

纤维增强复合材料（FRP）加固修复钢结构技术

杨勇新

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

国家工业建构筑物质量安全监督检验中心

2015年7月24日



主要内容

一、研究背景

二、技术特征

三、研究进展

四、前景展望

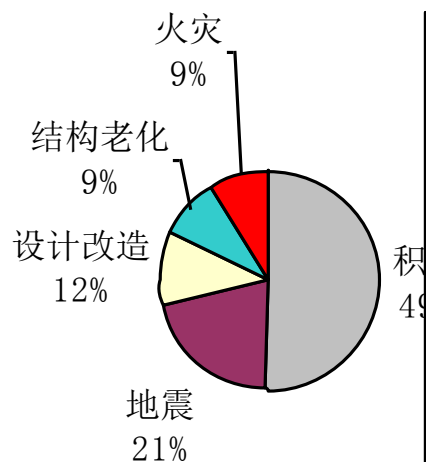


一、研究背景

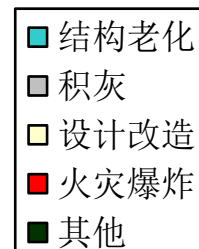
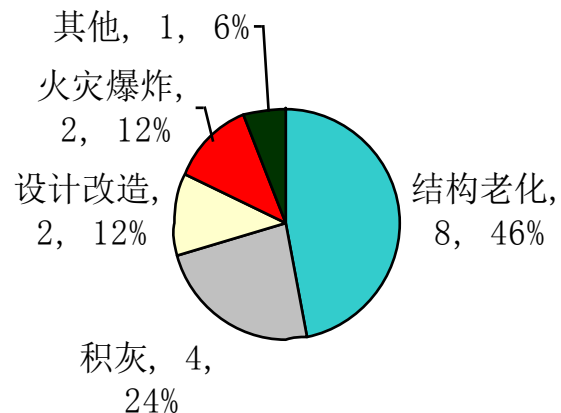
钢结构加固修复工程的需求巨大

设计不当，管理不善，事故频发

1958-1981钢铁厂倒塌统计



1990-2004钢铁厂倒塌统计



一、研究背景

钢结构加固修复工程的需求巨大

结构整体垮塌，构件损伤，焊缝开裂
挠度过大，稳定性不够



屋盖倒塌



杆件弯折



节点杆断裂、支座倾斜



构件损伤

一、背景情况

既有钢结构工程加固修复技术发展需求

《钢结构加固技术规范》CECS77: 96

- 1 总则
 - 2 术语、符号与代号
 - 3 加固基本原则及一般方法
 - 4 改变结构计算图形的加固
 - 5 加大构件截面的加固
 - 6 连接的加固与加固件的连接
 - 7 裂纹的修复与加固
 - 8 施工安全与工程验收
- 附录

钢结构加固的主要途径:

- ◆减轻荷载作用
- ◆改变结构计算图形
- ◆加大原结构构件截面和连接强度
- ◆阻止裂纹扩展等。

《钢结构加固技术规范》CECS77: 96

当有成熟经验时，亦可采用其它加固方法。



一、研究背景

既有钢结构工程加固修复技术发展需求

主要连接方式

- 焊接
- 螺栓连接
- 铆接

主要材料

- 钢材

新材料？
新连接方式？

缺点：增加重量、耐久性差、施工难度大



一、研究背景

既有钢结构工程加固修复技术发展趋势

材料：纤维增强复合材料

(**Fiber Reinforced Polymer/Plastic, FRP**)

可设计、高性能、高耐久性、.....

连接方式：粘贴 (**bond**)

无附加损伤、施工便捷、.....



一、研究背景

FRP加固混凝土结构技术成熟

FRP加固混凝土结构技术的经验值得学习、借鉴

◆产品形式多样，粘贴方式便捷

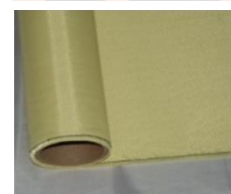
纤维布加固技术的特点：

- | | | |
|-------------------|---|-------------|
| ❖比强度比刚度高 | → | 不增加原结构自重和尺寸 |
| ❖可成形性 | → | 对复杂曲面结构有优势 |
| ❖不需钻孔 | → | 不破坏结构整体性 |
| ❖简便易行，成本低，效率高 | | |
| ❖施工过程无明火，安全可靠 ... | | |

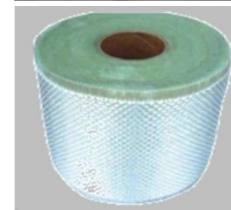
碳纤维



芳纶

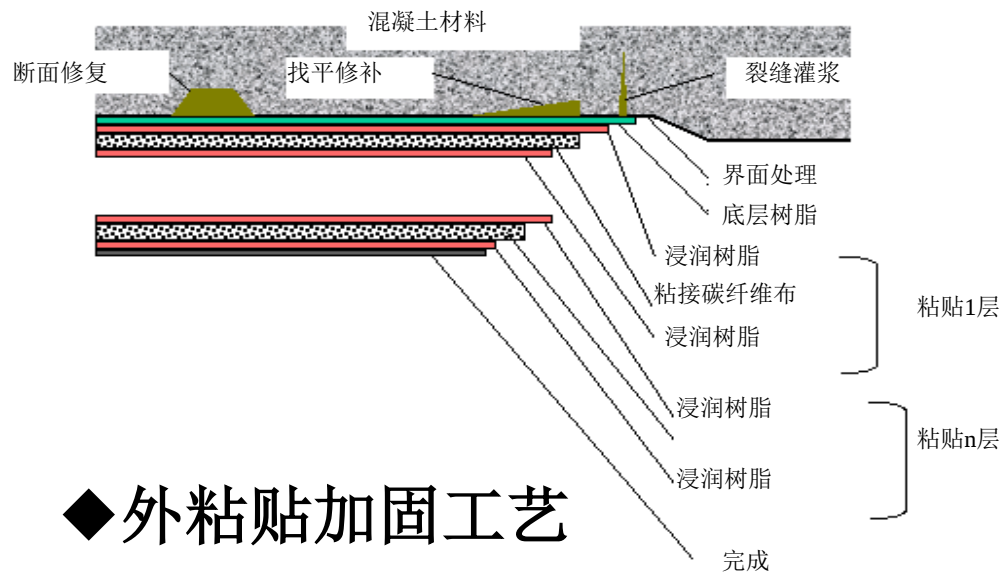


玻璃纤维



一、研究背景

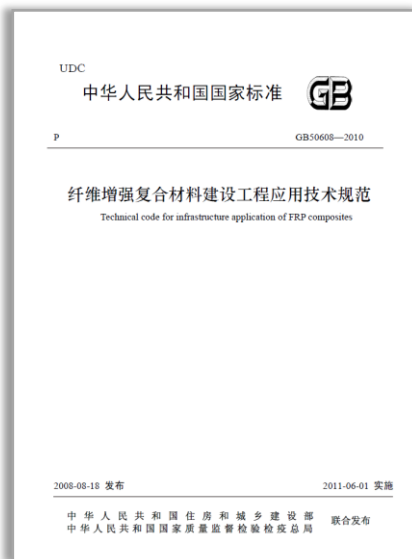
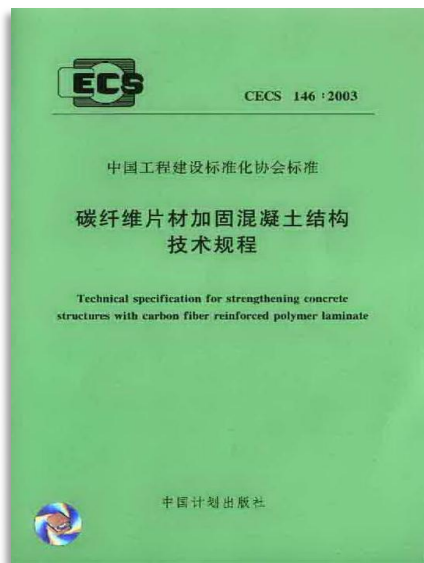
FRP加固混凝土结构技术成熟



