



# 高桩码头梁构件碳纤维加固效果评价

刘阳阳<sup>1</sup>, 李平杰<sup>2</sup>, 戴宇文<sup>2</sup>

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 针对高桩码头梁构件碳纤维加固效果的问题, 结合桥梁静载试验验证的理念, 对高桩码头引桥碳纤维加固前后进行静载试验, 通过比较碳纤维加固前后的位移、应力值, 获得碳纤维加固前后承载能力提高情况, 同时了解碳纤维加固后梁结构是否满足设计要求。通过静载试验结果分析可知: 高桩码头梁构件碳纤维加固效果良好, 可以推广使用。

**关键词:** 高桩码头; 碳纤维; 加固; 效果评价; 应用实例

中图分类号: U 657.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0075-04

## Carbon fiber reinforcement effect evaluation of piled wharf's beam component

LIU Yang-yang<sup>1</sup>, LI Ping-jie<sup>2</sup>, DAI Yu-wen<sup>2</sup>

(1. CCCCFHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. CCCCFourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the reinforcement effect of the carbon fiber on the beam of long-piled wharf, we present the static test of the approach bridge of long piles wharf before and after the reinforcement of carbon fiber with the concept of bridge static test. The improvement of bearing capacity of the wharf with the reinforcement of the carbon fiber is obtained by comparisons of the settlements and stresses before and after the reinforcement. In the meanwhile, it is also examined whether the beam structure satisfies the design requirements or not. The analyses of the test results reveal that the strengthening effect of carbon fiber on the beams of long piled wharf is significant and the method can be spread.

**Keywords:** long-piled wharf; carbon fiber; reinforcement; effect assessment; application example

高桩码头是码头主要形式之一。其结构轻、减弱波浪的效果好、砂石料用量省、对于挖泥超深的适应性强, 但对地面超载和装卸工艺变化的适应性差, 特别是运营多年的高桩码头结构, 其荷载及复杂的腐蚀环境使得码头出现各种病害, 如混凝土开裂、破损、变形等。因此, 需要对码头进行有效的维修加固<sup>[1-3]</sup>, 甚至升级改造。

碳纤维由于其耐腐蚀性, 无疑是一种适宜的加固材料。然而对于碳纤维的加固效果, 业界普遍抱有怀疑态度, 特别是针对海工结构, 由于加固的构件往往在腐蚀区, 碳纤维与结构物之间的粘结剂在海水下凝固, 因此需要对构件的加固效

果进行评价。目前, 码头结构加固效果评价主要采用理论分析法<sup>[4]</sup>。该方法必须在加固方法有效的基础上, 而其无法评估加固方法的有效性(如碳纤维粘结效果)。随后有学者采用静载实验法<sup>[5-6]</sup>。该方法既可以评估加固方法的有效性, 又可评估构件的加固效果, 因此它在桥梁工程中得到大力发展, 但在码头工程上发展缓慢。

浙江舟山某高桩码头梁构件采用碳纤维加固, 并应用了水下碳纤维粘结剂。为了评估碳纤维加固效果, 笔者对碳纤维加固梁构件进行数值模拟及试验分析(分加固前及加固后2个工况), 分别比较实验值与理论计算值, 从而评价碳纤维加固的效果。

收稿日期: 2014-09-22

作者简介: 刘阳阳(1982—), 男, 工程师, 从事港口及航道工程设计。

## 1 加固方法

高桩码头现场检测显示：引桥 14 根纵梁（靠海测 2 跨）严重受损，另外 14 根（靠岸侧 2 跨）产生锈胀大裂缝，因此需要对引桥纵梁进行碳纤维加固。

梁构件粘贴碳纤维加固工艺流程如下：表面处理—涂底胶—找平—涂浸渍胶—粘贴碳纤维布—涂浸渍胶—防腐处理。加固前后情况见图 1。



a) 加固前



b) 加固后

图 1 碳纤维加固前后情况

## 2 荷载试验

### 2.1 检算荷载

引桥桥面荷载分为均布荷载和移动荷载。引桥桥面均布荷载  $p = 20 \text{ kPa}$ ，桥面宽  $b = 6 \text{ m}$ ，桥跨度  $l = 6.5 \text{ m}$ 。引桥有 3 根主梁，采用荷载均分原理，得到中梁分配最大荷载为 390 kN。

