

附件 5

湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划 项 目 申 报 表

项目名称: CFRP 板胶接加固钢结构长期蠕变性能试验研究				
学校名称	长沙理工大学			
学生姓名	学 号	专 业	性 别	入 学 年 份
桂羽彤	201608020903	土木工程	女	2016
金呈颢	201608020412	土木工程	男	2016
刘高成	201608020940	土木工程	男	2016
王 谐	201608021102	土木工程	女	2016
周 昊	201608021120	土木工程	男	2016
指导教师	曹水东 李传习	职称	实验师 教 授	
项目所属 一级学科	土木工程	项目科类(理科/文科)	理科	
<p>学生曾经参与科研的情况</p> <p>桂羽彤, 长沙理工大学土木工程学院土木工程专业 16 级学生, 学习成绩专业排名第七, 曾参加过李传习教授团队的国家自然科学基金项目试验项目。大一期间参与了长沙理工大学学生科技立项项目“斜拉荷载作用下扩底桩的工程性状”, 参与长沙理工大学结构模型竞赛获三等奖, 获得过长沙理工大学材料与地质知识竞赛三等奖。</p> <p>金呈颢, 长沙理工大学土木工程学院土木工程专业 16 级学生, 学习成绩优异。曾参与长沙理工大学学生科技立项项目, 参与长沙理工大学结构模型竞赛、第八届地质与材料竞赛、CAD 制图大赛。</p> <p>刘高成, 长沙理工大学土木工程学院土木工程专业 16 级学生, 学习成绩位于专业前百分之十。大一期间参加长沙理工大学结构模型竞赛获三等奖, 参加过数学建模大赛、CAD 制图大赛并取得了优异成绩。</p> <p>王谐, 长沙理工大学土木工程学院土木工程专业 16 级学生, 学习成绩优异。大一期间参与了第十届读图制图大赛并获得一等奖、第八届地质与材料竞赛三等奖, 曾参与李传习教授科研项目试验。</p>				

周昊，长沙理工大学土木工程学院土木工程专业 16 级学生，担任过班长，曾于高中参与研究性学习课题《学校饮用水亚硝酸盐含量测量》获得省级一等奖，思维活跃，实践能力强。

指导教师承担科研课题情况

- 1、曹水东老师：研究领域为结构损伤识别与修复，大跨度桥梁施工控制理论。
- 2、曹水东. 桥梁结构损伤识别研究[D]. 长沙理工大学, 2006.
- 3、曹水东, 李传习, 徐飞鸿,等. 基于结构柔度矩阵损伤识别的柔度曲率比法[J]. 电力科学与技术学报, 2006, 21(1):85-88.
李传习, 陈卓异,曹水东, 周爱国等. 钢箱梁横隔板疲劳裂纹特征与实桥试验的轮载应力[J]. 土木工程学报, 2017(8):59-67.
- 4、港珠澳大桥 CB04 标世界第一吊吊具荷载试验现场技术负责人。
- 5、钢箱梁横隔板母材开裂机理及对策研究（51308070）国家自然科学基金项目，2016 年，曹水东，排名第 10；
- 6、空间主缆自锚式悬索桥成桥状态确定及其科学实现的理论与方法（51378080），国家自然科学基金项目，2013 年，曹水东，排名第 6；
- 7、空间主缆悬索桥自适应的构形与效应协调控制的理论与方法（51078041），国家自然科学基金项目，2010 年，曹水东，排名第 9；
- 8、复杂悬索桥多重非线性高效精细计算理论与方法(50778024)，国家自然科学基金项目，2008 年，曹水东，排名第 8；
- 9、空间主缆力学特性及其悬索桥自适应构形控制理论，教育部博士点基金项目，2011 年，曹水东，排名第 9；
- 10、多座特大跨桥梁建设项的施工控制现场测试组负责人，2001~至今；

