

# 预应力 FRP 加固工程结构技术研究进展

卢亦焱, 陈娟, 黄银燊, 吴涛

(武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

**[摘要]** 围绕国内外预应力 FRP 加固技术的研究现状以及最新进展, 从预应力 FRP 加固混凝土结构、预应力 FRP 加固钢结构、预应力 FRP 加固中关键技术的研究等方面进行了综述。试验研究表明: 预应力 FRP 加固混凝土能显著提高构件的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载, 改善受弯构件在长期荷载的力学性能, 提高构件的疲劳寿命; 预应力 CFRP 加固钢梁后, 其屈服荷载和极限荷载相对于对比梁都有明显的提高, 其提高的程度随着预应力 CFRP 的用量和预应力水平的提高而增大; 预应力 CFRP 加固对钢梁的刚度提高作用也比较明显, 对低强度的钢材, 提高效果更明显; 采用预应力 FRP 加固工程结构的关键问题在于预应力的施加体系、预应力控制值、预应力损失和端部的锚固。

**[关键词]** 纤维增强塑料; 加固技术; 混凝土结构; 钢结构; 研究进展

**[中图分类号]** TU58<sup>+</sup>1.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)08-0040-05

## 1 前言

纤维增强复合材料(fiber reinforced plastics, FRP)加固技术是一种用胶粘剂把 FRP 粘贴在结构外部以提高构件承载力的加固方法。由于 FRP 具有强度高、密度小、抗疲劳、耐腐蚀等优良的材料特性, 以及适用面广、施工方便等优点, 因此在加固工程中的应用越来越普遍, FRP 加固技术也成为目前国内外研究开发的一个热点。然而一般的加固工程中, 该方法仍然存在一些问题: FRP 的抗拉强度由于受构件变形的限制以及易出现 FRP 的剥离破坏而不能充分发挥; FRP 对处于使用阶段构件的加固效果不是很理想, 对加固构件的开裂荷载和屈服荷载提高不大, 往往是在受拉钢筋屈服后, FRP 的高强作用才得到发挥。

为了解决这些问题, 研究者提出将预应力技术应用与粘贴 FRP 加固技术中, 以发挥两者各自的优势。理论和实践表明, 预应力 FRP 的加固方法是可行的, 在提高构件的抗弯承载能力、整体刚度、疲劳寿命, 控制裂缝宽度、减小材料塑性徐变、降低构件挠度等方面都有着明显的作用<sup>[1~6]</sup>。文章在综合

有关资料的基础上, 结合笔者所做的研究成果, 综述了该技术研究的现状和最新进展。

## 2 预应力 FRP 加固结构力学性能研究

预应力 FRP 加固所用材料一般采用强度相对较高的纤维材料, 如碳纤维(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)和 PBO(poly-phenylene benzo-bis-oxazole)纤维复合材料等, 一般为片材, 从外形上又分为板材和布材。比较而言, FRP 板较适用于梁、板、柱的抗弯加固和抗剪加固; 而 FRP 布较适用于梁与柱的抗剪、抗弯加固, 柱与节点的抗震加固<sup>[7]</sup>。目前预应力 FRP 加固研究主要集中于对受弯构件加固的研究上。

### 2.1 预应力 FRP 加固混凝土构件受弯性能研究

Wight<sup>[2]</sup>、飞渭<sup>[8]</sup>、尚守平<sup>[9]</sup>、叶列平<sup>[10]</sup>等人进行了预应力与非预应力 CFRP 加固梁的试验研究, 发现由于预应力 CFRP 的存在, 梁的工作性能发生了变化, 内部发生了应力重分布, 使得采用预应力 CFRP 加固的梁, 其开裂荷载、屈服荷载、极限荷载均大幅度提高, 提高幅度远大于非预应力加固的提高幅度, 并可以改善裂缝发展。张坦贤、吕西林

**[收稿日期]** 2006-10-17

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(50678136), 湖北省青年杰出人才基金(2004ABB014)

