

# 装配式预应力 CFRP 板锚具有限元分析与施工技术

黄侨<sup>1</sup>, 万世成<sup>1</sup>, 关键<sup>1</sup>, 宋世刚<sup>2</sup>

(1.东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2.深圳市威士邦建筑新材料科技有限公司)

**摘要:** 纤维复合材料加固技术的先进性在于施加预应力,使 CFRP 处于较高的应力状态,充分利用材料的高强特性。锚固技术是限制预应力 CFRP 加固法应用的瓶颈,鉴于此,该文研制了一套新型预应力碳纤维板锚固体系,其特点是各零部件便于装配拆卸,重复利用率高,具有良好的经济效益;通过空间有限元数值分析,验证了锚固体系的受力性能;最后提出了相关的工艺流程和施工要点。

**关键词:** 桥梁加固; 预应力碳纤维板; 装配式; 锚具; 有限元; 施工技术

中国基础设施建设已从新建的高峰期过渡到建养并重的阶段,结构加固技术在现代土木工程中的重要性愈发凸显。在桥梁领域,早期常用粘贴钢板法作为结构修复补强的手段。20 世纪 90 年代末,高强纤维复合材料加固技术引入中国后盛行一时,主要应用形式为外贴碳纤维布或碳纤维板。而工程师们逐渐发现,这种“被动加固法”不能充分利用碳纤维材料的受拉特性,且容易在早期产生剥离破坏,因此结合体外预应力技术形成“预应力 CFRP 加固法”。

碳纤维板相比碳纤维布能提供更大的加固量,同时碳纤维板的制造工艺能保证其质量、性能更稳定。该方法的关键技术在于预应力锚具的强度可靠、传力模式合理,以及现场安装、张拉的施工性良好。其次,对于张拉空间的要求、各零部件的造价及重复利用率均为评价锚固体系的重要指标。虽然目前市场上预应力碳纤维板锚具及张拉装置的生产厂家较多,但因相关的规范标准不完善,同时受限于研究水平或利益驱使,其质量良莠不齐。

文献[9]提出的预应力碳纤维板张拉装置主体采用长方形结构,其构造简单、易于加工制造,但楔形槽孔的入口处较薄,受力时容易变形和产生裂缝,故锚具壁厚一般设计较大,导致碳纤维板与混凝土表面的间隙较大,在生产和安装中的用钢量、用胶量成本偏高。文献[10]提出的波形齿纹锚具主要由上下波形齿板、压紧及锁定装置构成,该类锚具主要适用于张拉碳纤

维布材,具有一定的局限性。该文在已有研究基础上提出一套新型预应力碳纤维板锚固体系。

## 1 锚固体系构造及原理设计

该文结合工程实践,基于实用性和经济性提出了一套预应力 CFRP 板锚固体系,用于钢筋混凝土结构及桥梁加固。锚固体系包括张拉组件、张拉端锚具、固定端锚具和锚固板。张拉组件包括锁紧螺母、穿心式千斤顶、球面垫圈、反力架、牵引螺杆和导轨压板,其整体构造参见图 1。

