

预应力 CFRP 筋弯曲极限承载力理论与试验研究

蔡万赞¹, 王航宇², 吴秀勇², 夏嘉君¹, 诸葛萍^{1*}

(1. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 温州市公路与运输管理中心, 浙江 温州 325002)

摘要: 为了得到碳纤维复合材料(Carbon Fiber-reinforced Polymer, CFRP)筋弯曲状态下的极限承载力, 开展了不同直径的 CFRP 筋在不同弯曲半径下抗拉极限承载力研究. 首先, 根据前人的理论公式, 分析 CFRP 筋直径和弯曲半径对弯曲抗拉强度的影响, 在此基础上建立 CFRP 筋在弯曲状态下极限承载力的理论计算模型; 其次, 利用建立的模型对 2 种不同直径的 CFRP 筋在 3 种不同弯曲半径下的弯曲极限承载力进行测试, 并将测试结果与理论模型计算结果进行对比, 验证理论模型的正确性; 最后, 通过 CFRP 筋弯曲状态下极限承载力理论计算模型, 对不同直径和弯曲半径的 CFRP 筋弯曲极限承载力进行预测. 结果表明: 在相同弯曲半径下, CFRP 筋的弯曲极限强度随其直径的增大而减小; 在相同直径下, CFRP 筋的弯曲极限强度随其弯曲半径的增大而增大; 当弯曲半径大于 5 m 时, 直径为 10 mm 和 12 mm 的 CFRP 筋的张拉效率均超过 90%. 本文所建立的理论计算模型的计算结果与试验结果吻合较好, 可用于预测不同弯曲工况下 CFRP 筋的极限承载力.

关键词: 预应力; 碳纤维复合材料筋; 弯曲半径; 张拉效率; 极限承载力

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 06-0047-07

碳纤维复合材料(CFRP)筋因其高强度、低密度、耐腐蚀、耐疲劳等优异性能^[1-4]被广泛应用于土木工程, 特别是桥梁工程的抗弯加固领域^[5-7]. 由于CFRP材料本身的抗剪性能较差^[8], 应用在悬索桥主缆或梁式桥连续抗弯抗剪加固时, 需对CFRP筋进行弯起, 筋材因其自身的弯曲作用会导致其抗拉性下降^[9], 从而不能较好地发挥材料性能. 因而, 研究CFRP筋在弯曲状态下的力学性能具有重要意义.

目前, 已有学者对CFRP筋的弯曲性能进行了研究, 如El-Sayed等^[10]研究表明, 在弯曲半径较小时, CFRP筋在弯曲状态下的抗拉强度较直线状态有较大折减; 诸葛萍等^[11]对弯折角分别为1.5°、2.0°、2.5°、3.0°时CFRP筋的弯曲抗拉强度进行了测试, 给出了CFRP筋弯曲折减系数的建议公式; 侯苏伟等^[12]对CFRP丝在鞍座及索夹处2种不同弯折变形状态下的内力分布进行了分析, 推导出

CFRP筋抗弯折效率的计算公式. 但有关CFRP筋在弯曲状态下的极限承载力研究鲜见报道.

为了了解CFRP筋在弯曲状态下的极限承载力, 本文首先对CFRP筋弯曲状态下的极限强度进行了理论分析, 借鉴已有的CFRP筋弯曲时的理论计算公式^[13], 建立CFRP筋弯曲状态下极限承载力的理论计算模型; 然后对不同直径的CFRP筋在不同弯曲半径下极限承载力进行试验测试, 将试验数据和理论计算结果进行对比分析; 最后通过理论计算模型对不同弯曲工况下CFRP筋的极限承载力进行预测, 以期为CFRP筋弯曲抗弯加固提供参考.

1 理论分析

1.1 CFRP 筋弯曲状态下受力分析

CFRP筋通常采用转向装置实现筋的弯曲转向. 对CFRP筋在弯曲状态下进行受力分析, 结果如图1所示.

