

ICS xxxxxxxx
CCS x xx

T

团 体 标 准

T/CECS XXX-20XX

纤维增强复合材料箍筋

Fiber reinforced polymer stirrups

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国工程建设标准协会 发布
中国标准出版社 出版

目 次

前 言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 分类、规格和标记	2
4.1 分类	2
4.2 规格	2
4.3 标记	3
5 要求	4
5.1 一般要求	4
5.2 外观	6
5.3 纤维含量	6
5.4 尺寸偏差	6
5.5 拉伸性能	6
6 试验方法	7
6.1 试验环境	7
6.2 外观	7
6.3 纤维含量	7
6.4 尺寸偏差	7
6.5 拉伸性能	8
7 检验规则	8
7.1 检验类型	8
7.2 组批、抽样和判定规则	8
8 标志、包装、运输和贮存	9
8.1 标志	9
8.2 包装	9
8.3 运输	9

T/CECS XXX-20XX

8.4 贮存	9
附录 A(规范性附录) 纤维增强复合材料箍筋弯拉强度的测试方法(B5).....	11
附录 B(规范性附录) 纤维增强复合材料箍筋弯拉强度的测试方法(B12).....	14
附录 C(资料性附录) 耐久性能与蠕变断裂性能	17

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件按中国工程建设标准化协会《关于印发〈2021 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2021〕20 号）的要求制定。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工程建设标准化协会提出。

本标准由中国工程建设标准化协会建筑产业化分会归口。

本文件负责起草单位：

本文件参加起草单位：

本文件主要起草人：

本文件主要审查人：

纤维增强复合材料箍筋

1 范围

本规程规定了纤维增强复合材料箍筋的术语及定义，分类、规格和标记，要求，试验方法，检验规则，标志、包装、运输和贮存等。

本规程适用于在土木工程结构中受力构件增强材料使用、直径 20mm 及以下的纤维增强复合材料箍筋。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修订版)适用于本文件。

GB/T 1446	纤维增强塑料性能试验方法总则
GB/T 2577	玻璃纤维增强塑料树脂含量试验方法
GB/T 2828.1	计数抽样检验程序 第一部分：按接收质量限(AQL)检索的逐批检验抽样计划
GB/T 26743	结构工程用纤维增强复合材料筋
GB/T 30022	纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法
GB/T 34551	玻璃纤维增强复合材料筋高温耐碱性试验方法
GB 50608	纤维增强复合材料工程应用技术标准
ACI 440.3R-12	Guide Test Methods for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures
ASTM D7337-12(2019)	Standard Test Method for Tensile Creep Rupture of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars
ASTM E4: 24	Standard Practices for Force Calibration and Verification of Testing Machines
ASTM E739-10 (2015)	Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data

