



# 碳纤维布在高桩码头加固中的应用

刘亚威, 王丽娟, 周云亮, 孙涵

(中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202)

**摘要:** 早期建设的高桩码头结构由于腐蚀、老化、过载、疲劳等原因导致损伤, 影响码头的使用功能, 针对这一问题进行了码头构件的加固研究。结合高桩码头加固实例, 采用现场试验及数值模拟方法, 通过加固前后混凝土构件挠度及应力变化, 分析了粘贴碳纤维布对损伤构件的加固效果。结果表明, 粘贴碳纤维布可有效降低混凝土构件的挠度及应力, 对损伤构件有良好的加固效果。

**关键词:** 高桩码头; 碳纤维布; 加固; 数值模拟

中图分类号: U 656. 1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S2-0118-05

## Application of carbon fiber cloth in reinforcement of high-pile wharf

LIU Ya-wei, WANG Li-juan, ZHOU Yun-liang, SUN Han

(CCCC(Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China)

**Abstract:** The early high-pile wharf structure is damaged due to corrosion, aging, overload, fatigue and other reasons, which affect the function of the wharf. Regarding these problems, the reinforcement of wharf components is studied. Combined with the reinforcement example of high-pile wharf, by the field test and numerical simulation method, the reinforcement effects of carbon fibers cloth on damaged components are analyzed through the deflection and stress change of concrete components before and after reinforcement. The results show that sticking carbon fiber cloth can effectively reduce the deflection and stress of concrete components, and has a good reinforcement effect on damaged components, which can provide a reference for the repair of similar wharfs. The results show that CFRP can effectively reduce the deflection and stress of concrete members, and has a good reinforcement effect on damaged members.

**Keywords:** high-pile wharf; carbon fiber cloth; reinforcement; numerical simulation

## 1 工程概况

某项目位于长江下游, 为高桩梁板式结构, 建于1988年, 岸线总长度402 m, 码头宽度30.5 m, 由55个排架组成, 共3个泊位, 采用钢管桩( $\phi 900\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ )基础结构, 每排4根(1对叉桩、2根直桩), 码头前方门机平台设计荷载 $q_1=20\text{ kN/m}^2$ ; 上部为梁板结构。见图1。

根据现行规范<sup>[1-2]</sup>, 对高桩码头梁构件根据外

观裂化程度进行分级, 梁构件状态分级见表1。

对拟加固码头梁构件进行检测, 混凝土构件的主要损伤表现为混凝土裂缝及剥落, 见图2。根据纵梁劣化程度的检测结果, 对纵梁的外观劣化度进行评级, 其中A级占比3.8%、B级占比65.4%、C级占比30.8%; 对纵梁安全性和适用性评价等级分别为B和C, 应对构件进行修补。