李传习教授：

- 1、钢箱梁横隔板母材开裂机理及对策研究（51308070）国家自然科学基金项目，2016 年，李传习，排名第 1；
- 2、空间主缆自锚式悬索桥成桥状态确定及其科学实现的理论与方法（51378080），国家自然科学基金项目，2013 年，李传习，排名第 1；
- 3、空间主缆悬索桥自适应的构形与效应协调控制的理论与方法（51078041），国家自然科学基金项目，2010 年，李传习，排名第 1；
- 4、特大跨桥梁安全性设计与评定的基础理论研究（2015CB057700），国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目，2015 年，李传习，项目主要成员；
- 5、复杂悬索桥多重非线性高效精细计算理论与方法(50778024)，国家自然科学基金项目，2008 年，李传习，排名第 1；
- 6、空间主缆力学特性及其悬索桥自适应构形控制理论，教育部博士点基金项目，2011 年，李传习，排名第 1；
- 7、特大型桥梁风、雨作用监测与模拟技术研究（重大科技专项子项），西部交通建设科技项目，2011 年，李传习，排名第 3。
- 8、多座特大跨桥梁建设项的施工控制研究负责人，2001~至今。
- 9、港珠澳大桥 CB04 标世界第一吊吊具研究与复核计算负责人，2013~至今

项目研究和实验的目的、内容和要解决的主要问题

1、研究和试验的背景

我国现已建成钢结构桥梁百余座，钢结构工业与民用建筑建设也方兴未艾，而疲劳开裂是钢结构的突出问题[1-3]。一旦产生裂纹，如不及时处置将迅速扩展，影响结构的使用安全。相对于传统加固方式，粘结 CFRP 加固对母材无损伤且具有轻质、高强、高弹模、抗疲劳、耐久性好等特性。对其加固机理进行研究具有现实意义。

而采用 CFRP 胶结加固钢结构，其中 CFRP 与钢材之间的粘结界面为该复合构件的薄弱环节^[4]。粘接材料的力学性能对粘结性能影响显著，已有国外学者对部分加固用结构胶粘剂的长期力学性能进行研究，结果表明在长期荷载作用下，环氧胶粘剂会产生蠕变^[5]（部分文献中作“徐变”，方便行文统一为蠕变，下同）。而随着时间的推移，此行为可能会影响加固系统粘接键合，造成其产生变形和应力重分配，影响加固效果。

本课题拟对钢结构加固用胶粘剂的蠕变性能及 CFRP 与钢材之间的粘结界面长期蠕变性能进行初步的试验研究与分析，相应的研究成果可为类似工程的设计与施工提供一定参考，本课题开展的研究工作具有一定的工程意义与学术价值。



图 1 国外采用 CFRP 加固钢混叠合梁结构施工图

2、研究和试验的目的

本课题拟通过考虑不同胶粘剂类型、持荷时间、加荷幅值、初始应变等因素对加固构件蠕变性能的影响试验测试，开展钢结构加固胶粘剂本体长期蠕变力学性能及 CFRP 片材与钢板粘结复合构件的蠕变性能研究，揭示其蠕变性能及机理，定性分析该种复合构件蠕变特性对加固效果的影响。预期研究成果将为 CFRP 加固钢结构设计与施工提供一定参考，具有一定的学术价值与工程意义；且有利于我们科研兴趣的激发和科研基本技能的提升。

3、试验实施的内容

(1) . **胶粘剂基本力学性能测定**。根据 ASTM D638-10 制作狗骨棒试件，通过标准静力拉伸试验测定不同类型胶粘剂（如延性胶 A 与脆性胶 L）的拉伸强度，弹性模量，泊松比，剪切模量等力学参数及应力-应变曲线。

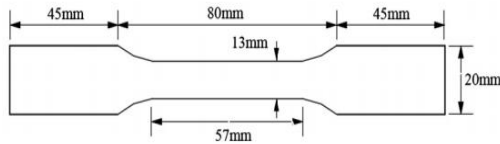


图 2 胶粘剂铸模

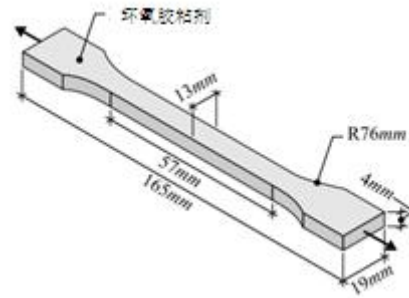
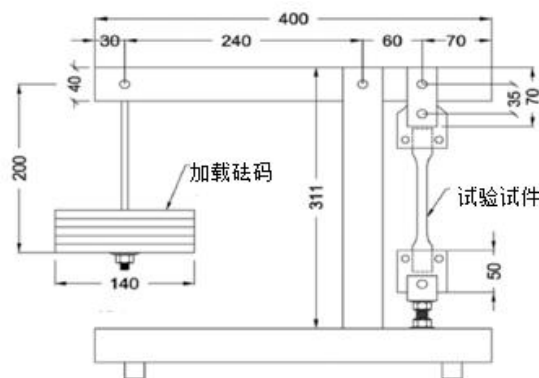


