

初始缺陷对超大型双曲冷却塔极限承载力的影响

赵 海¹, 白国良¹, 徐亚洲¹, 姚友成², 杜吉克²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院, 陕西 西安 710075)

摘 要: 施工误差、材料性能不均匀等不可控制因素必然导致冷却塔结构具有一定的初始缺陷, 本文主要研究了初始缺陷对冷却塔结构弹塑极限承载力的影响。通过弹性屈曲分析和自振特性分析, 获得冷却塔结构的屈曲模态及振型, 进而将结构初始缺陷视为由模态贡献系数调制的确定性函数(正交模态)的线性组合形式, 在考虑材料非线性的前提下, 采用修正的弧长法分析结构的弹塑性极限承载力。算例结果表明: 冷却塔对振型初始缺陷构形较屈曲模态缺陷构型更为敏感, 该方法可以有效地寻求结构初始缺陷的最不利分布形式, 适用于大型工程结构的初始缺陷分析。

关键词: 弧长法; 初始缺陷; 屈曲模态; 双曲冷却塔; 材料非线性; 模态贡献系数

中图分类号: TU33+2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)06-0777-07

双曲冷却塔主要由钢筋混凝土双曲线旋转薄壳通风筒、“人”字或“X”型支柱和基础组成。从工程处理的角度讲, 冷却塔筒壁可视为各向同性的线弹性均质壳体结构。从体型上看, 双曲线型旋转薄壳通风筒高度高、体型大, 属于高耸结构。下部的“人”字或“X”型支柱是通风筒的离散支撑结构, 主要承受塔的自重和风载。基础主要承受支柱传递过来的全部载荷。在双曲冷却塔的各个部分中, 双曲线型筒壁是其主体结构, 其所具有的圆型截面使得它对风荷载十分敏感^[1]。因此, 风荷载是双曲冷却塔设计的主要荷载之一。

众所周知, 几何缺陷的影响可以显著减低工程结构的屈曲承载力 (Arbocz 和 Starnes^[2], Khamlichi 等^[3], Papadopoulos 和 Papadrakakis^[4], 严建科等^[5])。这对于冷却塔的运行会造成极大的安全隐患。1973 年, 苏格兰 Adeer Nylon 电厂的一座冷却塔因子午向曲线缺陷引起环向应力增加超过了钢筋的屈服强度而发生倒塌。1979 年法国 Bouchain 和 1984 年英国的 Fiddlers Ferry 电厂相继有冷却塔因几何缺陷问题而倒塌。Al-Dabbagh 等^[6]、Alexandridis 和 Gardner^[7] 分析了建造过程中冷却塔几何缺陷对结构的影响。Radwanska 和 Waszczyszyn^[8] 通过实际的现场实测调查指出: 混凝土的长期行为, 例如徐变收缩等^[9] 会使冷却塔壳体产生几何缺陷。Kemp 和 Croll^[10]、Alexandridis 和 Gardner^[7] 通过对冷却塔壳体的分析发现: 几何缺陷会引起壳体的附加应力, 而且是风荷载作用下结构垮塌的主要原因之一。

1 初始缺陷的模拟方法

屈曲模态是临界点处的结构位移趋势, 也就是结构屈曲时的位移增量模式。在结构最低临界点处, 其所对应的屈曲模态为结构的最低阶屈曲模态, 结构按该模态变形将处于最小势能状态, 所以实际结构在加载的最初阶段是朝着该模态的变形趋势进行。由此可以假设: 若结构的缺陷分布形式恰好与最低阶屈曲模态相符, 则缺陷的引入会对结构受力性能产生最不利的影响。一致缺陷法就是采用最低阶屈曲模态模拟结构的初始缺陷分布。该法希望通过一次非线性计算就能得到缺陷结构的临界荷载最小值, 是计算量尽量小, 这是它的显著优点, 但结构的最低阶屈曲模态不能反映结构在整个非线性分析过程中的变

