



三峡库区变动回水区趸船系留设施 疲劳性能评估*

舒丹^{1,2}, 吴林键^{1,2}, 刘明维^{1,2}, 杜川³, 张伟毅², 崔艳明²

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 中交天航滨海环保浚航工程有限公司, 天津 300450)

摘要: 针对三峡库区变动回水区重庆段内某一典型码头工程项目, 分别计算得到在4种随机过程条件下, 其趸船系留设施中各缆绳、锚链在疲劳寿命期内的日均系缆、系锚应力-历时关系。根据Miner线性累积损伤理论, 结合各缆绳、锚链材料的 $T-N$ 曲线, 计算得到各缆绳、锚链的总疲劳损伤, 并预测各构件的疲劳寿命年限。本文中所用到的疲劳分析理论及计算过程不仅可以为三峡库区变动回水区趸船系留设施疲劳安全整改提供一定程度上的技术支撑, 也可类似工程项目的疲劳设计与评估提供有价值的参考依据。

关键词: 三峡库区变动回水区; 趸船系留设施; 缆绳、锚链; 疲劳评估

中图分类号: O 346.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0085-06

Fatigue performance evaluation of pontoon mooring facilities in fluctuating backwater area of Three Gorges Reservoir

SHU Dan^{1,2}, WU Lin-jian^{1,2}, LIU Ming-wei^{1,2}, DU Chuan³, ZHANG Wei-yi², CUI Yan-ming²

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. CCCC-TDC Binhai Environmental Channel Dredging Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: Based on a wharf project in the fluctuating backwater area of Three Gorges Reservoir in Chongqing, we calculate each mooring line and anchor chain's average daily stress-duration curve within the scope of the whole fatigue life period under the four kinds of random process. Based on the Miner linear cumulative damage law, and combining with the $T-N$ curve of each mooring rope and anchor chain, we get the cumulative fatigue damage of every one, and predict the fatigue life. The fatigue analysis method can not only provide a technical support for the safety hidden dangers' rectification of pontoon mooring facilities in the fluctuating backwater area of Three Gorges Reservoir, but also provide valuable reference for the fatigue design and evaluation of similar projects.

Keywords: fluctuating backwater area of three gorges reservoir; pontoon mooring facilities; mooring line and anchor chain; fatigue evaluation

三峡水库蓄水后, 其内最高蓄水位时的回水末端至最低蓄水位时回水末端之间的区域被称为变动回水区^[1]。由于三峡库区变动回水区水文条

件复杂, 既受水库蓄水调度控制, 同时也受到天然河流水文特征以及其余诸多因素的影响, 在不同自然随机过程条件下, 其内趸船系留设施构件

收稿日期: 2014-03-06

*基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAB05B00); 重庆市港航管理局科技项目(SW2013-27)

作者简介: 舒丹(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程方面的研究。

(缆绳、锚链、地牛等) 会呈现出不同程度的张紧-松弛的交替应力循环状态。在这一过程中, 伴随着各构件疲劳损伤的不断积累, 其表面上将出现疲劳裂纹。随着时间的推移, 各构件上的疲劳裂纹将持续开展, 当其开展到一定程度时, 各构件将发生疲劳破坏。

趸船系留设施的疲劳问题会对码头的正常作业、安全运营等产生直接的影响, 在设计过程中应高度重视。尤其是在三峡库区变动回水区的特殊水文情势下, 更应对其中各重要构件(如缆绳、锚链等)的疲劳寿命年限进行准确的分析和评估, 保证其在正常使用过程中不发生疲劳断裂破坏。

当前, 在工程领域范围内最常用的疲劳评估方法是在 Miner 线性累积损伤理论模型^[2]的基础上实现的。该理论认为: 在循环荷载作用下, 结构的疲劳损伤可通过线性累加的方式得到, 当疲劳损伤累积达到某一限值时, 结构将出现疲劳破坏。

本文针对三峡库区变动回水区重庆段内某一典型斜坡式码头工程项目, 基于 Miner 线性累积损伤理论对其趸船系留设施中缆绳、锚链这两类重要系泊构件进行疲劳性能评估。在分析过程中, 只考虑其系缆、系锚应力随时间的变化情况作为疲劳损伤计算的主要因素, 并预测其构件的疲劳寿命年限, 为类似工程项目的疲劳设计与评估提供技术支持。

