



浮式平台大直径钢管锚桩疲劳分析

曾 冬, 丁建军

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 针对浮式平台大直径钢管锚桩疲劳设计, 研究了英国标准学会、法国船级社、美国材料试验学会以及挪威等国家的相关标准或规程, 详细论述了锚桩疲劳分析理论、分析流程和疲劳设计分区。采用 $S-N$ 曲线法计算焊缝等级 C、D 下的锚桩线性累积损伤, 结果表明: 增加钢筋混凝土芯柱、增大钢管桩壁厚以及提高焊缝等级能有效改善锚桩抗疲劳性能。研究成果可为钢管桩疲劳设计提供一定的参考。

关键词: 大直径钢管锚桩; 疲劳; 疲劳设计分区; $S-N$ 曲线法; 线性累积损伤; 焊缝等级

中图分类号: U 652.7; U 655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0182-08

Fatigue assessment for large-diameter steel tubular restraining pile

ZENG Dong, DING Jian-jun

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: For the fatigue design of large-diameter steel tubular restraining piles for floating regasification units, studies are conducted on relevant codes of British Standard, Bureau Veritas, ASTM, and Det Norske Veritas. Details of fatigue analysis theory, analysis flow, and design section zoning are discussed. $S-N$ curve methodology is adopted to calculate the linear cumulative damage of restraining piles under weld class C and D, respectively. The results show that concrete filling, increasing pile wall thickness and weld class can improve the fatigue resistance of the restraining pile. The research results can provide a reference basis for the fatigue design of steel tubular piles.

Keywords: large-diameter steel tubular restraining pile; fatigue; design section zoning; $S-N$ curves methodology; linear cumulative damage; weld class

液化天然气浮式气化平台具有节约成本、远离工业区和人口密集区停泊等优点, 受到越来越多的关注。国外某大型液化天然气浮式气化平台首次采用大直径钢管锚桩进行系泊作业, 浮式平台体积大且长期受波浪荷载作用, 锚桩将承受很大的水平循环荷载, 从而产生疲劳累积损伤, 因此为了保证锚桩能够为浮式平台提供可靠的锚固, 有必要对锚桩进行疲劳评估。

现有文献对海洋结构疲劳损伤进行了一定研

究, 赖明雁^[1]采用谱分析法对深水钻井船的结构疲劳强度进行了评估, 刘志强等^[2]基于 Miner 累积损伤理论对海洋石油平台系泊链疲劳强度进行分析, 刘洪涛等^[3]研究了海洋平台锤击贯入式钢管桩的打桩疲劳。而现有文献对浮式平台大直径钢管锚桩研究较少, 且锚桩承受很大的水平循环荷载, 锚桩疲劳分析难度大。本文依据英国标准学会、法国船级社、美国材料试验学会以及挪威等国家的相关标准或规程对浮式气化平台锚桩进行

收稿日期: 2020-11-26

作者简介: 曾冬(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事码头和防波堤结构设计研究。

疲劳分析。

1 疲劳分析理论

1.1 钢结构疲劳失效

进行钢结构的疲劳分析,有必要了解钢结构常见的几种疲劳失效模式^[4]: 1)对于焊接钢结构,疲劳裂纹易从焊趾处形成并扩展至母材,在设计中要尽量避免这种失效模式; 2)角焊缝疲劳裂纹从焊缝根部形成并贯穿,这种破坏模式后果严重; 3)疲劳裂纹从焊缝根部扩展至母材部分,这种疲劳失效模式常见于疲劳试验; 4)疲劳裂纹从结构表面不平整或缺口处形成,常发生于结构应力较大处。

1.2 疲劳荷载谱

疲劳荷载谱是建立疲劳设计方法的基础,作用在结构上的荷载是随时间变化的,需要采用某种统计方法进行分析。国外疲劳设计方法^[5-6]通常采用雨流循环计数法统计不同应力幅对应的实际循环次数。雨流循环计数法原理^[7]是将应力变化时间序列简化为一系列应力转折点,只考虑应力峰值和谷值,中间点将被过滤,因而可以统计出不同应力幅对应的出现次数,再降序排列相关循环次数来确定疲劳荷载谱,见图 1。

