

# CFRP 筋黏结型锚具承载力评估试验与理论研究

孙莉莉, 诸葛萍, 徐玉林, 储焙宇  
(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 为探究土木工程中碳纤维增强复合材料(CFRP)筋黏结型锚具的内部力学行为,实现黏结型锚具的优化设计,建立了黏结型锚具承载力预测模型,给出了临界锚固长度计算方法,并通过 CFRP 筋-锚具拔出试验获得了锚固区筋-黏结介质界面残余黏结力与界面径向压应力的关系式。针对 CFRP 筋直径和锚固界面径向压应力对锚具计算承载力和临界锚固长度的影响进行了评估。研究表明:当黏结界面径向压应力在 0~160 MPa 范围内时,拔出试验最大拔出拉力、界面最大黏结力及界面残余黏结力随着界面径向压应力增加总体呈线性增加,其中,残余黏结力可达 20.5 MPa。锚具计算承载力随 CFRP 筋直径或径向压应力增加而呈线性增加,而临界锚固长度随径向压应力增加逐渐减小。对于 10mm 直径微压纹表面形式 CFRP 筋黏结型锚具,当界面径向压应力为 150 MPa,锚固安全系数为 1.5 时,其临界锚固长度为 427 mm。

**关键词:** 桥梁工程; CFRP 筋; 黏结型锚具; 残余黏结力; 承载能力

中图分类号:U444 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2018)06-0178-06

## Experimental and theoretical study on load-carrying capacity evaluation of CFRP tendon bond-type anchor

SUN Lili, ZHUGE Ping, XU Yulin, CHU Beiyu

(Institute of architectural engineering and environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** In order to explore the internal mechanical behavior of the tendon bond-type anchor made of the carbon fiber reinforced composite (CFRP) reinforcement in civil engineering and optimize the design of anchor, a prediction model of the bearing capacity of the bond-type anchor is established in this paper. From the prediction model, we can obtain the calculation method of the critical anchorage length. The relationship between the residual cohesive force of the interface of the anchorage zone and the interfacial radial stress was obtained by the pull out test of the CFRP bar anchor. The influence of the diameter of CFRP bar and the radial compressive stress at the anchorage interface on the bearing capacity and critical anchorage length of the anchorage is evaluated. The results showed that when the radial compressive stress of the boundary surface is within the range of 0 ~ 160 MP, the maximum pulling force, the maximum interfacial bonding force and the residual adhesion force of the interface increased linearly with the increase of the radial compressive stress of the interface, and the residual bond strength could reach 20.5 MPa. The calculated bearing capacity of the anchorage increased linearly with the increase of CFRP diameter or radial compressive stress, whereas the critical anchorage length decreased with increasing radial compressive stress. The critical anchorage length of the 10 mm diameter micro pressure stripe surface type CFRP tendons was 427 mm when the radial stress of the interface was 150 MPa and the anchorage safety factor is 1.5.

**Key words:** bridge engineering; CFRP tendons; bond-type anchor; residual cohesive force; load-carrying capacity

收稿日期:2018-06-28; 修回日期:2018-09-05

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY15E080012);宁波市自然科学基金项目(2017A610314);浙江省大学生科技创新活动计划项目(2018R405039)

作者简介:孙莉莉(1990-),女,浙江宁波人,硕士研究生,主要研究方向为结构工程。

通讯作者:诸葛萍(1982-),男,浙江瑞安人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为桥梁工程。

## 1 研究背景

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有质量轻、强度高、耐腐蚀性能好、耐疲劳等优点<sup>[1]</sup>,现以片材、筋材及索材的形式较多地应用于土木工程领域。其中,预应力 CFRP 筋可代替预应力钢绞线用于新建桥梁结构,也可作为主要加固材料用于土木工程结构的加固。工程应用中 CFRP 筋强度的发挥程度取决于其锚具,各型锚具的锚固机理还有待研究。

