

大型自然通风冷却塔抗震仿真分析

林伶俐, 徐荣彬

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 对于大型自然通风冷却塔的抗震计算常采用有限元法进行模拟分析, 由于冷却塔体型较大, 精细的模型计算耗时长, 较稀疏的单元划分的计算结果无法保证准确性。本文在对某大型冷却塔进行整体有限元分析的基础上, 将结构的薄弱部位取出, 对其进行精细的结构细部有限元分析。计算结果表明, 地震荷载作用下冷却塔的变形集中在支柱位置。

关键词: 大型自然通风冷却塔; 抗震; 仿真

中图分类号: TU347

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0101-04

Seismic Simulation of Large Natural Draft Cooling Tower

LIN Lingli¹, XU Rongbin²

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Finite element analysis will be chosen to do the anti-seismic calculation of large natural draft cooling tower in most conditions. Due to the large size of cooling tower, however, it will take a long time to calculate with a fine meshed modal. At the same time, a thin meshed modal will not guarantee the accuracy of the results. In this paper, methods of finite element analysis with a fine meshed modal which focus on the weak part of the structure is proposed. It is based on the holistic finite element analysis of a large natural draft cooling tower. This paper proves that deformation of the cooling tower appears mainly on the pillars.

Key words: large natural draft cooling tower; anti-seismic; simulation

随着经济的发展, 发电厂装机容量的不断增大, 循环水系统中的冷却塔的体型越来越大。常用的《工业循环水冷却设计规范》(GB/T 50102—2003)中, 主要适用于塔高 165 m 以下的大型自然通风冷却塔。对于超过 165 m 的大型自然通风冷却塔, 现有规范的适用性无法保证, 需要使用有限元法进行仿真模拟计算。在对大型自然通风冷却塔进行抗震有限元分析时, 为了节省计算工作量, 通常只能采用一些宏观单元进行有限元模拟, 而不能采用划分较密的实体单元等进行精细分析, 这样虽然可以把握结构的整体受力性能, 却不能清楚地了解薄弱部位局部的应力情况。结构细部法可以在整体模型的基础上, 对局部进行精密分析, 同时兼顾了计算精度和计算效率。工程经验表明, 在强烈地震

作用下, 支承塔筒的支柱上下端以及与柱上端相连的塔壳底部将成为整个结构的薄弱部位, 为准确了解薄弱部位的受力情况, 本文在整体分析的基础上, 将薄弱部位从整体模型中取出, 对其进行精细的结构细部分析。

本文的研究可以为大型自然通风冷却塔结构的抗震设计和抗震加固区域提供参考。

1 整体结构分析

1.1 分析方法

本文研究的大型冷却塔为一座淋水面积为 20 000 m² 的逆流式自然通风双曲线冷却塔, 塔总高 215 m, 底面直径 162 m, 塔壳顶部直径为 108 m, 塔壳喉部高 166 m, 喉部直径 100.5 m, 通风筒壳体最小厚度为 370 mm, 最大厚度为 2 000 mm, 塔壳由 56 对人字形斜支柱支承, 斜支柱直径 1 900 mm。

采用 ANSYS 和 ABAQUS 这两种有限元分析软

收稿日期: 2015-12-01

作者简介: 林伶俐, 男, 职称: 高级工程师, 学位: 硕士, 主要从事总承包管理、水工结构方面研究工作(e-mail)linlingli@gedi.com.cn。

件对冷却塔结构进行整体建模和计算。本文主要研究冷却塔在地震动荷载下的应力水平和变形情况，因此在本文中有限元模型运行安全地震动水平(0.10 g)下的弹性时程分析和极限安全地震动水平(0.20 g)下的弹塑性时程分析。冷却塔塔壳采用壳单元模拟，人字形支柱采用梁单元模拟，环板采用三维实体单元模拟，各部分结构均考虑混凝土与钢筋的共同作用。基于刚性地基假设的冷却塔有限元模型如图1所示。

