

双向碳纤维网格在上海堤防维修加固工程中的应用

钱程

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市200092]

摘要:堤防结构定期维修加固是预防安全隐患,确保堤防设施安全运行的重要手段。结合双向碳纤维网格在上海堤防设施维修加固工程的首次应用实例,介绍了碳纤维网格加固方法,分析了碳纤维网格加固系统在堤防维修加固工程中的适用性和先进性,探究了碳纤维网格受弯加固原理,推导了受弯承载力计算公式并验证了公式的正确性,为类似堤防维修加固工程提供参考和借鉴。

关键词:双向碳纤维网格;堤防维修;受弯加固;承载力计算

中图分类号:TV871

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)02-0246-04

0 引言

碳纤维材料兴起于20世纪90年代,因材料本身具有较高的抗拉强度、较小的质量密度及优异的耐久性能而被国外广泛应用于混凝土结构的后加固中。使用期间,将碳纤维材料与被加固体紧密粘连,确保整体协调变形,发挥碳纤维材料的抗拉特性,从而实现结构加固的目的。发展至今,碳纤维材料主要分为碳纤维板、碳纤维布和碳纤维网格三类^[1]。其中,碳纤维板、碳纤维布发展较早,目前已有成熟的技术规程。碳纤维网格由于出现较晚,目前仍处于研究应用阶段。

我国该项技术起步较晚,21世纪以来才逐步得到发展及应用,目前多被用于市政桥梁、建筑、隧洞等结构的加固,并取得了一定的成绩。众多专家学者也对材料良好的延性和优秀的裂缝控制能力展开研究。但该项技术在堤防设施维修加固工程中的应用仍是一片空白。笔者结合北部海塘一期达标大堤防浪墙维修工程(双向碳纤维网格在上海堤防维修加固工程中的首次尝试)设计施工经验,开展双向碳纤维网格在堤防设施维修加固工程中应用的研究,以期为类似工程的设计和施工提供参考。

1 双向碳纤维网格加固系统

1.1 加固系统

加固系统由双向碳纤维网格和聚合物砂浆(见图1)组成。双向碳纤维网格与常规的钢筋网片类

似,由纵横相间的碳纤维束编制而成。每束碳纤维均具有较高的抗拉强度,从而实现碳纤维网格双向受拉的特性。聚合物砂浆由水泥、掺合剂、骨料等组成,为碳纤维网格与被加固体之间的黏结材料。该系统用于堤防设施维修加固时,利用聚合物砂浆将碳纤维网格固定于结构表面,确保整体变形协调,共同受力^[2]。



图1 双向碳纤维网格及聚合物砂浆

1.2 加固方案

区别于碳纤维布、碳纤维板利用树脂类材料直接粘贴于结构外表面,碳纤维网格加固之前需对混凝土结构面层进行凿毛处理,凿毛深度满足聚合物砂浆加固要求,碳纤维网格包裹于聚合物砂浆之中,从而保证加固后的结构外观、尺寸与原结构一致。具体加固步骤(见图2)如下:

- (1)施工时,墙体表面凿除15 mm,基面充分湿润。
- (2)拌制聚合物砂浆,为保证砂浆黏粘效果,两次使用的砂浆需分别拌制。
- (3)喷射底浆,底浆厚度5 mm,确保底浆平整度。
- (4)张铺网格,网格需尽量张紧并没入底浆之中。
- (5)底浆初凝后喷射面浆,厚度10 mm。
- (6)压光找平及养护。

