

彭昕杰, 于敏, 刘晋超. 超大型冷却塔抗震薄弱部分分析及加强措施[J]. 华南地震, 2019, 39(4): 118–124. [PENG Xinjie, YU Min, LIU Jinchao. Seismic Analysis and Strengthening Methods for Weak Parts of a Supersized Cooling Tower[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(4): 118–124]

超大型冷却塔抗震薄弱部分分析及加强措施

彭昕杰, 于敏, 刘晋超

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510641; 2. 广东保利房地产开发有限公司, 广州 510308;
3. 广东省电力设计研究院, 广州 510663)

摘要: 对于大型复杂结构, 为节省计算工作量, 通常采用宏观有限元单元对构件进行模拟, 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的局部受力情况。在对某超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, 对其进行精细的子结构有限元分析。根据整体结构弹性和弹塑性时程分析结果, 发现该超大型冷却塔的变形集中在人字形支柱, 且其变形值接近其变形能力限值; 通过子结构细部分析, 发现人字形支柱两端是最为薄弱的部位, 因此提出采用外包钢管法对柱两端进行加固。外包钢管加固可以较大程度地提高混凝土柱的承载能力和延性。在相同受力情况下, 加固柱的混凝土受压损伤、箍筋应力和应变等较未加固柱大幅减小。

关键词: 超大型冷却塔; 薄弱部位; 整体有限元分析; 子结构; 外包钢管加固

中图分类号: TU352.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2019)04-0118-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.04.017

Seismic Analysis and Strengthening Methods for Weak Parts of a Supersized Cooling Tower

PENG Xinjie¹, YU Min², LIU Jinchao³

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. Guangdong Poly Real Estate Development Co., Ltd, Guangzhou 510308, China;
3. Guangdong Electric Design Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to save workload, finite element method is adopted to do macroscopic force analysis on large-scale and complex structure, but it is unable to clarify the force situation of local weak parts of structure. This paper using finite element method conducted delicate analysis on weak parts of a supersized cooling tower based on results of global analysis of whole structure. According to the result of elastic analysis and elastic-plastic time history analysis, deformations of this cooling tower are concentrated at Y-shaped pillars, and close to allowable deformation limit. It is revealed that both ends of Y-shaped pillars are the weakest parts of whole structure. Steel tube encasement is adopted to reinforce ends of columns, which significantly raises capacity and

收稿日期: 2019-02-10

基金项目: 国家重点研发计划 2017YFC0803300

作者简介: 彭昕杰(1993-), 男, 硕士, 主要从事结构抗震与耐火研究。

E-mail: 417053911@qq.com.

ductility of concrete columns. Under the same load condition, the compressive damage, stress and strain of stirrups are considerably reduced compared with the unreinforced columns.

Keywords: Supersized cooling tower; Weak parts of structure; Finite element analysis; Substructure; Steel tube encasement

0 引言

自日本“3.11”大地震引发了严重的核泄露事件之后,人们对核电设施的安全极大关注。超大型冷却塔是核电厂中与核安全有关的重要物项,损坏后可能会直接或间接造成安全事故。随着装机容量不断增大,超大型冷却塔淋水面积大,其高度往往超过200m,《工业循环水冷却设计规范》(GB/T 50102-2014)^[1]相较前版也新增了超大型冷却塔结构设计的内容。在对超大型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,例如梁单元、壳单元等对支柱、塔壳等进行有限元模拟,而不能采用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的局部受力情况。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^[2],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,对其进行精细的子结构分析。

为改善支柱的局部受力情况,提高支柱的抗震性能,本文提出采用外包钢管的方法对混凝土柱端进行局部抗震加强。外包钢管的加固方法在建筑结构中的应用已经比较成熟^[3-5],但在冷却塔结构中却很少见。本文的研究可以为超大型冷却塔结构的抗震设计和抗震加固提供参考。

