

学术论文

# PBO 纤维片材预应力外粘结加固集成新技术

吴智深, 岩下健太郎, 牛赫东

(日本国立茨城大学都市系统工程, 日本九州 日立市 316-8511)

**[摘要]** 近年采用外部粘结纤维增强复合材料 (FRP) 来加固结构越来越受到许多研究开发机构和生产单位的重视。结合作者在 FRP 方面的研究成果和最新开发出的高强高性能的 PBO 纤维材料, 系统地提出了一种更为有效的预应力外粘结加固方法; 通过与玻璃纤维、炭素纤维和芳纶纤维等的比较, 认清了新型 PBO 纤维材料的特性; 根据既有的试验和研究成果提出了一套完整的预应力加固方法的流程, 包括概念、原理和几种降低端部界面应力和新型锚固的措施; 室内小型试验和室外大型试验的结果表明, PBO 片材预应力技术能够提供令人满意的加固性能。

**[关键词]** 纤维增强聚合物 (FRP); PBO 纤维片材; 增强加固; 外粘结; 锚固措施

**[中图分类号]** TB332; TB333 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2005) 09-0018-07

## 1 引言

目前, 现存的许多结构设施, 从道路、桥梁、隧道、烟囱、房屋建筑到容器、水道和海洋工程结构, 由于老化, 不当的设计, 施工管理的不当, 使用目的的改变, 环境腐蚀、损坏而导致结构缺陷或功能过时, 亟需修复加固或改造。鉴于翻新重建的费用巨大, 所以各国政府和相关部门都在寻求经济有效的新的结构增强加固改造技术。传统的增强方法诸如外包钢筋混凝土法增厚, 外张拉钢索法和外粘钢板法都常遭受施工困难、工期长、耐久性差、增强效果有限并给原结构增加较大负荷。近年材料工业的迅速发展使得成功用于宇航飞行领域的具有重量轻、刚度和强度高、抗腐蚀性和疲劳性强的 FRP 复合材料 (fiber reinforced polymer) 成为土木工程领域中潜在的新型增强加固材料。

通过粘结材料 (通常为环氧树脂) 将 FRP 纤维片材粘贴于需增强加固的结构物表面的方法已经作为一种有效的、创新的结构加固方法而风靡全球。试验表明, 通过粘贴 FRP 纤维片材能够增大

结构的刚度、裂缝控制、钢筋屈服荷载和极限承载能力。但是由于 FRP 使用量与钢筋量相比非常小, 结构变形、裂缝控制能力以及钢筋屈服荷载的增强幅度有限。同时, FRP—混凝土界面有限的传递能力却会大大降低预期的加固效果, 导致脆性破坏, 例如在 FRP 端部的早期破坏, 由剪切或弯曲裂缝引起的剥离破坏等。通常, 在用非预应力的 FRP 纤维片材修补结构物时, 对高强度的 FRP 复合材而言, 只有一部分的强度被充分利用, 剩下的部分由于粘结界面的关系而未被加以利用。再者, 这种纤维片材外部粘结方法对处于工作状态或具有一定损伤状态的既有结构的加固效果会有明显下降。对于具有一定损伤状态的既有结构而言, 外张拉 FRP 不能促使这些已有的损伤恢复。为充分发挥这些材料的优势及解决上述的诸类问题, 采用像传统的预应力结构方法一样先张拉 FRP 纤维片材, 然后将其粘贴于结构物表面并养护, 最后释放张拉端。这样初始预应力可用来平衡结构的自重和一部分荷载, 从而能够充分发挥 FRP 的增强效果, 诸如大大推迟裂缝的进展和减小裂缝宽度, 有效地增

**[收稿日期]** 2005-01-23

**[作者简介]** 吴智深 (1961-), 男, 江苏镇江市人, 日本国立茨城大学教授, 博士生导师

强结构的刚度，缓解内部钢筋的应变，提高钢筋的屈服荷载和结构的极限承载能力<sup>[1~3]</sup>。虽然预张拉 FRP 增强方法有这么多优点，但也会带来一个问题，如预应力会引起张拉端的剪应力集中，过大的预应力可能会导致施加外载前的早期剥离破坏，这已经在过去的实验中得以发现<sup>[1,2,4]</sup>。这同时表明在应用预张拉 FRP 增强方法时，预张拉端部的处理措施非常重要。另一方面，FRP 片材张拉及粘结对纤维材料素材有一定的要求。近年来人们对炭素纤维片材的外张拉粘结方法进行了不少探讨。但存在着后述的种种问题很难将其实用化。为了充分发挥加固材料的潜在能力和有效地提高加固性能，笔者旨在系统地解决上述的各种问题，并建立一套革新的 FRP 片材的预应力加固方法和体系。其中，新型的 PBO 纤维材料的基本性能和特性被得到了充分的活用。