引桥为双车道，移动荷载为 2 辆 55 t 平板车平行横向布置，总载重 1 100 kN。根据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》，1 辆汽车作用于单跨引桥的最大荷载为 280 kN，引桥有 3 根主梁，采

用刚接板法计算横向分布系数，得到 2 辆 55 t 平板车作用于单跨中主梁垂直荷载为 326.5 kN。

通过以上分析可知，引桥最不利主梁为中梁，采用 Midas Civil 建立有限元模型，计算中梁跨中最大弯矩，均布荷载作用于中梁跨中最大弯矩为 317 kN·m，移动荷载作用于中梁跨中最大弯矩为 841 kN·m，因此，以移动荷载作为控制荷载。

静载试验效率为：

$$\eta_q = \frac{S_s}{S(1+\mu)} \quad (1)$$

式中： $S_s$  为静载试验荷载作用下控制截面最大内力计算值； $S$  为控制荷载作用下控制截面最不利内力计算值； $\mu$  为冲击系数（根据规范取值）。

试验荷载选取双后轴重车进行加载，按照 JTG/TJ 21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》要求，控制截面静载试验效率介于 0.95 ~ 1.05 之间，跨中截面的试验弯矩和荷载效率如表 1 所示。

表 1 试验弯矩和效率系数

试验工况	控制截面	设计弯矩/ (kN·m)	试验荷载/ kN	试验弯矩/ (kN·m)	试验荷载效率
加固前	跨中	841	550	811.0	0.96
加固后	跨中	841	560	825.5	0.98

### 2.2 试验方法

根据该桥的结构形式和特点，选择引桥从岸侧起的第 1 跨进行静载试验。

#### 1) 挠度测试。

主要测试中梁 2<sup>#</sup>梁，测试在各级荷载作用下结构主要断面的变形，一共 9 个挠度测点，挠度测点布置如图 2 所示。挠度采用百分表进行荷载等级分级测试，如图 3 所示，在挠度测点位置固定锚固钉，用钢丝绳及铁锤牵引，在地上锚固百分表进行测试，其中地面用换填砂处理且用钢板固定，百分表用磁性锚固在钢板上。

#### 2) 应变测试。

应变测点总共有 16 个，应变测试断面为  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ ，每个断面有 4 个测点，分别在离底面高度为 0、35、70、100 cm 处，实际布置时，可以做微调，并用尺子测试应变测试位置高度。应变测试随着荷载等级分级测试，在测试位置贴好应变片，并

涂好密封硅胶, 将导线引出桥面集中测试。

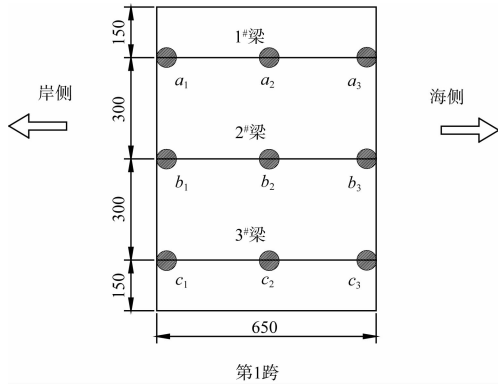


图2 挠度测点布置 (单位: cm)

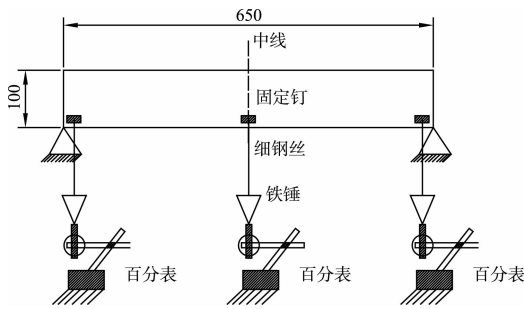


图3 百分表现场测试 (单位: cm)

