

文章编号: 1000-5013(2011)05-0560-05

考虑螺栓扭矩分布的 CFRP 筋夹板式锚具极限抗拔力计算方法

叶勇, 郭子雄, 刘阳

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 利用灰色系统理论,研究碳纤维增强复合材料(CFRP)筋夹板式锚具紧固螺栓扭矩分布对锚固性能影响,对夹板式锚具第 1~3 排紧固螺栓(加载端-自由端)施加扭矩及总施加扭矩等参数进行关联分析. 研究表明:第 3 排螺栓施加扭矩对于试件极限荷载的关联度最高,其后依次为总施加扭矩、第 2 排螺栓施加扭矩和第 1 排螺栓施加扭矩. 最后,基于分析结果建立考虑螺栓扭矩分布的 CFRP 筋夹板式锚具极限抗拔力计算模型,回归出相关系数,计算结果与试验结果吻合良好.

关键词: 碳纤维筋; 夹板式锚具; 高强螺栓; 灰色系统理论; 扭矩

中图分类号: TU 311.4 **文献标志码:** A

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer,简称 CFRP)筋具有高强轻质、抗疲劳性好、耐腐蚀等优点,在土木工程界得到广泛的应用^[1]. 简单、有效、经济的锚具是充分发挥 CFRP 筋高性能的前提. 近几年来,国内外研究人员针对传统夹片式锚具的改进和新型锚具的开发进行了研究^[2-3]. 然而,已有的 CFRP 筋锚具仍然存在着操作复杂、施工周期长等不足. 文献[4]基于机械锚固原理,设计制作了一套 CFRP 筋夹板式锚具并进行了拉拔试验. 同时,通过定量控制夹板螺栓的施加扭矩分布实现对筋材的合理夹持,避免锚具端部过度的应力集中,使夹板式锚具发挥了良好的锚固性能. 本文采用灰色系统理论,对 CFRP 筋夹板式锚具锚固性能的影响参数(包括螺栓扭矩分布和总扭矩)进行关联分析,寻找各参数间的相互关系,建立考虑螺栓扭矩分布的 CFRP 筋夹板式锚具极限抗拔力计算模型.

1 试验概况

1.1 锚具设计

设计并制作适用于直径 7 mm 的 CFRP 筋夹板式锚具^[4],如图 1 所示. 每套锚具包括 2 片开槽钢夹板和 6 套高强紧固螺栓,夹板材料为 45Mn 优质碳素结构钢;为了增加夹板与 CFRP 筋之间的摩擦力和机械咬合力,在夹板槽口表面刻痕凿毛. 使用时,将 CFRP 筋置于 2 片对叠的夹板槽内,然后拧紧穿过钢夹板螺栓的紧固螺栓,将 CFRP 筋夹紧.

1.2 试验装置

为了定量控制锚具对 CFRP 筋夹持作用的大小,采用扭矩扳手控制施加于夹板螺栓的扭矩,试验参数如表 1 所示. 在 CFRP 筋两端安装锚具,形成 CFRP 筋-锚具组装件. 其中一端锚具为固定锚具(试

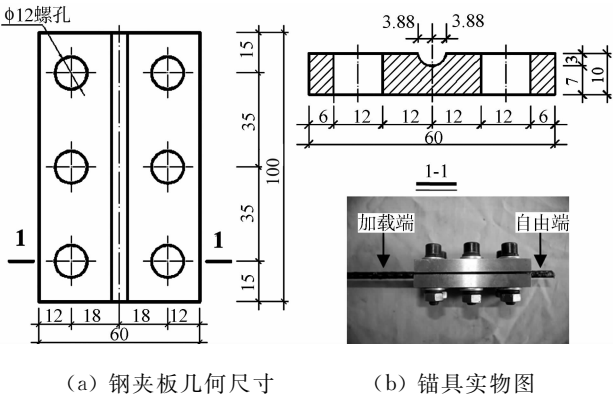


图 1 锚具构造图(mm)

Fig. 1 Configuration of the clamping anchor(mm)

验时,固定端不发生滑移和筋材断裂),另一端为试验锚具.采用拉拔试验验证锚具的锚固性能,试验装置如图 2 所示.厂家提供的 CFRP 筋极限强度为 2 GPa,弹性模量为 150 GPa.

