

# 玻璃钢补强加固方法研究\*

罗建群 张慧娟

山东工业大学  
一九九四年十月

---

\*国家自然科学基金及山东省自然科学基金联合资助

PDG

# 玻璃钢补强加固方法研究\*

罗建群 张慧娟

山东工业大学

(一九九四年十月)

**[摘要]**:文中根据作者多年来大量试验及工程实践经验,较全面系统地探讨了对砼结构工程的玻璃钢补强加固方法。结果表明,无论对砼、钢筋砼或钢丝网水泥的梁、板、管、柱等结构,在采用合理的玻璃钢表层包覆补强后,均可大幅度地提高其承载能力,且施工简便易行。受力时,各相材料能够形成新的统一体而协同工作,既可充分利用表层玻璃钢的高强特性,又可充分利用原结构的钢度和现有强度。文中还探讨了有关补强设计方法及在动载作用下的疲劳性能。特别适用于轻型结构的补强加固。

**关键词**:玻璃钢; 砼; 钢筋砼; 钢丝网水泥; 结构补强。

## 一、前 言

众所周知, 砼及钢筋砼工程结构是当今建筑行业中的主体工程。无论在水利工程、工业与民用建筑、道路桥涵、海港码头、供水工程、地下工程等工程项目中, 都离不开砼及钢筋砼结构工程。世界上大规模使用砼结构, 迄今已有五十多年的历史。随着使用期的增大, 运行条件的变动, 自然环境的影响以及原设计或

---

\* 国家自然科学基金和山东省自然科学基金联合资助

施工中存在的问题，目前，各类砼工程都已普遍出现工程老化病害问题，有的已造成或威胁结构的安全性；有的已降低了其适用性；更多的是存在耐久性问题。导致工程功能衰退或丧失，影响工程效益的发挥。目前，国内外在提高砼耐久性，充分利用老砼结构和研究开发经济合理的补强加固修复方法等方面都开始了大量的研究和探索工作。

当前，国内对砼工程结构修复方法中，较多采用了加大砼截面加固法，外包或内衬钢加固法，预应力加固法和改变结构传力途径的加固法等，有的也试用了粘贴钢板加固法。本文结合笔者十多年来对砼工程结构修复方法的试验研究及工程实践的经验，重点介绍采用玻璃钢对砼及钢砼(钢丝网水泥)结构的补强加固方法。

## 二、玻璃钢的特性

玻璃钢(玻璃纤维增强塑料)是以玻璃纤维为增强材料，合成树脂为基体复合而成的一种工程材料。

在补强加固工程使用的玻璃钢，最常使用的环氧玻璃钢和聚酯玻璃钢，也有采用如环氧酚醛玻璃钢等改性玻璃钢。根据采用的树脂基体的材料不同，可以是环氧树脂、固化剂、增韧剂、稀释剂、填料及其它改性剂配制而成的基体；也可以是以不饱和聚酯树脂、催化剂和促进剂、填料组成的基体。而作为增强材料的玻璃纤维，多采用无碱无捻无蜡的玻璃纤维布。

玻璃钢具有轻质高强、比强度高、粘结性好、性能可调、耐腐蚀、抗渗好、施工方便、尺寸稳定，表面光滑且与砼的线膨胀系数相近等一系列特性，但其弹性模量和层间剪切强度较低。<sup>(1)(2)</sup>

根据我们室内试验及补强加固工程中取样试验结果：

- 1、玻璃钢的比重约为 $1.7\sim 2.1\text{克}/\text{cm}^3$ ;
- 2、玻璃钢标准试件的力学性能测试结果如表1

表1 玻璃钢力学性能

| 项 目<br>种 类 | 极限强度(MPa) |         | 弹性模量(GPa) |       |
|------------|-----------|---------|-----------|-------|
|            | 弯曲        | 拉伸      | 弯曲        | 拉伸    |
| 聚酯玻璃钢      | 295~400   | 275~321 |           | 13~25 |
| 环氧玻璃钢      | 113~449   | 171~305 | 10~16     | 10~15 |
| 环氧煤焦油玻璃钢   | 41~125    | 102~191 | 7~8       | 7~11  |

