

通用型 FPSO 立管界面结构强度校核及加强分析

俞 健¹, 蔡 灵², 谷家扬³, 渠基顺³

- (1. 南通中远海运船务工程有限公司 总经理办公室, 江苏 南通 226001;
2. 南通中远海运船务工程有限公司 海工与新能源研发中心, 江苏 南通 226001;
3. 江苏科技大学 海洋装备研究院, 江苏 镇江 212003)

摘 要:通用型 FPSO 需要具备工作海域范围广、在不同作业环境及事故条件下结构安全性高等特点,且需满足多种功能要求,其立管界面加强结构强度问题就显得尤为重要。基于 ABS 规范要求,确定模型的计算参数,采用有限元软件 PATRAN 对目标通用型 FPSO 的立管界面加强结构进行强度校核分析,验证了设计的舯部立管界面的结构强度,并进行了多种补强方案的分析与优选,为船厂开展 FPSO 的立管界面结构设计提供参考。

关键词:通用型 FPSO;立管结构;强度校核;结构加强

中图分类号:U663

文献标志码:A

文章编号:2097-0358(2023)2-0049-08

0 引言

21 世纪是海洋资源开发的新世纪,世界各国把开发海洋、发展海洋经济和海洋产业作为国家发展的战略目标^[1]。浮式生产储卸油装置(Floating Production Storage and Offloading,简称“FPSO”)作为当今海洋油气开发的主流装置,已经被越来越多的石油公司所采用,是集人员居住与生产指挥系统于一体的综合性大型海上油气生产基地^[2]。立管系统是深海工程中不可或缺的一部分,主要类型有钢悬链立管、顶部张力式立管、柔性立管和混合式立管。无论 FPSO 使用哪种形式的立管,都需要将立管与主船体结构进行连接,而此处需要进行局部强度校核。立管导管的作用是将荷载传递至 FPSO 船体结构上,避免水下立管和电缆遭受波浪、海流、火灾、爆炸以及坠物、船舶碰撞等荷载的破坏^[3]。FPSO 作业油田水下生产系统通过自由站立式混合立管和柔性动态跨接软管与 FPSO 舷侧立管导管底部的 J 形管节相连^[4]。国外有学者对 FPSO 立管工字管支撑结构设计中载荷工况的优化选择、结构可靠性和疲劳寿命等问题进行了研究,在结构设计过程中,针对结构布置、连接方式、结构可靠性、疲劳寿命等问题,探讨了多种设计方案和备选设计方法^[5]。目前,海洋立管设计规范有 API-RP-2RD、DNV-OS-F201、ABS 以及 API-ST-2RD,这些标准是目前国际上应用最多的海上立管设计规范。虽然国内外很多研究机构对立管界面结构进行了大量的研究,但是没有较好地综合典型的立管界面设计及加强结构型式。

1 通用型 FPSO 立管界面结构设计

本文研究的多点系泊方式下的 FPSO 是一种适用于巴西、西非以及墨西哥湾等海域的通用型 FPSO,通用型 FPSO 舷侧的立管导管及立管廊是各种水下生产设施向上部模块过渡的连接区域。根据目标通用型 FPSO 船舯区域结构及舷边甲板上设备的布置,选取纵向范围 FR53~FR81,作为船舯立管界面结构的布置区域,立管界面结构与布置区域的主船体舷边平行安装。上部立管平台设计为纵向连续箱形结构,其上层平台高度对应舷侧内距基线 28 150 mm 的强力甲板;下部立管支撑结构设计为纵向间断的不规则箱形结构,以减少总纵强度对其的影响。上部立管平台垂向范围内为 26 290 mm~28 150 mm,下部立管支撑结构垂向范围为 9 250 mm~11 210 mm。在上部立管平台上,纵向范围内每半档等间距布置立管套管,并在立管套管对应横剖面位置设置板架结构进行加强,在立管平台的上、下层平台与舷侧连接处设置肘板,起到支撑立管廊结构的作用,在下部立管支撑结构中,立管对应剖面内也设置板架结构作为加强。根据船舯立管界面结构的

收稿日期:2022-12-28

基金项目:江苏省科技成果转化专项资金项目(BA20200062)