1.3 试验结果

试验的失效模式主要有以下 3 种:(1)滑移,即加载到 CFRP 筋极限拉力之前,开始出现滑移现象,继续加载时,荷载出现持续波动,滑移不断发展;(2)滑移后 CFRP 筋断裂,即当荷载接近 CFRP 筋极限拉力时,出现轻微滑移,继续加载时,荷载与滑移同时发展,最终 CFRP 筋在试验锚具端断裂破坏;(3)CFRP 筋断裂,即试验过程未出现滑移现象,当达到试件极限荷载时,CFRP 筋在试验锚具端突然断裂破坏.

表 1 为试验结果汇总.表 1 中: $\alpha_i(i=1\sim3)$ 为第 i 排螺栓的施加扭矩; α_t 为总扭矩; P_u 为试件的极限荷载; η 为试件极限荷载与 CFRP 筋名义极限拉力的比值.从表 1 中可以看出,合理控制施加于夹板螺栓的扭矩大小及分布,能有效避免锚具端 CFRP 筋应力集中导致筋材提前破坏,发挥较为理想的锚固性能.

表 1 试件参数及试验结果

Tab.1 Test parameters and experimental results

试件编号	$\alpha_1/\text{N}\cdot\text{m}$	$\alpha_2/\text{N}\cdot\text{m}$	$\alpha_3/\text{N}\cdot\text{m}$	$\alpha_t/\text{N}\cdot\text{m}$	P_u/kN	η	试件破坏模式
CA1	0	20	60	80	27	0.35	滑移
CA2	0	40	60	100	29	0.38	滑移
CA3	0	40	80	120	41	0.53	滑移
CA4	0	60	80	140	46	0.60	滑移
CA5	0	60	100	160	68	0.88	滑移
CA6	0	80	100	180	69	0.90	滑移
CA7	20	40	60	120	40	0.52	滑移
CA8	20	40	80	140	55	0.71	滑移
CA9	20	60	80	160	58	0.75	滑移
CA10	20	60	100	180	76	0.99	滑移
CA11	20	80	100	200	74	0.96	滑移后 CFRP 筋断裂
CA12	40	60	80	180	68	0.88	滑移
CA13	40	60	100	200	80	1.04	滑移后 CFRP 筋断裂
CA14	40	80	100	220	70	0.91	CFRP 筋断裂
CA15	60	80	100	240	73	0.95	CFRP 筋断裂
CA16	60	100	100	260	67	0.87	滑移后 CFRP 筋断裂
CA17	80	80	80	240	58	0.75	CFRP 筋断裂
CA18	80	100	120	300	55	0.71	CFRP 筋断裂

2 灰色关联分析

灰色系统理论具有“少数据建模”的优势,灰色关联分析法能分析各参数之间的相互关系及对事件影响程度的大小^[5].由文献[4]可知,锚具试件的极限抗拔力与夹板螺栓施加扭矩的大小与分布及总施加扭矩有关,但具体的影响程度不明.以实测试件的极限荷载(P_u)作为母序列 $\{x_0(k) \mid k=1,2,\cdots,18\}$,以实测的第 1~3 排螺栓的施加扭矩 $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$ 及螺栓总施加扭矩 α_t 作为系统的子序列 $\{x_i(k) \mid i=1,2,3,4;k=1,2,\cdots,18\}$.

2.1 初值化处理

采用初值化处理,消除各影响参数的量纲,使其成为可比较的数据序列.初值化的方法为

$$x'_i(k)=\frac{x_i(k)}{x_i(1)},\quad i=0,1,\cdots,4;\quad k=1,2,\cdots,18.$$

(1)

式(1)中: $x'_i(k)$ 为初值化后的数据序列; $x_i(k)$ 为原始数据序列; $x_i(1)$ 为各原始数据序列的第 1 个数据.

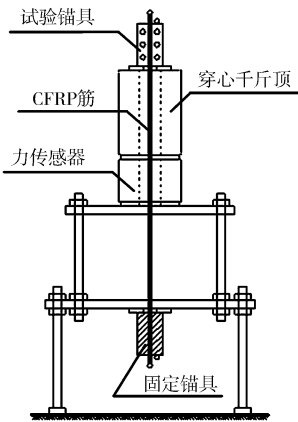


图 2 试验装置
Fig.2 Test set-up

各原始数据序列和经过初值化处理后的数据序列,如表 2 所示.