## 2 预应力张拉复合材料——PBO 纤维材料

近来，一种由日本东洋纺织股份有限公司开发的新型 PBO 纤维材料（PBO 为其学名 poly-p-phenylene benzo-bis-oxazole 首位字母的缩写，如图 1 所示）具有与炭素纤维相同或更高的弹性模量和张拉强度。PBO 纤维与其他各类纤维的力学指标的比较见图 2。另外，尤为重要是它的耐冲击性能或者说是能量吸收性能要远高于炭素纤维和芳纶纤维（如图 3 所示）。这一点作为结构增强材也非常重要，比如说可承受局部破坏所引起的冲击效应，从而有效地防止更大的破坏。此外，从未含浸纤维片材的单轴张拉实验结果（图 4）可见，常用

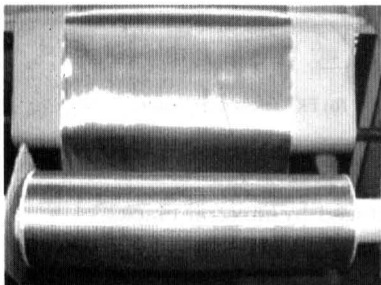


图 1 PBO 纤维片材

Fig.1 PBO fiber sheets

的炭素干纤维片材由于其能量吸收能力较低，2 m 长的炭素干纤维片材在张拉至其设计张拉强度的

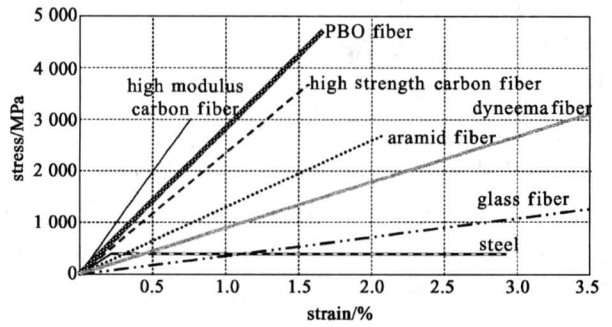


图 2 各种纤维的应力-应变性能

Fig.2 Stress-strain relations of different fibers

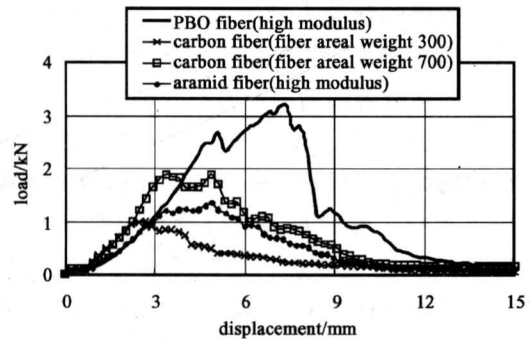


图 3 PBO 的耐冲击性能

Fig.3 Results of impact test

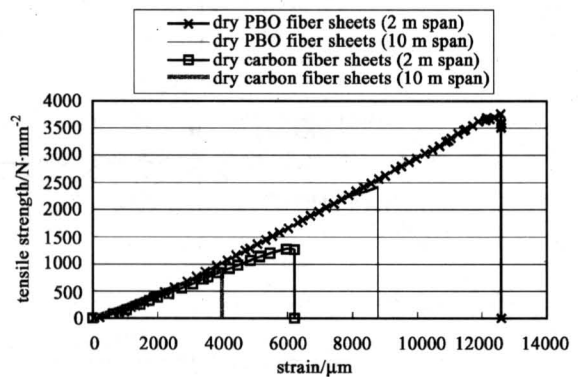


图 4 未含浸纤维片材的张拉实验

Fig.4 Tension test of dry fiber sheets

40% 就会全部被拉断，10 m 长的炭素干纤维片材的张拉能力仅能达到其设计张拉强度的 27%；而 2 m 长的 PBO 干纤维片材却可以张拉至其设计张拉强度的 90% 以上，10 m 长的 PBO 干纤维片材也可以张拉至其设计张拉强度的 60% 以上<sup>[5,6]</sup>。该结果同时也表明，采用 PBO 纤维片材在预张拉之前可