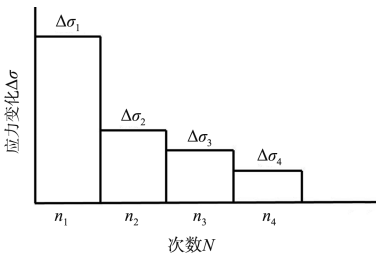


图 1 疲劳荷载谱

1.3 S-N 曲线

S-N 曲线为应力幅与疲劳失效循环次数之间的量化曲线,用于特定类型结构细部的疲劳评价。钢管桩采用对接焊缝加工制造,海水中阴极保护下钢管对接焊缝节点 S-N 曲线可以采用规范 BV NI 611 和 BS EN ISO 19902^[8]中的 C 和 D 曲线,见表 1、2。

S-N 曲线表达式为:

当 $S \geq S_q$ 时,

$$\lg N = \lg K_1 - m_1 \lg S \tag{1}$$

当 $S < S_q$ 时,

$$\lg N = \lg K_2 - m_2 \lg S \tag{2}$$

式中: S 为应力幅 (N/mm^2); S_q 为曲线转折点应力幅 (N/mm^2); N 为应力幅 S 对应的疲劳失效循环次数; m_1 为第一段直线斜率; m_2 为第二段直线斜率; K_1 、 K_2 为常数。

表 1 基于 ISO 19902 管节对接焊缝焊趾裂缝分类

管节对接焊缝描述	S-N 曲线
焊缝表面打磨齐平,无损检测无明显缺陷	C
采用除埋弧焊之外的方法水平施焊	D

表 2 海水中阴极保护下管节对接焊缝 S-N 曲线类型

S-N 曲线	第一段		转折点		第二段	
	m_1	$\lg K_1$	N	S_q	m_2	$\lg K_2$
C	3.5	13.23	4.68×10^5	114.5	5	16.47
D	3.0	11.78	10^6	84.5	5	15.63

1.4 疲劳累积损伤法则

工程中最常用的疲劳累积损伤法则为线性累积损伤法则,它认为每个应力循环下的疲劳损伤是独立的,总损伤等于每个循环下的损伤之和,当总损伤达到某一数值时,即发生疲劳破坏。线性累积损伤法则中最具代表性的是 Palmgren-Miner 法则,简称 Miner 法则,见式(3)、(4):

$$D = \sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \cdots + \frac{n_q}{N_q} \leq D_{al} \tag{3}$$

$$D_{al} = 1/\text{DFF} \tag{4}$$

式中: D 为总疲劳损伤; n_1 、 n_2 和 n_q 分别为第 1、第 2 和第 q 种应力幅对应的实际循环次数; N_1 、 N_2 和 N_q 分别为第 1、第 2 和第 q 种应力幅对应的疲劳失效循环次数; D_{al} 为总疲劳损伤允许值,应小于 1; DFF 为设计疲劳系数。保守考虑,当焊缝可以进行检查和修补时, DFF 值取为 2, D_{al} 值为 0.5; 当焊缝不能进行检查或修补时, DFF 值取为 3, D_{al} 值为 0.33。

2.2 锚桩主要参数

锚桩桩顶高程 10.95 m, 桩底高程-30.0 m, 桩长 40.95 m。锚桩由大直径钢管桩和钢筋混凝土芯柱两部分组成。其中钢管桩材质为 S355 DH36, 顶高程 10.95 m, 底高程-27.0 m, 钢管桩长 37.95 m。在高程-12.0 m 以上, 钢管桩直径 2.48 m, 壁厚 50 mm; 在高程-12.0 m 以下, 钢管桩直径 2.50 m, 壁厚 60 mm。混凝土等级为 C35/45, 钢筋等级为 B500B, 钢筋混凝土顶高程-5.0 m, 底高程-30.0 m, 钢筋混凝土芯柱长 25.0 m。每个截面上共设 36 组钢筋, 每组 2 根直径 50 mm 的钢筋。

