



# 海工混凝土结构荷载水平分析

苏林王, 应宗权, 刘培鸽, 李平杰  
(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 为了获得典型构件在实际服役环境中的荷载水平范围, 选取在役的3个码头梁构件设计实例, 以横梁、纵梁、轨道梁为研究对象, 理论分析出构件在“永久荷载”或“永久荷载+可变荷载”作用下的荷载水平; 另在华南地区选取某高桩码头, 进行现场应力测试与分析, 得到实际服役环境下的构件荷载水平。通过现场应力测试及典型实例理论分析, 确定了码头正常使用条件下钢筋混凝土结构荷载水平范围为0.1~0.47, 为开展在役海工结构实际服役状态的荷载模拟试验提供依据, 为码头结构设计提供参考。

**关键词:** 海工混凝土结构; 荷载水平; 理论分析; 现场应力测试; 荷载水平范围

中图分类号: TU 473.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0075-05

## On load level of concrete structure

SU Lin-wang, YING Zong-quan, LIU Pei-ge, LI Ping-jie

(Engineering Technology Research Co., Ltd. of CCCC Forth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** To obtain typical components load level range in practical service environment, by selecting design examples for three marina beam members in service, and taking the beam, stringer and track beam as the research object, we analyze the component load level under the “permanent load” or “permanent load plus variable load”. Besides, taking a high-pile wharf in Southern China for case study, we carry out the site stress test and analysis, and obtain the load level in the actual service environment. Based on the site stress testing and theoretical analysis of typical examples, we determine that the load level range for the wharf under normal condition shall be from 0.1 to 0.47, which provide the basis for conducting simulation tests in load-service marine structures and provide a reference for the pier design.

**Keywords:** marine concrete structure; load level; theoretical analysis; on-site stress testing; load level range

荷载水平(作抗比), 荷载效应组合的设计值与结构构件的抗力设计值的比值, 是疲劳试验时的重要参数之一, 也是影响钢筋混凝土结构可靠性的最重要因素。但结构正常服役状态下荷载水平范围的确定实属困难, 尤其是在役海工结构, 在长期使用过程中, 处于侵蚀介质、荷载等作用下, 疲劳强度不断地降低; 且由于基础沉陷, 结构计算简图发生变化等意想不到的事故仍发生, 往往出现内力重分布的现象; 另外, 目前研究报道对海工结构正常应力状态水平关注很少, 而现

在耐久性或可靠性试验更趋于模拟结构真实服役状态, 因此该部分的工作显得尤为重要。故开展码头正常使用条件下钢筋混凝土结构荷载水平研究与分析, 得到其荷载水平范围, 为开展在役海工结构实际服役状态的试验提供依据, 为码头结构设计提供参考, 具有现实意义。

相关文献<sup>[1-3, 6-8]</sup>的疲劳试验大多没结合结构正常服役状态下的应力水平, 往往注重探讨应力水平大小对疲劳损伤的影响。Samaha等<sup>[1]</sup>研究了单轴压缩应力比分别为0、0.40、0.75、1.00条件

收稿日期: 2014-06-10

作者简介: 苏林王(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程检测等的研究。

下圆柱体混凝土试件受压后的氯离子渗透系数；大连理工大学王海超<sup>[2]</sup>取应力水平为 0.55、0.65、0.75 的条件下，研究了腐蚀环境下疲劳损伤变化；华侨大学宋小雷<sup>[3]</sup>分析了应力水平为 0.5、0.55、0.6 的作用下锈蚀钢筋混凝土梁的疲劳强度和疲劳寿命、刚度变化特征、跨中变形规律。随着人们对结构耐久性破坏意识的加强，耐久性退化试验模拟越来越贴近构件真实服役情况，应力水平的确定开始依据经验或构件受力过程。长安大学陈拴发<sup>[4]</sup>依据高性能混凝土受力过程，选取 30%、45%、60% 等几种不同的应力水平开展高性能混凝土应力腐蚀与腐蚀疲劳特性研究；东南大学金祖权<sup>[5]</sup>根据混凝土梁的应力比设计一般为混凝土强度的 0.25~0.4，当应力比达到 0.5 时，混凝土梁的服役性能将受到较大影响等相关经验，并研究确定了 0.25（或 0.35）和 0.5 弯曲应力比下混凝土的抗腐蚀溶液性能。