1 整体结构分析

1.1 分析方法

本文研究的超大型冷却塔为一座淋水面积为22000 m²的逆流式自然通风双曲线冷却塔,塔总高235 m,底面直径为182 m,塔壳顶部直径为111.2 m,塔壳喉部高176.25 m,喉部直径为104.39 m,通风筒壳体最小厚度为390 mm,最大厚度为2000 mm,塔壳由60对人字形斜支柱支承,斜支柱直径为1900 mm。

采用ABAQUS有限元分析软件对冷却塔结构

进行整体建模以及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S4R模拟,塔壳的双层双向钢筋通过在壳单元中插入Rebar Layer进行模拟;人字形支柱采用梁单元B31模拟,支柱中的钢筋通过在梁单元中插入Rebar纤维进行模拟;环板采用三维实体单元C3D8R模拟,环板中的钢筋通过建立面单元SFM3D4R进行模拟。

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ABAQUS中的塑性损伤模型;而支柱混凝土,采用基于Yassin^[6]提出的混凝土单轴滞回本构模型,开发了自定义材料属性的FORTRAN程序接口(UMAT),然后嵌入到ABAQUS中。混凝土单轴拉、压应力-应变关系按《混凝土结构设计规范》附录C^[7]提供的应力-应变关系来确定。

基于刚性地基假定的冷却塔有限元模型如图1所示。为保证计算模型的准确性,采用ANSYS软件重新建模,进行了弹性时程分析结果对比,两种模型计算结果较为接近,建模过程参考文献^[8]进行。

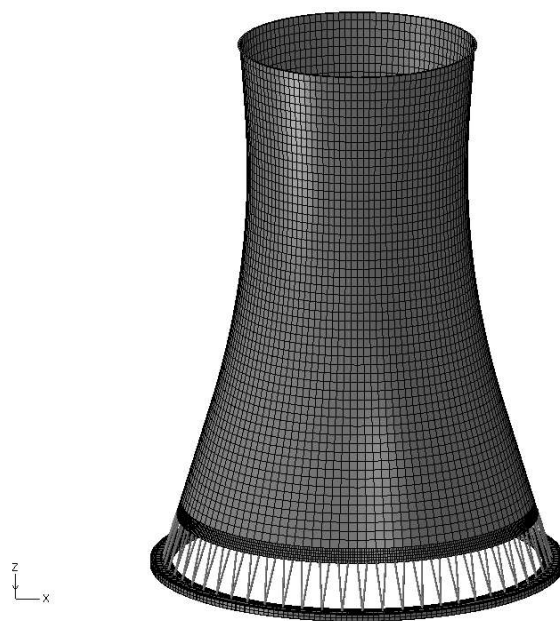


图1 基于刚性地基假定的冷却塔有限元模型
Fig.1 Finite element model of cooling tower based on assumption of rigid foundation

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 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。RG1.60 波是一条偏保守的人工波。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 支柱的最不利内力组合
Table 1 The most disadvantageous combination of internal forces of pillar

时间步	$N(\text{kN})$	$V(\text{kN})$	$M(\text{kN}\cdot\text{m})$
N_{\min}	-39 458.9	1265.5	11 472.8
N_{\max}	7893.5	1267.9	9892.2
M_{\max}	-38 000.0	1552.1	13 447.9
V_{\max}	13 572.7	1627.7	12 764.3

根据支柱截面尺寸及配筋，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，说明当前的支柱截面尺寸偏小，或截面配筋不够。

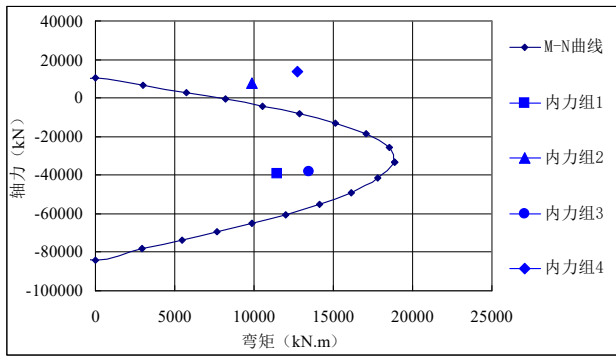
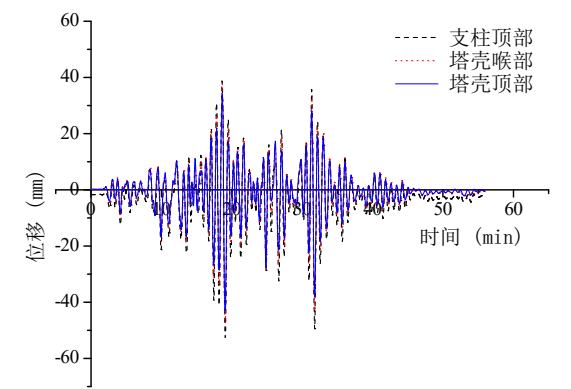