3) 裂缝监测。

检测在试验荷载作用下结构裂缝的发展状况。

4) 试验加载。

静载试验主要测试在各级荷载作用下结构的工作性能, 包括各测点挠度、跨中截面应力变化等, 采用1辆550 kN双后轴重车进行中心加载, 加载位置如图4所示。加载车辆的轮距宽度为1.8 m, 轮距最大长度为6.1 m, 双后轴距1.35 m, 前后轴距4.75 m。在试验过程中对试验跨中控制截面进行裂缝观测跟踪。

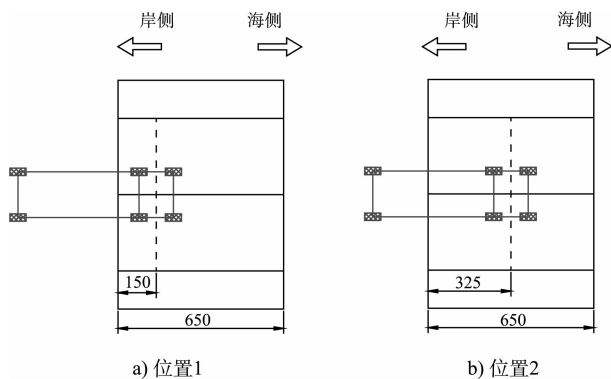


图4 加载位置 (单位: cm)

通过1辆550 kN双后轴重车加载、卸载完成跨中正弯矩工况静载试验, 试验步骤为: 1) 引桥空载, 30 min后测试空载数据; 2) 车辆倒退行驶至加载位置1, 15 min后测量梁的挠度及应力; 3) 车辆倒退行驶至加载位置2, 15 min后测量梁的挠度及应力; 4) 车辆驶离桥面, 15 min后测试各个主梁的挠度及应力。试验加载顺序见表2。

表2 引桥静载试验加载

加载顺序	加载中心与第一跨岸侧端部距离/cm	加载方式
空载	0	引桥空载
1级	150	加载位置1
2级	325	加载位置2
卸载	0	车辆驶出引桥

5) 现场测试。

现场测试包括车辆加载、挠度测试、应变测试, 测试时间为晚上落潮时间段。

3 试验结果分析

采用有限元软件 midas 建模, 计算得到结构设计理论挠度值与应变值, 并与试验值进行比较, 得出结构的实际运用状况。加固前、后的试验荷载不同 (表1), 使得加固前与加固后理论挠度值、试验值之间没有可比性, 只能比较加固前、后各自的设计理论值与实测值, 分析结构参数 (刚度、承载能力等) 是否达到设计要求, 从而评价结构的实际运用状态。

3.1 挠度分析

1) 测试误差。

试验采用“钢丝绳 + 铁锤”法测试挠度, 可能存在2个误差: ①钢丝绳自身的变形或滑动; ②锤尖与百分表端部未完全对中。为了消除这些测试误差, 须做以下措施: ①钢丝绳吊锤安装后, 对钢丝绳施加拉力, 以消除连接处及钢丝绳的非弹性变形; ②将锤尖锯掉, 留出一个小平面对中百分表。由于挠度测试量程较小, 通过实际应用表明, 这种方法是可行的。

2) 挠度测试结果。

加固前主梁的校验系数为1.05, 加固后主梁

的校验系数为 0.95, 满足 JTG/TJ 21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》规定的校验系数在 0.6~1.1 之间的要求。卸载后, 实测最大挠度变形测点的相对残余变位为: 加固前 11%; 加固后 3%, 满足 JTG/TJ 21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》中规定的小于 20% 的要求, 说明结构弹性恢复能力较好(表 3)。