一、研究背景

FRP加固混凝土结构技术成熟

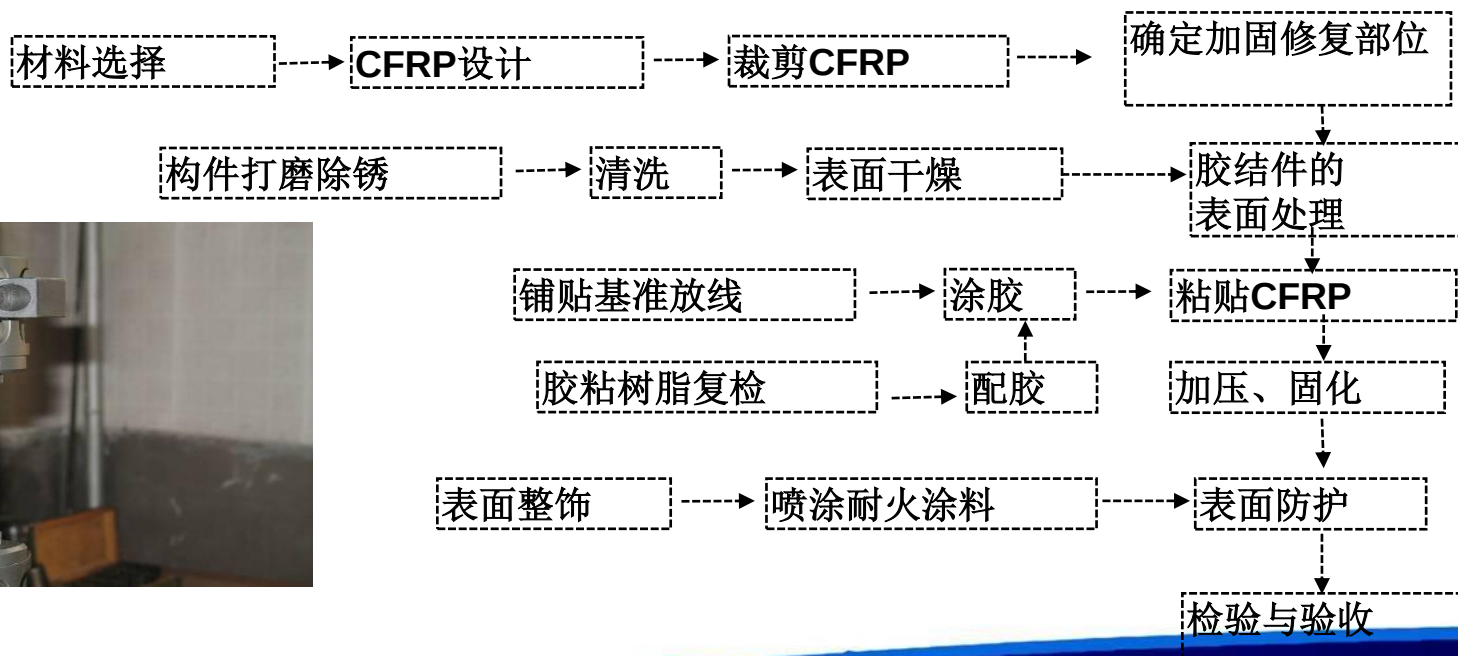
- ◆大量应用于工程实际，效果显著
- ◆标准规范已成体系



二、技术特征

◆材料特点

- ◆钢材的强度较高，各向同性，匀质材料
- ◆表面处理方式不同： 施工工艺有差异

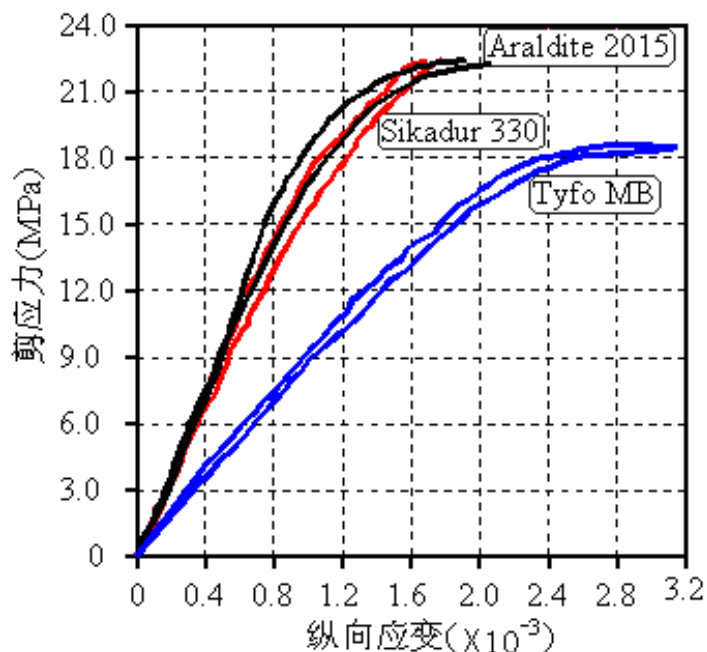


二、技术特征

◆界面特性不同

破坏面在胶层或粘结界面

- ◆粘结剂与钢材、纤维材料具有较高的适配性（抗剪强度）
- ◆界面处理要求较高
- ◆环境条件影响较大，与钢结构所处的环境相适应



二、技术特征

效率较高的加固修复方式

◆钢梁疲劳性能加固修复

降低应力集中、提高疲劳寿命、改善工作状态

适合于不同尺度

适合于工作制度升级

适合于恶劣环境（如：高温、粉尘、腐蚀）

适合于施工周期短

适合于提升疲劳性能等

◆金属管道（腐蚀）加固修复

提高耐腐蚀能力、提高承载能力、改善工作状态



三、研究进展

3.1 试验研究

3.2 工程示范

3.3 标准编制

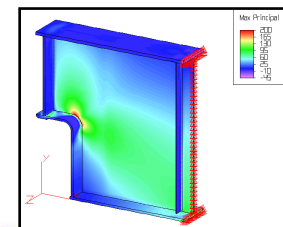


三、研究进展

3.1 试验研究

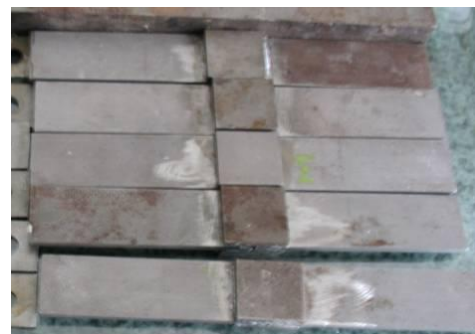
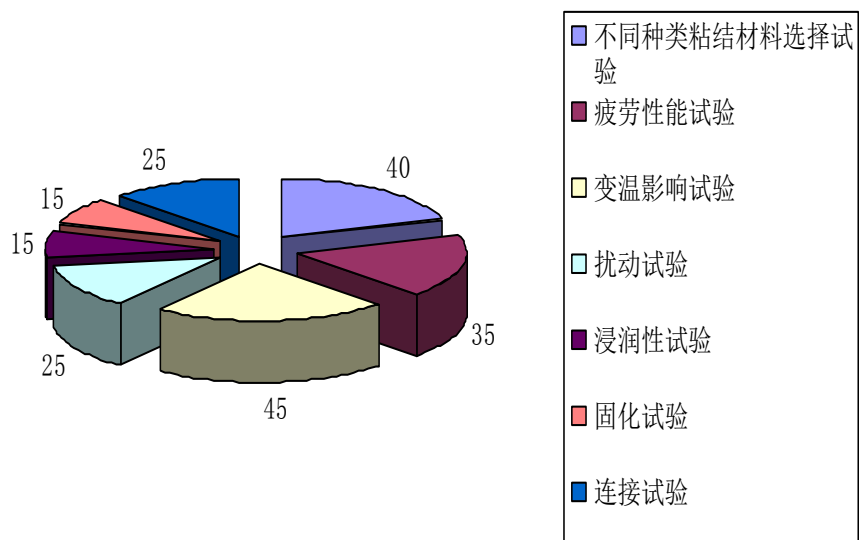
- ◆ 材料选择
- ◆ 工艺选择
- ◆ 模型试验
- ◆ 计算分析
- ◆