收稿日期: 2022-04-12.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(52078256); 浙江省基础公益计划(LGF22E080023).

第一作者: 蔡万赞(1998-), 男, 浙江温州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 桥梁工程. E-mail: 512036084@qq.com

*通信作者: 诸葛萍(1982-), 男, 浙江温州人, 教授, 主要研究方向: 桥梁工程. E-mail: zhugeping@nbu.edu.cn

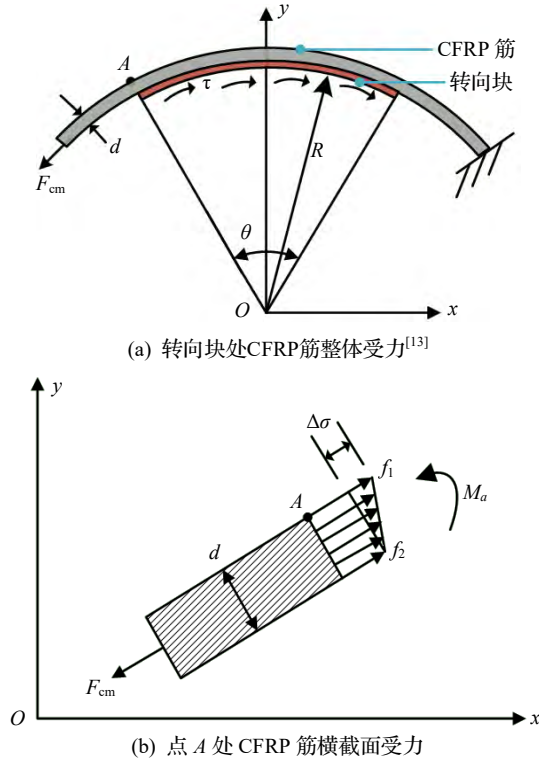


图1 转向块处CFRP筋受力分析

由图1(a)可知,假设CFRP筋横截面满足平截面,若CFRP筋右端轴向受到约束,对CFRP筋左端轴向进行张拉,因CFRP筋在转向块上受到摩擦力(τ),则极限状态下最先进入破坏状态位置为点A,只需对点A处的横截面进行受力分析,即可得出CFRP筋在转向块处的弯曲抗拉强度(图1(b)).

在极限状态下,CFRP筋在点A处其径向外侧纤维与内侧界面处纤维之间的应力差($\Delta\sigma$)为:

$$\Delta\sigma = f_1 - f_2 = \frac{\theta(R+d) - \theta R}{\theta R} E_c = \frac{d}{R} E_c, \quad (1)$$

式中: f_1 和 f_2 分别为极限拉力作用下CFRP筋在转向块处的径向外侧纤维与内侧界面处纤维的拉应力,其中 $f_1 = f_{cu}$ (f_{cu} 为CFRP筋的抗拉强度); θ 为CFRP筋在转向块的包角; R 为转向块半径; d 为CFRP筋直径; E_c 为CFRP筋纵向弹性模量.

CFRP筋在转向块处的弯曲抗拉强度(f_{cm})的计算公式为:

$$f_{cm} = f_{cu} - \frac{1}{2} \Delta\sigma. \quad (2)$$

结合式(1)和式(2)可知,当 $\Delta\sigma < f_{cu}$, 即 $R > dE_c/f_{cu}$ 时,在极限拉力作用下,CFRP筋外层纤维还未进入破坏状态,则式(2)成立.因此,CFRP筋的弯曲

临界半径(R_{cr})为:

$$R_{cr} = \frac{d}{f_{cu}} E_c,$$

即在此弯曲半径下,CFRP筋即使不受轴向拉力作用,其外层纤维也会进入破坏状态.

