



钢管桁架结构在系缆力作用下的疲劳寿命分析

李元青¹, 王安华¹, 王秋忆²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 外海开敞大型原油码头系缆墩采用全钢管桁架结构时, 利用计算系缆力研究其疲劳寿命, 往往使计算疲劳寿命偏短, 与实际情况偏离较大。目前对实测系缆力的分析研究较少, 无规律可循。对日照港岚山港区 30 万吨级原油码头扩建工程的实测系缆力数据进行分析研究, 找出系缆力的分布规律, 并根据系缆力的概率分布分析系缆墩管节点的疲劳损伤。分析结果表明: 结构疲劳损伤最大的为中层管节点, 系缆力对系缆墩疲劳损伤影响较小, 仅为 10^{-4} 数量级。

关键词: 实测系缆力; 全钢管桁架结构; 疲劳损伤; 疲劳寿命

中图分类号: U 656.1⁺32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)10-0080-06

Analysis of fatigue life for steel tubular frame marine structure by the mooring load

LI Yuan-qing¹, WANG An-hua¹, WANG Qiu-yi²

(1.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China; 2.Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For all-steel tubular frame mooring structure of large offshore oil wharf, the calculated fatigue life using calculated mooring load will be short and be deviated from the actual situation. Currently there are fewer researches on the analysis of the measured mooring load, and they are disorder. This paper analyzes actual measuring mooring load of 300 000 DWT crude oil wharf expansion project in Ri-zhao port Lan-shan harbor, and finds out the probability law of distribution for mooring load and analyzes the fatigue damage of the tubular nodes. The analysis results show that the worst fatigue damage nodes are middle tube nodes, and mooring load has little influence on fatigue damage to all-steel tubular mooring pier, only 10^{-4} orders of magnitude.

Keywords: actual mooring load; all-steel tubular frame marine structure; fatigue damage; fatigue life

随着我国原油对外依存度的不断增加, 迫切需要建设大型原油接卸泊位。近年来, 我国近岸优良的岸线资源大多已被开发, 为适应船舶大型化需求, 建设大型原油泊位必须向离岸化、深水化发展。

“桩基+钢管桁架”结构与重力式墩式结构相比, 具有自身承受的波浪、水流力较小的特点, 特别适用于深水、浪大的开敞式海域。该结构已广泛应用于海洋石油平台中, 但应用于码头工程中, 结构的计算还需要解决一些具体问题, 如疲

劳寿命分析。外海开敞式码头不仅要考虑随机波浪荷载对结构的疲劳损伤, 还要考虑船舶撞击力和系缆力等荷载对结构疲劳寿命的影响。前人的研究主要以靠船墩为对象, 发现波浪力单独作用下管节点疲劳寿命的计算结果富余较大, 而船舶撞击力对结构造成的疲劳损伤较大, 在疲劳分析中不可忽略^[1-2]。然而, 有关系缆力对结构疲劳损伤影响方面的研究仍然空缺。

本次研究依托日照港岚山港区 30 万吨级原油码头二期工程(简称“依托工程”), 在设计初期,

收稿日期: 2016-06-16

作者简介: 李元青(1968—), 女, 教授级高工, 从事水运设计工作。

计算系缆力作用下系缆墩的疲劳寿命时, 采用近似的办法将波浪作用频率约等于系缆力作用频率, 将最大计算系缆力约等于系缆力作用幅值, 得出的疲劳寿命远小于结构的设计使用年限, 由于缺少实测数据的支撑, 该近似方法使得结果失真较大。目前收集了已建成码头 6 个月的实测系缆力数据, 并分析系缆力的实际变化规律, 探究系缆力对该结构疲劳寿命, 特别是管节点处疲劳寿命的影响。