图 3 胶粘剂试件

(2). 胶粘剂蠕变性能测定。设计制作加载装置，通过长期荷载拉伸试验测定不同荷载条件下（静力极限荷载 20%、35%、50%等）胶粘剂在不同加载时限内的蠕变应变。



图中尺寸单位：mm

图 4 胶粘剂蠕变测试装置示意图

(3). CFRP 板/钢复合构件界面长期蠕变性能测试。制作如图 5 所示的双剪试件，通过固定千分表测量 CFRP 板表面与钢板相对滑移，采用应变片测量 CFRP 表面的应力分布或采用数字相关技术（DIC）获得板表面连续应变场，研究不同胶粘剂类型、持荷时间、加荷幅值、初始应变等因素对该复合构件界面蠕变力学性能的影响。

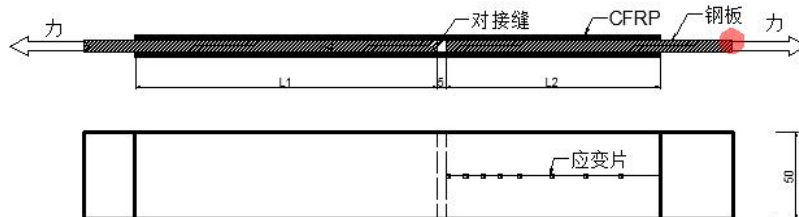


图 5 CFRP 板/钢复合双剪构件示意图

4、试验解决的主要问题

- (1) 得到不同类型胶粘剂力学性能，优选出满足钢（钢混）结构加固服役条件的胶粘剂；
- (2) 了解所研究的胶粘剂本体蠕变性能，为加固设计及仿真计算提供更完善的一手试验资料。
- (3) 力求通过蠕变对 CFRP 板/钢复合构件界面长期力学性能影响的试验研究，揭示其对钢桥加固效果的影响，为 CFRP 加固钢结构设计与施工提供参考。

国内外研究现状和发展动态

目前碳纤维增强复合材料（CFRP）修复混凝土结构技术已经成熟并广泛运用于混凝土梁、板、柱等工程修复中。而在航天领域如粘结修补飞机、航空器部件的铅金属薄板缺陷的成功运用，为其向钢结构工程领域的移植和拓展提供了技术基础和借鉴。因此，近年来国内外部分学者逐渐开始分别采用室内试验、数值模拟，理论推导等方法对 CFRP 加固钢结构的性能进行了一系列的研究，现对目前相关的研究工作进行简要的介绍：

胶粘剂力学性能方面：Makoto Imanaka 等^[6]对两种环氧类及丙烯酸胶粘剂本体力学性能及粘接性能进行了研究，结果表明，环氧胶粘剂用于粘接加固效果明显优于丙烯酸，因此，结构胶研究与应用主要集中在环氧组分粘剂。而 Feng CW. 试验证明环氧胶粘剂具有蠕变特性且与应力有关的^[4]：在线性粘弹性区域中，蠕变应变是应力的线性函数，随着压力水平的增加，行为通常会偏离到非线性。在此基础上，Silva P, Valente T 等学者^[7]对某低养护龄期胶粘剂长期性能开展蠕变试验研究，在一定拉应力水平下，环氧胶粘剂将表现出线性粘弹性，两不同等级应力水平下（30%和 40%的极限应力）在持续 80 天的荷载后，与最初的应变相比初始状态均增加了 140%，较标准养护条件下蠕变量显著增大，证实了胶粘剂养护龄期对蠕变影响显著。但是，以上研究所针对胶粘剂主要为加固混凝土所用，对于钢结构加固用胶粘剂蠕变性能国内外鲜有文献报道。而**我校李传习教授团队（本试验指导老师为团队成员）已在试验的基础上优选出了适合钢结构加固用胶粘剂^[8]**，故继续深入对适用胶粘剂蠕变性能的研究，对揭示钢结构加固机理有一定推动作用。