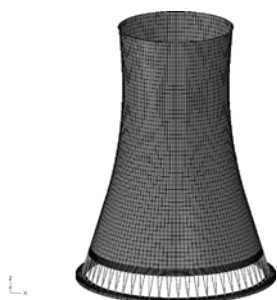


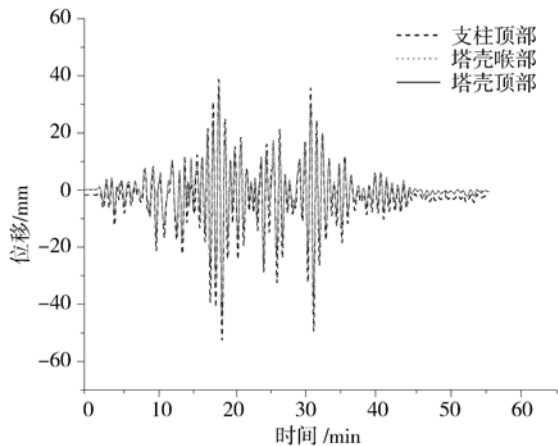
图1 冷却塔有限元模型

Fig. 1 Cooling Tower Finite Element Model

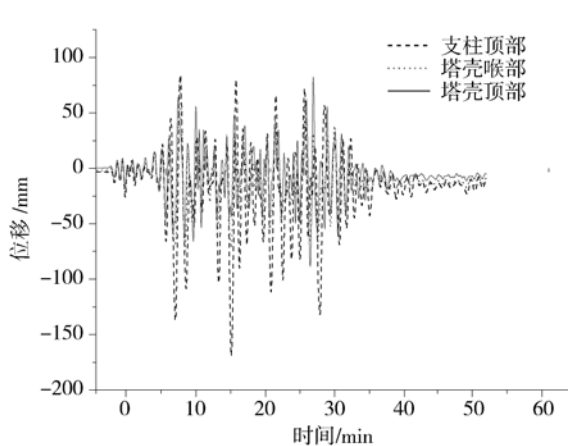
分析时，钢筋采用理想弹塑性模型，根据实际选用的钢筋种类确定钢筋的屈服强度和弹性模量。塔壳和环板的混凝土材料，采用混凝土损伤塑性模型；而支柱混凝土采用基于混凝土单轴滞回本构模型。混凝土单轴拉、压应力-应变关系按《混凝土结构设计规范》提供的应力-应变关系来确定。地基土体采用 Drucker-Prager 模型。

1.2 分析结果

对上述模型进行弹性和弹塑性时程分析。实际分析时，分别输入了 RG1.60、AG、EL-CENTRO



(a) 0.10 g下的位移时程



(b) 0.20 g下的位移时程

图3 冷却塔在XZ平面内不同高度的三点的位移时程

Fig. 3 Time History Displacement of Three Points With Different Heights in the XZ Plane of Cooling Tower

共三组三维地震波。限于篇幅，本文只给出 RG1.60 地震波作用下的分析结果。表1列出了峰值加速度为0.10 g的RG1.60地震波作用下，支柱柱端的四组最不利内力，其中的V和M为双向合成内力。

表1 支柱的最不利内力

Table 1 The Most Dangerous Internal Force of the Pillars

时间步	N/kN	V/kN	M/kN.m
N_{min}	-38 742.9	1 145.5	10 572.8
N_{max}	7 753.5	1 197.9	9 722.2
M_{max}	-36 450.0	1 462.1	12 325.9
V_{max}	12 372.7	1 557.7	11 854.3

利用 Response 2000 截面分析软件，作出对应于支柱截面的 M-N 曲线，并与表1中各时间步的 N、M 值进行比较，如图2所示。从图可以看出，支柱出现了偏心受拉的情况，且内力值已经超过了截面的拉弯承载力，说明当前支柱截面尺寸或配筋不够。

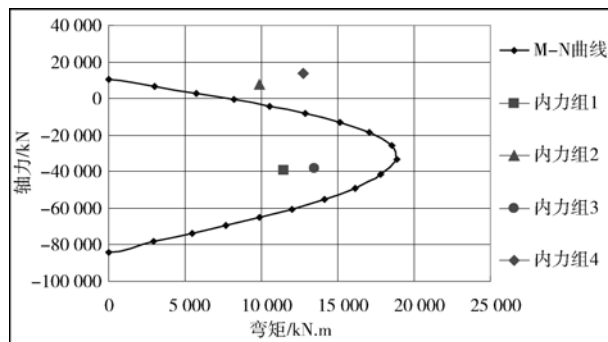


图2 支柱最不利内力与承载力的比较

Fig. 2 Comparison of the Most Dangerous Internal Force and Bearing Capacity

图 3(a) ~ (b) 分别给出了峰值加速度为 0.10 g 和 0.20 g 下, +XZ 平面内冷却塔在支柱顶部、塔壳喉部和塔壳顶部不同高度点的 X 向位移时程。

从图 3 可以看出, 在 0.10 g 和 0.20 g 下, 均是支柱顶部的位移最大; 0.10 g 下, 三个不同高度的点的水平位移同时取得最大或最小值, 而 0.20 g 下三者不同步。在 0.10 g 下, 支柱的侧移角达到了 1/344, 说明在 0.10 g 下支柱已经开始进入弹性; 在 0.20 g 下, 支柱的侧移角达到了 1/107。在峰值加速度为 0.10 g 和 0.20 g 的 RG1.60、AG、EL-CENTRO 三组地震波作用下, 支柱的平均侧移角分别为 1/565 和 1/223, 接近支柱的侧移能力限值, 因此建议对支柱上下端进行加固。