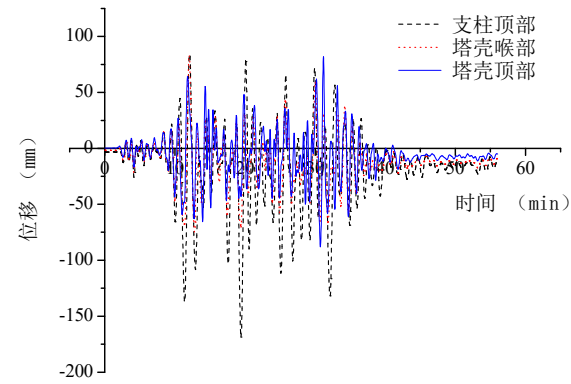
图 2 支柱最不利内力与承载力的比较
Fig.2 Comparison of the most disadvantageous combination of internal forces and carrying capacity of pillars

图 3(a)和(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三个不同高度的点的 X 向位移时程。从图可以看出，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 1/342，说明在 0.10g 下支柱已经开始进入弹塑性；在 0.20 g 下，支柱的侧移角达到了 1/106。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 1/568 和 1/225，接近支柱的侧移能力限值，考虑到该冷却塔结构的重要性，因此建议对支柱上下端进行加固。



(a)0.10g 下的位移时程



(b)0.20g 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 Displacements time history of three points of cooling tower at different heights in the XZ plane

图 4 为峰值加速度为 0.20 g 的 RG1.60 地震波作用下，支柱达到 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。而由于惯性作用，塔壳喉部和塔壳顶部的位移反而小于支柱顶部(参见图 3)。

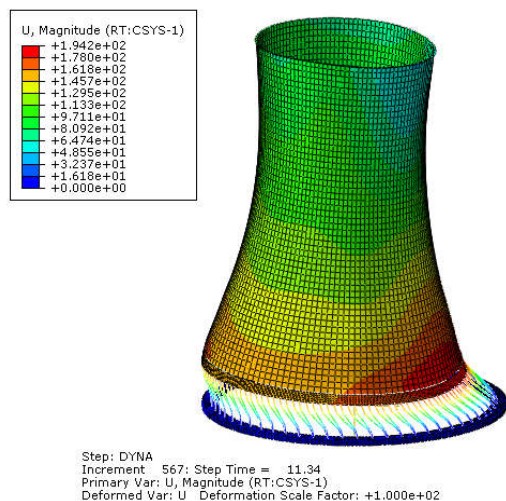


图4 冷却塔X向位移云图

Fig.4 Cloud diagram of X-directional displacement of cooling tower

2 子结构细部分析

2.1 建模方法

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子结构细部分析。子结构下端截取边界为支墩底面,上端边界面为塔壳的第三层模板顶面,左右两侧的边界面为相邻两对人字形柱之间的塔壳的中面。支墩底面采用固定边界,塔壳侧面和顶面采用力边界。混凝土、钢筋和钢管分别采用四面体实体单元 C3D4R、两节点桁架单元 T3D2 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)。子结构的有限元模型如图 5 所示。

2.2 子结构分析结果

提取峰值加速度为 0.20 g 的 RG1.60 地震波作用下,子结构边界在四个典型时刻整体分析的内力结果,然后施加在子结构上进行细部分析。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);(3)支柱轴力最大时刻;(4)支柱剪力和弯矩最大时刻。

