

AP1000 核电厂抗震 I 类大型结构模块 吊装分析研究

左绍兵 储艳春 叶志燕
(上海核工程研究设计院 上海 200233)

摘要 模块化设计和建造方法是 AP1000 第三代核电厂特点之一,但同时也面临着大型模块的吊装挑战。本文基于 ANSYS 大型有限元计算软件,对 AP1000 核电厂中大型结构模块 CA01 进行了吊装工况下的有限元分析,计算了结构的应力和变形,并对构件进行了规范验算。计算结果表明,在合理设置临时支撑的情况下,CA01 模块能够安全吊装就位,为大型结构模块的顺利吊装提供强有力的理论支撑。

关键词 AP1000, 结构模块, 吊装, 有限元分析

中图分类号 TU318.2, TU391

模块化技术是核电工程项目中缩短设计周期和节省投资的一种新型设计和建造技术,通过工厂化制造与现场施工的平行建造法,使土建施工和模块加工制造同步进行,以达到降低制造成本和提高经济性的目的。在近几年,中国引进的美国西屋 AP1000 第三代核电技术采用了模块化技术,其中最大的结构模块是 CA01 结构模块,其轴测示意图如图 1 所示。

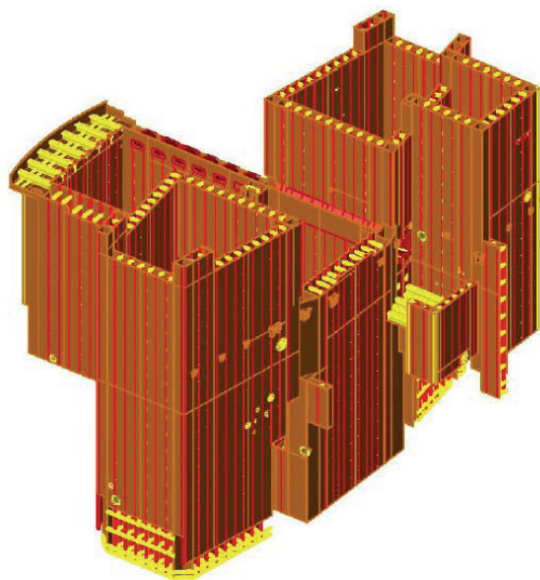


图 1 CA01 模块轴测示意图
Fig.1 Isometric drawing of CA01 module.

很多学者对不同形式结构的吊装进行了研究,如陈辉等运用 SAP2000 分析软件对安全壳顶封头的吊点设置进行了研究^[1],陈吉杉等对吊装过程中的动载系数进行了研究^[2],张齐凯等采用大型通用有限元计算软件 ANSYS 对渤海某海洋平台水平片吊装进行了强度和位移分析计算^[3]。以上研究中吊装结构的体积和重量均相对较小,部分有限元模型经过简化处理,不能准确考虑吊点和重心之间的关系,还有的研究忽略了风荷载的作用。本文将在精确计算吊装结构重心和吊点位置,并充分考虑风荷载等因素下,对总吊装重量约 1050 吨的大型结构模块 CA01 的吊装分析进行研究,为大型模块的安全吊装就位提供强有力的理论支撑。

1 吊装分析模型的建立

1.1 CA01 结构模块

AP1000 核电项目中 CA01 模块位于反应堆厂房内,外形尺寸长为 29 m、宽为 25 m、高为 26 m,净重约 760 t,总吊装重量约 1050 t,CA01 模块典型墙体由钢面板、剪力钉、钢桁架等构件组成,如图 2 所示。在浇筑混凝土时,钢面板可以作为模板。在使用阶段,钢面板与混凝土形成组合结构,共同承担外荷载。钢面板和混凝土之间力的传递通过剪力钉来完成,槽钢和角钢组成的钢桁架是钢面板组装和模块吊装过程中的支撑。

第一作者:左绍兵,男,1983 年出生,2009 年于同济大学获硕士学位,主要研究方向为大型先进压水堆国家重大专项模块化技术
收稿日期:2012-10-31,修回日期:2013-3-30