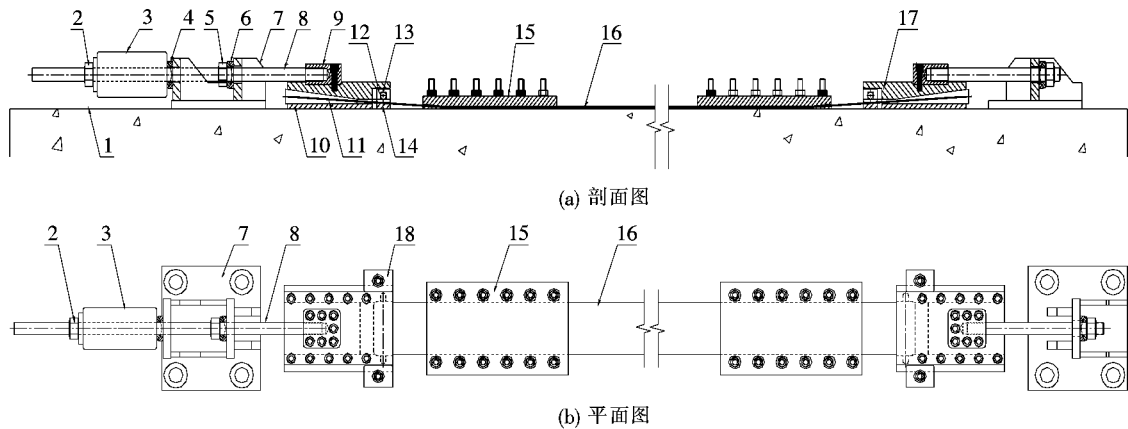
锚具盖板和底板在工厂中由高强合金钢精铸成型,可现场装配构成锚具外壳。楔形夹片包括上、下两块,外表面光滑,内表面带细齿纹,使用时嵌入锚具内的楔形空腔。锚具盖板顶部设有水平螺纹通孔,由牵引螺杆将张拉力从穿心式千斤顶传递到锚具上,进而在碳纤维板内部产生预应力。锚固板在张拉端和固定端各安装一块,张拉完成后,拧紧螺栓将碳纤维板两端锚固,拆除其余所有零部件(图 2)。

楔形夹片夹持于碳纤维板端部,张拉时楔形夹片挤压锚具内壁,根据反作用原理,碳纤维板与楔形夹片之间产生摩阻而无法回缩。转向块底面为光滑弧面,使碳纤维板从倾斜受拉过渡到水平状态。导轨压板用于抵抗由穿心式千斤顶中心线与碳纤维板错位产生的偏心力矩。加固过程中,球面垫圈起到自主调节受力

收稿日期:2018-09-10

基金项目:2014 年交通运输部《公路桥梁加固设计规范》修订编制项目;江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(编号:KYLX16\_0261)

作者简介:黄侨,男,博士,教授,博士生导师,E-mail:quanghit@126.com



1-被加固构件;2-锁紧螺母 I;3-穿心式千斤顶;4-球面垫圈 I;5-锁紧螺母 II;6-球面垫圈 II;  
7-反力架;8-牵引螺杆;9-张拉端锚具盖板;10-张拉端锚具底板;11-楔形夹片;12-转向块;  
13-圆柱销;14-转向块压板;15-锚固板;16-碳纤维板;17-固定端锚具;18-导轨压板

图 1 装配式预应力碳纤维板锚固体系整体构造图

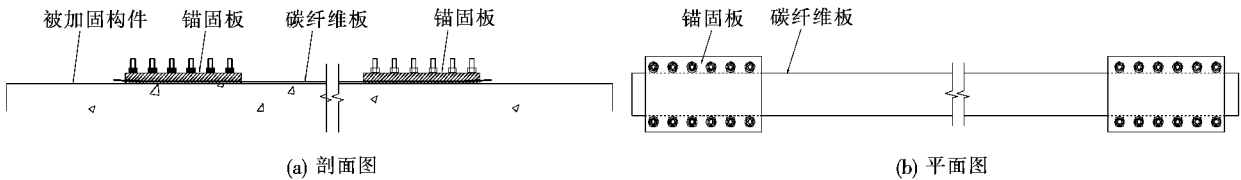


图 2 加固完成后的锚固体系示意图

中心的作用。

上述锚固体系的特色在于:① 整体为装配式结构,零部件重复利用率高,工程应用潜力大;② 制造成本和施工成本较低,经济性好;③ 采用环氧胶与锚固板共同锚固,可靠度高;④ 张拉时依靠楔形夹片的机械摩擦传力,锚固力大;⑤ 张拉空间小,传力流畅,施工便捷。

2 有限元数值计算与分析

可靠的数值模型和精确的计算分析是现代结构和机械设计的基础。为验证锚固体系各零部件的强度和变形满足设计要求,该文采用空间有限元分析软件 Abaqus 对其进行数值模拟,获得碳纤维板达到抗拉强度标准值( $f_{fk}=2\ 400\text{ MPa}$ )时的锚具应力分布。