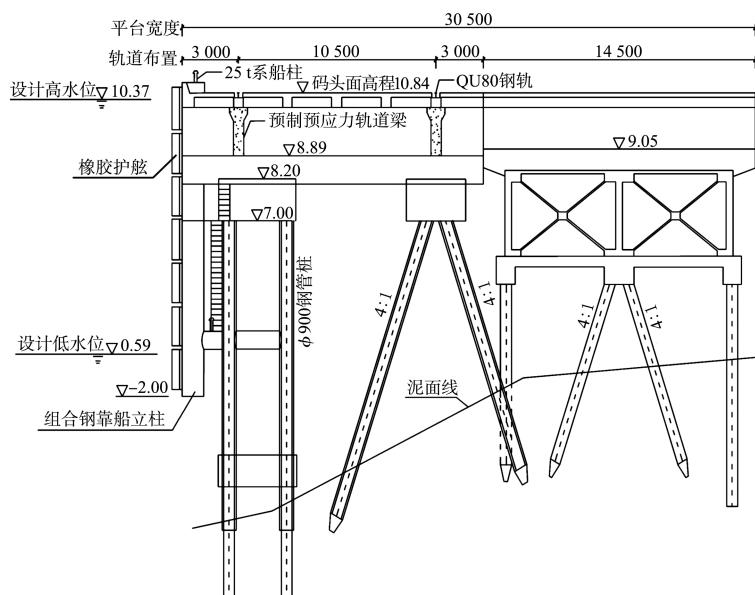


图 1 码头结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

表 1 梁构件劣化程度分级

等级	钢筋锈蚀	裂缝	剥离剥落
A	无	无	无
B	混凝土表面可见局部锈迹	局部有微小蚀裂缝, 裂缝宽度小于 0.3 mm	局部剥落, 剥落长度小于构件长的 5%
C	锈迹较多, 钢筋锈蚀范围较广	裂缝较多, 部分为顺筋连续裂缝, 裂缝宽度在 0.3~3.0 mm	局部剥落, 剥落长度小于构件长度的 10%
D	锈迹普遍, 钢筋表面大部分或全部锈蚀, 钢筋截面面积明显减小	大面积顺筋连续裂缝, 裂缝宽度大于 3.0 mm	剥落长度大于构件长度的 10%



图 2 待加固纵梁

## 2 纵梁常用加固方法

混凝土构件的加固方法和特点见表 2。

CFRP 材料加固法是采用专用的环氧树脂等胶黏剂将碳纤维布等材料粘贴于待加固构件表面并形成与构件共同承受荷载的整体, 发挥 CFRP 材料的良好的力学性能, 从而提高构件强度及耐久性。CFRP 材料加固法质量轻、强度高、耐腐蚀、易施工, 越来越多地用于混凝土结构的加固。笔者采用 CFRP 材料加固法, 通过对加固前后梁的受弯性能分析其适用性。

表 2 劣化混凝土构件加固方法

常用方法	特点
增大截面法	施工技术成熟、可靠, 效果明显, 但增加原结构的自质量, 减小净空, 工期长, 结构二次受力明显
外包钢板法	约束原构件变形, 增大构件刚度来提高承载力
外加预应力法	通过改变原结构的内力分布、降低结构原有应力水平来间接提高结构的承载能力
CFRP 材料加固法	加固效果明显、施工简便、工期短、耐腐蚀、不增加自质量、不改变原结构尺寸、对周围生活活动影响较小

## 3 施工方法

### 3.1 表面处理

清除被加固构件表面剥落、疏松、蜂窝、腐

蚀等劣化的混凝土, 露出混凝土结构层, 并用修复材料将表面修复平整。由于本工程为预制纵梁, 属预制构件, 基材条件较好, 平均处理深度较浅。

转角粘贴处应进行导角处理并打磨成圆弧状,圆弧半径不小于 20 mm,对局部小范围有凹陷的混凝土表面应先进行修补,使混凝土表面无棱角及凹陷区域。表面处理后,用丙酮擦拭干净构层表面并使表面清洁干燥,必要时使用强力风扇或吹风机保证表面干燥清洁。

### 3.2 碳纤维布粘贴

按设计要求的尺寸裁剪碳纤维布,将浸渍胶均匀、饱满地涂抹于需要粘贴的混凝土表面上。将裁剪好的碳纤维布贴在涂好胶黏剂的基层上,顺纤维方向多次滚压挤出气泡,使浸渍胶充分浸透碳纤维布,滚压时应防止损伤碳纤维布。多层粘贴时,在纤维表面的浸渍树脂处干燥后立即进行下一层的粘贴。碳纤维布的主要参数为:单位面积质量 300 g/m<sup>2</sup>、抗拉强度标准值 3.1 GPa、弹性模量 230 GPa。

## 4 加固效果数值模拟

目前国内外对碳纤维布加固混凝土构件的试验模拟及数值模拟已经取得了丰硕的成果,对混凝土与碳纤维材料共同工作的机理也已经做了深入的研究,笔者在已有研究的基础上采用 ANSYS 有限元软件对工程案例加固效果进行模拟。对数值模拟结果可靠性有较大影响的因素主要是所选用的材料本构关系是否合理。碳纤维材料加固混凝土构件的主要材料包括混凝土、钢筋、碳纤维材料。