CFRP 筋材锚具按工作原理可分为机械夹持式锚具、黏结型锚具和组合式锚具。其中,黏结型锚具性能较机械式锚具稳定,还具有可避免咬伤筋材、抗疲劳性能好<sup>[2]</sup>等优点。黏结型锚具主要通过锚固区传力介质(LTM) - CFRP 筋界面的黏结剪应力平衡筋材的拉力以实现 CFRP 筋的锚固,它由 LTM、直筒钢管及其两端的螺栓组成,见图 1。针对 CFRP 黏结型锚具理论分析相对滞后的现状,梅葵花<sup>[3]</sup>提出了一种直筒式黏结型锚具黏结力的分布模型,并用解析法分析了其极限承载力。蒋田勇等<sup>[4]</sup>结合不同荷载下锚固区传力介质(LTM) - CFRP 筋界面黏结力分布特点,详细分析了其荷载机理,论证了极限状态时黏结力分布是光滑平顺的,从而提出了光滑曲线模型。朱元林等<sup>[5]</sup>采用 4 种不同 LTM,对不同长度和不同锚筒锥角大小的锚具进行了静载试验,得出不同填料对锚固长度的影响。Zhang 等<sup>[6]</sup>采用膨胀混凝土 LTM 锚具对 4 种 FRP 筋进行拔出试验,提出了界面传力形式及黏结力 - 滑移量关系模型。Al - Zahrani 等<sup>[7]</sup>研究表明,纤维增强复合材料(CFRP)筋材的锚固黏结性能取决于锚具 LTM - 筋材的接触面积和 LTM 的剪切强度。Benmokrane 等<sup>[8]</sup>研究了 AFRP 和 CFRP 筋在水泥中的拉拔性能,得出筋材表面形式、黏结长度及灌浆料的刚度对黏结强度的影响较大。郭书峰<sup>[9]</sup>分析了 CFRP 筋 - 环氧树脂胶界面黏结力的组成形式,通过试验得出 CFRP 筋直径大小对界面破坏模式有较大影响,界面径向压应力大小对界面最大黏结力影响较大。Jung 等<sup>[10-12]</sup>研究了不同 CFRP 筋表面形式和不同锚固形式对锚具性能的影响,并通过在锚固区分裂 CFRP 筋束增加黏结面积的方法提高锚具承载力。Park 等<sup>[13]</sup>研究了锚具 LTM 中添加不同矿物纤维材料对 CFRP 筋锚固性能的影响,通过试验得出 LTM 中添加矿物纤维材料可以增强 LTM 的黏结强度。在试验研究方面,对黏结型锚具的研究主要集中在黏结力影响因素,黏结力与滑移量关系、界面压应力

对黏结性能的影响等方面。其中,界面径向压应力大小对性能的影响研究方面还停留在低应力阶段,高压应力情况下的相关研究还有待开展。在锚具锚固承载力评估理论研究方面,现有的研究还存在机理不明及理论和试验相脱离的问题。

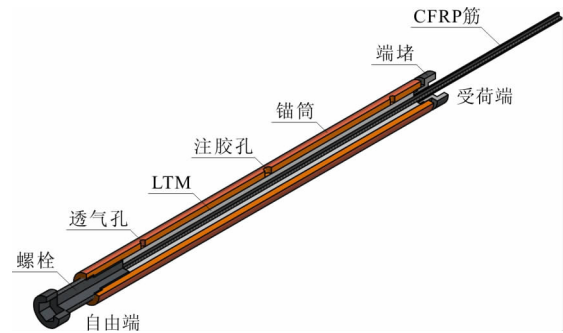


图 1 黏结型锚具构造图

本文对 CFRP 筋黏结型锚具的锚固承载力和临界锚固长度的理论评估方法开展了研究,并对上述理论评估所需的锚具界面径向压应力与界面最大黏结力和残余黏结力的关系进行了试验实测与分析,并对锚固性能的影响因素进行了定性分析。通过研究建立锚固承载力和临界锚固长度的理论评估模型,该模型可用于锚具的优化设计,为黏结型锚具的工程应用提供参考。