收稿日期: 2011-02-28 修改稿日期: 2011-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50778150, 50978216); 高等教育博士学科点专项科研基金资助项目(20096120110003); 陕西省科技计划国际合作项目(2008KW-13); 陕西省工业攻关项目(2006K07-G24)

作者简介: 赵 海(1982-), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事随机场理论与结构动力可靠度方向的研究。

形趋势,因此它也就不一定是结构的最不利缺陷分布。

由于施工误差、材料性能不均匀等不可控制因素的存在,必然会导致冷却塔结构具有一定的初始缺陷。然而在结构设计过程中,大部分规范仅给定了初始缺陷的最大值,并没有明确指出相应的缺陷形式^[11]。本文将结构的初始缺陷视为由模态贡献系数调制的确定性函数(正交模态)的线性组合形式,即以结构的多阶屈曲模态或自振振型模态按一定比例叠加为结构的初始几何缺陷构型,从而探究缺陷对结构的影响。

将几何初始缺陷引入到结构中通常要对同一结构模型进行两次分析:

1. 对初始的无缺陷结构进行本征值屈曲分析,确定结构可能的屈曲模式,同时证实网格离散模型结构的精确性。将本征模态作为结果文件写入到节点数据中。

2. 将上步分析所得的屈曲模态引入到无缺陷的结构模型中,从而记及结构几何缺陷的影响。一阶屈曲模态通常假定为结构的最不利缺陷构型,它们通常被按比例施加到结构的理想模型上,从而进行考虑缺陷影响的极限承载力分析。

初始几何缺陷可以表示为:

$$\Delta x_i = \sum_{i=1}^M \omega_i \phi_i \quad (1)$$

式中, ϕ_i 为第 i 阶模态形状, ω_i 为相应的比例因子。通常情况下,如果结构对几何缺陷不敏感,则第一阶屈曲模态应具有最大的比例因子。扰动幅度通常取决于结构几何尺寸,如可按梁截面或者壳厚度的百分比确定。

2 考虑初始缺陷影响的屈曲稳定分析理论

2.1 特征值屈曲分析

分析结构稳定时,在基于线弹性特征值屈曲响应分析中,结构屈曲的临界荷载可以表示为:

$$P_{cri} = \lambda_i Q \quad (2)$$

式中, Q 为作用荷载; λ_i 为屈曲特征值或屈曲荷载因子,本文采用 Block Lanczos^[12] 方法求解冷却塔的特征值,其控制方程为:

$$([K_L] + \lambda_i [K_G]) \cdot \{\delta\} = 0 \quad (3)$$

式中: $[K_L]$ 为结构总体弹性刚度矩阵,即小位移的线性刚度矩阵; $[K_G]$ 为结构总体几何刚度矩阵,也称初始应力刚度矩阵; $\{\delta\}$ 为特征位移向量。

屈曲模态及其本征值是屈曲分析中最重要的输出结果,而且屈曲模态还反映了结构失稳时的构型,其中结构的一阶屈曲模态与屈曲承载力相联系,故具有重要的工程意义。

2.2 非线性极限荷载的求解理论

研究表明,弹性屈曲分析结果通常较实际承载力大很多。所以,需要考虑材料非线性和几何非线性的影响,可以采用弧长法分析此类问题。该方法假设荷载是成比例的,即荷载大小是随着单一标量参数的变化而变化的;此外,弧长法假设结构的反应不存在突然的分歧点。在节点变量和荷载参数定义的空间中,弧长法的解答被视为是单一平衡路径的新发现。求解方法的发展要求我们要尽可能横切这条路径。该算法基本保留了牛顿法,因此,在任何情况下都具有有限的收敛半径。考虑具有路径依赖性的材料甚至荷载的反应时,修正的弧长算法通过移动假定的距离(通常由标准,路径依赖的收敛速度和静态的自动增量算法决定)来限制增量的大小。该算法沿着当前求解点的切线移动,随后在穿过该点并与该点的切线垂直的平面内寻求平衡解。