**[作者简介]** 卢亦焱(1965-), 男, 福建永定县人, 武汉大学土木建筑工程学院教授, 博士, 博士生导师

等<sup>[11]</sup>进行了预应力及非预应力 CFRP 布加固一次和二次受力梁抗弯试验研究,结果表明用预应力 CFRP 布加固的梁在一次和二次受力时的开裂荷载、屈服荷载、挠度为 1/200 时的荷载、极限荷载均比用非预应力 CFRP 加固的梁大。研究指出,在平均施加预应力的情况下,一次受力与二次受力对极限承载力的影响不大,二次受力条件下的加固梁承载力略低。说明在加固过程中不易或不能预先卸荷的构件,用预应力 CFRP 布加固具有显著的优越性。T. Kojima<sup>[12]</sup>对破损梁采用 CFRP 加固后发现,受损伤梁加固后,在二次加载过程中不会有新的裂缝产生。钢筋屈服后,CFRP 板的应变仍然按线性变化,这证明了在钢筋屈服后,CFRP 仍有足够的承载力。

Bryan 等<sup>[13]</sup>研究了在加拿大等寒冷地区采用 CFRP 棒材给混凝土梁施加预应力的可行性,进行了在 -27 ℃ 低温下 CFRP 预应力混凝土梁短期受弯试验,结果表明 CFRP 棒材的短期性能不受低温的影响。El - Hacha<sup>[14]</sup>等试验了采用预应力 CFRP 布加固梁在室温(22 ℃)和低温(-28 ℃)下的短期和长期性能,重点研究了温度变化引起的材料或预应力的改变对加固梁的受弯性能的影响。试验结果表明,低温下加固梁强度的提高比在室温下的高 20%,预应力对温度的变化不敏感。试验中,未见低温下混凝土与 FRP 之间的粘结破坏;长期处于室温和低温下,FRP 的预应力水平均得到了充分的维持。

Wright<sup>[4,15]</sup>对预应力 FRP 加固混凝土梁和板的疲劳性能的研究表明,预应力加固对疲劳破坏更有效,预应力 FRP 布的存在,降低了内部钢筋的应力,减小混凝土的塑性蠕变和构件的变形,减少了裂缝的分布,提高了构件的疲劳寿命。

## 2.2 预应力 FRP 加固混凝土构件受剪性能研究

近年来研究者对预应力 FRP 加固混凝土的抗剪性能进行了研究。Lees J. M. 等<sup>[16]</sup>进行了未加固和预应力 CFRP 加固的梁的对比试验。结果表明,加固梁的极限抗剪承载力大大高于未加固梁,现行的设计规范和分析方法低估了对比梁和加固梁的抗剪承载力。

刘立新等<sup>[17]</sup>进行了预应力和非预应力 CFRP 加固受损和未受损钢筋混凝土梁受剪性能试验研究。结果表明,碳纤维一方面作为桁架模型的腹拉杆,改善钢筋混凝土梁内的受力状态来提高构件的抗剪承载力;另一方面通过限制斜裂缝的开展起到抗剪加固作用,因此无论是预应力碳纤维布还是非预应力碳纤维布加固,均能提高梁的整体刚度和变形性能,而提

高程度差别不大,但开裂荷载有一定提高,极限荷载显著提高。预应力碳纤维布由于预应力的存在,对结构有横向约束作用,可以更有效地限制斜裂缝的开展,使得裂缝变得细而密,改善破坏形态。

## 2.3 预应力 FRP 加固钢结构的研究

目前,国内外已进行了一些采用 FRP 对钢结构进行防腐蚀、防老化的维护加固研究,也有人开始考虑用 FRP 对钢桥、钢建筑物进行维护加固,革新原有的维护加固方法<sup>[18,19]</sup>。现有的采用碳纤维布加固钢梁的研究表明,在钢梁屈服前,碳纤维布所起的作用有限,其高强特性并没有得到充分发挥;试验梁破坏时碳纤维布中的拉应力仅为其抗拉强度的 10%~20%,加固效果不理想。其原因主要是由于碳纤维的截面较小,而且弹性模量与钢材的弹性模量相近,于是在相同荷载作用下经加固后结构在弹性阶段的应力与应变并没有得到有效减小。文献[20]采用数值方法分析了经过碳纤维加固后的钢结构,发现利用碳纤维布可以有效地提高钢结构部分进入塑性区后的刚度和承载能力,而一般钢结构设计并不考虑材料的塑性承载能力。