1 工程概况

重庆某架空斜坡式码头位于长江三峡水库变动回水区重庆河段内。码头所在河段属典型的山区河流, 一年内水位变幅较大, 水位差一般可达 30 m。当洪峰来临时, 水位达到最高且水流湍急。码头使用岸线总长约 300 m, 共设 2 个泊位, 分别包括 1 个 400 车位滚装船泊位以及 1 个 3 000 吨级多用途泊位。本文依托该码头工程项目中 3 000 吨级多用途泊位。图 1 为该多用途泊位的现场示意图。该泊位的设计年吞吐能力约 40 万 t, 总体上是由一条架空缆车斜坡道和一艘钢趸船组成, 其

中架空斜坡道的坡底高程为 167.20 m, 坡顶高程为 209.70 m, 设计坡度为 1:2.4, 斜坡道总长 110 m, 宽 28 m。该架空斜坡道的下部为典型的桩-柱式结构, 桩柱间距 17 m, 共 6 跨。采用每排 4 根直径为 1.8 m 的嵌岩灌注桩。立柱的直径为 1.6 m, 柱间设 1 000 mm × 800 mm 的联系梁。钢制趸船平面尺度为 72 m × 18 m, 其上设置多用途起重机 1 台。



图 1 3 000 吨级多用途泊位架空斜坡道及趸船

图 2 为该泊位趸船系留设施的总平面布置。包括 4 根系泊缆绳以及 3 根锚链, 其中各缆绳、锚链的相关规格如表 1 所示。

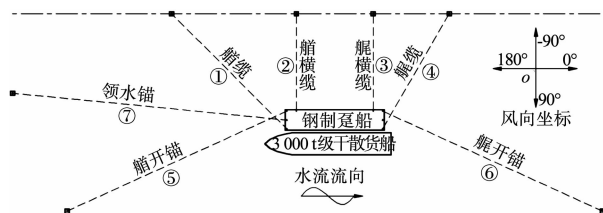


图 2 趸船系留设施总平面布置

表 1 趸船锚链、缆绳的规格

编号	名称	直径/mm	类型及材料
①	艏缆	φ32	
②	艏横缆	φ28	螺旋形钢
③	艉横缆	φ28	绞线钢材
④	艉缆	φ28	
⑤	艏开锚	φ44 × 2	
⑥	艉开锚	φ38 × 2	普通有档链环
⑦	领水锚	φ44 × 2	AM ₂ 级链钢

2 趸船系留设施疲劳性能评估

2.1 趸船缆绳、锚链的应力-历时曲线

根据设计文件可知该码头及各构件的使用年限为 50 a, 根据 API 推荐规范^[3]以及 API RP 2A-

WSD 规范^[4]规定,对钢结构进行疲劳分析时,应取结构或构件的 3 倍设计使用年限作为其疲劳使用寿命期,故在依托工程项目中趸船系留缆绳、锚链的疲劳使用寿命期应为 150 a。

在对各缆绳、锚链进行疲劳性能评估过程中,暂不考虑由于趸船系留设施的平面布置形式、各缆绳和锚链的锈蚀情况、靠泊船舶与趸船的相互作用以及船行波所引起趸船船体运动等原因对各缆绳、锚链疲劳损伤的影响,着重以各缆绳、锚链在自然因素影响下整个疲劳寿命期范围内的系缆、系锚应力随时间的变化作为构件疲劳损伤的主要因素。

2.1.1 自然因素

根据 JTS 144-1—2010 《港口工程荷载规范》^[5]规定,内河中影响趸船系留设施各缆绳、锚链系缆、系锚力的主要因素应为风荷载和水流力,故这两部分自然因素荷载理应作为各构件疲劳分析的重要依据。

1) 风。

由于本文依托工程所在地的风要素分布资料较少,暂无法得到关于风速、风向的历时关系。根据文献[5]中规定,内河港港区内的基本风压计算方法如下:

$$W_0 = 0.000\ 625v^2 \quad (1)$$

式中: v 为重现期为 50 a 且在港口上空离地 10 m 高的风在 10 min 内的平均最大风速 (m/s)。当无实测风速资料时,可按照 GB 50009—2012 《建筑结构荷载规范》^[6]中的规定对内河港口的基本风压进行取值。根据以上规定并结合式(1),可大致推求计算得到依托工程所在地的不利风速值约为 15 ~ 30 m/s。