本研究以实测系缆力数据替代计算系缆力, 更符合实际情况, 且具有较高的可信度。为日后类似结构在设计阶段分析结构疲劳寿命问题时提供借鉴, 具有一定的工程实用价值。

1 全钢钢管桁架码头结构

1.1 结构特点

钢管桁架码头由上部平台、透空式钢管桁架主体、下部桩基结构及相关附属构件组成^[3]。

该结构的首要特点就是结构轻, 由于采用受力较为合理的空间桁架结构和桩基基础, 使承受同样外荷载的结构断面尺寸大为减小, 有效降低了工程投资。其次是结构透空, 没有重力式结构的巨大墙身, 也没有高桩墩台较大的上部墩台结构, 有效地减小了波浪荷载的冲击作用。该结构施工的主要特点就是整体预制程度高、水上作业量小、施工进度快。

钢管桁架结构作为新型码头结构, 国家“863”课题《离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头建造技术研究》已对其进行了较为全面的探究, 研究表明钢管桁架码头从工程技术、结构方案等方面都展现出了巨大的潜力, 代表了未来码头结构的重要发展方向。

1.2 依托工程结构方案

依托工程位于日照港岚山港区中作业区, 设计年吞吐量为 1 800 万 t。码头长 418 m, 由工作平台、靠船墩、系缆墩、人行桥组成。码头平面呈“蝶”型布置, 平面布置见图 1, 码头共有 8 个系缆墩和 2 个靠船墩, 其中艏艉缆和横缆的 6 个系缆墩采用钢管桁架结构。

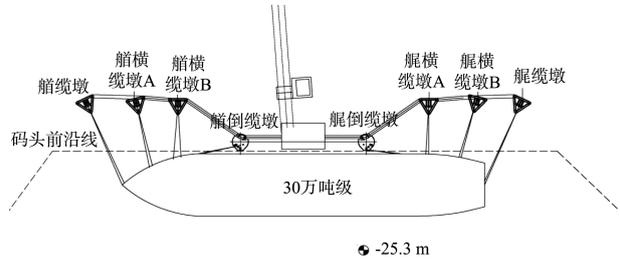


图 1 码头平面布置

系缆墩由 3 根 $\phi 2.4$ m 的钢管混凝土桩形成支撑, 顶部钢平台由箱型截面的纵横梁构成整个系缆平台。3 根钢管混凝土桩组成等边三角形, 钢管桁架高 46.2 m。钢管桁架结构在泥面 1 m 以下采用直径 2.2 m 的钻孔灌注桩, 钻孔灌注桩总长 17.7 m。桁架结构顶部通过钢结构纵、横梁和花纹钢板形成上部平台。

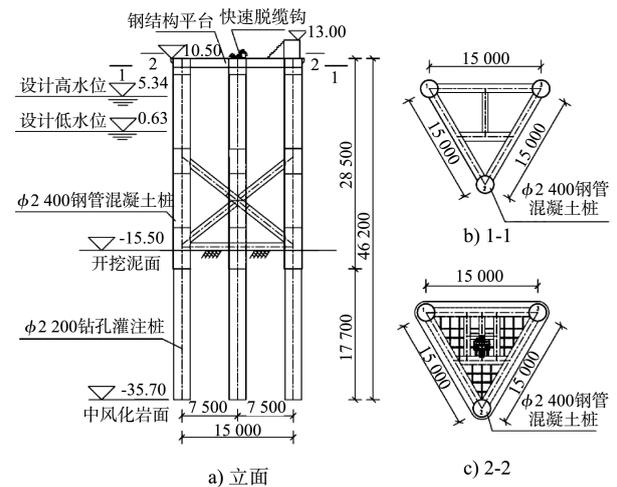


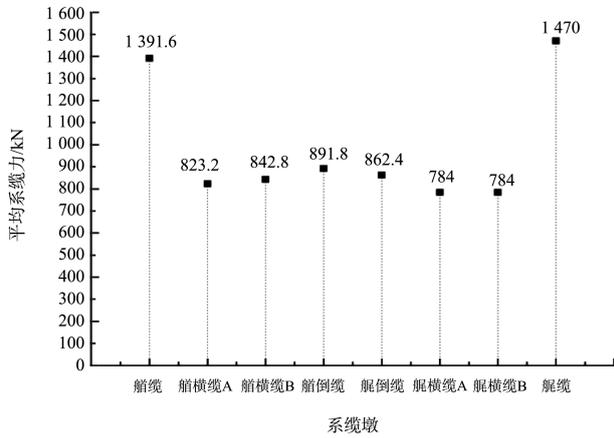
图 2 系缆墩结构 (高程: m; 尺寸: mm)

