

· 施 工 ·



玄武岩纤维制品在老码头加固修复中的应用*

蔺威威¹, 林 猛², 谷坤鹏¹, 王泉泉¹

(1. 中交上海港湾工程设计研究院有限公司, 上海 200032; 2. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对20世纪建设的大量码头因长期运营于恶劣环境而产生的钢筋混凝土劣化问题, 依托宁波舟山港二期码头加固修复工程, 设计不同的玄武岩纤维制品进行针对性加固修复, 包括采用双层玄武岩纤维布(300~380 g/m²)结合粘接胶对面板进行加固、植入玄武岩纤维筋结合钢套筒支模灌注C40水下不分散混凝土进行加大截面法加固、掺入玄武岩纤维网格结合混凝土进行面层控裂加固等, 结合施工工艺流程实现了将玄武岩纤维布、筋、网格在老码头中的综合应用, 并对施工后约2年的应用效果进行评估。结果表明, 玄武岩纤维布未出现鼓包、剥离等现象, 玄武岩纤维网格、筋复合混凝土结构未产生有害裂缝, 总体外观质量良好。

关键词: 老码头; 玄武岩纤维制品; 加固修复; 现场施工; 质量跟踪

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0193-06

Application of basalt fiber products in reinforcement and repair of old wharves

LIN Weiwei¹, LIN Meng², GU Kungpeng¹, WANG Quanquan¹

(1. CCCC Shanghai Harbor Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: In response to the deterioration of reinforced concrete caused by long-term operation in harsh environments in a large number of wharves built in the twentieth century, relying on the reinforcement and repair project of Ningbo-Zhoushan Port phase II wharf, we design different basalt fiber products to use for targeted reinforcement and repair, which include using double-layer basalt fiber cloth (300 g/m² to 380 g/m²) combined with adhesive to reinforce the panel, implanting basalt fiber reinforcement combined with steel sleeve support formwork to inject C40 underwater non-dispersed concrete for increased cross-section method, and adding basalt fiber mesh combined with concrete for surface layer crack control reinforcement. Combining with the construction process, we achieve the comprehensive application of basalt fiber cloth, reinforcement, and mesh in the old wharf, and evaluate the application effect of about 2 years after construction. The results show that there is no bulging or peeling phenomenon in the basalt fiber cloth, and there are no harmful cracks in the basalt fiber mesh and reinforcement composite concrete structure. The overall appearance quality is well.

Keywords: old wharf; basalt fiber product; reinforcement and repair; on site construction; quality tracking

20世纪建设的大量海港码头运营已有几十年, 受到早期设计标准、各项荷载、高温高湿腐蚀环境、施工条件等因素的影响, 出现了不同程

度的病害情况^[1], 尤其桩基作为承受上部结构的基础结构形式^[2], 一旦出现严重的劣化, 随着进一步的腐蚀甚至会出现工程事故, 因此亟需进行

收稿日期: 2024-03-22

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3706504)

作者简介: 蔺威威(1996—), 男, 硕士, 工程师, 从事水工、海工结构加固与修复。

加固修复。

近年来,纤维材料加固法在工程结构中的应用一直是国内外研究的热点,随着材料技术的飞跃发展,已经开发了多种高性能纤维材料^[3]。碳纤维是迄今为止应用于工程结构加固领域较早、技术成熟、用量最大的纤维材料^[4]。然而碳纤维制品价格昂贵,直接影响工程经济性,因此利用其他新材料进行工程加固应用的思路应运而生。

连续玄武岩纤维是以火山喷发的玄武岩矿石为原料,拉丝制成的一种高性能天然绿色无机矿物纤维,其制造过程环保无污染、能耗低、成本低,无二次污染,被称为 21 世纪无污染的“绿色工业原材料”,是极佳的工程应用材料^[5]。随着玄武岩纤维向着稳定化、量产化及高性能化的发

展^[6-7],逐步在多个工程领域应用,而在码头工程领域尚无应用报道。

本文依托宁波舟山港二期码头水工结构加固修复工程,通过对老码头不同部位的劣化情况采用针对性的玄武岩纤维制品进行加固修复,以期提高结构耐久性,旨在为行业提供示范与借鉴。