由式(1)和式(2)可解得弯曲抗拉强度为:

$$f_{cm} = f_{cu} - \frac{d}{2R} E_c, \quad R > \frac{d}{f_{cu}} E_c. \quad (3)$$

将弯曲极限状态下,CFRP筋抗拉强度的发挥率称为弯曲张拉效率(η_t),则:

$$\eta_t = \left(\frac{f_{cm}}{f_{cu}} \right) \times 100\%. \quad (4)$$

弯曲张拉效率是反映CFRP筋抗弯曲性能的主要指标,弯曲张拉效率越大,表示抗弯曲性能越好.此外,由式(3)可知,CFRP筋在转向块处的弯曲抗拉强度与其在转向块上的包角无关,只与材料本身性能和弯曲半径有关.

1.2 CFRP筋弯曲状态极限承载力

从上述分析可知,CFRP筋在弯曲状态下内外侧纤维存在应力差,当CFRP筋外侧纤维产生初始破坏时,其内侧大部分截面的纤维还未达到其破坏极限强度,此时CFRP筋最外侧纤维的抗拉强度为材料自身的极限抗拉强度.当CFRP筋外侧纤维破坏后,破坏处的力由剩下的CFRP筋截面承担,横截面的应力也会重新分布,直到新的外侧纤维达到极限状态,CFRP筋的破坏形态类似于逐层破坏模式.因此,在CFRP筋弯曲状态下,其极限承载力往往不是出现在外侧纤维刚产生破坏时,而是出现在外侧纤维部分破坏后的某一时刻.为了研究CFRP筋在弯曲破坏时的极限承载力,对其横截面进行分析,结果如图2所示.

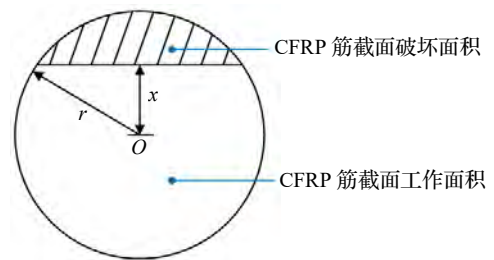


图2 CFRP筋横截面受力分析

从图2可知,假设当CFRP筋圆心位置到发生破坏后上截面的高度为 x 时CFRP筋的承载力达到

最大, 则将 CFRP 筋整个圆截面的承载力减去破坏截面(图 2 中阴影部分)的承载力, 即可得到 CFRP 筋工作截面的承载力, 其中阴影部分下边缘的应力为 f_{cu} , 圆心位置的应力为 $f_{cu} - E_c / R$.

CFRP 筋工作截面极限承载力(F)的计算公式为:

$$F = \left(f_{cu} - \frac{E_c}{R} x \right) \pi r^2 - f_{cu} \left[\arccos \left(\frac{x}{r} \right) r^2 - \sqrt{r^2 - x^2} x \right], \quad (5)$$

式中: r 为 CFRP 筋的半径; η 为锚固效率.

由于转向块处 CFRP 筋的极限拉力大小较直线状态有所下降, 因而式(5)满足条件 $F \leq f_{cu} \eta \pi r^2$.

根据式(5)可知, CFRP 筋截面承载力是一个关于 x 的函数, 为求其最大值, 令 $F' = 0$, 根据函数单调性, 其最大值的计算公式为:

$$x = \frac{r[(2f_{cu}R + \pi E_c r)(2f_{cu}R - \pi E_c r)]^{1/2}}{2f_{cu}R}. \quad (6)$$

将 x 代入式(5), 可求得 CFRP 筋在弯曲状态下破坏达到的最大承载力.

2 试验研究

2.1 CFRP 筋强度试验

为了测得 CFRP 筋在锚固状态下的抗拉强度, 对直径为 12 mm 的 CFRP 筋进行张拉力试验(图 3). CFRP 筋采用挤压式锚具固定, 将其安装于压力机上, 以 $1 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度缓慢张拉, 直至破坏^[14].



图 3 CFRP 筋张拉力试验

3 组直径为 12 mm 的 CFRP 筋的张拉力试验结果见表 1.