2.3 工程地质

本项目工程地质参数见表 3。

表 3 工程地质参数

土层	表面高程 /m	密度/ (t·m ⁻³)	C _u / kPa	ε ₅₀	q _{ur} /MPa
软黏土	-15.70	1.9	12	0.020	—
硬黏土	-16.27	1.9	50	0.007	—
硬黏土	-18.42	1.9	250	0.004	—
软岩	-20.78	2.6	—	—	5
硬岩	-30.96	2.6	—	—	17

2.4 波浪条件

浮式再气化平台位于防波堤堤后, 防波堤掩护效果良好, 浮式再气化平台所在位置波浪较小, 设计使用寿命内不同波况下波数统计结果见表 4。

表 4 浮式再气化平台位置处设计寿命 25 a 内所有波况下波数统计

H _s /m	波数/个									合计/个
	T _p =8 s	T _p =10 s	T _p =12 s	T _p =14 s	T _p =16 s	T _p =18 s	T _p =20 s	T _p =22 s	T _p =24 s	
0.05	15 351 250	11 041 250	2 320 625	57 500	1 875	0	0	0	0	28 772 500
0.10	12 114 688	8 989 250	8 271 875	5 851 071	1 061 250	11 111	125	0	0	36 299 370
0.15	1 761 250	1 067 500	1 459 375	1 871 429	2 038 594	395 694	23 625	1 477	0	8 618 944
0.20	162 188	99 250	55 625	237 500	723 906	403 472	66 125	7 273	0	1 755 339
0.25	10 000	7 250	0	25 357	143 594	124 306	23 625	795	104	335 031
0.30	3 750	0	0	1 786	24 688	20 139	3 250	0	0	53 613
0.35	313	0	0	0	1 250	1 111	2 125	114	729	5 642
0.40	0	0	0	0	0	0	0	682	0	682
0.45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计/个	29 403 438	21 204 500	12 107 500	8 044 643	3 995 157	955 833	118 875	10 341	833	75 841 119

2.5 浮式再气化平台系泊力时间序列

为了获得浮式再气化平台对锚桩作用的水平循环荷载大小, 采用 3D 模型开展浮式再气化平台系泊分析。从 3D 模型中提取不同波况下的系泊力时间序列用于锚桩疲劳分析。图 5 为对应有效波高 H_s=0.2 m 和谱峰周期 T_p=12 s 波浪条件不同锚桩系泊力时间序列。

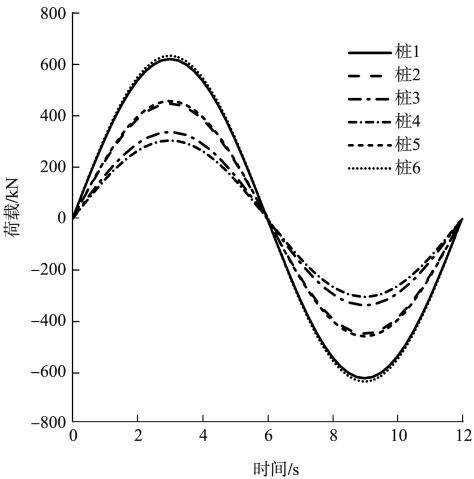


图 5 有效波高 H_s=0.2 m 和谱峰周期 T_p=12 s 系泊力时间序列

2.6 有限元模型

采用 Ansys 软件进行锚桩内力分析, 锚桩采用 3D 弹性梁单元 BEAM188 模拟, 通过 P - Y 曲线法模拟桩-土之间的相互作用。 P - Y 曲线为桩周土对桩身抗力 P 与桩侧水平变形 Y 之间的关系, 而 Ansys 软件中 COMBIN39 非线性弹簧单元有 F - D 常数对能够表示力与位移之间的关系。因此, 可以采用 COMBIN39 单元模拟桩土相互作用。锚桩泥面以下每个节点通过两个相互垂直的 COMBIN39 单元进行限制, 见图 6。