1.3 适用性和先进性分析

根据以往加固经验,堤防设施混凝土构件多采用钢筋网片外贴加固。对比碳纤维加固与常规加固方

收稿日期:2023-02-16

作者简介:钱程(1991—),男,硕士,工程师,从事水利水电设计工作。

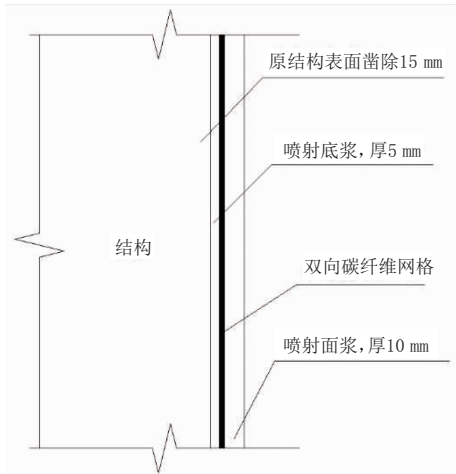


图2 双向碳纤维网格加固系统断面案,优缺点见表1。

表1 加固方案对比

项目	双向碳纤维网格加固系统	碳纤维布加固系统	钢筋网片外贴加固
防腐性能	好,且聚合物砂浆为碱性,能防止原结构钢筋锈蚀	好(材料本身不存在腐蚀问题)	差,钢筋需考虑足够的保护层厚度
喷射砂浆/混凝土厚度	1.5~2cm	1mm左右(单层碳纤维布)	8cm
施工难易程度	施工简便,对场地要求低,需要劳动力少,施工周期短		施工难度最大,需要机械辅助,对场地要求高,外贴结构需设置模板浇筑,需要劳动力多,且混凝土需保证一定的养护期
环境影响	施工影响范围小,施工期间基本无粉尘产生,施工噪声小,施工废弃物少		混凝土用量大,施工场地需考虑施工机械进出,施工及保养期间有废水气产生,可能会对环境造成一定的影响
混凝土回弹率及密度	回弹率低,不存在钢筋网振动问题。网格后无混凝土空洞,具有极高的密度	—	存在钢筋网片振动问题,混凝土回弹率高。钢筋网片后易形成混凝土空洞,造成密度较差
美观	表层为聚合物砂浆,与原有结构观感一致,加固痕迹不明显	碳纤维布外露,与原有结构外观颜色不一致,加固痕迹明显	与原有墙身外观一致,但会明显增加墙身厚度

2 抗弯加固原理

碳纤维网格为柔性材料,具有较高的抗拉强度,可代替常规的钢筋网片。当堤防设施混凝土构件发生受弯破坏时,在受拉区布置双向碳纤维网格(纤维方向与加固部位的受拉方向一致),通过碳纤维网格拉伸变形承担外部荷载。

2.1 抗弯承载力计算

《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》^[3]已明确碳纤维布抗弯加固承载力计算公式,但由于碳纤维网格区别于碳纤维布,仍具有一定的保护层厚度,故技术规程中的公式未完全适用。为方便计算,指导工程设计,本节结合钢筋混凝土计算原理及假定,探讨适用于碳纤维网格加固系统的抗弯承载力计算公式。

除满足钢筋混凝土结构抗弯计算的基本假定外,还需满足以下假定:

(1)碳纤维网格应力应变满足线形变化。

与传统钢筋网片加固工艺相比,碳纤维网格加固系统在施工难易程度、施工周期、可靠性等方面具有较大优势。对比碳纤维网格与碳纤维布加固方案,虽然碳纤维网格加固技术在施工准备、施工工序方面难度略大于碳纤维布加固技术,但在对内部钢筋防腐保护能力和加固后的美观性等方面具有一定的优势。而堤防工程尤其是海堤工程,常年处于高盐环境中,内部钢筋的防腐能力将直接影响堤防工程的耐久性。同时,堤防多为外露结构,加固后的整体美观性、一致性也需着重考虑。综上所述,双向碳纤维网格加固系统在堤防设施维修加固工程中具有较好的适用性和一定的先进性。

(2)抗弯承载力极限状态前,碳纤维网格不会剥离的假定。

(3)待加固结构设计合理,为适筋破坏。

经碳纤维网格加固后,结构理想的破坏型式主要为以下两种:

(1)破坏 I - 碳纤维网格未失效,受拉钢筋屈服,受压混凝土压碎^[4]。

(2)破坏 II - 碳纤维网格失效,受拉钢筋屈服,受压混凝土未压碎^[5]。

(1)破坏 I

该状态下应力应变分布见图3,即

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}, \epsilon_s \geq \epsilon_y, \epsilon_{cf} < \epsilon_{cfu}$$

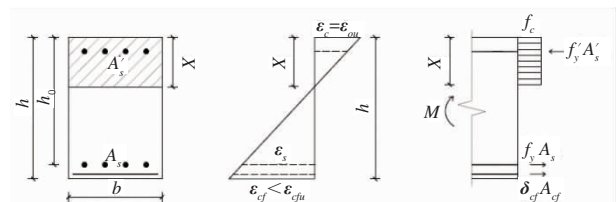


图3 应力应变分布

图3中, h 、 b 为结构外尺寸 (m); f_y 、 f'_y 为钢筋抗拉、抗压设计值; f_c 为混凝土抗压设计值 (N/mm^2); a_s 、 a'_s 、 a_{cf} 为受拉钢筋、受压钢筋、碳纤维网格保护层厚度 (m); ε_c 、 ε_s 、 ε_{cf} 为混凝土、受拉钢筋、碳纤维网格应变; ε_{cu} 、 ε_y 、 ε_{cfu} 为混凝土、受拉钢筋、碳纤维网格极限应变; A_s 、 A'_s 、 A_{cf} 为受拉钢筋、受压钢筋、受拉碳纤维网格截面面积^[6] (m^2)。