由此,研究者提出了采用预应力碳纤维布加固钢梁的方法,将 FRP 粘结修补技术的优势引入到钢结构加固修复工程中,以提高钢结构的承载能力和结构的可靠性。将碳纤维布进行张拉后再用于钢梁的加固,以使碳纤维布较早地参加工作,从而使其高强度的特点得以提前发挥,提高加固效果。

目前国内在预应力 FRP 加固钢结构领域内开展的研究工作和工程实例还不多。笔者采用设置永久锚具和反拱施加预应力的方法进行了加固钢梁的试验研究,结果表明<sup>[21]</sup>,预应力 CFRP 加固钢梁后,其屈服荷载和极限荷载相对于对比梁都有明显提高,其提高的程度随着预应力 CFRP 的用量和预应力水平的提高而增大。而且预应力 CFRP 加固技术对钢梁的刚度提高作用也比较明显,对低强度的钢材,提高效果更明显。在试验的基础上,笔者对预应力 CFRP 加固钢梁后的正截面承载力和挠度变化进行了理论分析,初步建立了预应力 CFRP 加固钢梁的理论计算体系。

## 3 预应力 FRP 加固的关键问题

尽管预应力碳纤维布加固技术相对于传统的碳纤维布加固技术有着一系列的优点,但是对预应力碳纤维布加固技术的研究,目前在国内外尚不够深入,待于深入研究内容主要集中在以下几个关键的方面。

### 3.1 预应力的施加体系

预应力 FRP 加固技术是一项新颖的加固技术,其中预应力的施加方法无疑是非常重要的。FRP 材料的整体强度要远远低于单丝纤维,工艺中的一个关键问题就是如何使得材料截面内力分布尽可能均匀,从而可以将 FRP 张拉至较高的应力水平。国内外不少研究单位在试验和实践中研究了施加预应力体系,方法主要有以下 3 种。

1) 反拱法。先将 FRP 片材用环氧树脂粘贴到梁的受拉面,然后用千斤顶从 FRP 片材外把梁从中部顶起,等胶固化后卸载,这样就对梁施加了一定的预应力。赵启林等<sup>[22]</sup>通过这种方法对碳纤维布施加预应力来加固钢梁,但是该方法仅适用于纤维片材,施工时容易造成梁上部开裂,施加的预应力水平较低且不易控制,具有一定的使用局限性。

2) 不设置永久锚具的外部张拉法。EI - Hacha<sup>[23]</sup>、飞渭、赵启林、尚守平<sup>[24]</sup>等在试验中施加预应力时均采用此种方法,即先用特制的预张拉设备张拉 FRP 布,再用环氧树脂将其粘贴到梁的受拉面,胶固化后,在梁的两端剪断,即施加了预应力。理论计算和试验研究表明,采用该方法,预应力碳纤维布的张拉预应力水平为 200 ~ 400 MPa,预应力水平较低。为了提高初始预应力水平,应该研究预应力 FRP 在梁端的有效锚固措施。

3) 在加固构件上设置永久性锚具。此种方法不需要外部反力架体系,而是利用加固梁自身提供的反力进行张拉,张拉完毕后碳纤维布粘贴在构件上,锚具保留在原位。这样可减小预应力碳纤维布放张时粘贴层的剪切变形,从而降低了传递给混凝土表面的剪力,有效防止了加固梁发生早期破坏,使碳纤维布的强度能充分发挥出来,而且它更适合加固现场施工操作,具有较好的应用前景。EI - Hacha 等延续了 Wright 等人的工作,开发了使用圆形钢筋锚拴的 FRP 预应力体系,对 CFRP 开始张拉至 650 MPa,相当于片材极限抗拉强度的 50 %。

### 3.2 预应力控制值

采用预应力 FRP 加固,可以有效改善结构的力学性能,但是 FRP 片材的张拉预应力并不是越大越好,过高的预应力存在以下问题:FRP 是由彼此之间没有粘结的单丝纤维组成,使得纤维之间应力分布很不均匀,缺乏延性使得单丝的纤维达到极限强度后即断裂;FRP 片材的应力松弛将随着张拉力的增大而增加;锚固端会由于剪应力值过大而造成破坏;张拉预