对锚具进行三维实体建模,单元采用 C3D8R。钢材的弹性模量取  $2.06\times 10^5\text{ MPa}$ ,泊松比 0.3;碳纤维板的弹性模量为  $1.6\times 10^5\text{ MPa}$ ,泊松比 0.45。建立空间坐标系形成装配件,为各零部件的界面建立合适的接触和绑定关系。有限元模型的外形尺寸与真实结构一致,并进行精细化网格划分,计算结果见表 1、图 3。

表 1 锚固体系主要部件有限元分析结果

部件名称	材料类型	最大应力/MPa	所在位置
反力架(张拉支架)	QT400-3	524.6	水平孔缘
锚具盖板	QT500-3	429.5	螺纹孔缘
锚具底板	Q345	144.2	过渡斜面棱
楔形夹片	Q345	396.1	较薄侧尖端
锚固板	Q345	293.6	过渡斜面棱
转向块、圆柱销	45 号钢	85.9	圆柱销根部

Q345 钢综合力学性能良好,用作机械零件、一般金属结构件的热轧或正火状态,选为本套装置的主要材料;球墨铸铁有良好的塑性与韧性,焊接性与切削性均较好,用于加工锚具盖板和反力架(张拉支架);45 号钢强度较高,用于制作承受载荷较大的小截面调质件,选为转向块和圆柱销的材料。

经后处理分析,可知受力危险区域基本位于孔道边缘、过渡斜面及薄壁尖端。其中,反力架和楔形夹片的个别危险点已经超过材料的屈服强度,但危险点进入塑性后产生变形,应力变化平稳,远低于材料破坏强度;经实践证明,各零部件在预加力下的变形值极小,不影响锚具正常使用。根据应力状态的不同并综合考