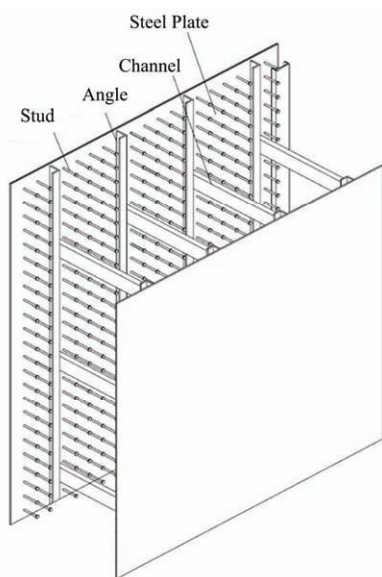


图 2 CA01 模块典型墙体墙
Fig.2 Typical wall of CA01 module.

1.2 有限元模型

1.2.1 构件单元模拟

在 CA01 模块 ANSYS 有限元模型中, 钢面板和角钢采用 Shell 43 单元模拟, 槽钢、T 型钢和临时支撑采用 Beam 188 单元模拟, 剪力钉重量作为均布荷载施加到钢面板上。

1.2.2 荷载工况

大型结构模块吊装阶段荷载有以下几种:

模块自重: 考虑吊装过程的模块倾斜、动力影响等因素, 取 1.25 倍的荷载放大系数。

风荷载: 吊装时最大风速不超过 $8.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 计算中风速取 $11.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 根据 ASCE7-05^[4]换算得计算风压为 $0.09 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

1.2.3 模型边界条件

大型模块吊装计算分析分三个阶段, 一、起吊和吊运阶段; 二、定位阶段; 三、就位阶段, 三个阶段 ANSYS 有限元模型的边界条件如下:

(1) 起吊和吊运阶段: 模块通过 8 个吊耳与吊具相连, 由于吊装过程中模块移动缓慢, 此时约束条件在模型中采用约束模块与吊耳连接板连接的节点的自由度来实现。

(2) 定位阶段: 吊耳连接处的约束和定位销对模块定位点的水平约束。

(3) 就位阶段: 就位后, 模块受到底板上预埋件的竖向约束。

CA01 结构模块有限元模型见图 3。

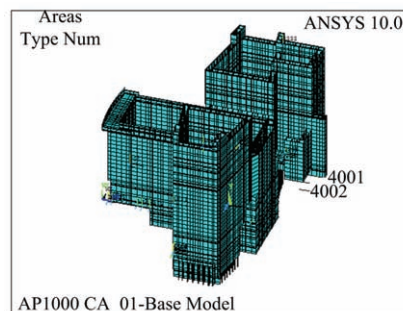


图 3 CA01 结构模块有限元模型
Fig.3 Finite element model of CA01 module.

2 吊装分析研究

由于大型模块吊装三个阶段除了约束条件不同外, 计算和分析方法均相同, 本文仅对吊装的第一个阶段起吊和吊运阶段进行分析研究。

2.1 应力和变形分析

2.1.1 应力和变形限值

CA01 结构模块中使用的材料如下:

A36 钢板, 屈服强度 $f_y=248 \text{ Mpa}$;

ASTM A240 S32101 钢板, 屈服强度 $f_y=448 \text{ MPa}$ 。

由于 ASTM A240 双相不锈钢的强度高于 A36, 为了方便计算分析, 同时保证结构的安全, 模型中所有材料的强度均取 A36 材料的强度。

根据 AISC 360-05^[5]表 16-D 可知, 在恒载和活载的共同作用下, 构件的变形不超过 $L/240$ 。

2.1.2 应力和变形计算

当 CA01 模块未设置临时支撑时, 应用 ANSYS 有限元分析软件, 对 CA01 模块的吊运阶段进行分析。结果表明, 最大节点应力超过了材料的屈服强度, 最大节点变形也达到 26 mm 。根据分析结果, 在 CA01 模块吊装过程中应设置临时支撑, 临时支撑设置情况如下图 4 所示。设置临时支撑前后, CA01 模块最大应力和最大位移如表 1 所示。

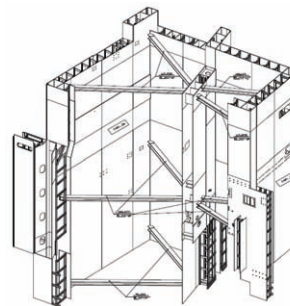


图 4 CA01 结构模块吊装临时支撑
Fig.4 Temporary bracing of CA01 module.