- 3、玻璃钢的线膨胀系数为 $(7\sim 11)\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ ;
- 4、玻璃钢的表面糙率系数为 $0.010\sim 0.011$ ;
- 5、玻璃钢板渗透能力可达 $3.5\text{MPa}$ 以上;
- 6、玻璃钢与砼的粘结力大于砼的粘结力。

### 三、砼构件外包玻璃钢后的再复合性能

对于由砼、钢筋砼或加筋钢丝网水泥结构为基体的梁板构件，在切实做好界面过渡层的前提下，表面包覆玻璃钢后的再复合构件，经大量的室内试验和部分现场测试结果均表明，再复合后的构件的承载能力均较原构件有大幅度的提高，受力时，各相材料能够形成新的统一体而协同工作，既可充分利用表层玻璃钢的高强特性，又可充分利用原砼结构的刚度和剩余强度。

#### (一)玻璃钢/砼复合梁<sup>[3]</sup>

对 $1100\times 150\times 75\text{mm}$ C20的砼简支梁，外包玻璃钢补强加固后，采用支座间距为 $900\text{mm}$ ，跨中纯弯段为 $400\text{mm}$ 的四点弯曲试验，结果表明：

- 1、用二层 $(0.2/0.4)$ 包覆的砼梁的承载能力 $(4156\text{N}\cdot\text{m})$ 不仅远大于同等条件的砼梁 $(100\text{N}\cdot\text{m})$ ，且已接近正常配筋的钢筋砼

梁( $5000\text{N}\cdot\text{m}$ )；而五层包覆的砼梁，可承受弯矩的平均值为 $9084\text{N}\cdot\text{m}$ 。可见复合梁的承载力已大幅度地提高。

2、复合梁正截面上的纵向应变，沿截面高度大致呈直线分布。芯梁中的表面裂缝不会迅速发展，体现了玻璃钢与砼之间的互相抑制作用。

3、在各级荷载作用下，实测挠度均呈规则性变化。且其挠度随包覆玻璃钢层的厚度增加而减少，表明复合梁的刚度也有所增大。

4、玻璃钢/砼复合梁在破坏过程中，塑性变形不大。当表面补强玻璃钢层的厚度配置适宜时，将出现在受拉区破坏的同时，受压区也出现若干分布均匀的裂纹的正常破坏现象；当受拉区所配置的玻璃钢层厚度不足时，破坏时，底部玻璃钢将首先开裂，并迅速向顶部发展而折断，但顶部玻璃钢层仍基本保持完整；当受拉区所配置的补强玻璃钢层过厚时，其破坏方式是首先由顶部受压区产生裂缝开始，随之向支座一侧倾斜开裂，而底部玻璃钢层却基本保持完整。

## (二) 玻璃钢/钢筋砼复合梁<sup>[4]</sup>

试验表明，

1、同样是 $1100\times 150\times 75\text{mm}$ 的C20钢筋砼梁，受拉区配有 $2\phi 8$ 钢筋，在简支间距为 $900\text{mm}$ ，四点弯曲的跨中纯弯段 $400\text{mm}$ 情况下，复合梁的破坏弯矩为 $14412\text{N}\cdot\text{m}$ ，约为正常配筋钢筋砼芯梁( $5000\text{N}\cdot\text{m}$ )的3倍，表明经再复合后可大幅度地提高其承载能力。

2、各复合梁正截面上玻璃钢表面纵向应变也大致呈直线分布。

3、复合梁在各级荷载作用下，实测挠度也呈规则性变化，且当复合梁在接近破坏时，挠度迅速增大，有明显的破坏先兆。破坏时，多先由底部玻璃钢补强层首先开裂，随砼裂缝扩大，侧面玻璃钢开裂，此时钢筋尚能承受约40~50%的破坏荷载，直至钢筋被拉断后才折断。表现出较好的延性。