作者简介:俞健(1974—),男,江苏南通人,南通中远海运船务工程有限公司总经理办公室工程师。

设计情况,对主船体舷侧内结构进行加强,纵向 FR53~FR81、垂向由主甲板至 STRINGER1 平台(距基线 6 760 mm)范围内每两强框之间的 1/4 档、1/2 档和 3/4 档均做垂向 T 型材加强;将下部立管支撑结构上、下平台对应高度舷侧内的骨材做材料加强,立管布置区域内 FPSO 船体结构钢材主要采用 AH32、DH36 等高强度钢。船舳立管界面结构如图 1 所示。

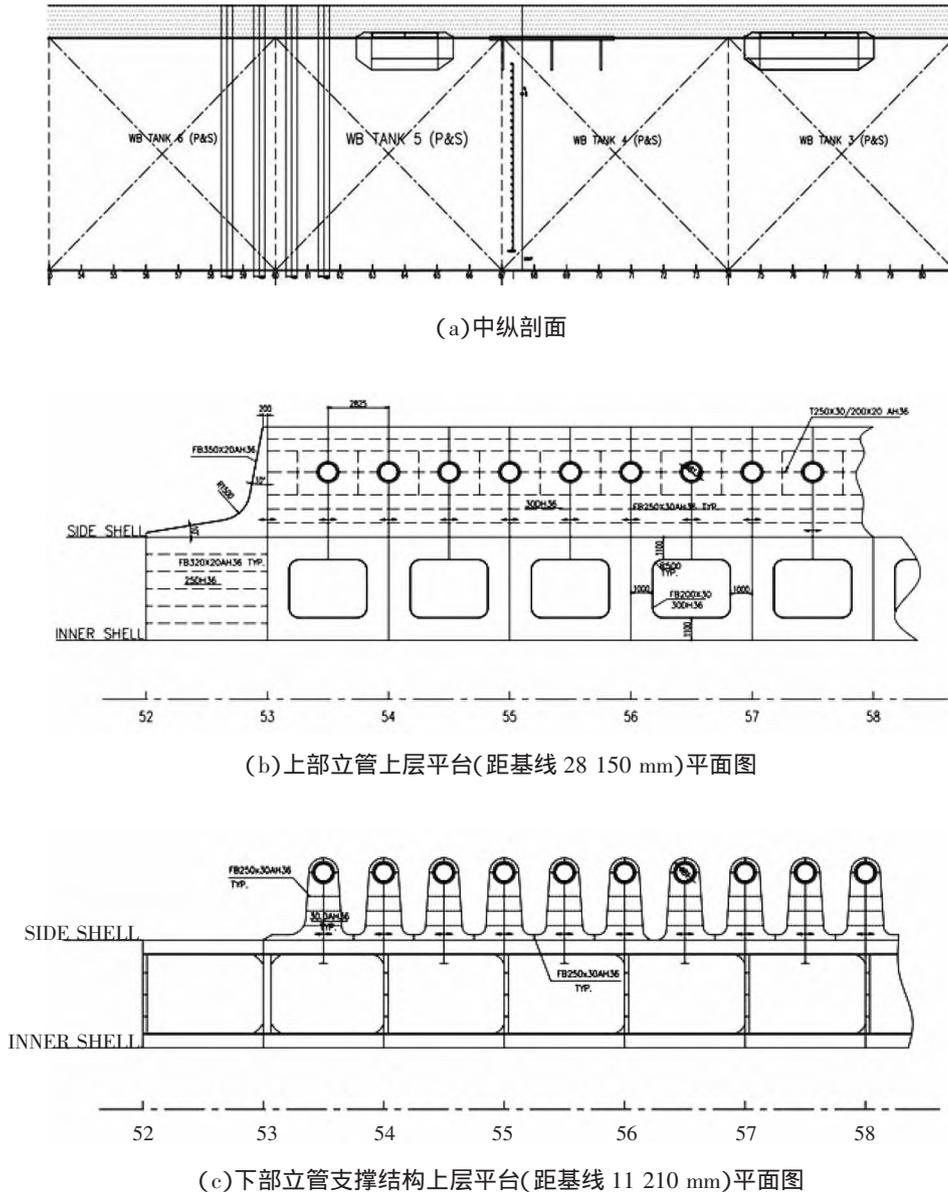


图 1 船舳立管界面结构设计图

2 立管界面结构模型与边界条件

2.1 有限元模型

相关工程问题常采用数值模拟的研究方法^[6],本文采用大型有限元软件 PATRAN 建立布置立管结构的通用型 FPSO 三舱段有限元模型,模型由主船体和立管结构两部分组成。主船体模型范围为全宽模型,舱段模型的纵向范围为 FR53~FR74,垂向范围为整个型深。模型采用笛卡尔直角坐标系, x 轴与基线重合,船舳为正, y 轴垂直于中线面,左舷为正, z 轴垂直于水线面,向上为正。进行网格划分时,对于远离立管界面结构的区域采用粗网格建模,粗网格尺寸为 900 mm × 900 mm,而对立管界面结构进行了网格细化,网格尺寸为 200 mm × 200 mm,细化区域分为上部立管平台和下部立管支撑结构两部分。上部立管平台细化区域为:沿