## 2 锚具承载力模型

CFRP 筋黏结型锚具构造如图 1 所示。锚具黏结界面黏结力的影响因素有 CFRP 筋表面形式<sup>[10]</sup>、填充介质胶体的力学性能<sup>[14]</sup>和界面径向压应力<sup>[9]</sup>等。由郭书峰<sup>[9]</sup>对 CFRP 筋与环氧树脂胶界面传力机理的研究可知,CFRP 筋受力后,随着拉力的增大,LTM - CFRP 筋界面在锚固区范围内逐渐发生剥离,剥离界面还残存有较大的残余黏结力,其大小可超过最大黏结力的 30%。该残余黏结力与界面的径向压应力大小有关,当压应力在 0 ~ 160MP 范围内时,基本呈线性关系。残余黏结力可通过 CFRP 筋 - 锚具的拔出试验直接测定。考虑到锚具在极限状态下绝大部分黏结区域处于剥离状态,因此,可用残余黏结力来对锚具的承载能力进行评估,即:

$$F_{au} = \pi dl\tau_{res}(\sigma_r) \quad (1)$$

式中:  $F_{au}$  为锚具承载力, kN;  $d$  为 CFRP 筋直径, mm;  $l$  为锚固长度, mm;  $\tau_{res}(\sigma_r)$  为 CFRP 筋 - LTM 界面的残余黏结应力, MPa, 其大小与界面径向压应力  $\sigma_r$  有关。以该承载力为基础对锚具进行优化设计可获得偏安全的设计结果。郭书峰<sup>[9]</sup>研究表明,界

面径向压应力的大小对其残余黏结力影响较大,径向压应力越大,残余黏结力也就越大。因此,为提高锚具的锚固承载力,需尽量增加锚固区 LTM 的径向压应力,该压应力可通过预紧锚具自由端的螺栓进行施加。

为充分发挥 CFRP 筋的抗拉性能,锚具的设计承载力需大于 CFRP 筋的极限拉力  $F_{cu}$ ,即:

$$F_{au} = \pi d l \tau_{res}(\sigma_r) \geq \eta F_{cu} \quad (2)$$

式中:  $F_{au}$  为锚具设计承载力, kN;  $\eta$  为安全系数,考虑到材料差异、操作偏差、经济性等原因,本文取  $\eta = 1.5$ 。由公式(2)可得锚具的临界锚固长度  $l_{cr}$ :

$$l_{cr} = \frac{\eta F_{cu}}{\pi d \tau_{res}(\sigma_r)} \quad (3)$$

### 3 试验研究

由公式(1)可知,若能获得锚固区界面的残余黏结力,即可实现对锚具承载力的评估。本文通过 CFRP 筋-LTM 拔出试验测定该界面的残余黏结力。

#### 3.1 试验设计

拔出试验试件如图 2 所示。试件一端为界面黏结长度仅为 50 mm 的黏结型锚具,考虑到方便组装和重复利用问题,另一端为承载力大得多的夹片式锚具。试件中黏结型锚具锚管内径为 20 mm,外径为 34 mm,长度为 80 mm。LTM 由环氧树脂胶和石英砂混合而成,前者占总质量的 54.5%。石英砂可提高 LTM-CFRP 筋界面的摩擦力和咬合力,减少胶体在灌注过程中热量的释放,从而使得 LTM 更加密实。

本试验采用的环氧树脂胶和 CFRP 筋的材料特性参数由厂商提供。环氧树脂胶剪切强度为 18.3 MPa,拉伸强度为 41.2 MPa,断裂伸长率为 11.3%。CFRP 筋的表面形式为微压纹形式,见图 3,其实测直径为 7.56 mm,抗拉强度为 2 400 MPa,弹性模量为 135 GPa。