以不需要浸含树脂、养护等不必要的劳力和工期，而直接张拉干纤维片材。考虑到目前施加预应力都是采用含浸树脂硬化而成的 FRP 板，费时费力，并且这又很难保证 FRP 板与结构的混凝土表面之间良好的粘贴效果，尤其对于被加固的结构表面为凹凸不平的情况，界面不均匀或凹凸不均匀容易造成 FRP 的剥离而使增强加固失效，采用这种直接张拉干纤维片材的方法并配以特殊的界面处理方法，施工简易并能基本保证良好的粘贴效果。

### 3 PBO 纤维片材预应力加固的概念和原理

正如传统的预应力结构一样，通过 PBO 纤维片材对结构施加预应力能够充分发挥 PBO 材料的特性，有效地改善结构的受力和变形能力，从而达到良好的加固效果。PBO 纤维片材预应力加固混凝土结构的简单流程如图 5 所示，先张拉无浸含的 PBO 纤维片材，然后再通过浸含和粘结剂粘贴于结构物表面并硬化养护，最后释放张拉端。FRP 片材外粘结加固技术中的中心环节问题是确保良好的粘结界面。通常，在 FRP 纤维片材或板的端部

以及裂缝端部容易引起界面剪应力的集中，导致界面剥离而使加固达不到预期效果。考虑到界面的剪应力成因是源于 FRP 中的应力分布差，FRP 中预应力的存在在端部以外的地方不会引起额外的界面剪应力，这一点与非预应力加固方法完全一样（图 6）。但是，值得注意的是由于预应力端部的张拉释放，应力由无到有的变化会使剪应力集中加剧，设计和处理不当会导致端部发生剥离破坏。同

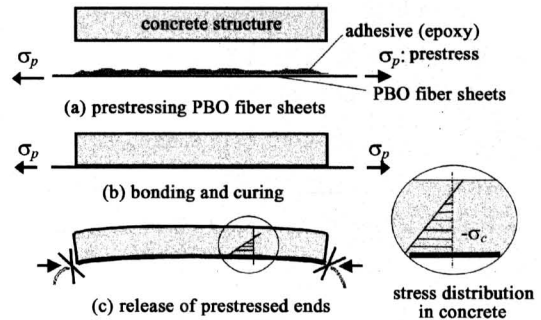


图 5 预应力 PBO 纤维片材加固混凝土结构的概念

Fig.5 Concept of strengthening of concrete structure with prestressed PBO fiber sheets

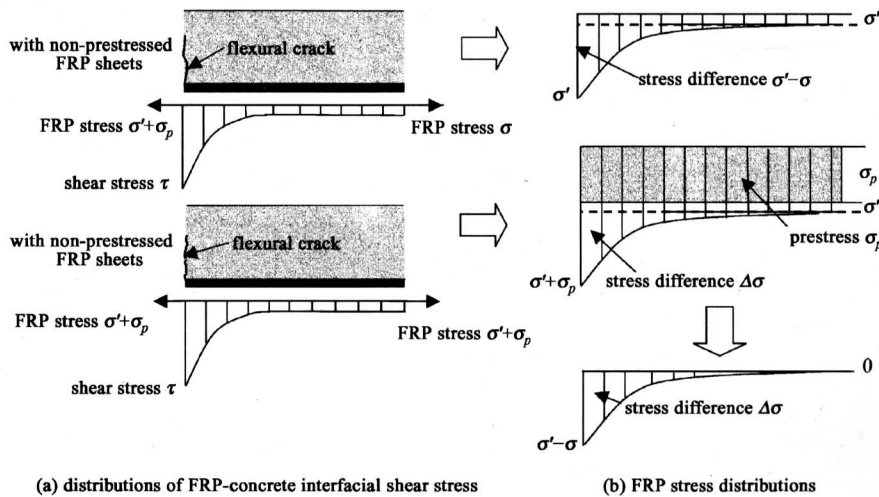


图 6 受弯裂缝引起的界面和 FRP 内部应力分布

Fig.6 Interface and FRP stress distributions induced by flexural cracks

时，大吨位的预应力所造成的端部剪应力集中很难用通常的方法加以锚固，为此就需要针对张拉释放后的受力特点开发出端部的应力低减措施。如图 7 所示，可在 FRP 纤维片材端部采用 U 型 FRP 纤维片材或螺栓、锚钉锚固，但这两种措施并没有改善局部的应力集中现象，仍然受制于界面的粘结承载