应力过大会造成混凝土受拉一侧出现微裂缝。因此,对 FRP 片材施加预应力应该控制在一定的范围内。

郭馨艳等<sup>[25]</sup>提出了将当预应力梁受拉一侧混凝土的应力达到其抗拉强度时的预应力作为容许张拉预应力,并提出了相应的计算公式。1991 年,Triantafillou<sup>[26]</sup>提出了在保证预应力体系不发生锚固破坏的条件下,获得最大预应力水平的分析模型,来预测最大预应力水平,确保释放预应力时端部锚固处不会破坏。次年,Triantafillou 对此分析模型进行了试验验证,试验结果与分析结果符合较好<sup>[27]</sup>。Garden 等人<sup>[28]</sup>认为较高的预应力水平可以较大地提高结构的刚度及混凝土的承载力,CFRP 板的预应力水平至少为 0.25。Deuring<sup>[29]</sup>认为,为了获得技术、经济上合理的预应力,应变应控制在 50 % 的板材极限应变范围内。Meier<sup>[30]</sup>认为预应力控制值影响加固梁的极限荷载和破坏模式。当预应力控制值是 FRP 抗拉强度的 60 % ~ 70 % 时,钢筋屈服,然后 FRP 板被拉断,因为此时钢筋和 FRP 板都被充分利用,所以此时为最佳。牛赫东等<sup>[31]</sup>通过理论分析,基于破坏力学的概念,提出了仅取决于界面破坏能的最大可施加预应力值: $\sigma_{pmax} = \sqrt{2G_f E_2 / t}$ ,其中, $G_f$ 代表界面破坏能, $E_2$ 代表 FRP 的弹性模量, $t$ 代表 FRP 的厚度,下标 p 表示预应力, $f$ 表示破坏。此公式仅适用于不采取任何应力减小措施的情况下,不发生由端部剪应力集中造成的剥离破坏时的最大预应力值。

### 3.3 预应力损失

Wight 认为预应力损失的幅度主要取决于预应力水平和梁的刚度。EI - Hacha 等人在试验中对粘贴不同长度预应力 CFRP 的梁的预应力损失进行了研究,结果表明,放张预应力后,预应力损失随着时间的增加而增加,长度较长的 CFRP 的预应力损失值较大。他认为长期的预应力损失主要是混凝土的收缩和徐变造成的。

Quanrill R. J. 等<sup>[32]</sup>通过试验表明,张拉预应力越大,CFRP 片材的有效预应力也越大,且呈线性增加,而且,理论计算结果与试验结果一致。另外,当 RC 梁结构一定时,张拉预应力的大小对 FRP 片材的预应力损失率无影响。

飞渭、叶列平等研究后指出,产生预应力损失的因素有:张拉设备的变形、FRP 布与转动轴之间的摩擦、混凝土压缩变形及徐变、CFRP 的松弛及蠕变、释放预应力引起的损失等。其中前 4 种因素的影响都较小,张放引起的预应力损失是最重要的因

素。预应力损失与预应力布的层数、宽度、长度、弹性模量以及施加预应力控制值有关。

### 3.4 端部的锚固

Wright 等在采用预应力 CFRP 加固混凝土板的疲劳试验中发现,由于端部锚固的存在,可以延迟 CFRP 的剥离,从而延迟加固板的最终疲劳破坏的发生。锚固对混凝土梁的极限荷载和破坏形式都有很大的影响。Merier 发现如果没有特殊的端部锚固,FRP 布在预应力水平为其抗拉强度的 5% 时锚固区域就发生了早期破坏。

一种常用的锚固措施是在梁端设置 U 形箍,它能够比较有效地防止预应力 FRP 不在梁端发生锚固粘结破坏,从而在一定程度上提高初始预应力水平。叶列平、尚守平、飞渭等人都是先通过外部反力架对碳纤维布进行张拉,然后进行粘贴,待粘贴的树脂养护至预定粘贴强度后释放张拉力,其梁端使用 U 形箍进行加固。试验证明,U 形箍对阻止端部剥离破坏起到了明显的作用,但当荷载到达一定水平后,U 形箍内侧又发生剥离,说明 U 形箍的施加数量与施加位置有待于进一步研究。另一种锚固措施是在粘结剂硬化后,在两端安装机械夹具,保证 FRP 的端部对预应力释放有足够的锚固,预应力通过硬化的粘结层传到梁上,最后切除多余的 FRP 布,获得预应力。机械夹持-树脂粘结型锚固方式综合了上述两种锚固方式的优点。其中一部分力通过树脂的粘结作用传递给套管,并通过粘结和夹片横向压力的综合作用进行锚固,取得了较好的效果。