x 轴方向, 细化整个上部立管平台及其主船体内加强结构; 沿 y 轴方向, 自距坐标原点 -28 500 mm 到上部立管平台舷侧处; 沿 z 轴方向, 自距坐标原点 22 570 mm 至主甲板。下部立管支撑结构细化区域为: 沿 x 轴方向, 细化整个下部立管支撑结构及加强结构; 沿 y 轴方向, 自距坐标原点 -28 500 mm 至下部立管支撑结构外缘处; 沿 z 轴方向, 自距坐标原点 6 450 mm 至距坐标原点 13 170 mm。有限元模型如图 2—图 4 所示。

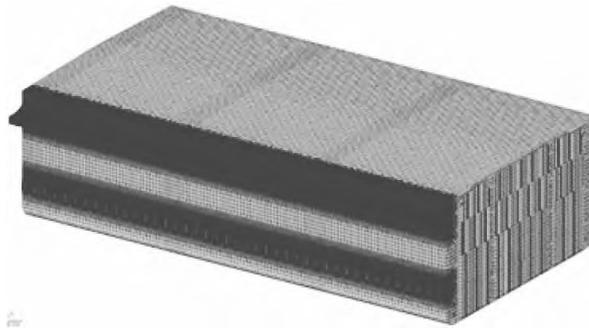


图 2 立管布置舱段有限元模型

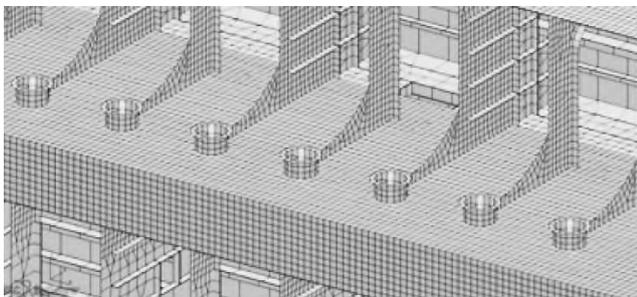


图 3 上部立管平台细化区域(隐去舷侧外板)

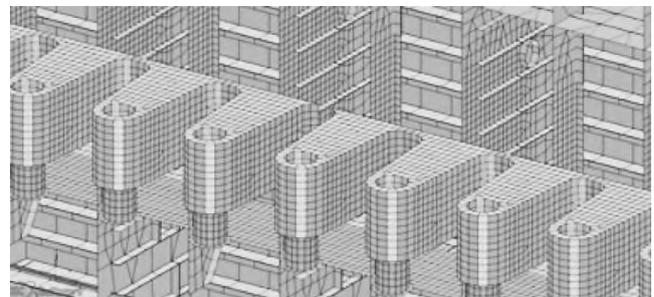


图 4 下部立管支撑结构细化区域(隐去舷侧外板)

2.2 模型边界条件

根据 ABS FPI 规范的 5A-3-A4 节相关内容, 甲板、内底板和外底板上应施加总体坐标系 y 自由度上有刚度的弹簧单元, 舷侧板、内壳板和纵舱壁节点上应施加总体坐标系 z 自由度上有刚度的弹簧单元。有限元模型的边界条件如表 1 所示, 施加情况如图 5 所示。