CFRP 材料蠕变方面：由于碳纤维增强材料由树脂基体及增强相碳纤维所组成，树脂属高分子材料，在持荷状态下，其大分子链会发生结构改变导致宏观材料变形^[9]。Malvar^[10]指出对于各种应力水平，徐变断裂强度与荷载持续时间的对数成线性关系，并指出在相当于 50 年的持续时间下，GFRP、AFRP、CFRP 的最终断裂强度只能推断为初始强度的 30%、47%、91%。国内大连理工大学任慧韬^[11]通过对 CFRP 采用 40%和 60%（超过 CFRP 蠕变断裂的最大应力）的极限应力水平进行持续荷载试验，发现应力幅为 40%的蠕变值与初始应变的比值大于应力幅

为 60%的比值;且卸载后会发生不可恢复的残余变形。在经过蠕变试验后,碳纤维片材的抗拉强度明显下降,最大降幅达到一半以上,并且有蠕变系数越大,抗拉强度降幅越大的趋势。

CFRP 板/钢复合构件界面性能方面: ZhaoXiaoLing^[12, 13]对 CFRP 加固钢结构界面破坏模式做了以下六种分类: a 型, CFRP/胶层界面破坏; b 型, 钢/胶层界面破坏; c 型, 胶层内聚破坏; d 型, CFRP 板层离; e 型, CFRP 板断裂; f 型, 钢板屈服(后三种通常较小出现)及混合破坏。并且对粘结剂类型、CFRP 材料、钢材表面处理方式、环境温度、氯盐侵蚀、冲击等对其破坏形式、机制与极限承载力的影响进行了综述。国内滕锦光院士团队^[14, 15]研究了三种非线性粘结剂(即材料本构呈非线性)时 CFRP/钢单搭接界面的粘结性能,发现采用不同粘结剂时粘结滑移曲线形态相似,但界面破坏形式不同,界面峰值剪应力和局部滑移也相差较大;Wu C, Zhao X 等^[16]UHM-CFRP 板/钢双剪疲劳试验表明疲劳寿命和加载荷载比存在线性对数关系。而疲劳加载后没有破坏的试件则对其进行了静载试验,并和控制试件进行对比,发现疲劳加载并没有改变 CFRP-钢双剪试件的破坏模式及剩余粘结强度。我团队通过单搭接接头的拉伸剪切试验,测试了四种粘结剂与两种 CFRP 材料,CFRP 板表面应变分布,得到了 CFRP/钢界面粘结滑移本构,讨论了 CFRP 板/钢界面抗剪极限承载力计算方法且基于粘聚力单元对 CFRP/钢界面粘结力学行为进行了数值模拟。对于 CFRP/钢界面长期蠕变性能,已知文献中仅有国内卢奕焱教授团队对 CFRP 布材做过一些有益探讨^[17, 18],而对于加固性能更优的 CFRP 板材尚缺少相关研究。故在我团队已有研究基础上,继续对 CFRP 板/钢界面蠕变性能进行研究,具有一定的科研价值及工程意义。

由上可知,国内外学者对 CFRP 胶接加固钢结构进行了较多的研究,但还存在以下几个问题:①还没有对适用于钢结构加固用胶粘剂材料长期蠕变力学性能开展过相应的研究。②目前用于疲劳加固的 CFRP 板材与钢之间界面长期蠕变力学性能及其机理尚缺乏基于试验研究的相关结论。因此,就粘贴 CFRP 加固钢结构长期蠕变性能而言,对其组成材料及加固系统均少有研究成果可供工程应用参考。因此,有必要开展一些具有针对性的研究。