4、当玻璃钢补强层厚度相同时，在各种荷载下，玻璃钢/钢筋砼复合梁的挠度较同样条件下的玻璃钢/砼复合梁减少60~70%；也比钢筋砼芯梁减少25~35%。表明芯梁的刚度对复合梁的弯曲刚度有很大影响。在同一梁中，其弯曲刚度仍随荷载的增加而减少。

5、分析表明，影响补强效果的主要因素是表面玻璃钢补强层的厚度和芯梁的刚度。

6、对已经破坏的芯梁，经修复处理后，重新包覆表面玻璃钢补强层，其实测破坏荷载不低于直接在未破坏的芯梁上包覆同样厚度玻璃钢的复合梁，表明上述玻璃钢补强加固法对已损坏工程的修复同样是可靠的。

### (三) 玻璃钢/钢丝网水泥复合板<sup>[5]</sup>

试验表明：

1、在钢丝网水泥结构表面包覆玻璃钢后，可较原结构强度提高1.5~10倍。其提高程度随玻璃钢的包层厚度和原网板内筋网分散均匀程度有关，筋网分散程度好的。补强后承载能力提高幅度大，而同一类芯板，则随包层厚度增加而增大。

2、无论从应变测量或挠度测量的结果推算出来的弯曲刚度均较接近。当原芯板刚度较大时，实测复合板的弯曲刚度也较大。

而对同一种芯板，包层厚度大的，则弯曲刚度也较大。两相比较，芯板的原刚度大小的影响是主要的。

3、复合板跨中挠度呈规则变化。当相对挠度  $f/L_0 < 0.01$  时，复合板的荷载——挠度曲线呈线性变化，反复加载也无异常现象。而当  $f/L_0 > 0.01$  时，挠度增长率加大。一般在破坏时， $f/L_0 > 0.025$ ，说明复合板在破坏前有较明显的挠曲变形和破坏先兆，均呈塑性破坏。

4、根据声发射测试结果的分析表明，复合板的破坏过程是，在荷载较小时，表明砂浆尚未开裂的无声发射阶段历时较长；然后是砂浆开裂时的声发射开始阶段；再后是表现为部分钢丝断裂的间断声发射阶段；最后则是玻璃断裂并扩展时约连续声发射阶段。而未包玻璃钢的相同条件下的芯板，则无声发射阶段的历时很短，相应荷载也小得多，且无明显的间断声发射阶段，破坏荷载也小得多。可见，由于表层玻璃钢的存在，使砂浆开裂和钢丝断裂的过程大为推延，扩大了弹性工作范围，从而大幅度地提高了承载能力。复合板中，随着荷载的增加，即使砂浆已经开裂，荷载仍可由玻璃钢及钢丝网共同承担。充分说明，复合板在受力时，各项材料，包括砂浆、筋网、树脂基体及玻璃丝布等能够形成新的统一体而协同工作。

#### (四) 外包玻璃钢加固的受压构件<sup>[6]</sup>

对外包玻璃钢的受压构件的试验研究表明：

1、外包玻璃钢后，试件的极限承载力都较同类的未包试件为高，但提高的幅度不尽相同，一般随包覆层数增加而加大。如包覆二层时，约提高28—50%，而包覆五层时可提高72—94%。补

强时，对素砼构件宜在三层以上，对钢筋砼构件，宜在4—5层以上。

2、在同样包覆条件下，长柱较立方体试件提高的幅度为大；同标号的素砼试件提高的幅度较钢筋砼构件为大；低标号砼的提高幅度较高标号砼的提高幅度为大。

3、条件相同情况下，无论是直接包覆，还是已经破损但经修补并包覆后进行环氧灌浆处理的各类试件，其增强效果都相近。

4、应变实测试验结果表明，其横向拉应变约为纵向压应变的一半左右。随着荷载增加，试件的压应力增大，而表面玻璃钢的横向拉应力也随之增加。证明其承载能力的提高，是来自外包抗拉性能高的表层玻璃钢补强层对砼横向变位约束的结果。