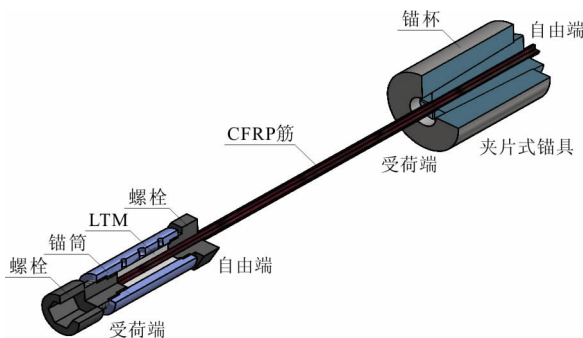


图 2 CFRP 筋-环氧树脂拔出试验试件



图 3 微压纹表面形式 CFRP 筋

试件中 LTM 的径向压应力  $F_{pre}$  大小通过自由端 LTM 的轴向预压力大小进行控制,预压力通过预紧自由端的螺栓进行施加,自由端螺栓轴力通过扭力扳手施加。根据预紧前后 LTM 体积不变的原理,可建立起预压力  $F_{pre}$  与 LTM 表面径向压应力  $\sigma_r$  的关系,见图 4。预压力  $F_{pre}$  与扭力扳手扭矩  $T$  的关系模型通过万能试验机、压力传感器以及应变仪进行标定。通过扭力扳手施加扭矩来达到预紧锚具的效果。

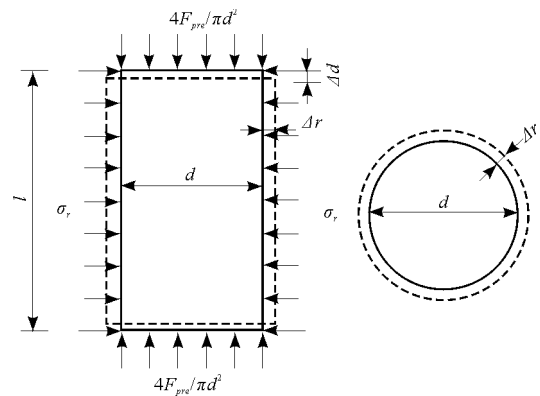


图 4 预压力-径向压应力示意图

本次试验共进行了 7 种工况的试验,因试件 LTM 体积小,灌注密实度不易保证,且每个试件至少需要 3 个有效试验值,为了减少上述试验误差且满足经济性要求,每种工况设 5 个试件(编号分别为 S-i-1、S-i-2、S-i-3、S-i-4、S-i-5),各种试件的径向压应力不同,最大的径向压应力达到 159 MPa,见表 1。

表 1 试验工况表

试件类型编号	$d/\text{mm}$	$F_{pre}/\text{kN}$	$\sigma_r/\text{MPa}$	试件数量
S-1	7.58	0.000	0	5
S-2	7.58	7.098	26.5	5
S-3	7.58	14.126	53.0	5
S-4	7.58	21.084	79.5	5
S-5	7.58	27.974	106.0	5
S-6	7.58	34.796	132.5	5
S-7	7.58	41.550	159.0	5

3.2 界面拔出试验

试验采用 600 kN 万能伺服拉力试验机对试件进行加载,并记录试验过程力与位移相关数据和 CFRP 筋的破坏形态。静载试验安装见图 5。

加载过程参考 JSCE - E531 - 1995<sup>[15]</sup> 相关规定,加载速度建议为 100 ~ 500 MPa/min。本次试验加载速度为 200 MPa/min。试验结果见表 2 和图 6。

试验结果表明,该黏结型锚具破坏形式分为锚固端 CFRP 筋滑脱破坏和锚固端 CFRP 筋剥离破坏两种。滑脱破坏即 CFRP 筋与 LTM 界面发生滑脱。剥离破坏则是 CFRP 筋表层纤维因黏结力过大而从母材中被剥离出来而产生的破坏形式。径向压应力在 106 MPa 及以下时,锚具破坏形式为锚固端 CFRP 筋滑脱破坏;径向压应力超过 106 MPa 时,锚具破坏

