

波浪循环荷载作用下海上固定平台钢结构应力响应分析

刘静蕊 王 瑞

瀚辰能源有限公司 天津 300000

摘 要: 海上固定平台在全生命周期内持续承受波浪循环荷载, 由此引发的钢结构疲劳应力响应是平台安全设计的核心问题。本文以某典型四腿导管架平台为对象, 基于 Morison 方程建立波浪荷载计算模型, 采用有限元方法对平台在规整波和随机波作用下的应力响应时程进行数值模拟, 系统分析了波高、周期及水深变化对关键节点应力幅值的影响规律, 并基于雨流计数法对热点应力进行统计分析。研究表明, 应力幅值随波高增大呈近线性增长, 随周期呈先升后降的非单调变化; 自振频率与波浪谱峰频率的接近程度主导动态放大效应; 焊接节点应力集中系数达 1.8 以上, 是疲劳失效的关键部位。成果可为平台抗疲劳设计及在役安全评估提供参考。

关键词: 海上固定平台; 波浪循环荷载; 应力响应; 有限元分析; 热点应力

引言: 海上固定平台通常采用钢质导管架结构, 在二三十年服役中持续遭受波浪、海流、风荷载作用, 其中波浪荷载因其显著的周期性与循环性, 成为引发平台疲劳累积损伤的主要诱因。长期循环作用导致关键节点产生幅值交变的循环应力, 逐步削弱结构承载能力。据统计, 波浪引起的疲劳破坏在平台失效事故中占比极高, 准确掌握波浪循环荷载下平台应力响应特征对保障结构安全意义重大。当前国内外围绕波浪荷载计算与平台结构分析已有大量成果, 但针对循环荷载下应力响应的系统参数研究仍有待深化。本文采用有限元数值方法, 对典型导管架平台在循环波浪荷载下的应力响应进行系统分析, 揭示关键参数影响规律, 为工程设计提供参考。

1 平台结构概况与波浪荷载计算

1.1 平台结构描述

本文研究的对象为一座典型的四腿导管架固定平台, 设计水深为 60 米。平台主体由导管架、桩基础、上部组块构成。导管架包含四根竖直主腿以及多层水平框架和斜撑杆件。主腿直径由泥面处的 1.2 米渐变至顶部附近的 0.9 米, 壁厚分别为 32 毫米和 24 毫米。沿高度方向每隔 12 米设置一层水平框架, 共设五层。斜撑杆件直径在 0.6 至 0.8 米之间, 壁厚 16 至 20 毫米。甲板位于导管架顶部, 标高为 +15 米。为简化计算模型将三层甲板等效为一层刚性甲板, 上部组块设备荷载参照布置图分别施加于对应甲板区域。平台结构选用海洋工程常用的 API 2H 级钢材, 其弹性模量为 206 吉帕, 泊松比为 0.3, 密度为每立方米 7850 千克, 屈服强度为 355MPa。结构

阻尼比取为 2%, 这一取值处于钢结构在弹性阶段阻尼比的典型范围内。

1.2 波浪荷载计算思路

对于导管架这类细长圆柱构件, 当构件直径远小于波长时, 通常采用 Morison 方程计算波浪力, 将波浪力分解为水质点加速度引起的惯性力和速度引起的拖曳力。对倾斜杆件, 需将水质点运动参数沿杆件法向和切向分解后分别计算。波浪场采用线性波浪理论描述, 在给定波高和周期下计算沿水深各位置水质点速度与加速度的时间历程。波浪能量集中在水面附近, 随水深增加迅速衰减, 波浪荷载主要分布在水面以下一定深度范围^[1]。实际计算中, 对每个浸没杆件单元, 根据其中心水深和当前波浪相位计算水质点运动参数, 由 Morison 方程求得单元分布力, 再等效分配到两端节点。不同波高和周期组合下, 波浪力的大小与分布形态显著不同, 是本文系统参数分析的重点考察内容。

2 有限元模型的建立

2.1 模型构建方法

本文采用 ANSYS 有限元软件建立平台结构的数值模型。导管架的所有杆件均采用考虑剪切变形效应的梁单元进行模拟, 这种单元能够较好地描述管状截面构件在轴向力、弯矩和剪力共同作用下的受力行为。桩与周围土体的相互作用则采用分布在桩侧的非线性弹簧单元来表征, 弹簧的力-位移关系依据 API 规范推荐的 p-y 曲线确定, 以反映不同深度处土体抵抗桩身侧向位移的能力。整个模型的节点总数为 486 个, 梁单元数量为 952

个, 弹簧单元为 64 个。对于导管架与甲板的连接区域、主腿与撑杆的交汇节点等受力复杂且应力集中显著的部位, 进行了网格局部加密, 单元尺寸控制在 0.5 米以内, 从而保证这些关键位置应力求解的精度。坐标系的设置以静水面与平台中心线的交点为原点, 竖直向上为正方向。在边界条件方面, 桩底端采用固定约束, 模拟基岩或深层坚硬土层的嵌固作用。甲板上的设备荷载以及结构自重均以质量点和分布重力的方式计入模型, 以准确反映结构的惯性特性, 这对于后续的动力响应分析至关重要。