牛赫东等在试验中对比了 3 种锚固方式:U 形纤维箍、方形纤维锚固、螺栓锚固。结果证明采用铆钉的锚固措施最为有效,他建议增加锚固面积及螺栓数量可提高荷载承受能力。

## 4 结语

国外在预应力 FRP 方面的研究时间较早,计算理论和施工技术都相对成熟,已经在许多重大工程中取得了显著成果。国内由于对于预应力 FRP 加固的很多问题还没有解决,使得这项技术在应用中不够成熟,还未完全推广到工程应用中,因此该领域有着广阔的发展前景。通过分析比较,提出以下几点建议供今后研究参考。

1) 国外已经进行了很多 FRP 筋材、棒材应用于加固的研究,而国内在预应力 FRP 加固方面起步较晚,研究大多局限于 FRP 片材方面,在新材料的开

发和研究方面应该进一步深入。

2) 目前还没有计算预应力 FRP 加固结构承载能力的设计计算公式。一般的理论计算过于理想,许多试验发现加固梁的极限荷载都小于理论承载力,需要大量的试验研究来进一步完善预应力 FRP 加结构的承载力、变形等计算模型和设计方法,为工程应用提供依据。

3) 为了将预应力 FRP 加固技术推广开来,还需要对预应力 FRP 的施工工艺进行进一步研究,以保证结构加固结构的可靠性,满足更高的加固补强要求。

## 参考文献

- [1] Amr A Abdelrahman, Sami H Rizkalla. Serviceability of concrete beams prestressed by carbon fiber reinforced plastic bars [J]. ACI, 1997 (7-8): 447-457
- [2] Wight R G, Green M F. Prestressed FRP sheets for poststrengthening reinforced concrete beams [J]. Journal of composites for construction, 2001(11): 214-220
- [3] Charles W. Dolan. Developments in non-metallic prestressing tendons [J]. PCI, 1990 (9-10): 80-88
- [4] Wight R G, El-Hacha R. Prestressed CFRP sheet for strengthening reinforced concrete structures in fatigue [A]. Proceedings of the 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures [C], 2003, 895-904
- [5] Luc R. Taerwe, Lambotte H. Loading tests on concrete beams prestressed with glass fiber tendons [J]. PCI, 1992 (7-8): 84-97
- [6] Ezzeldin Y, Sayed-Ahmed, Shelley L Lissel. Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) post tensioned masonry diaphragm walls: prestressing, behaviour and design recommendations [J]. Journal of Civil Engineering, 1999, 26:324-344
- [7] 薛伟辰. FRP 板加固混凝土结构研究进展 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2004(1): 40-41
- [8] 飞渭, 江世永. 预应力碳纤维布加固混凝土上受弯构件试验研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(2): 56-60
- [9] 尚守平, 彭晖. 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, 24(5): 24-30
- [10] 叶列平, 庄江波. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土 T 形梁的试验研究 [J]. 工业建筑(增刊), 2004, 34(370): 94-101
- [11] 张坦贤, 吕西林. 预应力碳纤维布加固一次二次受力梁抗弯试验研究 [J]. 结构工程师, 2005, 21(1): 34-40
- [12] Kojima T, Takagi N. Flexural strengthening of bridge by using tensioned carbon fiber reinforced polymer plate [A]. Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions [C]. 2001, 1939-1946
- [13] Bryan Paul E; Green Mark F. Low temperature behaviour of CFRP prestressed concrete beams [J]. Canadian Journal of Civil Engineering. 1996, 23(2): 464-470
- [14] El-Hacha R, Wight R G, Green M F. Innovative system for prestressing fiber-reinforced polymer sheets [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(3): 305-313
- [15] Wright. Prestressed CFRP sheets for strengthening concrete slabs in fa-