从以上研究内容来看，应力水平范围的确定，既没有较为科学的手段可对其进行全面分析，更无规范说明，采用的应力水平大小往往根据经验，或参考试件的受力过程，进而得到码头结构的损伤规律或其它科学性及其可信度不高的结论，因此本文针对该问题，选取已建设好了的 3 个码头梁构件设计实例，以横梁、纵梁、轨道梁为研究对象，理论分析出构件在“永久荷载”及“永久荷载+可变荷载”作用下的荷载水平设计值；另在华南地区选取了某高桩码头，进行现场应力测试与分析，确定实际服役环境下的构件荷载水平。通过总结与分析现场应力测试及典型实例理论研究结果，获得典型构件在实际服役环境中的应力水平范围，为后续开展在役海工结构实际服役状态的试验提供依据，为码头结构设计提供参考。

## 1 梁构件荷载水平的设计实例分析

为了充分了解码头梁构件荷载水平设计值，特别调研了某设计院，选取已经建设好了的 3 个码头梁构件设计实例，同时考虑到梁构件应用特

性的不同，选取的梁构件包括横梁、纵梁、轨道梁。通过比较码头梁构件在永久荷载及“永久荷载+可变荷载”作用下的效应与其自身的极限承载能力，分析出“永久荷载”及“永久荷载+可变荷载”的荷载水平设计值。3 个码头梁构件的具体情况如下。

### 1.1 工程概况

1) 某电厂煤码头横梁。主体结构为有基床双排式小型钢筋混凝土圆筒，圆筒直径 3.0 m，壁厚 300 mm，高 19.05 m，圆筒横向中心距 20 m，以简支箱型梁（横梁）连接，纵向中心距 9.75 m，以简支预制矩形梁（纵梁）连接，上部简支  $\pi$ 、T 板结构，共同形成以结构自重承担码头外部作用的重力式水工建筑物，其中 C40 混凝土，保护层 50 mm，Ⅱ级钢筋，受拉钢筋为 30B32，箍筋选配双肢  $\phi 10@150$  mm。横梁断面见图 1。

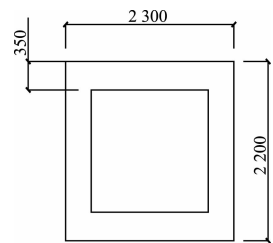


图 1 横梁断面

2) 某公司 5 000 DWT 级码头轨道梁分段长度为 48 m，分 9 跨，排架间距 6.4 m，两端悬臂 1.6 m，下横梁宽度为 1.2 m。保护层 50 mm，C40 混凝土，Ⅱ级钢筋，下部纵向配筋 12B25，上部纵向配筋 11B25，

箍筋选配双肢  $\phi 12@150$  mm。轨道梁断面见图 2。

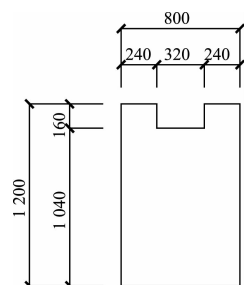


图 2 轨道梁断面

3) 某大桥第 12 标段箱梁预制场码头。其中纵梁的支承宽度 (下横梁宽度) 1.2 m, 预制梁长 5.2 m, 搁置长度 0.2 m, 净跨 4.8 m。C35 混凝土, II 级钢筋, 保护层 60 mm, 下部纵向钢筋 5B25, 上部纵向钢筋 4B25, 构造箍筋选  $\phi 10@200$  mm, 纵梁断面见图 3。连续轨道梁的支承宽度 (桩帽宽度) 2.0 m, 预制梁长 4.6 m, 搁置长度 0.3 m, 净跨 4.0 m。C35 混凝土, II 级钢筋, 保护层 60 mm, 下部纵向钢筋 18B25, 上部纵向钢筋 20B25, 构造箍筋选  $\phi 10@200$  mm, 轨道梁断面见图 4。

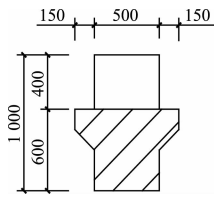


图 3 纵梁断面

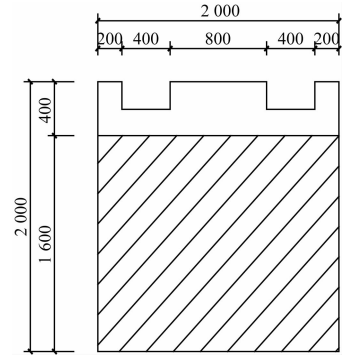


图 4 某大桥轨道梁断面

### 1.2 结果及分析

根据 3 个码头梁构件的设计文件, 并依据 JTJ 267—1998 《水运工程混凝土结构设计规范》<sup>[9]</sup> 中对于荷载的规定, 可以计算出永久荷载与可变荷载作用于梁构件的受力情况, 也可获得构件的最大承载力, 即可求得荷载水平 (表 1)。