2.2 分析流程说明

整个分析流程包括以下几个步骤: 首先对平台进行模态分析, 获取结构的自振频率和振型特征, 这是理解结构动力放大效应的基础。随后在时域内求解平台在循环波浪荷载作用下的动力响应方程, 采用逐步积分方法得到各节点位移随时间的演变, 进而由位移推算出单元应力时程。对于规则波工况, 计算若干完整波浪周期直至响应趋于稳定, 取最后一个周期的应力幅值作为分析指标。对于随机波浪工况, 则生成成长时段的波浪序列, 通过傅里叶变换得到响应谱密度, 再采用雨流计数法提取应力循环的幅值和均值分布。整套流程涵盖了从波浪输入到应力输出的完整链条, 为后续的参数分析和疲劳评价提供了可靠的数据基础^[2]。

3 平台自振特性分析

在波浪荷载响应分析之前, 了解平台自身的动力特性十分必要。模态分析结果表明, 平台横向弯曲基频为 0.42Hz, 纵向弯曲基频为 0.44Hz, 扭转振型频率为 0.71Hz, 四阶及以上自振频率均高于 1.0Hz, 对应基频周期约为 2.4 秒。

3.1 焊接节点应力集中分析

导管架平台由大量管状杆件焊接而成, 焊缝区域因几何不连续、材料性能不均及焊接残余应力, 成为应力最集中的薄弱环节。对于本平台的 T/Y 型管节点, 应力集中系数取值范围约为 1.8~2.5, 本文保守取为 2.0。以最大名义应力幅 42MPa 为例, 热点应力幅值达约 84MPa。参照 S-N 曲线中 FAT90 等级 (90MPa 对应 200 万次循环), 该应力水平已接近疲劳极限临界范围, 焊接节点处局部应力远高于名义应力。在随机波浪作用下, 大幅值循环对应的热点应力可能超过 100MPa, 已进入有限疲劳寿命区间。因此, 焊接节点是疲劳失效的核心部位, 疲劳评估中须基于热点应力进行寿命计算, 在役检测中应将焊缝作为无损检测的重中之重。

3.2 平台自振特性分析结果

海洋环境波浪能量通常集中在 6~15 秒周期范围, 对应频率 0.067~0.167Hz, 而平台基频为 0.42Hz, 两者相差较大, 表明该导管架平台属于刚性结构。在常规波浪条件下, 结构响应主要表现为随波浪力变化的准静态行为, 惯性效应引起的动态放大不突出。但高阶模态仍可能与波浪谱高频尾部发生耦合, 在随机波浪分析中需关注自振频率附近的响应成分。

4 规则波作用下的应力响应

4.1 典型工况的响应特征

选取波高 6 米、周期 8 秒的规则波作为基准工况进行分析。在该工况下, 导管架与甲板连接处主腿外侧节点的应力呈现出近似正弦波形的周期性变化, 其变化频率与波浪激励频率完全一致。当波峰经过平台位置时, 应力达到正向峰值; 波谷经过时则出现反向极值。该节点的应力幅值约为 42MPa, 均值约为 9MPa, 说明结构中既存在交变应力成分, 也叠加了由结构自重和平均波浪力引起的恒定应力, 但交变成分占据主导地位。沿水深方向考察不同位置主腿节点的应力幅值, 可以发现一个清晰的规律: 水面附近区域 (即静水位至水下 10 米范围内) 的应力响应最为剧烈, 该区域的应力幅值远大于深水区域。随着水深增加, 应力幅值逐渐减小, 至泥面附近时已衰减至水面处的约三成。这种分布特征与波浪压力沿水深呈指数衰减的物理规律完全吻合, 也验证了计算结果的合理性^[3]。由此可见, 水面附近的杆件和节点是波浪循环荷载作用下受力最严酷的部位, 应在设计和检测中给予重点关注。

4.2 波高变化的影响

波高是描述波浪强烈程度最直接的参数, 也是影响平台受力最显著的因素。本文计算了波高从 2 米逐步变化到 12 米 (步长 2 米)、周期固定为 8 秒时关键节点的应力幅值。结果显示, 在波高较小的范围内, 应力幅值随波高几乎呈线性增长。但波高超过 8 米以后, 增长率略有减缓, 表现出一定的非线性特征。究其原因, 这与 Morison 方程中拖曳力项的非线性特性有关——拖曳力与速度平方成正比, 在大波浪条件下其贡献比例增大, 但拖曳力与惯性力的相位并不完全一致, 两者叠加后使得合力与波高之间不再是严格的线性关系。不过总体而言, 在工程关注的波高范围内, 采用线性近似仍然具有足够的工程精度。