表 3 满载作用下跨中截面挠度

工况	满载时实测 挠度值/mm	卸载后残余 挠度值/mm	相对残余 变位/%	理论挠 度值/mm	挠度校 验系数
加固前	1.75	0.20	11	1.67	1.05
加固后	1.58	0.05	3	1.70	0.95

注: 表格中数据均为向下挠度。

可见, 加固前的挠度值大于设计理论值, 加固后的挠度值小于设计理论值, 说明加固后主梁刚度得到提高。实测最大挠度变形测点的相对残余变位, 加固前远远大于加固后, 说明加固后弹性变形能力得到大的改善。

### 3.2 应变分析

加固前主梁的校验系数为 1.04, 加固后主梁的校验系数为 0.97, 满足 JTG/TJ 21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》规定校验系数在 0.6~1.1 之间的要求。卸载后, 横梁实测最大应变测点的相对残余应变为: 加固前 7%; 加固后 2%, 满足 JTG/TJ 21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》中规定的小于 20% 的要求, 说明结构弹性恢复能力较好(表 4)。

表 4 实测应变与理论应变对比

工况	满载时实 测应变值 /10 <sup>-6</sup>	卸载后残 余应变值 /10 <sup>-6</sup>	相对残 余变位 /%	理论应 变值/ 10 <sup>-6</sup>	挠度 校 验 系 数
加固前	205	15	7	198	1.04
加固后	196	3	2	202	0.97

注: 表格中数据均为拉应力。

主梁实测最大挠度变形值为: 加固前  $205 \times 10^{-6}$ , 设计理论值为  $198 \times 10^{-6}$ ; 加固后  $196 \times 10^{-6}$ , 设计理论值为  $202 \times 10^{-6}$ 。加固前的应变值大于设计理论值, 加固后应变值小于设计理论值, 说明加固后主梁刚度得到提高。实测最大应变测点的相对残

余变位为: 加固前 7%; 加固后 2%。加固前大于加固后, 说明加固后弹性变形能力得到大大改善。

### 3.3 裂缝观测结果分析

在整个试验过程中利用手电筒、裂缝测宽仪观测新裂缝的产生和旧裂缝宽度的变化, 试验过程中未发现新裂缝的产生和裂缝宽度发生变化。

## 4 结语

1) 加固前后主梁试验挠度及应变值求出的校验系数均满足 JTG/TJ 21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》规定的校验系数在 0.6~1.1 之间的要求。说明加固前后结构静载试验符合规范要求。

2) 加固前, 主梁最大挠度及应变值稍大于设计理论值, 说明结构存在安全隐患, 需要进行维修加固。

3) 加固后, 主梁最大挠度及应变值均小于设计理论值, 说明结构满足正常使用要求, 结构维修加固效果较好。

4) 实测最大挠度变形测点的相对残余变位为: 加固前 11%; 加固后 3%。实测最大应变测点的相对残余变位为: 加固前 7%; 加固后 2%。挠度、应变的残余变位均是加固前大于加固后, 说明加固后弹性变形能力得到大的改善, 加固效果良好。

### 参考文献:

- [1] 杨荣君, 秦武, 沈斌, 等. 高桩码头结构新型加固改造方案设计[J]. 水运工程, 2013(10): 122-127.
- [2] 丁祺. 高桩码头破损检测及加固技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [3] 郑永来, 杨扬. 高桩码头加固方法分析[J]. 结构工程师, 2007(1): 86-90.
- [4] 时蓓玲, 吴锋, 孙穆. 高桩码头结构承载力检测与评估方法[J]. 中国港湾建设, 2009(1): 1-2.
- [5] 翁友法, 时蓓玲, 朱光裕. 某高桩码头的荷载试验和承载力评估[J]. 水运工程, 2010(1): 50-53.
- [6] 张芹, 戴冠英. 南京炼油厂 10 号码头船舶荷载试验分析[J]. 水运工程, 1994(11): 29-34.

(本文编辑 郭雪珍)