形式为 CFRP 筋剥离破坏。拔出试验 S - 6 试件拉力 - 界面滑移量曲线见图 7。界面破坏模式见图 8。

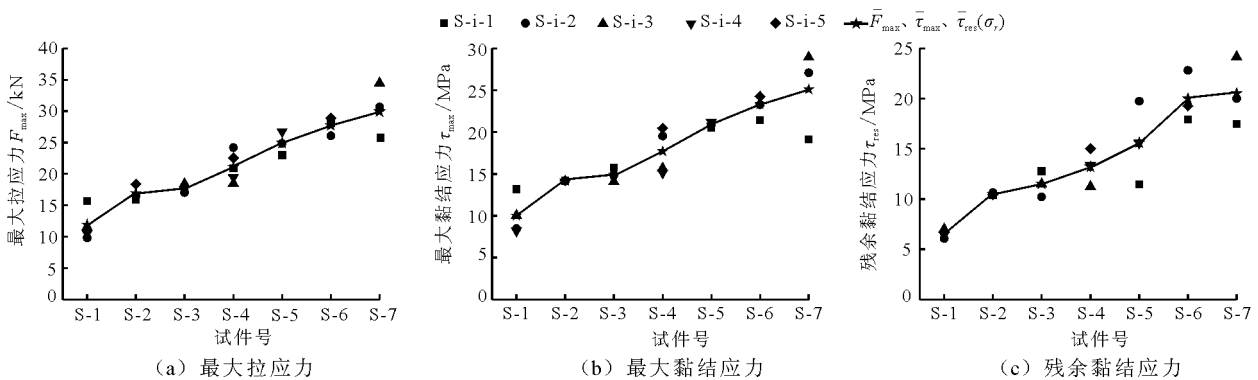


图 5 静载试验图

表 2 界面拔出试验结果

试件类型编号	$\sigma_r$ /MPa	$\bar{F}_{max}$ /kN	$\bar{\tau}_{max}$ /MPa	$\bar{\tau}_{res}(\sigma_r)$ /MPa	破坏形态
S-1	0	11.9	10.0	6.5	锚固端 CFRP 筋滑脱
S-2	26.5	16.9	14.2	10.5	锚固端 CFRP 筋滑脱
S-3	53.0	17.7	14.9	11.5	锚固端 CFRP 筋滑脱
S-4	79.5	21.1	17.7	13.2	锚固端 CFRP 筋滑脱
S-5	106.0	24.9	20.9	15.6	锚固端 CFRP 筋滑脱
S-6	132.5	27.7	23.3	20.0	锚固端 CFRP 筋剥离
S-7	159.0	29.9	25.1	20.5	锚固端 CFRP 筋剥离

注:  $\bar{F}_{max}$  为锚具破坏时平均最大拉力,  $\bar{\tau}_{max}$  为平均最大黏结力,  $\bar{\tau}_{res}(\sigma_r)$  为平均残余黏结力。



注:个别试件由于灌胶不密实,锚筒损坏等原因,试验数据不可靠,未在图中表示。

图 6 界面拔出试验结果

由图 7 可以看出,试验前期拉力 - 界面滑移量曲线呈直线增长,CFRP 筋与 LTM 没有发生相对位移,此时拉拔力由 CFRP - LTM 界面胶着力、摩擦力及咬合力组成。当力值达到最大值后,拉力 - 界面滑移量曲线开始下降,说明 CFRP - LTM 界面开始破坏,CFRP 筋与 LTM 开始发生明显的相对滑移。当胶着力彻底消失后,锚具的拉拔力由摩擦力与咬合力组成,CFRP 筋与 LTM 滑移量增大,CFRP 与

