

ICS 59.100

Q 36

备案号：

DB44

广东省地方标准

DB44/T 497—2008

土木工程用玻璃纤维增强 复合材料（GFRP）筋

Glass Fiber Reinforced Polymer Rebar for Civil Engineering

2008-05-26 发布

2008-11-01 实施

广东省质量技术监督局发布

目 次

前 言	1
1 范围	2
2 规范性引用文件	2
3 术语和符号	2
4 技术要求	4
5 试验方法	5
6 检验规则	7
7 标志、包装、运输、储存	8
附 录 A（规范性附录）GFRP 筋拉伸性能的测试方法	9
附 录 B（规范性附录）GFRP 筋剪切强度的测试方法	10
附 录 C（规范性附录）GFRP 筋粘结强度的测试方法（拉拔试验）	11
附 录 D（资料性附录）GFRP 筋应力 - 应变曲线	18
附 录 E（资料性附录）GFRP 筋基本设计要求	19

前 言

本标准参考国内外相关技术标准和技术规程制定。

本标准中附录A、附录 B、附录C为规范性附录，附录D、附录E为资料性附录。

本标准由深圳市海川实业股份有限公司提出。

本标准由广东省质量技术监督局归口。

本标准起草单位：深圳市海川实业股份有限公司、深圳海川工程科技有限公司、上海启鹏化工有限公司。

本标准主要起草人：何唯平、汤惠工、张杰、李明、黄永衡。

本标准为首次制定。

土木工程用玻璃纤维增强复合材料（GFRP）筋

1 范围

本标准规定了土木工程用玻璃纤维增强复合材料（GFRP）筋的术语和定义、技术要求、试验方法、检验规则及标志、包装、运输和储存。

本标准适用于广东省内的隧道、矿山支护、边坡支护、盾构端头井掘进、连续配筋混凝土路面、桥梁结构等土木工程。

本标准不适用弯矩重新分配的混凝土结构以及受压构件。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 16413 煤矿井下用玻璃钢制品安全性能检验规范

GB/T 1446 纤维增强塑料性能试验方法总则

GB/T 1463 纤维增强塑料密度和相对密度试验方法

ACI 440.1R Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars（FRP 筋混凝土结构设计和施工指南）

ACI 440.3R Guide Test Methods for Fiber Reinforced Polymer（FRPs）for Reinforcing or Strength Concrete Structures（用于增强混凝土结构中的 FRP 筋性能试验方法）

3 术语和符号

3.1 术语

3.1.1

纤维增强复合材料 Fiber Reinforced Polymer

由高性能纤维（碳纤维、芳纶纤维、玄武岩纤维、玻璃纤维）与树脂基体、固化剂、采用适当的成型工艺所形成的材料，依次表示为CFRP、AFRP、BFRP、GFRP等。

3.1.2

玻璃纤维增强复合材料筋 Glass Fiber Reinforced Polymer Rebar

由高性能的含碱量小于0.8%的无碱玻璃纤维（E-Glass）无捻粗纱或者高强玻璃纤维（S）无捻粗纱和树脂基体（环氧树脂、乙烯基树脂、不饱和聚酯树脂等）、固化剂，采用成型固化工艺复合而成表面形状为全螺纹式（或其它有利于与混凝土粘结的形式）的杆体，下文简称GFRP筋。

