

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200000.000000

体外预应力纤维增强树脂基复合材料 (FRP) 筋混凝土结构研究进展

^{*}, AA
()

摘 要: 本文从纤维增强树脂基复合材料 (FRP) 筋、关键技术和构件三个主要方面综述了体外预应力 FRP 筋混凝土结构的研究成果: ①介绍了预应力 FRP 筋拉伸性能和长期性能, 给出了面向设计的 FRP 筋蠕变断裂应力值、松弛率以及疲劳最大应力和应力幅限值。②阐述了预应力 FRP 筋三种主要锚固技术的优缺点和减小锚固端应力集中的方法, 重点介绍了近年来新开发的复合材料夹片锚具, 其锚固效率系数高于 90%; 同时, 基于转向 FRP 筋力学性能试验结果, 建议转向半径不宜小于 FRP 筋半径的 200 倍, 转向角度不宜大于 5°。③梳理了体外预应力 FRP 筋混凝土构件的试验研究结果 (单调加载、长期持荷和循环加载), 介绍了国内外规范中的设计方法, 并基于既有文献中 42 根梁的试验结果评价了规范中计算方法的精度, 验证了我国规范 GB 50608—2020 中体外预应力 FRP 筋混凝土结构设计计算方法的准确性。本综述将对体外预应力 FRP 筋混凝土结构的推广应用起到积极推动作用。

关键词: 体外预应力; 混凝土结构; 纤维增强树脂基复合材料 (FRP) 筋; 长期性能; 锚固; 转向; 试验研究; 设计方法

中图分类号: TU599 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2021)00-0001-17

A review of the studies on concrete structures prestressed with external fiber reinforced polymer (FRP) tendons

^{*}, AA
()

Abstract: The studies on concrete structures prestressed with external FRP tendons are reviewed in the aspects of FRP tendon, key technology and structural component, in this review. Firstly, the tensile properties and long-term behaviors of FRP tendon are introduced. The design-oriented values of creep-rupture stress, relaxation rate and the limits of maximum fatigue stress and fatigue stress range are provided. Secondly, the advantages and deficiencies of three main types of anchor for FRP tendon, and the methods of reducing the stress concentration on FRP tendon at anchor are elaborated. The newly-developed composite-wedge anchor is emphasized, which possesses an anchor efficiency coefficient exceeding 90%. Meanwhile, the deviation radius is recommended to be larger than 200 times of the radius the cross-section of FRP tendons, and the deviation angle of FRP tendons should not exceed 5°, based on the experimental results on the mechanical properties of deviated FRP tendons. Thirdly, the experimental results of concrete beams prestressed with external FRP tendons are reviewed, including monotonic loading, sustained loading and cyclic loading. The design methodologies in the codes at home and overseas are introduced. The accuracies of the calculating methods in the codes are evaluated using the experimental data of forty-two beams, and the methods in the Chinese code GB 50608—2020 are validated to be accurate in the design calculation for con-

收稿日期:
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200000.000000>
基金项目: 国家自然科学基金 (基金号)
通信作者: 姓名, 学历, 职称, 硕士生/博士生导师, 研究方向为..... E-mail:

引用格式: , AA. 体外预应力纤维增强树脂基复合材料 (FRP) 筋混凝土结构研究进展 [J]. 复合材料学报, 2021, 0(0): 1-17.
, A. A. A review of the studies on concrete structures prestressed with external fiber reinforced polymer (FRP) tendons[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 0(0): 1-17(in Chinese).

crete structures prestressed with external FRP tendons. This paper is expected to actively promote the popularization and application of concrete structures prestressed with external FRP tendons.

Keywords: external prestressing; concrete structures; fiber reinforced polymer (FRP) tendon; long-term behavior; anchors; deviation; experimental study; design methodology

体外预应力技术是一种适用于中小跨径桥梁和建筑结构的有效加固/增强技术, 该技术将预应力筋在结构体外进行张拉, 利用预应力筋的回缩对结构产生预加力以抵消外荷载引起的内力, 实现限制结构裂缝和变形、提高承载力的目的。体外预应力技术避免了体内预应力的孔道布置、灌浆等工序, 且方便维护管理人员对预应力筋进行质量检查, 一旦发现问题(如预应力筋受到腐蚀、火灾等外部因素的影响)可及时采取措施^[1]。除锚固端外, 体外预应力筋仅在转向块处与结构体接触, 可减少孔道摩擦造成的预应力损失。预应力筋是预应力结构中的关键部件, 在海洋等严酷环境下, 布置在结构体外的预应力钢筋、钢绞线容易遭受外界腐蚀环境的影响, 一旦高应力状态的预应力筋在腐蚀介质作用下发生锈蚀, 将严重威胁结构安全性。

耐腐蚀的纤维增强树脂基复合材料 (FRP) 是工程界公认的严酷环境下替代传统钢筋, 提升结构耐久性的理想材料, 美国 ACI 440.4R 规范^[2] 建议碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP) 筋和芳纶纤维增强树脂基复合材料 (AFRP) 筋作为预应力材料使用, 从二十世纪八十年代起, CFRP 筋和 AFRP 筋体外预应力技术 (图 1) 开始在美日欧等发达国家得到大量应用^[3-5], 实现了结构承载力、刚度、抗裂性等综合性能提升。预应力玄武岩纤维增强树脂基复合材料 (BFRP) 筋的研发较晚, 目前尚未在体外预应力实际工程中得到应用, 但其优越的力学性能和高性价比在预应力工程中将具有显著优势^[6,7]。由于 FRP 筋的材料性能与传统预应力钢筋、钢绞线区别较大, FRP 筋体外预应力技术的应用需解决以下关键问题: ①FRP 筋长期力学性

能(蠕变、松弛和疲劳)不明确; ②FRP 筋的横向强度远低于纵向强度, 锚固工艺复杂; ③转向区 FRP 筋弯折导致其力学性能降低明显; ④需建立有效的设计计算方法。

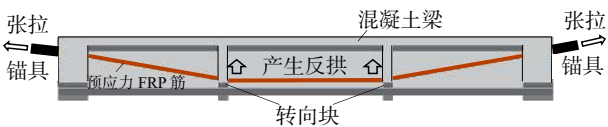


图 1 体外预应力纤维增强树脂基复合材料 (FRP) 筋混凝土结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram for a concrete structure prestressed with external fiber-reinforced polymer (FRP) tendons

针对上述瓶颈, 各国学者开展了大量理论与试验研究, 并取得了相关成果。本文从预应力 FRP 筋力学性能、体外预应力 FRP 筋应用关键技术(包括锚固和转向)和体外预应力 FRP 筋混凝土构件三方面, 归纳总结了国内外体外预应力 FRP 筋混凝土结构的研究成果, 并通过既有文献中 42 根体外预应力 FRP 筋混凝土梁的试验结果, 对国内外规范中设计方法的精度进行验证。

1 预应力 FRP 筋力学性能

1.1 拉伸性能

FRP 筋在大部分预应力工程中主要承受顺纤维方向的拉应力, 因此拉伸性能是预应力 FRP 筋的最重要、最基本的性能, FRP 筋、高强钢筋和钢绞线力学性能的拉伸性能如表 1。从表中可以看出, CFRP 筋的拉伸强度和弹性模量最高, 但材料延伸率低, 且热膨胀系数几乎为零, 在温度作用下不能与混凝土结构同步变形, 容易产生温度应力, AFRP 筋的“热缩冷胀”特性也存在类似问题。虽然 BFRP 筋的强度和弹性模量不及 CFRP 筋, 但 BFRP 延伸率较高, 且热膨胀系数与混凝土

表 1 FRP 筋、高强钢筋、钢绞线拉伸性能^[8]

Table 1 Tensile properties of FRP tendons, high-strength steel bar and steel strand

Type of tendon	Density/(g/cm ³)	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Elongation/%	Longitudinal thermal expansivity/(10 ⁻⁶ /℃)
CFRP tendon	1.5	1 500~2 500	120~160	0.5~1.7	-2~0
BFRP tendon	2.0	800~1 800	50~60	1.6~3.0	6~8
AFRP tendon	1.4	1 000~2 000	40~120	1.9~4.4	-6~-2
High-strength steel bar	7.85	490~700	200	>10	11.7
Steel strand	7.85	1 400~1 860	180~200	>4	11.7

土接近，不易产生较大的温度应力。另一方面，BFRP 筋的弹性模量较低，仅为 CFRP 的 1/3 左右，由混凝土收缩徐变产生的 BFRP 筋预应力损失将明显小于 CFRP 筋的相应值。

相比于短期力学性能，FRP 筋长期力学性能才是体外预应力 FRP 筋混凝土结构服役性能的关键控制因素。例如，蠕变断裂性能是决定预应力 FRP 筋的设计应力取值的关键因素，FRP 筋松弛是预应力损失的重要组成部分，疲劳性能限制了 FRP 筋使用期间的最大疲劳应力和应力幅。下文将介绍 FRP 筋蠕变、松弛和疲劳性能方面的既有研究结果，并给出面向设计的 FRP 筋蠕变断裂应力建议值、松弛率以及最大疲劳应力和应力幅限值。

1.2 蠕变和松弛性能

蠕变和松弛两种现象的本质相同，均由树脂的黏弹性变形引起。蠕变是材料在恒定应力下应变随时间的推移而增加的现象，反之，松弛是材料在恒定应变下应力随时间的推移而减少的现象。预应力 FRP 筋的蠕变和松弛会对结构长期性能造成不利影响，在过大的长期应力下，FRP 筋在服役期间会发生断裂，该现象被称为蠕变断裂，保证 FRP 筋在一定时间（一般取 50 年、100 年，或取 50 万小时、100 万小时）不发生蠕变断裂的最大应力被称为蠕变断裂应力。关于蠕变断裂性能，国内外很多学者经过蠕变断裂试验研究，提出了 CFRP 筋、AFRP 筋和 BFRP 筋的蠕变断裂应力（表 2），其中， f_u 是 FRP 筋的抗拉强度。值得注意的是，虽然玻璃纤维增强树脂基复合材料 (GFRP) 筋也是土木工程中常用的 FRP 筋，但由于其蠕变断裂应力低（不超过 $0.3f_u$ ），因此各国规范中不建议 GFRP 筋作为预应力材料使用。

从表 2 中可以看出，不同国家对 FRP 蠕变断裂应力的评价相差较大，这主要由各国学者采用的 FRP 材料生产工艺的差异引起。需要说明的是，

文献^[13]中的数据是碱溶液环境下的 BFRP 筋蠕变断裂应力。考虑到表 2 中美国 ACI 规范的权威性，且 ACI 440.4R 规范^[2]是专门针对预应力 FRP 筋编制的规范，因此 CFRP 筋和 AFRP 筋的蠕变断裂应力建议值根据 ACI 440.4R 规范^[2]取值。BFRP 筋的蠕变断裂应力建议值根据 Shi 等^[12]的研究取值（考虑 95% 可靠度），如表 3。

表 3 FRP 筋蠕变断裂应力建议值

Table 3 Recommended values of the creep rupture stress of FRP tendons

Type of tendon	CFRP	AFRP	BFRP
Creep rupture stress	$0.70f_u$	$0.55f_u$	$0.54f_u$

f_u is the tensile strength of FRP tendon.