1 工程概况

宁波舟山港二期码头作业区范围紧临炮台山处的一期陆域岸线延伸至老鼠山的山麓为止,见图 1,主码头长 323 m、宽 22 m,卸船泊位和装船泊位作为主码头连片布置,长度分别为 186 和 137 m,码头后方设有 3 条栈桥,长度分别为 75.084、91.431、122.823 m,宽度均为 9.5 m。码头和栈桥均为高桩梁板式结构。

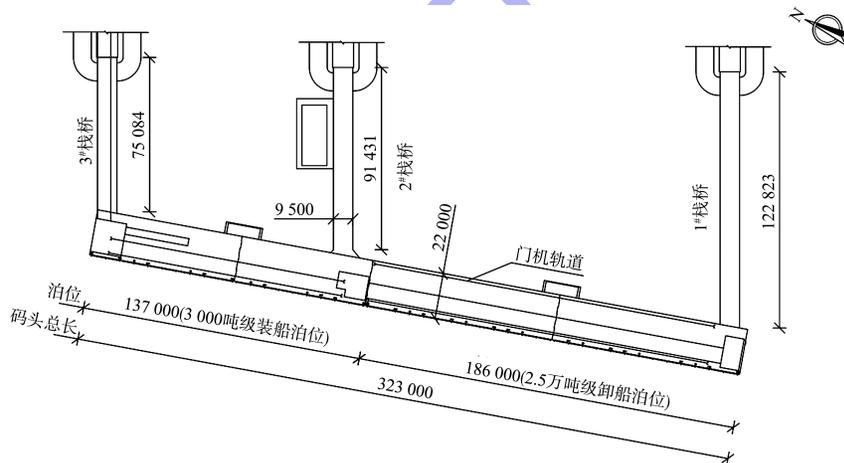


图 1 码头平面位置 (单位: mm)

Fig. 1 Wharf layout position (unit: mm)

老塘山二期工程于 1986 年实施,1992 年建成投产,目前已服役了 30 余年。2019 年 11 月,经过对码头的全面检测,发现码头及栈桥主体结构出现了大范围不同程度的混凝土破损开裂情况,包括栈桥桩基、码头及栈桥面层、面板以及横纵梁,亟需采取加固修复措施。

2 玄武岩纤维制品加固修复设计

2.1 玄武岩纤维布加固面板

参照 GB 50608—2010《纤维增强复合材料

建设工程应用技术规范》^[8],根据不同部位的劣化情况,设计不同的玄武岩纤维制品进行加固修复。

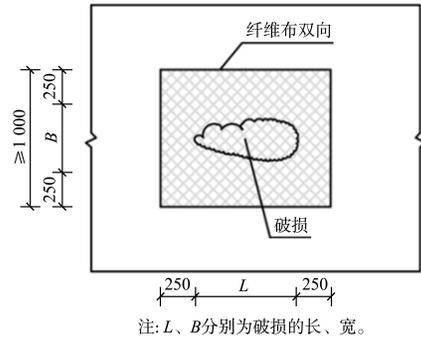
利用玄武岩纤维布加固面板,可以在低应力下与混凝土共同受力,发挥玄武岩纤维布高强度的优点,降低混凝土应力、减小面板挠度、限制混凝土裂缝进一步发展^[9]。

以栈桥某块面板为例,现场破损裂缝情况见图 2a),栈桥面板下部有 1 处空鼓,尺寸为 0.8 m×0.3 m(长×宽);加固修复设计见图 2b)。针对

面板底部空鼓情况, 采用聚合物砂浆填补后双向粘贴, 粘贴双层, 且超出距离 250 mm 以上。玄武岩纤维布的性能见表 1。据大量工程调研结果得知, 纤维布破坏基本为剥离破坏, 粘接性能最为重要, 则对粘接胶提出性能设计指标见表 2。



a) 面板劣化情况



b) 面板加固修复设计(单位: mm)