2 日照港油码头实测数据及其规律分析

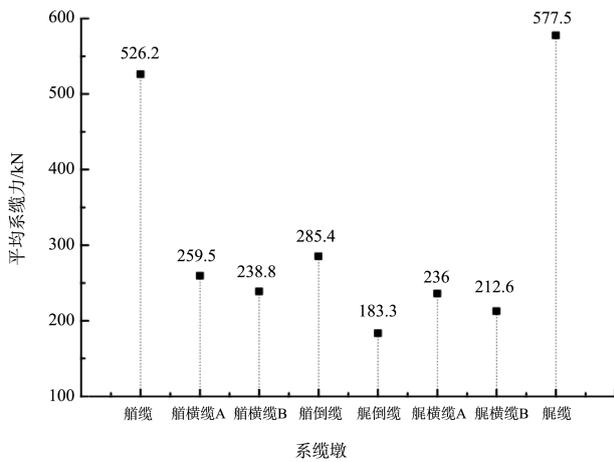
笔者收集了邻近泊位 2015-01-01—2015-06-30 共 6 个月的系缆力随时间变化情况, 并分析其变化规律。系泊缆绳载荷监测系统每隔 10 min 记录 1 组各系缆钩上的系缆力值, 因而每个系缆钩上 1 d 内有 144 组离散的数据, 总计 26 064 组离散数据。

2.1 系缆墩最大系缆力分析

选取恰当的系缆力值作为设计荷载对结构设计的安全性、合理性起着十分重要的作用。统计出各系缆墩 6 个月内的最大系缆力和平均系缆力, 见图 3。由图 3 各系缆墩上最大系缆力和平均系缆力的对比可知, 艏、尾系缆墩的总力最大。



a) 最大系统缆力



b) 平均系统缆力

图3 各系缆墩系统力

目前确定船舶系缆力的主要方式有3种：依据规范、数学模型和物理模型试验^[4]。物模试验成本高、耗费时间、依照规范计算步骤简单但结果粗略，因而本工程在设计阶段采用 Optimoor 数模软件进行系缆力计算。将实测数据统计得出的各系缆墩最大系统缆力值和通过 Optimoor 软件计算得出的最大系统缆力值进行对比可知，Optimoor 计算最大系统缆力结果相较实测数据更大，是一种偏保守的计算方法，见表1。

经分析，造成该差距的原因主要有以下两点：

1) 实测数据虽然极具代表性，但由于只记录了半年内的系缆力变化情况，可能未涵盖少数极端风浪条件下的系缆力值。2) Optimoor 软件计算出的是船舶在静力荷载作用下的不利组合的缆绳内力，但对于外海开敞式码头，动力作用也有影响，静力模型分析计算结果可能与实际情况相差较大。

表1 实测与数模计算得到的系缆墩最大系统力值

系缆墩	实测数据/kN	Optimoor 计算最大值/kN
船缆墩	1391.6	3853.6
船横缆墩A	823.2	2889.9
船横缆墩B	842.8	2889.9
船倒缆墩	891.8	1926.6
船倒缆墩	862.4	1926.6
艉横缆墩A	784	2889.9
艉横缆墩B	784	2889.9
艉缆墩	1470	3853.6

2.2 最大缆绳张力分析

为了确保船舶靠泊作业的安全，缆绳的正常工作是十分重要的一环。本工程的系缆方式为：船缆墩和艉缆墩各系4根，其余横缆墩和倒缆墩各系2根，系统总和为20根。在分别统计了各个系缆钩上缆绳的最大张力后(表2)，得出如下结论：

表2 各缆绳上最大张力

系缆钩	编号	最大张力/kN	系缆钩	编号	最大张力/kN
船缆	1	372.4	船倒缆	11	627.2
	2	411.6		12	588.0
	3	401.8		13	539.0
	4	411.6		14	637.0
船横缆	5	411.6	船横缆	15	401.8
	6	441.0		16	450.8
	7	470.4		17	539.0
	8	421.4		18	490.0
船倒缆	9	695.8	船倒缆	19	490.0
	10	450.8		20	460.6