除了蠕变断裂应力外，松弛率也是预应力工程中关注的重要指标。然而，松弛试验的操作难度远大于蠕变试验，大部分松弛试验无法解决锚固端滑移导致的应力变化对松弛试验测量结果造成的影响。例如，对于 BFRP 松弛率的研究发现，在 $0.5f_u$ 的应力下 50 年的松弛率预测值为 11%，这一过大的松弛率是由试验中的锚固问题以及采用了强度较低的 BFRP 筋导致^[15]。而在预应力 BFRP 筋增强混凝土梁试验中，由于混凝土的徐变收缩效应的影响，所测得的 BFRP 筋松弛率高达 20%^[16]，远高于 BFRP 筋实际的松弛率。为此，Shi 等^[17]和 Zou^[18]分别提出了能够有效排除锚固端滑移对 FRP 筋长期应力影响的松弛试验装置，对试验中由荷载传感器直接测得的荷载进行修正。采用修正方法得到 CFRP 筋和 AFRP 筋在 $0.5f_u$ 初始应力下 1 000 小时松弛率分别为 1% 和 8%。BFRP 筋在 $0.4f_u$ 、 $0.5f_u$ 和 $0.6f_u$ 初始应力下 1 000 h 松弛率分别为 4.2%、5.3% 和 6.4%，高于预应力钢绞线在 $0.7f_u$ 初始应力下 1 000 小时松弛率 (2.5%)。

CFRP 筋的低松弛率对预应力损失的控制十分有利，而 AFRP 筋的高松弛率由芳纶纤维本身的黏弹性变形造成，属于无法避免的材料特殊性能；BFRP 筋的松弛率对于预应力工程的应用偏大，这种较大的长期变形主要是由原本弯曲的纤维在持荷初期阶段随着树脂黏弹性变形被拉直造成的^[19]，在该阶段之后，由于纤维被拉直，材料长期变形趋于稳定。因此，若能控制 FRP 在持荷初期由于弯曲纤维拉直造成的较大黏弹性变形，就能很大程度地抑制 FRP 的长期变形。基于上述机制分析，Wang 等^[20]提出了预张拉控制 FRP 筋松弛率的方

表 2 FRP 筋的蠕变断裂应力

Table 2 Values of creep rupture stress of FRP tendons

Reference	CFRP	AFRP	BFRP
Yamaguchi ^[9]	$0.93f_u$	$0.47f_u$	/
Ando ^[10]	$0.79f_u$	$0.66f_u$	/
Tokyo Rope ^[11]	$0.85f_u$	/	/
Shi et al. ^[12]	/	/	$0.54f_u$
Banibayat ^[13]	/	/	$0.15f_u$
ACI 440.1 R-15 ^[14]	$0.55f_u$	$0.3f_u$	
ACI 440.4R-04 ^[2]	$0.70f_u$	$0.55f_u$	/

f_u is the tensile strength of FRP tendon.

法，在预张拉力的作用下，FRP 中的树脂会发生黏弹性变形，伴随着树脂的变形，先天弯曲的纤维被调直，从而实现纤维的共同受力，控制 FRP 的黏弹性变形，如图 2 所示。图 3 的 SEM 图片进一步从微观角度展现了纤维束在预张拉前后的变化。试验表明，预张拉处理后的 BFRP 筋在 $0.5f_u$ 初始应力下 1 000 小时松弛率仅为 2.6%，比未进行预张拉处理的 BFRP 筋相应值降低 50%，接近预应力钢绞线在 $0.7f_u$ 初始应力下 1 000 h 松弛率 (2.5%)。

FRP 筋的松弛率 r_t 可以用对数曲线进行拟合，即 $r_t=a_1+a_2\lg t$ (其中 t 是时间)，对于不同种类的 FRP 筋， a_1 和 a_2 的值可通过试验获得，利用该公式可计算 FRP 筋百万小时松弛率预测值，如表 4。

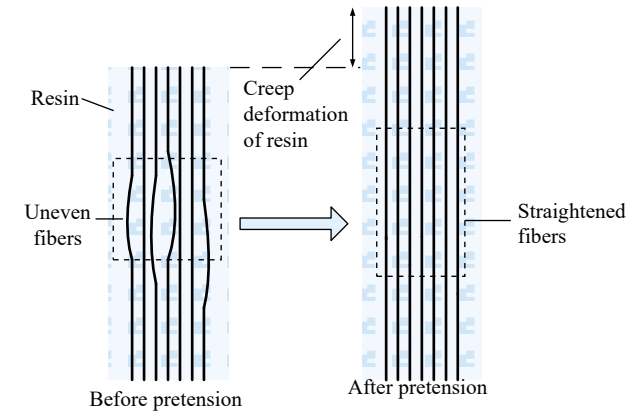
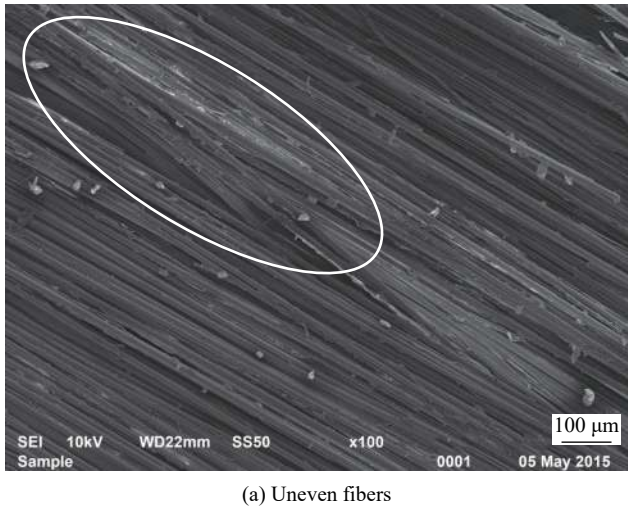


图 2 FRP 筋蠕变松弛性能提升机制示意图^[20]

Fig. 2 Schematic diagram for the improvement mechanism of creep and relaxation behaviors of FRP tendons

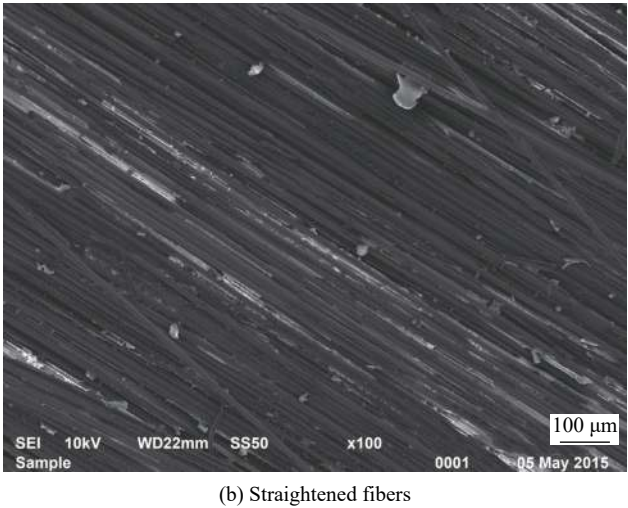


图 3 FRP 筋内部初始弯曲纤维与预张拉后的拉直纤维^[17]

Fig. 3 Initial uneven fibers and straightened fibers after pretensioned in a FRP tendon

表 4 $0.5f_u$ 初始应力下 FRP 筋百万小时松弛率预测值

Table 4 Predictive values of the one-million-hour relaxation rates of FRP tendons at a $0.5f_u$ initial level

Type of tendon	CFRP	AFRP	BFRP
Relaxation rate	3.0%	10~13%	6.7%

1.3 疲劳性能

疲劳是材料在交变荷载作用下产生局部不可恢复的损伤，进而扩展为宏观裂纹并进一步导致材料破断的现象。材料在远低于其极限荷载水平的交变荷载作用下，随着内部的初始缺陷或损伤的扩展所发生的破坏称为疲劳破坏。根据纤维弹性模量不同，FRP 筋疲劳破坏机制有所区别，碳纤维弹性模量较高，纤维承担的疲劳应力较大，

因此疲劳损伤主要由纤维控制；玄武岩纤维和芳纶纤维弹性模量较低，树脂承担的应力较大，疲劳损伤由树脂微裂纹扩展到纤维-树脂界面，并最终造成纤维断裂^[21] (图 4)。需要说明的是，虽然裂纹随循环次数扩展，在宏观疲劳破坏发生前，FRP 筋的弹性模量不随疲劳荷载循环次数的增加而发生变化^[22]。

各国学者对 FRP 筋的疲劳性能进行了系统研究，并确定最大疲劳应力和应力幅为控制疲劳寿命的关键因素。例如，CFRP 筋在 $0.9f_u$ 的最大疲劳应力 (即疲劳强度) 以及 $0.05f_u$ 的应力幅下能够保持 200 万次疲劳循环后不发生破坏，而 AFRP 筋的相应限值则较低，分别为 $0.5f_u$ 和 $0.025f_u$ ^[23-24]。El Refai 等^[25] 对 BFRP 筋的疲劳性能进行了研究，