表 1 边界条件

位置	平移			转动		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
后端	后端所有纵向单元	相关	—	—	—	相关
	后端独立点	约束	—	—	—	—
	甲板、内底板和外板	—	弹簧	—	—	—
	舷侧、内壳和纵舱壁	—	—	弹簧	—	—
前端	前端所有纵向单元	相关	—	—	—	相关
	前端独立点	—	—	—	—	—
	甲板、内底板和外板	—	弹簧	—	—	—
	舷侧、内壳和纵舱壁	—	—	弹簧	—	—

注：“—”表示不施加约束，“相关”表示所有纵向单元节点与中心线中和轴处的独立点刚性连接。

施加于舱段模型两端每个构件的独立弹簧单元的刚度 c , 由下式求得：

$$c = \left(\frac{E}{1 + \nu} \right) \frac{A_{s-net50}}{l_{tk} n} = 0.77 \frac{A_{s-net50} E}{l_{tk} n} \tag{1}$$

式中： $A_{s-net50}$ 为单独构件的剪切面积，即甲板、内底板、外底板、内壳纵舱壁或者水密纵舱壁的剪切面积， ν 为

材料泊松比 ν_k 为舱段有限元模型舯部舱的横舱壁之间的长度, mm; E 为材料弹性模量, N/mm^2 ; n 为构件上施加弹簧单元的节点数目。

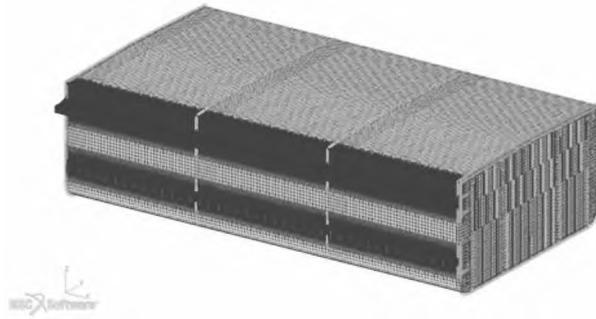


图 5 有限元模型边界条件示意图

3 计算载荷及工况

3.1 立管界面结构载荷

根据 ABS FPI 规范相关要求, 通用型 FPSO 立管界面结构强度校核设计载荷条件主要有 4 种, 即作业工况、试验工况、极端工况以及临时工况, 本文主要对作业工况进行讨论。表 2 给出了作业工况下的立管设计载荷。如图 6 所示, 与设计张力相关的面内角度 IPA 为 0° 时, 结构最危险; IPA 为 90° 时, 结构最安全。故立管与主船体之间的 IPA 取 0° 、 30° 和 60° , 在水平面中立管与主船体之间的角度 Local Angle 取 45° 、 90° 和 135° , 如图 7 所示。

表 2 作业工况下立管设计载荷

	EHU	GI	GL	OP	WI
数量	21	5	11	15	3
有效张力/t	163.8	567	537.6	888.3	603.75
弯矩/(t·m)	28.35	89.25	78.75	150.15	91.35
剪力/t	21	79.8	73.5	119.7	82.95

注: EHU—脐带缆; GI—注气立管; GL—天然气提升立管; OP—生产立管; WI—注水立管。

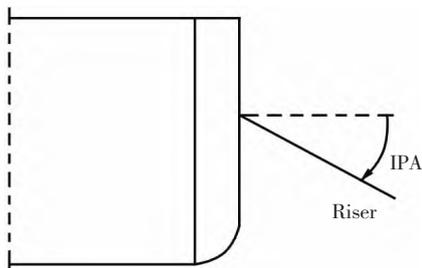


图 6 IPA 示意图

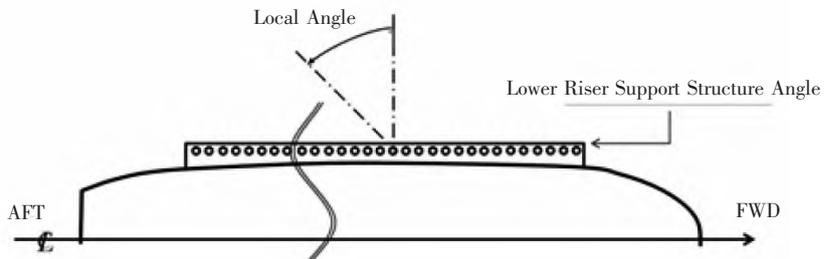


图 7 Local Angle 示意图

3.2 立管界面结构工况

将 IPA 的 3 种角度和 Local Angle 的 3 种角度进行组合, 共得到 9 种角度组合工况, 工况命名为“A-Y”, 其中 Y 为 1—9, 两种夹角的具体组合情况如表 3 所示。