1) 结合日照当地自然条件，该工程30万吨级船舶在风、浪、流联合作用下，全部20条工作缆绳中最大的张力出现在倒缆和艉缆上，船缆和横缆对应的的缆绳张力相对较小。

2) 系泊期间缆绳上最大系统缆张力为695.8 kN，30万t油轮一般选择44mm直径的钢缆(纤维缆)，根据《港口工程荷载规范》，其破断力为1320 kN。国际海运论坛组织(OCIMF)^[5]指导性文件中指出任何一条系泊缆绳上的载荷不得超过其最大破断载荷(MBL)的55%。根据实测数据，最大系统缆力未超过其破断力的55%，达到安全泊稳条件。

2.3 系缆力分布概率

近年来, 结构可靠度成为研究热点。结构在设计使用年限内, 在规定的条件下, 完成预定功能的能力为结构可靠性, 而结构可靠度是结构可靠性的概率度量。我国于 1992 年颁布了港口工程有关结构可靠度的结构设计标准 GB 50015—1992《港口工程结构可靠度设计统一标准》。由规范可知, 荷载统计特性是结构可靠度分析中必不可少的输入条件, 而系缆力作为钢管桁架结构系缆墩受到的主要外部荷载, 确定其分布类型对进一步研究结构可靠度提供重要的依据。

本文以 100 kN 为采样区间长度, 对作用于各系缆墩的系缆力进行了概率分布统计, 图 4 为作用于船缆墩和艮缆墩的系缆力概率分布。

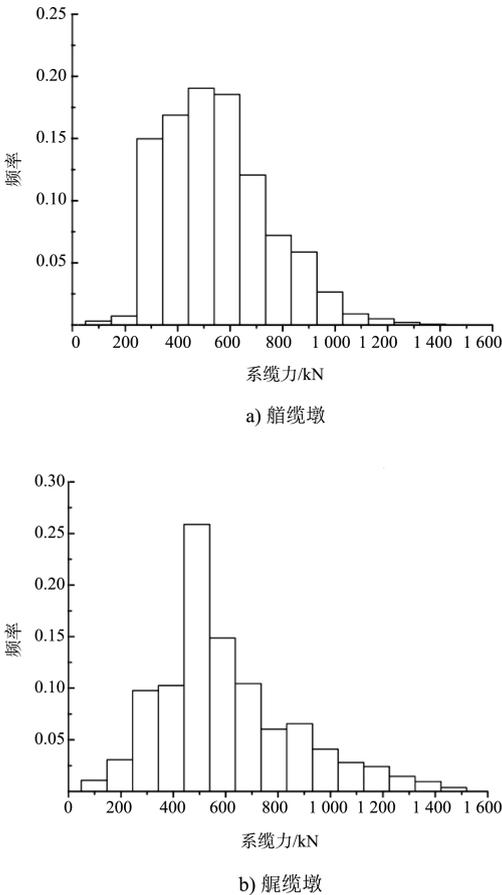


图 4 系缆力概率分布

从统计结果可知, 各系缆墩上系缆力分布概率类似, 均表现为中间高、两边低、左右不对称。各系缆墩上出现频率最高的系缆力值, 即图中的峰值, 偏向曲线左侧。船艮缆系缆墩上出现

概率最高的系缆力值在 500 kN 左右, 而横缆墩和倒缆墩上出现概率最高的系缆力值均在 200 kN 左右。

大连理工大学也曾对此做过研究^[6], 其根据收集的环境要素资料和随机变量的统计资料, 得到系缆力的样本, 进行统计分析和拟合检验后得出系缆力不拒绝服从正态分布、对数正态分布和极值 I 型分布, 见图 5。