表 2 原始试验数据及初值化序列
Tab. 2 Test data and initialized sequence

试件编号	P_u		α_1		α_2		α_3		α_4	
	$X_0(k)$ /kN	$X'_0(k)$	$X_1(k)$ /N·m	$X'_1(k)$	$X_2(k)$ /N·m	$X'_2(k)$	$X_3(k)$ /N·m	$X'_3(k)$	$X_4(k)$ /N·m	$X'_4(k)$
CA7	40	1.000	20	1.000	40	1.000	60	1.000	120	1.000
CA8	55	1.375	20	1.000	40	1.000	80	1.333	140	1.167
CA9	58	1.450	20	1.000	60	1.500	80	1.333	160	1.333
CA10	76	1.900	20	1.000	60	1.500	100	1.667	180	1.500
CA11	74	1.850	20	1.000	80	2.000	100	1.667	200	1.667
CA12	80	2.000	40	2.000	60	1.500	80	1.333	180	1.500
CA13	68	1.700	40	2.000	60	1.500	100	1.667	200	1.667
CA14	70	1.750	40	2.000	80	2.000	100	1.667	220	1.833
CA15	73	1.825	60	3.000	80	2.000	100	1.667	240	2.000
CA16	67	1.675	60	3.000	100	2.500	100	1.667	260	2.167
CA17	58	1.450	80	4.000	80	2.000	80	1.333	240	2.000
CA18	55	1.375	80	4.000	100	2.500	120	2.000	300	2.500
CA1	27	0.675	0	0.000	20	0.500	60	1.000	80	0.667
CA2	29	0.725	0	0.000	40	1.000	60	1.000	100	0.833
CA3	41	1.025	0	0.000	40	1.000	80	1.333	120	1.000
CA4	46	1.150	0	0.000	60	1.500	80	1.333	140	1.167
CA5	68	1.700	0	0.000	60	1.500	100	1.667	160	1.333
CA6	69	1.725	0	0.000	80	2.000	100	1.667	180	1.500

2.2 计算关联系数

计算母序列与各子序列的绝对差值,即有

$$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)|, \quad i = 1, 2, 3, 4; \quad k = 1, 2, \cdots, 18. \tag{2}$$

式(2)中: $\Delta_i(k)$ 为母序列与各子序列的绝对差值; $x'_0(k), x'_i(k)$ 分别为经过初值化处理后的母序列、子序列. 根据式(2)计算的母序列与各子序列的绝对差值,如表 3 所示.

表 3 原始试验初值化处理差序列和关联系数序列
Tab. 3 Absolute difference sequence and relational coefficient sequence of test data

试件编号	α_1		α_2		α_3		α	
	$\Delta_1(k)$	$\zeta_1(k)$	$\Delta_2(k)$	$\zeta_2(k)$	$\Delta_3(k)$	$\zeta_3(k)$	$\Delta_4(k)$	$\zeta_4(k)$
CA7	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
CA8	0.375	0.875	0.375	0.875	0.042	0.984	0.208	0.926
CA9	0.450	0.854	0.050	0.981	0.117	0.957	0.117	0.957
CA10	0.900	0.745	0.400	0.868	0.233	0.918	0.400	0.868
CA11	0.850	0.755	0.150	0.946	0.183	0.935	0.183	0.935
CA12	0.000	1.000	0.500	0.840	0.667	0.797	0.500	0.840
CA13	0.300	0.897	0.200	0.929	0.033	0.987	0.033	0.987
CA14	0.250	0.913	0.250	0.913	0.083	0.969	0.083	0.969
CA15	1.175	0.691	0.175	0.938	0.158	0.943	0.175	0.938
CA16	1.325	0.665	0.825	0.761	0.008	0.997	0.492	0.842
CA17	2.550	0.507	0.550	0.827	0.117	0.957	0.550	0.827
CA18	2.625	0.500	1.125	0.700	0.625	0.808	1.125	0.700
CA1	0.675	0.795	0.175	0.938	0.325	0.890	0.008	0.997
CA2	0.725	0.784	0.275	0.905	0.275	0.905	0.108	0.960
CA3	1.025	0.719	0.025	0.991	0.308	0.895	0.025	0.991
CA4	1.150	0.695	0.350	0.882	0.183	0.935	0.017	0.994
CA5	1.700	0.607	0.200	0.929	0.033	0.987	0.367	0.877
CA6	1.725	0.603	0.275	0.905	0.058	0.978	0.225	0.921

根据灰色系统理论,关联系数的计算方法为

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x'_0(k) - x'_i(k)| + \zeta \cdot \max_i \max_k |x'_0(k) - x'_i(k)|}{|x'_0(k) - x'_i(k)| + \zeta \cdot \max_i \max_k |x'_0(k) - x'_i(k)|}. \quad (3)$$