图 6 锚桩有限元模型

2.7 单位荷载作用下锚桩节点应力

在锚桩 5.0 m 高程位置上施加单位水平荷载, 提取锚桩不同高程位置节点上的弯曲应力和剪切应力, 并按公式(5)计算锚桩节点等效应力。

$$\sigma_e = \frac{\sigma + e}{|\sigma + e|} \left(\frac{|\sigma|}{2} + \sqrt{\frac{\sigma^2}{2} + \tau^2} \right) \tag{5}$$

式中: σ 为弯曲应力; τ 为剪切应力; σ_e 为节点等效应力; e 为一小值, 主要是为了避免分母为 0。

图 7 为单位荷载作用下锚桩节点应力随高程变化曲线。

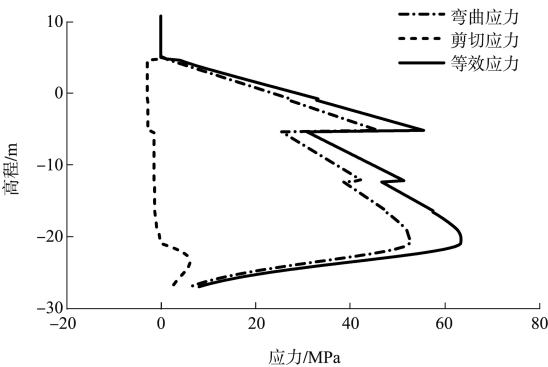


图 7 单位荷载作用下锚桩节点应力沿高程分布

2.8 锚桩节点应力时间序列

获得单位荷载作用下的锚桩节点等效应力 σ_e 后, 再乘以系泊力时间序列 $L(t)$, 可以得到不同波况下锚桩不同高程位置处节点等效应力时间序列 $\sigma(t)$ 。

$$\sigma(t) = \sigma_e \times L(t) \tag{6}$$

3 锚桩疲劳分析结果

3.1 锚桩防腐设计

锚桩腐蚀速率基于 BS EN 1993-5^[9] 表 4-2。考虑到工程地处热带水域, 腐蚀速率按双倍考虑。根据腐蚀速率大小将锚桩沿高程划分成 3 个区域, 保守考虑, 锚桩水下区和泥下区分界线取为原泥面以下 0.5 m, 见表 5、6。

表 5 锚桩腐蚀速率

分区	区域描述	腐蚀率/(mm·a ⁻¹)
区域 1	浪溅区、潮间带、低水位区	0.16
区域 2	水下区	0.08
区域 3	泥下区	0.02

表 6 锚桩防腐设计

分区	高程范围/m	阴极保护	预留腐蚀
区域 1	-0.70~10.95	水面以上阴极保护不适用	2 mm 预留腐蚀厚度和 600 μm 环氧涂层
区域 2	-16.20~-0.70	牺牲阳极满足 15 a 使用寿命	1 mm 预留腐蚀厚度
区域 3	<-16.20	-	0.5 mm 预留腐蚀厚度

3.2 锚桩疲劳设计分区

锚桩疲劳设计时, 须根据锚桩腐蚀区域划分、是否有钢筋混凝土芯柱, 以及钢管桩壁厚大小进行分区, 见图 8。锚桩共分 6 个区域, 依次为分区 1~6, 其中分区 6 只有钢筋混凝土芯柱, 无钢管桩, 因此不需要进行疲劳分析。

由图 8 可知, 锚桩分区 1 为钢管桩, 高程范围为 -0.70~10.95 m, 钢管桩外径 2.48 m, 壁厚 50 mm, 防腐措施为 2 mm 预留腐蚀厚度和 600 μm 环氧涂层; 锚桩分区 2 为钢管桩, 高程范围为 -5.00~-0.70 m, 钢管桩外径 2.48 m, 壁厚 50 mm, 防腐措施为 1 mm 预留腐蚀厚度和 15 a 牺牲阳极保护; 锚桩分区 3 为钢管桩、钢筋和混凝土