假设 P^N (N 为模型的自由度) 为加载方式, λ 为荷载大小参数,则任意大小的荷载可以表示为 λP^N , 设 u^N 为与荷载相对应的位移,算法如图 1 所示。

假设在已知解 $A_{\text{点}}^0 = (\bar{u}_0^N; \lambda_0)$, 刚度矩阵为 K_0^{NM} , 并且已经解出 $K_0^{NM} \bar{v}_0^M = P^N$ 。则增量的大小(由 A^0 到 A^1) 是从解空间中指定的路径长度 Δl 中选取的,即 $\Delta \lambda_0^2 (\bar{v}_0^N; 1) : (\bar{v}_0^N; 1) = \Delta l^2$, 因此, $\Delta \lambda_0 = \pm \Delta l / (\bar{v}_0^N \bar{v}_0^N + 1)^{\frac{1}{2}}$, 这里的 \bar{v}_0^N 就是 \bar{v}_0^N 。 Δl 的值起初是由用户自己定义的,但对于静力问题,可采用自动增量算法

调整 Δl 值. 通过选取沿切线响应方向的 $\Delta \lambda_0$, 使得对于一个增量 $(\bar{u}_{-1}^N; \Delta \lambda_{-1})$ 来说, $\Delta \lambda_0 (\bar{v}_0^N; 1)$ 的点积为正, 即

$$\Delta \lambda_0 (\bar{v}_0^N \Delta \bar{u}_{-1}^N + \Delta \lambda_{-1}) > 0 \quad (4)$$

假设当前的荷载大小为 P_{total} , 则 $P_{\text{total}} = P_0 + \lambda(P_{\text{ref}} - P_0)$. 这里的 P_0 为恒载, P_{ref} 为参考荷载向量, λ 为荷载比例因子.

2.3 模态贡献系数

2.3.1 屈曲模态贡献系数

模态贡献系数定义为单个模态引起的结构位移与结构所有模态产生的结构总位移的比值, 它反映了结构各阶模态在结构总位移中的贡献比例. 模态贡献系数越大, 其贡献越多.

结构第 j 阶模态的模态贡献系数^[13] ($\sum_{j=1}^N \alpha_j = 1.0$)

$$\alpha_j = \frac{\Delta_j}{\Delta_{\text{total}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: Δ_j 为由第 j 个模态引起的结构所有自由度上的位移绝对值之和, Δ_{total} 为结构所有模态引起的结构位移总和.

2.3.2 振型贡献系数

通过有限元分析可得按质量归一化后的各阶模态, 计算振型参与系数的公式为:

$$\gamma_j = \frac{\phi_j^T M I}{\phi_j^T M \phi_j} = \frac{\phi_j^T M I}{M_j} \quad (6)$$

式中: γ_j 为第 j 阶振型参与系数; ϕ_j 为结构第 j 振型; M 为结构的质量矩阵; I 为单位阵.

各阶模态有效质量 M_j^{eff} 的计算公式为:

$$M_j^{\text{eff}} = \gamma_j^2 M_j = (\phi_j^T M I)^2 / M_j \quad (7)$$

振型对结构响应的贡献通过计算振型参与系数的方法是比较困难的, 但可以通过计算各阶模态有效质量与结构总质量的比值 $\sum_j M_j^{\text{eff}} / M_{\text{total}}$ 作为各阶模态振型的贡献系数.

3 算例分析

3.1 模型基本参数

某间接空冷塔高 250.0 m, 喉部直径 113.0 m, 进风口直径 186.0 m, 进风口高度 28.5 m, 冷却塔壳体最小厚度 420 mm, 采用 66 对 X 型柱 (1.2 m × 1.7 m) 支撑, 冷却塔为 C45 钢筋混凝土结构, 其弹性模量为 3.35e10 N/m², 环基为 C35 钢筋混凝土结构, 其弹性模量为 3.15e10 N/m², 泊松比为 0.2.