3 术语和定义

3.1

纤维增强复合材料 **fiber reinforced polymer composites**

采用连续纤维或纤维织物为增强相，聚合物树脂为基体相，两相材料通过复合工艺制备而成的聚合物基复合材料。

3.2

纤维增强复合材料箍筋 **fiber reinforced polymer stirrups**

采用拉挤成型工艺、模压工艺或缠绕管切割工艺制成的封闭式、组合封闭式及螺旋式纤维增强复合材料制品，用以替代钢筋混凝土结构中钢箍筋。

3.3

组合封闭箍筋 **end-lap stirrups**

由单个连续缠绕通过搭接或两个开口筋形成的封闭环式箍筋。

3.4

螺旋箍筋 **spiral stirrups**

通过连续缠绕形成的螺旋式箍筋。

3.5

封闭箍筋 **closed stirrups**

通过连续缠绕形成的闭合式箍筋。

3.6

弯拉强度 **bend strength**

箍筋在弯曲段发生破坏时的拉伸强度。

4 分类、规格和标记

4.1 分类

按箍筋增强纤维种类分为玻璃纤维(GF)箍筋、碳纤维(CF)箍筋等。

按箍筋成型型式可分为组合封闭箍筋(I)、螺旋箍筋(II)、封闭箍筋(III)等。

按箍筋表面状态分为光圆(P)、螺纹(T)、黏砂(S)、其他(O)。

按箍筋外形形式可分为圆形(C)和矩形(R)。

按箍筋截面形式可分为圆形截面(CS)和矩形截面(RS)。

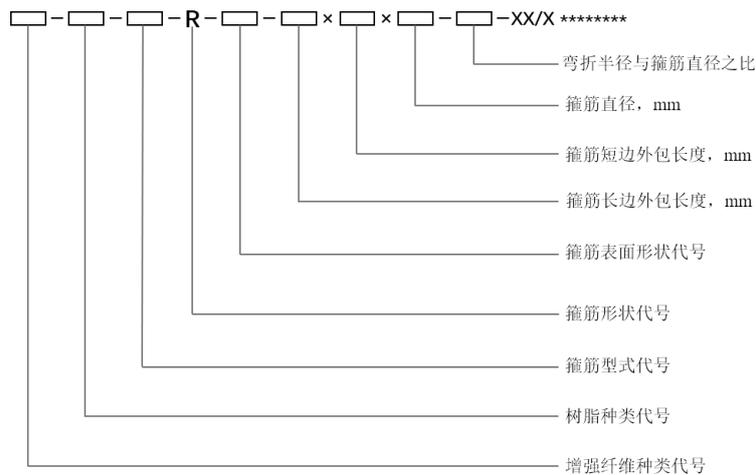
4.2 规格

T/CECS XXX-20XX

圆形截面纤维增强复合材料箍筋按公称直径分为 6mm、8mm、10mm、12mm、14mm、20mm 等规格，矩形截面按面积等效折算公称直径。

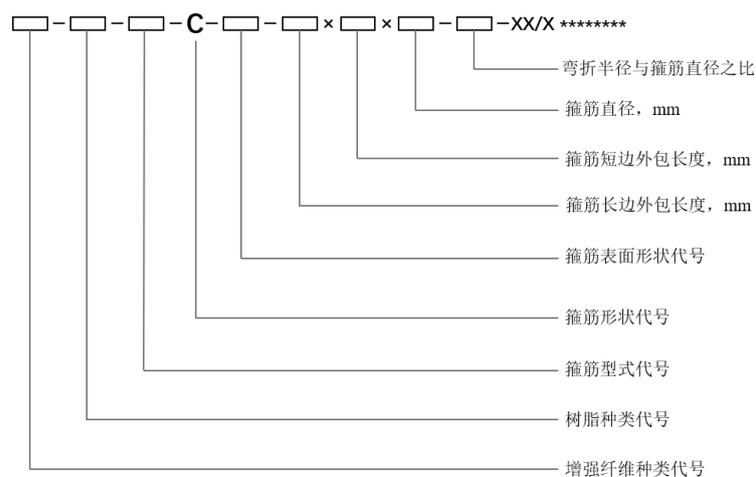
4.3 标记

增强纤维种类代号、树脂种类代号、纤维增强复合材料箍筋型式代号、纤维增强复合材料箍筋按箍筋形状代号、纤维增强复合材料箍筋表面形状代号、外包尺寸、纤维增强复合材料箍筋直径、弯折半径与箍筋直径的比值和标准号等信息的顺序编写如下所示。



示例 1：箍筋直径 8mm，弯折半径与箍筋直径之比为 3，纤维增强复合材料箍筋长边外包长度 420mm，纤维增强复合材料箍筋短边外包长度 240mm，基体树脂选用环氧树脂，表面为黏砂，按照本标准生产的玻璃纤维增强复合材料螺纹矩形封闭箍筋为：

GF-EP-III-R-S-420×240×8-3 XX/X*****



示例 2：箍筋直径 8mm，纤维增强复合材料箍筋外包直径长 300mm，基体树脂选用环氧树脂，表面为黏砂，按照本标准生产的玻璃纤维增强复合材料螺纹圆形封闭箍筋为：

GF-EP-III-C-S-300×8 XX/X*****

5 要求

5.1 一般要求

5.1.1 纤维

纤维增强复合材料箍筋纤维种类有玻璃纤维(GF)、碳纤维(CF)等。

5.1.2 树脂

纤维增强复合材料箍筋的基体树脂可选用环氧树脂(EP)、乙烯基树脂(VE)等热固性树脂和聚丙烯树脂(PP)、尼龙树脂(PA)、丙烯酸树脂(PM)等热塑性树脂。

5.1.3 标准弯钩构造要求

纤维增强复合材料箍筋的弯折半径 r_v 与该箍筋直径 d_b 比值不应小于 3，且纤维增强复合材料封闭箍筋应有锚固段。锚固可采用 90° 的弯钩(图 5.1.3)，弯钩尾部搭接长度应符合下式规定：