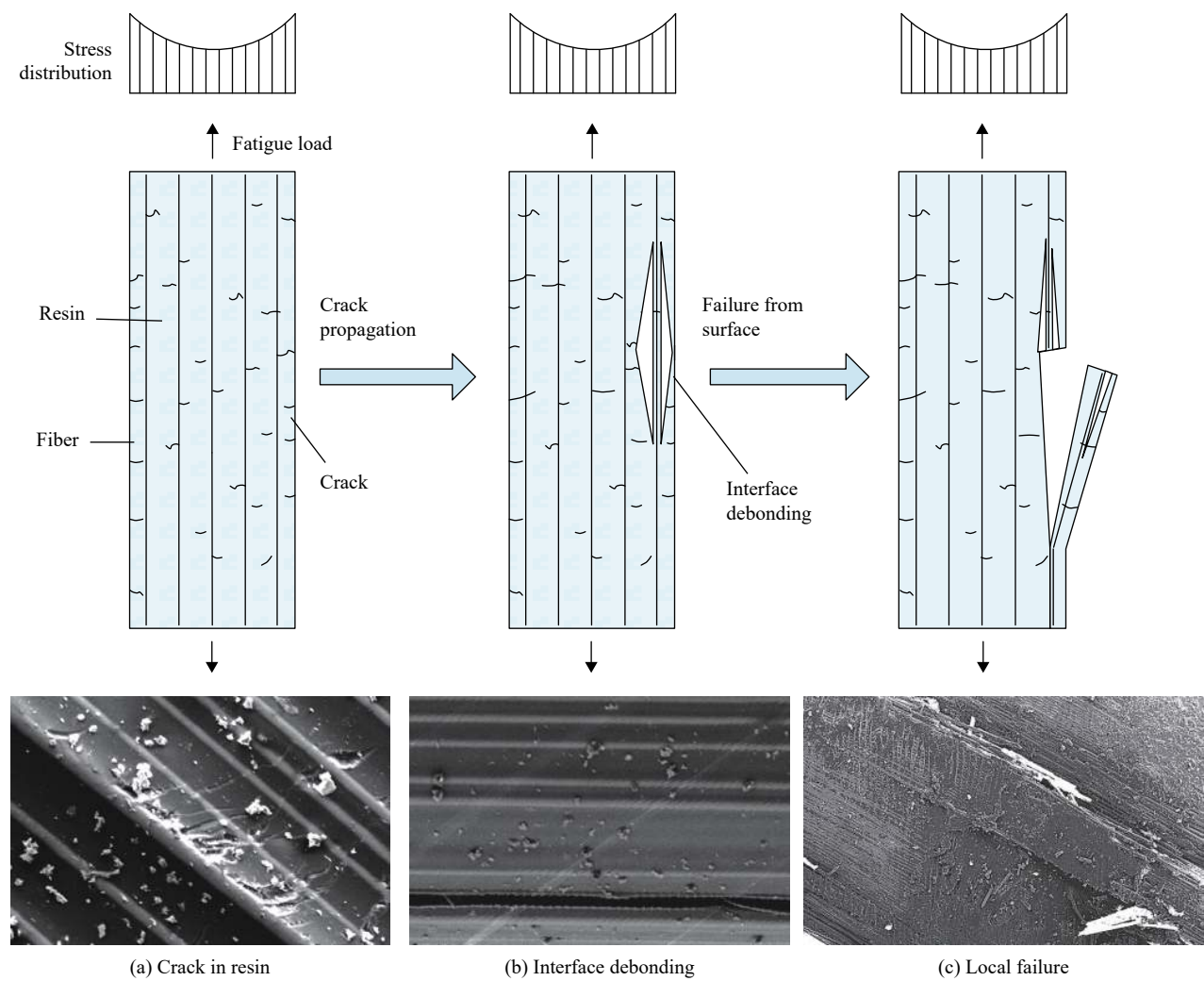


图 4 玄武岩纤维增强树脂基复合材料 (BFRP) 筋疲劳破坏机制[22]
Fig. 4 Mechanism of the fatigue failure of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) tendon

得出了 $0.04f_u$ 这一疲劳应力幅限值，并且当应力幅大于 $0.08f_u$ 时，BFRP 筋均发生锚固区的疲劳破坏，而非筋材本身破坏，其结果不能反映材料真实的疲劳性能。因此，可靠的锚固方式是 FRP 筋疲劳试验结果有效性的重要保证。对于弹性模量较大的 CFRP 筋，可采用一般拉伸试验中的黏结型锚具，因为在疲劳荷载作用下 CFRP 筋试件变形很小，端部树脂剪切变形不足以引起树脂发热软化[26]；反之，对于弹性模量较小的 FRP 筋(如 BFRP 筋)，端部树脂剪切变形会引起树脂发热软化，锚固区的提前破坏使得 FRP 筋真实的疲劳性能无法通过试验直接获得。为此 Wang 等[22] 提出了一种通过在 FRP 筋锚固区缠绕双向纤维布 (200 g/m^2) 的锚固方法，避免了锚固区张拉端的应力集中，能够更加准确地测量 FRP 筋疲劳性能。CFRP 筋、AFRP 筋和 BFRP 筋的疲劳强度见表 5。

表 5 FRP 筋疲劳强度 (括号中为对应的应力幅)
Table 5 Values of the fatigue strength of FRP tendons (with the corresponding stress range in the brackets)

References	CFRP	AFRP	BFRP
Saadatmanesh ^[23-24]	$0.9f_u$ ($0.05f_u$)	$0.5f_u$ ($0.025f_u$)	/
Adimi et al. ^[27]	$0.35f_u$ ($0.21f_u$)	/	/
El Refai ^[25,28]	$0.5f_u$ ($0.1f_u$)	/	$0.39f_u$ ($0.04f_u$)
Song et al. ^[29]	$0.64f_u$ ($0.09f_u$)	/	/
	$0.53f_u$ ($0.19f_u$)		
	$0.37f_u$ ($0.28f_u$)		
Xie et al. ^[30]	$0.5f_u$ ($0.09f_u$)	/	/
Zhuge et al. ^[31]	$0.42f_u$ ($0.04f_u$)	/	/
Zhang and Ou ^[32]	$0.5f_u$ ($0.25f_u$)	/	/
Odagiri et al. ^[33]	/	$0.54f_u$ ($0.05f_u$)	/
Wang et al. ^[22]	/	/	$0.6f_u$ ($0.05f_u$)
Atutis et al. ^[34]	/	/	$0.65f_u$ ($0.07f_u$)

f_u is the tensile strength of FRP tendon.

2 体外预应力 FRP 筋应用关键技术

体外预应力 FRP 筋与混凝土之间没有黏结作用，FRP 筋中的预应力完全依靠锚具和转向块传递给混凝土结构，因此锚固和转向是体外预应力的关键技术。与各向同性的钢材不同，FRP 材料的横向强度远低于纵向强度，该特性导致体外预应力 FRP 筋的锚固和转向无法完全沿用传统预应力钢筋、钢绞线的工艺。首先，在锚固区的复杂受力情况下，切口效应将导致 FRP 筋在达到极限拉伸强度之前就发生锚固区破坏；其次，为了减小体外预应力结构二次效应而设置的转向块会造成 FRP 筋的弯折，从而导致 FRP 筋产生应力集中。本节将主要介绍预应力 FRP 筋的主要锚固形式，同时，基于转向块-FRP 筋体系的力学性能研究，提出体外预应力 FRP 筋转向半径和转向角度限值。

2.1 预应力 FRP 筋锚具

目前的预应力 FRP 筋锚具主要分为黏结型锚具、摩擦型锚具和夹片式锚具(图 5)，其中黏结型锚具是利用锚固端黏结材料(树脂、水泥等)与 FRP 筋之间产生的化学黏结力进行锚固的方法。摩擦型锚固通过膨胀水泥等材料固化后的体积膨胀产生正压力，从而在套管和 FRP 筋之间形成摩

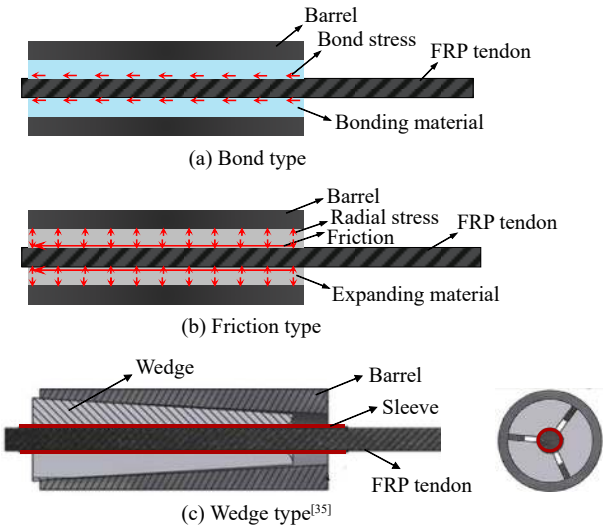


图 5 FRP 筋主要锚固形式

Fig. 5 Main types of anchor of FRP tendons

擦力来实现锚固。夹片式锚具中的夹片数量一般有 2、3、4 三种，夹片材料可采用金属或超高强混凝土，为减小金属夹片对 FRP 筋的直接作用，可在 FRP 筋外套软质金属套筒，夹片通过软质金属套筒间接作用在 FRP 筋上，夹片和 FRP 筋组装后在锚杯的楔形作用力下实现挤压锚固。三类锚固工艺的优缺点如表 6。

表 6 FRP 筋主要锚具形式的优缺点

Table 6 Advantages and deficiencies of the main types of anchor for FRP tendons

Type of anchor	Advantages	Deficiencies
Bond type	No radial stress, hence inducing no decrease in strength of tendon	Inconvenient grouting; prestress loss due to long-term creep deformation of the bonding material in anchor
Friction type	Radial stress is beneficial for the long-term behavior of anchor	Inconvenient grouting
Wedge type	Convenient assembly	Notch effect on FRP tendon

从表 6 可以看出，黏结型和摩擦型锚具难以提供预应力 FRP 筋长期服役过程中的有效锚固力，且现场灌浆不利于施工便利性。钢夹片锚具组装方便，但 FRP 筋的切口效应明显。为此，研究人员提出了一系列措施减小夹片式锚具的切口效应，除了在 FRP 筋表面套一根软金属薄管以分散径向应力外^[35]，还可采用整体式钢夹片保证夹片的同步跟进，实现均匀的应力分布^[36]。另一种减小径向应力的方法是改变夹片的材料，例如采用聚苯硫醚 (PPS) 材料作为夹片^[37]，或采用分段式复合材料夹片(图 6)^[38]，均能够更有效地减缓应力集中。分段式复合材料夹片采用模压工艺生产，原材料包括短切纤维、树脂、石英砂等，通过不同材料

的组合实现变刚度，从而降低 FRP 筋的应力集中。相关试验结果表明，分段复合材料夹片锚具的锚固效率达到 90%，且 BFRP 筋复合材料夹片锚具体系的疲劳应力幅限值、蠕变率等参数与 BFRP 筋本身的试验结果一致。

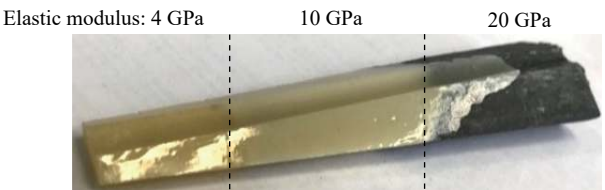


图 6 分段式复合材料夹片^[38]

