 055 200	2 749 600	47.48
第 2 段柱截面积 $j_2/mm^2$	2 185 695.2	1 508 645.55	44.88
第 3 段柱弹性模量 $E_3/(N \cdot mm^{-2})$	18 177.11	34 554	-47.40
第 3 段柱容重 $\gamma_3/(N \cdot mm^{-3})$	$2.810 0 \times 10^{-5}$	$2.336 5 \times 10^{-5}$	20.27
第 3 段柱截面积 $i_3/mm^2$	5 857 163	4 414 200	32.69
第 3 段柱截面积 $j_3/mm^2$	2 468 192	2 749 602.17	-10.23
第 4 段柱弹性模量 $E_4/(N \cdot mm^{-2})$	18 092.34	34 554	-47.64
第 4 段柱容重 $\gamma_4/(N \cdot mm^{-3})$	$3.474 9 \times 10^{-5}$	$2.336 5 \times 10^{-5}$	48.72
第 4 段柱截面积 $i_4/mm^2$	7 539 840	5 099 500	47.85
第 4 段柱截面积 $j_4/mm^2$	2 696 863	4 414 152.12	-38.90
第 5 段柱弹性模量 $E_5/(N \cdot mm^{-2})$	22 306.62	34 554	-35.44
第 5 段柱容重 $\gamma_5/(N \cdot mm^{-3})$	$3.463 2 \times 10^{-5}$	$2.336 5 \times 10^{-5}$	48.22
第 5 段柱截面积 $i_5/mm^2$	10 846 244	7 240 800	49.79
第 5 段柱截面积 $j_5/mm^2$	6 620 565	5 099 548.55	29.83

南北两侧沉降量分别为 62.656 3, 62.656 4mm。模型修正后,南北两侧沉降量分别为 203.074 5, 203.074 8mm,实际测量的南北两侧沉降量分别为 217, 218mm,修正后的 W 异形柱模型一定程度上能够准确反映实际结构当前状态,进一步证实 Kriging 和 NSGA2 相结合修正方法的有效性、可行性。

5 W 异形柱修正前后的内力分析

W 异形柱作为典型的大型混凝土异形柱,进行结构模型修正前后的内力分析非常重要<sup>[15-18]</sup>,其必要性如下。

### 1) 准确性评估

结构模型通常根据假设和简化建立,无法完全反映实际结构的复杂性和非线性行为。根据修正前后的内力分析结果,可评估修正方法对内力分布的改善程度,从而提高模型准确性、可靠性。

### 2) 结构性能预测

准确的内力分析对预测结构性能至关重要。内力分布直接影响结构强度、刚度、稳定性等指标。通过分析修正前后的内力,可更准确评估结构承载力、变形行为和破坏机制,为结构设计优化和安全评估提供基础。

### 3) 模型验证

分析结构模型修正前后的内力是验证修正方法是否有效的重要手段。通过与实测数据相比,可验证修正后模型的准确性、可靠性。如果修正后的模型能够更好地拟合实测数据,说明修正方法有效,可提高对结构性能的信心。

准确的内力分析对结构工程实践至关重要。在结构设计和评估阶段,了解结构各部分内力分布有助于制定合理的设计方案和控制措施。此外,修正前后的内力分析还可用于损伤识别和健康监测等领域,提高结构可持续性和安全性。

鉴于 W 异形柱南北两侧对称性,两侧内力值基本相同,因此只提取一侧进行内力分析。结构模型修正前后南侧各节段的轴力、剪力、弯矩如图 4 所示。

根据图 4 可知,W 异形柱自上而下,轴力、剪力、弯矩不断增加。同时,修正后的 W 异形柱模型与修正前相比,5 段柱的轴力、剪力、弯矩均有所增加。南侧第 1~5 段柱,平均轴力分别增加 87.56%,104.48%,81.35%,68.43%,74.98%,平均剪力分别增加 87.56%,104.48%,81.35%,68.43%,74.98%,平均弯矩分别增加 94.25%,101.91%,89.51%,82.42%,78.53%。平均轴力增加最大的是第 2 段,由初始 181.613kN 增加至 371.355kN,增幅为 104.48%,最小的是第 4 段,由初始 764.784kN 增至 1 288.130kN,增幅为 68.43%。平均剪力增加最大的是第 2 段,由初始 311.539kN 增至 637.020kN,增幅为 104.48%,最小的是第 4 段,由初始 1 311.910kN 增至 2 209.650kN,增幅为 68.43%。平均弯矩增加最大的是第 2 段,由初始 1 545.480kN·m 增至 3 120.420kN·m,增幅 101.91%,最小的是第 5 段,由初始 18 776.900kN·m 增至 33 521.700kN·m,增幅 78.53%。