考虑经济效益,按照现行碳素钢规范和合金钢规范选择

材料试制成型(图 4)。

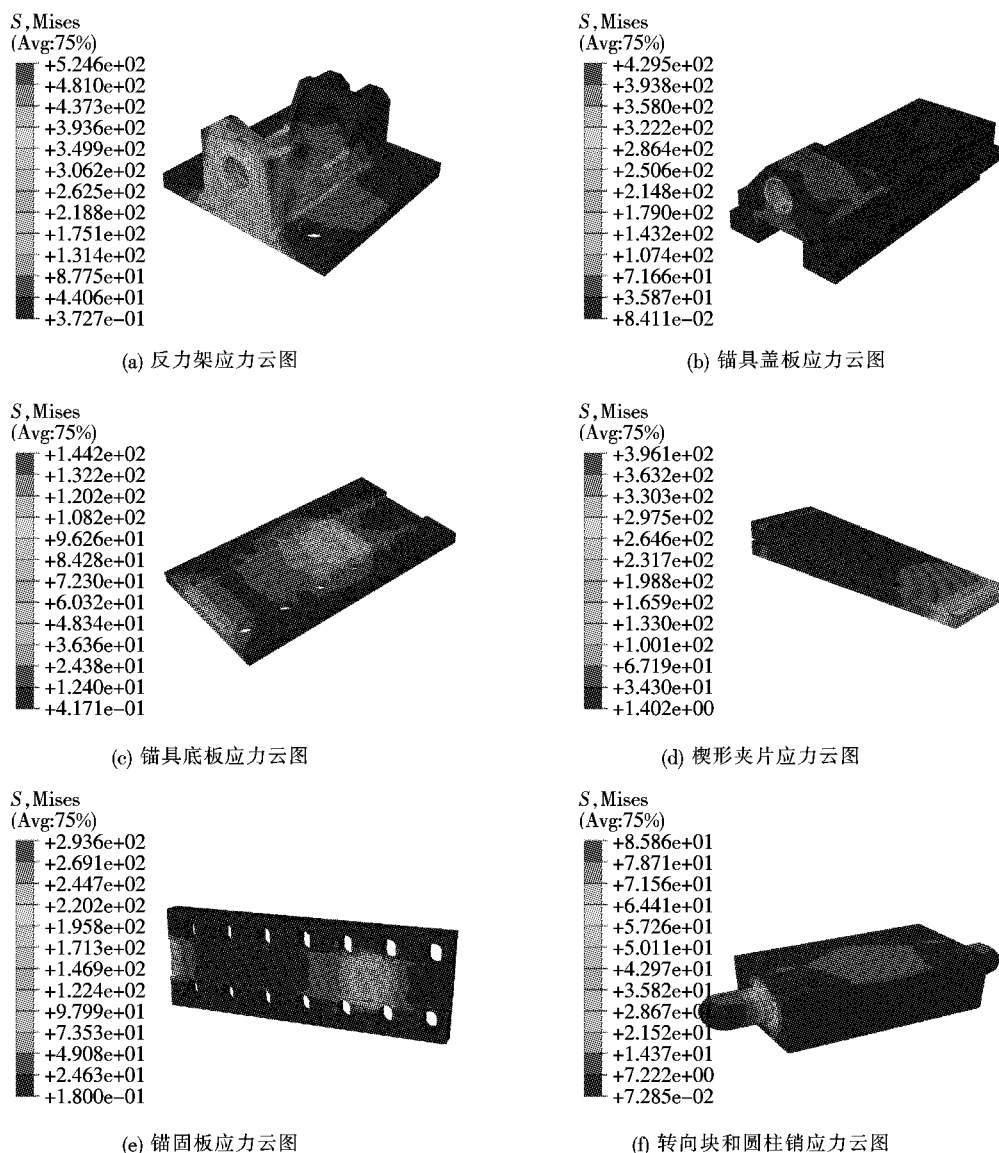


图 3 锚具各零部件有限元分析结果(单位:MPa)

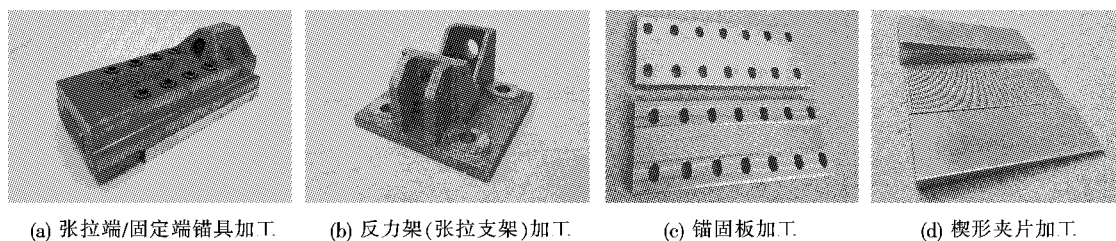


图 4 装配式预应力碳纤维板锚固体系各零部件加工

### 3 施工工艺流程及技术要点

#### 3.1 施工工艺流程

在锚具的设计和调试过程中,一方面为了检验上

述新型锚固体系的安全性和实用性;另一方面为了探索和总结该套装置的施工技术,笔者进行了一批受损钢—混凝土组合梁试件的室内加固试验,加固效果良好。加固使用的 CFRP 板为深圳市威士邦公司生产的 WSB—TB 双向碳纤维复合板,配套胶黏剂为 WSB

—QT碳纤维复合板材胶。施工过程分为“安装—张拉—锚固”3个阶段,具体工艺流程如下:①将碳纤维板两端用砂布打磨,楔形夹片内表面涂胶,外表面涂蜡油;②利用水平反力架,将碳纤维板的两端压入锚具内部;③在被加固构件表面划线定位、钻孔,并清除孔内粉尘;④植入螺纹钢筋,固化期内不得扰动,待2d后受荷;⑤将混凝土表面和碳纤维板的接触区域分别打磨粗糙,清除灰尘和油污;⑥调配、拌匀碳板胶,涂覆在反力架、碳纤维板和锚固板的底面;⑦安装张拉组件、张拉端锚具、固定端锚具、碳纤维板和锚固板;⑧旋紧锁紧螺母Ⅰ,放松锁紧螺母Ⅱ,张拉千斤顶至目标预应力;⑨旋紧锁紧螺母Ⅱ,卸载千斤顶,放松锁紧螺母Ⅰ,拆除张拉组件;⑩待7d后将碳纤维板沿锚固板外侧裁断,拆除张拉端锚具和固定端锚具。