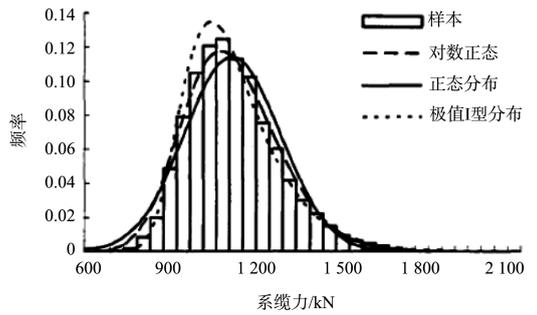


图 5 系缆力概率分布

本文在对依托工程的系缆力分布概率进行非线性拟合后, 发现极值 I 型分布更加贴合系缆力的概率分布 (图 6)。

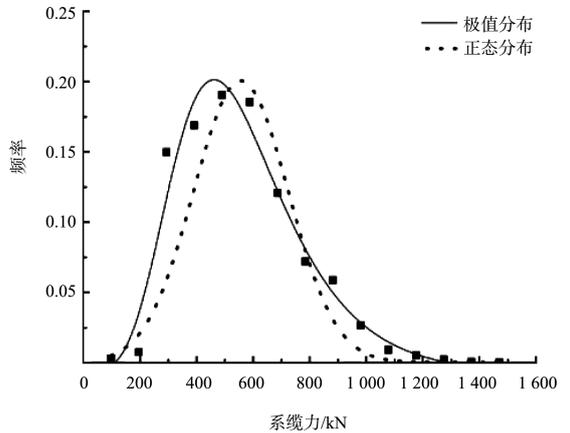


图 6 船艮缆系缆力分布拟合曲线

3 全钢钢管桁架码头在实测系缆力作用下的疲劳寿命分析

3.1 疲劳分析步骤

目前普遍用于工程前期疲劳分析阶段的理论为线性累积损伤理论, 即 Miner 理论。Miner 理论表示任意应力幅往复作用下的裂缝生命周期可通过实际循环次数和造成材料断裂的循环次数的比值来表示。本文采用 S-N 曲线法对钢管桁架结构

管节点进行疲劳寿命分析。 $S-N$ 曲线法是基于 Miner 线性累积损伤理论的一种安全寿命的设计方法。具体的步骤如下(图 7): 确定疲劳载荷谱, 建立长时间内系缆力作用的统计特性; 分析系缆力作用下的结构响应, 得出结构各管节点的名义应力; 根据结构各管节点的类型和几何尺寸, 计算应力集中系数, 得出各管节点的热点应力; 选择适用的 $S-N$ 曲线(本文采用挪威船级社(DNV)《海上钢结构疲劳强度分析推荐作法》中的 $S-N$ 曲线); 进行疲劳累积损伤分析。

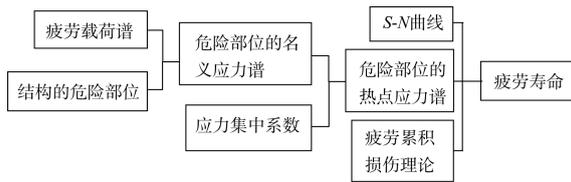


图 7 疲劳寿命计算步骤

3.2 疲劳载荷谱

要进行疲劳分析, 首先要编制疲劳载荷谱, 明确作用于结构上载荷往复作用的形式, 即往复作用的幅值与循环次数。船舶在水流、波浪和风的联合作用下运动, 该运动引起系缆力的变化。系缆力是作用于一点上的往复荷载, 其往复作用在结构内产生交变应力, 长久下去便造成疲劳损伤。

系缆力是不确定性载荷, 载荷值与靠泊环境关系密切。根据实测依托工程资料, 系缆力往复作用是由一系列小幅值循环和大幅值循环组成的, 一般 1 d 之内会出现两次大幅值循环。从文献[7]可知, 缆绳张力大小与水流、波浪、风等都重要的关系。相比较而言, 对缆绳张力大小的影响次序为: 水流、波浪和风, 因此初步推断大幅值循环是受水流作用的影响, 而小幅值循环则是风和波浪共同作用的结果。图 8 为 1 月 8 日靠泊时船缆墩系缆力随时间变化的曲线。