表 1 CA01 模块吊装时最大应力和最大位移
Table 1 Maximum stress and deformation of CA01 module under lifting.

	最大应力 Maximum stress /MPa	最大变形 Maximum deformation /mm
未设置支撑 Without bracing	385	26
设置支撑 With bracing	220	14

由上表可知, 设置临时支撑后, CA01 模块吊装时, 结构的最大应力和最大变形均变小, 满足规范要求, 变形云图和应力云图见图 5 和图 6。

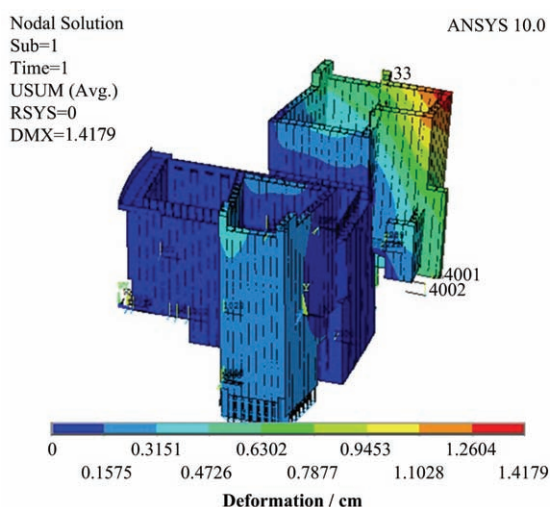


图 5 设置临时支撑时模块变形图
Fig.5 Deformation of CA01 module with temporary braces.

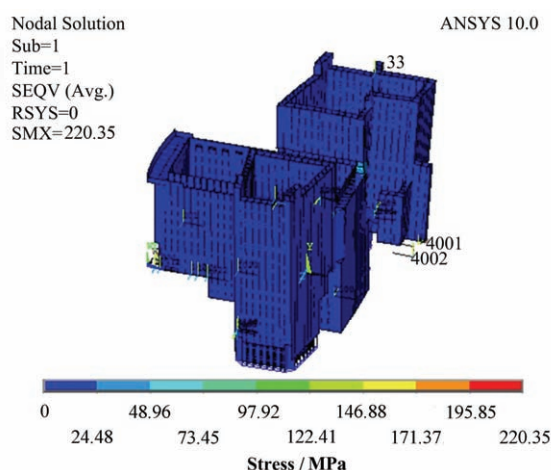


图 6 设置临时支撑时模块应力图
Fig.6 Stress of CA01 module with temporary braces.

以上分析表明:

(1) 合理设置临时支撑可以减小模块吊装过程中的应力和变形;

(2) 吊装时模块面板的最大应力出现在墙的交接处;

(3) 吊装时模块的变形值相对较小, 最大变形出现在模块顶部靠近换料水池墙角的位置。

2.2 构件规范验证

根据 ANSYS 对结构的应力和变形计算后, 还需对结构中各构件进行规范验算, 结构模块吊装时被作为钢结构来考虑, 相关构件验算应满足 AISC S335^[6]的相关要求:

压弯组合时构件应力应满足公式(1)和公式(2)的要求:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{my} f_{by}}{(1 - \frac{f_a}{F_{ey}})} + \frac{C_{mz} f_{bz}}{(1 - \frac{f_a}{F_{ez}})} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{f_{by}}{F_{by}} + \frac{f_{bz}}{F_{bz}} \leq 1.0 \quad (2)$$

如果 $f_a/F_a \leq 0.15$, 构件应力应满足式(3)代替式(1)和式(2):

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{by}}{F_{by}} + \frac{f_{bz}}{F_{bz}} \leq 1.0 \quad (3)$$

拉弯组合时构件应力应满足式(4):

$$\frac{f_a}{F_t} + \frac{f_{by}}{F_{by}} + \frac{f_{bz}}{F_{bz}} \leq 1.0 \quad (4)$$