综上所述,W 异形柱模型修正前后内力增加结

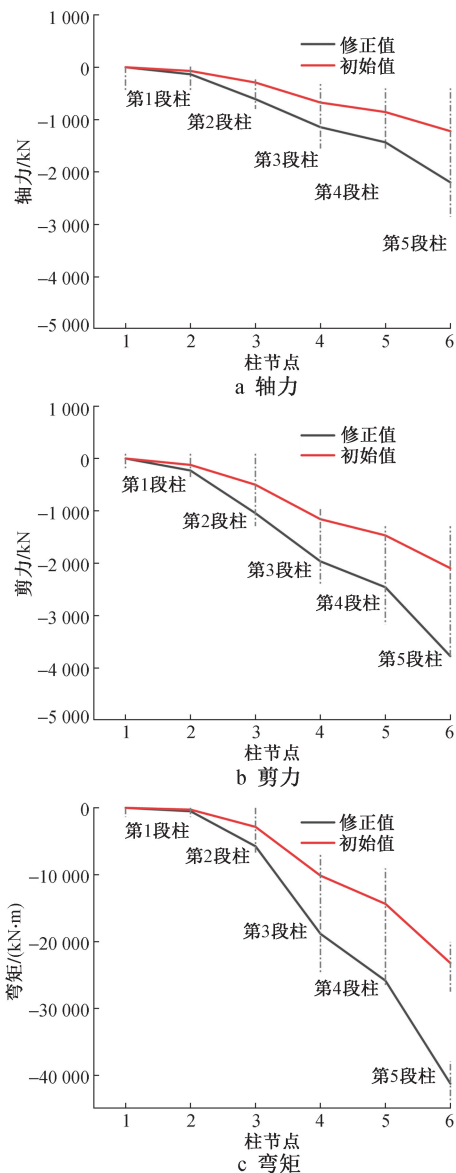


图 4 W 异形柱南侧有限元模型受力分析  
Fig. 4 Force analysis of finite element model of the south side W-shaped column

果可解释实际结构当前状态,即 W 异形柱南北两侧出现 217,218mm 沉降,很大程度上是结构内力显著增加所致。

## 6 结语

1) 初始 W 异形柱有限元模型南北两侧沉降量分别为 62.656 3,62.656 4mm,与实际测量结果存在较大偏差。结合 W 异形柱现场裂缝情况,初步判断 W 异形柱发生一定损伤,因此需要对 W 异形柱结构进行模型修正。

2) 将 W 异形柱有限元模型修正后,南北两侧沉降量分别为 203.074 5,203.074 8mm,与实测结果的 217,218mm 接近,验证该修正方法的正确性。