图 2 玄武岩纤维布加固面板

Fig. 2 Panel reinforced by basalt fiber cloth

表 1 玄武岩纤维布主要技术指标

Tab. 1 Main technical indicators of basalt fiber cloth

纤维布类型	单位面积质量/ (g·m ⁻²)	抗拉强度 标准值/MPa	弹性模量/ GPa	极限 应变/%
玄武岩纤维布	300~380	≥2 400	≥90	≥2.2

表 2 粘接胶主要性能

Tab. 2 Main properties of adhesive

抗拉强度/ MPa	受拉弹性模量/ GPa	伸长率/ %	抗弯强度/MPa	抗压强度/ MPa	钢-钢拉伸 抗剪强度 标准值/MPa	钢-钢不 均匀扯离 强度/MPa	与干、湿表面 混凝土正拉粘接 强度/MPa	不挥发物 固体含量/ %
≥40	≥2 500	≥1.5	≥50, 且不得呈脆性破坏	≥70	≥14	≥20	≥2.5, 且为混凝土内聚破坏	≥88

2.2 玄武岩纤维筋加固桩基

利用玄武岩纤维筋替代钢筋进行加大截面法加固可有效提高结构耐久性, 且玄武岩纤维筋的线弹性能够在筋材屈服后为结构提供二次刚度, 卸载后的结构残余变形明显小于相同位移下的普通钢筋混凝土结构^[10]。

以栈桥某一桩基为例, 破损裂缝情况见图 3a), 原桩基为 $\phi 700$ mm 灌注桩, 桩身表面裂缝密且多, 裂缝长度在 1.2~2.0 m, 裂缝宽度在 0.49~2.21 mm, 超声波法检测裂缝深度在 69~117 mm, 采用加大截面法进行修补; 加固修复设计见图 3b), 加固

后桩基直径为 1 000 mm, 加固高度为 3 m, 加固厚度为 60 mm, 植入玄武岩纤维筋长度 0.6 m, 参考 JG/T 351—2012 《纤维增复合材料筋》^[11], 设计主筋直径 16 mm, 单根长 3 495 mm, 箍筋直径 10 mm, 单根长 2 960 mm, 力学性能见表 3。玄武岩纤维筋外包钢套筒进行支模浇筑, 浇筑混凝土为 C40 水下不分散混凝土。

表 3 玄武岩纤维筋力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of basalt fiber reinforcement

玄武岩纤维筋类型	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限应变/%
$\phi 16$ mm 纵向筋	≥1 200	≥50	≥2.5
$\phi 10$ mm 箍筋	≥1 500	≥50	≥2.5