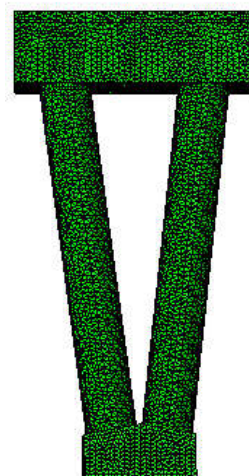
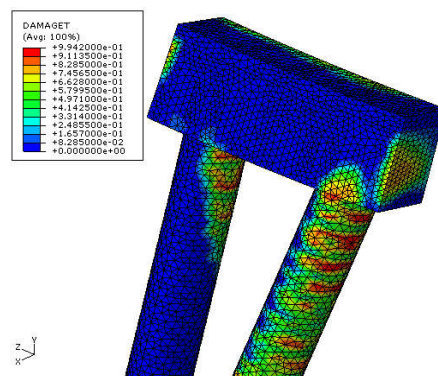


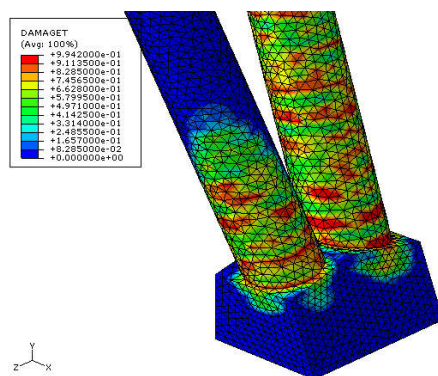
图5 子结构有限元模型

Fig.5 Finite element model of substructure

图 6~图 8 分别为上述典型时刻(4)的子结构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。



(a)支柱—塔壳节点放大图



(b)支柱—支墩节点放大图

图6 子结构混凝土受拉损伤云图

Fig.6 Cloud diagram of tensile damage of concrete from substructure

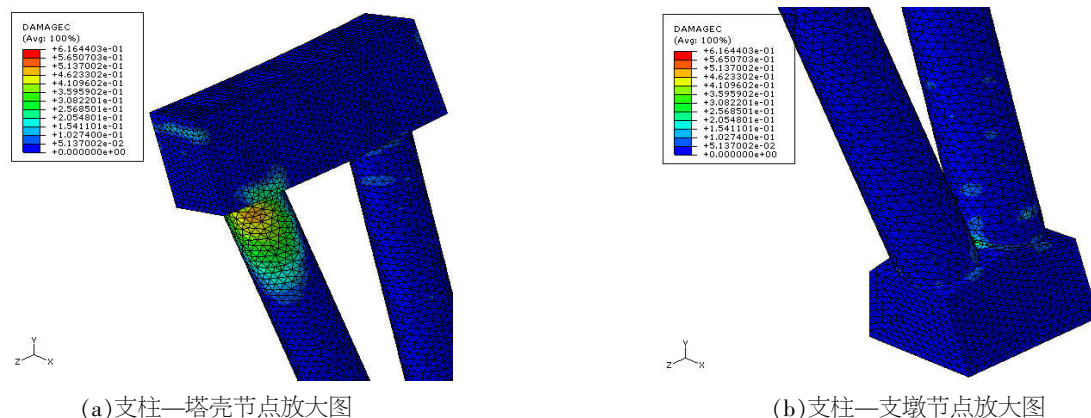


图 7 子结构混凝土受压损伤云图

Fig.7 Cloud diagram of compressive damage of concrete from substructure

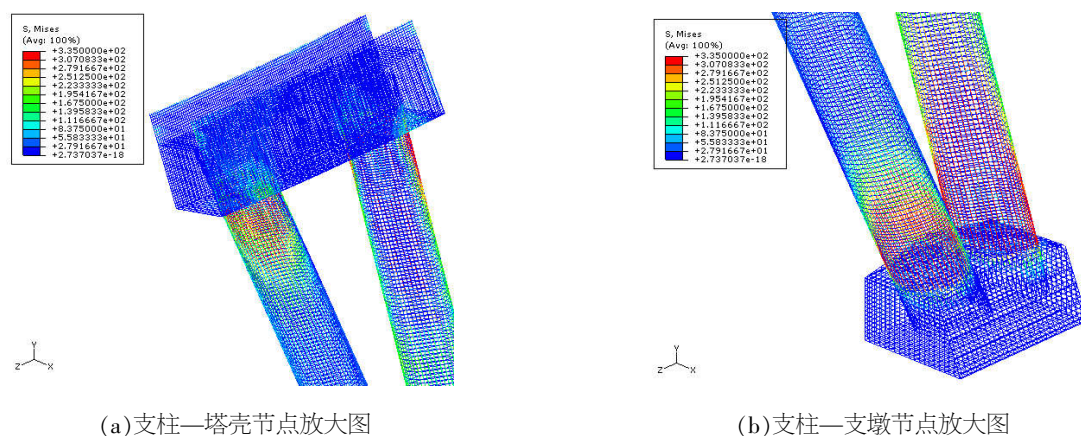


图 8 子结构钢筋应力云图

Fig.8 Cloud diagram of tensile stress of steel bars from substructure

选用以下方式对子结构进行加固处理：在柱上下端各 1/4 范围内外包钢管，钢管厚度为 22 mm，屈服强度取 335 MPa。由于仅对冷却塔的局部区域进行加固，且钢管厚度相对于柱直径来说较薄(约为直径的 1.16%)，根据圣维南原理，可近似认为局部加固后不改变结构的整体受力性能，因此对加固后的子结构施加与未加固子结构相同的力边界条件进行分析。

分析结果表明，与未加固时相比，加固后的子结构混凝土受压损伤大幅减少，受压损伤指标最大值由 0.616 减少至 0.282，但加固后混凝土受拉损伤改善不大；加固后支柱以及支柱相连的塔壳、支墩的混凝土损伤情况相差不大，支柱混凝土受压损伤不再明显高于塔壳和支墩。