在对依托工程的 6 个月的系缆力变化情况进行统计之后, 获得了系缆力往复变化幅值与其对应循环次数的关系曲线(图 9)。

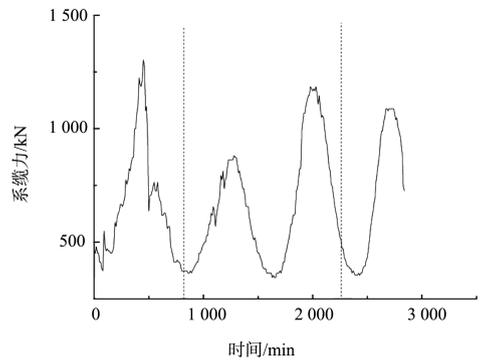


图 8 1月8日系缆力随时间变化的曲线

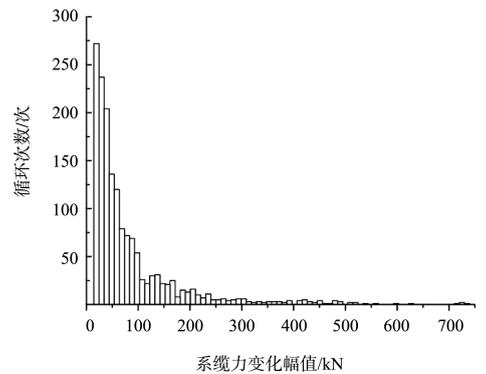


图 9 系缆力幅值与循环次数关系曲线

由图 9 可知, 系缆力往复变化幅值与其对应循环次数成反比, 变化幅值越大, 作用的循环次数越小。如果分别加载各离散的幅值, 工作量非常大, 也不具有可操作性。因而将图 9 的系缆力变化幅值分级统计, 以 100 kN 为基本区间进行划分, 得出表 3 所示的疲劳载荷谱。

表 3 疲劳载荷谱

系缆力幅值/kN	45	145	240	345	446	607
循环次数/次	1 243	213	75	31	27	12

3.3 系缆力作用下的疲劳损伤计算

根据对系缆力实测数据的观察分析, 发现系缆力一次往复作用的周期不固定, 最短为 15 min。经有限元模态分析得出, 系缆墩的固有频率为 2.59 Hz, 自振周期为 0.39 s, 图 10 为其一阶振型。依照中国船级社于 1992 年出版的《海上固定平台入级与建造规范》, 系缆力作为冲击性荷载的作用频率与结构固有频率相差甚远, 不会产生重大的动力响应, 不需做动力分析, 只需进行静力分析。

本文的研究对象为钢管桁架结构中的管节点,

该结构中共有 9 处关键管节点, 编号见图 11。

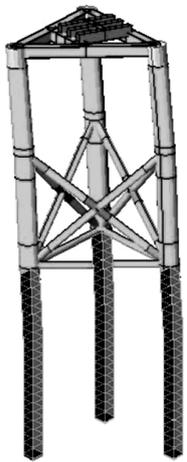


图 10 系缆墩一阶振型

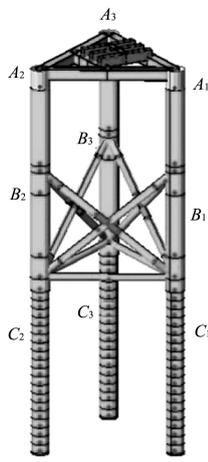
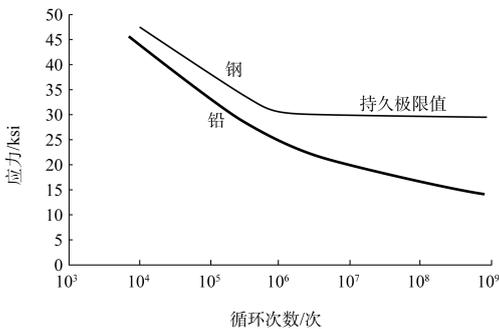