Fig. 6 Segmented composite wedge

2.2 FRP 筋转向半径及角度的合理优化

目前，预应力 FRP 筋在转向处力学性能的研究较少。Zhu 等^[39]开展了转向块处 FRP 筋静力性能试验(图 7)，研究表明，由于弯折对筋材造成一定程度的附加应力，转向区外侧是 FRP 筋中应力最大的部分，FRP 筋发生破坏时，弯折段外侧最大应变与 FRP 筋极限拉应变基本一致。由于弯折作用，FRP 筋极限荷载相比于单向拉伸试验中 FRP 筋的极限荷载有不同程度的降低，下降率与转向半径和转向角度有关。

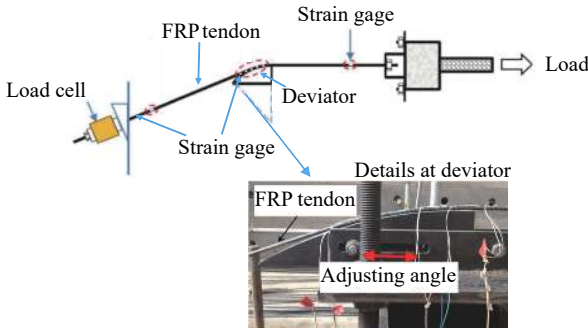


图 7 图 7 FRP 筋转向区试验装置^[39]
Fig. 7 Test setup for FRP tendons at a deviator

1) 转向半径的优化

图 8(a) 是不同转向半径下的 FRP 筋承载力保留率，通过对比可以发现，转向半径对 FRP 筋承载力保留率的影响显著。不同直径 FRP 筋的力学性能对弯折的敏感度不同，对于直径 8mm 的 BFRP 筋，当转向半径 R 与 FRP 筋半径 r 比值 (R/r) 从 400 变为 200 时，BFRP 筋的承载力仅有 5~8% 的降低，当 R/r 从 200 变为 100 时，BFRP 筋的承载力大幅下降；对于直径 16 mm 的 BFRP 筋，当 R/r 从 200 变为 100 时，承载力降低不到 5%，当 R/r 从 100 变为 50 时，承载力大幅下降。此外，对于弹性模量较高的 CFRP 筋， R/r 对转向处强度的影响更大，尤其是当 R/r 从 200 变为 100 时，承载力仅约为初始值的一半。

2) 转向角度的优化

图 8(b) 对比了不同转向角度下的 FRP 筋承载力保留率，可以看出，当 FRP 筋转角从 0°变为 14°时，承载力下降率超过 10%，其中直径为 8 mm 的 BFRP 筋和 CFRP 筋的下降率分别为 11% 和 13%。但当转向角度从 14°变化到 27°时，FRP 筋的承载力下降率不超过 5%。因此，为了严格限制 FRP 筋承载力降低，转向角度不得超过 15°。对于弹性模

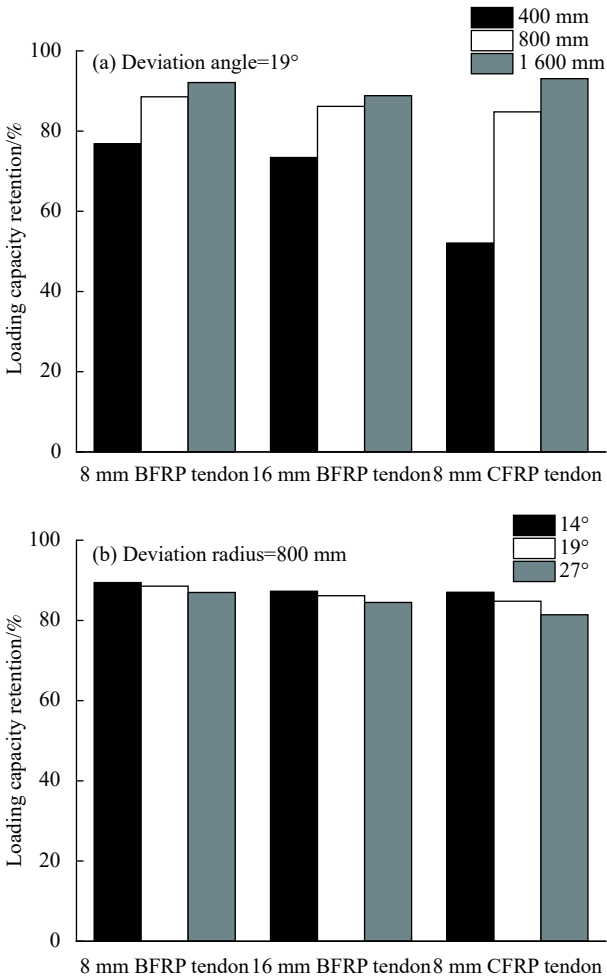


图 8 图 8 转向角度和转向半径对弯折 FRP 筋承载力保留率的影响^[39]
Fig. 8 Effects of deviation radius and angle on the loading capacity of FRP tendon at deviator

量更大的 FRP 筋，转向角度限制更加严格，例如 Santoh 等^[40]通过试验探讨了 CFRP 筋的拉伸强度和转向角度的关系，当转向角度从 5°变化到 25°时，拉伸强度的降低比较明显；转向角度大于 25°时，强度降低趋势明显减缓，建议 FRP 筋的转向角度不超过 5°。另一方面，转向角度越大，摩擦造成的 FRP 筋预应力损失也越大，因此 FRP 筋转向角度不宜过大。

综上，根据优化试验的结果，建议工程设计中转向半径和 FRP 筋半径的比值 R/r 不宜小于 200。为了转向角度限值规定的一致性，建议 FRP 筋的转向角度不宜超过 5°，但可根据 FRP 筋的种类适当放宽该限值。

3 体外预应力 FRP 筋混凝土构件研究

既有研究中，体外预应力 FRP 筋混凝土构件大多以梁为主要研究对象，本节将主要介绍体外

预应力 FRP 筋混凝土梁力学性能相关研究成果。

3.1 静力性能研究

国际上关于体外预应力 FRP 筋混凝土梁的研究大多采用 CFRP 和 AFRP 筋。Lou 等^[41] 的数值分析表明, 体外预应力 CFRP 筋混凝土梁的静力性能与预应力钢筋混凝土梁类似。在一定范围内适当提高体外预应力筋的配筋率, 有助于显著提高结构的开裂荷载和屈服荷载, 但会逐渐降低结构延性。另外, 虽然体外预应力能显著提高混凝土梁的开裂荷载和屈服荷载, 但在梁体内无任何配筋的情况下, 结构的曲率分布会变得极其不规则, 从而导致破坏时局部裂缝过大; 反之, 配置一定量的体内钢筋, 可以使结构的曲率分布和开裂模式得到明显的改善。极限状态下的体外预应力 FRP 筋应力(以下简称“极限应力”)是决定构件承载力的重要参数^[42], 为此, Ghallab and Beeby^[43] 以极限应力的几个影响因素为变量, 对 16 根梁进行了试验研究, 结果表明, 当体外预应力 FRP 筋的有效高度大于截面高度时, 有效高度将对其极限应力产生显著影响。另外, 预应力水平、混凝土强度、转向块数量和转向块间距等对 FRP 筋的极限应力影响较大。

Wang 等^[44] 和史健喆等^[45] 对体外预应力 BFRP 筋混凝土梁的静力性能进行了试验研究, 结果表明, 体外预应力 BFRP 筋可以显著提高结构的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载, 并可以保证一定的结构延性, 体外预应力 BFRP 筋梁的力学性能与体外预应力钢绞线梁各类力学性能类似, 且由于 FRP 是线弹性材料, 前者卸载后的残余变形明显小于后者。复合材料夹片锚具在体外预应力梁的加载过程中能够有效地对 BFRP 筋施加锚固力, 夹片与筋之间不发生任何滑移, 在梁体发生破坏时, 锚固端未发生任何形式的损伤, 从而证明了复合材料锚具在构件极限状态下的有效性。

3.2 长期持荷性能研究

既有文献中体外预应力 FRP 筋混凝土梁的长期性能试验研究很少。史健喆^[6] 通过杠杆配重法开展了为期 150 天的体外预应力 BFRP 筋混凝土梁长期荷载试验, 试件为全预应力混凝土梁。从图 9 可以看出, 预应力越大, 长期反拱值增量也越大; 在初始预应力水平相同的情况下, 由于钢绞线弹性模量较高, 普通松弛钢绞线在结构中的长期预应力损失率比体外预应力 BFRP 筋高 15%。混凝土

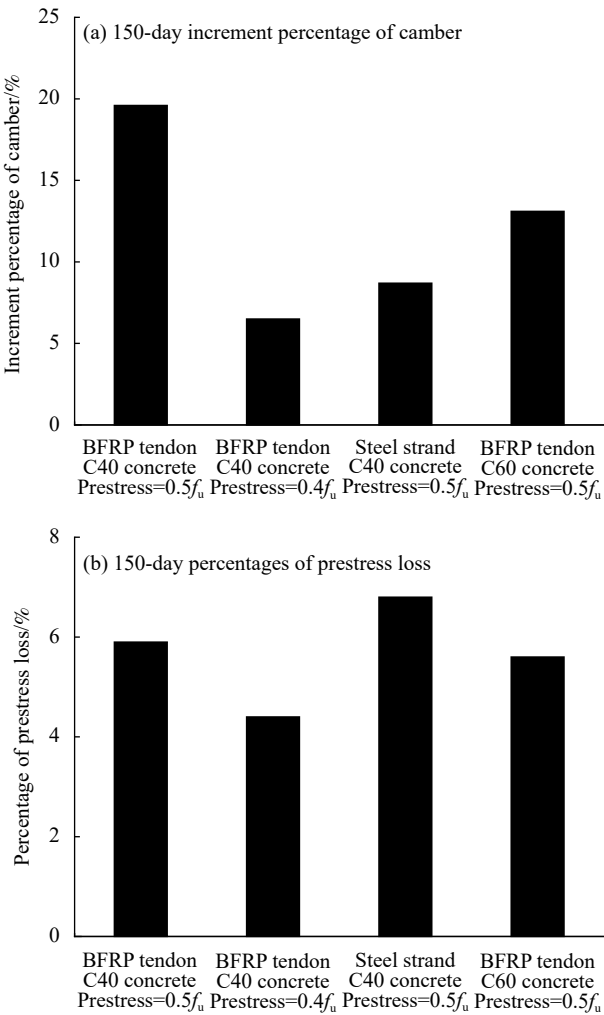


图 9 体外预应力混凝土梁长期变形与预应力损失

Fig. 9 Long-term deformation and prestress loss of RC beam prestressed with external tendon