开发出适合于钢结构加固的材料、设计方法、施工方法等



三、研究进展

材料选择：不同种类粘结材料优选



三、研究进展

材料选择：不同种类粘结材料优选

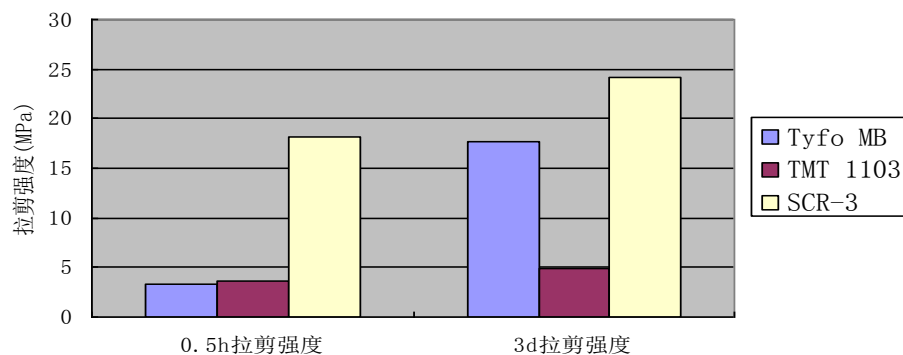
抗剪性能试验



单搭接拉剪试验



双搭接拉剪试验



三、研究进展

材料选择：不同种类粘结材料优选

本体性能试验



力学性能试验试件



拉剪试验试件



三、研究进展

材料选择：不同种类粘结材料优选

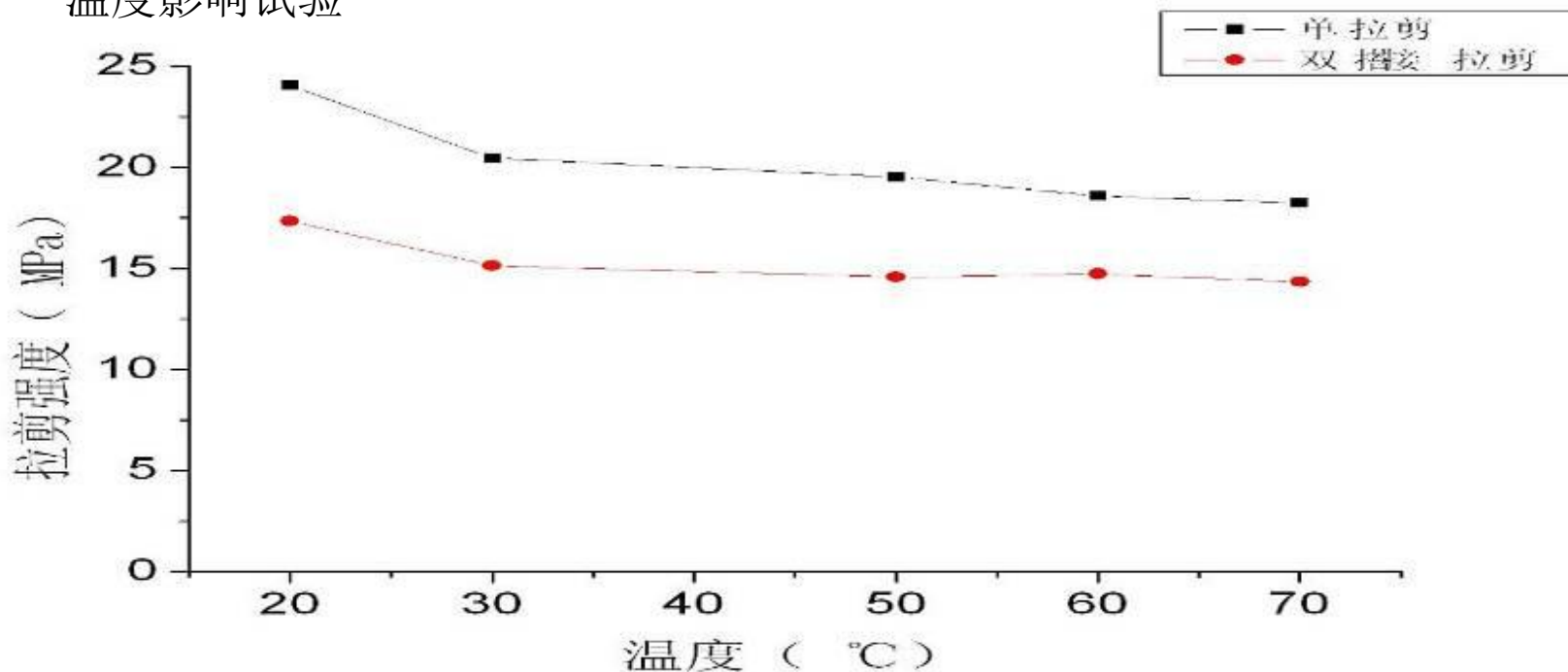
温度影响试验



三、研究进展

材料选择：不同种类粘结材料优选

温度影响试验



—◆— Tyfo-1 - SCR-3粘结剂拉剪强度与养护温度关系曲线

SCR-3



三、研究进展

材料选择：不同种类粘结材料优选

正拉粘结强度试验



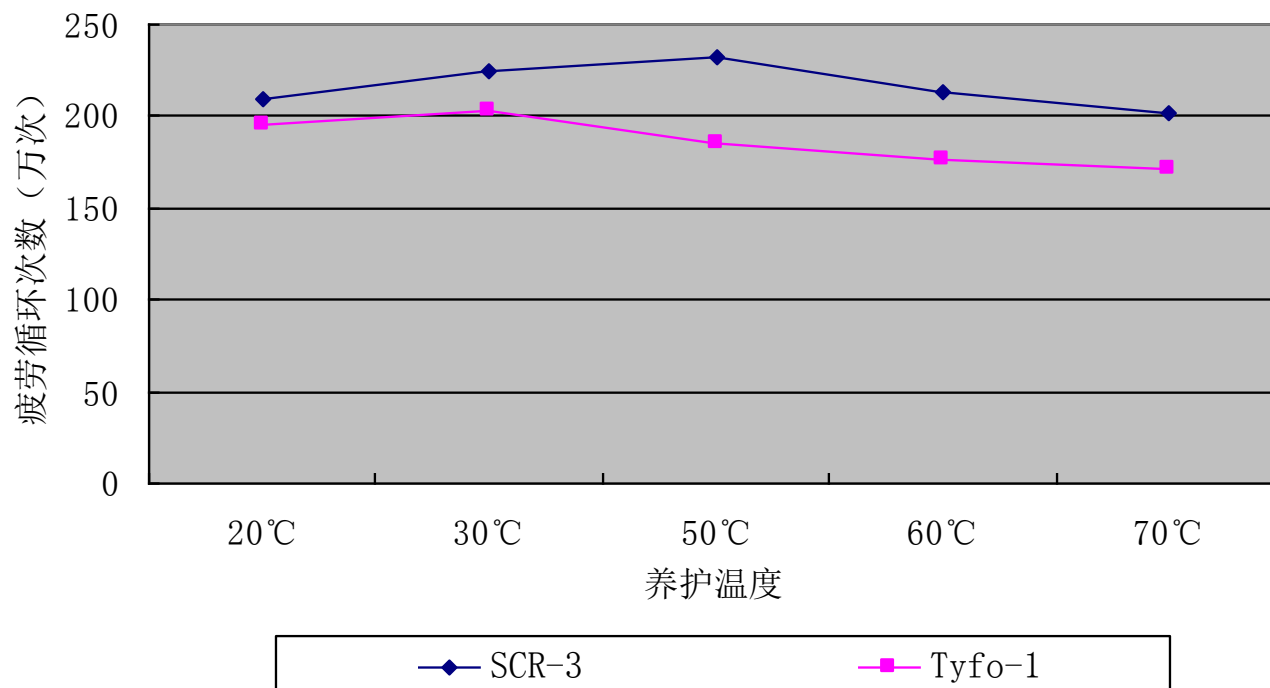
SCR-3粘结剂

不同工艺，不同温度，不同材料

三、研究进展

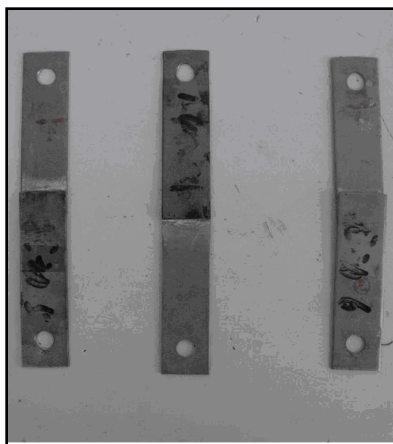
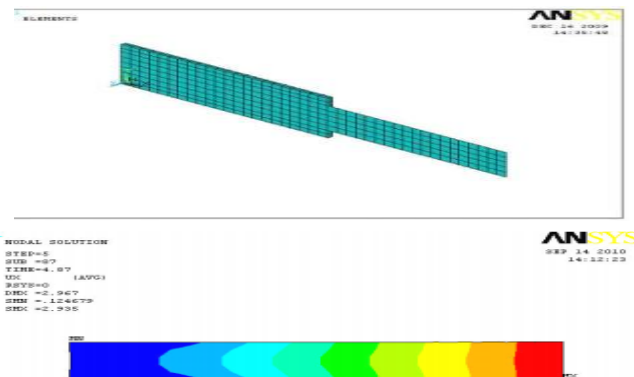
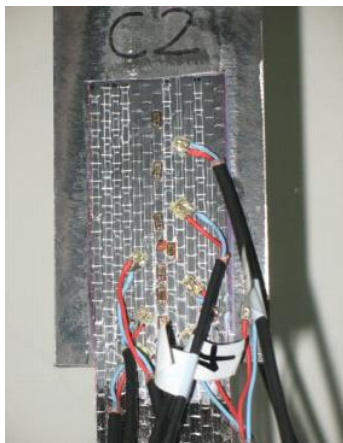
材料选择：不同种类粘结材料优选

疲劳性能试验



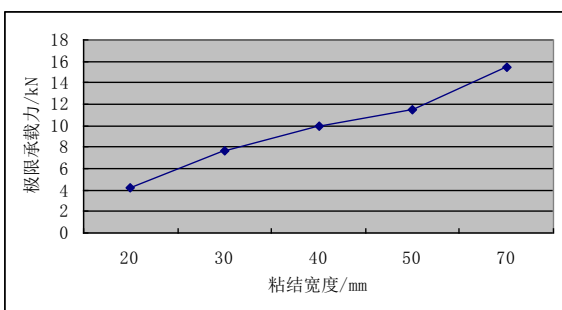
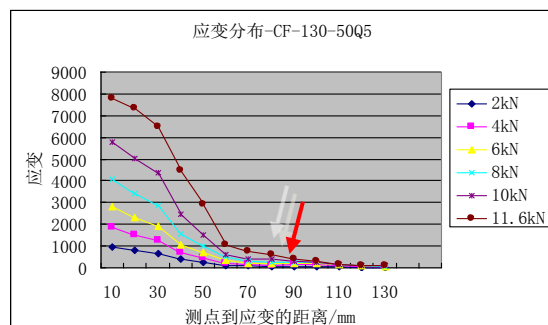
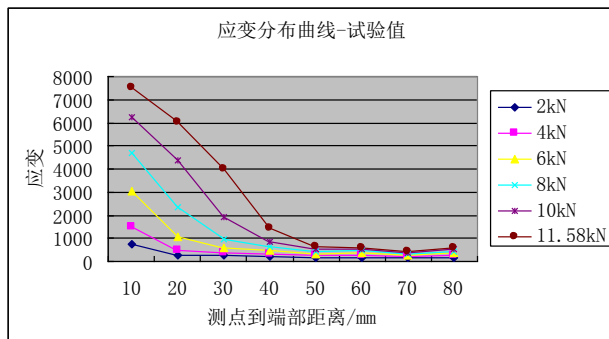
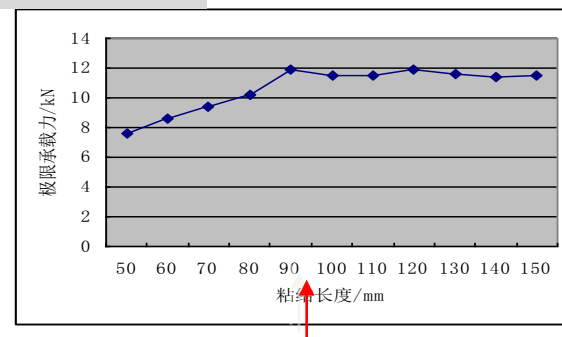
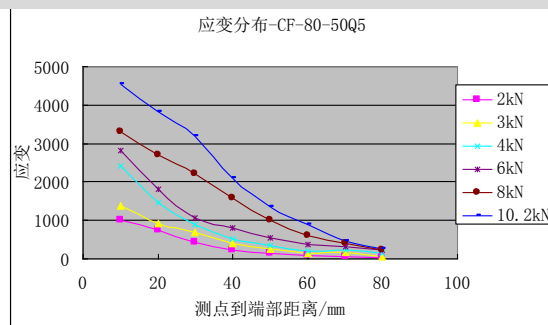
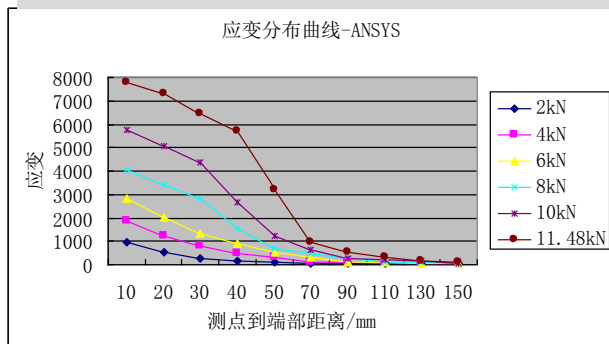
三、研究进展

材料选择：粘结性能测试分析



三、研究进展

材料选择：粘结性能测试分析



粘结应变分布结果比较

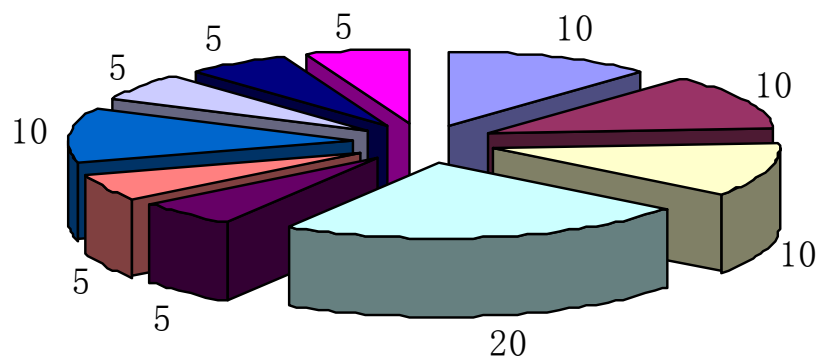
有效粘结长度确定

粘结承载力确定比较

确定了钢材与FRP粘结的本构关系与参数

三、研究进展

工艺选择

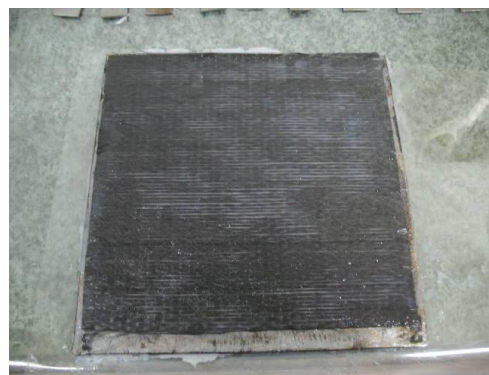
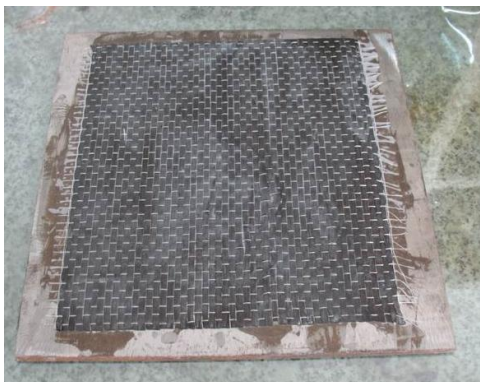