$$l_{\text{thf}} \geq 12d_b$$

式中， l_{thf} ——弯钩尾部搭接长度(mm)；

d_b ——圆形截面纤维增强复合材料箍筋直径或矩形截面箍筋的截面高度(mm)。

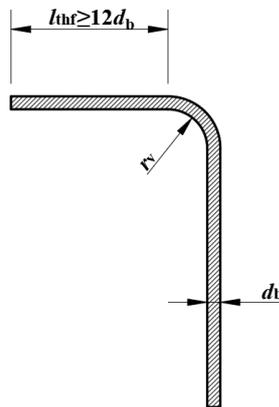


图 5.1.3 纤维增强复合材料箍筋弯折的构造要求

5.1.4 锚固要求

纤维增强复合材料箍筋的锚固要求应符合下列规定之一：

- 箍筋末端绕纵筋弯折成标准弯钩，应满足条文 5.1.3 的弯折段构造要求；
- 连续缠绕箍筋的一端绕纵筋弯折成标准弯钩，另一端绕纵筋弯折后与标准弯钩一端的尾部的搭接长度至少为 $1.3l_d$ (图 5.1.4)。其中 l_d 为锚固长度，应取(1)、(2)、(3)

T/CECS XXX-20XX

中的最大值:

$$(1) \frac{d_b \left(\frac{f_{ft}}{\sqrt{f_c}} - 340 \right) \psi_t}{13.6 + \frac{c_b}{d_b}}$$

$$(2) 20 d_b$$

$$(3) 305\text{mm}$$

式中: d_b ——纤维增强复合材料箍筋公称直径(mm);

c_b ——取纤维增强复合材料箍筋重心到混凝土近表面的距离与锚固纤维增强复合材料箍筋的重心间距的一半两者中的较小值(mm),为防止发生劈裂破坏, c_b/d_b 不应大于 3.5;

ψ_t ——考虑浇筑混凝土时纤维增强复合材料箍筋位置的系数,若纤维增强复合材料箍筋下方新浇筑混凝土厚度超过 305mm,则该系数取 1.5,其它情况取 1.0;

f_{ft} ——纤维增强复合材料箍筋的抗拉强度设计值(N/mm²);

f_c' ——混凝土圆柱体抗压强度标准值(N/mm²)。

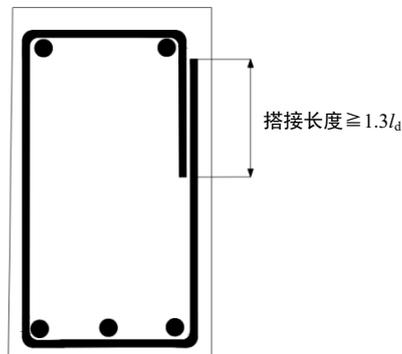


图 5. 1. 4 连续缠绕组合封闭箍筋

5. 1. 5 其他构造要求

5. 1. 5. 1 在满足保护层厚度和其他邻近筋材布置要求的情况下,箍筋的外包尺寸应尽量大,且箍筋末端长度应满足条文 5.1.4 的锚固要求。

5. 1. 5. 2 用于受剪构件的纤维增强复合材料箍筋可采用组合封闭箍筋、螺旋箍筋、封闭箍筋,其中,组合封闭型箍筋可采用连续缠绕组合封闭箍筋(图 5.1.4)或由两个 U 型筋、C 型筋与 U 型或两个 C 型筋形成的箍筋(图 5.1.5)。