表 1 不同码头梁构件设计荷载水平

计算内容	弯矩/(kN·m)			荷载水平	
	荷载效应组合的设计值		抗力设计值	永久荷载	永久荷载 + 可变荷载
	永久荷载	永久荷载 + 可变荷载			
某电厂煤码头横梁	1 311	3 427	10 220	0.13	0.34
某公司 5 000DWT 级码头轨道梁	58	612	1 702	0.03	0.36
某大桥第 12 标段箱梁预制场码头纵梁	99	259	548	0.18	0.47
某大桥第 12 标段箱梁预制场码头轨道梁	212	1 368	4 613	0.05	0.30

由表 1 可知: 只考虑“永久荷载”时, 荷载水平较小, 在 0.03 ~ 0.2 之间, “永久荷载 + 可变荷载”荷载水平在 0.3 ~ 0.5 之间。

## 2 某码头应力测试与分析

为得到实际码头结构在荷载作用下的结构应力情况, 在华南地区选取某高桩梁板式码头工程的引桥面板, 来测试其在竖向荷载作用下的应力情况, 从而获得实际服役环境下的构件荷载水平。值得指出的是, 由于结构自重作用下的应力难以确定 (由上述分析可知该应力较小), 此处通过现场测试获得的结构应力为模拟可变荷载作用下的结构应力响应。

### 2.1 码头工程概况

码头始建于 2003 年, 为高桩码头, 全长 126 m。为满足生产需要, 对码头结构进行改造, 新建吊机墩台 1 个, 引桥 1 座。新建吊机墩台长 13.1 m, 宽 12.5 m, 新建引桥为高桩梁板式结构, 长 58 m, 宽 10 m, 混凝土强度等级为 C30, 桩基均为  $\phi 1\ 000$  mm 钻孔灌注桩。

### 2.2 应力测点布置及加载方式

应力测点布置如图 5 所示, 现场布置情况如图 6 所示。

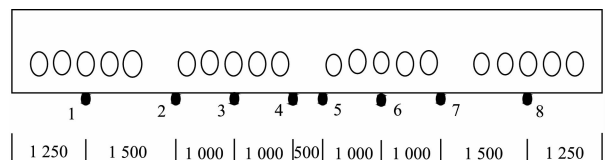


图 5 跨中应变测点布置 (单位: mm)



图 6 测点现场埋设情况

该引桥设计弯矩为  $344.532 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，为了得到引桥在安全工作范围内，各级荷载作用下结构的工作性能，主要为跨中截面应力变化等，采用 2 部 280 kN 双后轴重车进行中心加载，加载位置如图 7 所示，理论计算最大值为  $335.751 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

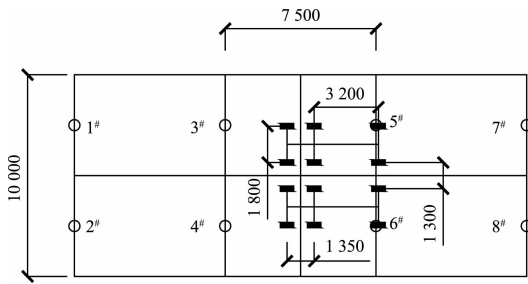


图 7 加载位置 (单位: mm)

通过 2 部 280 kN 双后轴重车循环加载、卸载完成跨中正弯矩工况、桥墩最大反力工况静载试验，试验步骤为：跨中截面分 2 级进行加载，即 1# 和 2# 重车分别驶入预定位置，完成主跨正弯矩工况试验加载，试验加载顺序见表 2。试验加载现场如图 8 所示。



图 8 加载现场

表 2 新建引桥静载试验加载

加载顺序	荷载值/kN	加载方式
0	0	引桥空载
1 级	280	1 号车驶入西侧预定位置
2 级	560	2 号车驶入东侧预定位置
卸载	0	两车同时驶出引桥