- | | |
|------------|---------------|
| 分段快速施工工艺试验 | 预定大面积快速施工工艺试验 |
| 表面浸润工艺试验 | 涂胶工艺试验及滚压工艺试验 |
| 粘贴后压力控制试验 | 固化时间控制试验 |
| 多层铺设工艺试验 | 多层搭接工艺试验 |
| 固化温度控制试验 | 表面防护工艺试验 |

三、研究进展

工艺选择

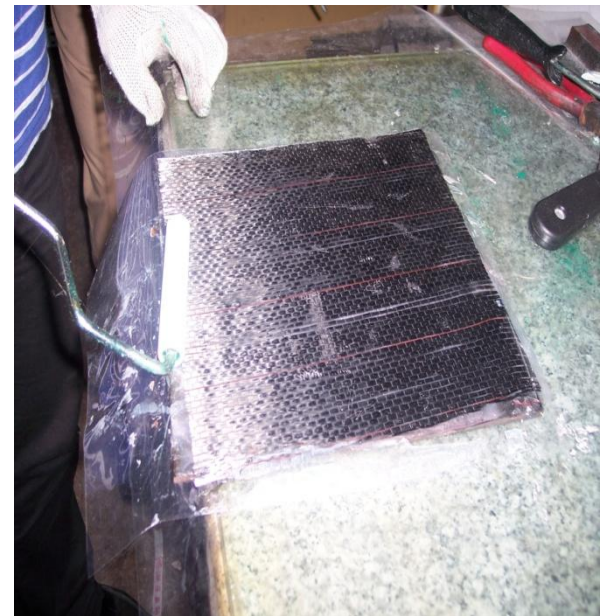
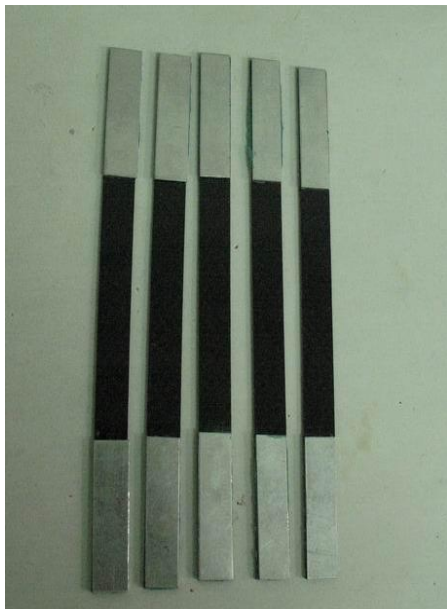
不同粘贴顺序(工艺)试验



三、研究进展

工艺选择

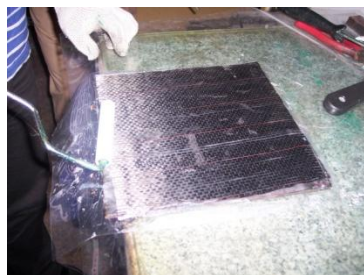
不同搭接工艺及浸润性试验



三、研究进展

工艺选择

不同表面处理方式的现场比对测试与评价



三、研究进展

工艺选择

表面防护工艺试验



工艺一：

每施工段至少需要4人。一人负责配胶，将SCR-3粘结剂A、B组分混合均匀；一人负责涂胶，将胶涂于钢梁表面待加固区域；另外两人分别负责粘贴碳纤维布和刮胶、滚压。

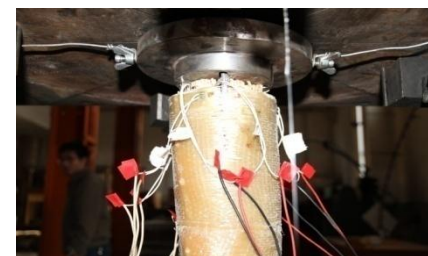
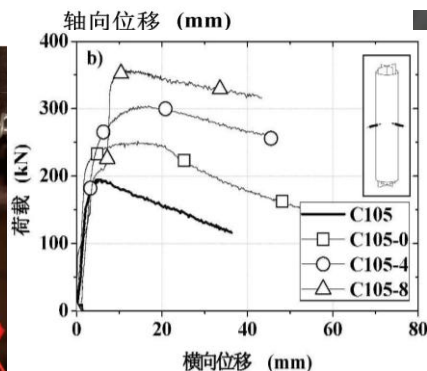
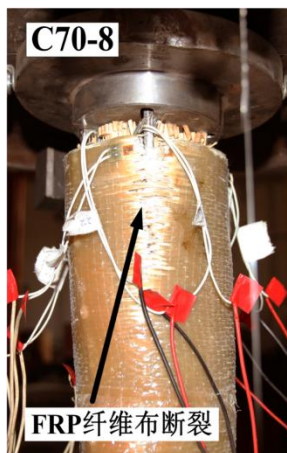
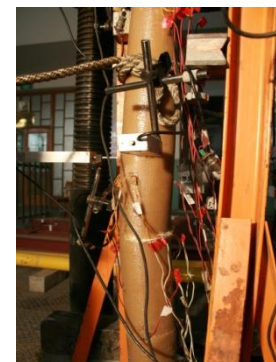
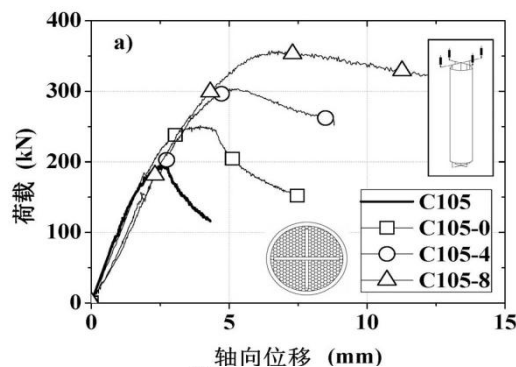
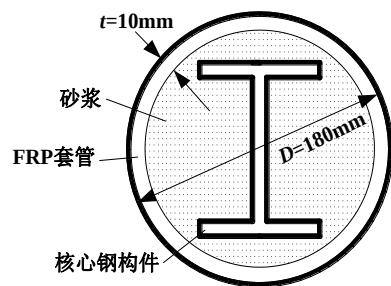
工艺二：

每施工段至少3人。一人负责将粘结剂A组分涂于钢梁待加固区域；一人负责将粘结剂B组分涂于碳纤维布表面；一人负责粘贴碳纤维布、刮胶、滚压。

三、研究进展

模型试验

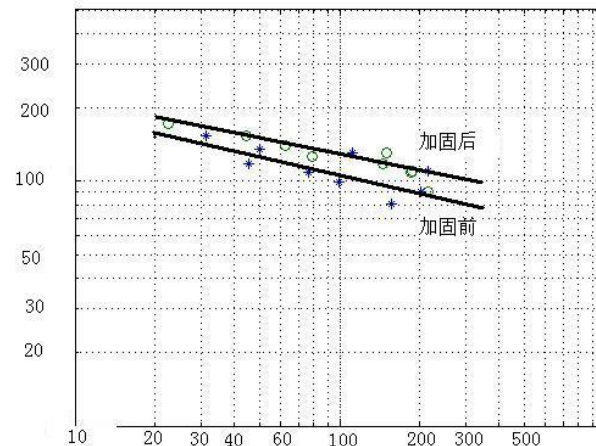
型钢外包FRP、内填不同材料后，**受压**稳定性大幅提高



三、研究进展

模型试验

十字形接头试件疲劳试验



加固前

$$\lg N = 16.3540 - 2.5122 \lg \Delta \sigma$$

加固后

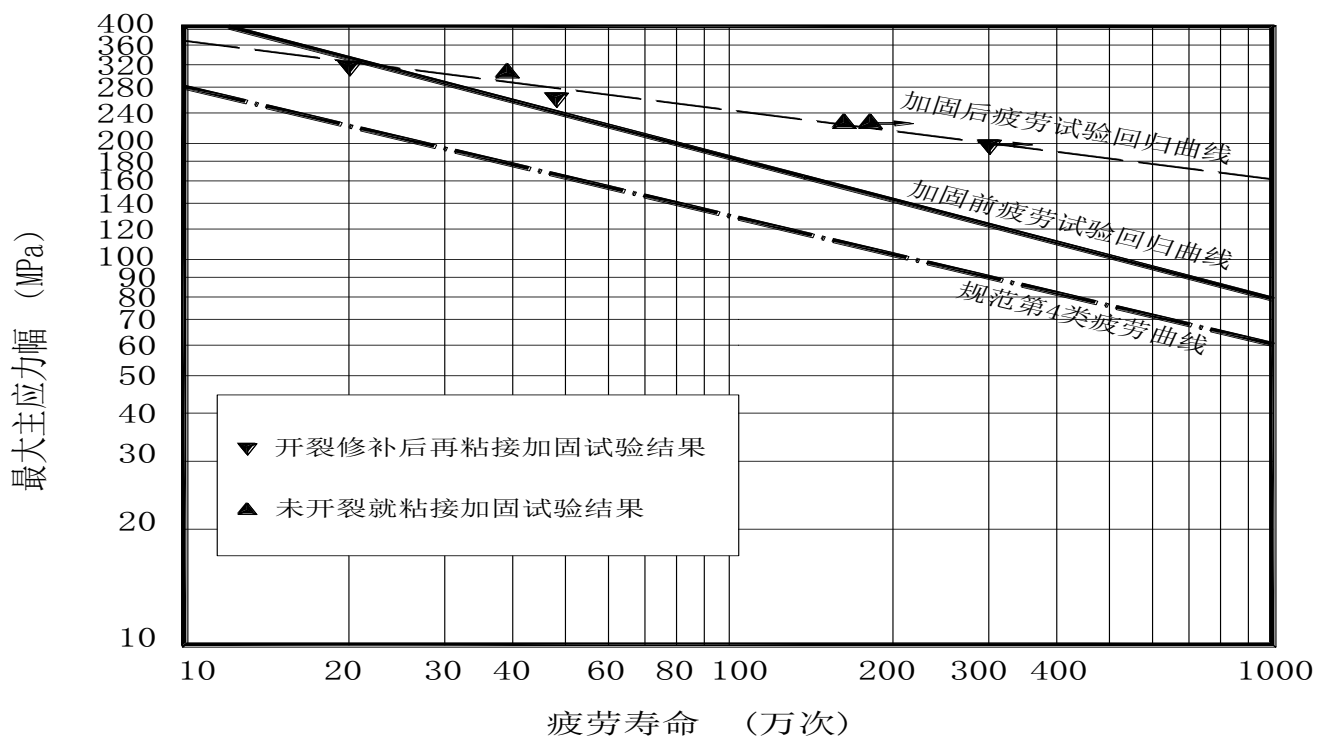
$$\lg N = 22.4799 - 3.7068 \lg \Delta \sigma$$