5. 1. 5. 3 用于受扭构件的纤维增强复合材料箍筋可采用组合封闭箍筋和封闭箍筋形式,其

中，组合封闭型箍筋可采用由 C 型筋与 U 型或两个 C 型筋形成的箍筋。

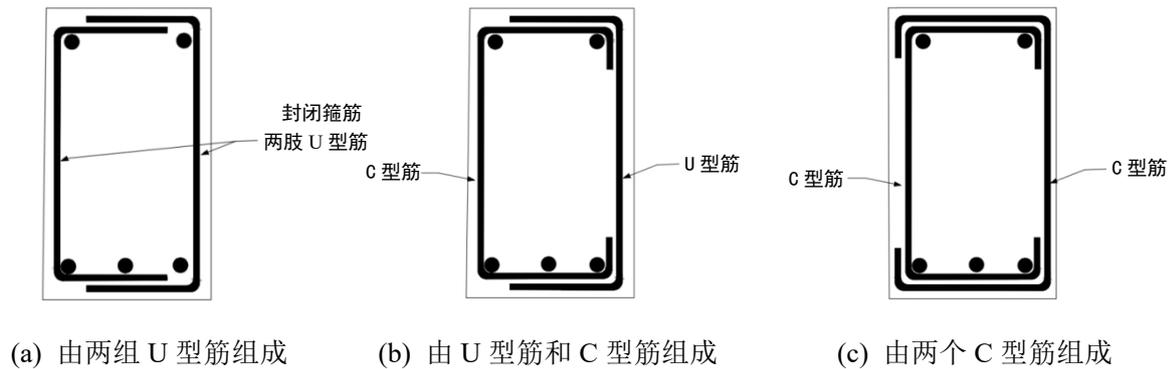


图 5.1.5 由两个开口筋形成的组合封闭箍筋

5.2 外观

纤维增强复合材料箍筋外观应符合下列规定：

- 光圆筋整体应顺直，外表面应光滑平整、色泽均匀，无气泡、起皱、裂纹、纤维裸露及纤维浸润不良等缺陷；
- 螺纹筋整体应顺直，螺纹应沿筋长度方向以均匀的距离间隔螺旋排列，螺纹深度均匀，无明显裂纹、气泡、毛刺、断丝及纤维裸露等缺陷；
- 黏砂筋表面应黏有河砂或机制石英砂，砂粒径应均匀适中且砂在筋表面均匀分布，表面无其他夹杂物，无裂纹及纤维裸露等缺陷。

5.3 纤维含量

热固性树脂纤维增强复合材料箍筋的纤维体积含量不应小于 60%，热塑性树脂纤维增强复合材料箍筋的纤维体积含量不应小于 50%。

5.4 尺寸偏差

尺寸偏差应符合表 5.4-1 规定。

表 5.4-1 尺寸偏差 单位为 mm

公称直径	$6 \leq d_b < 20$	20
直径	+0.50	+0.88
	0	0
直线度	≤ 3	≤ 4

直线度偏差应符合表 5.4-2 规定。

表 5.4-2 直线度偏差 单位为 mm/m

直线度	≤ 3	≤ 4
-----	----------	----------

5.5 拉伸性能

纤维增强复合材料箍筋的拉伸性能指标应符合表 2 及表 3 的规定。

热固性复合材料箍筋弯拉强度不应低于箍筋直线段抗拉强度的 40%。

热塑性复合材料箍筋弯拉强度不应低于 250MPa。

表 5.5-1 热固性纤维增强复合材料箍筋主要力学性能指标

热固性纤维增强复合材料箍筋种类和等级		直线段抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	弯拉强度 (MPa)
碳纤维增强复合材料箍筋	$d \leq 10\text{mm}$	≥ 2000	≥ 131	≥ 800
	$10\text{mm} < d \leq 13\text{mm}$	≥ 1800	≥ 131	≥ 720
	$d > 13\text{mm}$	≥ 1600	≥ 131	≥ 640
玻璃纤维增强复合材料箍筋	$d \leq 10\text{mm}$	≥ 900	≥ 45	≥ 360
	$10\text{mm} < d \leq 20\text{mm}$	≥ 700	≥ 45	≥ 280

表 5.5-2 热塑性纤维增强复合材料箍筋主要力学性能指标

热塑性纤维增强复合材料箍筋种类和等级		直线段抗拉强度 (MPa)	直线段弹性模量 (GPa)	弯拉强度 (MPa)
玻璃纤维增强复合材料箍筋	$d \leq 10\text{mm}$	≥ 900	≥ 45	≥ 300
	$10\text{mm} < d \leq 20\text{mm}$	≥ 700	≥ 45	≥ 250

6 试验方法

6.1 试验环境

试验环境按 GB/T 1446 的规定执行。

6.2 外观

正常(光)照度下,距离 0.5m 对样品进行目测。外观洁净,均匀一致,无目视可见杂物。不应有纤维断丝和松股现象。

6.3 纤维含量

纤维体积含量按 GB/T 2577 的规定进行测试。

6.4 尺寸偏差

直径测量采用精度 0.02mm 的游标卡尺,任意取直线段中段 3 个位置测量,取算术平均值。

直线度测量采用精度 1mm 的钢尺,将直线段的纤维增强复合材料箍筋水平放置在平

台上，任意转动 3 次分别测量其最大挠度，取算术平均值。

6.5 拉伸性能

纤维增强复合材料箍筋截取有效直线段测试抗拉强度、弹性模量参照 GB/T30022 拉伸性能试验。纤维增强复合材料箍筋弯折段弯拉强度性能试验应按本文件附录 A 方法执行。