图 11 系缆墩中各管节点位置

在疲劳分析中, 一些研究者提出持久极限的概念, 当构件中的应力幅低于某一固定值时, 材料可以承受无限次应力循环, 却不造成疲劳。图 12 为某种钢试件对应的 $S-N$ 曲线, 其中上部曲线右侧的水平线数值即对应于该试件的持久极限值。



注: 1 ksi = 6.895 MPa。

图 12 对应于 $S-N$ 曲线中的持久极限值

结合管节点的结构响应分析和 $S-N$ 曲线, 以实测系缆力幅值对舢缆系缆墩结构各管节点进行疲劳分析得到 6 个月内疲劳累积损伤, 后扩展到 50 a 后得到设计年限内的疲劳累积损伤, 计算结果见表 4。由计算结果可知: 疲劳损伤最大的管节点为管架中层管节点。由 145 kN 和 45 kN 系缆力引起的疲劳损伤值非常小, 对总疲劳累积损伤不造成影响, 故没有列于表中。

4 结论

1) 该工程系缆墩分布方式科学合理, 能较好地满足安全泊稳条件。该布置方式可供后续开敞

式码头设计时参考。

表 4 系缆力作用下各管节点的疲劳累积损伤

管节点	6 个月内不同系缆力作用下的疲劳累积损伤				总累积损伤(50 a)
	603 kN	446 kN	345 kN	240 kN	
A_1	1.09×10^{-8}	/	/	/	1.09×10^{-6}
A_2	1.10×10^{-8}	/	/	/	1.10×10^{-6}
A_3	1.09×10^{-8}	/	/	/	1.09×10^{-6}
B_1	1.20×10^{-6}	1.35×10^{-6}	3.10×10^{-7}	7.50×10^{-8}	2.94×10^{-4}
B_2	6.00×10^{-6}	2.70×10^{-7}	3.10×10^{-8}	7.50×10^{-8}	9.75×10^{-5}
B_3	1.20×10^{-6}	1.35×10^{-6}	3.10×10^{-7}	7.50×10^{-8}	2.94×10^{-4}
C_1	1.20×10^{-8}	/	/	/	1.20×10^{-6}
C_2	1.20×10^{-7}	/	/	/	1.20×10^{-5}
C_3	1.20×10^{-7}	/	/	/	1.20×10^{-6}

注: “/” 表示热点应力值小于持久极限, 故认为对结构疲劳损伤没有影响。

2) 在分别对各系缆墩的系缆力分布概率进行非线性拟合后, 发现极值分布更加贴合系缆力的概率分布。

3) 该结构疲劳损伤最大的管节点为中层管节点。以实测系缆力计算的系缆墩疲劳损伤较小, 扩展到 50 a 设计年限时仅为 10^{-4} 数量级, 与计算系缆力相比差距很大。因此系缆力对系缆墩疲劳损伤影响较小。该结果可作为日后考量系缆力对钢管桁架结构疲劳损伤影响的参考依据。

参考文献:

- [1] 赵石峰, 陈廷国, 易平, 等. 深水港码头轻型导管架结构在船舶撞击下的疲劳分析[J]. 工程力学, 2010(8): 251-256.
- [2] 刘坤, 陈廷国, 易平, 等. 轻型码头结构提高疲劳寿命的方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011(3): 217-221.
- [3] 张志明, 杨国平, 周丰, 等. 轻型结构码头形式研究[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2010.
- [4] 王翔, 孙克俐, 王东凯, 等. 开敞式码头船舶系缆力数值分析[J]. 港工技术, 2012(8): 25-27.
- [4] 陈际丰, 林乐伟, 章少兰. 作用于开敞墩式原油码头结构船舶系缆力的选取[J]. 水运工程, 2011(6): 73-76.
- [5] Develop Effective Moorings for Tanker and Gas Carrier Terminals Exposed to Waves [R/OL]. Joint Industry Project, Proposal from TTI. <http://www.ten-siontech.com>, 2005-06-24.
- [6] 王建超. 轻型码头结构荷载标准与可靠度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [7] 向溢, 杨建民, 谭家华. 码头系泊船舶模型试验[J]. 海洋工程, 2001, 19(2): 45-49. (本文编辑 武亚庆)