对应加固前200万次的常应力幅90MPa，加固后疲劳应力幅值可以提高到约130 MPa

三、研究进展

模型试验

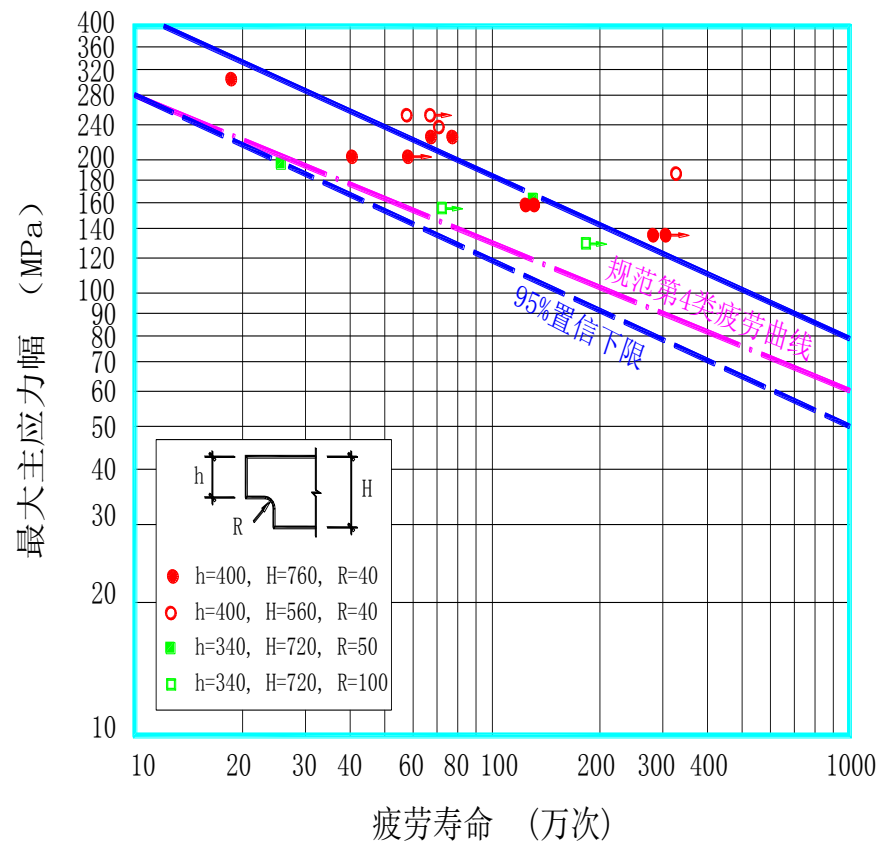
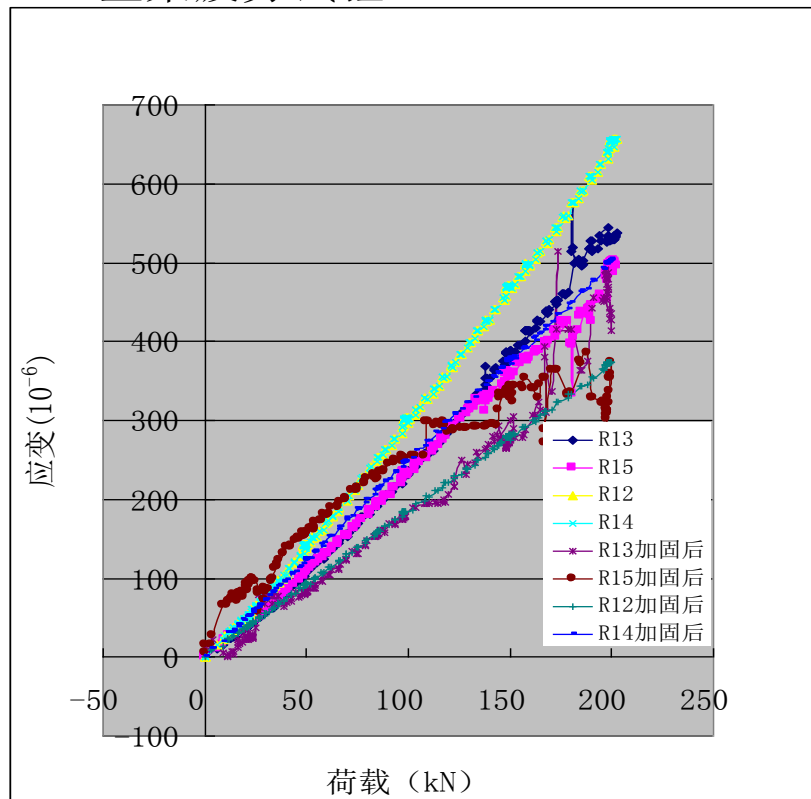
梁端加固后疲劳试验



三、研究进展

模型试验

整梁疲劳试验



模型梁粘贴一层碳纤维布后，关键控制点的**应力下降10%~20%**

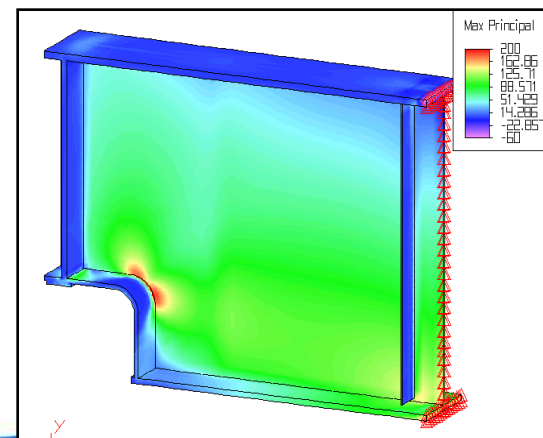
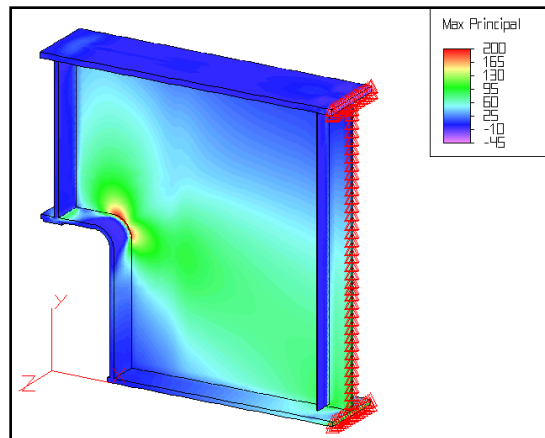
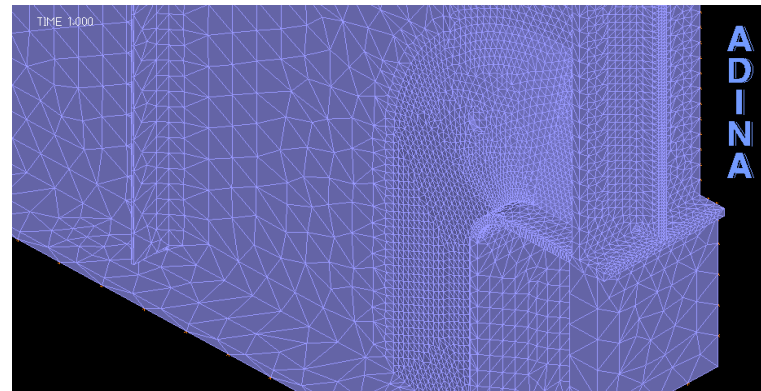
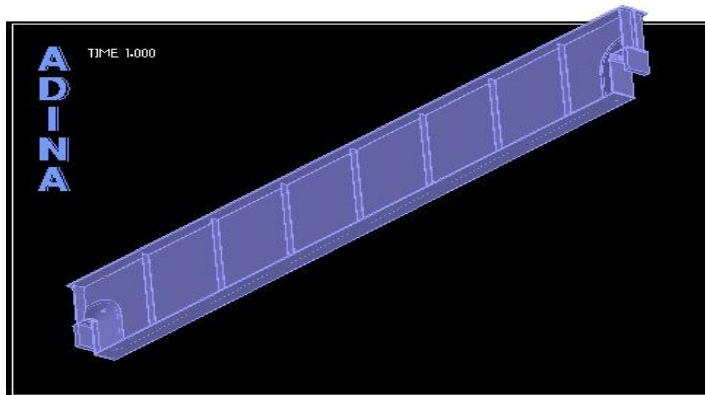
疲劳寿命提高50%