7 检验规则

7.1 检验类型

检验类型分为出厂检验和型式检验。

7.1.1 出厂检验

每批产品进行外观、公称直径、弹性模量与弯拉强度。

7.1.2 型式检验

有下列情况之一时，应按第 5 章要求的全部项目进行型式检验：

- a) 新产品或者老产品转厂生产的试制定型鉴定时；
- b) 正式生产后，如材料、工艺有较大改变，可能影响产品性能时；
- c) 正常生产每年不少于一次；
- d) 停产一年以上恢复生产时；
- e) 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时。

7.1.3 出厂检验与型式检验项目

表 7.1.3 出厂检验和型式检验项目

序号	检验项目	技术要求	检验方法	检验类型	
				出厂	型式
1	外观	5.2	6.2	+	+
2	纤维含量	5.3	6.3	-	+
3	尺寸偏差	5.4	6.4	+	+
4	拉伸性能	5.5	6.5	+	+

注：“+”表示进行该项检验，“-”表示不进行该项检验。

7.2 组批、抽样和判定规则

7.2.1 组批

以同一规格、同一种材料、同一生产工艺，稳定连续生产的 30 吨为一批，不足此数量时，按一批计。

7.2.2 抽样

外观检验和尺寸偏差采取一次随机抽样，每批取样数量为 5 个。

纤维含量、拉伸性能采用二次随机抽样，第一次样本数为 5 个，第二次样本数为 20 个。

7.2.3 判定规则

- a) 按 GB/T 2828.1 采用一次抽样法时，所抽样本应全部符合要求或仅有 1 项不符合要求时则判该批为合格；否则判定该批不合格。
- b) 采取二次抽样时，在第一次所抽样本中全部符合要求则判定该批为合格；如有 2 个或 2 个以上不符合要求，则判该批不合格。当有 1 个试样不符合要求时则进行第二次抽样，第二次抽样时，单一样本值与样本均值的偏差不应超过 20%，否则剔除此样本。当两次抽样不符合要求的样本总数为 1 时则判该批合格，否则判定该批不合格。
- c) 按 GB/T 2828.1 采用二次抽样法时，弯拉强度按照平均值和最小值双控原则进行判定，即 0.9 倍平均值不小于表 2 中示数且 1.05 倍最小值不小于表 2 或表 3 中示数时为合格。弹性模量按平均值不小于表 2 或表 3 中示数时为合格。在第一次所抽样本中全部指标符合要求则判定该批为合格；如有 2 项或 2 项以上指标不符合要求则判该批不合格。当有 1 项指标不符合要求时则进行第二次抽样，当两次抽样不符合要求的指标总数为 1 时则判该批合格，否则判定该批不合格。

8 标志、包装、运输和贮存

8.1 标志

8.1.1 产品出厂时应附产品说明书和产品检验合格证。

8.1.2 产品合格证上应包括产品名称、规格、批号、数量、生产厂名、厂址等信息。

8.2 包装

产品应用结实、柔软的包装材料分组包装，每组应捆扎牢固，防止相互摩擦。

8.3 运输

运输车辆以及堆放处应有防雨、防潮设施。装卸时不可损伤包装、应避免撞击、油污、重压、弯折和浸水等现象。

8.4 贮存

8.4.1 产品应贮存在空气干燥、流通的库房内，并存放在地面以上干燥的平台或垫子上，不应沾染油污。

8.4.2 当产品露天存放时，应避免产品受到紫外线长期照射、雨水浸泡。

附录 A

(规范性附录)

纤维增强复合材料箍筋弯拉强度的测试方法(B5)

A.1 范围

本试验方法规定了纤维增强复合材料箍筋弯拉强度的测试方法(B5)。

A.2 试验设备和要求

液压千斤顶与测力传感器需根据 ASTM E4 进行校准，其承载能力应超过试样的承载能力，并以所需的加载速率加载。在整个测试过程中，测力传感器的读数精度应控制在 1% 以内。

A.3 试件制备

A.3.1 试件的配置图如图 A.3.1，用于锚固纤维增强复合材料箍筋的混凝土块的尺寸根据所测纤维增强复合材料箍筋外包尺寸确定。但是，两混凝土试块之间的间距不应小于 200mm，建议取为 400mm。如图 A.3 所示，混凝土块应使用钢箍筋进行加固，以防止混凝土块在弯折段纤维增强复合材料箍筋被拉断之前发生劈裂破坏。纤维增强复合材料箍筋尾部锚固长度 L_t 应符合 5.1.3 节的要求。