由平截面假定等比关系得:

$$\frac{x}{h-a_{cf}} = \frac{0.8\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{cf}} \quad (1)$$

由力平衡方程得:

$$f_c b x + f'_y A'_s = f_y A_s + E_{cf} \varepsilon_{cf} A_{cf} \quad (2)$$

再对受压区钢筋合力点取矩, 可得:

$$KM \leq M_u = f_y A_s (h_0 - a'_s) + E_{cf} \varepsilon_{cf} A_{cf} (h - a'_s - a_{cf}) - f_c b x \left(\frac{x}{2} - a'_s \right) \quad (3)$$

式中: M 为弯矩设计值 ($\text{kN} \cdot \text{m}$); E_{cf} 为碳纤维网格弹性模量 (MPa)。

(2) 破坏 II

该状态下应力应变分布见图4, 即

$$\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}, \varepsilon_s \geq \varepsilon_y, \varepsilon_{cf} = \varepsilon_{cfu}$$

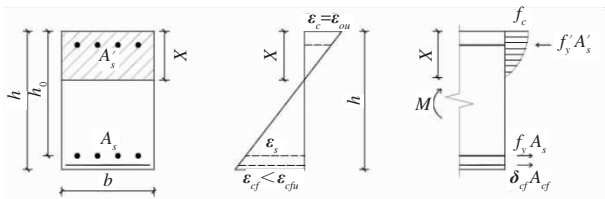


图4 应力应变分布

该破坏状态碳纤维及钢筋拉应力已知, 混凝土压应力未知, 故对受压区混凝土合力点取矩。因混凝土未压碎, 受压钢筋应变相对较小, 为方便计算, 忽略受压钢筋, 可得:

$$KM \leq M_u = f_y A_s \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + E_{cf} \varepsilon_{cfu} A_{cf} \left(h - a_{cf} - \frac{x}{2} \right) \quad (4)$$

式中: $x = \frac{0.8\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{cfu}} (h - a_c) \leq \frac{0.8\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{cfu}} (h - a_{cf})$, 从计算方便及偏安全角度考虑, 可取

$$x = \frac{0.8\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{cfu}} (h - a_{cf}) \quad (5)$$

2.2 碳纤维网格加固方案复核

为确认加固方案是否满足抗弯承载力要求, 需进行结构复核。可按以下步骤(见图5)复核:

(1) 确认加固结构尺寸、混凝土标号、钢筋型号数量等, 确认碳纤维网格用量及参数。

(2) 计算 $x_c = \frac{0.8\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{cfu}} (h - a_{cf})$ 。

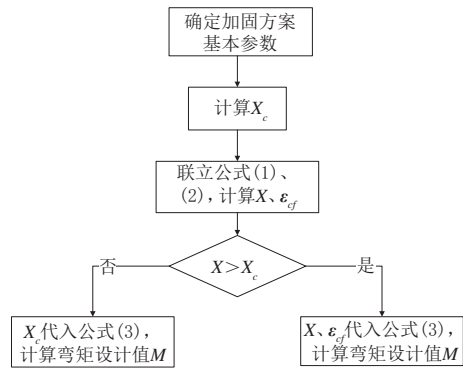


图5 加固方案复核流程

(3) 假设加固结构极限状态为破坏 I, 联立式(1)、式(2), 计算 x 。若 $x > x_c$, 则假设成立, ε_{cf} 、 x 代入式(3), 计算 M ; 反之, 则将 x_c 代入式(4), 计算 M 。

2.3 计算公式验证

为验证上述公式的正确性, 本文利用“碳纤维网格加固超载梁抗弯性能试验”^[7](以下简称文1)和“碳纤维加固建筑混凝土梁的抗弯性能研究”^[8](以下简称文2)实验结果进行验证, 计算结果见表2。

表2 实验值与计算值对比

序号	参数	实验值 / ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	计算值 / ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	备注
1	$b \times h = 150 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$, $L = 2\ 600 \text{ mm}$; $f_c = 19.1 \text{ MPa}$, $f_y = f'_y = 300 \text{ MPa}$, $a_s, a'_s = 30 \text{ mm}$; $E_{cf} = 230 \text{ GPa}$	126.1	119.5	对应文1 CFN梁
	$b \times h = 250 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, $L = 2\ 400 \text{ mm}$; $f_c = 19.1 \text{ MPa}$, $f_y = f'_y = 360 \text{ MPa}$, $a_s = 30 \text{ mm}, a'_s = 25 \text{ mm}$; $E_{cf} = 124 \text{ MPa}$	159.6	145.4	对应文2 JGL1梁