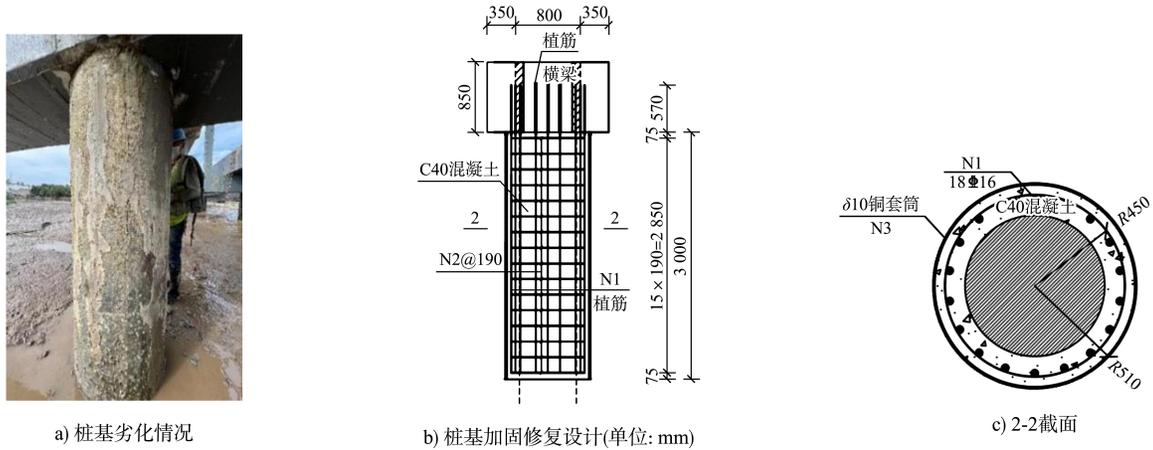


图 3 玄武岩纤维筋加固桩基

Fig. 3 Pile foundation reinforced by basalt fiber reinforcement

2.3 玄武岩纤维网格加固面层

利用玄武岩纤维网格加固面层可有效提高抗裂性能，由于玄武岩纤维与水泥基混凝土成分相近，密度、温度变形系数相似，相容性较好，混凝土浇筑成型时，纤维与基体之间没有因温度膨胀导致的界面裂缝，结合十分牢固，两者协同作用可有效提高复合材料的整体性能。此外，玄武岩纤维网络的二维网状结构可双向约束混凝土的裂纹发展^[12]。

以 2# 栈桥的面层混凝土结构为例，破损裂缝情况见图 4a)，表面已经出现非常严重的结构型裂缝，长、宽、深都超出了使用规定范围，结构耐久性大幅下降，且外观质量差；加固修复设计见图 4b)，设计玄武岩纤维网孔边长为 50 mm，厚度为 30 mm，混凝土保护层厚度为 30 mm。采用的玄武岩纤维网格的性能指标见表 4。

表 4 玄武岩纤维网格拉伸性能

Tab. 4 Tensile properties of basalt fiber mesh

拉伸强度/MPa	拉伸弹性模量/GPa	断裂伸长率/%
≥2 000	≥85	≥2.3

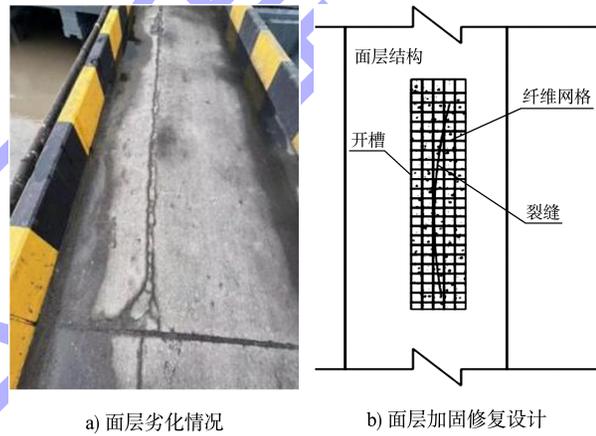


图 4 玄武岩纤维网格加固面层

Fig. 4 Surface layer reinforced by basalt fiber mesh

3 现场施工及 2 年后应用效果

3.1 玄武岩纤维布现场施工

利用玄武岩纤维布加固面板的施工工艺流程见图 5。待加固修复完成后，表面做平整检查、补胶、常温固化等，最终施工效果见图 6a)，整体外观质量好，采用现场锤击法进行检查得到有效粘接面积基本为 100%；施工 2 年后的应用效果见图 6b)，外观未出现脱落、损坏鼓包等现象，粘接性能保持良好。

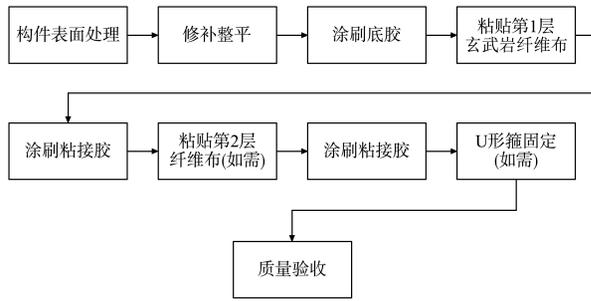
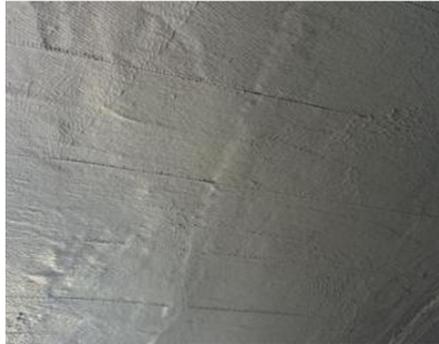