3.2 单元特性

ABAQUS 建模中, 选取三维 4 节点、四边形、应力/位移壳单元 (S4R) 模拟冷却塔塔筒; 选取一阶、2 节点、剪切变形三维梁单元 (B31) 模拟冷却塔结构的 X 型柱, 有限元模型三维视图见图 2.

3.3 荷载模式: 自重+内吸力+外部风压.

重力荷载: 考虑到施工阶段冷却塔的安全性, 整体屈曲分析时其自重考虑放大系数 1.5.

冷却塔内筒吸力: 塔筒内表面风吸力为均布荷载, 其大小为塔筒顶部所受风荷载的 0.5 倍.

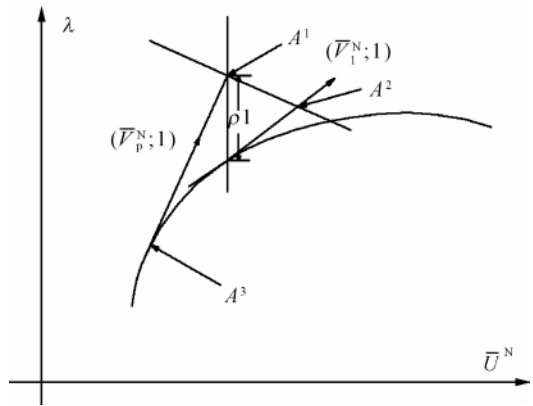


图1 修正的弧长算法

Fig. 1 Algorithm for the modified arc-length method

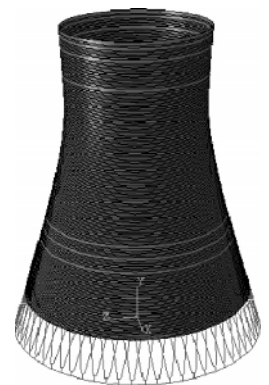


图2 ABAQUS 冷却塔有限元模型

Fig. 2 ABAQUS finite element model of the hyperbolic cooling tower

风荷载:《火力发电厂水工设计规范》中规定:作用在双曲线冷却塔表面上的等效风荷载标准值按下式计算:

$$\omega_e = \gamma_0 w(Z, \theta) = \gamma_0 \beta C_g C_p(\theta) \mu_z(Z) w_0 \tag{8}$$

式中: γ_0 为结构重要性系数,取 1.1; $w(Z, \theta)$ 为作用在塔表面上的等效风荷载标准值; w_0 为基本风压,取 600 N/m²; $C_p(\theta)$ 为平均风压分布系数(取值见表 1); β 为风振系数,取 1.9; μ_z 为风压高度变化系数; C_g 为塔间干扰系数 $1.2 \geq 1.0$.

水工规范中规定冷却塔的平均风压分布系数 $C_p(\theta)$ 的取值为:

$$C_{P(\theta)} = \sum_{k=0}^m \alpha_k \cos(k\theta) \tag{9}$$

当 $m = 7$ 时的 8 个拟合系数值 α_k 分别为: $-0.442\ 6, 0.245\ 1, 0.675\ 2, 0.535\ 6, 0.061\ 5, -0.138\ 4, 0.001\ 4, 0.065$.

表 1 中的 $C_p(\theta)$ 值依据的是国外相关文献对冷却塔平均风压分布系数取值,图 3 将本文采用的平均风压分布系数取值与规范给出的取值做了相应的对比.