表 3 立管与主船体两种夹角的组合情况

IPA/ $^\circ$	Local Angle/ $^\circ$		
	45	90	135
0	A-1	A-2	A-3
30	A-4	A-5	A-6
60	A-7	A-8	A-9

考虑不同载荷分量以及表 3 中两种夹角组合形成的工况, 得到立管界面及加强结构强度校核的组合工况如表 4 所示, 每种工况对应的模型编号为“LCX-A-Y-Z”, 其中 $X = 1$ 代表立管设计载荷条件是作业工况。“A-Y”表示夹角情况 $Z = 1$ 代表装载状态为满载工况 $Z = 2$ 代表装载状态为压载工况。

表 4 作业工况下立管强度校核 18 种工况

工况名称	装载模式	载荷分量					
		静水弯矩/ (t·m)	立管设 计载荷	波浪垂向弯 矩/(t·m)	船舶运动加速度		
					垂向 a_z	纵向 a_x	横向 a_y
LC1-A-1-1~LC1-A-9-1	满载	最大中垂	有效张力	最大中垂	$+a_z$ -max	$+a_x$ -max	$+a_y$ -max
LC1-A-1-2~LC1-A-9-2	压载	最大中拱	剪力弯矩	最大中拱	$-a_z$ -max	$-a_x$ -max	$-a_y$ -max

为了在立管界面结构有限元模型中施加下部立管支撑结构所受的合成剪力和合成弯矩, 需要建立局部坐标系。局部坐标系的示意图如图 8 所示, 局部坐标 X 轴为立管管道的径向, Y 轴为合成弯矩的方向, Z 轴为合成剪力的方向。

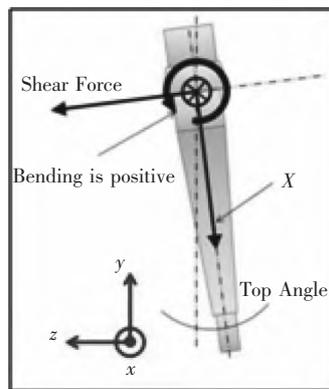


图 8 局部坐标系示意图

4 立管界面结构强度校核

根据 ABS API 规范获得 FPSO 立管界面结构最大许用等效应力为 389.5 MPa, 进行强度评估时选取三舱段有限元模型的舯部舱(FR60~FR67), 并对目标关注区域的所有结构进行验证。

首先对作业设计载荷条件满载和压载两种装载状态下共 18 种工况的结构等效应力进行分析, 以掌握装载状态、Local Angle 和 IPA 对立管界面结构屈服强度的影响。通过有限元计算, 立管界面主要结构在作业工况下的等效应力计算结果如表 5 所示。

表 5 作业工况下立管界面各主要构件应力值 单位: MPa

工况	上部立管平台	下部立管支撑结构	立管主船体部分界面结构
LC1-A-1-1	650	169	411
LC1-A-2-1	651	198	413
LC1-A-3-1	653	166	415
LC1-A-4-1	650	157	411
LC1-A-5-1	651	153	413
LC1-A-6-1	653	156	414
LC1-A-7-1	651	131	412
LC1-A-8-1	651	162	413
LC1-A-9-1	652	140	413
LC1-A-1-2	647	168	364

续表 5 作业工况下立管界面各主要构件应力值 单位:MPa

工况	上部立管平台	下部立管支撑结构	立管主船体部分界面结构
LC1-A-2-2	648	198	366
LC1-A-3-2	650	168	368
LC1-A-4-2	647	158	365
LC1-A-5-2	648	152	366
LC1-A-6-2	650	156	368
LC1-A-7-2	648	111	365
LC1-A-8-2	648	112	366
LC1-A-9-2	649	109	367