表 1 CFRP 筋张拉力试验结果

编号	CFRP 筋直径/mm	极限拉力/kN
TJ-1	12	228.43
TJ-2	12	222.76
TJ-3	12	226.12

取试验结果的平均值, 计算出 CFRP 筋在锚固状态下的抗拉强度为 1997.26 MPa. 生产厂家给出的 CFRP 筋材料的抗拉强度为 2100 MPa, CFRP 筋纵向弹性模量为 160 GPa, 表明本试验的锚固效率为 95.1%.

2.2 CFRP 筋弯曲试验

2.2.1 试验方案

对 CFRP 筋进行弯曲试验, 考虑目前工程常用的 CFRP 筋规格及试验梁的尺寸, 设置 6 种工况(表 2). 当 CFRP 筋直径较小时($<10 \text{ mm}$), 其达不到结构所需承载力的加固需求; 当 CFRP 筋直径过大时($>12 \text{ mm}$), 碳纤维筋运输不便, 所以目前实际工程中使用 10 mm 和 12 mm 规格的碳纤维筋最多. 因此, 选用 CFRP 直径规格为 10 mm 和 12 mm.

表 2 6 种弯曲试验工况

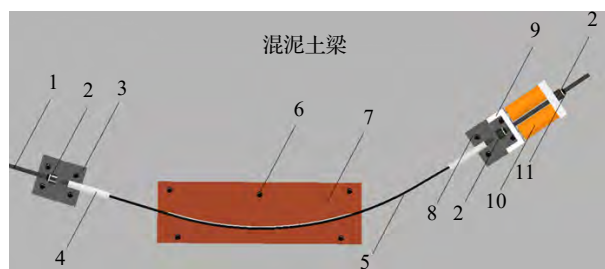
试件	弯曲半径/m	CFRP 筋规格直径/mm
WZ-1-10	1.0	10
WZ-1-12	1.0	12
WZ-1.5-10	1.5	10
WZ-1.5-12	1.5	12
WZ-2-10	2.0	10
WZ-2-12	2.0	12

本文设计的 CFRP 筋弯曲极限承载力试验加载装置由 3 部分组成: 张拉装置、锚固装置和转向装置. 张拉装置由张拉钢板、2 个行程为 20 t 千斤顶和 3 个 220 kN 的传感器组成; 锚固装置由 2 个钢支座和挤压型锚具组成; 数据采集仪器为静态应变仪, 用于收集应变片以及传感器的数据. CFRP 筋弯曲极限承载力加载装置如图 4 所示. 其中转向块由 2 块钢板焊接而成, 底部钢板尺寸为: $70 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 转向块上起导轨作用的钢板其包角都为 20° .

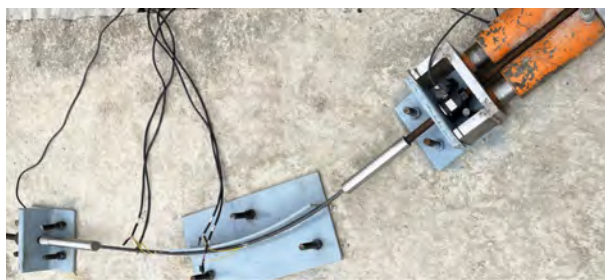
CFRP 筋弯曲极限承载力试验主要有 2 步:

(1)张拉预处理: 首先将混凝土表面打磨平整, 再将张拉装置、锚固装置和转向装置预先安装到位, 通过打孔植筋方式将它们固定在梁上, 植筋螺杆均采用8.8级M20螺杆。

(2)施加预应力: 当张拉预处理准备完成后, 在CFRP筋弯曲处及直线端内外两侧贴上应变片, 再对CFRP筋施加预应力, 缓慢施加直到CFRP筋完全破坏。



(a) CFRP 筋弯曲试验加载装置



(b) CFRP 筋弯曲试验加载试验

1 为 8.8 级 M20 螺杆; 2 为力传感器; 3 为固定端钢支座; 4 为锚具; 5 为 CFRP 筋; 6 为植筋(均采用 M20 螺杆); 7 为弯曲导轨; 8 为张拉端钢支座; 9 为张拉钢板; 10 为千斤顶; 11 为 M20 螺母。