能力，应称为被动的锚固方法。经理论研究发现<sup>[8]</sup>，在线弹性界面本构关系的情况下，端部的界面剪应力与施加的预应力大小、FRP 纤维片材厚度的平方根成正比。为了更有效地利用界面的承载能力，应从这两方面入手：在靠近端部的地方逐步减少张拉应力并在应力变化处采用螺栓锚钉或 U

型 FRP 纤维片材加以锚固；对于多层 FRP 纤维片材张拉在靠近端部的地方可采用逐步减少层数的方法并使用 U 型 FRP 纤维片材锚固。具体的原理和实际操作如图 8 和图 9 所示。为了保证这些方法的有效性，建议厚度或预应力变化的间隔应超过剪应力传递的有效长度。经理论计算<sup>[9]</sup>，对于一层 FRP（包括炭素纤维和 PBO 纤维）有效长度不会超过 15 cm，建议采用 15~20 cm 的间隔。

另外，为了保证 FRP 纤维片材与结构物表面的完全粘结，尤其针对不平整或拱形的结构表面，本张拉系统采用真空泵装置来使 FRP 纤维片材和结构物表面之间形成真空状态而保证界面的良好粘结。具体装置如图 10 所示。

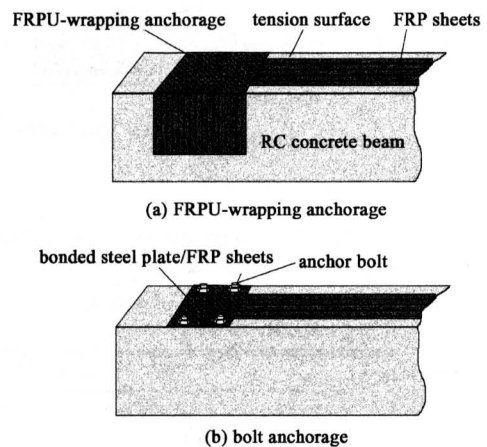


图 7 被动的端部锚固措施<sup>[2]</sup>

Fig.7 Passive anchorage measures

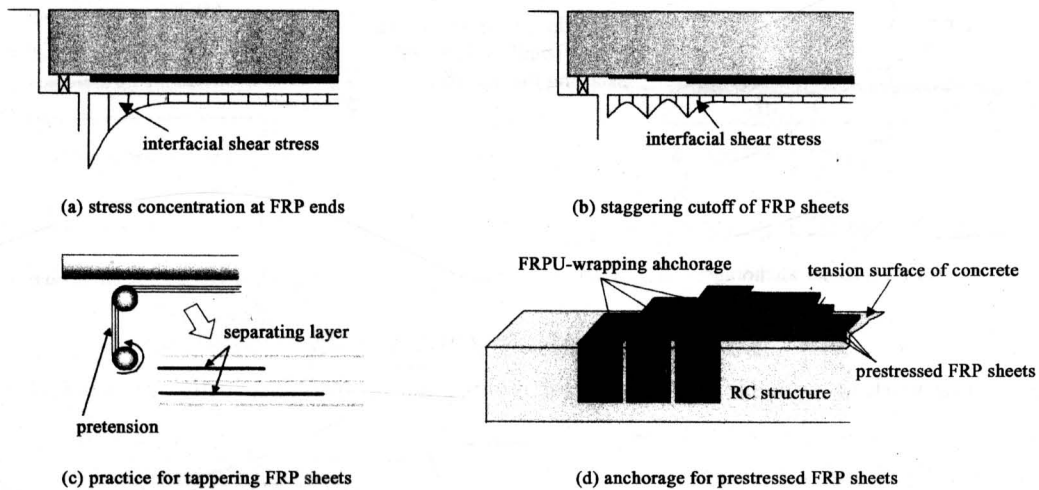


图 8 逐步减小被张拉的 FRP 层数的张拉锚固原理及实际操作图

Fig.8 The working principle and practice for tapering FRP sheets towards FRP ends