组成的复合截面, 高程范围为-12.00~-5.00 m, 钢管桩外径 2.48 m, 壁厚 50 mm, 防腐措施为1 mm 预留腐蚀厚度和 15 a 牺牲阳极保护; 锚桩分区 4 为钢管桩、钢筋和混凝土组成的复合截面, 高程范围为-16.20~-12.00 m, 钢管桩外径 2.50 m, 壁厚 60 mm, 防腐措施为 1 mm 预留腐蚀厚度和 15 a牺牲阳极保护; 锚桩分区 5 为钢管桩、钢筋和混凝土组成的复合截面, 高程范围为-27.00~-16.20 m, 钢管桩外径 2.50 m, 壁厚 60 mm, 防腐措施为 0.5 mm 预留腐蚀厚度。钢筋混凝土芯柱钢管桩不同分区惯性矩计算结果见表 7。

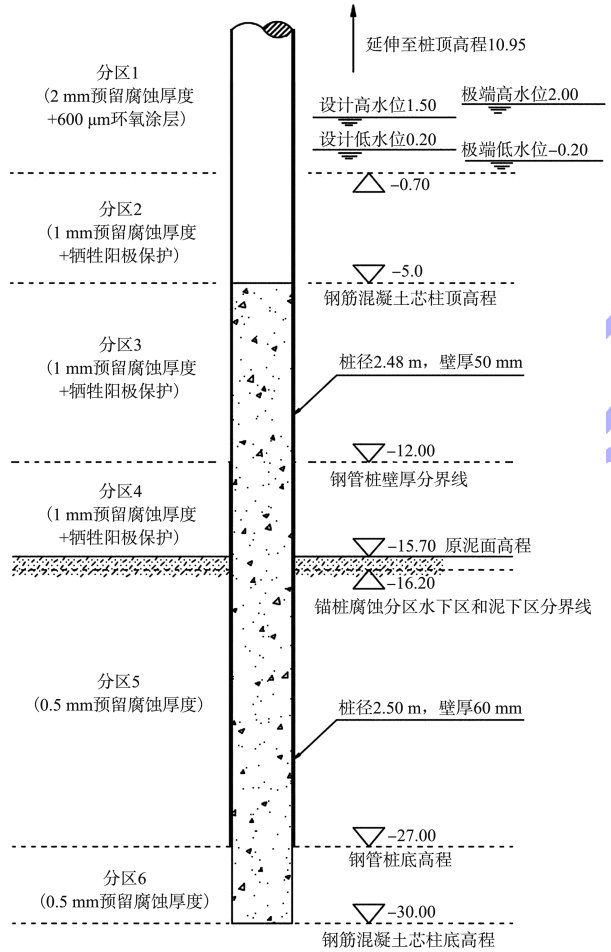


图 8 锚桩疲劳设计分区 (高程: m)

分区	惯性矩/m ⁴			
	钢管桩	钢筋	混凝土	复合截面
1	0.259	0	0	0.259
2	0.271	0	0	0.271
3	0.271	0.150	0.076	0.497
4	0.331	0.150	0.076	0.557
5	0.337	0.150	0.076	0.563

3.3 锚桩疲劳损伤结果讨论

锚桩疲劳裂缝一般从焊缝处形成, 因此, 有必要分别评估锚桩 5 个分区焊缝的等级要求。开展两组分析工况, 分别采用焊缝等级 C 和焊缝等级 D 进行锚桩疲劳评估, 不同焊缝等级下锚桩沿高程累积疲劳损伤结果见图 9。分别提取锚桩不同分区最大疲劳损伤值, 见表 8。