3) W 异形柱有限元模型修正后,5 段柱内力均

有一定程度增加。其中,平均轴力、平均剪力、平均弯矩增加最多的均为第 2 段,增幅分别为 104.48%, 104.48%, 101.91%,一定程度上导致 W 异形柱南北两侧沉降。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 周林仁,叶文许.空间桁架结构特征响应信息对模型修正的影响机理分析[J].振动与冲击,2023,42(17):1-8.  
ZHOU L R, YE W X. Analysis of influence mechanism for characteristic response information of spatial truss structure on model modification [J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(17): 1-8.
- [ 2 ] 何子豪,吴邵庆.结合 SVR 响应面与粒子群优化的有限元模型修正[J].振动与冲击,2023,42(15):163-172,240.  
HE Z H, WU S Q. Finite element model modification combining SVR response surface and particle swarm optimization [J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(15): 163-172,240.
- [ 3 ] 陈伟明.隔震结构贝叶斯有限元模型修正及动力可靠度分析方法研究[D].广州:广州大学,2023.  
CHEN W M. Research on Bayesian finite element model modification and dynamic reliability analysis method of isolated structures [D]. Guangzhou:Guangzhou University, 2023.
- [ 4 ] 柳振海,李刚,刘博,等.考虑参数不确定性的海上风电结构模型修正方法[J].电力勘测设计,2024(3):6-11,27.  
LIU Z H, LI G, LIU B, et al. Model modification method of offshore wind power structure considering parameter uncertainty [J]. Electric power survey & design, 2024(3): 6-11,27.
- [ 5 ] 唐和生,王泽宇,陈嘉缘.基于数字孪生和深度学习的结构损伤识别[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(1):110-121.  
TANG H S, WANG Z Y, CHEN J Y. Structural damage identification based on digital twins and deep learning [J]. Journal of civil and environmental engineering, 2024, 46(1): 110-121.
- [ 6 ] 祁泉泉,辛克贵.改进的 Berman-Baruch 法在非比例阻尼有限元模型修正中的应用[J].工程力学,2012,29(7):1-5.  
QI Q Q, XIN K G. Application of improved Berman-Baruch method in non-proportional damping finite element model modification [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(7): 1-5.
- [ 7 ] VIKAS A, SONDIPON A, KIRAN V. FRF-based finite element model updating for non-viscous and non-proportionally damped systems[J]. Journal of sound and vibration, 2023,552.
- [ 8 ] QIU S Q, ZHOU Y Z, CAI H Y, et al. Identification of multiple alternative solutions in structural model updating using multiple subswarm particle swarm optimization [J]. Engineering optimization, 2023,55(2):271-290.
- [ 9 ] CHEN L Y, HUANG X C, YI H. Structural model updating study in consideration of complex pre-stress distribution [J]. Journal of low frequency noise, vibration and active control, 2021,40(3):21-27.
- [ 10 ] 秦世强,张亚州,康俊涛.基于改进稳态遗传算法的桥梁有限元模型修正[J].中山大学学报(自然科学版),2020,59(4):79-88.  
QIN S Q, ZHANG Y Z, KANG J T. Bridge finite element model modification based on improved steady-state genetic algorithm [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2020, 59(4): 79-88.
- [ 11 ] CAI Z J, ZHANG W, ZHANG K, et al. Multi-objective optimization of proton exchange membrane fuel cells by RSM and NSGA-II [J]. Energy conversion and management, 2023, 277:1531257.
- [ 12 ] 项雄标,张新娜,周康康,等.基于响应曲面法和 NSGA2 的凸轮轴磨削参数优化[J].金刚石与磨料磨具工程,2023,43(3):348-354.  
XIANG X B, ZHANG X N, ZHOU K K, et al. Optimization of camshaft grinding parameters based on response surface method and NSGA2 [J]. Diamond & abrasives engineering, 2023, 43(3): 348-354.
- [ 13 ] 卜康正,赵勇,郑先昌.基于 NSGA2 遗传算法的地铁隧道上方基坑工程优化设计[J].铁道科学与工程学报,2021,18(2):459-467.  
BU K Z, ZHAO Y, ZHENG X C. Optimization design of foundation excavation engineering above subway tunnel based on NSGA2 genetic algorithm [J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(2): 459-467.
- [ 14 ] 董青,陈钰浩,刘永刚,等.基于优化加点代理模型的桥梁结构疲劳寿命预测方法[J].机械强度,2023,45(3):729-742.  
DONG Q, CHEN Y H, LIU Y G, et al. Prediction method of fatigue life for bridge structure based on optimized interpolation surrogate model [J]. Journal of mechanical strength, 2023, 45(3): 729-742.
- [ 15 ] HALICKA A, ZIEBA J. Influence of subsoil model on safety and eco-efficiency of reinforced concrete structure for rectangular liquid tank founded beneath the terrain surface [J]. Engineering structures, 2024,303117571.
- [ 16 ] 孟啸.深基坑地下结构逆作施工内力变形试验与数值分析[J].铁道建筑技术,2024(3):171-175.  
MENG X. Experimental and numerical analysis of internal force and deformation for underground structure during top-down construction of deep foundation excavation [J]. Railway construction technology, 2024(3): 171-175.
- [ 17 ] 张斌,陈孝湘,龚建伍.复合地层大口径顶管管道结构内力影响因素分析[J].电力勘测设计,2023(S2):40-45.  
ZHANG B, CHEN X X, GONG J W. Analysis of influencing factors of internal force for large diameter pipe jacking pipeline structure in composite stratum [J]. Electric power survey & design, 2023(S2): 40-45.
- [ 18 ] 黄慎江,昌洋.基于拆除构件法的大跨度预应力网架屋盖-框架结构的内力重分布分析[J].建筑结构,2023,53(S2):552-556.  
HUANG S J, CHANG Y. Analysis of internal force redistribution for long-span prestressed grid roof-frame structure based on method of removing components [J]. Building structure, 2023, 53(S2): 552-556.