表 2 为子结构在加固前后的钢筋应力和应变比较。从表可以看出，外包钢管未屈服，加固后塔壳和支墩的钢筋应力较加固前没有大的变化，支柱两端的纵筋仍然达到了屈服，但纵筋应变较加固前大幅减少；支柱箍筋的应力及拉应变较加

固前大幅减少，说明外包钢管起到了较强的横向约束作用。

由于在冷却塔整体分析时，支柱采用梁单元进行模拟，目前还无法准确地考虑外包钢管对混凝土支柱以及整体结构受力的影响。下面仅通过一个近似的分析来粗略了解外包钢管对混凝土柱的承载力和延性的提高作用。

以一根竖直的混凝土柱为分析对象，柱的截面尺寸、垂直高度、材料等与冷却塔支柱(斜柱)相同，对比不加固柱与采用外包钢管对柱两端 1/4 区域内进行加固后的受力情况。分析时，柱上下端设为固定端，在柱顶施加恒定轴压力，轴压比为 0.43，水平向施加单调增加的位移，直至支柱发生破坏。结果表明，外包钢管后混凝土的受压损伤指标大幅降低，受拉损伤范围扩大(如图 9 所示)，分布更均匀，箍筋的应力及拉应变大幅降低。

图 10 为采取加固前后柱顶的力-位移曲线。从图可以看出，加固柱的承载力和延性较未加固柱有较大幅度的提高。

表 2 加固前后子结构的钢筋应力和应变

Table 2 Strain and stress of steel bars from substructure before and after steel tube encasement

加固工况	结构部位	Mises 应力 (MPa)	最大拉应变($\mu\epsilon$)	最大压应变($\mu\epsilon$)
柱上下端各 1/4 范围内加固	支柱纵筋	335.000	5531.327	-1770.400
	支柱箍筋	84.954	382.062	-412.397
	支墩钢筋	163.276	570.343	-792.601
	支柱钢管	165.169	635.053	-231.110
未加固	支柱纵筋	335.000	7385.658	-3540.805
	支柱箍筋	280.959	1363.880	-681.233
	支墩钢筋	162.638	627.810	-789.504