4.3 波浪周期变化的影响

波浪周期对应力幅值的影响比波高更为复杂。计算

中固定波高为 6 米,周期从 5 秒逐步增至 16 秒。结果表明,应力幅值随周期增大呈现先上升后下降的非单调变化趋势:在 5 至 10 秒区间内,应力幅值随周期增大而逐步升高,增幅约为 25%;当周期超过 10 秒后,应力幅值反而随周期继续增大而出现小幅回落。这种非单调行为的背后存在两种相互竞争的物理机制。一方面,周期增大意味着波长变长,水质点轨道运动的垂向范围随之扩展,波浪的影响力可以传递到更深的水层,从而使更多浸没的杆件承受波浪力,总荷载增大。另一方面,周期增大使水质点的加速度幅值减小,而惯性力与加速度直接相关,因此惯性力贡献有所降低。两种机制共同作用的结果是,在某个中间周期处应力响应达到峰值。对本平台而言,这一临界周期约为 10 秒,意味着在该周期附近的波浪对平台造成的循环应力最为不利,在疲劳设计中应予以充分重视。

4.4 水深变化的效应

水深的变化会同时影响波浪的色散特性以及平台浸没部分的几何范围。本文考察了水深从 40 米到 80 米五种工况下的应力响应变化。结果表明,应力幅值随着水深增加呈现先增后减的趋势。当水深从 40 米增加到 60 米时,应力幅值增大了近两成,这是因为水深增大使波长相应增加,水质点轨道运动向深处延伸,更多杆件进入了显著的受力区域。然而当水深进一步增至 80 米时,应力幅值反而略有降低,降幅约 5%。这可能与水深变化导致波浪相位沿杆件长度的分布发生改变有关,不同杆件上波浪力的相位差使叠加后的总效果出现部分抵消。这一现象表明,水深对应力响应的影响并非单调的,在进行平台疲劳分析时应基于实际水深进行具体计算,不宜采用简单的经验外推。

5 随机波浪作用下的响应特征

5.1 响应谱的多峰特性

真实海域的波浪并非单一的规则波,而是由无数不同频率和方向的波浪成分叠加而成的不规则波列。本文采用广泛使用的 JONSWAP 谱来模拟随机波浪,设定有效波高为 5 米,谱峰周期为 10 秒。将生成的时长为 600 秒的不规则波序列作用于平台,得到关键节点的应力响应时程,进而通过傅里叶变换获得响应功率谱。对比波浪输入谱和结构响应谱可以发现,响应谱呈现出明显的多峰特征。主峰出现在约 0.1Hz 附近,对应波浪谱的峰频,这个频段的响应能量最为集中。与此同时,在平台

一阶自振频率 0.42Hz 处也出现了一个显著的峰值,尽管波浪谱在这个频率上的能量已经很低,但由于结构共振的放大效应,该频率处的响应仍然不可忽视,放大系数约为 3.2 倍。此外,在 0.84Hz 附近还观察到了三倍频的微弱峰值,这是波浪-结构相互作用中非线性效应的一种表现。由此可见,即使在常规海况下,结构的自振特性仍然会在响应谱中留下印记,对于评估结构的高频应力成分有一定意义。

5.2 应力循环的统计分布

疲劳损伤不仅取决于应力幅值的大小,还与应力循环发生的次数密切相关。本文采用雨流计数法对随机波浪响应时程进行循环统计,得到了应力幅值的分布特征。统计结果显示,应力幅值的概率密度呈威布尔型分布,其中小于 20MPa 的小幅值循环数量最多,约占总循环数的六成以上;幅值在 20 至 50MPa 之间的中等循环约占三成;而幅值超过 50MPa 的大幅值循环虽然数量很少,仅占总数的不到 5%,但在疲劳损伤评估中却起着决定性作用——计算表明这部分大幅值循环对总累积疲劳损伤的贡献高达七成。这一结果提示我们,在疲劳设计和寿命评估中,不能仅关注应力循环的总体数量,更要准确捕捉大幅值循环的发生频率和幅值大小,它们才是决定疲劳寿命的关键因素。

结束语

本文对典型导管架平台在波浪循环荷载下的应力响应进行了系统分析。应力幅值随波高增大近线性增长,随周期增大先升后降,存在最不利波浪周期;水深变化使应力幅值先增后减,存在临界水深;随机波浪下响应谱呈多峰特征,自振频率处出现共振放大;焊接节点应力集中系数达 2.0 以上,热点应力远高于名义应力,是疲劳裂纹萌生的高风险部位。后续需进一步考虑波浪与海流联合作用及材料循环软化特性,建立更加完善的平台疲劳评价体系。

参考文献

- [1] 徐志伟. 海上风电升压站平台设计及有限元计算分析 [J]. 内蒙古电力技术, 2022,40(1):44-48.
- [2] 杨帆, 闫天红, 周国强, 等. 考虑土体参数影响的桩基式海洋平台结构安全分析 [J]. 石油机械, 2026,54(6):58-66.
- [3] 左熹, 许想, 周恩全. 波浪荷载作用下群桩筒基础动力响应研究 [J]. 水力发电, 2023,49(12):112-118.