参 考 文 献

- [1] 李传习, 李游, 陈卓异, 等. 钢箱梁横隔板疲劳开裂原因及补强细节研究[J]. 中国公路学报, 2017,30(3):121-131.
- [2] 李传习, 陈卓异, 周爱国, 等. 钢箱梁横隔板疲劳裂纹特征与实桥试验的轮载应力[J]. 土木工程学报, 2017(8):59-67.
- [3] 曹水东, 李传习, 徐飞鸿, 等. 基于结构柔度矩阵损伤识别的柔度曲率比法[J]. 电力科学与技术学报, 2006,21(1):85-88.
- [4] 岳清瑞等. 碳纤维增强复合材料(CFRP)加固修复钢结构性能研究与工程应用[M]. 中国建筑工业出版社, 2009.
- [5] Feng, Chih-Wei. Prediction of long-term creep behavior of epoxy adhesives for structural applications[J]. 2005.
- [6] Imanaka M, Liu X, Kimoto M. Comparison of fracture behavior between acrylic and epoxy adhesives[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2017,75:31-39.
- [7] Silva P, Valente T, Azenha M, et al. Viscoelastic response of an epoxy adhesive for construction since its early ages: Experiments and modelling[J]. Composites Part B Engineering, 2017,116:266-277.
- [8] CFRP 板-钢界面粘结性能试验研究与数值模拟[J].
- [9] 李伟东, 张金栋, 刘刚, 等. 国产 T800 碳纤维/双马来酰亚胺复合材料的界面及力学性能[J]. 复合材料学报, 2016,33(7):1484-1491.
- [10] Majda P, Skrodzewicz J. A modified creep model of epoxy adhesive at ambient temperature[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009,29(4):396-404.
- [11] 任慧韬. 纤维增强复合材料加固混凝土结构基本力学性能和长期受力性能研究[D]. 大连理工大学, 2003.
- [12] Zhao X L, Zhang L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures[J]. Steel Construction, 2008,29(8):1808-1823.
- [13] Heshmati M, Haghani R, Al-Emrani M. Durability of bonded FRP-to-steel joints: Effects of moisture, de-icing salt solution, temperature and FRP type[J]. Composites Part B Engineering, 2017,119:153-167.
- [14] Xia S H, Teng J G. Behaviour of FRP-to-steel bonded joints[J]. 2005.
- [15] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP-混凝土界面粘结滑移本构模型[J]. 建筑结构学报, 2005,26(4):10-18.
- [16] Wu C, Zhao X, Duan W H, et al. Bond characteristics between ultra high modulus CFRP laminates and steel[J]. Thin-Walled Structures, 2012,51(2):147-157.
- [17] Lu Y Y, Zhang X P, Tang Z Y. Creep Properties of CFRP-Steel Composites Subjected to Tensile Loads[J]. Advanced Materials Research, 2011,163-167:3591-3595.
- [18] 卢亦焱, 张学朋, 唐志宇. 碳纤维布与钢板粘结复合材料徐变性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011,32(9):123-129.

本项目学生有关的研究积累和已取得的成绩

曹水东老师主讲《工程力学试验》课程中，除了教授课本基本试验内容，同时注重我们视野的扩展，经常会将其科研团队在该方面的研究试验最新进展穿插其中，大大激发了我们的试验兴趣。并在李传习教授所讲授的《高等桥梁理论》课程中，对钢箱梁存在病害及对策有较为全面的认识，激发了小组成员对胶粘加固钢结构产生了浓厚兴趣。项目组同学经常找老师或我们同学之间进行交流。

本课题成员主要为 2016 级土木工程大类的大二本科生，其中有两位同学分别承担过校级科研课题，且均已参与了指导老师所在科研团队前期一些相关的试验研究基础工作。

第 1 承担人桂羽彤大一期间参与了长沙理工大学学生科技立项项目“斜拉荷载作用下扩底桩的工程性状”，并参与了结构模型竞赛获三等奖；曾参与了李传习教授团队国家自然科学基金项目试验，培养了试验基本技能，学习成绩名列土木工程大类前茅，具备本课题研究所需的理论基础和试验基本技能。项目其他成员均成绩优异，且部分同学参与过指导老师科研团队的相关试验工作，对实验室条件熟悉，且参与科学研究的愿望强烈，均希望参与本课题，提高自己理论知识水平和增强试验技能水平，加深对 CFRP 加固钢结构的认识。

项目的创新点和特色

碳纤维增强复合材料（CFRP）修复钢结构的研究为近年来国内外结构加固领域内的热点，其中的 CFRP/钢界面力学性能方面研究成果陆续有相关文献报导，但均主要集中在其短期静力性能、考虑各种环境因素后性能及抗疲劳性能，对于长期荷载作用可能产生的蠕变效应研究尚不多。本项目的主要创新点有：

适用钢结构加固用的环氧胶粘剂具有蠕变特性，且随着持荷时间、荷载水平及服役环境变化，其特性表现较为复杂，而国内针对环氧胶粘剂长期蠕变性能的研究还未曾涉及，本项目首次拟开展适用于钢结构加固用胶粘剂材料本体长期蠕变力学性能研究。