强度等级为 C60 的梁长期反拱增长率比混凝土强度等级为 C40 的梁相应值低 33%, 这是因为高强混凝土的长期徐变比普通混凝土小。

曹国辉和方志^[46] 开展了长达 1 001 天的体外预应力 CFRP 筋混凝土箱梁长期力学性能试验, 试验结束时长期跨中挠度为初始挠度的 2.3~2.4 倍, 且挠度经过前 3 个月的较快发展后逐渐趋于稳定。长期荷载作用下, 顶板混凝土和受压钢筋的应变变化较大, 而受拉钢筋应变变化较小。

3.3 疲劳性能研究

在实际工程中, 大多数结构并非一直承受恒定荷载的作用, 尤其是桥梁等直接承受风荷载、车辆荷载的结构。大量的疲劳试验已经表明, 体外预应力 CFRP 筋混凝土梁和体外预应力 AFRP 筋混凝土梁具有优良的疲劳性能, 在特定的疲劳荷

载循环次数下 (一般为 200 万次) 未发生破坏^[47-49]。体外预应力 FRP 筋混凝土结构中, 应力幅最大且最容易发生破坏的是混凝土内的非预应力钢筋^[50]。因此, 对于体外预应力 FRP 筋混凝土结构, 其结构疲劳破坏一般由非预应力钢筋应力集中导致的钢筋疲劳断裂控制, 这一结论对于体外预应力 FRP 筋简支梁和连续梁同样适用。基于这一机制, 研究人员提出了一系列基于钢筋疲劳断裂的体外预应力 FRP 筋加固结构疲劳寿命预测模型^[47,50,51]。

除了体外预应力 FRP 筋简支梁外, 少数学者还针对连续梁进行了疲劳研究。Grace 等^[49,52]开展了两跨连续梁试验, 两跨循环荷载上限分别为极限承载力的 13% 和 27%, 前者挠度受疲劳荷载的影响不大, 后者的挠度随着荷载循环次数的增加而增大, 但未研究疲劳荷载作用下体外预应力 FRP 筋混凝土连续梁的内力重分布等塑性能。程君^[53]的试验研究表明, 与简支梁类似, 连续梁的疲劳破坏均始于疲劳加载跨控制截面附近主裂缝处的体内普通受拉钢筋疲劳断裂, 试验梁疲劳加载跨跨内控制截面的抗弯刚度呈“快速减小-缓慢减小-迅速减小”的三阶段退化规律; 与简支梁不同的是, 疲劳荷载下连续梁纵向各截面刚度的不均匀退化会造成截面间相对刚度的变化, 从而引起构件的疲劳内力重分布, 随着疲劳次数增加, 中支座截面弯矩迅速增加, 在实际工程中应着重防止该处的疲劳破坏。

4 FRP 筋体外预应力混凝土结构设计方法

由于体外预应力筋不能和混凝土结构协同变形, 因此设计与体内有黏结混凝土结构存在明显区别。我国《纤维增强复合材料工程应用技术标准》GB 50608—2020^[54]中对预应力 FRP 筋混凝土结构设计作了详细规定, 并专门针对体外预应力 FRP 筋混凝土结构提出了 FRP 筋应力增量、抗弯承载力等关键性能参数的计算方法。本节主要介绍 GB 50608—2020^[54]中涉及体外预应力 FRP 筋结构的设计方法以及国外规范中的相关规定, 同时介绍了基于按龄期调整有效模量法 (AEMM)^[55]的结构时随变形和预应力损失预测。并利用既有文献中 42 根梁的试验数据和计算方法得到的理论值进行对比, 验证了设计计算方法的准确性。

4.1 预应力 FRP 筋张拉控制应力

根据 1.2 节的介绍, 张拉控制应力限值应适当低于蠕变断裂应力。但过低的张拉控制应力会造

成 FRP 筋的强度无法充分发挥。GB 50608—2020^[54]中给出的 FRP 筋张拉控制应力 σ_{con} 上下限值如表 7。

表 7 FRP 筋张拉控制应力 σ_{con}

Table 7 Tension control stress σ_{con} of FRP tendons

Type of FRP	CFRP	AFRP	BFRP
Upper limit	$0.65 f_u$	$0.55 f_u$	$0.50 f_u$
Lower limit	$0.50 f_u$	$0.35 f_u$	$0.35 f_u$

f_u is the tensile strength of FRP tendon.

4.2 预应力损失

1) 张拉过程中的预应力损失

张拉过程中的预应力损失包括锚具变形和预应力筋内缩值 a 引起的预应力损失值 σ_{l1} 和预应力筋与转向块摩擦引起的预应力损失值 σ_{l2} , 各国规范针对该指标的计算方法基本一致, 以 GB 50608—2020^[54] 为例, σ_{l1} 按下式计算:

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_p$$

(1)

式中,

l ——张拉端至锚固端之间的距离 (mm);
 E_p ——FRP 筋弹性模量。

对于黏结型锚具和夹片式锚具, a 分别取 1~2mm 和 8mm。

σ_{l2} 按下式计算:

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\text{con}} (1 - e^{-\mu\theta})$$

(2)

式中,

σ_{con} ——预应力 FRP 筋张拉控制应力值;
 μ ——预应力 FRP 筋与转向块的摩擦系数;
 θ ——预应力 FRP 筋转向角度。

当 $\mu\theta$ 不大于 0.2 时, σ_{l2} 可按 $\sigma_{l2} = \mu\theta\sigma_{\text{con}}$ 计算, 对于 CFRP 筋、AFRP 筋和 BFRP 筋, μ 分别取 0.30、0.25 和 0.30。

2) 结构服役期间的预应力损失

结构服役期间的预应力损失, 可按 $\sigma_{l4} + \sigma_{l5}$ 粗略估算。如需进行较为精确的预测, 可参照 4.6 节中的方法进行计算。

(1) 预应力 FRP 筋的松弛损失 σ_{l4} 按下式计算:

$$\sigma_{l4} = r_r \sigma_{\text{con}}$$

(3)

式中,

r_r ——松弛损失率, 根据 1.2 节的内容, 可用对数曲线拟合松弛率, 即 $r_r = a_1 + a_2 \log T$, 当无实测数据确定系数 a_1 和 a_2 时, 对于设计基准期为 100 年的预应力 FRP 筋受弯构件, r_r 也可近似按表 4

的数值取用;

其余符号意义同前。

(2) 预应力作用下混凝土收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{l5} 按下式计算:

$$\sigma_{l5} = \frac{35+280\sigma_{pc}/f_{cu}'}{(1+15\rho_e)} \cdot \frac{E_p}{E_s} \tag{4}$$

式中,

σ_{pc} ——预应力 FRP 筋合力点处的混凝土法向压应力;

ρ_e ——预应力 FRP 筋和非预应力钢筋的等效配筋率;

f_{cu}' ——施加预应力时的混凝土立方体抗压强度;

E_s ——普通钢筋弹性模量;

其余符号意义同前。

如需针对特定服役龄期进行较为精确的预测, σ_{l5} 可按 4.6 节的方法计算。

4.3 极限状态下体外预应力 FRP 筋应力增量

极限状态下体外预应力 FRP 筋应力增量 ($\Delta\sigma_{pu}$) 是计算体外预应力 FRP 筋混凝土梁极限荷载的重要参数, 国外大部分混凝土设计规范在计算该应力增量时, 均采用对体内无黏结预应力筋应力增量进行修正的方法, 因此存在一定的局限性。例如, 美国 ACI 440.4R^[2] 规定极限荷载下的 FRP 筋应力增量按下式计算:

$$\Delta\sigma_{pu} = \Omega_u E_p \varepsilon_{cu} \left(\frac{R_d d_p}{x_0} - 1 \right) \tag{5}$$

式中,

Ω_u ——应变折减系数;

ε_{cu} ——混凝土极限压应变;

R_d ——折减系数;

d_p ——体外预应力 FRP 筋初始有效高度;

x_0 ——极限状态下的中和轴高度。

欧洲 *fib* 规范^[56] 虽未给出具体计算公式, 但建议极限极限荷载下的 FRP 筋应力增量以正常使用极限状态的应变为基准, 按承载能力极限状态下的 FRP 筋的应变增量进行推算。

英国 BS 8110 规范^[57] 采用下式计算极限荷载下的 FRP 筋应力增量:

$$\Delta\sigma_{pu} = \frac{7\,000 \left(1 - \frac{1.7 f_u A_p}{f_c b d_p} \right)}{\frac{L}{d_p}} \tag{6}$$

式中,

f_u ——FRP 筋抗拉强度;

A_p ——FRP 筋截面积;

f_c ——混凝土极限抗压强度;

b ——构件截面宽度;

L ——构件跨度;

其余符号意义同前。

我国 GB 50608—2020^[54] 中基于 Peng 等^[58] 的计算理论, 针对体外预应力 FRP 筋给出了极限状态下应力增量计算方法, 具体如下:

$$\Delta\sigma_{pu} = \frac{E_p}{L_{fp}} \left(X_1 + Y_1 \frac{\varepsilon_{cu}}{x_0} \right) \frac{\varepsilon_{cu}}{x_0} \tag{7}$$

式中,

X_1 、 Y_1 ——常数, 按规范计算;

L_{fp} ——锚固端之间的体外预应力 FRP 筋总长度;

其余符号意义同前。

4.4 转向区 FRP 筋应力

第 2 节中提到, 体外预应力 FRP 筋在转向区容易产生应力集中, 因此需限制转向区 FRP 筋的应力以保证该区域 FRP 筋的安全性。转向区 FRP 筋应力 σ_{dev} 可采用 Dolan 公式^[59] 计算, 表达式如下:

$$\sigma_{dev} = P/A_p + E_p r/R \tag{8}$$

式中,

P ——直线段 FRP 筋轴力;

r ——预应力 FRP 筋半径;

R ——转向半径;

其余符号意义同前。

基于 Dolan 公式, 分别对 CFRP 筋、AFRP 筋和 BFRP 筋提出不同转向半径下的强度折减系数(弯折后的断裂应力与初始强度的比值), 如表 8, CFRP 筋、AFRP 筋和 BFRP 筋的力学性能参照 GB 50608—2020^[54] 规范取初始强度分别为 1 800 MPa、1 300 MPa 和 1 300 MPa, 弹性模量分别为 140 GPa、65 GPa 和 55 GPa。需要说明的是, 随着初始强度的提高和弹性模量的增加, 折减系数将分别增大和减小, 设计人员应根据实际的 FRP 筋力学性能适当选取折减系数。

表 8 不同 R/r 下的弯折 FRP 筋强度折减系数 Table 8 Strength reduction coefficients of deviated FRP tendon at different values of R/r			
R/r	CFRP tendon	AFRP tendon	BFRP tendon
200	0.61	0.75	0.79
300	0.74	0.83	0.86
400	0.81	0.88	0.89