式(3)中: ζ 为分辨系数,用以提高关联系数之间差异的显著性,一般取值0.5; $\min_i \min_k |x'_0(k) - x'_i(k)|$ 为二级最小差; $\max_i \max_k |x'_0(k) - x'_i(k)|$ 为二级最大差。

按式(3)计算得到的关联系数,如表3所示.各比较序列和参考序列的关联度 $r_i(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \zeta_i(k)$ 将表3的关联系数代入 $r_i(k)$,可得到各比较和参考序列的关联度为{0.756, 0.896, 0.936, 0.918}.表明,对锚具极限抗拔力影响最大的因素是第3排螺栓的施加扭矩 α_3 ,其次是总扭矩 α_t 、第2排螺栓的施加扭矩 α_2 和第1排螺栓的施加扭矩 α_1 .

夹板式锚具与CFRP筋之间通过机械咬合和摩擦作用传递界面剪力,夹板螺栓施加扭矩的大小与机械咬合力及摩擦力成正比关系.为避免锚具加载端处CFRP筋过度的应力集中,使界面剪力沿夹板长度分布更加均匀,采用沿加载端-自由端螺栓施加扭矩逐渐增加的方式,第3排螺栓的施加扭矩最大.故锚固区内第3排螺栓对CFRP筋的夹持作用最大,这与灰色关联分析的结果相符.文献[4]的研究结果表明,螺栓的总扭矩不仅关系到试件的极限荷载,而且对试件的破坏模式起决定作用,故其对锚具锚固性能的影响也是十分显著的。

3 夹板式锚具极限抗拔力模型建立

3.1 组合权系数的确定

采用文献[6]介绍的方法,求得组合权系数 $\omega = [0.196, 0.259, 0.279, 0.266]$.即在影响锚具锚固性能程度上,第1~3排螺栓施加扭矩的权重分别为0.196, 0.259, 0.279,总扭矩的权重为0.266.

3.2 夹板式锚具极限抗拔力计算模型

张拉时,锚固区内CFRP筋的受力情况如图3所示.由力的平衡条件可得

$$P = \int \tau_s dA = \beta \int \sigma_t dA. \quad (4)$$

式(4)中: β 为考虑摩擦和机械咬合综合作用的界面剪力系数; A 为CFRP筋与锚具夹板的接触面积; σ_t 为夹板施加于CFRP筋的法向压应力; τ_s 为CFRP筋与夹板接触面上的剪应力(包括摩擦力和机械咬合力); P 为CFRP筋轴力,即外加荷载.由于各排螺栓施加扭矩的不同,导致 β 沿锚固长度 l 并非常数.

假设各排螺栓附近的界面剪力系数分别与法向压力成正比,可得

$$\beta \int \sigma_t dA = \beta_1 T_1 + \beta_2 T_2 + \beta_3 T_3. \quad (5)$$

式(5)中: $\beta_i (i=1\sim3)$ 为第 i 排螺栓附近的界面剪力系数; $T_i (i=1\sim3)$ 为第 i 排螺栓的轴力,即夹板对CFRP筋的法向压力。

螺栓轴力与螺栓施加扭矩存在正比关系,即 $T_i = \gamma \alpha_i$. 其中: γ 为螺栓施加扭矩与轴力之间的比例系数,试验测得 $\gamma = 0.3958$.由式(4),(5)和 $T_i = \gamma \alpha_i$,可得

$$P = 0.3958 (\beta_1 \alpha_1 + \beta_2 \alpha_2 + \beta_3 \alpha_3). \quad (6)$$

由表1的结果可知:当 α 小于200 N·m时, P_u 随 α 的增加而增加;在 α 等于200 N·m时, P_u 达到最大值;当 α 超过200 N·m, P_u 开始随着 α 的增加而减少,说明应力集中的影响开始显现,锚具性能下降.考虑各影响参数的组合权系数,建立锚具极限抗拔力 P_u 的计算模型为

$$P_u = \begin{cases} b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3, & \alpha \leq 200; \\ c_1 X_1 + c_2 X_2 + c_3 X_3 - c_4 X_4^2, & \alpha > 200. \end{cases} \quad (7)$$

上式中,令 $X_1 = \gamma \omega_1 \alpha_1$, $X_2 = \gamma \omega_2 \alpha_2$, $X_3 = \gamma \omega_3 \alpha_3$, $X_4 = \gamma \omega_4 (\alpha_t - 200)$.利用统计软件包SPSS软件非线性回