- tigue [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2003, 6(3): 175 - 182
- [16] Lees J M, Winistorfer A U, Meier U. External prestressed carbon fiber - reinforced polymer straps for shear enhancement of concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(4): 249 - 256
- [17] 彭 刚, 刘立新, 李险峰. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁受剪性能试验研究[J]. *河南科学*, 2005, 23(3): 407 - 410
- [18] Trent C Miller, Nfichael J Chajes, et al. Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates[J]. *Bridge Engineering*, 2001, 11(6): 51 - 56
- [19] Deng Jun, Lee Marcus M K, Moy, et al. Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate [J]. *Composite Structures*, 2004, 64(2): 205 - 215
- [20] 赵启林. 利用碳纤维恢复或提高军用桥梁承载力的数值分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2002, 3(4): 46 - 49
- [21] 吴 涛. 预应力 CFRP 加固钢梁抗弯性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005
- [22] 赵启林, 王景全, 金广谦. 碳纤维加固的“反拱预应力技术”及其提高钢结构承载能力的分析[J]. *钢结构*, 2002, 17(3): 51 - 54
- [23] El - Hacha, Green M F. Prestressed fiber - reinforced polymer laminates for strengthening structures[J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2001, 3(2): 111 - 121
- [24] 尚守平, 彭 晖. 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, 24(5): 24 - 30
- [25] 郭馨艳, 黄培彦, 郑小红. 预应力 FRP 加固 RC 梁的受力分析 *华南理工大学学报(自然科学版)* [J]. 2005, 33(7): 6 - 10
- [26] Triantafillou, Deskovic. Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short - term behavior [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1991, 117(7): 1652 - 1672
- [27] Triantafillou, Deskovic. Strengthening of concrete structure with prestressed fiber reinforced plastic sheets [J]. *ACI Structural Journal*, 1992, 89(3): 235 - 244
- [28] Garden H. N., Hollaway. An experimental study of the strengthening of reinforced concrete beams using prestressed carbon composite plates[A]. *Proceeding of the 7th international conference on Extending the life of Bridge*[C], 1997. 191 - 199
- [29] Deuring M. Post - strengthening of concrete structures with pre-tensioned advanced composites [S]. *EMPA Report No. 224*, 1993
- [30] Merier U. Strengthening of structures using carbon fiber composites [J]. *Construction and Building Materials*, 1995, 9(9): 191 - 199
- [31] 牛赫东, 吴智深. 预应力 FRP 纤维布粘结补强技术中的界面剪切应力传递[A]. *第二届全国土木工程纤维增强材料(FRP)应用技术学术交流会论文集*[C]. 中国, 昆明, 2002.
- [32] Quanrill R J, Hollaway L C. The flexural rehabilitation of reinforced concrete beams by the use of prestressed advanced composite plates [J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 58: 1259 - 1275

## New progress in study of the technology of strengthening structures with prestressed fiber reinforced plastics

Lu Yiyan, Chen Juan, Huang Yinshen, Wu Tao

(*School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

[Abstract] The application of fiber reinforced plastics (FRP) in strengthening projects is one of the most popular fields in the studies in civil engineering. Practices and theories have testified that the technology of strengthening structures with prestressed FRP is feasible with obvious advantages. A concise state-of-the-art survey and new progress of the technology of strengthening structures with prestressed FRP are presented, including studies in terms of concrete structures strengthening with prestressed FRP, steel structures strengthening with prestressed FRP and the key problems in its practical application. Experimental studies revealed that strengthened with prestressed FRP, the cracking load, yielding load and ultimate capacity of RC beams increased obviously, behaviors of flexure members under long-term load were improved, and the fatigue life of concrete members were also increased. Strengthen steel beams with prestressed FRP, the yielding load and ultimate capacity increased obviously, with greater increase when more CFRP were used or at higher prestress level. Prestressed CFRP contributed to the rigidity of steel beam especially when strength of steel is relatively low. The key problems in practical application of the technology of strengthening with prestressed FRP include the studies on prestress applying system, prestress control value, prestress loss and end anchorage system.

[Key words] fiber reinforced plastics; strengthening technology; concrete structures; steel structures; research progress