2) 水流。

①工程所在位置断面的月均流量-时间序列。

根据距离该码头较近的水文站 20 a 的实测水文数据,以月为单位统计得到码头工程所在位置河道断面各年的月均流量-时间序列关系(图 3)。

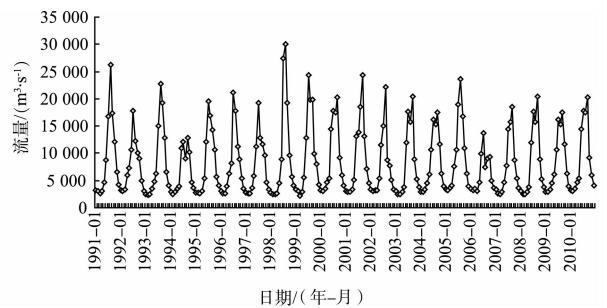


图 3 工程所在位置断面的月均流量-时间序列

②工程所在位置断面的月均水位-时间序列。

根据尚明芳^[7]所提出的方法,运用 HEC-RAS 水力学分析软件^[8]建立工程所在位置河段的水流水力学计算模型,计算得到该处断面的月均水位-时间序列。所述 HEC-RAS 计算模型中需用到的河道断面月均流量-时间序列如图 3 所示,建模过程中,根据长江航道局 2008 年所实测的地形资料在软件中定义工程河段中各断面的相关数据,其余各参数及计算过程详见文献[8]。根据上述方法,则可计算得出工程所在位置断面处的月均水位-时间序列(图 4)。

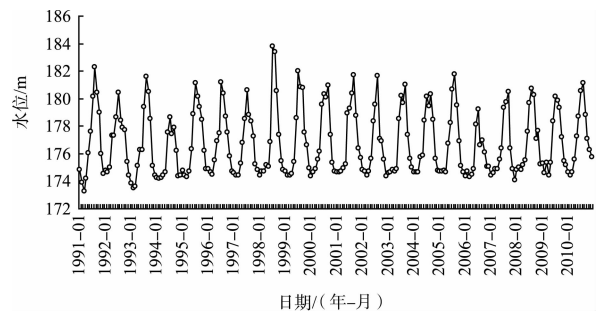


图 4 工程所在位置断面的月均水位-时间序列

③工程所在位置断面的月均流速-时间序列。

根据工程所在位置河道断面的几何情势,结合图 3、4 便可推求计算得到该处的月均流速-时间序列(图 5)。

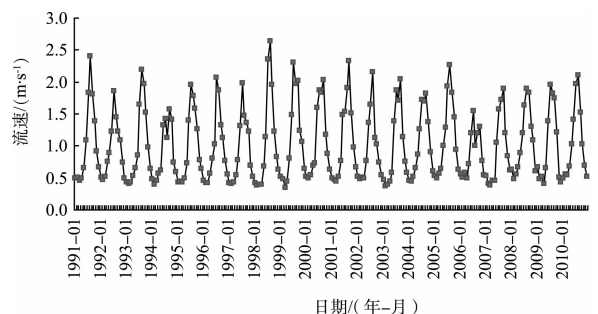


图 5 工程所在位置断面的月均流速-时间序列

2.1.2 计算随机过程

根据 2.1.1 节中对自然因素的分析, 结合本文依托码头工程所在位置实际情况综合考虑, 共拟定出 4 种典型的随机过程情况予以计算分析:

随机过程 1: 流速 - 历时 + 风向 0° (风速 24 m/s);

随机过程 2: 流速 - 历时 + 风向 0° (风速 30 m/s);

随机过程 3: 流速 - 历时 + 风向 90° (风速 16 m/s);

随机过程 4: 流速 - 历时 + 风向 90° (风速 24 m/s)。

在上述随机过程中, 风向及水流流向如图 2 所示。

2.1.3 趸船缆绳、锚链的月均应力历时曲线

根据图 4、5 所示工程所在位置断面处的 20 a 月均水位-历时关系、月均流速-历时关系以及表 1 中各缆绳、锚链的规格, 结合趸船、靠泊船舶的基本尺度等数据, 采用系缆力计算软件 OPTIMOOR 分别计算出在上述 4 种自然随机过程情况下, 各缆绳、锚链在 20 a 内的月均系缆、系锚应力, 并整理得到各缆绳、锚链的月均应力-历时曲线 (图 6), 为随机过程一条件下的 OPTIMOOR 系缆力计算模型。