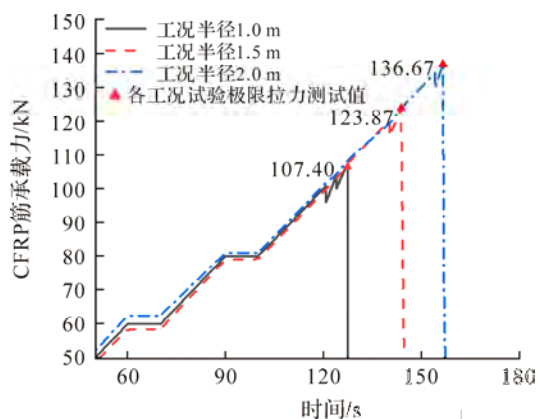
图 4 CFRP 筋弯曲试验

施加预应力前在固定端放置1个力传感器, 张拉端放置2个力传感器(传感器已进行标定, 传感器的应变值大小对应力的大小, 已进行拟合, 得到了换算公式)。在施加预应力时, 可根据传感器的应变值大小换算成拉力大小来控制试验的张拉速度。为了得到弯曲时CFRP筋内外侧应变的多组数据, 试验荷载增量为2t, 当施加的预应力达到0、2、4、6、8 t时停止加载, 且持荷一段时间, 在持荷阶段记录CFRP筋弯曲段内外侧应变。得到各阶段数据后, 缓慢持续加载, 直到CFRP筋完全破坏。通过应变采集仪可以采集到初始破坏时拉力值和最后极限破坏时拉力值。

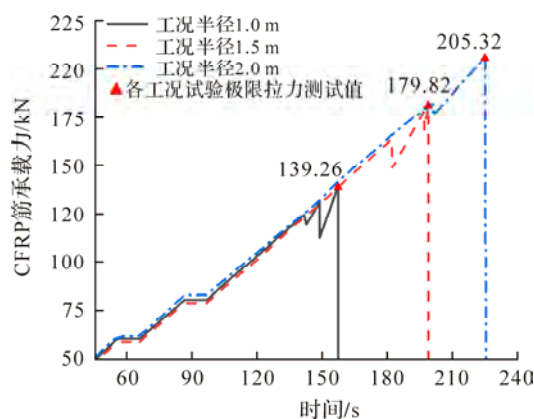
2.2.2 试验结果及分析

图5给出了各种工况下CFRP筋弯曲试验加载

过程中力和时间的变化曲线。由图5可知, 在不同工况下, CFRP筋都表现出较为一致的破坏过程, 即在张拉过程中, 当外侧纤维先达到极限强度时, CFRP筋发生初始破坏, CFRP筋上的力发生突变而下降; 但CFRP筋仍可以继续张拉, 说明此时CFRP筋并没有达到其极限承载力; 随着加载的持续, CFRP筋由于外侧纤维逐层被破坏, 会发生几次类似于初始破坏的拉力突变现象, 直至CFRP截面达到其极限承载力而发生最终破坏。最终破坏状态为爆炸性破坏模式(图6)。该破坏过程与前文的理论分析过程基本一致, 验证了本文在1.2节所提出的CFRP筋极限承载力理论的正确性。



(a) CFRP 筋直径为 10 mm



(b) CFRP 筋直径为 12 mm

图 5 CFRP 筋弯曲试验加载过程中承载力的变化

当 CFRP 筋安装在转向块上时, 其处于弯曲状态, 此时 CFRP 筋远离转向块的外边缘受拉(应变为正), 贴着转向块的内边缘受压(应变为负)。当施加预应力后, CFRP 筋内外两侧均被拉伸, 内外应变都为正数。通过试验可以发现, 在施加不同大小预应力后, CFRP 筋的内外应变差变化不大。因此

将多组试验各阶段的应变差取平均值(表 3).