抗剪时构件应力应满足式(5):

$$\frac{f_v}{F_v} \leq 1.0 \quad (5)$$

其中: C_{mv} 、 C_{mv} 为受压构件中与构件约束有关的系数, 构件两端有约束取 0.85, 无约束取 1.0; f_a 为计算轴向压应力; f_{by} 、 f_{bz} 分别指绕构件截面 Y 轴(强轴)和 Z 轴(弱轴)的允许弯曲应力; F'_{ey} 、 F'_{ez} 为欧拉临界应力除以安全系数以后的应力; F'_a 为允许轴向压应力; F_{by} 、 F_{bz} 分别指绕构件截面 Y 轴(强轴)和 Z 轴(弱轴)的允许弯曲应力; F_t 为允许轴向拉应力; f_v 为计算剪应力; F_v 为允许剪应力。

由于模块吊装属于施工工况, 许用应力可放大 1.33 倍, 基于以上内力和相关计算公式, 可得 CA01 模块各构件在吊装工况下的规范验算结果如表 2 所示。

表 2 CA01 模块起吊和吊运阶段构件验算结果
Table 2 Design results of CA01 module members under lifting.

构件 Structure members	应力比 Stress ratio	安全余量 Margin
槽钢 Channel	0.92	0.08
角钢 Angel	0.18	0.82
面板 Steel plate	0.89	0.11
槽钢角钢间焊缝 Weld between channel and angle	0.24	0.76
面板和角钢间的焊缝 Weld between steel plate and angle	0.18	0.82

3 结论

大型结构模块吊装过程的有限元计算分析论证为大型模块的成功吊装提供了强有力的理论支撑, 浙江三门和山东海阳核电建设现场 CA01 模块的成功吊装就是对该理论计算的最好证明。

本文对 AP1000 核电项目中 CA01 模块进行吊装过程的有限元分析, 得出以下结论:

- (1) 大型结构吊装时合理设置临时支撑可以减小吊装过程中结构应力和变形;
- (2) 大型结构吊装时, 不同截面的交接处以及结构形式不规则处是需要重点关注的部位;
- (3) 大型结构模块吊装过程的有限元计算分析为大型模块的成功吊装提供了强有力的理论支撑。

参考文献

- 1 陈辉, 宋平, 何菲菲, 等. AP1000 安全壳顶封头最优吊点分析和吊装方法的改进[J]. 核电工程与技术, 2011, 2: 34-38
CHEN Hui, SONG Ping, HE Feifei, *et al.* The optimum lifting point analysis of AP1000 containment vessel top head and improvement of handling method[J]. Nuclear Power Engineering Technology, 2011, 2: 34-38
- 2 陈吉杉. 垂直吊装中动载系数的取值分析[J]. 安装, 2005, 142: 28-29
CHEN Jishan. Study on the dynamic load coefficient in the vertical lifting[J]. Installation, 2005, 142: 28-29
- 3 张齐凯, 李依泽, 刘鹏, 等. 海洋平台水平片吊装有限元分析[J]. 石油天然气学报, 2010, 32: 378-380
ZHANG Qikai, LI Yize, LIU Peng, *et al.* Finite element analysis of offshore platform lifting[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32: 378-380
- 4 American society of civil engineers, ASCE7-05, Minimum Design Load for Buildings and Other Structures[S], 2005. 27-28
- 5 American institute of steel construction, AISC 360-05, Specification for Structural Steel Buildings[S], 2005. 381-383
- 6 American institute of steel construction, AISC S335-1989, Specification for Structural Steel building-Allowable Stress Design and Plastic Design[S], 54-55

Study on lifting of large structure module in AP1000 nuclear power plant

ZUO Shaobing CHU Yanchun YE Zhiyan

(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract Background: Modularization is one of characteristics of AP1000 nuclear power plant, however, the challenge of large module lifting should be met. **Purpose:** An analysis method for large module lifting has been studied in this paper. **Methods:** Based on ANSYS software and steel design code of America, the finite element analysis of CA01 structure module in AP1000 nuclear power plant was conducted. **Results:** The analysis results show that stress and deformation meet the requirements of codes and construction when the temporary brace is properly set in CA01 module. The maximum stress can be found in the juncture of wall, and maximum deformation occurs at the corner of CA01 module. **Conclusions:** Proper temporary brace is important to the lifting of structure and maximum stress or deformation usually occurs at irregular locations of structure. And it is necessary to perform detail analysis before structure lifted.

Key words AP1000, Structure module, Lifting, Finite element analysis

CLC TU318.2, TU391