而在室外加固工程中,为避免锚具发生锈蚀和CFRP板受紫外线侵蚀,在张拉检验合格后应使用黏结性、防腐性和耐久性好的环氧树脂砂浆对锚具及CFRP板表面进行封闭防护。

### 3.2 施工技术要点

预应力CFRP板加固技术对操作水平的要求较高,在安装、张拉和锚固过程中,常见的问题包括安装不当造成装置预应力损失过大,锚具中心线偏差造成碳纤维板张拉时发生扭曲或破裂,涂胶时黏结层出现空洞不饱满导致结合面滑移,锚固区混凝土发生拉拔破坏致使端部锚具脱落等。为避免出现上述现象,同时保证施工安全和操作流畅,针对加固各环节的关键技术要点总结如下:

(1)施工前仔细检查锚具及碳纤维板的外观质量和数量,确保满足安装要求。

(2)钻孔位置避开混凝土结构内部的钢筋,必要时借助钢筋探测仪放线钻孔。

(3)碳纤维板中线与梁平行并通长标记,严格控制两端锚具中心线同轴误差。

(4)对反力架区域混凝土进行切槽处理和涂胶找平,保证牵引螺杆水平传力。

(5)清理植筋孔内灰尘碎渣,再用压缩空气吹出浮尘,最后用丙酮清洁孔壁。

(6)分段刮抹碳板胶,使黏结面均匀密实,避免出现空洞、扭曲或起伏现象。

(7)张拉碳纤维板时应分级、平稳、缓慢加压,严禁快速冲、放千斤顶行程。

(8)操作过程中若植筋胶或碳板胶不慎沾到皮肤,先用酒精擦拭后清水冲洗。

## 4 结语

该文提出的装配式预应力碳纤维板锚固体系,强度和变形满足要求,施工工艺简单可靠,可在工程实践中推广应用。该锚固体系的优势包括:①作用原理清晰,传力明确,能够提供强大的预加力和可靠锚固;②整套装置为装配式结构,重复利用率高,工程应用价值大;③锚具尺寸和张拉空间小,对桥下净空影响甚微。

预应力碳纤维板的加固效果极大程度上取决于施工工艺是否科学合理以及现场操作水平的优劣。碳纤维复合材料引入中国交通建筑行业经历过初期的热潮、反思,以及向欧美日学习的阶段,目前正处于迈向规范化、标准化、成熟化的阶段,最终目标是实现其生产、研发、施工的全面国产化,使中国的碳纤维技术达到世界先进水平。

随着JTG/T J22—2008《公路桥梁加固设计规范》的新一轮修编,预应力碳纤维加固技术正受到管养领域越来越多的重视。虽然中国经历10余年的不懈努力,已基本掌握预应力CFRP加固的基础技术,也取得了一些桥梁加固经验,但其锚固关键技术的研究、张拉装置的开发运用、施工过程中的工艺技巧及质量保障还有待创新和加强。

### 参考文献:

- [1] 张树仁.桥梁病害诊断与加固设计[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [2] Meier U. Strengthening of Structures Using Carbon Fibre/Epoxy Composites[J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(6): 341—351.
- [3] 吴刚,安琳,吕志涛.碳纤维布用于钢筋混凝土梁抗弯加固的试验研究[J].建筑结构,2000(7).
- [4] Garden H N, Hollaway L C. An Experimental Study of the Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Composite Plates [J]. Composites Part B: Engineering, 1998, 29(4): 411—424.
- [5] 尚守平,彭晖,童桦,等.预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J].建筑结构学报,2003(5).
- [6] Basler M, Clárin R, Limin W. Bridge Strengthening with Prestressed CFRP Plate Systems[J]. IABSE Symposium Report, International Association for Bridge and Structural Engineering, 2004, 88(2): 7—12.
- [7] 邓朗妮,张鹏,燕柳斌,等.预应力碳纤维板加固钢筋混凝土梁施工工艺及试验研究[J].混凝土,2009(8).