图 6 CFRP 筋破坏状态

表 3 试验应变差结果

试件	试验弯曲 应变差/ $\mu\epsilon$	理论弯曲 应变差/ $\mu\epsilon$	试验值与理 论值误差/%
WZ-1-10	9 067.7	10 000.0	9.32
WZ-1-12	10 787.2	12 000.0	10.11
WZ-1.5-10	5 527.2	6 666.7	17.09
WZ-1.5-12	6 931.8	8 000.0	13.35
WZ-2-10	4 483.0	5 000.0	10.34
WZ-2-12	4 927.3	6 000.0	17.88

由表3可知, 试验值较理论值小, 这是由于应变片贴在CFRP筋内外两侧位置没有完全对称, 测得的应变不是CFRP筋应变最大的位置, 导致数据偏小, 误差超过了10%. 但试验测得的应变差的变化规律与理论应变差的变化规律一致, 证明了应变差理论计算公式(式(1))正确. 当CFRP筋直径不变时, 弯曲应变差随弯曲半径的增大而减小; 而当CFRP筋的弯曲半径不变时, 弯曲应变差随CFRP筋直径的增大而增大.

表4给出了试验时 CFRP 筋初始破坏时的拉力和完全破坏时的极限承载力, 以及通过式(5)计算出的 CFRP 筋在弯曲状态下的极限承载力. 从表4可知, CFRP 筋弯曲试验中得到的极限拉力测试值与式(5)计算得到的理论值误差较小, 证明式(5)理论计算值较为准确.

表5给出了CFRP筋弯曲状态下初始破坏时的效率.

表 4 CFRP 筋弯曲试验测试值与理论预测值

试件	初始破坏 拉力测试 值/kN	极限拉 力测试 值/kN	理论 预测 值/kN	预测值与 极限拉力 误差/%
WZ-1-10	100.82	107.40	106.10	1.21
WZ-1-12	124.06	139.26	139.20	0.04
WZ-1.5-10	120.28	123.87	124.20	0.27
WZ-1.5-12	163.57	179.82	168.00	6.57
WZ-2-10	134.26	136.67	134.00	1.95
WZ-2-12	182.12	205.32	184.40	10.19

表 5 CFRP 筋弯曲试验初始破坏效率

试件	F_{cm}/kN	f_{cm}/MPa	f_{cu}/MPa	$\eta_0/\%$
WZ-1-10	100.82	1 284.00	2 100.00	61.14
WZ-1-12	124.06	1 097.49	2 100.00	52.26
WZ-1.5-10	120.28	1 532.23	2 100.00	72.96
WZ-1.5-12	163.57	1 447.00	2 100.00	68.90
WZ-2-10	134.26	1 710.00	2 100.00	81.43
WZ-2-12	182.12	1 611.11	2 100.00	76.72

注: F_{cm} 为CFRP筋弯曲状态下初始破坏拉力测试值; f_{cm} 为CFRP筋弯曲抗拉强度; f_{cu} 为CFRP筋抗拉强度; η_0 为试验实测弯曲状态下初始破坏效率.

由表5可知, 弯曲半径的大小对弯曲张拉效率值影响较大, 2.0 m弯曲半径工况试件的初始张拉效率比1.5 m弯曲半径工况试件提高了约8%, 比1.0 m弯曲半径工况试件提高了约20%. 在CFRP筋弯曲半径较小时, CFRP筋直径规格对其在弯曲状态下初始张拉效率值的影响较大, 随着弯曲半径的增大而逐渐减小. 在弯曲半径为1.0 m时, 2种直径的CFRP张拉效率只有50%~60%, 弯曲折损非常大. 将弯曲半径提升到1.5 m和2.0 m时, 张拉效率得到较大提升, 尤其在弯曲半径为2.0 m时, 张拉效率可以达到约80%. 同时可以观察到, 当CFRP筋直径不变时, 弯曲强度随弯曲半径的增大而增大; 当CFRP筋的弯曲半径不变时, 弯曲强度随CFRP筋直径的减小而增大.