LTM 发生了相互剥离现象。

平均最大黏结力、平均最大残余黏结力与锚具预紧后胶体径向压应力的关系测试结果见图 9。

由图 9 可知,随着胶体径向压应力增大,锚固区破坏时平均最大黏结应力随之逐渐增大。当径向压应力为 159 MPa 时,对应的残余黏结力达 20.5 MPa。径向压应力在 0 ~ 26.5 MPa 时,平均最大黏结力增加最快;径向压应力在 26.5 ~ 53.0 MPa 时,

平均最大黏结力增加缓慢;径向压应力超过 53.0 MPa 后,平均最大黏结力增加较快,但增幅有所减弱,总体呈线性增加。平均残余黏结力随锚具径向压应力增加呈上升趋势,总体为线性关系。对平均残余黏结力和压应力之间的关系进行线性拟合后,可得出平均残余黏结力和径向压应力的关系模型:

$$\bar{\tau}_{res} = 0.088\sigma_r + 6.996 \quad (4)$$

$$(0 \leq \sigma_r \leq 160 \text{ MPa})$$

拟合均方差为  $\sigma(|\tau_{res}|) = 0.9628$ 。

利用该模型,并结合公式(1)和公式(3)可对

CFRP 筋黏结型锚具的承载力和锚具的临界锚固长度进行评估。

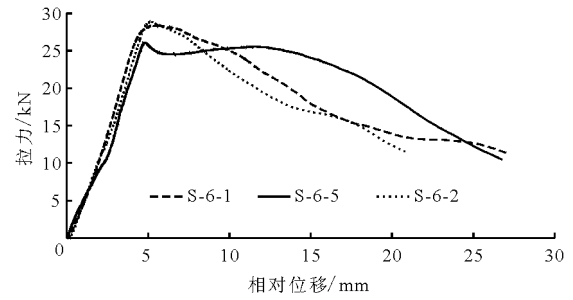


图7 拔出试验拉力-界面滑移量曲线(S-6 试件)