### 2.3 应力测试结果

表 3 为试验工况下跨中截面的实测应力值。

表 3 第 2 跨跨中截面实测应力值 MPa

测点号	工况			
	一级	二级	卸载	弹性应力
1	0.030	0.075	0	0.075
2	0.690	1.245	0.03	1.215
3	0.690	1.269	0.03	1.239
4	0.690	1.260	0.03	1.230
5	0.072	1.119	0.03	1.089
6	0.072	1.131	0.03	1.101
7	0.072	0.831	0.03	0.801
8	0	0.045	0	0.045

表 3 表明，新建引桥第 2 跨在最大正弯矩试验工况下，产生的最大拉应力为  $1.269 \text{ MPa}$ ，混凝土强度等级为 C30，抗拉强度设计值为  $1.43 \text{ MPa}$ ，因此，混凝土受拉区未出现裂缝。

因试验条件有限，本次试验未得到混凝土的最大压应力，采用有限元软件 (abaqus) 模拟上述试验过程。模型特点为：1) 模型构件均采用有限元的线弹性模型进行模拟；2) 由于结构在施工中，接头处均做现浇处理，则认为桩基、桩帽、纵横梁以及面板之间采用固定连接；3) 桩基依据地质条件及规范计算确定桩基嵌固点的位置，将其嵌固点处截断并嵌固；4) 计算模型中不考虑地基土。



在上述假定的基础上,为了真实反映三维结构应力应变分布,采用实体单元对混凝土结构进行模拟,从而得到混凝土最大压应力为 3.289 MPa (未包括自重),应力水平为  $\alpha = 3.289/14.3 = 0.23$ ,这里的应力水平是指构件中混凝土的最大应力(未包括自重)与其抗压强度设计值的比值。值得说明的是,试验模拟结果的混凝土承受的拉应力与现场试验吻合,因此模拟结果可靠。

另外,模拟获得该引桥构件的荷载效应组合的设计值为 344.532 kN·m,承受的极限荷载为 1 073.38 kN·m,因此荷载水平为  $\alpha = 344.532/1 073.38 = 0.32$ ,这里的荷载水平是荷载效应组合的设计值(包括自重)与结构构件的抗力设计值的比值。

### 3 结语

1) 通过几个设计实例的计算分析可知,永久荷载应力水平较小,在 0.03 ~ 0.2 之间;“永久荷载 + 可变荷载”荷载水平在 0.3 ~ 0.5 之间,若不考虑自重的影响,荷载水平的取值范围为 0.1 ~ 0.47。

2) 通过对某码头的模拟静载试验的测试,初步确定了码头结构在可变荷载作用下的结构荷载水平,与理论计算基本吻合。

3) 对比分析结果,为了开展在役海工结构实际服役状态的荷载模拟试验,试验方案中选取应力水平为 0.15、0.3、0.5 是科学与合理的。

### 参考文献:

- [1] Samaha H R, Hover K C. Influence of micro cracking on the mass transport properties of concrete [J]. ACIM at Erials Journal, 1992, 89(4): 416-424.
- [2] 王海超. 钢筋混凝土构件腐蚀疲劳试验研究与理论分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2004: 164.
- [3] 宋小雷. 锈蚀钢筋混凝土梁静力及疲劳性能试验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2008: 92.
- [4] 陈拴发. 高性能混凝土应力腐蚀与腐蚀疲劳特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2004: 171.
- [5] 金祖权. 西部地区严酷环境下混凝土的耐久性与寿命预测[D]. 南京: 东南大学, 2006: 196.
- [6] 邢明录. 锈蚀钢筋混凝土梁疲劳试验与数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2003: 71.
- [7] 董福兴. 钢筋锈蚀混凝土构件疲劳性能的试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002: 76.
- [8] 易伟建, 孙晓东. 锈蚀钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 6-10.
- [9] JTJ 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 74 页)

3) 采用翼板开孔方案可有效减小基床上的浮托力,但增大了透过波浪和流速,随着翼板开孔高度的增加,空腔下部最大流速值和堤后浪高值均增大。开孔高度为 3 m 时空腔下部最大流速值为 300 cm/s。堤后浪高最大值为 0.80。

4) 综合工程实际状况和基床修复施工需要,翼板开孔 3 m、加厚栅栏板至 1 ~ 1.1 m、港池侧栅栏板安放宽度不小于 2 排 (8 m),是保障基床

安全的现实方案。

### 参考文献:

- [1] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].
- [2] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [3] 大连理工大学. 大窑湾北堤补充波浪物理模型试验研究[R]. 大连: 大连理工大学, 2012.

(本文编辑 郭雪珍)