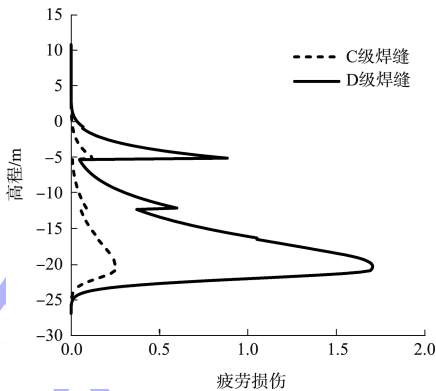


图 9 不同焊缝等级下锚桩沿高程累积疲劳损伤结果

表 8 锚桩不同分区最大疲劳损伤结果					
工况	锚桩分区	腐蚀区域	钢筋	焊缝等级	最大疲劳损伤
1	1	1	—	C	0.01
	2	2	—	C	0.13
	3	2	2×50 mm	C	0.09
	4	2	2×50 mm	C	0.15
	5	3	2×50 mm	C	0.25
2	1	1	—	D	0.07
	2	2	—	D	0.88
	3	2	2×50 mm	D	0.60
	4	2	2×50 mm	D	1.05
	5	3	2×50 mm	D	1.71

锚桩分区 1~4 位于泥面以上, 焊缝可以进行检查和修复, 设计疲劳系数 DFF 取 2, 对应的最大疲劳损伤允许值为 0.5。而锚桩分区 5 位于泥面以下, 焊缝不能进行检查和修复, DFF 值取 3, 对应的最大疲劳损伤允许值为 0.33。锚桩分区 1 为 C 级焊缝和 D 级焊缝对应的最大疲劳损伤分别为 0.01 和 0.07, 均小于最大疲劳损伤允许值 0.50, 因此, 锚桩分区 1 焊缝等级取 D 级。锚桩分区 2 为 D 级焊缝对应的最大疲劳损伤为 0.88, 超出最大疲劳损伤允许值 0.50; 而锚桩分区 2 为 C 级焊缝对应的最大疲劳损伤为 0.13, 小于最大疲劳损

伤允许值 0.50，因此，锚桩分区 2 焊缝等级取 C 级。锚桩分区 3 为 D 级焊缝对应的最大疲劳损伤为 0.60，超出最大疲劳损伤允许值 0.50；而锚桩分区 3 为 C 级焊缝对应的最大疲劳损伤为 0.09，小于最大疲劳损伤允许值 0.50，因此，锚桩分区 3 焊缝等级取 C 级。锚桩分区 4 为 D 级焊缝对应的最大疲劳损伤为 1.05，超出最大疲劳损伤允许值 0.50；而锚桩分区 4 为 C 级焊缝对应的最大疲劳损伤为 0.15，小于最大疲劳损伤允许值 0.50，因此，锚桩分区 4 焊缝等级取 C 级。锚桩分区 5 为 D 级焊缝对应的最大疲劳损伤为 1.71，超出最大疲劳损伤允许值 0.33；而锚桩分区 5 为 C 级焊缝对应的最大疲劳损伤为 0.25，小于最大疲劳损伤允许值 0.33，因此，锚桩分区 5 焊缝等级取 C 级。所以，锚桩不同分区焊缝等级要求见表 9。

表 9 锚桩不同分区焊缝等级要求

锚桩分区	腐蚀区域	钢筋	焊缝等级	最大疲劳损伤
1	1	-	D	0.07
2	2	-	C	0.13
3	2	2×50 mm	C	0.09
4	2	2×50 mm	C	0.15
5	3	2×50 mm	C	0.25

由表 9 可知，无论为 C 级焊缝还是 D 级焊缝，锚桩累积疲劳损伤在不同分区界面上均存在跳跃间断点，锚桩由分区 1 变化至分区 2，分界面位于高程-0.70 m 位置处，锚桩累积疲劳损伤稍微减小，原因为锚桩预留腐蚀厚度由 2 mm 减小为 1 mm，锚桩惯性矩由 0.259 m⁴增大至 0.271 m⁴，锚桩刚度增大，锚桩应力幅将减小，对应的疲劳失效循环次数将增大，因此，锚桩累积疲劳损伤稍微减小。锚桩由分区 2 变化至分区 3，分界面位于高程-5.00 m 位置处，锚桩累积疲劳损伤明显减小，原因为钢管桩内浇筑钢筋混凝土芯柱，锚桩惯性矩由 0.271 m⁴增大至 0.497 m⁴，锚桩刚度显著增大，锚桩应力幅明显减小，对应的锚桩疲劳失效循环次数显著增加，因此，锚桩累积疲劳损伤显著减小。锚桩由分区 3 变化至分区 4，分界面位于高程-12.00 m 位置处，锚桩累积疲劳损伤减小，原因为钢管桩壁厚由 50 mm 增加至 60 mm，