4.5 正常使用极限状态计算

1) 裂缝宽度

在荷载标准组合或准永久组合下, 对于要求不出现裂缝的预应力 FRP 筋混凝土受弯构件 (非预应力筋采用普通钢筋时), 抗裂验算可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010^[60]方法进行; 允许出现裂缝的预应力 FRP 筋混凝土受弯构件, 根据 GB 50608—2020^[54] 规范, 最大裂缝宽度可按下列公式计算:

$$w_{\max} = 1.9\psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (9)$$

式中,

ψ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数;

σ_{sk} ——按荷载标准组合计算的受弯构件纵向受拉钢筋等效拉应力;

c_s ——最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离;

d_{eq} ——受拉区纵向钢筋等效直径;

ρ_{te} ——按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋的等效配筋率;

其余符号意义同前。

美国 ACI 440.4R 规范^[2] 建议采用 Gergely-Lutz 公式计算裂缝宽度 w :

$$w = 0.076\beta(E_s\varepsilon_s) \sqrt[3]{d_c A} \quad (10)$$

式中,

β ——中性轴到混凝土受拉边缘的距离与中性轴到受拉钢筋合力点距离之比;

ε_s ——钢筋应变;

d_c ——混凝土保护层厚度;

A ——混凝土有效受拉区面积。

欧洲 fib 规范^[56] 采用下式计算构件裂缝宽度

w_d :

$$w_d = 2l_{s,\max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}) \quad (11)$$

式中,

$l_{s,\max}$ ——钢筋与混凝土发生相对滑移的长度;

ε_{sm} —— $l_{s,\max}$ 范围内钢筋的平均应变;

ε_{cm} —— $l_{s,\max}$ 范围内混凝土的平均应变;

ε_{cs} ——混凝土收缩应变。

英国 BS 8110 规范^[57] 中的裂缝宽度为混凝土受拉区表面裂缝宽度, 与其他规范不同, 故在此不作介绍。

2) 刚度

预应力 FRP 筋混凝土受弯构件的挠度可按现

行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010^[60] 的有关规定计算。对于矩形、T 形、倒 T 形和 I 形截面预应力 FRP 筋混凝土受弯构件, 按荷载标准组合并考虑长期作用影响的截面抗弯刚度 B 可按下列公式计算:

$$B = \frac{M_k}{M_q(\theta - 1) + M_k} B_s \quad (12)$$

式中,

M_k ——按荷载标准组合计算的弯矩值;

M_q ——按荷载准永久组合计算的弯矩值;

θ ——虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数,

可取 2; 对于翼缘位于受拉区的倒 T 形截面, 应增加 20%。当有可靠工程经验或测试数据时, 可按实际情况取值;

B_s ——荷载标准组合计算的受弯构件的短期抗弯刚度;

其余符号意义同前。

B_s 按下列规定计算:

不出现裂缝的受弯构件,

$$B_s = 0.85E_c I_0 \quad (13)$$

式中,

E_c ——混凝土弹性模量;

I_0 ——换算截面惯性矩;

其余符号意义同前。

允许出现裂缝的受弯构件,

$$B_s = \frac{0.85E_c I_0}{k_{cr} + (1 - k_{cr})\omega} \quad (14)$$

式中,

k_{cr} ——预应力混凝土受弯构件正截面的开裂弯矩 M_{cr} 与弯矩 M_k 的比值, 当 k_{cr} 大于 1.0 时, 取 1.0;

ω ——系数;

其余符号意义同前。

美国 ACI 440.4R 规范^[2] 采用下式中的修正有效惯性矩 I_e 计算结构刚度:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (15)$$

式中,

M_a ——用于挠度验算的弯矩值;

β_d ——有效惯性矩折减系数;

I_g ——全截面惯性矩;

I_{cr} ——开裂截面惯性矩;

其余符号意义同前。

欧洲 *fib* 规范^[56] 考虑钢筋的受拉刚化 (Tension stiffening), 采用下式计算构件有效刚度 B_{eff} :

$$B_{\text{eff}} = \frac{B_I \cdot B_{II}}{\zeta B_I + (1 - \zeta) B_{II}} \quad (16)$$

式中,

- B_I ——全截面刚度;
- B_{II} ——未考虑受拉刚化的开裂后刚度;
- ζ ——受拉刚化系数。

英国 BS 8110 规范^[57] 仅通过跨高比限值来控制结构变形, 未提出刚度计算公式。

4.6 梁体变形及预应力值的时随变化

Youakim and Karbhari^[55] 基于按龄期调整有效模量法, 提出了预应力 FRP 筋混凝土结构长期性能参数计算方法。该方法大致分为四个步骤, 首先计算恒定荷载施加时产生的瞬时应变与曲率; 第二步, 计算混凝土本身的自由蠕变应变 ε_{cr} 、收缩应变 ε_{sh} 以及蠕变产生的曲率变化 $\Delta\phi_{\text{free}}$; 第三步, 对混凝土施加虚拟约束, 使得第二步的应变和曲率变化完全恢复, 计算相应的约束力 ΔN 和约束力矩 ΔM ; 第四步, 将 ΔN 和 ΔM 反向作用于考虑钢筋后的换算截面, 求解换算截面的应变和曲率。根据该模型, 考虑体外预应力 FRP 筋与构件变形的不一致性, 截面曲率变化 $\Delta\phi$ 的计算方法分别如式下:

$$\Delta\phi = k_1 \Delta\phi_{\text{free}} + \frac{k_{\text{cc}}}{h} (\Delta\varepsilon_{\text{cc}})_{\text{free}} - \frac{A_p y_p}{\bar{I}} \frac{\Delta\sigma_p}{\bar{E}_c} \quad (17)$$

式中,

- k_1 、 k_{cc} ——系数;
 - $\Delta\phi_{\text{free}}$ ——混凝土自由曲率变化值;
 - $(\Delta\varepsilon_{\text{cc}})_{\text{free}}$ ——混凝土因徐变产生的自由轴向变形;
 - h ——截面高度;
 - y_p ——预应力筋截面形心到全截面中性轴的垂直距离;
 - $\Delta\sigma_p$ ——预应力 FRP 筋应力变化量;
 - \bar{I} ——全截面惯性矩;
 - \bar{E}_c ——按龄期调整的混凝土有效模量;
- 体外预应力 FRP 筋应力变化 $\Delta\sigma_p$ 按下式计算:

$$\Delta\sigma_p = E_p \frac{\Delta L_p}{L_{p0}} + \Delta\sigma_{\text{pr}} \quad (18)$$

式中,

ΔL_p ——梁体变形造成的体外预应力 FRP 筋的长度变化, 该值与梁体本身的弯曲变形和体外预应力 FRP 筋的线形有关;

- L_{p0} ——体外预应力 FRP 筋初始长度;
- $\Delta\sigma_{\text{pr}}$ ——松弛引起的应力下降, 取值见 1.2 节; 其余符号意义同前。

4.7 梁构件力学性能理论值与试验值对比

为了验证规范中设计计算方法的合理性, 从国内外收集了 42 根体外预应力 FRP 筋混凝土梁的试验数据, 对比试验值和计算方法得到的理论值, 表 9 和表 10 列出了数据库的相关信息。除 GB 50608—2020^[54] 的计算方法之外, 还对比了美国规范 ACI 440.4R-04^[2]、欧洲混凝土规范 *fib*^[56] 和英国规范 BS8110^[57] 计算方法的精度, 计算过程中的材料力学性能取实测值。

表 9 体外预应力 FRP 筋混凝土梁抗弯性能研究数据库
Table 9 Database of the studies on the flexural behaviors of concrete beams prestressed with external FRP tendons

References	Number of specimen	Type of tendon
Shi ^[6]	3	BFRP
Ghallab and Beeby ^[43]	12	AFRP
Wang et al. ^[44]	3	BFRP
Du et al. ^[61]	4	CFRP
El-Refai et al. ^[62]	3	CFRP
Bennitz et al. ^[63]	6	CFRP
Jung et al. ^[64]	2	CFRP
Au et al. ^[65]	3	AFRP
Tan et al. ^[66]	2	CFRP

表 10 体外预应力 FRP 筋混凝土梁长期性能研究数据库
Table 10 Database of the studies on the long-term behaviors of concrete beams prestressed with external FRP tendons

References	Number of specimen	Type of tendon
Shi ^[6]	3	BFRP
Cao and Fang ^[46]	1	CFRP

- 1) 张拉过程中转向块摩擦导致的预应力损失
试验中, 张拉完毕后张拉端和锚固端的 FRP 筋轴力差值反映了转向块摩擦造成的预应力损失 σ_{l2} 。各国规范计算 σ_{l2} 的方法相同, 试验值与理论值比值的平均值为 1.01, 方差为 0.05。因此, 规范中计算公式具有足够的精确度, 可直接用于摩擦损失计算。

- 2) 极限状态下体外预应力 FRP 筋应力增量
表 11 列出了体外预应力 FRP 筋极限状态应力增量的理论值精度, 其中 GB 50608—2020^[54] 规范专门针对体外预应力 FRP 筋提出了应力增量计算方法, 因此采用 GB 50608—2020^[54] 计算的理论值最准确, 但计算步骤较复杂。ACI 440.4R 方法步

表 11 体外预应力 FRP 筋极限状态应力增量 $\Delta\sigma_{pu}$ 的试验值与理论值之比

Table 11 Ratios of experimental value to theoretical value of the stress increment $\Delta\sigma_{pu}$ of external prestressing FRP tendons at ultimate state

Codes	ACI 440.4R	BS 8110	<i>fib</i>	GB 50608
Average value	1.39	2.14	1.58	1.01
Variance	0.58	0.89	0.45	0.20

骤简单，但精度不高。

3) 极限抗弯承载力

表 12 中的数据表明，对于体外预应力 FRP 筋结构的极限抗弯承载力，GB 50608—2020^[54] 规范公式的计算精度最高。为了计算简便而选择 ACI 440.4R 时，计算精度可以接受。

表 12 体外预应力 FRP 筋混凝土梁抗弯承载力的试验值与理论值之比

Table 12 Ratios of experimental value to theoretical value of the flexural capacity of concrete beams prestressed with external FRP tendons

Codes	ACI 440.4R	BS 8110	<i>fib</i>	GB 50608
Average value	1.09	1.47	1.10	1.05
Variance	0.15	0.22	0.13	0.07

4) 转向区 FRP 筋应力

用数据库中试验梁极限承载力下 FRP 筋应力的试验数据和 Dolan 公式计算得到的理论数据进行对比，得到试验值与理论值比值的平均值为 1.02，方差为 0.04。结果表明，Dolan 公式对转向区 FRP 筋应力的预测结果与试验值的误差在 3% 以内，因此 Dolan 公式可以准确预测转向区 FRP 筋应力，设计时可直接采用。