三、研究进展

计算分析

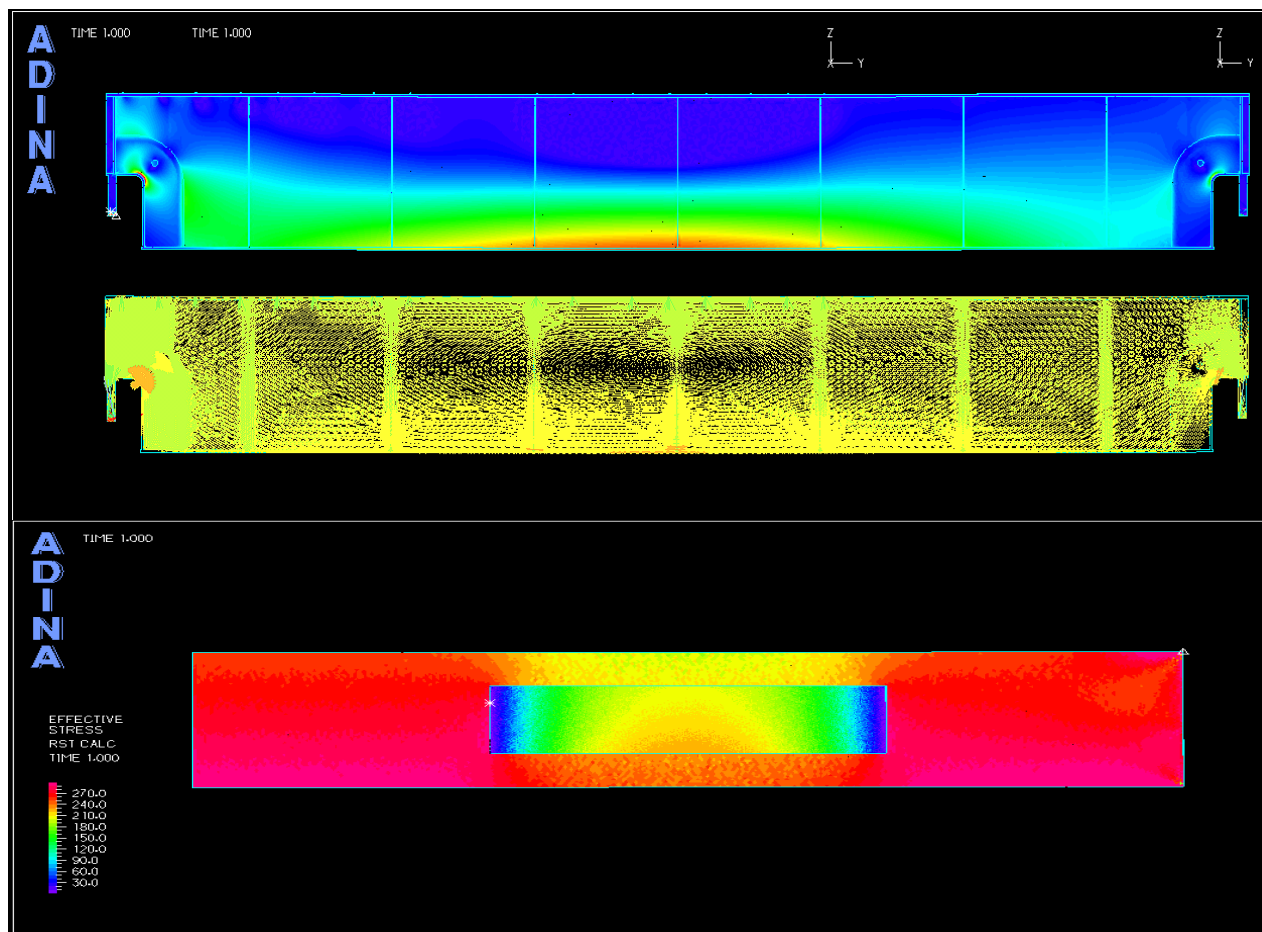
受弯构件建立模型



三、研究进展

计算分析

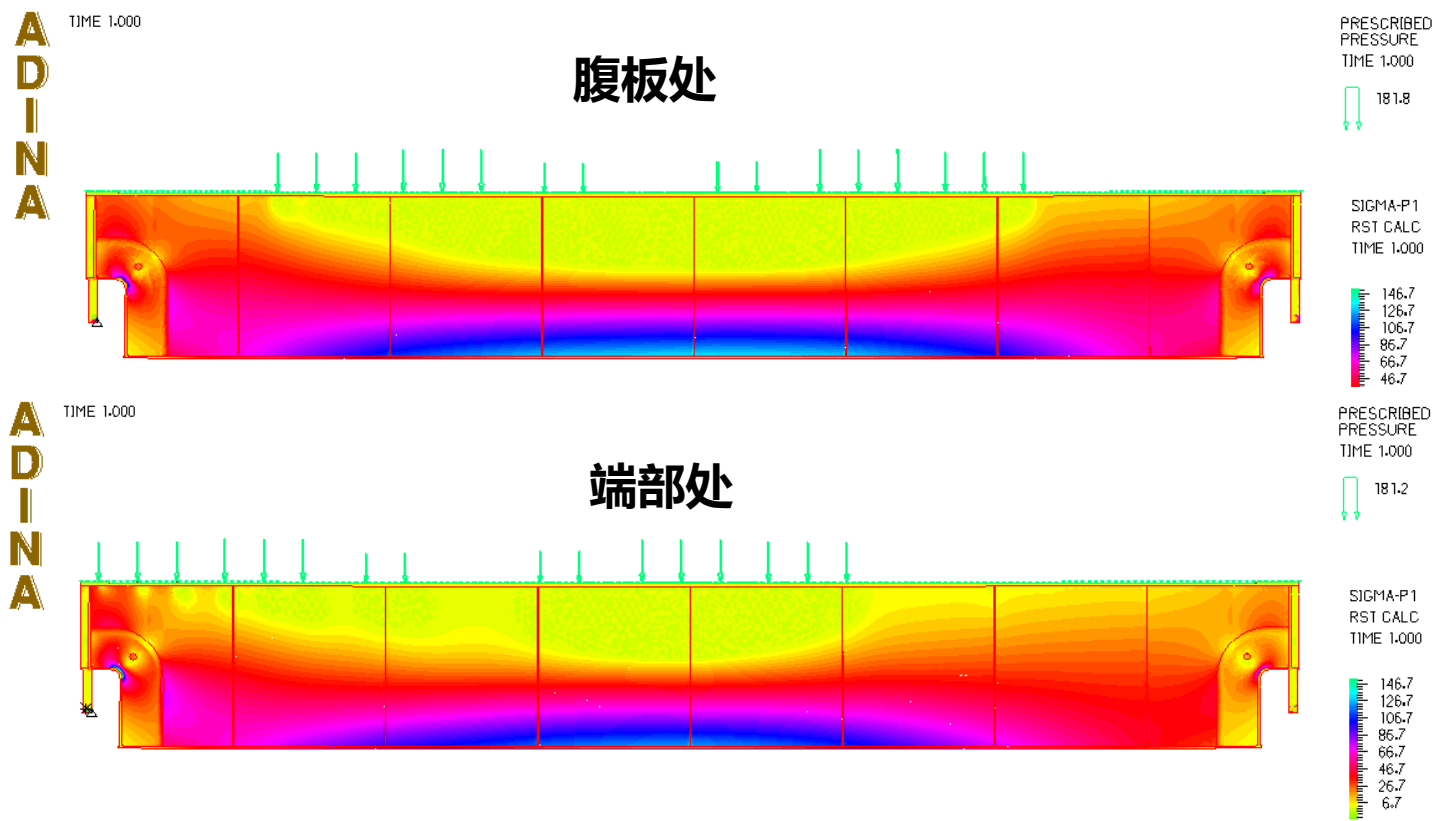
应力分布



三、研究进展

计算分析

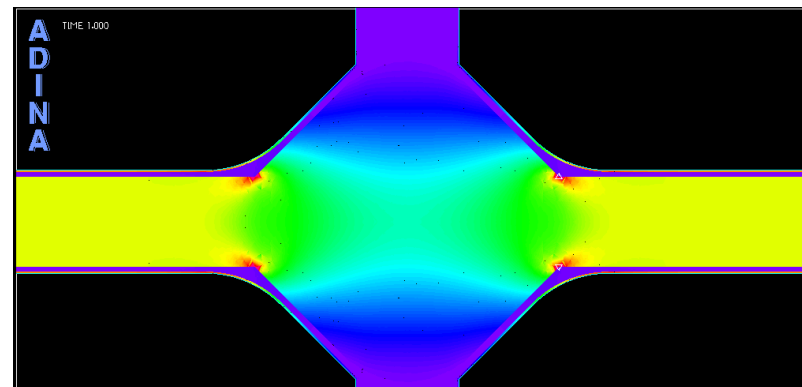
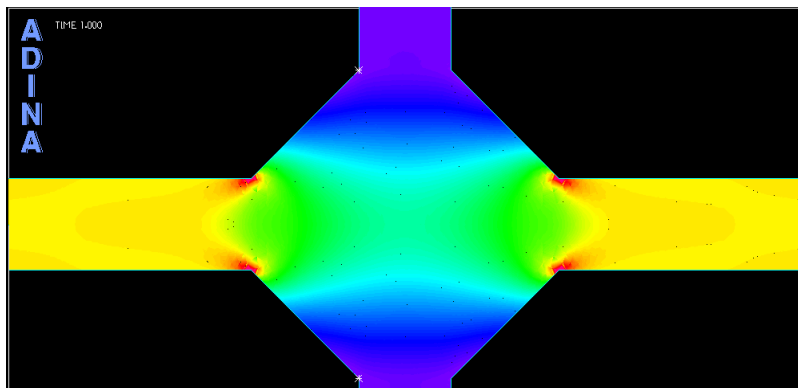
最不利工况分析



三、研究进展

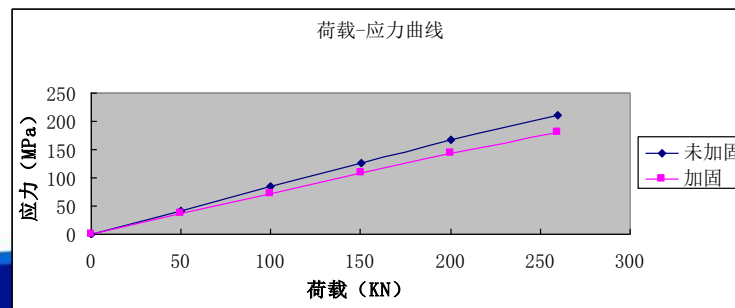
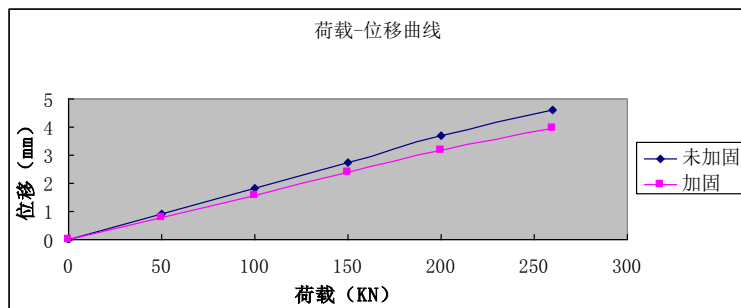
计算分析