惯性矩由 0.497 m⁴增大至 0.557 m⁴，锚桩刚度增大，锚桩应力幅减小，对应的锚桩疲劳失效循环次数增加，因此，锚桩累积疲劳损伤减小。锚桩由分区 4 变化至分区 5，分界面位于高程-16.20 m 位置处，锚桩累积疲劳损伤稍微减小，原因为锚桩预留腐蚀厚度由 1 mm 减小为 0.5 mm，锚桩惯性矩由 0.557 m⁴增大至 0.563 m⁴，锚桩刚度增大，锚桩应力幅将减小，对应的锚桩疲劳失效循环次数将增大，因此，锚桩累积疲劳损伤稍微减小。由此可见，锚桩桩内浇筑钢筋混凝土和增大钢管桩壁厚对于改善锚桩抗疲劳性能效果显著。

对于锚桩分区 1，C 级焊缝和 D 级焊缝锚桩累积疲劳损伤均小，原因为锚桩分区 1 内节点应力小，应力幅值较小，对应的锚桩疲劳失效循环次数大，因此，锚桩累积疲劳损伤小。对于锚桩分区 2 至分区 5，锚桩 D 级焊缝累积疲劳损伤明显大于 C 级焊缝疲劳损伤，C 级焊缝和 D 级焊缝主要区别在于 C 级焊缝需进行焊后打磨，修整齐平。由此可知，进行焊后打磨修整齐平也能显著改善锚桩抗疲劳性能。

4 结语

- 1) 锚桩疲劳分析的关键之一在于获得锚桩节点应力时间序列，通过在锚桩上施加单位荷载获得不同高程位置上的节点应力，再与系泊力时间序列相乘获得锚桩节点应力时间序列。
- 2) 锚桩累积疲劳损伤在不同分区界面上存在跳跃间断点，因此，锚桩疲劳分析时应根据刚度变化进行设计分区。
- 3) 增加钢筋混凝土芯柱、增大钢管桩壁厚以及提高焊缝等级能有效改善锚桩抗疲劳性能。
- 4) 锚桩疲劳分析时，设计疲劳系数 DFF 应根据锚桩焊缝是否可以进行检查和修复进行取值。
- 5) 国标水运工程钢结构设计规范^[10]采用容许应力法进行疲劳设计，由于容许应力法存在一定的安全因素经验性和主观臆断性^[11]，因此将疲劳设计的可靠度建立在概率论的基础上，采用 S-N 曲线法进行线性累积损伤计算是今后制定规范的一个趋势。

参考文献:

[1] 赖明雁.深水钻井船结构疲劳强度分析[J].船舶设计通讯, 2010(2): 50-55.

[2] 刘志强,王明强,朱永梅.基于 Miner 累计损伤理论的海洋石油平台系泊链疲劳强度分析[J].造船技术, 2011(4): 19-21, 34.

[3] 刘洪涛,黄怀州,袁玉杰.一种 TLP 钢管桩疲劳设计方法探析[J].石油和化工设备, 2016, 19(2): 18-22, 26.

[4] Det Norske Veritas(DNV). Fatigue design of offshore steel structures: DNV-RP-C203: 2011 [S]. Høvik, Norway: DNV, 2011.

[5] British Standard Institution. BS EN 1993-1-9: 2005. Design of steel structures-part 1-9: Fatigue: BS EN 1993-1-9: 2005[S]. London: BSI, 2004.

[6] Bureau Veritas. Guidelines for fatigue assessment of steel ships and offshore units: NI 611 DT R00E [S]. Paris:

Bureau Veritas, 2016.