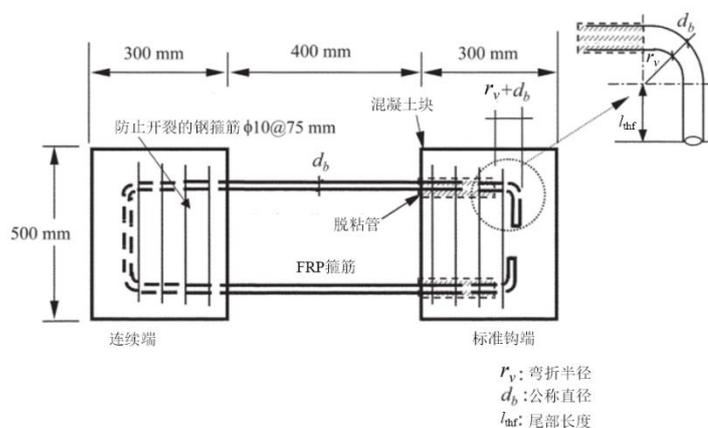


图 A.3.1 件布置图

A.3.2 所用混凝土粗骨料最大粒径为 20-25mm。混凝土坍落度应满足 (100 ± 20) mm，28 天抗压强度应满足 (30 ± 3) MPa。

A.3.3 各试验条件下的有效测试数据的数量不应少于 5 个。如果试件因混凝土块劈裂而破坏，则该试验数据应不予考虑，并对与该破坏试件同批次的试件重新开展试验。如果试件因箍筋从混凝土中拔出而破坏，这表明弯折半径和尾部锚固长度对所测箍筋是不足的。有必要调整这些参数(或试件尺寸)并重新测试。

A.4 环境条件

除非试验有特殊的测试环境要求，否则应在温度(23±3)°C 和相对湿度(50%±10%)的标准试验环境下进行试样制作、试样储存和试样测试。

A.5 测试方法

如图 A.5 所示，测试装置包括一个用于施加两个混凝土块之间的相对位移的液压千斤顶，以及用于测量所施载荷的测力传感器。含纤维增强复合材料箍筋测试段的混凝土块应放置在滚轴的顶部，以尽量减少混凝土块与试验台之间的摩擦力。

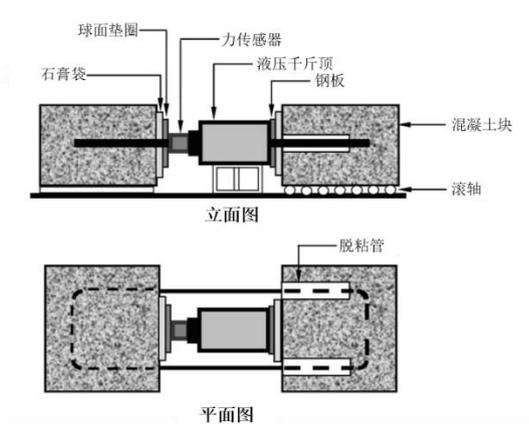


图 A.5 测试装置

在试验过程中，试件不应受到任何冲击、振动或扭转，以平稳、连续的方式用千斤顶加载，直到试件破坏。在测试过程中，不得暂停加载。加载速率的选择应使试件在试验开始后 1-10 分钟内破坏。记录试件的破坏荷载与破坏模式。

A.6 计算

纤维增强复合材料箍筋的弯拉强度只能根据试件在弯折段的破坏进行评估。在发生明显的混凝土块体劈裂的情况下，该数据应被忽略，并应继续试验，直到在箍筋弯折段破坏的试件数量不少于 5 个。

纤维增强复合材料箍筋弯拉强度按式(A.6.1)计算：

$$f_{ub} = \frac{F_{ub}}{2A} \quad (\text{A.6.1})$$

式中： f_{ub} ——纤维增强复合材料箍筋弯拉强度，MPa；

F_{ub} ——根据弯曲试验确定的极限承载力，N；

A ——纤维增强复合材料箍筋单肢箍截面面积， mm^2 。

强度折减系数按式(A.6.2)计算：

$$\chi = \frac{f_{ub}}{f_u} \quad (\text{A.6.2})$$

式中： χ ——强度折减系数；

f_u ——纤维增强复合材料箍筋直线段抗拉强度，MPa。

附录 B

(规范性附录)