综上所述，无论砼、钢筋砼或是钢丝网水泥的梁、板或杆柱结构，在静载试验或动载下的疲劳试验，当表面包覆玻璃钢后的再复合性能均表现为：

1、都可大幅度提高其承载能力，且刚度也有所提高。

2、经再复合后的各项材料，能够形成新的统一体而协同工作。既能充分利用玻璃钢强度高的特性，又可充分利用原结构的刚度和现有强度。

3、采用表层包覆玻璃钢的结构，在荷载较小时，能够防止和抑制水泥砂浆或砼的开裂，从而扩大了原结构的弹性工作范围。

4、经玻璃钢补强加固后结构的承载能力，主要取决于原结构的刚度及玻璃钢补强层的包覆厚度。

5、梁式结构在表面包覆玻璃钢后，结构在破坏前均有较大

的挠度，从而使结构破坏具有明显的先兆。

6、砼或钢筋砼轴向或偏心受压杆柱外包玻璃钢后，其承载能力之所以能够大幅度提高，主要是来自抗拉性能高的表层玻璃钢补强层对砼横向变位约束的结果。

#### 四、玻璃钢补强设计方法探讨

有关玻璃钢补强设计方法，目前尚无规定。笔者根据试验结果和工程实践，通过分析，并经必要的假定和简化，分别建立了有关梁式结构和受压构件外包玻璃钢后的补强计算模型，提出了如下一些补强计算方法<sup>[7][8]</sup>，可供补强工程设计参考。

##### (一) 外包玻璃钢的素砼梁

经玻璃钢补强后复合梁正截面承载力为：

$$M_u = f_r \delta (b + 2\delta) (h + \delta) + 2/3 f_r \delta (h - x) h$$

梁的受压区高度 $X$ 约为 $(1/5 \sim 1/6)h$ ，也可按下式计算。

$$X = \frac{2f_r \delta h}{4f_r \delta + f_{cu} b}$$

补强设计中，可先假定补强层厚度后试算，也可据试验结果，取 $X = (1/5 \sim 1/6)h$ ，按下式估算玻璃钢补强层的厚度 $\delta$ 。

$$\delta = \frac{M_u}{f_r h b + 2/3 f_r (h - x) h}$$

式中，

$\delta$ ——外包玻璃钢层的包覆厚度；

$M_u$ ——结构抗力，即截面的抵抗弯矩；

$X$ ——应力图形的受压区高度；

$b$ ——矩形截面芯梁的宽度；

$h$ ——矩形截面芯梁的高度；

$f_s$ ——玻璃钢强度的设计值；

$f_{cs}$ ——砼弯曲抗压强度的设计值。

## (二) 外包玻璃钢的钢筋砼梁

经玻璃钢补强后的钢筋砼梁的正截面承载力为：

$$M_u = f_s \delta (b + 2\delta) (h + \delta) + 2f_s \delta (h - x) h / 3 + f_s A_s (h - a - x / 3)$$

复合梁的受压区高度：

$$x = \frac{2f_s \delta h + f_s A_s}{4f_s \delta + f_{cs} b}$$

对于钢筋砼芯梁外包玻璃钢后，其 $x$ 值一般在 $(0.3 \sim 0.4)h$ 左右，补强设计中，可按此范围先假定 $x$ 值，或先按经验设定玻璃钢层厚度 $\delta$ 后，再按上述关系检验承载力条件。通过试算，最后确定经济合理的玻璃钢层包覆厚度。