图 5 玄武岩纤维布施工工艺流程
Fig. 5 Construction process of basalt fiber cloth



a) 现场完工效果



b) 2年后效果

图 6 玄武岩纤维布应用效果
Fig. 6 Application effect of basalt fiber cloth

3.2 玄武岩纤维筋现场施工

利用玄武岩纤维筋加大桩基截面的施工工艺流程见图 7, 现场典型施工见图 8a)、b)。由于玄武岩纤维筋的密度约为钢筋的 1/4, 施工全过程效率大幅提高, 施工质量控制良好, 拆模养护 1 个月内未发现裂缝产生, 2 年后的应用效果见图 8c), 表面未发现有害裂缝产生, 外观质量良好。

满足结构耐久性设计要求。

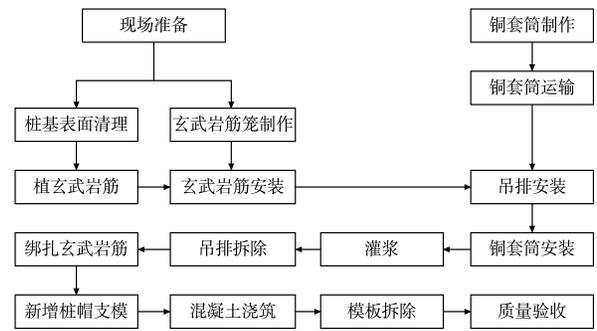


图 7 玄武岩纤维筋施工工艺流程

Fig. 7 Construction process of basalt fiber reinforcement



a) 玄武岩纤维筋笼安装 b) 完工效果 c) 2年后效果

图 8 玄武岩纤维筋应用效果

Fig. 8 Application effect of basalt fiber reinforcement

3.3 玄武岩纤维网格现场施工

利用玄武岩纤维网格掺入面层混凝土结构的施工工艺流程见图 9, 现场典型施工见图 10a)、b)。网格搭接位置大于或等于 3 个网孔节点, 浇筑混凝土过程中由于玄武岩纤维网格较好的刚度未出现弯折等现象, 施工质量控制良好, 2 年后的应用效果见图 10c), 表面未发现有害裂缝产生, 外观质量良好。

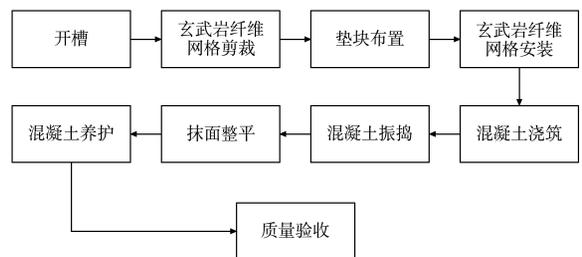


图 9 玄武岩纤维网格施工工艺流程

Fig. 9 Construction process of basalt fiber mesh

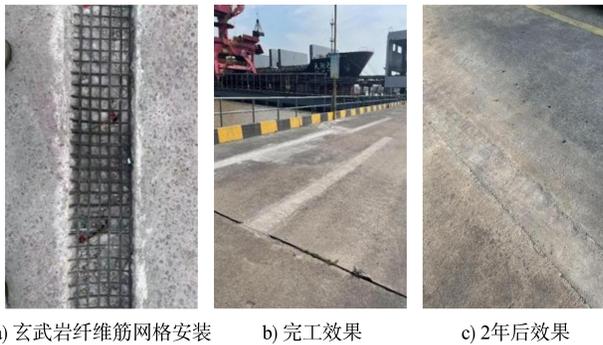


图 10 玄武岩纤维网格应用效果

Fig. 10 Application effect of basalt fiber mesh

4 结论

1) 本文设计双层玄武岩纤维布(300~380 g/m²)结合粘接胶对面板进行加固,且超出破损端部距离 250 mm 以上,现场施工质量好,采用现场锤击法验证了粘接面积基本为 100%,且 2 年后未出现脱落、损坏、鼓包等现象。