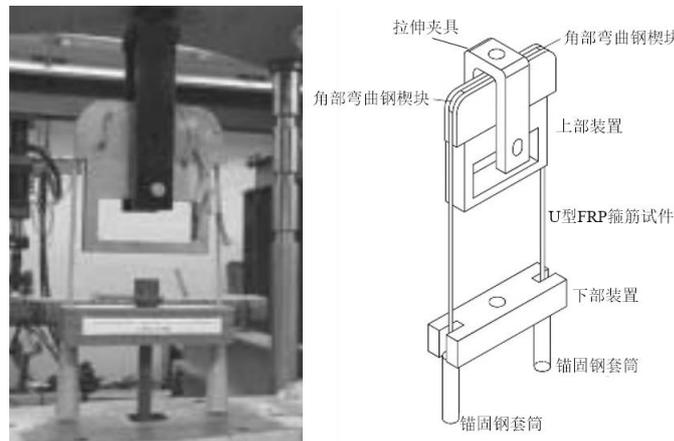
纤维增强复合材料箍筋弯拉强度的测试方法(B12)

B.1 范围

本试验方法规定了纤维增强复合材料箍筋弯拉强度的测试方法。

B.2 试验设备和要求

纤维增强复合材料箍筋弯拉试验使用特定的测试夹具，测试夹具由上、下部分及由合适的金属(如铝或钢)制成的可更换的角部弯曲钢楔块组成(图B.2-1)，详细尺寸如图B.2-2~B.2-5所示。将纤维增强复合材料弯折筋放置于沿测试夹具和角嵌件的两侧及顶部的凹槽中。测点的布置取决于所需测量的变量。如需测量弹性模量和应变，可在转角附近布置应变片。荷载一直施加到纤维增强复合材料弯拉筋破坏为止。