图 4 为 0.20 g 的 RG1.60 地震波作用下, 支柱 X 向位移最大时刻的冷却塔 X 向位移云图(位移放大比例系数为 100)。从图可以清楚地看到, 结构的变形主要集中在支柱, 由于惯性作用塔壳喉部和塔壳顶部的位移反而小于支柱顶部(参见图 3)。

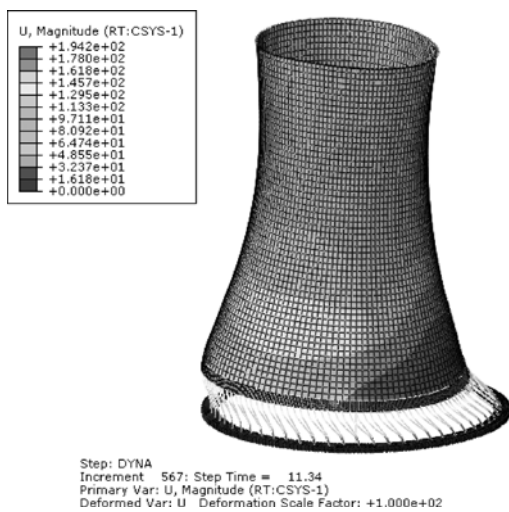


图 4 冷却塔 X 向位移云图

Fig. 4 Displacement Cloud Map in X Direction of Cooling tower

2 结构细部分析

2.1 建模方法

在本例的整体计算中可知, 在地震荷载作用下, 冷却塔的变形集中在支柱附近。因此, 选取内力和变形相对较大的一对支柱以及与支柱相连的支墩和上部壳体进行结构细部分析。结构细部下

端截取界面为支墩底面, 上端界面为塔壳的第三层模板顶面, 左右两侧的界面为相邻两对人字型柱之间的塔壳的中面。支墩底面采用固定边界, 塔壳侧面和顶面边界采用力边界。混凝土、钢筋和钢管分别采用四面体实体单元、两节点桁架单元和三节点壳单元 S3R 单元进行建模。钢筋和混凝土的接触, 采用 ABAQUS 中的 Embedded Region 方法将钢筋嵌入到混凝土中。外包钢管和混凝土的接触采用基于泛函的接触模型, 分别选择混凝土为从属表面, 钢管为主表面, 切向接触采用库伦 (Coulumb) 摩擦模型, 摩擦系数取为 0.5, 法向接触采用“硬接触”(Hard Contact)。结构细部的有限元模型见图 5。

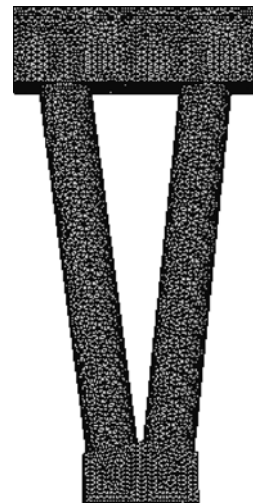


图 5 结构细部有限元模型

Fig. 5 Structure Detail Finite Element Model

2.2 结构细部分析结果

提取峰值加速度为 0.20 g 的 RG1.60 地震波作用下, 结构细部边界在四个典型时刻整体分析的内力结果, 然后施加在结构细部上进行细部分析。四个典型时刻为: (1) 支柱顶部 X 向位移最大时刻; (2) 支柱顶部 Y 向位移最大时刻(同时支柱轴拉力也最大)、支柱轴压力最大时刻、支柱剪力和弯矩最大时刻。

图 6 ~ 图 7 分别为支柱剪力和弯矩最大时刻的结构细部混凝土受拉损伤云图、受压损伤云图和钢筋应力云图。从图可以看出, 混凝土的损伤主要集中在支柱以及与支柱相连的塔壳、支墩的局部区域, 支柱裂缝开展严重, 受压损伤指标也较高(最大值 0.616), 支柱上下端的钢筋屈服。