### 4.1 混凝土本构关系

结合 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[3]</sup>及王新敏<sup>[4]</sup>对混凝土材料的处理方法,混凝土的本构关系为:

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] & (\varepsilon_c < \varepsilon_0) \\ f_c \left[ 1 - 0.15 \cdot \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0} \right] & (\varepsilon_c \geq \varepsilon_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f_c$  为应力峰值,当均匀受压时,即为轴心抗压强度;  $\varepsilon_0$  为相对于峰值应力时的应变,取 0.002;  $\varepsilon_{cu}$  为极限压应变,为 0.003 3。应力-应变关系见图 3。

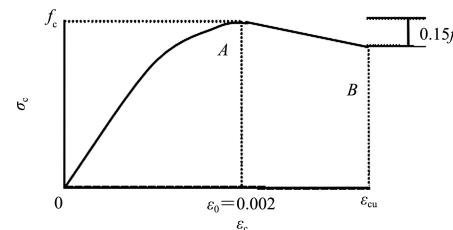


图 3 混凝土应力-应变关系曲线模型

采用 SOLID 65 单元模拟混凝土材料并输入 6 个控制点形成本构模型曲线,此单元是 ANSYS 软件中的三维实体单元,适用于抗压强度比抗拉强度大的非均匀材料,如混凝土、岩石等。

### 4.2 碳纤维材料的本构关系

碳纤维布的应力-应变关系取理想弹性,纤维应力超过其抗拉强度则认为纤维断裂,其本构关系为:

$$\sigma_{cf} = \begin{cases} E_{cf} & (0 \leq \varepsilon_{cf} < \varepsilon_{cfu}) \\ 0 & (\varepsilon_{cfu} \geq \varepsilon_{cf}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_{cfu}$  为碳纤维布容许拉应变;  $\varepsilon_{cf}$  为碳纤维布应变;  $E_{cf}$  为碳纤维布弹性模量;  $\sigma_{cf}$  为应变为  $\varepsilon_{cf}$  时的应力。

### 4.3 滑移界面模型

目前,对 CFRP 材料与混凝土连接界面的研究已经有较多成果<sup>[5-8]</sup>,但多数结果较为离散。根据陆新征<sup>[9-10]</sup>采用的精细的有限元方法分析结果,可以较好地模拟 CFRP-混凝土工作界面,他通过对黏结-滑移模型剥离承载力的计算值及物理模型试验值对比分析,提出的混合模型(上升段采用简化型,下降段采用双线型)模拟结果见表 3。

表 3 陆新征黏结-滑移界面模型剥离承载力模拟成果

粘结滑移模型	计算值/试验值	变异系数	相关系数
陆新征精确模型	1.001	0.15	0.91
陆新征简化模型	1.001	0.15	0.91
陆新征双线性模型	1.001	0.16	0.91

## 5 结果分析

### 5.1 挠度分析

#### 5.1.1 实测值分析

分析对象为裂缝沿纵梁方向的构件,测试在实际运营荷载作用下构件跨中截面的变形,采用百分表测试 3 个挠度测点,测点布置见图 4,加固

前后应变分析结果见表 4。

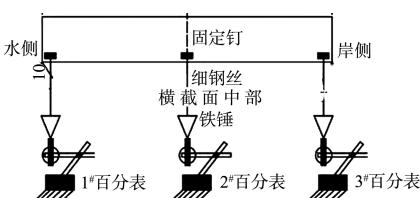


图 4 百分表布置位置

根据观测设备记录的结果, 取平均值作为跨中挠度最大值。因本次加固的梁为纵向裂缝, 因此百分表沿横截面底部布置于跨中截面, 其中一只百分表布置于横截面正中位置, 外侧 2 只百分表距离边缘距离均为 15 cm。