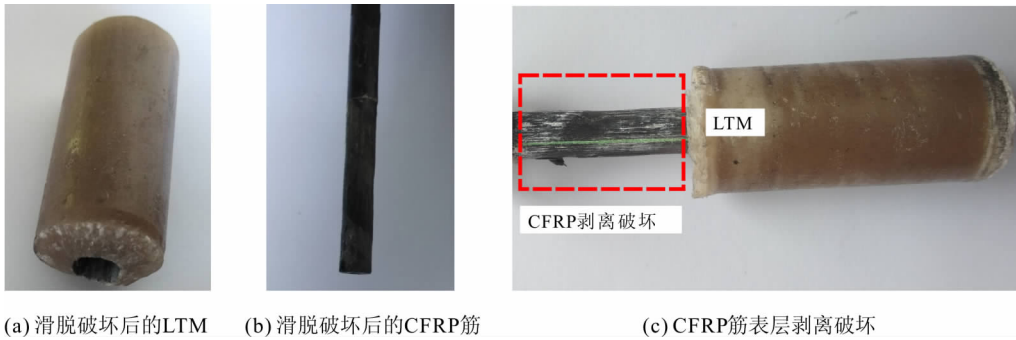


图8 CFRP 筋-LTM 界面破坏模式

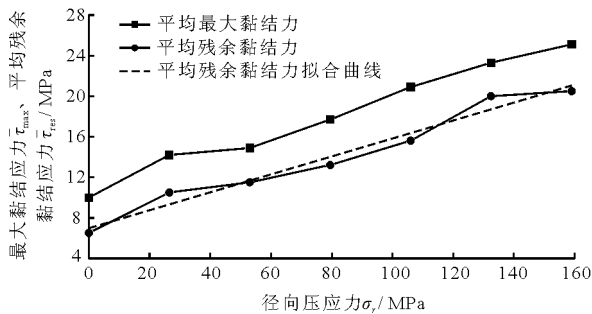


图9 平均最大黏结应力和平均残余黏结力

## 4 锚固性能评估

### 4.1 CFRP 筋直径的影响

根据公式(2)、(3)和(4),可以求得 CFRP 筋直径对锚具承载力及临界锚固长度的影响(图 10、11)。以锚具的径向压应力设计值 150 MPa 为例,

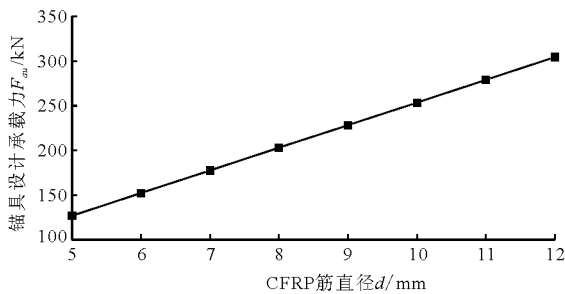


图10 CFRP 筋直径与设计承载力的关系

当锚固长度为 400 mm 时,锚具设计承载力随 CFRP 筋直径增加呈线性增长(图 10),临界锚固长度亦随 CFRP 筋直径增长呈线性增加(图 11)。极限拉力设计值为 181 kN 直径为 10 mm 的 CFRP 筋所需的临界锚固长度为 427 mm。在此临界锚固长度下锚具的设计承载力 271 kN。

### 4.2 界面径向压应力的影响

由公式(2)、(3)和(4),可求得界面径向压应力对锚具设计承载力和临界锚固长度的影响(图 12、13)。以直径为 8 mm 的 CFRP 筋为例,界面径向压应力在 0 ~ 150 MP 范围内时,锚具设计承载力呈线性增加,见图 12。临界锚固长度随径向压应力增加而呈非线性减小,见图 13,径向压应力越大,CFRP 筋所需的临界锚固长度越小。

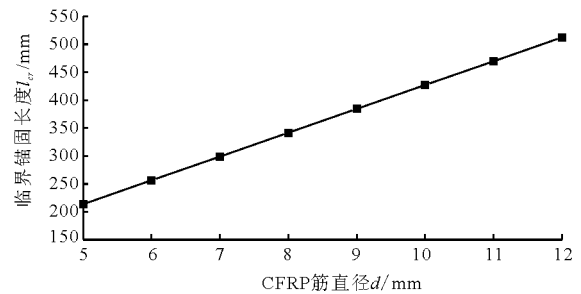


图11 CFRP 筋直径与临界锚固长度的关系

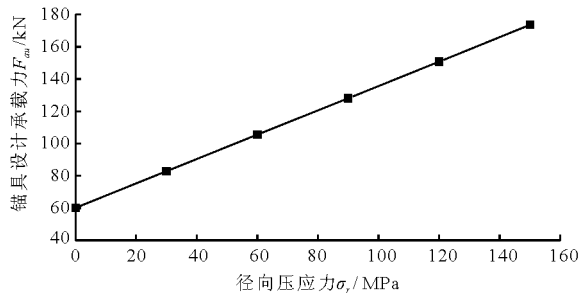


图12 径向压应力与承载力的关系

当界面设计径向压应力在 0 ~ 160 MPa 范围内,且径向压应力一定时,通过公式(3)与公式(4)可算得实际工程中不同直径 CFRP 筋黏结型锚具所需的临界锚固长度。当 CFRP 筋直径一定时,不同设计径向压应力大小对应的临界锚固长度也可求得。

## 5 结论

本文通过对 CFRP 筋黏结型锚具内部力学行为和极限承载力进行分析,并对该锚固体系进行拉拔试验,定性分析黏结型锚具锚固性能影响因素后可得如下结论:

(1) 锚具黏结界面最大残余黏结力随界面径向压应力的增加基本呈线性增长,对于微压纹表面形式的 CFRP 筋和环氧树脂胶 LTM,当界面径向压应力为 160 MPa 时,其残余黏结力可达到 21.1 MPa。