加固前后模型梁腹板加劲肋截面应力



加固后应力集中处单元平均拉应力下降了**5.88%**，最大拉应力下降了**7.03%**

在最不利工况下，粘贴碳纤维布加固后，加劲肋下端应力平均降低**10%**

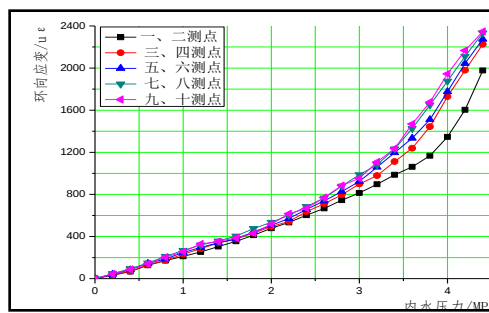
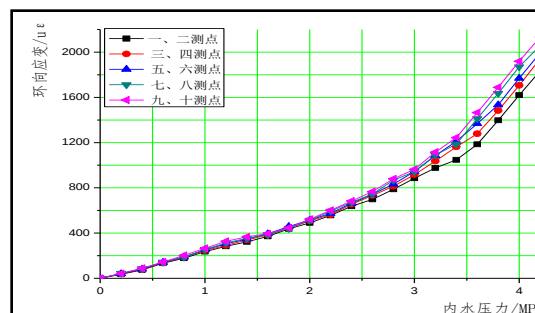
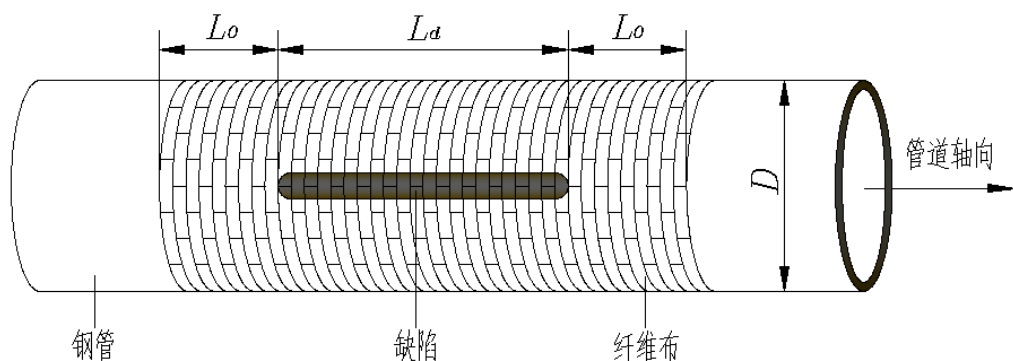


三、研究进展

计算分析

管道加固修复

可以有效地控制塑性变形，提高环向和纵向的承压能力



三、研究进展

3.2 工程示范

◆炼钢车间440T吊车梁加固修复

◆油气管道加固修复

◆桥墩防腐蚀修复

◆网架加固修复

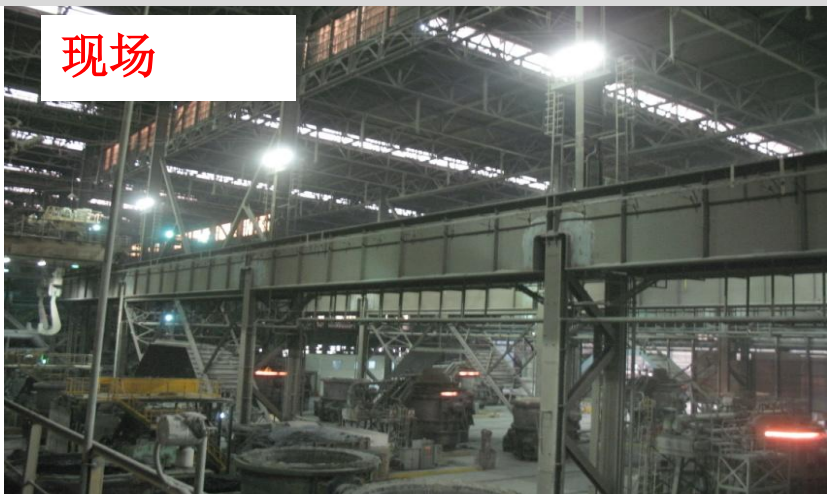
◆.....



三、研究进展

吊车梁加固

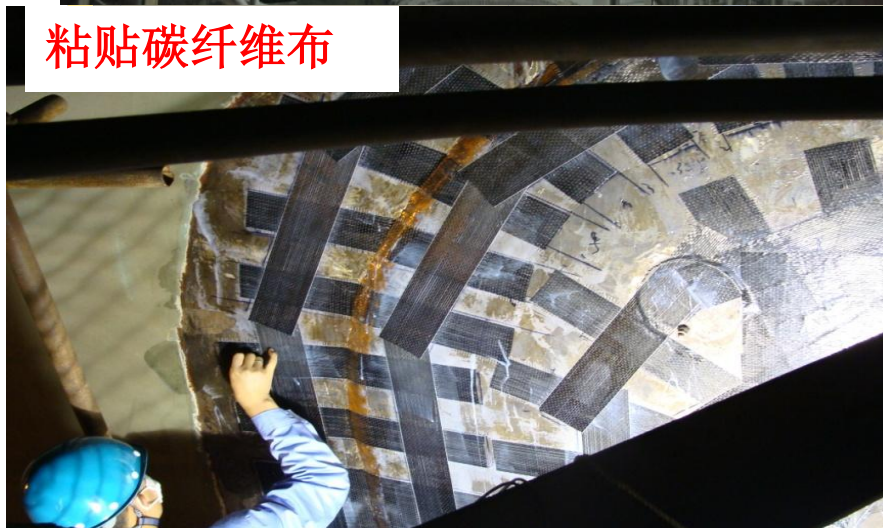
现场



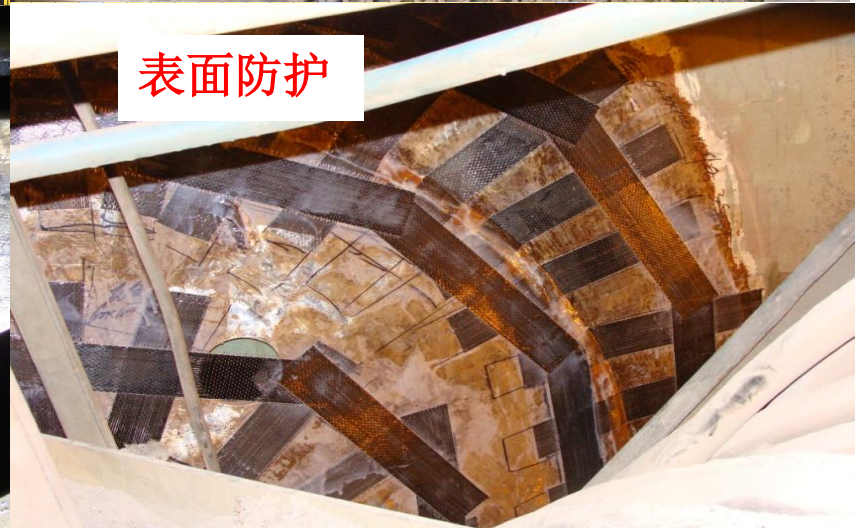
表面处理



粘贴碳纤维布



表面防护



三、研究进展

吊车梁加固

通过试验及分析，粘贴碳纤维布加固后，试验吊车梁模型的整体**疲劳寿命可提高50%以上**。此次加固施工，由于采用冶建总院自主开发的**SCR-3快干型粘结剂**及配套施工工艺，大大缩短了停产时间，仅用时**48个小时**就完成了整个加固过程，节省因停产产生的效益损失**1000余万元**。

宝钢一炼钢吊车梁碳纤维加固

工程应用证明

宝钢分公司一炼钢车间浇铸跨（DE跨）原有 1#440T 桥式起重机因年久损坏等原因，需整体更换。原结构在更换吊车之前，曾发现多处承载能力和疲劳应力幅值不满足要求。主要包括：吊车梁圆弧形端承载力不足（已发现裂缝），横向加劲肋端头腹板的疲劳应力幅超过限值，以及个别梁上翼缘应力偏高。更换后，吊车的工作荷载和工作制度均有所改变，需对原结构吊车梁进行加固。

鉴于粘贴碳纤维加固钢结构技术在实际工程中应用的实例有限，无现成标准、规范可循，特别是本工程，结构工作环境存在高温及粉尘，施工周期受到生产的严格限制，施工环境条件恶劣，国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心进行了详细的前期试验研究和加固方案设计。并于 2008 年 11 月对宝钢一炼钢车间浇铸跨吊车梁进行了碳纤维加固补强。

由于采用了国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心开发的钢结构加固用快干型 CSR-3 粘结剂，并在该中心编制的整套施工方案指导下进行施工，使得固化和施工速度大为提升。整个加固过程仅用时 48 个小时。大大减少了停产时间，节省因停产产生的效益损失约 1000 万元，且粘贴碳纤维布后，吊车梁的整体疲劳寿命可提高 50%以上。本实际工程应用证明，国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心的碳纤维加固钢结构工程技术先进，具有良好的经济效益。

工程管理部

2009年3月5日



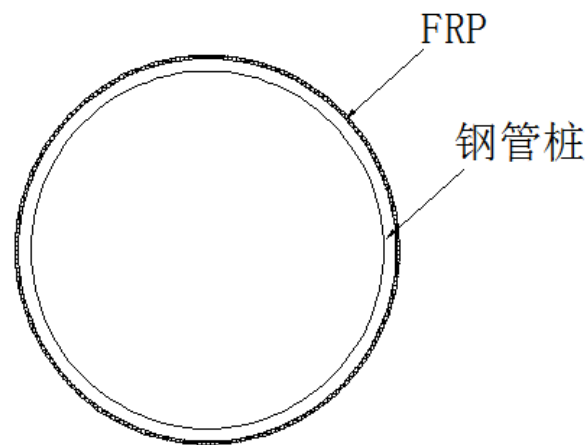
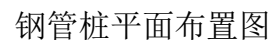
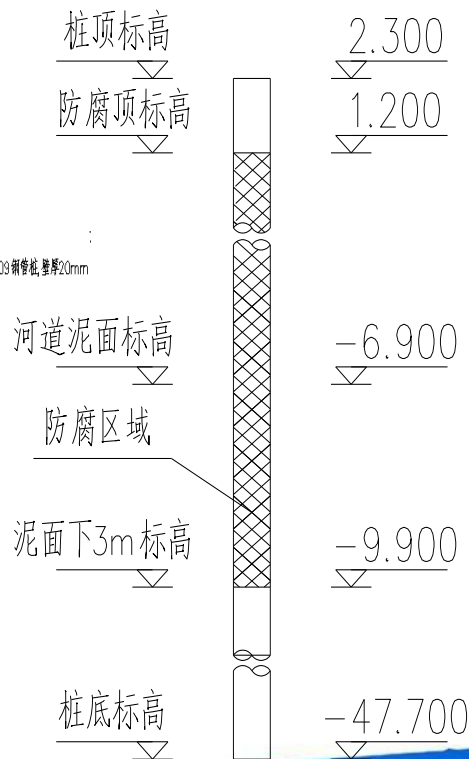
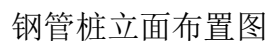
三、研究进展