国内仅有指导老师所属科研团队正在进行加固性能更优的 CFRP 板/钢界面性能的相关研究工作，本项目拟对其长期蠕变性能的研究是在团队研究基础上的深入。

项目的技术路线及预期成果

1、技术路线

本项目的技术路线如下：

① 项目实施前的调研：通过查阅和研究国内外文献资料及工程应用现状，了解和掌握已有的研究成果及应用现状，发现研究的不足和工程应用中需解决的问题，确定本项目的研究

方向和研究内容。

② 研究方案设计与实施：共分三个层次进行

- **胶粘剂材料优选的力学性能试验研究：**在调研的基础上，并结合指导老师研究团队的研究情况，初步确定待优选的胶粘剂材料范畴，对待优选胶粘剂进行静力拉伸强度、弹性模量、泊松比和剪切模量等力学参数及应力-应变曲线测定，结合桥梁钢结构加固特点，优选出胶粘剂材料；
- **胶粘剂本体材料的长期蠕变性能试验研究：**加工已选定胶粘剂本体材料试件，设计制作试验加载装置，通过长期荷载拉伸试验测定不同荷载条件下（静力极限荷载 20%、35%、50%等）胶粘剂本体材料在不同加载时限内的蠕变应变。
- **CFRP 板/钢复合构件界面长期蠕变性能试验研究：**考虑不同胶粘剂类型、持荷时间、加荷幅值、初始应变等因素的影响，通过 CFRP 板/钢双剪试件进行拉伸试验，采用千分表测量 CFRP 板表面与钢板的相对滑移，并采用电阻应变片或数字相关技术（DIC）测量 CFRP 表面的应力的方式获得板表面连续应力-应变场。

③ 研究结果整理与提炼：对本项目试验研究所获取的结果进行分析研究，初步揭示出胶粘剂材料本体和在 CFRP 板/钢加固应用工程应用中，长期蠕变的产生机理和性能特点，掌握长期荷载作用下可能产生的蠕变效应对加固效果的影响，使研究成果能用于指导工程实践应用。

本项目试验研究流程为：

项目实施前的调研→研究方案设计与实施→研究结果整理与提炼→项目结题。

2、预期成果

- (1) 依托本项目的研究结果，发表 EI 以上的研究论文 1~2 篇。
- (2) 申请专利 1-2 项
- (3) 通过胶粘剂本体和 CFRP 板/钢复合双剪试件的长期蠕变性能试验研究，了解长期蠕变特性及其对加固效果的影响，为 CFRP 片材加固钢（钢混）结构长期性能提供试验研究资料，用于指导工程实践。

3、试验费用预算

项目实施过程中的费用主要包括以下几个方面：

- 1) 科研业务费
 - ①测试分析费：3000 元
 - ②论文版面费：2000 元
- 2) 试验材料费
 - ①钢板：3000 元
 - ②CFRP 及胶粘剂：6000 元

- ③应变片、线缆：1000 元
 - ④百分表及应变仪借用：2000 元
 - 3) 资料、打印费
 - ①资料费：500 元
 - ②打印费：500 元
 - 4) 学生劳务：2000 元
- 共计：20000 元

年度目标和工作内容（分年度写）

2018 年 5 月~2019 年 4 月

①全面收集国内外关于胶粘 CFRP 加固钢结构方面的试验技术及理论成果，结合现有试验条件，制定本项目的研究计划方案。

②进行试件及试验加载装置初步设计，购置所需的材料，并对加载装置进行组装，测试各个功能的可用性。

③试件制作与养护。

2019 年 5 月~2020 年 4 月

①试验的正式实施。

②各测试元件的数据进行收集整理，分析得到试验结论。

③试验报告的编写及论文撰写。

指导教师意见

项目申请人桂羽彤等同学是我在《工程力学试验》课程教学中了解的学生，其理论功底扎实，试验能力强，且学习中表现出对 CFRP 胶粘加固钢结构产生浓厚的兴趣和创新意识；且于 2017 年以来参与了我团队试验基础工作，具有一定知识积累。他们在获知本人所在科研团队正在开展 CFRP 粘接加固钢结构相关研究工作后，于年底开始与本人交流探讨关于开展 CFRP 板胶接加固钢结构长期蠕变性能试验研究的初步构想，其小组成员共同努力，查阅了大量国内外文献，于第二年的 2 月底提出了初步试验方案，本人觉得方案经深化后可行，具有较大的学术价值与工程意义。

鉴于此，本人同意申报。

签字：

日期：

注：