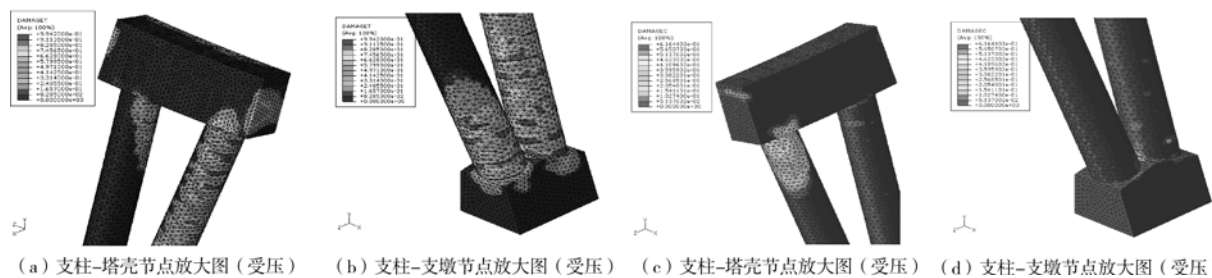


图 6 结构细部混凝土受拉损伤云图

Fig. 6 Structure Detail Cloud Map of Concrete with Tension Damage and Compression Damage

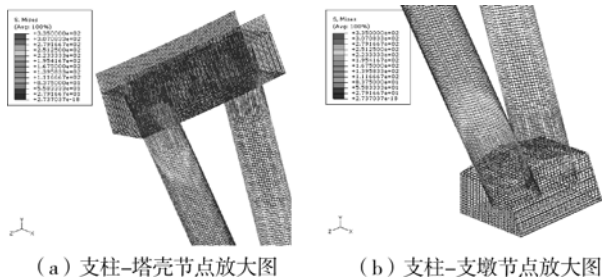


图 7 结构细部钢筋应力云图

Fig. 7 Structure Detail Stress Cloud Map of Steel Bar

3 结论

本文对某大型冷却塔进行了弹性和弹塑性的整体地震反应分析，并对薄弱部位进行了非线性精有限元分析，得到了以下结论：

1) 将整体有限元分析和结构细部有限元分析相结合，既可以把握大型复杂结构的整体抗震性能，又能详细了解局部区域的受力情况。

2) 人字形柱-大型冷却塔结构的薄弱部位一般位于人字形柱上下端以及与柱相连的塔筒底部和支墩。

3) 工程中需要采用加固措施对柱上下端局部区域进行加固，以减少混凝土的受压损伤、支柱纵筋应变。具体加固措施将需结合工程进一步的研究。

参考文献：

[1] GB/T 50102-2003, 工业循环水冷却设计规范 [S].
 [2] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范 [S].

(责任编辑 林希平)

(上接第 100 页 Continued from Page 100)

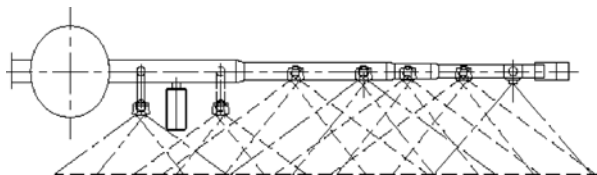


图 8 喷嘴调低方案

Fig. 8 Turn Down Scheme of Nozzles

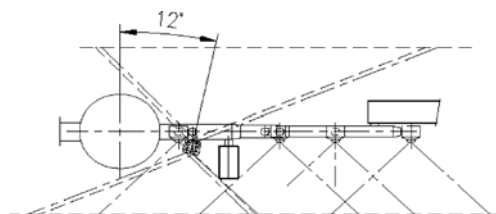


图 9 喷嘴旋转方案

Fig. 9 Rotat Scheme of Nozzles

1) 将喷嘴位置调低，见图 8。

2) 旋转喷嘴，但最大旋转角度不要超过 15°，见图 9。

如果采取上述措施仍无法避免喷嘴将浆液喷淋到支撑梁上的话，应采用在支撑梁上贴 4~5 mm 厚 PP 板的方式进行加厚，PP 板长度约 1 000 mm。

4 结论

综上所述，对于超大型直径吸收塔，喷淋层的设计是整个系统设计的难点，同时也是最为关键的设计环节。因此，在设计时务必细致严谨。首先应根据脱硫效率和循环浆液量等参数计算出喷淋层母

管和各支管管径、每个喷嘴流量及压力，确定好喷嘴型式；然后进行喷淋层及喷嘴的初步布置，同时应结合喷淋母管、塔内支撑梁和塔壁等对每个喷嘴位置进行放样计算，出现浆液喷淋到上述部件时，应对喷嘴位置进行调整。最后，当整个喷淋层设计好后，还应在塔内进行烟气流态及浆液雾化效果的计算机流场模拟，确保塔内脱硫效果达到最佳。

参考文献：

[1] AUSTRIAN ENERGY & ENVIRONMENT, 6.1.7 DESIGN OF ABSORBER INTERNALS, DESIGN MANUAL WET FGD[S].

(责任编辑 郑文棠)