通过对比分析所有工况中立管界面各主要结构的最大等效应力可知:立管界面结构的最大等效应力总是出现在满载工况下,压载工况下立管界面各主要结构较为安全。由于立管上部平台结构中设置的肘板尺寸过小,没有有效抵抗上部立管平台在立管张力作用下的剪力,造成上部平台的应力过大,等效应力最大值为 653 MPa,不满足屈服强度要求。主船体部分的最大等效应力为 415 MPa,出现位置为距基线 26 290 mm 的舷侧外板纵向加强筋上,此处应力集中也是由上部立管平台肘板过小引起的。在作业工况下,下部立管支撑结构的最大等效应力为 198 MPa,出现在立管套管上,满足屈服强度要求。

综上,从安全方面考虑,应该对上部立管支撑结构的肘板进行加强。

5 立管结构加强研究

由表 5 可知,上部立管平台的结构在所有工况中的等效应力均超过了许用应力 389.5 MPa,其中工况 LC1-A-6-1 是上部立管平台结构、立管主船体部分界面结构的主导工况。因此,以此工况进行结构加强计算。

5.1 上部立管平台加强方案

根据表 5 分析发现,作为上部立管双层平台的支撑结构,初步设计的肘板强度太弱,不足以支撑上部立管平台,立管套管和舷侧外板之间的立管强框受较大剪力的影响,强度不满足要求。故上部立管平台的补强思路是将距基线 28 150 mm 立管平台与舷侧外板连接处的肘板(简称“上层肘板”)的厚度增大,并增加面板,将距基线 26 290 mm 立管平台与舷侧外板连接处的肘板(简称“下层肘板”)的板厚和面积(面积增大有两种方案,第一种方案简称“面积 1”,第二种方案简称“面积 2”,示意图分别如图 9、图 10 所示)增大,并增加面板,增加立管套管和舷侧外板之间的立管强框架的板厚。表 6 列出了上部立管平台结构补强方案的汇总,以及各方案调整后有限元模型增加的重量占原有限元模型的比重。

表 6 上部立管平台加强方案及模型重量变化汇总表

方案名称	上层肘板		下层肘板			立管强框架板厚/mm	比重/%
	腹板厚度/mm	面板型号	腹板厚度/mm	面板型号	面积方案		
NO.1	20	FB200 × 30	20	FB200 × 30	面积 1	35	0.14
NO.2	30	FB200 × 30	30	FB200 × 30	面积 1	35	0.23
NO.3	30	FB200 × 30	35	FB200 × 30	面积 1	35	0.28
NO.4	30	FB200 × 30	40	FB200 × 30	面积 1	35	0.28
NO.5	30	FB200 × 30	40	FB200 × 30	面积 1	40	0.31
NO.6	30	FB200 × 30	40	FB200 × 30	面积 1	45	0.32
NO.7	30	FB200 × 30	40	FB200 × 30	面积 1	50	0.33
NO.8	30	FB200 × 30	40	FB200 × 30	面积 2	35	0.31
NO.9	30	FB200 × 30	40	FB200 × 30	面积 2	35	0.33

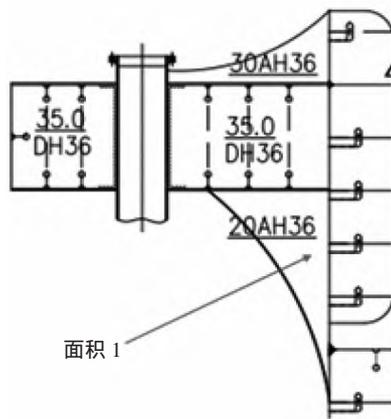


图 9 面积 1 示意图

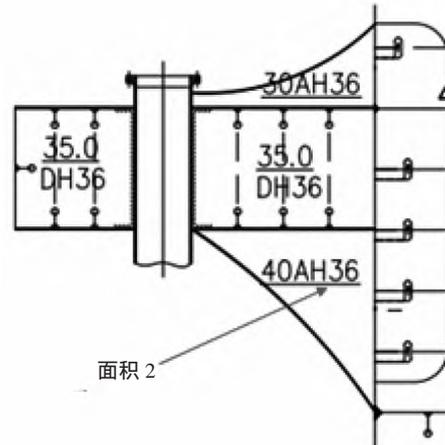


图 10 面积 2 示意图

5.2 上部立管平台加强方案计算结果分析

通过有限元计算,得到各加强方案下上部立管平台各构件以及主船体和下部立管支撑结构的最大等效应力计算结果,如表 7 所示。

表 7 上部立管平台加强方案应力计算结果汇总表

单位:MPa

方案名称	主船体	下部立管支撑	上部立管平台结构		
			上、下层肘板	上、下层平台	立管强框
NO.1	387	262	585	243	480
NO.2	329	262	507	213	480
NO.3	285	262	394	239	547
NO.4	272	262	377	241	548
NO.5	273	262	375	230	490
NO.6	273	262	373	220	444
NO.7	273	262	371	211	406
NO.8	294	262	368	162	354
NO.9	324	262	337	186	355