(2) 利用本文锚具承载力和临界锚固长度评估模型可对 CFRP 筋黏结型锚具的设计承载力和临界锚固长度进行评估。对于常用直径 10 mm 的微压纹 CFRP 筋,当设计锚固安全系数为 1.5 时,所需的临界锚固长度为 427 mm。

(3) 锚具设计承载力和临界锚固长度与 CFRP 筋直径和径向压应力大小有关。临界锚固长度随 CFRP 筋直径增加线性增加,而随径向压应力增加而逐渐减小。

### 参考文献:

- [1] 叶列平,冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报,2006,39(3):24-36.
- [2] 诸葛萍,任伟平,强士中,等. 碳纤维(CFRP)筋锚固体系的研究现状及应用[J]. 中外公路,2010,30(2):158-163.
- [3] 梅葵花. CFRP 粘结型锚具的受力性能分析[J]. 桥梁建设,2007,(3):80-83.
- [4] 蒋田勇,方志. 极限状态时 CFRP 筋粘结式锚具粘结力分布[J]. 公路交通科技,2007,24(12):75-78+92.

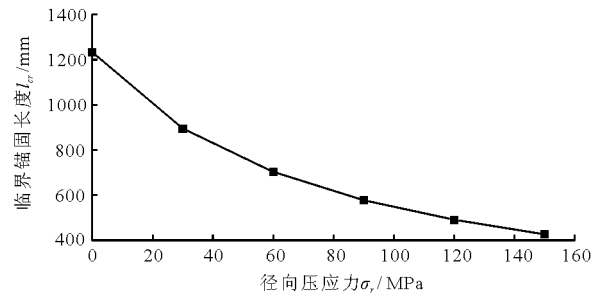


图13 径向压应力与临界锚固长度的关系

- [5] 朱元林,刘礼华,张继文,等. 碳纤维复合材料筋在不同锚固填料中的锚固性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2015(7):78-82.
- [6] ZHANG Burong, BENMOKRANE B. Pullout bond properties of fiber-reinforced polymer tendons to grout[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002,14(5):399-408.
- [7] AL-ZAHRANI M M, ALDULAIJAN S U, NANNI A, et al. Evaluation of bond using FRP rods with axisymmetric deformations [J]. Construction & Building Materials, 1999,13(6):299-309.
- [8] BENMOKRANE B, ZHANG B, CHENNOUF A. Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications[J]. Construction & Building Materials, 2000,14(3):157-170.
- [9] 郭书峰. 碳纤维复合材料筋-环氧树脂胶界面传力机理研究[J]. 工业建筑,2017,47(4):111-115.
- [10] JUNG W T, PARK J, KANG J, et al. A Fundamental study on the anchor performance of non-surface treated Multi CFRP Tendons [J]. International Scholarly and Scientific Research & Innovation, 2013,11(7):872-876.
- [11] JUNG W T, KEUM M S, KANG J Y, et al. An experimental study on anchor performance of bare CFRP tendons with bond type anchor[J]. Advanced Materials Research, 2015,1082:408-411.
- [12] JUNG W T. Study on tensile characteristic for CFRP cable without surface treatments [J]. Procedia Engineering, 2011,14(3):1518-1523.
- [13] PARK C G, KIM J O, PARK S K, et al. Bonding properties of carbon fibre reinforced polymer (cfpr) reinforcing bar in high-strength concrete with mineral admixtures[J]. Polymers & Polymer Composites,2009,17(9):545-556.
- [14] 张长青,王鹏. CFRP 筋锚具粘结界面上剪应力的影响参数研究[J]. 公路交通技术,2011(3):55-59.
- [15] JSCE-E531-1995, Test method for tensile properties of continuous fiber reinforcing htmaterials[S]. Tokyo :Japan Society of Civil Engineers, 1995.