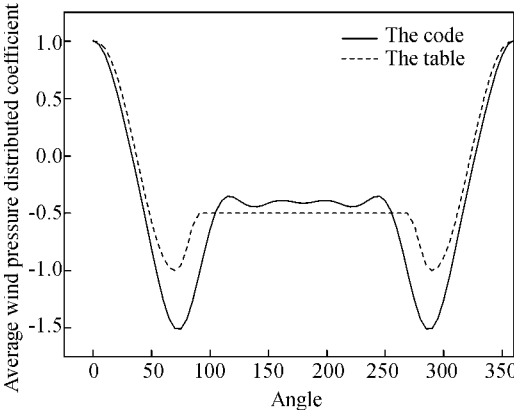


图 3 平均风压分布系数对比图
Fig. 3 Comparison of the average wind pressure distribution coefficient

表 1 平均风压系数

Tab. 1 The mean wind pressure coefficient

Curve Numbers	θ values	$C_p(\theta)$ values
Piecewise function I	$0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$	$1 - 2.0 \times \left(\sin\left(\frac{90^\circ}{70^\circ} \times \theta\right) \right)^{2.267}$
Piecewise function II	$70^\circ \leq \theta \leq 91^\circ$	$-1.0 + 0.5 \times \left(\sin\left(\frac{90^\circ}{21^\circ} \times (\theta - 70^\circ)\right) \right)^{2.395}$
Piecewise function III	$91^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$	-0.5

3.4 分析结果

3.4.1 屈曲模态为初始缺陷对冷却塔的影响

结构的前六阶屈曲本征值和振动频率如表 2 所示.考虑以屈曲模态为初始缺陷时,同时分别考虑了模态阶数和振型幅值的变化对结构极限承载力的影响.

屈曲模态选取时剔除了冷却塔的局部振型.前两阶屈曲模态贡献率分别为 47%和 53%;前三阶贡献率分别为 23%、27%和 50%.不同工况条件下的结构极限荷载比例系数计算结果如表 3 所示.

表 2 前六阶屈曲本征值和振动频率

Tab. 2 The first six-order buckling eigenvalues and frequency

Buckling mode	Buckling eigenvalues	Vibration mode	Frequency /Hz
1	14.309	1	0.503
2	14.414	2	0.505
3	14.777	3	0.554
4	-15.182	4	0.556
5	-15.208	5	0.598
6	15.251	6	0.599

表 3 不同工况条件下结构极限荷载比例系数

Tab. 3 Proportional limit load factors under different conditions

Conditions	Mode orders	Modal shape amplitude /m	proportionality factors
1	1	0.05	1.91
2	1	0.1	1.742
3	1	0.2	1.803
4	1 and 2	0.05	1.646
5	1 and 2	0.1	1.672
6	1 and 2	0.2	1.772
7	1, 2 and 3	0.05	1.768
8	1, 2 and 3	0.1	1.745
9	1, 2 and 3	0.2	1.674
10	Perfect structure	/	2.856

工况 1、2 和 3 即为不同幅值条件下,按照一致缺陷模态法计算得到结构极限荷载比例系数.从计算结果可以看出:一致缺陷法中极限荷载比例系数最小值为 1.742,但这并非冷却塔最不利的极限荷载比例系数.当以前两阶模态叠加,幅值为 0.05 m 时,结构的极限荷载比例系数最小,其值为 1.646,与无缺陷的冷却塔结构相比,极限荷载比例系数降低了 42.4%.极限荷载比例系数随模态阶数和幅值的变化趋势如图 4 所示,不同工况条件极限荷载比例因子对比图如图 5 所示.