从表 7 计算结果可以看出,加强方案 NO.8、NO.9 各结构都满足强度要求。在加强方案 NO.1 中,下层肘板的大小增加为面积 1,上、下层肘板均增加了型号为 FB200 × 30 的面板时,主船体结构的最大等效应力降低为 387 MPa,已经满足屈服强度要求,但接近临界值;下部立管支撑结构上的应力相比原结构没有发生变化;上部立管平台上、下层肘板和立管强框的最大等效应力仍超过许用应力。加强方案 NO.2—NO.7 与加强方案 NO.1 类似,也有部分结构不满足要求。

在加强方案 NO.8 中,立管界面所有的结构均满足屈服强度要求,最大的等效应力出现在下层肘板上,为 368 MPa,立管强框上的最大等效应力为 354 MPa。相比加强方案 NO.8,加强方案 NO.9 的最大等效应力出现在立管强框上,为 355 MPa,上、下层肘板上的应力出现了明显的下降,立管界面结构更为安全,但加强方案 NO.9 中的结构增加的重量比加强方案 NO.8 大 0.02%,因此,从成本角度来看,采用加强方案 NO.8 更合适。

6 结束语

本文建立了立管界面结构有限元模型,并进行了工作工况下的强度计算,分析了立管界面结构在不同设计载荷条件下的应力情况,发现上部立管平台在满载和压载工况下,立管分界面结构的最大等效应力超

过了许用应力,且满载工况为主导工况,高应力主要是由上部立管平台的结构设计和双层平台相连的肘板尺寸过小导致的,不能有效支撑立管张力。本文通过对上部立管平台支撑结构进行多种补强方案的加强,最终获得较优的加强方案,可为船厂开展 FPSO 的立管界面结构设计提供参考。

参考文献:

- [1]郭云飞,包孔,周戈琳,等.疏浚船用 DH36 钢焊接工艺性能研究[J].造船技术,2015(6):74-78.
- [2]刘传辉.30 万吨级 FPSO 模块安装工艺研究[J].石油和化工设备,2018(12):36-38.
- [3]中国船级社.海上浮式装置入级规范[S].北京:人民交通出版社,2020.
- [4]康庄,李辉,孙丽萍,等.自由站立式立管总体设计与分析[J].船海工程,2011(5):154-159.
- [5]PARK S H, LEE M K, KIM J T. The Structural Design Developments of Riser I-Tube Support in an FPSO[C]// ASME International Conference on Ocean. 2009.
- [6]徐骁.非对称式半潜起重平台波浪冲击的特性研究[D].镇江:江苏科技大学,2021.

(责任编辑 张 利)

Analysis of Strength Check and Reinforcement of Interface Structure of General-purpose FPSO Risers

YU Jian¹, CAI Ling², GU Jia-yang³, QU Ji-shun³

- (1. General Manager's Office, Nantong COSCO SHIPPING Shipyard Co., Ltd., Nantong 226001, China;
2. New Energy and Offshore R&D Center, Nantong COSCO SHIPPING Shipyard Co., Ltd., Nantong 226001, China;
3. Marine Equipment Research Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: A general-purpose FPSO is featured by the need of having a wide range of working sea area in different operating environments and accident conditions with high structural safety, and the need to meet a variety of functional requirements, and the issue of enhancing the structural strength of its riser interface is particularly important. Based on the requirements of ABS specifications, the calculation parameters of the model are determined, and the finite element software PATRAN is used to carry out strength checking and analysis of the structure strength of the riser interface of the targeted general-purpose FPSO, to validate the structural strength of the designed amidships riser interface, and to carry out the analysis and preference of various reinforcing schemes for the shipyards to provide reference for shipyard to carry out design of the riser interface structure of the FPSO.

Key words: general-purpose FPSO; riser structure; strength check; structural reinforcement