表 4 跨中截面挠度实测值

梁构件是否加固	百分表	运营时间	运营时间	码头面停	非运营时间
		段挠度最大值/mm	段挠度平均值/mm	止作业挠度值/mm	段挠度平均值/mm
否	1#	3.86		0.22	
	2#	3.88	3.867	0.22	0.22
	3#	3.86		0.22	
是	1#	2.81		0.22	
	2#	2.81	2.810	0.22	0.22
	3#	2.81		0.22	

注: 因码头面作用有动荷载, 百分表难以稳定读数, 上述实测挠度均为各百分表在测试期间的平均最大或最小值。

从表 4 可以看出, 在码头运营时段, 碳纤维加固后纵梁挠度的变化主要表现在两个方面: 一是在跨中截面处总体挠度降低了约 27.3%; 二是对于裂缝沿纵向的梁, 在加固前梁身跨中截面处的挠度表现为中间大两边略小, 采用碳纤维加固后在同一截面处的挠度趋于一致。由此可见, 碳纤维布对有损伤的纵梁的加固作用十分明显。进一步分析可知, 碳纤维布的存在使纵梁及碳纤维布形成了共同承受荷载的整体, 可有效抑制混凝土裂缝的发展。

### 5.1.2 模拟值分析

根据码头设计文件建立有限元模型, 纵梁跨度为 7 m。数值模拟过程中所用荷载为设计荷载, 最大正弯矩为 3 277 kN·m, 位于跨中, 最大负弯矩为 2 038 kN·m, 位于支座处。数值模拟结果见表 5。

表 5 跨中截面挠度模拟值

工况	挠度/mm	备注
加固前	4.25	未考虑纵梁裂缝, 近似认为灌浆修补后无裂缝
加固后	2.56	-

从表 5 可以看出, 采用本文的假定模型, 尽管由于工况不可能严格一致等因素致使模拟结果与实测值难以吻合, 但通过加固前后的挠度值对比, 仍能看出碳纤维材料对混凝土构件的加固作用。

### 5.2 应力分析

与挠度分析中百分表布置形式不同, 应力测试主要在跨中混凝土表面及碳纤维表面粘贴应变片, 仅检测沿纵梁长度方向的应变。根据选用的应变片规格所对应的应力-应变关系模拟和实测应力值结果对比见表 6。

表 6 实测应力及模拟结果

工况	材料	实测值/kPa	模拟值/kPa
加固前	混凝土	910.0	826.2
	混凝土	-	308.5
加固后	碳纤维布	903.0	797.3

注: 混凝土强度设计值为 C30, 弹性模量为 30 kN/mm<sup>2</sup>。

根据现场实测情况, 纵梁加固后碳纤维没有明显的凸起、凹陷, 且无任何拉裂现象, 从外观可以判断混凝土及碳纤维布之间无相对变形, 可以认为是协同受力。

加固前混凝土受拉区应力实测值与模拟值误差为 9%, 应是实际荷载与设计荷载不完全一致引起。对比数值模拟结果可知, 加固后混凝土应力大幅度下降, 混凝土应力值低于碳纤维布应力值, 原因在于混凝土与碳纤维布通过胶黏剂粘贴后形成了共同承受荷载的整体, 两种材料在受拉区无相对位移, 但碳纤维材料的弹性模量远大于混凝土的弹性模量, 因此在变形相同时, 碳纤维布应力值远大于混凝土, 与现场实测的结果吻合。

### 6 结语

1) 作为劣化混凝土构件加固的有效途径, 碳纤维布在低应力状态下可与混凝土结构共同受力, 碳纤维布发挥其高强度、高弹性模量的优点, 降低了混凝土应力、减小纵梁跨中挠度、限制混凝