表2中的实验值为碳纤维加固简支梁发生受弯破坏所对应的弯矩值, 计算值为由2.1节推导公式计算的碳纤维加固简支梁弯矩设计值。

由结果可知, 计算值均接近实验值, 且均小于实验值, 计算结果偏安全, 推导公式具备一定的实用价值。

3 工程应用实例

北部海塘位于长江口南港水道、黄浦江和长江交汇处, 为浦东海塘的起点, 上游接黄浦江一线堤防(见图6)。

该段海塘于1998年12月建设完成, 共701 m, 为复合式斜坡堤+防浪墙结构(见图7), 建成至今已有20多年历史。2019年7月巡查期间发现, 防浪墙

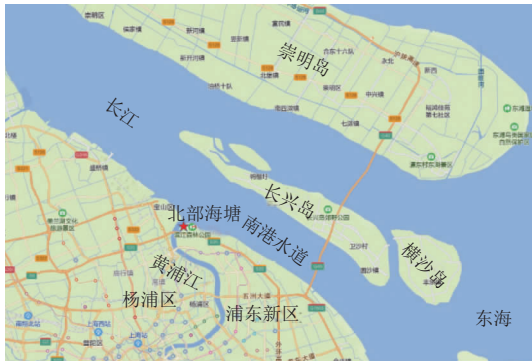


图6 北部海塘区位置

墙身裂缝明显有增多和延展趋势,初步判断为结构受台风和高潮位双重侵袭影响。为消除隐患,平安度汛,管理部门立即开启应急加固程序。鉴于工程处于汛期施工,开缺风险大,且要求施工周期短,不宜采用拆除重建方案。墙后堤顶道路为区域内企业的主要通道,施工期间需保持道路畅通,可供施工的作业面小。考虑以上因素,亟须一种施工方便快捷、结构安全可靠、施工影响小的加固方案。经研判分析,采用双向碳纤维网格加固方案。

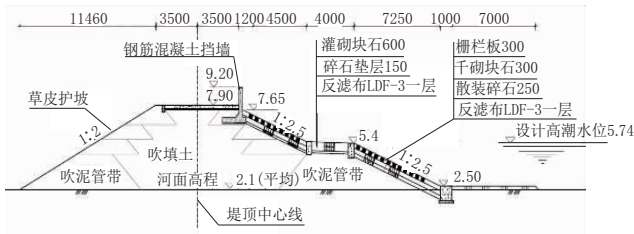


图7 北部海塘大堤结构

由于现状结构墙身裂缝较多,且存在多处钢筋外露锈蚀情况,为保证加固效果,面层凿毛后对墙面进行检查,外露锈蚀钢筋除锈并重新刷涂防锈油漆,裂缝逐条进行凿槽嵌补,后再进行底浆喷涂、网格张铺、面浆喷涂、面层养护等工序。本工程加固周期为2019年8月15日至2019年10月5日,共52d,加固方案成功解决墙身原有安全隐患。目前结构已经历4a汛期考验,墙身未见明显损坏、裂缝情况(见

图8)。



图8 加固结构影像

4 结语

实例证明,碳纤维网格加固系统成功解决了北部海塘防浪墙墙身损坏、裂缝的安全隐患,且相较于常规加固方案,具有施工简单、结构可靠、方便快捷等优势,在堤防设施维修加固工程中具有较好的适用性和一定的先进性,可在类似工程中推广应用。

参考文献:

- [1] 朱显巨,钱国芬,茹建中.浅析碳纤维增强复合材料在建筑工程中的应用[J].中华民居(下旬刊),2014(5):148.
- [2] 叶玉珍.纤维复合增强材料在黄坡水库输水管加固工程中的应用[J].水利水电工程设计,2004(03):24-25,44.
- [3] CECS 146—2003(2007),碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S].
- [4] 赵志刚,谭云亮.碳纤维加固钢筋混凝土T梁设计研究[J].公路,2005(12):4-8.
- [5] 曹皓,石雪飞,胡可.预制混凝土桥面板采用回转式钢筋接缝的受弯性能研究[J].公路,2020,65(10):181-186.
- [6] 潘毅,胡文豪,郭瑞,等.碳纤维增强复合网格-聚合物水泥砂浆加固RC梁的抗弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(4):119-128.
- [7] 钟正强,高威.碳纤维网格加固超载梁抗弯性能试验[J].交通科学与工程,2021,37(3):41-49.
- [8] 陈进财,商先鹏,张苏文,等.碳纤维加固建筑混凝土梁的抗弯性能研究[J].合成材料老化与应用,2020,49(5):103-106.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com