### 4 PBO 纤维片材预应力加固的实际施工方法

PBO 纤维片材预应力加固的实际施工方法可参照图 11。为了配合实际应用的要求，笔者的研究组开发了一套可实际操作的预应力设备（图 12），可方便地应用于实际桥梁等的加固作业中。笔者应用于此装置先后进行了跨径 10 m 和 16.7 m 的大型公开实验，验证了其各项性能，实验现场吸引了政府、大学、研究机构等有关部门共约 300 人的参加。

### 5 预应力 PBO 纤维片材加固的实验验证

笔者的研究小组在过去的 6 年间，系统地对 FRP 预应力加固方法进行了研究<sup>[2, 5~7]</sup>。从 2 m 跨径的小型梁试件（15 cm×20 cm）到跨径为 10 m，16.7 m 的大型 T 型梁（1 m 高），对混凝土强度、纤维种类、纤维的增强量、预应力大小、锚固措施以及疲劳性能等设计参数进行了大量实验研究。实验结果证实了预应力 FRP 纤维片材能够大幅度地提高结构物的强度、刚度、抗开裂和变形能力；高强度的混凝土材料能更有效地发挥预应力

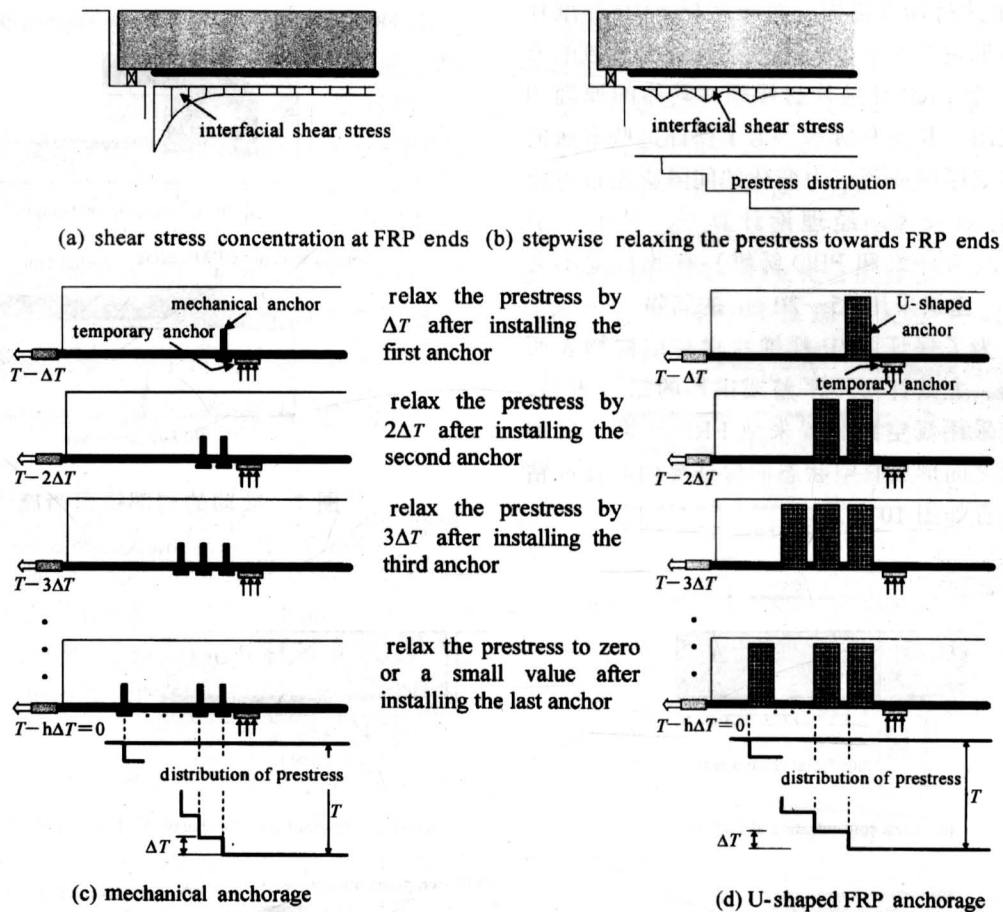


图 9 逐步释放预应力的张拉锚固原理及实际操作图<sup>[5]</sup>

Fig.9 The working principle and practice for relating the prestress gradually towards FRP ends