管道加固



提高了管道的耐腐蚀性，扩大了工作参数范围

桥墩修复

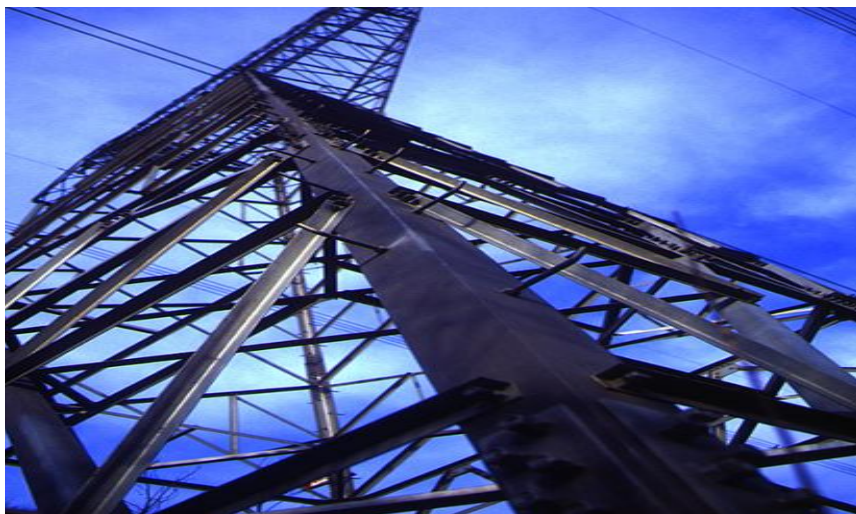


提高了桥墩的耐久性



三、研究进展

网架加固



提高了构件的稳定性和整体刚度

三、研究进展

3.3标准编制

《纤维增强复合材料加固修复钢结构技术规程》

编制组于**2011年12月**成立。

召开了**4次**工作会议。确定编写大纲、编写分工、进度计划安排后，开展了试验验证、指标与参数讨论、设计方法完善、形成条文及条文说明等工作，于**2013年7月**完成了征求意见稿。

经中国冶金建设协会研究同意，于**2013年8月**中旬开始进行征求意见，先后向行业协会、高校、科研院所、公司企业、生产厂家等单位及专家发出征求意见稿/函，于**2013年10月底**对反馈意见进行汇总，编制组对反馈意见进行解释说明验证，并对标准文本相应部分进行修订完善，对设计内容进行了详细的试算，最终完成送审稿

经中国冶金建设协会研究决定于**2014年1月10日**在北京召开专家审查会议。审查组专家一致认为该规程整体上达到国际领先水平，同意行业标准《纤维增强复合材料加固修复钢结构技术规程》（送审稿）通过审查，建议根据审查意见修改完善后形成报批稿，报有关部门审批，并尽快开展宣贯和推广应用工作。

2014年3月，针对标准审查会中的专家意见，编制组完成了标准内容最终修改，形成《纤维增强复合材料加固修复钢结构技术规程（报批稿）》。

已上报。



三、研究进展

规程目录

1 总则

2 术语、符号

2.1 术语

2.2 符号

3 材料

3.1 一般规定

3.2 纤维布及纤维增强复合材料

3.3 树脂

3.4 防护及填充材料

4 设计方法

4.1 一般规定

4.2 受拉构件加固

4.3 轴心受压构件加固

4.4 简支工字钢梁受弯加固

4.5 内压钢管加固

4.6 抗疲劳加固

5 施工与安全

5.1 一般规定

5.2 施工

5.3 安全

6 检验与验收

6.1 检验

6.2 验收

附录A



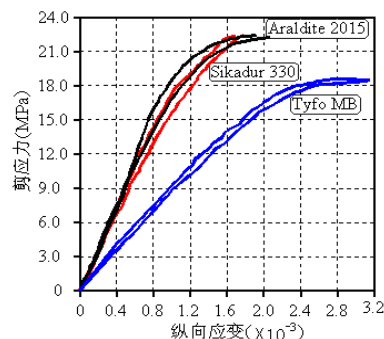
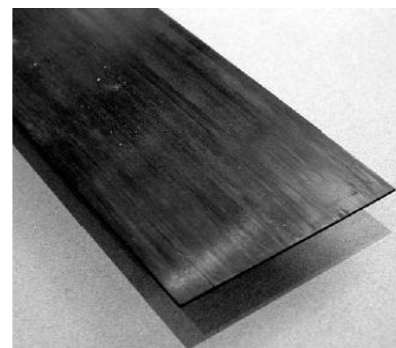
三、研究进展

✓材料方面

主要针对钢结构加固所用的FRP材料及制品，给出基本性能及某些特殊性能的规定指标，用于指导选择合适的加固材料，保障加固的效率和安全性。

包括

- ◆ 纤维增强复合材料
- ◆ 配套树脂材料
- ◆ 表面防护材料
- ◆ 内部填充材料等



三、研究进展

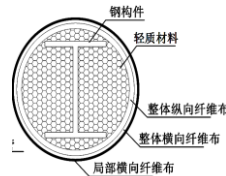
✓、设计方面

主要针对相对成熟的钢结构构件加固的设计，给出基本设计公式及其构造要求，对于尚未成熟的方法有些给出了定性的方法，有待发展完善。

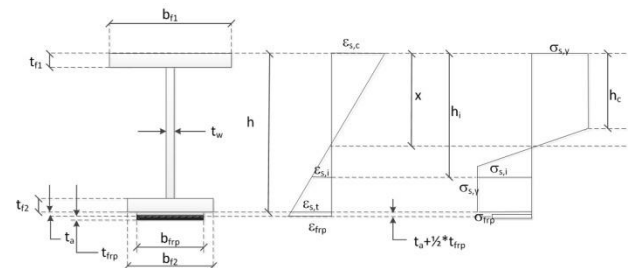
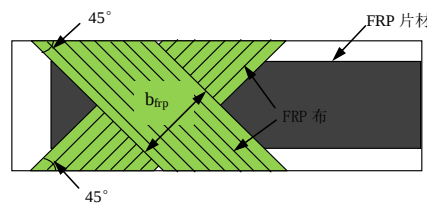
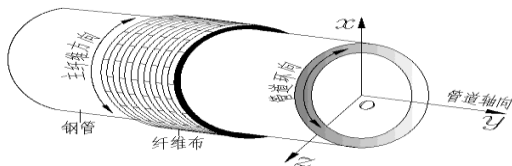
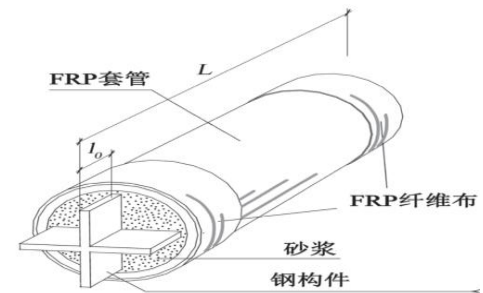
- 包括
- ◆ 受拉构件
- ◆ 轴心受压构件
- ◆ 工字型截面梁
- ◆ 钢管
- ◆

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f \gamma_e}$$

$$N \leq \min \{ f A_n + \varepsilon_f E_f A_f, 1.5 f A_n \}$$



$$\frac{N}{\phi A_s} \leq f$$



$$t_f = \frac{E_s}{E_{f,h}} \left(\frac{PD}{2[\sigma]} - \delta_s \right)$$

$$M_{u,d} = \frac{f_y}{\gamma_R} t_{f1} b_{f1} \left(\frac{h - t_{f1}}{2} \right) + \frac{f_y}{\gamma_R} t_w (h_c - t_{f1}) \left(\frac{h - h_c - t_{f1}}{2} \right) + \frac{2}{3} \frac{f_y}{\gamma_R} t_w (x - h_c)^2 + \frac{f_y}{\gamma_R} t_w (h + h_c - t_{f2} - 2x) \left(x - \frac{h_c + t_{f2}}{2} \right) + \frac{f_y}{\gamma_R} t_{f2} b_{f2} \left(\frac{h - t_{f2}}{2} \right) + \varepsilon_{f,t,d} E_f b_f t_f \left(\frac{h + t_f}{2} + t_s \right)$$

三、研究进展

✓、施工方面

主要针对FRP加固钢结构的基本施工方法和质量检测检验方法，给出基本要求及某些特殊要求，保障钢结构加固的效率和安全性。

包括

- ◆ 施工工艺流程
- ◆ 施工安全细则
- ◆ 质量检验方法
- ◆ 安全验收条件等



三、研究进展

✓、参考标准

- 1 《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》 GB50608
- 2 《钢结构设计规范》 GB50017
- 3 《混凝土结构加固设计规范》 GB50367
- 4 《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》 GB8923
- 5 《输油管道工程设计规范》 GB50253
- 6 《建筑结构加固工程施工质量验收规范》 GB 50550
- 7 《单向纤维增强塑料拉伸性能试验方法》 GB/T 3354
- 8 《增强制品试验方法》 GB/T 9914.3
- 9 《碳纤维增强塑料体积含量检验方法》 GB/T 3366
- 10 《胶粘剂拉伸剪切强度测定方法》 GB/T 7124
- 11 《输送流体用无缝钢管》 GB/T 8163
- 12 《石油天然气工业输送钢管交货技术条件第1部分：A级钢管》 GB/T 9711.1
- 13 《石油天然气工业输送钢管交货技术条件第2部分：B级钢管》 GB/T 9711.2
- 14 《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》 JTJ025
- 15 《铁路桥梁钢结构设计规范》 TB10002.2
- 16 《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》 CECS 146
- 17 《腐蚀管线剩余强度手册》 ASME/ANSI B31G
- 18 《腐蚀管道评估的推荐作法》 SY/T 10048
- 19 “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures” ACI 440-2R



四、前景展望

市场分析

较传统方法更能够推进**技术升级**

施工便捷、耐久耐腐、抗疲劳性能优越、适用面广

以每年10万平方米加固修复量计，该技术平均产值预计达**5亿元**，节约资金约**8亿元以上**



四、前景展望

后继工作

- 1、标准宣贯，在2015年下半年开始
- 2、开发、生产不同环境要求的加固材料及其制品
- 3、联合高校、设计单位、工程建设单位进一步深入研究，发展该技术方法
- 4、开展工程应用



谢谢!

请批评指正!

杨勇新

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

国家工业建构筑物质量安全监督检验中心

E-Mail: yangyongxin@tsinghua.org.cn

电 话: 010-82229326 (传 真)

手 机: 13511077879