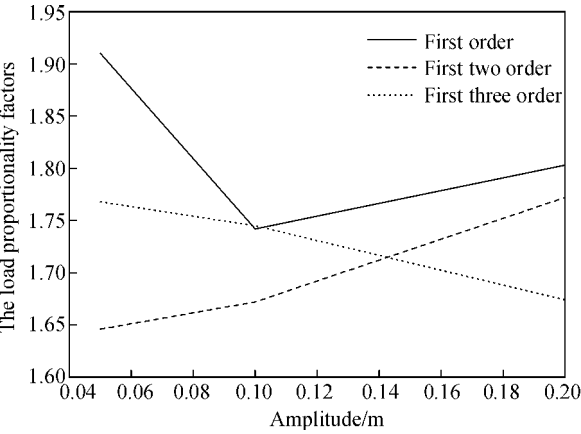


图 4 极限荷载比例系数变化趋势图

Fig. 4 The trend of proportional limit load factors

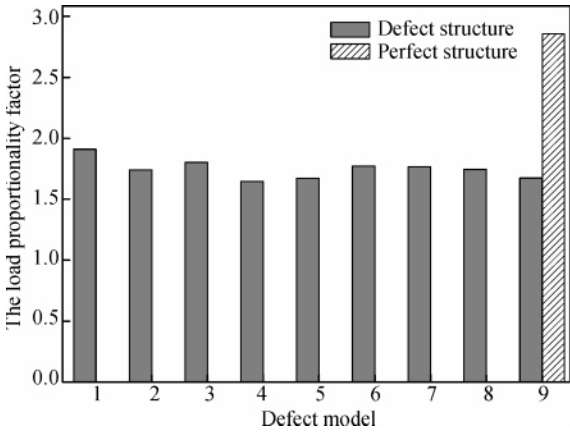


图 5 极限荷载比例因子对比图

Fig. 5 Contrast ratio of ultimate load factor

3.4.2 振型模态为初始缺陷对冷却塔的影响

本文对冷却塔结构的前 50 阶模态的模态振型参与系数进行了分析,前 50 阶振型中,贡献最大的 3 阶振型(第 21、22 和 23 阶振型)X 向平动和 Z 向平动的有效质量比分别可达 0.844 9 和 0.875 3,具体计算如表 4 所示.一般情况下,模态质量参与系数比大于 0.8 时,计算精度就能满足工程精度要求^[14].

表 4 结构的动力特性

Tab. 4 Dynamic properties of the structure

Mode order	X direction translation ratio/%	Z direction translation ratio/%	X direction effective mass participation factor	Z direction effective mass participation factor
21	77.7	22.3	0.785 6	0.064 8
22	19.9	80.1	0.048 6	0.785
23	40.2	59.8	0.010 7	0.023 7
Sum	/	/	0.844 9	0.873 5

考虑振型模态为初始缺陷时,同样考虑了振型阶数和振型幅值的变化对结构极限承载力的影响.前两阶振型贡献率分别为 49.5%和 50.5%;前三阶贡献率分别为 49.5%、48.5%和 2%.不同工况条件下结构的极限荷载比例系数计算结果如表 5 所示.

计算结果表明:以前两阶模态叠加,幅值为 0.1 m 时,结构的极限荷载比例系数最不利,其值为 1.526,与无缺陷的冷却塔结构相比,极限荷载比例系数降低了 46.6%.极限荷载比例系数随振型阶数和幅值的变化趋势如图 6 所示,不同工况条件极限荷载比例因子对比图如图 7 所示.

表 5 不同工况条件下结构极限荷载比例系数

Tab. 5 Proportional limit load factor under different conditions

Conditions	Mode orders	Modal shape amplitude /m	Proportionality factors
1	1	0.05	1.738
2	1	0.1	1.624
3	1	0.2	1.657
4	1 and 2	0.05	1.607
5	1 and 2	0.1	1.526
6	1 and 2	0.2	1.73
7	1, 2 and 3	0.05	1.607
8	1, 2 and 3	0.1	1.713
9	1, 2 and 3	0.2	1.707
10	Perfect structure	/	2.856