5) 正常使用荷载下的裂缝宽度

表 13 是不同规范中裂缝宽度计算方法精度对比，需要注意的是，规范中给出的裂缝计算公式考虑了长期混凝土收缩徐变作用的增大效应，而试验数据为短期裂缝宽度实测值，因此在计算过程中需将规范公式计算的理论值进行一定处理后，再和试验值对比。可以看出，我国规范计算的裂缝宽度计算精确度与美国和欧洲规范接近，实际设计时可直接采用 GB 50608—2020^[54]。

6) 正常使用荷载下的短期挠度

将 ACI 440.4R、*fib* 和 GB 50608—2020^[54] 规范计算的 0.7 倍极限荷载下的挠度理论值和试验值对比(表 14) 可知，与裂缝宽度计算类似，GB 50608—2020^[54] 规范计算正常使用极限状态短期挠度的精

表 13 预应力 FRP 筋混凝土梁裂缝宽度的试验值与理论值之比

Table 13 Ratios of experimental value to theoretical value of the crack width of concrete beams prestressed with external FRP tendons

Codes	ACI 440.4R	<i>fib</i>	GB 50608
Average value	0.94	1.03	0.92
Variance	0.53	0.59	0.65

表 14 预应力 FRP 筋混凝土梁挠度的试验值与理论值之比

Table 14 Ratios of experimental value to theoretical value of the deflection of concrete beams prestressed with external FRP tendons

Codes	ACI 440.4R	<i>fib</i>	GB 50608
Average value	0.94	0.95	0.92
Variance	0.34	0.38	0.25

度与 ACI440.4R 和 *fib* 接近，设计时可采用 GB50608—2020^[54] 规范。

7) 长期挠度(反拱)及预应力损失预测

表 15 和表 16 是基于 AEMM 的结构长期挠度(反拱)及预应力损失的理论值精度。文献^[46] 中未测量预应力损失，且仅包含一个试件，因此文献^[46] 的长期挠度结果中无方差数据。对比结果表明，基于 AEMM 的长期性能预测方法考虑了混凝土徐变和 FRP 筋预应力损失之间的相互影响，计算结果准确。

表 15 预应力 FRP 筋混凝土梁长期挠度(反拱) 试验结果与 AEMM 计算的理论值之比

Table 15 Ratios of experimental value to theoretical value calculated using AEMM of the long-term deflection (camber) of concrete beams prestressed with external FRP tendons

Duration of loading/day	50	100	150	300	500	1 000
Average value of Shi ^[6]	0.92	1.04	1.12	/	/	/
Variance of Shi ^[6]	0.33	0.24	0.46	/	/	/
Cao and Fang ^[46]	1.08	1.12	0.95	0.94	1.15	1.13

表 16 预应力 FRP 筋混凝土梁长期预应力损失试验结果与 AEMM 计算的理论值之比

Table 16 Ratios of experimental value to theoretical value calculated using AEMM of the prestress loss of concrete beams prestressed with external FRP tendons

Duration of loading/day	50	100	150
Average value of Shi ^[6]	1.05	0.94	1.08
Variance of Shi ^[6]	0.23	0.41	0.33

5 结论与展望

围绕体外预应力纤维增强树脂基复合材料

(FRP)筋混凝土结构,文章从预应力 FRP 筋、关键技术和构件三个层次展开介绍。在预应力 FRP 筋层次,重点阐述了 FRP 筋的长期性能(蠕变、松弛和疲劳),提出了面向设计的 FRP 筋应力限值和松弛率;在关键技术层次,综述了 FRP 筋主要锚具形式,并结合试验结果分析了转向区 FRP 筋性能的影响因素,优化了 FRP 筋转向参数。在构件层次,总结了体外预应力 FRP 筋混凝土构件的试验研究结果,系统介绍了体外预应力 FRP 筋混凝土结构的设计方法,并通过既有文献中 42 根 FRP 筋体外预应力梁的试验结果对计算方法的精度进行了验证。主要结论如下:

(1)在土木工程常用的几种预应力 FRP 筋中,碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)筋的力学性能最好,玄武岩纤维增强树脂基复合材料(BFRP)筋和芳纶纤维增强树脂基复合材料(AFRP)筋次之。BFRP 的弹性模量较低,由混凝土收缩徐变产生的预应力损失值明显小于 CFRP 筋的相应值。BFRP 筋蠕变断裂应力为 $0.54f_u$ (f_u 是 FRP 筋的抗拉强度),1 000 小时松弛率仅为 2.6%,疲劳应力幅和最大应力限值分别为 $0.04f_u$ 和 $0.53f_u$,可以满足预应力材料对应力水平和松弛率的要求。AFRP 筋的松弛率大,会导致服役期间较大的预应力损失。

(2)FRP 筋锚固和转向是体外预应力 FRP 筋应用关键技术。预应力 FRP 筋锚具主要分为黏结型锚具、摩擦型锚具和夹片式锚具。黏结型锚具不会对筋材造成挤压,但长期力学性能不足;摩擦型锚具长期受力性能较好,但不利于施工便利性;夹片式锚具组装方便,但对 FRP 筋的切口效应明显。复合材料夹片锚具能够显著降低 FRP 筋端部应力集中,有效提供锚固力,锚固效率系数高于 90%。

(3)转向造成的 FRP 筋的强度下降率随转向角度的增加而增大,随转向半径的增加而减小。相比于转向角度,转向半径对弯折 FRP 筋的影响更加显著,建议转向半径和 FRP 筋半径的比值(R/r)不宜小于 200,转向角度不宜大于 5° ,但可根据 FRP 筋的种类适当放宽该限值。

(4)体外预应力 FRP 筋可显著提高钢筋混凝土结构的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载,并可以保证一定的结构延性。在长期荷载下,体外预应力 FRP 筋混凝土结构的变形和预应力损失呈现先快速增长后趋于稳定的规律,由于 BFRP 筋弹性

模量较低,其预应力损失低于普通钢绞线。体外预应力 FRP 筋混凝土结构疲劳破坏一般由内部的非预应力钢筋在裂缝处的疲劳断裂控制,可基于这一机制建立寿命预测模型。

(5)我国《纤维增强复合材料工程应用技术标准》GB 50608—2020 中体外预应力 FRP 筋混凝土结构设计计算方法的准确性得到 42 根 FRP 筋体外预应力梁的试验结果的验证;对于正常使用荷载下的长期变形和预应力损失预测,当精度要求较高时,建议采用按龄期调整有效模量法(AEMM)。

结合既有的国内外研究成果,未来尚需对体外预应力 FRP 筋混凝土结构开展的工作有以下几个方面:

(1)在 FRP 筋性能方面,还需全面研究 FRP 筋在多因素耦合作用下的耐久性,且尚需对弯折 FRP 筋的疲劳性能进行系统研究。

(2)在 FRP 筋锚固性能方面,应进一步提升锚固效率,开发适用于多根 FRP 筋的锚具,且尚需开展黏结型锚具、摩擦型锚具和夹片式锚具在不同应力水平下的疲劳性能研究。

(3)在体外预应力 FRP 筋混凝土构件静力性能方面,应进一步开展构件抗弯承载力极限状态可靠度分析,同时进行构件受剪性能及其设计计算方法研究。

(4)在体外预应力 FRP 筋混凝土构件疲劳性能方面,尚需考虑实际工程中的荷载情况,进行随机疲劳荷载下的构件性能研究,并建立相应的疲劳寿命预测方法。

(5)尚需开展体外预应力 FRP 筋混凝土构件的现场暴露试验,验证体外预应力 FRP 筋对严酷环境下结构力学性能和耐久性的提升效果。

参考文献:

- [1] 孙宝俊,周国华.体外预应力结构技术及应用综述[J].东南大学学报:自然科学版,2001,31(1):109-113.
SUN B, ZHOU G. A survey on Structural techniques and applications of external prestressing[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, 31(1): 109-113(in Chinese).
- [2] ACI Committee 440. ACI 440.4 R-04 Prestressing Concrete Structure with FRP Tendons[S]. USA: American Concrete Institute, 2004.
- [3] GRACE N F, NAVARRE F C, NACEY R B, et al. Design-construction of bridge street bridge-first CFRP bridge in the United States[J]. PCI Journal, 2002, 47(5): 20-35.