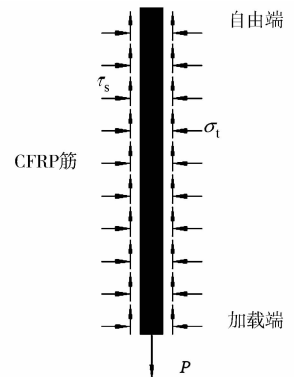


图3 锚固区内CFRP筋受力分析
Fig.3 Mechanical behavior of CFRP rod within the anchorage zone

归工具进行拟合. 在 95%保证率条件下, 回归出系数向量为 $\mathbf{b} = \{5.930, 2.800, 3.831\}$, $\mathbf{c} = \{0.928, 1.561, 5.289, 0.038\}$. 加权后的经验公式表示为

$$P_u = \begin{cases} 0.460\alpha_1 + 0.287\alpha_2 + 0.423\alpha_3, & \alpha \leq 200, \\ 0.072\alpha_1 + 0.160\alpha_2 + 0.584\alpha_3 - 0.004(\alpha_i - 200)^2, & \alpha > 200. \end{cases} \tag{8}$$

锚具极限抗拔力计算值($P_{u,c}$)与试验值($P_{u,exp}$)的对比,如图 4 所示. 由图 4 可见,锚具极限抗拔力的计算结果和试验结果吻合良好.

4 结 束 语

基于已有 CFRP 筋夹板式锚具拉拔试验的结果,对性能影响参数进行关联分析,建立考虑螺栓扭矩分布的 CFRP 筋夹板式锚具极限抗拔力计算模型. 研究表明:锚具夹板第 1~3 排(加载端-自由端)螺栓的施加扭矩及总扭矩对试件极限荷载的关联度分别为 0.756,0.896,0.936 和 0.918,权重分别为 0.196,0.259,0.279 和 0.266. 所建立的 CFRP 筋夹板式锚具极限抗拔力计算模型,其计算结果和试验结果吻合良好,可为 CFRP 筋夹板式锚具的进一步改进和应用提供参考.

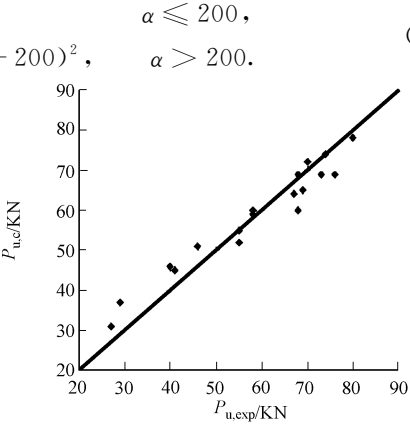


图 4 锚具极限抗拔力
试验值与计算值的比较
Fig. 4 Comparison between
experimental and calculation results

参考文献:

[1] CAROLIN A. Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements[D]. Lulea;Lulea University of Technology,2003.

[2] MAHMOUD M,REDA T,NIGEL G S. New concrete anchors for carbon fiber reinforced polymer post-tensioning tendons(part 2): Development/experimental investigation[J]. ACI Structural Journal,2003,100(1):96-104.

[3] 蒋田勇,方志. CFRP 预应力筋夹片式锚具的试验研究[J]. 土木工程学报,2008,41(2):60-69.

[4] 叶勇,郭子雄. CFRP 筋预应力锚具受力性能试验[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2011,32(2):198-202.

[5] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.

[6] 林煌,郭子雄. SRC 柱抗剪承载力影响参数的灰色关联分析[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2008,29(2):294-298.

Computational Model to Predict the Load-Carrying
Capacity of Clamping Anchor for CFRP Rods
Considering Torque Distribution

YE Yong, GUO Zi-xiong, LIU Yang

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Grey correlation analysis was conducted to study the performance-influence parameters of the clamping anchor for CFRP (carbon fiber reinforced polymer) rods. The two parameters were taken into consideration: the individual torque applied to the bolts (from loaded end to free end) and the total torque. Based on analytical results, the sequence from the high correlation of ultimate load to low correlation is: the individual torque applied to the third row of bolts, the total torque, the torque applied to the second row of bolts and the first row of bolts. A model considering the distribution of torque is established to predict the load-carrying capacity of the clamping anchor, the parameters were also regressed, the analytical results agree well with the test ones.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer rod; clamping anchor; high-strength bolt; grey system theory; torque