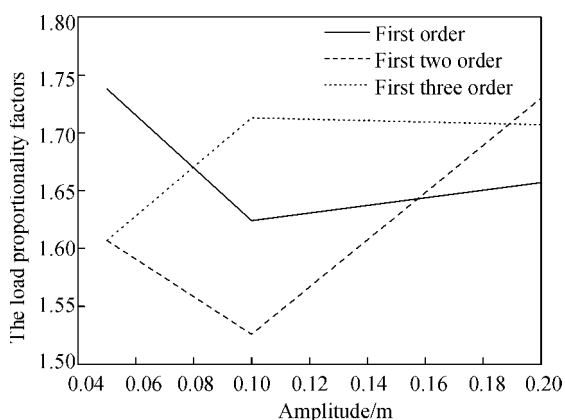


图 6 极限荷载比例系数变化趋势图

Fig. 6 The trend of proportional limit load factors

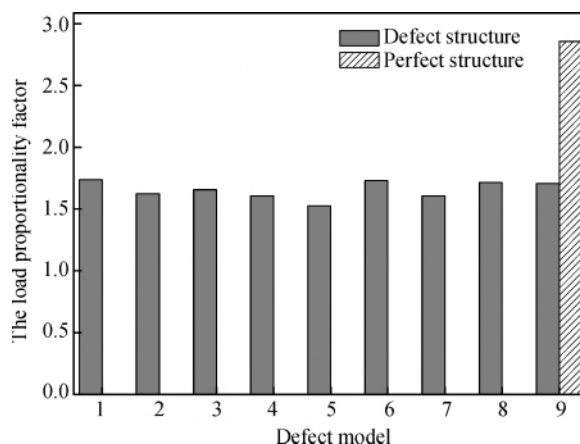


图 7 极限荷载比例因子对比图

Fig. 7 Contrast ratio of ultimate load factor

4 结 论

通过以上分析可以得出以下几点结论:

(1) 在不考虑结构初始缺陷对承载力安全系数的影响时,算例荷载比例因子为 2.856;然而分别以屈曲模态和振型考虑不同模态缺陷时的最不利荷载比例系数值分别为 1.646 和 1.526,与无缺陷冷却塔结构的荷载比例系数相比下降了 42.4% 和 46.6%。可见初始缺陷对双曲冷却塔结构极限承载力的影响是相当可观的,因此该类型结构具有明显的缺陷敏感性。

(2) 在幅值不变的情况下,以振动模态为缺陷构型较屈曲模态为缺陷构型对结构极限荷载比例因子的影响明显,这主要是由于振动模态的总体变形趋势比屈曲模态大,从而导致有限元网格节点处缺陷的幅值相对较大,因此可以推断:该类冷却塔结构对振型初始缺陷构型较屈曲模态缺陷构型敏感。

(3) 多阶模态叠加的缺陷构型使得极限荷载比例因子随缺陷幅值的变化而不再具有规律性,这类缺陷构型的引入可能会随着幅值的增大而提高或降低结构的承载力。

(4) 按照本文的方法得到了较一致缺陷法更为不利的结果,因此,对于缺陷敏感的双曲冷却塔结构而言,需要考虑多阶模态叠加的缺陷构型,以便全面地考虑初始缺陷对结构承载力的不利影响。该方法对于考虑初始缺陷影响的大型复杂结构的稳定性分析,具有很好的实际应用的意义。

参考文献 References

- [1] 杨智春, 李 斌, 樊丽君. 双曲冷却塔在风载下的应力分析与屈曲稳定性分析[J]. 工程力学, 2003(增刊): 385-387.
YANG Zhi-chun, LI Bin, FAN Li-jun. Hyperbolic cooling towers under wind load on the stress analysis and buckling stability analysis [J]. Engineering Mechanics, 2003(Supplement): 385-387.
- [2] ARBOCZ J, STARNES J H. Future directions and challenges in shell stability analysis [J]. Thin-Walled Structures, 2002, 40(9): 729-754.
- [3] KHAMLI CHI A, BEZZAZI M, LIMAM A. Buckling of elastic cylindrical shells considering the effect of localized axisymmetric imperfections [J]. Thin-Walled Structures, 2004, 42: 1035-1047.
- [4] PAPADOPOULOS V, PAPADRAKAKIS M. Finite-element analysis of cylindrical panels with random initial imperfections [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130 (8): 867-876.
- [5] 严建科, 吕 婷, 贺拴海. 有初始几何缺陷混凝土系杆拱桥极限承载力分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 42 (1): 54-59.
YAN Jian-ke, LÜ Ting, HE Shuan-hai. Ultimate load carrying capacity analysis of concrete tied arch bridges with initial geometric defects[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 42 (1): 54-59.
- [6] AL-DABBAGH A, GUPTA A K. Meridional imperfection in cooling tower design [J]. J. Struct. Div., ASCE,