- [4] KARBHARI V M. Use of composite materials in civil infrastructure in Japan[R]. California, USA: University of California, 1998.
- [5] 鲁平印, 向星赞. 荷兰Dintelhaven桥的设计建造特色[J]. 中外公路, 2008, 28(9): 245-248.
- LU P, XIANG X. Design and construction features of Dintelhaven Bridge in Netherland[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(9): 245-248(in Chinese).
- [6] 史健喆. 海洋环境下BFRP筋体外预应力加固钢筋混凝土梁长期性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- SHI J. Long-term behaviors of RC beam prestressed with external BFRP tendons in marine environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2019 (in Chinese).
- [7] WANG X, SHI J, WU G, et al. Effectiveness of basalt FRP tendons for strengthening of RC beams through the external prestressing technique[J]. *Engineering Structures*, 2015, 101: 34-44.
- [8] 吴智深, 汪昕, 吴刚. FRP增强工程结构体系[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 116-117.
- WU Z, WANG X, WU G. FRP Reinforced engineering structural systems[M]. Beijing: Science Press, 2016: 116-117 (in Chinese).
- [9] YAMAGUCHI T, NISHIMURA T, UOMOTO T. Creep rupture of FRP rods made of aramid, carbon and glass fibers[J]. Structural Engineering & Construction: Tradition, Present and Future, 1998, 2: 1331-1336.
- [10] ANDO N, MATSUKAWA H, KAWAMURA M, et al. Experimental studies on the long-term tensile properties of FRP tendons[C]//Proceedings of the Third International Symposium on Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3). Sapporo: Japan Concrete Institute, 1997, 2: 203-210.
- [11] Tokyo Rope. CFCC, Carbon Fiber Composite Cable [EB/OL] Tokyo: Tokyo Rope Manufacturing Co. Ltd, 2000 [2021-03-15]. <http://www.tokyoropeco.jp/>.
- [12] SHI J, WANG X, WU Z, et al. Creep behavior enhancement of a basalt fiber-reinforced polymer tendon[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 94: 750-757.
- [13] BANIBAYAT P, PATNAIK A. Creep rupture performance of basalt fiber-reinforced polymer bars[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 28(3): 04014074.
- [14] ACI Committee 440. ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars[S]. USA: American Concrete Institute, 2015.
- [15] GUNNARSSON A. Bearing capacity, relaxation and finite element simulation for prestressed concrete beams reinforced with BFRP tendons[D]. Iceland: Reykjavik University, 2013.
- [16] THORHALLSSON E, JONSSON B S. Test of Prestressed concrete beams with BFRP tendons[C]//Workshop Structural Engineering and Composites Laboratory. Reykjavik: Reykjavik University, 2012.
- [17] SHI J, WANG X, HUANG H, et al. Relaxation behavior of prestressing basalt fiber-reinforced polymer tendons considering anchorage slippage[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 51(9): 1275-1284.
- [18] ZOU P X W. Long-Term Properties and Transfer Length of Fiber-Reinforced Polymers[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2003, 7(1): 10-19.
- [19] 周祝林, 杨云娣. 纤维增强塑料蠕变机理的初步探讨[J]. 玻璃钢/复合材料, 1985, 4: 31-35.
- ZHOU Z, YANG Y. A preliminary discussion on creep mechanism of fiber-reinforced plastic (FRP)[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 1985, 4: 31-35(in Chinese).
- [20] WANG X, SHI J, WU Z, et al. Creep strain control by pretension for basalt fiber-reinforced polymer tendon in civil applications[J]. Materials & Design, 2016, 89: 1270-1277.
- [21] WU Z, WANG X, IWASHITA K, et al. Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid FRP sheets[J]. *Composites: Part B Engineering*, 2010, 41(5): 396-402.
- [22] WANG X, SHI J, WU Z, et al. Fatigue behavior of basalt fiber-reinforced polymer tendons for prestressing applications[J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 20(3): 04015079.
- [23] SAADATMANESH H, TANNOUS F E. Relaxation, creep, and fatigue behavior of carbon fiber reinforced plastic tendons[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(2): 143-153.
- [24] SAADATMANESH H, TANNOUS F E. Long-term behavior of aramid fiber reinforced plastic (AFRP) tendons[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(3): 297-305.
- [25] EL REFAI A. Durability and fatigue of basalt fiber-reinforced polymer bars gripped with steel wedge anchors[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 17(6): 04013006.
- [26] 曾凡星. FRP拉索疲劳特性及其长寿命RC斜拉桥研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- ZENG F. Study on fatigue properties of FRP cables and longevity of RC cable-stayed bridge[D]. Nanjing: Southeast University, 2012 (in Chinese).
- [27] ADIMI M R, RAHMAN A H, BENMOKRANE B. New Method for Testing Fiber-Reinforced Polymer Rods under Fatigue[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2000, 4(4): 206-213.
- [28] ELREFAI A, WEST JS, SOUDKI K. Performance of CFRP tendon-anchor assembly under fatigue loading[J]. Composite Structures, 80(3): 352-360.
- [29] SONG ST, ZANG H, DUAN, N, et al. Experimental Re-

- search and Analysis on Fatigue Life of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Tendons[J]. *Materials*, 2019, 12(20): 786-795.
- [30] XIE G H, TANG Y S, WANG C M, et al. Experimental study on fatigue performance of adhesively bonded anchorage system for CFRP tendons[J]. *Composites: Part B*, 2018, 150: 47-59.
- [31] 诸葛萍, 丁勇, 侯苏伟, 等. 新型CFRP筋锚具优化设计及疲劳性能试验[J]. *工学版*, 2014, 48(10): 1822-1827, 1842.
- ZHUGE P, DING Y, HOU S, et al. Optimization design and fatigue test of new CFRP tendon anchor assembly[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(10): 1822-1827, 1842(in Chinese).
- [32] 张新越, 欧进萍. CFRP筋的疲劳性能[J]. *材料研究学报*, 2006, 20(6): 565-570.
- ZHANG X, OU J. Experimental study on fatigue behavior of CFRP bars[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2006, 20(6): 565-570(in Chinese).
- [33] ODAGIRI T, MATSUMOTO K, NAKAI H. Fatigue and relaxation characteristics of continuous aramid fiber reinforced plastic rods[C]//*Proceedings of the Third International Symposium on Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*. Sapporo: Japan Concrete Institute, 1997, 2: 14-16.
- [34] ATUTIS E, VALIVONIS J, ATUTIS M. Experimental study of concrete beams prestressed with basalt fiber reinforced polymers under cyclic load[J]. *Composite Structures*, 2018, Special Issue: 389-396.
- [35] SCHMIDT J W, BENNITZ A, TÄLJSTEN B, et al. Mechanical anchorage of FRP tendons – A literature review[J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 32: 110-121.
- [36] SCHMIDT J W, BENNITZ A, TÄLJSTEN B, et al. Development of mechanical anchor for CFRP tendons using integrated sleeve[J]. *Journal of Composites for Construction*. 2010, 14(4): 397-405.
- [37] TERRASI G P, AFFOLTER C, BARBEZAT M. Numerical optimization of a compact and reusable pretensioning anchorage system for CFRP tendons[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(2): 126-135.
- [38] 张磊. 基于同源材料的FRP筋夹片式锚具优化设计及性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- ZHANG L. Study on optimization design for a wedge anchor of FRP tendon based on homologous materials and its performance[D]. Nanjing: Southeast University, 2019 (in Chinese).
- [39] ZHU H, DONG Z Q, WU G, et al. Experimental Evaluation of Bent FRP Tendons for Strengthening by External Prestressing[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(5): 04017032.
- [40] SANTOH N. CFCC: Carbon Fiber Composite Cable[M]//Nanni A. *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1993: 223-248.
- [41] LOU T, LOPES S M R, LOPES A V. Numerical analysis of behaviour of concrete beams with external FRP tendons[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 35: 970-978.
- [42] GHALLAB A. Calculating ultimate tendon stress in externally prestressed continuous concrete beams using simplified formulas[J]. *Engineering Structures*, 2013, 46: 417-430.
- [43] GHALLAB A, BEEBY A W. Factors affecting the external prestressing stress in externally strengthened prestressed concrete beams[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2005, 27(9): 945-957.
- [44] WANG X, SHI J, WU G, et al. Effectiveness of basalt FRP tendons for strengthening of RC beams through the external prestressing technique[J]. *Engineering Structures*, 2015, 101: 34-44.
- [45] 史健喆; 汪昕; 吴智深. 采用同源材料夹片锚具的玄武岩纤维复材筋体外预应力加固混凝土梁受弯性能研究[J]. *工业建筑*, 2019, 9: 156-160.
- SHI J, WANG X, WU Z. Flexural behavior of RC beams prestressed with external BFRP tendons using a composite-wedge anchorage[J]. *Industrial Construction*, 2019, 9: 156-160(in Chinese).
- [46] 曹国辉, 方志. 体外CFRP筋预应力混凝土箱梁长期受力性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(2): 18-24.
- CAO G, FANG Z. Experimental study on the long-term behavior of concrete box girders prestressed with external CFRP tendons[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(2): 18-24(in Chinese).
- [47] 高宏. 体外预应力FRP筋加固混凝土梁的疲劳性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- GAO H. Research of the fatigue performance of RC beams externally prestressed with FRP tendons[D]. Nanjing: Southeast University, 2006 (in Chinese).
- [48] BRAIMAH A, GREEN M F, CAMPBELL T I. Fatigue behaviour of concrete beams post-tensioned with unbonded carbon fibre reinforced polymer tendons[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2006, 33(9): 1140-1155.
- [49] GRACE N F. Response of continuous CFRP prestressed concrete bridges under static and repeated loadings[J]. *PCI Journal*, 2000, 45(6): 84-102.
- [50] Elrefai A, West J, Soudki K. Fatigue of reinforced concrete beams strengthened with externally post-tensioned CFRP tendons[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29: 246-256.
- [51] 朱虹. 新型预应力FRP筋预应力混凝土结构的研究[D]. 南京:

- 东南大学, 2004.
- ZHU H. Study on concrete structure prestressed with FRP tendons[D]. Nanjing: Southeast University, 2004 (in Chinese).
- [52] GRACE N F, ENOMOTO T, YAGI K. Behavior of CFCC and CFRP Leadline prestressing systems in bridge construction[J]. *PCI Journal*, 2002, 47(3): 90-103.
- [53] 程君. 体外预应力CFRP钢筋混凝土连续梁疲劳性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- CHENG J. Study on the fatigue behavior of reinforced concrete continuous beams prestressed with external CFRP tendons[D]. Nanjing: Southeast University, 2017 (in Chinese).
- [54] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50608—2020 纤维增强复合材料工程应用技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD). GB 50608—2020 Technical standard for fiber reinforced polymer (FRP) in construction[S]. Beijing: China Planning Press, 2020 (in Chinese).
- [55] YOUAKIM S A, KARBHARI V M. An approach to determine long-term behavior of concrete members prestressed with FRP tendons[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(5): 1052-1060.
- [56] The International Federation for Structural Concrete (*fib*). *fib* MC2010 *fib* model code for concrete structures[S]. Hoboken, USA: Ernst & Sohn, 2010.
- [57] BSI Technical Committee B/525. BS 8110-1-1997 Structural use of concrete—Part 1: Code of practice for design and construction[S]. Britain: British Standard Institute, 1997.
- [58] PENG F, XUE W, TAN Y. Design approach for flexural capacity of prestressed concrete beams with external tendons[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(12): 04018215.
- [59] DOLAN C W. Design recommendations for concrete structures prestressed with FRP tendons: FHWA contract, final report[R]. USA: Federal Highway Administration, 2001.
- [60] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD). GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016 (in Chinese).
- [61] DU J S, YANG D, NG P L, et al. Response of concrete beams partially prestressed with external unbonded carbon fiber-reinforced polymer tendons[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 150-151: 344-349.
- [62] EL-REFAI A, WEST J, SOUDKI K. Strengthening of RC beams with external post-tensioned CFRP tendons. Case histories and use of FRP for prestressing applications[J]. *ACI Special Publication*, 2007, 245: 123-142.
- [63] BENNITZ A, SCHMIDT J W, NILIMAA J, et al. Reinforced concrete t-beams externally prestressed with unbonded carbon fiber-reinforced polymer tendons[J]. *ACI Structural Journal*, 2012, 109(4): 521-530.
- [64] JUNG W T, PARK J S, PARK Y H, et al. An experimental study on the flexural behavior of post-tensioned concrete beams with CFRP tendons[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 351-352: 717-721.
- [65] AU F T, SU R K, TSO K, et al. Behaviour of partially prestressed beams with external tendons[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2008, 60(6): 455-467.
- [66] TAN K, FAROOQ M, NG C, et al. Behavior of simple-span reinforced concrete beams locally strengthened with external tendons[J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(2): 174-183.