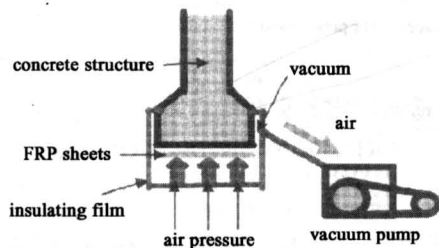


图 10 真空装置<sup>[6]</sup>

Fig.10 Air bag system for a perfect bonding

FRP 纤维片材的潜力；采用预应力 PBO 纤维片材比预应力炭素纤维片材的延性要好；疲劳实验发现，预应力 PBO 纤维片材的疲劳性能与无张拉的加固性能几乎没有显著差别，PBO 纤维片材的破坏应变、挠度和裂缝宽度基本上不随循环加载次数的变化而变化。这些实验进一步验证了预应力 PBO 纤维片材加固方法的有效性。目前，预应力 PBO 纤维片材的加固方法在日本国道 256 号榎木

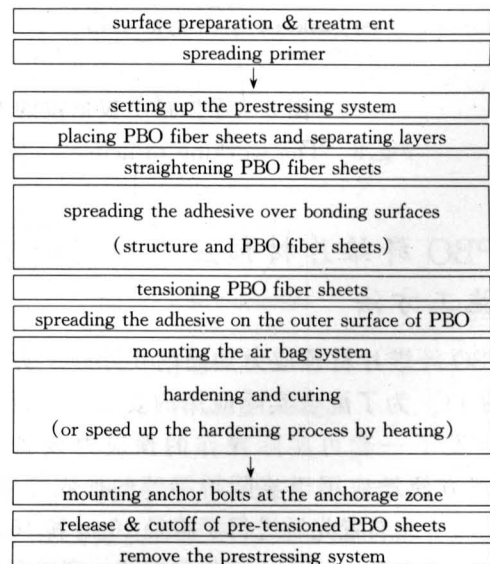


图 11 PBO 纤维片材预应力加固的实际流程

Fig.11 Flowchart of practical application

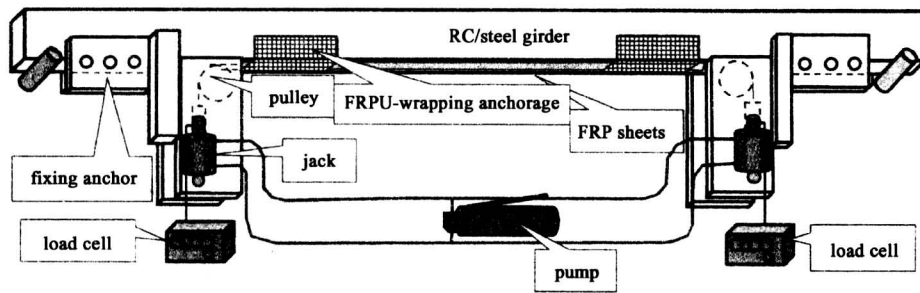


图 12 实际应用的预应力装置

Fig. 12 Practical application apparatus for prestressing PBO fiber sheets

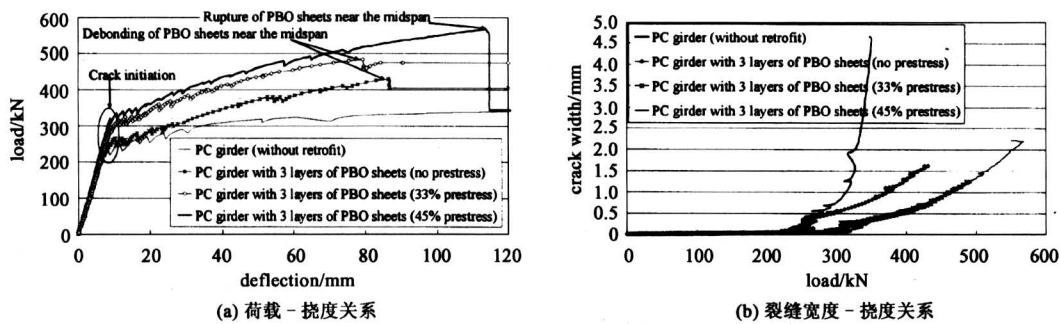


图 13 预应力 PBO 纤维片材的增强效果 (10 m 跨径的大型梁实验的部分结果)<sup>[6]</sup>

Fig. 13 Strengthening effect of prestressed PBO fiber sheets

RC 箱梁桥以及某高速公路高架预应力桥的加固改造中得到了具体应用，日经建设 (Nikkei Construction, 2003-03-28) 对此进行了重点报道。预应力 PBO 纤维片材加固的实际应用研究仍在进行，以后将有更详细的报告。