土裂缝的开展。

2) 采用陆新征提出的界面模型可准确模拟混凝土与碳纤维布的受荷机理,但在实际工程中,现场实测与数值模拟结果可能因为运行工况与实际工况不完全相同导致结果有差异,但总体变化趋势与理论分析值一致。

3) 本案例为内河高桩码头构件加固,施工可在枯水期进行,便于混凝土表面的处理及碳纤维布的粘贴,但在海港区域应注意选择乘潮施工,并采取措施保证混凝土表面干燥。

## 参考文献:

- [1] 中交四航工程研究院有限公司.水运工程水工建筑物检测与评估技术规范: JTS 304—2019[S].北京: 人民交通出版社有限公司, 2018.
- [2] 中交四航工程研究院有限公司.港口水工建筑物修补加固技术规范: JTS 311—2011[S].北京: 人民交通出版社, 2011.
- [3] 住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范: GB 50010—

(上接第 117 页)

由质量效益分析可知:二代模具预制平均废品率为 0.91%,三代模具预制平均废品率为 0.56%,若采用三代模具进行预制施工,每架透水框架预制费用约 77.17 元,因此可节省费用 2.03 万元。

综上所述,采用三代模具进行框架预制可节省工期 27 d、节约成本约 73 万元且预制质量较好,因此三代模具更适于大规模短时间内的框架预制施工。

## 6 结论

1) 本文基于长江 6 m 水深航道整治工程,对正四面六边体透水框架预制施工模具选择进行探讨,针对目前常用的两种预制模具——整体式(二代)模具、拼装式(三代)模具从预制件成品质量、构件脱模时间以及施工成本进行数据收集和对比分析。

2) 从预制件成品质量来看,三代模具在预制施工过程中,废品率降低了 3.5%;从构件脱模时间上,三代模具因构件拼接缝较多,加快表面空气流动速度,缩短混凝土初凝时间,施工效率提升

2010[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

- [4] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M].北京: 人民交通出版社, 2007.
- [5] 杨奇飞.FRP-混凝土粘结界面研究的两个重要问题[D].汕头: 汕头大学, 2009.
- [6] FERRACUTI B, SAVOIA M, MAZZOTTI C. Interface law for FRP-concrete delamination [J]. Composite structures, 2007, 80(4): 523-531.
- [7] MONTI G, RENZELLI M, LUCIANI P. FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones[C]//6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures. Singapore: World scientific publications, 2003: 183-192.
- [8] 王召.FRP 筋混凝土界面粘结性能的研究[D].大连: 大连理工大学, 2015.
- [9] 陆新征.FRP-混凝土界面行为研究[D].北京: 清华大学, 2005.
- [10] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等.FRP 片材与混凝土粘结性能的精细有限元分析[J].工程力学, 2006, 23(5): 74-82.

(本文编辑 武亚庆)

9%;从施工成本角度,因预制工期时间缩短,场地与设备等租赁时间缩短,可节省成本 50 万元。

3) 采用拼装式(三代)模具进行透水框架预制施工,既能保证预制施工高质量、高效率完成,又能节约施工成本,可以为类似工期紧、施工量大的工程提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 余南, 芮迪文.关于四面六边体透水框架预制模具选择的探究[J].中国水运(下半月), 2019, 19(9): 251-252.
- [2] 陈亮.四面六边形混凝土整体透水框架在航道整治工程中的应用[J].中国水运, 2015(6): 48-49.
- [3] 周生利, 刘常全, 张俊.混凝土四面六边透水框架结构在长江航道整治中的应用[J].水运工程, 2012(10): 102-106, 114.
- [4] 蒋波, 雷国平, 尹书冉, 等.单个透水框架的三维数值模拟研究[J].水运工程, 2014(12): 168-172.
- [5] 李莎, 熊飞, 王珂, 等.长江中游透水框架护岸工程对底栖动物群落结构的影响[J].水生态学杂志, 2015, 36(6): 72-79.

(本文编辑 王璁)