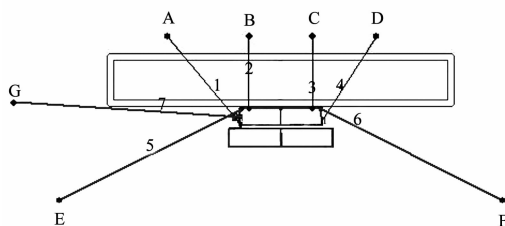


图 6 随机过程 1 情况下 OPTIMOOR 软件计算模型

本文仅以趸船中各缆绳、锚链中的艀缆、艀开锚为例, 详细阐述其疲劳分析的具体过程, 其余各缆绳、锚链的疲劳评估方法与之相同。根据上述方式, 则可分别计算得到艀缆、艀开锚在 20 a 内的月均应力-历时曲线, 如图 7 和 8 所示。

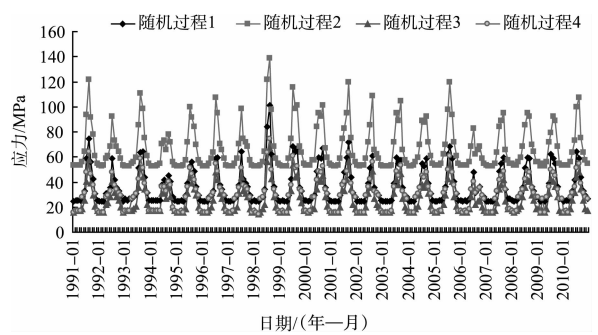


图 7 艀缆在各随机过程下的月均应力-历时曲线

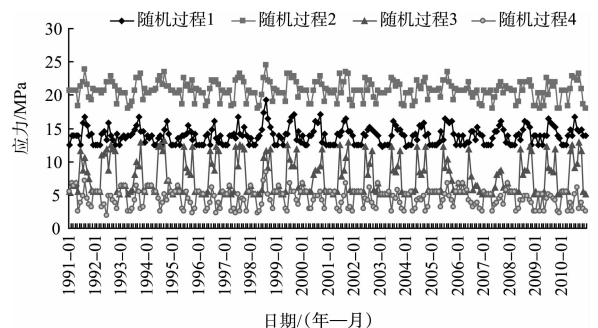


图 8 艀开锚在各随机过程下的月均应力-历时曲线

2.1.4 趸船缆绳、锚链的日均应力-历时曲线

评估各锚链、缆绳疲劳性能时, 若以月均值作为计算样本, 将会使得应力样本容量偏少, 影响计算结果的精度。根据以上分析, 可认为三峡库区变动回水区的水文情势就某一天而言, 其日平均水位、日平均流量以及日平均流速保持不变。基于该假设, 可通过计算各缆绳、锚链在疲劳寿命期范围内的日均应力-历时关系作为疲劳评估的应力样本, 这样可使得样本容量增多, 提高疲劳分析的精度。

根据图 7、8 中的计算结果, 分别取在 20 a 中各年同一个月应力平均值作为在疲劳寿命期典型年内该月的月均应力值, 比如: 计算图 7 和 8 中艀缆、艀开锚在 1991—2010 年这 20 a 中每年 1 月份的月均应力平均值, 将其作为艀缆、艀开锚在疲劳寿命期典型年内 1 月份的月均应力平均值, 其余各月份计算方式类似。之后分别取艀缆、艀开锚在典型年内每个月的第 15 日当天的应力值为代表, 得到疲劳寿命期典型年内艀缆、艀开锚的 12 个代表应力样本, 通过对上述散点进行追踪拟合得到艀缆、艀开锚在疲劳寿命期典型年内的日