## 6 结论

FRP 纤维片材加固方法近来已经被作为一种先进技术引起国内外的注意。但是，常规的 FRP 纤维片材外粘结加固方法并不能充分发挥 FRP 纤维片材的潜力。为此，笔者结合高性能 PBO 纤维材料提出了一整套完整的预应力加固方法，其实用性和有效性在实验中得到了进一步验证。此技术将在各种重大结构工程的增强加固中发挥决定性的作用。

此工作为茨城大学与安部工业所、东邦 Earthtech、新日铁复合材料、东洋纺等公司的共同研究。

## 参考文献

- [1] Triantafillou T C, Deskovic N, Deuring M. Strengthening of concrete structures with prestressed fiber reinforced plastic sheets [J]. ACI Structural Journal, 1992, 89(3): 235~244
- [2] Wu Zhishen, Tanabe K, Matsuzaki T, et al. A retrofitting method for concrete structures with externally prestressed carbon fiber sheets [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 44A: 1299~1308 (in Japanese)
- [3] El-Hacha R, Wight R G, Green M F. Prestressed fiber-reinforced polymer laminates for strengthening structures [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2001, 3(2): 111~121
- [4] Stöcklin I, Meier U. Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips [A]. Proceedings of the Fifth International Conference on Fiber-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5) [C], Cambridge, UK, 16~18 July, 2001. 291~296

- [5] Wu Zhishen, Niu Hedong. Recent developments in FRP strengthening techniques[A]. The Third Middle East Symposium on Structural Composites for Infrastructure Applications[C], Aswan, Egypt, 17~20 December, 2002. 255~269
- [6] Wu Zhishen, Iwashita K, Hayashi K, et al. Strengthening Prestressed-concrete girders with externally prestressed PBO fiber reinforced polymer sheets [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2003, 22(14): 1269~1286
- [7] Wu Zhishen, Iwashita K, Hayashi K, et al. Upgrading method of RC flexural structures with externally prestressed PBO fiber sheets[J]. Journal of the Japan Society for Composite Materials, 2002, 28(4): 146~155
- [8] 牛赫东, 吴智深. 预应力 FRP 纤维布粘结增强技术中的界面剪切应力传递[A]. 第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流会议文集[C], 昆明, 2002. 74~85
- [9] Niu Hedong, Wu Zhishen. Finite element analysis on anchorage treatment in concrete structures flexurally strengthened with prestressed FRP laminates [A]. Proceedings of JCI International Symposium on Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures [C], Kyoto, July 2003. 69~76

## Study on Strengthening Technique with Prestressed PBO Fiber Sheets

Wu Zhishen, Iwashita Kentaro, Niu Hedong

(Department of Urban & Civil Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316-8511, Japan)

**[Abstract]** The application of externally bonded fiber reinforced polymer (FRP) laminates to the exposed faces of concrete members provides an innovative and efficient rehabilitation method for strengthening and upgrading structurally inadequate or functionally obsolete concrete structures. However, FRP laminates unlike the cold worked steel exhibit elastic-rupture behavior and also the limited bond capacity of FRP-concrete interface often fails the retrofitted system in an undesirable brittle manner, which leaves FRP material unused with more reserves. Moreover, enhancements in cracking and yield load due to FRP bonding are not significant. To take full advantage of FRP laminates, more gains can be achieved by prestressing the fibers prior to bonding them. Traditional practice is to pretension fiber sheets impregnated with adhesive or FRP plate, which is time-consuming, difficult to apply in the field and ensure a perfect bond at the interface. A newly-developed PBO fiber possesses high modulus, high strength and higher energy absorption capability as compared to carbon and aramid fibers, and PBO fiber sheet can be pretensioned to over 70% of its tensile strength without being impregnated with adhesive. All these make such material suitable to be prestressed for strengthening concrete structures. Based on the experiments and theoretical studies, a comprehensive strengthening method with prestressed PBO sheet is established including concept, working principle and corresponding countermeasures, whose strengthening effect is validated by both laboratory and field experiments.

**[Key words]** fiber reinforced polymers (FRP); PBO fiber sheet; retrofit/repair; bond; prestressing; anchorage