(a) 测试夹具

(b) 夹具示意图

图 B. 2-1 弯折筋拉伸装置示意图

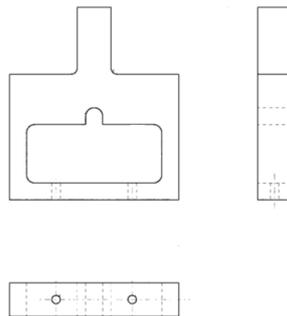


图 B. 2-2 测试夹具上部装置

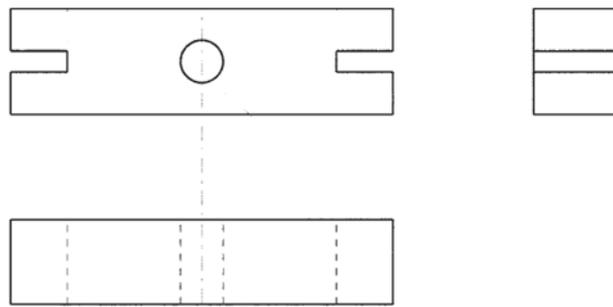


图 B. 2-3 测试夹具下部装置

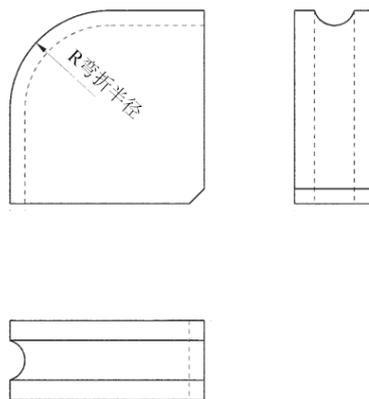


图 B. 2-4 角部弯曲钢楔块

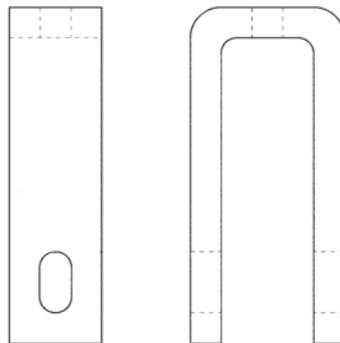


图 B. 2-5 拉伸夹具

B.3 试件制备

B. 3. 1 纤维增强复合材料箍筋试件应符合图 B.2.2 和 B.2.3 所示试验夹具的尺寸要求，安装好后的试件中心线与试验夹具侧面的中心线平行。

B. 3. 2 对需要应变数据处，应变片应位于试样宽度方向的中心，并平行于纤维方向。应变片应安装在拐角区域内外的平面上。

B. 3. 3 各试验条件下的有效测试数据的数量不应少于 5 个。

B.4 环境条件

除非指定不同的环境(如温度或碱性溶液)作为实验的一部分，否则应在 $23 \pm 3^\circ\text{C}$ 和 50

±10%相对湿度的标准实验室条件下储存和测试。

B.5 测试方法

B.5.1 将上部、下部拉伸加载夹具分别与试验机连接，试验夹具与拉伸加载架不应存在错位，试验夹具和试样不应产生扭转。

B.5.2 在试样上施加和释放一个小载荷(小于预期失效载荷的 5%)，以重新调整试验夹具。在此步骤中，应变测量数据需归零。

B.5.3 测试速度应根据被测材料的规格确定。但是，当未指定测试速度时，推荐速度为 1.0 至 2.0 mm/min。

B.6 计算

纤维增强复合材料箍筋弯拉强度按式(B.6.1)计算：

$$S = P / (2A) \quad (\text{B.6.1})$$

式中： S ——弯拉强度，MPa；

P ——试件拉伸破坏载荷，N；

A ——FRP 箍筋截面面积，mm²。

附录 C

(资料性附录)

耐久性能与蠕变断裂性能

C.1 性能指标

碱环境下玻璃纤维增强复合材料箍筋弯折段耐久性能与蠕变断裂性能指标应符合表 C.1 的规定。

表 C.1 碱环境下玻璃纤维增强复合材料箍筋耐久性能与蠕变断裂性能指标

玻璃纤维纤维增强复合材料箍筋性能		弯拉强度保留率
耐久性能	弯折半径: $3\sim 5d$	$\geq 60\%$
蠕变断裂性能	弯折半径: $3d$	$\geq 25\%$

C.2 耐久性能试验方法

C.2.1 碱环境下纤维增强复合材料箍筋弯折段耐久性能试验条件按 GB/T 34551 的规定。耐久性能试验前及试验后纤维增强复合材料箍筋的弯拉强度试验均按本文件附录 B 方法执行。每组试件数量应不少于 5 个。

C.2.2 弯拉强度保留率按式 (C.2.2) 计算:

$$\eta = \frac{S_a}{S_0} \quad (\text{C.2.2})$$

式中: η ——弯拉强度退化率, %;

S_a ——碱环境侵蚀 90 天后 FRP 箍筋弯拉强度, MPa;

S_0 ——碱环境侵蚀前 FRP 箍筋弯拉强度, MPa。

C.3 蠕变断裂性能试验方法

C.3.1 纤维增强复合材料箍筋蠕变断裂试验按 ASTM D7337-12(2019)的规定, 应力水平应取试件弯拉强度的 20%~80%范围内, 且设置不少于 4 个应力水平梯度, 蠕变应力水平梯度的分布能够使试件断裂时间跨越三个数量级(如 1 小时、10 小时、100 小时、1000 小时), 最长试验持续时间不宜超过 10000 小时。

C.3.2 纤维增强复合材料箍筋弯折段蠕变断裂性能试验应按本文件附录 A 方法执行。每组试件数量应不少于 5 个。

C.3.3 蠕变断裂应力与蠕变断裂时间为半对数关系, 为保证蠕变断裂性能指标取值的工程

可靠性,应基于试验数据按式(C.3.3.1~C.3.3.6)计算考虑 95%可靠度的百万小时的蠕变断裂强度保留率。

$$Y_c = A + BX \pm \sqrt{2F_p \mu^2 \left[\frac{1}{n} + (X - \bar{X})^2 / \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{C.3.3.1})$$

$$X = \log t \quad (\text{C.3.3.2})$$

$$A = \bar{Y} - B\bar{X} \quad (\text{C.3.3.3})$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (\text{C.3.3.4})$$

$$\mu^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i)^2}{n-2} \quad (\text{C.3.3.5})$$

$$Y_i = A + BX_i \quad (\text{C.3.3.6})$$

式中: Y_c ——蠕变断裂强度保留率,即箍筋蠕变断裂应力与箍筋弯拉强度之比, %;

t ——蠕变断裂时间,小时,百万小时取;

A ——线性回归的截距估计值;

B ——线性回归的斜率估计值;

μ^2 ——残差方差的估计值;

F_p ——对应 95%置信水平下的 F 分布临界值;

\bar{X} ——蠕变断裂时间平均值;

\bar{Y} ——蠕变断裂强度保留率平均值;

n ——样本量。