本文提出的在CFRP筋弯曲状态下极限破坏力理论计算模型的计算结果与试验结果吻合较好, 验证了理论计算模型的正确性.

3 弯曲极限承载力理论预测

利用本文建立的理论计算模型(式(5))可计算出不同工况下CFRP筋在弯曲状态时的极限承载力.

为此对直径为10 mm和12 mm这2种规格的CFRP筋在不同弯曲半径下的初始破坏拉力和极限承载力进行预测,结果如图7所示。

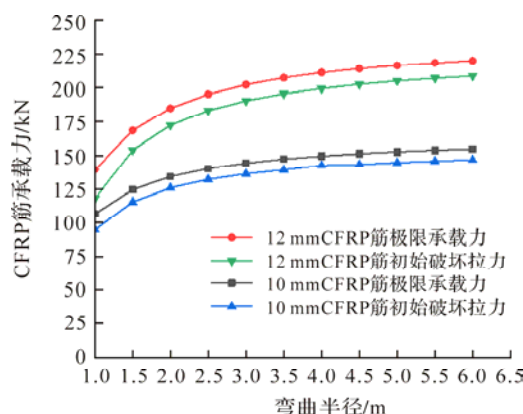


图7 CFRP筋弯曲极限拉力预测结果

图8为CFRP筋弯曲效率预测结果。从图8可知,弯曲半径在3~6 m范围内,CFRP筋的2种破坏效率开始时随弯曲半径增大变化明显;当弯曲半径超过5 m后,其张拉效率增加不明显。2种规格的CFRP筋在弯曲半径为5 m时初始破坏张拉效率达90%以上,且极限破坏时张拉效率达95%以上。目前实际抗弯抗剪加固工程中CFRP筋弯曲半径通常在5 m以上,因此CFRP筋的弯曲强度折损较少、张拉效率高,在工程加固应用中可靠度高。

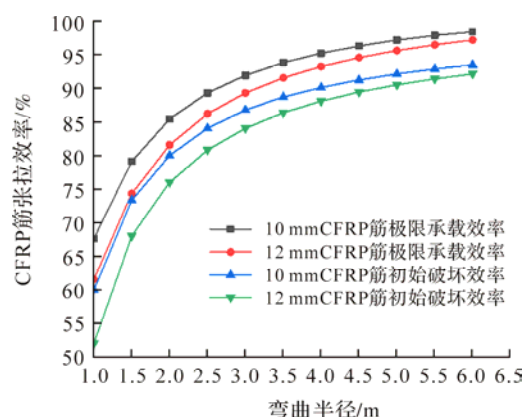


图8 CFRP筋弯曲效率预测结果

4 结论

通过理论推导得到了CFRP筋在弯曲状态下极限承载力的理论计算模型,并对不同工况下CFRP筋的力学性能进行了试验,得到不同工况下CFRP筋内外应变差、初始破坏力、极限承载力值。试验结果验证了理论计算模型的正确性。利用该

计算模型对2种规格的CFRP筋进行了极限承载力预测,得到结论如下:

(1)在相同弯曲半径下,CFRP筋的弯曲强度随其直径的增大而减小;在相同CFRP筋直径下,CFRP筋的弯曲强度随其弯曲半径的增大而增大。

(2)当弯曲半径大于3 m时,2种规格CFRP筋的张拉效率均能达到85%以上;当弯曲半径大于5 m后,CFRP筋的张拉效率增加缓慢,2种规格CFRP筋开始破坏时的张拉效率达到90%以上,且极限破坏时张拉效率达到95%。

(3)本文提出的CFRP筋弯曲状态下极限承载力的理论计算模型的计算结果与试验结果吻合较好,可用于不同直径、不同弯曲半径下CFRP筋极限承载力和张拉效率的计算和预测。

参考文献:

- [1] 诸葛萍, 丁勇, 布占宇. 碳纤维材料应用于桥梁工程的耐久性研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2013, 26(3): 99-104.
- [2] 闫清峰, 张纪刚. 纤维增强复合材料在土木工程中的应用与发展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36):15314-15322.
- [3] Hiroshi F. FRP composites in Japan[J]. Concrete International, 1999, 21(10):29-32.
- [4] Correia J R. Fibre-reinforced polymer (FRP) composites [EB/OL]. [2022-02-10]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-08236-3_11.
- [5] 周畅, 王文伟, 石劭阳. 预应力CFRP片材抗剪加固钢筋混凝土T梁试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(9): 68-76; 84.
- [6] Heydarinouri H, Nussbaumer A, Motavalli M, et al. Strengthening of steel connections in a 92-year-old railway bridge using prestressed CFRP rods: Multiaxial fatigue design criterion[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(6):04021023.
- [7] 骆英, 经正男. 嵌贴CFRP筋抗剪加固RC深T梁优化方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(2):363-368.
- [8] Ping Z G, Jie Z Y, Zhang Z H, et al. The influence of load transfer medium creep on the load-carrying capacity of the bond-type anchors of CFRP tendons[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206:236-247.
- [9] Lin Y, Min J Y, Teng H, et al. Flexural performance of steel - FRP composites for automotive applications[J]. Automotive Innovation, 2020, 3(3):280-295.
- [10] El-Sayed A K, El-Salakawy E, Benmokrane B.

- Mechanical and structural characterization of new carbon FRP stirrups for concrete members[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(4):352-362.
- [11] 诸葛萍, 章子华, 丁勇, 等. 土木工程用 CFRP 筋弯折抗拉性能[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5):1300-1305.
- [12] 侯苏伟, 叶华文, 强士中, 等. CFRP 主缆在鞍座及索夹处的抗弯折性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29(5):128-133.
- [13] 诸葛萍, 强士中, 侯苏伟, 等. 悬索桥鞍座处 CFRP 主缆抗弯性能研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(4):57-62.
- [14] Japan Society of Civil Engineers. Test method for tensile properties of continuous fiber reinforcing materials (JSCE-E 531-1995)[EB/OL]. [2022-02-10]. <http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter01/recommendation/FRP-bar/test.pdf>.

Theoretical and experimental study on bending ultimate bearing capacity of prestressed CFRP bars

CAI Wanyun¹, WANG Hangyu², WU Xiuyong², XIA Jiajun¹, ZHUGE Ping^{1*}

(1.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Wenzhou Highway and Transportation Management Center, Wenzhou 325002, China)

Abstract: In order to obtain the ultimate bearing capacity of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bars under bending state, the ultimate tensile bearing capacity of CFRP bars with different diameters under different bending radii was studied. Firstly, the influence of the diameter and bending radius of CFRP bars on the bending tensile strength is analyzed based on existing theoretical formulas, and on this basis, the theoretical model of the ultimate bearing capacity of CFRP bars under bending state is established. Secondly, the bending ultimate bearing capacity of two different diameters of CFRP bars under three different bending radii is tested by model test, and the computational results are compared with the experimental results to verify the theoretical model. Finally, the bending ultimate bearing capacity of CFRP bars with different diameters and bending radius is predicted by the theoretical model of the ultimate bearing capacity of CFRP bars under the bending state. The results show that under the same bending radius, the bending ultimate strength of CFRP bars decreases with the increase of its diameter; and under the same diameter of CFRP bars, the bending ultimate strength of CFRP bars increases with the increase of its bending radius; when the bending radius is greater than 5 m, the tensile efficiency of 10 mm and 12 mm CFRP bars can exceed 90%. The computational result is in good agreement with the experimental result. Hence the theoretical model established in this paper can be used to predict the ultimate bearing capacity of CFRP bars under different bending conditions.

Key words: prestress; CFRP bars; bending radius; tension efficiency; ultimate bearing capacity

(责任编辑 史小丽)