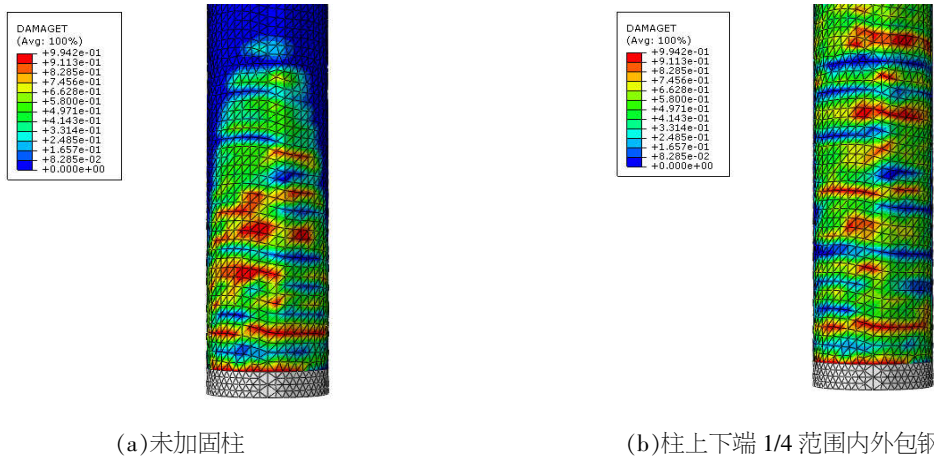


图 9 混凝土受拉损伤云图

Fig.9 Cloud diagram of tensile damage of concrete from pillars

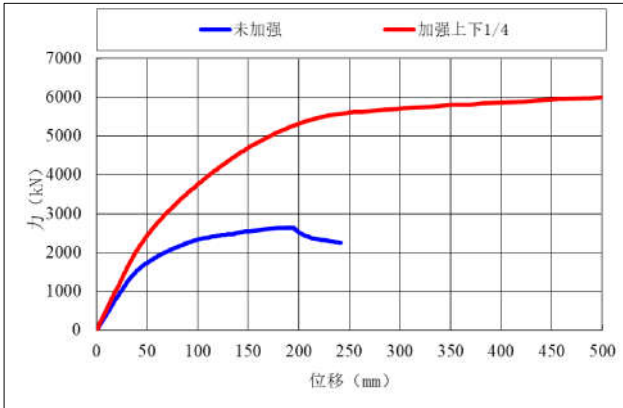


图 10 加固柱和未加固柱的力—位移曲线比较

Fig.10 Cloud diagram of tensile damage of concrete from pillars

3 结语

本文对某超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细有限元分析，探讨了薄弱部位的加强措施，

得到了以下结论：

(1)将整体有限元分析和子结构细部有限元分析相结合，既可以研究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—超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)采用外包钢管的方法对支柱上下端局部区域进行加固后,在相同的力边界条件下,混凝土的受压损伤将大幅减少,支柱纵筋应变、箍筋的应力及拉应变较加固前大幅减少;

(4)采用外包钢管加固的方法,可以较大地提高钢筋混凝土支柱的承载能力和延性。

如何准确地考虑外包钢管对人字形支柱以及冷却塔整体结构抗震性能的影响将有待于今后进一步的研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50102-2014: 工业循环水冷却设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [2] 陈艳娇. 冷却塔模型的抗震计算与试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [3] 解敏. 外包钢混凝土柱轴心受压试验研究及可靠度分析 [D]. 西安: 西安理工大学, 2001.
- [4] 范涛, 徐湘涛, 丁南生, 高涌涛. 轴心受压钢筋混凝土柱与外包钢柱有限元对比分析[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(5): 33-35+38.
- [5] 欧阳煜, 戚继亮, 蔡志鸿. 外包钢加固低强混凝土偏压柱试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(6): 71-73+93.
- [6] Yassin, M. H. M. Nonlinear analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cyclic loads [D]. California : University of California. Berkeley, 1994.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.