均应力-历时曲线 (图 9、10)。其中, 典型年年初、年末的应力值则根据曲线变化的趋势顺延而得。

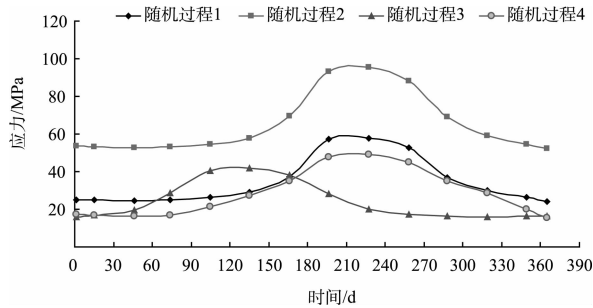


图 9 船缆在疲劳寿命期典型年的日均应力-历时曲线

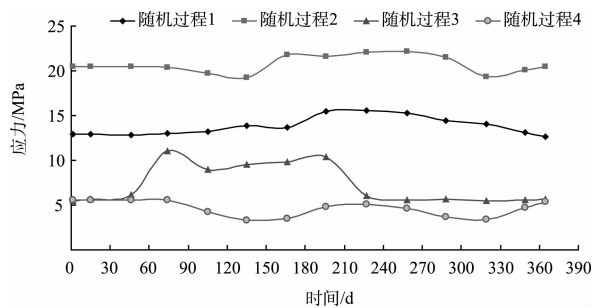


图 10 船开锚在疲劳寿命期典型年的日均应力-历时曲线

此处, 考虑各缆绳、锚链在整个疲劳寿命期 150 a 内的日均应力-历时关系为平稳随机过程, 即认为在这 150 a 内, 各缆绳、锚链每年的日均应力-历时关系均服从其在典型年内的日均应力-历时关系, 将其典型年内的应力-历时关系延伸至整个疲劳寿命期的 150 a 当中。图 11 为随机过程 1 条件下, 船缆、船开锚在疲劳寿命期 150 a 内的日均应力-历时关系。

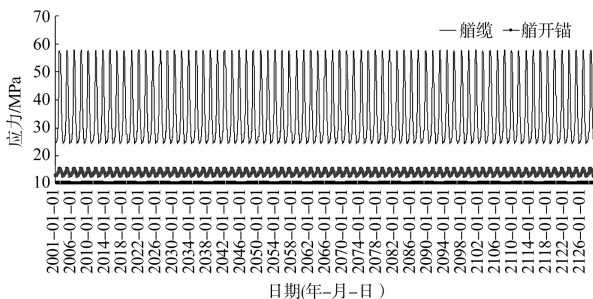


图 11 随机过程 1 情况下船缆、船开锚在疲劳寿命期 150 a 内的日均应力-历时曲线

2.2 趸船缆绳、锚链的 $T-N$ 曲线

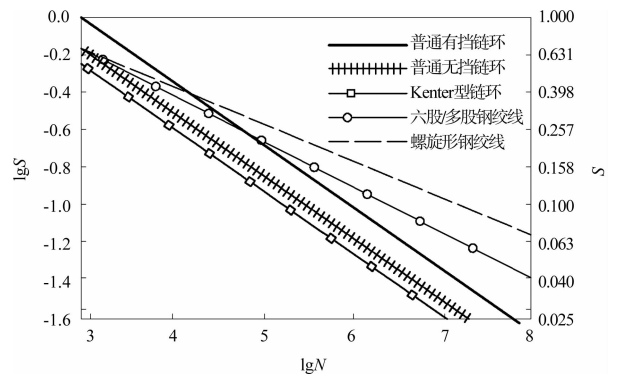
趸船系留设施中各缆绳、锚链在正常工作状

态时可能受拉、受扭^[9]。本文考虑趸船系留设施中缆绳、锚链主要受系泊张力影响。根据 API 推荐规范^[3]规定, 应根据缆绳、锚链试验的 $T-N$ 曲线 (T 代表系缆、系锚张力, N 代表恒幅荷载循环的次数), 来选取各构件疲劳损伤的相关参数。

该规范^[3]中同时还规定, 各系留构件的 $T-N$ 曲线应建立在对该构件的疲劳试验数据和回归分析的基础上, 在缺乏更准确数据的情况下, 可根据式(2)的 $T-N$ 曲线离散方程式计算各缆绳、锚链名义张力疲劳寿命。

$$NR^M = K \quad (2)$$

式中: N 为结构在恒幅交变应力作用下达到疲劳破坏临界点所需要的理论循环次数; R 为应力幅; M 为斜率; K 为截距。



注: S 为应力幅/基准强度, N 为应力循环次数。

图 12 螺旋形钢绞线、普通有档链环的 $T-N$ 曲线

本文依托工程项目中趸船各缆绳、锚链的类型分别为螺旋形钢绞线、普通有档链环, 故应选取相应的 $T-N$ 曲线进行计算 (图 12)。根据对应的 $T-N$ 曲线, 可分别得到相应的计算参数。其中螺旋形钢绞线 $M = 5.05$, $K = 10^{(3.25 - 3.43L_m)}$ (L_m 为钢缆绳的平均荷载与断裂强度的比值); 普通有档链环的 $M = 3.0$, $K = 1\ 000$ 。

2.3 趸船缆绳、锚链疲劳损伤计算

根据图 11 中所示的各缆绳、锚链在疲劳寿命期 150 a 内的日均应力样本, 经雨流计数法^[10]统计得到各级应力幅 R_i 出现的实际循环次数 n_i ; 同时, 根据 $T-N$ 曲线参数计算得到各缆绳、锚链在各级应力幅 R_i 为恒幅作用时所对应的疲劳破坏临