式中，除与上述包覆素砼梁相同外

$f_s$ ——钢筋抗拉强度的设计值；

$a$ ——芯梁的钢筋保护层厚度。

## (三) 外包玻璃钢的轴向受压构件

经玻璃钢补强后的构件截面承载力为：

$$N_u = \phi (f_{cs} A + 2\alpha f_s \delta h + f_s A_s)$$

式中，

$N_u$ ——受压杆柱截面抗力；

$\phi$ ——杆柱的纵向弯曲系数；

$f_{cs}$ ——砼抗压强度设计值；

$f_s$ ——钢筋的抗压强度设计值；

$f_t$ ——玻璃钢抗拉强度设计值；

为安全计，设计时可取  $f_t = 50 \sim 100 \text{MPa}$

$\delta$ ——玻璃钢的包覆厚度；

$h$ ——杆柱砼截面长度；

$A$ ——杆柱砼截面面积；

$A_s$ ——杆柱砼截面内钢筋面积；

$\alpha$ ——侧向应力系数

设计中，建议  $\alpha = 2.0 \sim 2.5$ ，短柱可取较小值，而长柱可取较大值。

#### (四) 外包玻璃钢的偏心受压构件

经玻璃钢补强后的构件截面承载力为：

$$M_u = \phi \cdot N = f'_s A'_s - f_s A_s - f_t \delta (h - 2x) + f_{cu} x b$$

$$M = N_u \cdot e = f_t \delta b h + f_t \delta \frac{2}{3} [(h-x)^2 + x^2] + f_{cu} x b \cdot \frac{1}{2} (h-x) \\ + f_s A_s (h/2 - a) + f'_s A'_s (h/2 - a')$$

式中，

$e$ ——偏心距， $e = M/N$ ；

$f_t$ ——玻璃钢的抗拉设计强度，取  $f'_t = f_t$ ；

$f_s$ ——钢筋的抗拉强度设计值；

$f_{cu}$ ——砼的抗压极限强度值；

$f'_s$ ——钢筋的抗压试验设计值；

$A_s$ ——受拉钢筋的截面面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$A'_s$ ——受压钢筋的截面面积 ( $\text{mm}^2$ )。

通常，在补强设计中，常可根据经验选择  $\delta = 1 \sim 4 \text{mm}$  代入进行试算。

## 五、玻璃钢补强加固施工方法及构造要求

### (一) 玻璃钢补强加固形式及方法

#### 1、外包玻璃钢加固

对有条件在原结构外表面进行表层包覆玻璃钢的工程结构，由于对原结构进行整体包覆，施工质量易于保证，补强加固效果好，是对梁、板、柱、肋及管道的首选方案。在补强加固前，首先应对原构件表面进行必要的凿打和清洗，使原构件表面砼或砂浆露出牢固部分，并设法清除筋网的锈蚀；然后吹干吹净，再在其表面涂刷树脂基液和采用树脂腻子将其表面填平压实，形成可靠的界面过渡层；再分层手工糊制玻璃钢补强层，每铺一层布，涂刷一遍基液，彼此纵横交错分层糊制，应保证各层玻璃丝布均浸透均匀，刮平贴实，无气泡，无分层，无折皱，以确保其整体性；最后，经检查及整修，再涂刷一层表面胶，固化后即可交付使用。鉴于一般玻璃钢在固化期间都会产生一定程度的收缩（环氧玻璃钢较小，聚酯玻璃钢较大），对于外包玻璃钢的构件将大有裨益，将使玻璃钢补强层与原结构的结合更为牢靠。

#### 2、内衬玻璃钢加固

对于管、罐等内封闭结构内壁的补强加固，则需要内衬补强加固方法。施工方法同前。但应特别注意减少玻璃钢固化收缩的影响，宜采用收缩较小的环氧玻璃钢或改性环氧玻璃钢，并采取必要的层间加强措施和切实做好凿毛和过渡层，以防止因施工质量不好而引起补强层脱壳现象的发生。

#### 3、局部玻璃钢补强加固

对于某些结构整体性能尚好，但已出现某些较大裂缝的砼或

钢筋砼结构，也可考虑采用局部补强的方式进行加固。一般是先对裂缝附近进行凿打并洗净吹干后；用树脂砂浆修补原裂缝；再在裂缝修补表面附近糊制一定宽度的玻璃钢补强层，以加强其表面承载能力，一般玻璃钢层的宽度不宜少于30~50cm。

## (二)玻璃钢补强加固的构造及施工要求

1、作为受力结构的玻璃钢补强层，为确保其补强效果，在受力部位的铺布层数一般不宜少于三层。如经验算，补强后结构刚度尚且不足时，宜在局部加贴钢板或在玻璃钢中粘贴高强钢丝和树脂砂浆等方法予以补充。