- 1979, 105 (6): 1089-1102.
- [7] ALEXANDRIDIS A, GARDNER N J. Tolerance limits for geometric imperfections in hyperbolic cooling towers [J]. J. Struct. Engrg., ASCE, 1992, 118 (8): 2082-2100.
- [8] RADWANSKA M, WASZCZYSZYN Z. Buckling analysis of a cooling tower shell with measured and theoretically-modelled imperfections [J]. Thin-Walled Struct., 1995, 23 (1-4): 107-121.
- [9] JULLIEN J F, AFLAK W, L'HUBY, Y. Cause of deformed shapes in cooling towers [J]. J. Struct. Engrg., ASCE, 1994, 120 (5): 1471-1488.
- [10] KEMP K O, CROLL J G A. The role of geometric imperfections in the collapse of a cooling tower [J]. The Struct. Engrg., London, 1976, 54 (1): 33-38.
- [11] 顾明剑, 张其林. 引入一阶屈曲模态作为初始缺陷的研究 [J]. 工业建筑, 2005(增刊): 1188-1192.
GU Ming-jian, ZHANG Qi-lin. The first-order buckling mode as the study of initial defects [J]. Industrial Building, 2005(Supplement): 1188-1192.
- [12] 董石麟, 钱若军. 空间网格结构分析理论与计算方法 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 242-243.
DONG Shi-lin, QIAN Ruo-jun. Space grid structure analysis theory and the calculation method [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000: 242-243.
- [13] 马坤全, 潘湘文, 沈钱斌. 空间缆索自锚式悬索桥模态贡献系数分析 [J]. 桥梁建设, 2009(1): 11-14.
MA Kun-quan, PAN Xiang-wen, SHEN Qian-bin. Analysis of modal contribution coefficients of spatial cable self-anchored suspension bridge [J]. Bridge Construction, 2009(1): 11-14.
- [14] 王雪亮, 瞿伟廉, 刘晖. 广州新电视塔的动力特性有限元分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29: 142-144.
WANG Xue-liang, QU Wei-lian, LIU Hui. Finite element analysis on dynamic characteristics of super high tower in Guangzhou [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(1): 142-144.

The influence of initial imperfections on the ultimate bearing capacity of super-large hyperbolic cooling towers

ZHAO Hai¹, BAI Guo-liang¹, XU Ya-zhou¹, YAO You-cheng², DU Ji-ke²

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an, 710075, China)

Abstract: The uncontrollable factors such as construction error, material inhomogeneity, etc. will inevitably lead to a certain initial imperfection. This paper mainly studies the initial defects of the cooling tower structure in the elastic-plastic stage influencing on the ultimate bearing capacity. Through elastic buckling analysis and the self-vibration characteristics of analysis, the buckling modes and the vibration modes multiplied by the modal contribution coefficients are introduced into the structure as the initial defects of hyperbolic cooling towers, taking into account the nonlinear material under the premise of the modified arc-length method in order to amend the elastoplastic ultimate bearing capacity of the structure. In the end, the numerical results show that: the super-large hyperbolic cooling tower with vibration mode initial imperfections is more sensitive than with buckling mode initial imperfections. The method can efficiently facilitate the search for the most unfavorable initial imperfection distribution form, so it can be applied to large-scale engineering structure initial imperfection analysis.

Key words: arc-length method; initial imperfections; buckling modes; hyperbolic cooling towers; material nonlinearity; modal contribution coefficients