# 桥梁健康监测数据的结构化存储与分析

曹素功<sup>1,2</sup>, 黄立浦<sup>2</sup>, 张勇<sup>1</sup>, 田浩<sup>1</sup>, 胡皓<sup>1</sup>

(1.浙江省交通运输科学研究院, 浙江 杭州 311305; 2.长沙学院 土木工程学院)

**摘要:**大跨桥梁一般都安装有规模不等的结构监测系统,对桥梁的环境荷载、运营荷载、桥梁特征和桥梁响应等参数进行实时监测。因各系统的开发者和监测内容各不相同,导致积累的海量原始数据结构定义各异,开发利用较困难,形成了信息孤岛。该文以9座大桥健康监测系统为例,对桥梁健康监测数据进行调研、梳理和分析,给出长大桥梁结构监测数据的格式规范,提出自动初步处理与人工专业分析的两步数据处理方法。研究表明:针对海量原始监测数据提出的规范化命名、结构化存储方法行之有效,可为桥梁健康监测系统的开发应用、数据结构定义、接口交互和采集提供规范参照;经过该文提出的数据处理方法处理后的数据与原始数据相比,其容量大幅减少,可保证处理后的数据量不超过原始数据量的5%,可为长大桥梁数据分析和挖掘利用工作奠定基础。

**关键词:**桥梁工程;健康监测;数据存储;数据分析;结构化数据

## 1 前言

桥梁是交通运输大动脉的重要组成部分,在国家经济建设与社会发展中有着极为重要的地位。作为一种跨越江海河谷的架空构造建筑结构,桥梁一旦出现垮塌等安全事故,将造成难以估量的生命及财产损失,产生极为恶劣的社会影响。据2018年交通运输行业发展统计公报,2018年末中国公路桥梁85.15万座,比上年增加1.90万座,其中特大桥梁5 053座,大桥98 869座,建设水准亦达到了世界级水平。庞大的桥梁基数,意味着艰巨的养护任务。近年来,中国很多长大桥梁实施应用了桥梁结构健康监测系统,在桥梁结构的关键部位部署相应的传感器监测节点,对桥梁的环境荷载、运营荷载、桥梁特征和桥梁响应等参数进行

实时监测。同时,利用各种数据分析方法,对监测数据进行智能处理,从而有效地评估桥梁结构的健康状况。

近年来对结构监测系统数据的处理与分析也开展了不少探索性的理论研究工作,主要可分为两个方面:基于确定性分析和基于概率分析。Seo等重点介绍了如何通过结构监测系统数据所获得的荷载和结构响应信息修正理论有限元模型;Kwon和Frangopol利用监测数据(即钢箱梁应变)进行钢桥屈服强度和疲劳强度可靠度分析,其中针对的研究对象是单个构件的可靠度,而不是整体结构;葡萄牙学者Costa和Figueiras研究了如何利用应变传感器系统对服役期较长的铁路钢桥进行性能评估;德国学者Hosser等研究并给出了如何利用结构监测数据对结构进行基于可靠度的结构体系评估方法的整体框架;徐幼麟利用香港青马大桥监测系统所获海量数据开展了全方位的大跨度桥梁结

- \*\*\*\*\*
- [8] 宋世刚.桥梁预应力碳纤维加固施工技术要点[C].中国公路学会养护与管理分会第七届学术年会论文集,2017.
- [9] 庞忠华,陆绍辉.OVM 预应力碳纤维板锚具及其静载试验研究[J].预应力技术,2015(4).
- [10] 卓静,李唐宁.FRP 片材波形齿夹具锚的原理[J].土木工程学报,2005(10).

- [11] 许尚贤.机械设计中的有限元法[M].北京:高等教育出版社,1992.
- [12] GBT 700—2006 碳素结构钢[S].
- [13] GB/T 3077—2015 合金结构钢[S].
- [14] 黄侨,万世成,侯旭.桥梁预应力碳纤维板加固中的参数取值及损失计算方法研究[J].公路交通科技,2016(9).

收稿日期:2018-07-30

基金项目:浙江省科学技术厅项目(编号:2017F30049,LGF18E080002);长沙市科技局指导性科技计划项目(编号:ZD1601023);浙江省交通运输厅科技项目(编号:2016009,2017016);浙江省自然科学基金资助项目(编号:LQY18E080002)

作者简介:曹素功,男,硕士,工程师.E-mail:caosg@zjtkyy.com