2) 利用植入玄武岩纤维筋结合钢套筒支模灌注 C40 水下不分散混凝土进行加大截面法加固,现场施工全过程效率大幅提高,拆模无裂缝产生,2 年后仅出现微小裂纹,满足结构耐久性设计要求。

3) 利用玄武岩纤维网格结合混凝土进行面层控裂加固,现场施工未发现网格有弯折现象,施工质量控制良好,表面未发现有害裂缝产生,外观质量良好。

4) 玄武岩纤维是 21 世纪绿色天然无机纤维,具有力学性能好、耐腐蚀、价格低等综合性价比优势,工程应用表明,利用玄武岩纤维制品在码

头上进行加固修复具有良好的推广应用前景,可有效降本增效,具有一定的行业示范作用。

参考文献:

[1] 陆旭峰,任敏,刘伟,等.海港码头结构修补及加固技术的应用[J].水运工程,2017(10):135-138,148.

[2] 王飞朋,郑娟,吴浩杭,等.老码头混凝土方桩修复加固方案及技术要点[J].水运工程,2022(1):87-94,130.

[3] 白琼琼.高性能纤维的发展现状及展望[J].毛纺科技,2021,49(6):91-94.

[4] 赖世伟,汪进秋.国内外碳纤维产业现状及发展趋势[J].唐山师范学院学报,2022,44(6):25-29.

[5] 张建伟,余希林,刘嘉麒,等.连续玄武岩纤维新材料的制备性能及其应用[J].材料导报,2023(11):234-240.

[6] 吴智深,陈兴芬.连续玄武岩纤维的标准化与高性能化发展[J].高科技纤维与应用,2022,47(5):16-24.

[7] 周伯柱,赵晏强,吴跃伟.从知识产权视角看玄武岩纤维产业发展态势[J].棉纺织技术,2017,45(11):76-80.

[8] 中冶研究建筑总院有限公司,中铁二十四局集团有限公司.纤维增强复合材料建设工程应用技术规范:GB 50608—2010[S].北京:中国计划出版社,2010.

[9] 刘亚威,王丽娟,周云亮,等.碳纤维布在高桩码头加固中的应用[J].水运工程,2023(S2):118-122.

[10] 吴智深,汪昕,史健喆.玄武岩纤维复合材料性能提升及其新型结构[J].工程力学,2020,37(5):1-14.

[11] 中冶建筑研究总院有限公司,国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心.JG/T 351—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[12] 屠建伟,于方,邓春林,等.抗裂网格对混凝土平板抗裂性能的影响研究[J].建筑结构,2020,50(S1):814-818.

(本文编辑 王璁)

(上接第 153 页)

[5] 吴雪茹.水利枢纽通航水流条件研究[J].水运工程,2006(9):52-55.

[6] 姜楚,赵建钧,辜晋德.青田水利枢纽通航水流条件试验研究[J].水利水运工程学报,2014(2):74-80.

[7] 刘中峰,刘达,黄本胜,等.孟洲坝枢纽二线船闸上引航道通航水流条件试验研究[J].水运工程,2019(1):119-125.

[8] 王云莉,孙国栋,李艳,等.北江濠里枢纽上游引航道通航水流条件试验研究[J].水运工程,2016(4):105-112.

[9] 李一兵,李发忠.葛洲坝三江下引航道口门区通航条件改善措施探讨[J].水道港口,2005,26(3):154-158.

[10] 李明德,黄伦超,桑雷.株洲枢纽船闸下引航道口门区整治措施及效果分析[J].水运工程,2006(8):79-82.

[11] 中交水运规划设计院.船闸总体设计规范:JTJ 305—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.

[12] 交通运输部天津水运工程科学研究所.水运工程模拟试验技术规范:JTS/T 231—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.

(本文编辑 王璁)