2、结构补强加固时，应根据不同部位的受力情况，采用不同的补强层厚度和铺布方式，但又要兼顾结构的整体性。

3、当原结构有较大裂缝或缺陷时，应事先采用树脂砂浆等对原结构进行修复，或在包覆玻璃钢时预留灌浆孔，在包覆后实施灌浆处理。

4、在补强施工中，首先必须将原结构表面上松散的砼或砂浆清除冲洗干净，并清除已锈蚀的筋网上的锈层，然后在保持干燥的前提下，再在表层涂刷树脂基液，并用树脂腻子将其填平压实，切实做好过渡层后，才可分层糊制玻璃钢补强层，以确保新老结构间的良好粘结。

5、要根据施工环境，选好合适的施工配比，准确称料，按规定方法配制基液及腻子。一次配料不宜过多，应及时使用。

6、分层糊制玻璃钢补强层时，一般应自上而下涂刷基液，使其浸润均匀。玻璃丝布应根据设计的铺设方向铺平，再刮平压实。要求各层均应无气泡、无分层、无折皱。各层固化后，如发

现上述疵漏时，应及时灌注基液或采用割补的方法予以处理。在各层固化并经检验合格后，再在边口作封边处理和涂刷表面胶。

7、糊制玻璃钢层时的温度以 $10-25^{\circ}\text{C}$ 为宜，应避免在温度过高、过低或在有雨、雾时施工，以保证固化良好。

8、玻璃钢补强加固施工中，还应有必要的安全防护措施，以确保施工安全。

## 六、结 论

(一)无论砼、钢筋砼或钢丝网水泥的梁、板、管、柱结构，在切实做好过渡层的前提下，表面包覆玻璃钢进行补强加固后，均于大幅度地提高原结构的承载能力，且刚度也有所提高。

(二)表层包覆玻璃钢的复合梁、板及受压杆柱的试验表明，经再复合后的各构件中的各项材料，能够形成新的统一体而协同工作。既可充分利用表层玻璃钢补强层的高强特性，又可充分利用原结构的刚度和现有强度。在荷载较小时，还能防止或抑制水泥砂浆或砼中的开裂，从而扩大了工程结构的弹性工作范围。

(三)采用玻璃钢补强加固方法施工中，无论是外包，内衬或局部玻璃钢补强加固，都必须充分做好原结构的表面处理和切实做好过渡层，尤其对于内衬玻璃钢补强，必要时还应采取必要的层间加固措施，以确保其施工质量。

(四)玻璃钢补强加固设计中，对梁式和受压构件结构，建议可按文中方法进行设计计算。但尚有待进一步完善。

(五)玻璃钢补强加固方法具有补强效果好、施工简便、基本不增加原结构断面尺寸和重量，且易做到不同部位不同要求等特点，特别适用于异形断面及轻型结构的补强加固，在有高空作

业时尤显其优越性。

### 主要参考文献

1、植村 益次主编(日)、北京玻璃钢研究所译,“纤维增强塑料设计手册”,中国建筑工程出版社,1986年,北京

2、罗建群、张慧娟:“玻璃钢作为混凝土结构补强材料的试验研究”,水利水运科学研究,1990年No.2,南京

3、罗建群、张慧娟:“玻璃钢/砼梁试验研究”,玻璃钢/复合材料,1986年No.2,北京

4、罗建群、张慧娟:“钢筋混凝土外包玻璃钢梁的研究”,玻璃钢/复合材料,1990年No.4,北京

5、张慧娟、罗建群:“玻璃钢/钢丝网水泥复合板性能研究”,玻璃钢/复合材料,1988年No.2,北京

6、罗建群等:“肋拱渡槽拱肋的病害处理”,山东水利科技,1992年No.3,济南

7、罗建群、张慧娟:“梁式结构外包玻璃钢的补强计算”,山东工业大学,1994年,济南

8、罗建群、张慧娟、赵治广:“受压构件外包玻璃钢补强加固计算方法探讨”,山东工业大学,1994年,济南