界循环次数 N_i 。基于上述方式便可计算得到当第 i 级应力幅作用时,各缆绳、锚链的疲劳损伤 D_i ,而后基于 Miner 线性累积损伤理论,将各级应力幅分别作用时所产生的疲劳损伤根据式(3)进行线性累加,即计算得到各缆绳、锚链的总疲劳损伤 D ,并预测其疲劳寿命年限。

$$D = \sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

综上所述,若忽略构件的初始疲劳损伤,则在各随机过程条件下,趸船系留设施中各缆绳、锚链在疲劳寿命期内 150 a 范围内的总疲劳损伤及疲劳寿命年限计算结果如表 2、3 所示。

表 2 趸船各缆绳、锚链在各随机过程情况下的总疲劳损伤

疲劳损伤 D	船缆	船横缆	艏横缆	艉缆	船开锚	艉开锚	领水锚
随机过程 1	0.795	0.008 62	0.000 033 4	0.000 677	0.007 92	0.005 9	0.031 7
随机过程 2	2.350	0.024 50	0	0	0.012 20	0.007 6	0.046 9
随机过程 3	0.457	1.770 00	2.00	1.06	0.037 80	0.037 0	0.049 5
随机过程 4	1.140	4.290 00	4.13	1.99	0.020 70	0.021 2	0.081 8

表 3 趸船各缆绳、锚链在各随机过程情况下的疲劳寿命年限

疲劳寿命年限 Y	船缆	船横缆	艏横缆	艉缆	船开锚	艉开锚	领水锚
随机过程 1	188.77	17 393.61	4 484 513.64	221 515.29	18 949.71	25 411.75	4 734.32
随机过程 2	63.93	6 132.78	∞	∞	12 251.10	19 741.66	3 198.07
随机过程 3	328.53	84.53	75.07	141.54	3 965.28	4 049.02	3 027.34
随机过程 4	131.07	34.99	36.30	75.23	7 230.98	7 061.91	1 832.74

3 结论

1) 在疲劳寿命期 150 a 范围内,船缆在随机过程 2 和 4 情况下;船横缆、艏横缆、艉缆在随机过程 3 和 4 情况下;其总的疲劳损伤 $D > 1$,这表明各构件在疲劳寿命期内已破坏。从总体上来看,船横缆在随机过程 4 条件下产生的总疲劳损伤最大,表明该缆绳为最危险系留构件,次危险构件为随机过程 4 条件下的艏横缆,其损伤作用同样不可忽略。

2) 当风向为 0° 时,船缆、船横缆和船开锚、艉开锚、领水锚的总疲劳损伤随着风速的增加而增大;而艉缆、艏横缆的总疲劳损伤则随着风速的增加而减小;同时,该情况下船缆的总疲劳损伤最大,为最危险系留构件。

3) 当风向为 90° 时,趸船中各缆绳的总疲劳损伤比各锚链要大;其中船开锚、艉开锚的总疲劳损伤随风速增加而减小,除此之外的其余各缆绳、锚链的总疲劳损伤均随风速增加而增大。

本文所用到的疲劳分析理论及计算过程不仅可以为三峡库区变动回水区趸船系留设施的疲劳安全整改提供一定程度上的技术支撑,也可为类似三峡库区的山区河流大型水库内码头工程项

目的疲劳设计与评估提供有价值的参考依据。

参考文献:

- [1] 周世良,李怡,吴林键,等.三峡水库变动回水区斜坡式码头趸船系留设施安全评估方法及处置对策研究[R].重庆:重庆市港航管理局,重庆交通大学,2013.
- [2] JTS 152—2012 水运工程钢结构设计规范[S].
- [3] American Petroleum Institute, API Design and Analysis of Station keeping Systems Floating Structures[S].
- [4] American Petroleum Institute, API RP 2A-WSD Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design[S].
- [5] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [6] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
- [7] 尚明芳.库区变动回水段港口工程设计水位确定方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [8] 王晓阳,邓赞新,喻妮厚. HEC-RAS 及其在桥梁阻水雍高计算中的应用[J].湖南水利水电,2008(3):31-32.
- [9] 王佳颖,张世联,徐伟,等.超期服务浮式平台锚链疲劳寿命安全评估[J].上海交通大学学报,2008,42(11):1 888-1 891.
- [10] 赵晓鹏,姜丁,张强,等.雨流计数法在整车载荷谱分析中的应用[J].科技导报,2009(3):67-73.

(本文编辑 郭雪珍)