[7] ASTM International. Standard practices for cycle counting in fatigue analysis: ASTM E1049-85[S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2017.

[8] British Standard Institution. Petroleum and natural gas industries-Fixed Steel Offshore Structures: BS EN ISO 19902[S]. London: BSI, 2008.

[9] British Standard Institution. BS EN 1993-5: 2007. Design of steel structures-part 5: Piling: BS EN 1993-5: 2007[S]. London: BSI, 2007.

[10] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程钢结构设计规范: JTS 152—2012[S].北京: 人民交通出版社, 2012.

[11] 马庆如,曹绍圣.国外焊接钢结构疲劳设计方法的进展[J].冶金建筑, 1981(4): 30-35.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 100 页)

2) 冲坑面积 A 与平衡时最大冲深 h_s 随弗劳德数 Fr 总体呈线性增长; $Fr<0.565$ 时, 平均冲深 \bar{h} 随 Fr 增长较慢, 此时来流条件对 \bar{h} 影响较小; 而 $Fr>0.565$ 时, \bar{h} 随 Fr 增长则相对较快。

3) H_{d1} 与 L_{d2} 对局部冲坑形态及冲深发展的影响具有一定的等效性, 在相同水流条件, 不同丁坝尺度时, 冲刷平衡时的冲坑形态一致, 冲刷开始的 0.4 h 内, 冲深随时间发展规律一致。

4) 随着一级丁坝相对高度 ψ 的增加, H_{d1} 对 h_s 及 \bar{h} 的影响效果逐渐降低, h_s 与 \bar{h} 均随 ψ 的增大逐渐增加, $\psi>0.7$ 时, 其增幅趋于平缓。

参考文献:

[1] 钟亮,孙建云,刘珺洁,等.阶梯形丁坝下游回流规律分析[J].水利水运工程学报, 2017(5): 9-17.

[2] 武永新,王建家,苑希民.丁坝工程冲刷与防护措施研究综述[J].自然灾害学报, 2020, 29(1): 1-10.

[3] 彭静,玉井信行,河原能久.丁坝坝头冲淤的三维数值模拟[J].泥沙研究, 2002(1): 25-29.

[4] ZHANG L, WANG H, ZHANG X Q, et al. The 3-D morphology evolution of spur dike scour under clear-water scour conditions[J]. Water, 2018, 10(11): 1-15.

[5] 王振,刘焕芳,王燕燕.丁坝设计参数对河床冲淤量的影响规律研究[J].人民长江, 2013, 44(22): 22-24.

[6] RAJARATNAM N, NWACHUKWU B A. Flow near groin-like structures[J]. Journal of hydraulic engineering, 1983, 109(3): 463-480.

[7] 陆晶,倪丁凡,刘亚威,等.挑角对淹没丁坝附近河床变形影响的试验[J].武汉大学学报(工学版), 2015, 48(1): 11-14.

[8] 方达宪,王军.丁坝坝头床沙起冲流速及局部最大冲深计算模式的探讨[J].泥沙研究, 1992(4): 77-84.

[9] 宁健,李国栋,马森.河宽缩窄率对河床冲刷形态影响数值模拟研究[J].水力发电学报, 2017, 36(8): 43-49.

[10] 马兴华,周海.丁坝及淹没丁坝冲刷公式研究[J].水运工程, 2015(1): 126-133.

[11] PANDEY M, AHMAD Z, SHARMA P K. Estimation of maximum scour depth near a spur dike[J]. Canadian journal of civil engineering, 2015, 43(3): 270-278.

[12] 钟亮,王振志,王舒,等.非淹没复式断面丁坝区的流速分布规律[J].长江科学院院报, 2018, 35(6): 60-66.

[13] 喻涛.非恒定流条件下丁坝水力特性及冲刷机理研究[D].重庆: 重庆交通大学, 2013.

[14] 喻涛,王平义,陈里,等.非恒定流作用下丁坝局部冲刷研究[J].四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(3): 31-36.

(本文编辑 王璁)