3.1.3

玻璃纤维无捻粗纱 glass fiber roving

平行原丝（多股原丝无捻粗纱）或平行单丝（直接无捻粗纱）不加捻而并合的集束体。

3.1.4

玻璃纤维 fiberglass

一般指硅酸盐熔体制成的玻璃态纤维或丝状物。

3.1.5

无碱玻璃纤维 E fiber glass

碱金属氧化物含量很少，具有良好电绝缘性的玻璃纤维(其碱金属氧化物含量一般小于0.8%)。

3.1.6

高强玻璃纤维 S glass fiber

用硅-铝-镁系统的玻璃拉制的玻璃纤维，其新生态强度比无碱玻璃纤维高25%以上。

3.2 符号

f_k : GFRP筋的抗拉强度标准值；

f_d : GFRP筋的抗拉强度设计值；

f_v : GFRP筋的剪切强度；

f_u : GFRP筋的抗拉强度；

f_b : GFRP筋弯曲部位抗拉强度设计值；

F_u : GFRP筋的抗拉承载力；

T : GFRP筋扭矩；

ϵ : GFRP筋的极限应变；

E : GFRP筋的弹性模量；

A : GFRP筋的横截面积；

d_b : GFRP筋的等效直径；

C_b : GFRP筋的等效周长；

τ : GFRP筋与混凝土、水泥砂浆的平均粘结强度；

l_a : GFRP筋在混凝土结构中锚固长度；

l_l : GFRP筋在混凝土结构中搭接长度；

r_b : GFRP筋弯曲部分的半径；

α : 计算系数，按照经验取为 1/18.5；

β : 搭接长度修正系数，一般取 1.6；

γ : 计算系数，根据经验取为 0.05；

σ : 样本方差；

$\overline{f_u}$: GFRP 筋抗强度的样本均值；

4 技术要求

4.1 外观

4.1.1 GFRP筋形状为左旋或右旋，螺纹杆体表面质地应均匀、无气泡、裂纹及其它缺陷，其螺纹牙形、牙距应整齐，不得有损伤。

4.1.2 热固性树脂成型GFRP筋弯曲应在工厂按照一定的角度完成，并符合设计要求。

4.2 公称直径范围及推荐直径

公称直径范围为10 mm ~ 28 mm，本标准推荐的GFRP筋公称直径宜为20 mm，25 mm。

4.3 外形尺寸及偏差

GFRP筋的外形尺寸及允许偏差应符合表1的要求。

表 1 产品规格及尺寸偏差

公称直径/mm	长度偏差/mm	允许偏差/mm	杆体弯曲度 mm/m
10	+25	± 0.4	3
12			
14			
16			
18			
20			
22	± 0.6	4	
25			
28			

4.4 密度

GFRP筋的密度为1.9 ~ 2.1g/cm³。

4.5 力学性能

GFRP筋的力学性能应符合表2的要求。

表 2 GFRP 筋杆体力学性能

规格	抗拉强度标准值 f_k / MPa	剪切强度 f_v / MPa	扭矩 T / Nm	极限应变 / %	弹性模量 E / GPa
< 16	600	110	--	1.5	40
16	550		41	2.0	

注：GFRP 筋抗拉强度标准值保证率在 99.7% 以上，即由 $f_k = \overline{f_u} - 3\sigma$ 计算得到。

4.6 粘结强度峰值

GFRP筋与混凝土、水泥砂浆等材料结合时的粘结强度峰值应符合表3的要求。

表 3 GFRP 筋粘结强度检验值

直径 (mm)	锚固长度 (mm)	粘结强度峰值 (MPa)
10 ~ 16	5d	10.0 ~ 12.6
18 ~ 25	10d	7.5
25 以上	15d	5.5

4.7 抗静电性能

在环境温度 25 ± 5 ，相对湿度为60%~70%的条件下，GFRP筋至少放置2h后，表面电阻平均值不得大于 3×10^8 。

4.8 阻燃性能

GFRP筋在一般情况下不检验阻燃性能，但在煤矿井下及同类性质的工程中使用，应根据酒精喷灯燃烧试验检验阻燃性能，阻燃性能应符合GB 16413的要求。

5 试验方法

5.1 实验室环境条件

应符合GB/T 1446 的有关规定。

5.2 外观检测

产品外观检测用目测法进行。

5.3 外形尺寸测量

杆体的长度用钢卷尺在平台上进行；杆体的直线度在平台上用塞规检测。杆体的横截面积 A 、等效直径 d_b 、等效周长 C_b 按照 5.3.1 ~ 5.3.7 进行测试。

5.3.1 试件应该在试验环境中放置 24h 以上。

5.3.2 在一个量筒中倒入适当数量的水或者酒精，以保证试件放入后不会有液体溢出。

5.3.3 用卡尺测量试件的长度 3 次，每一次测量应该旋转 120 度，取三次测量的平均值，精确到 0.1mm，即为试件的长度。

5.3.4 在试件浸入量杯之前测量液体的体积，浸入后再测量液体的体积，需要注意避免试件将空气带入液体之中，计算前后的体积差。

5.3.5 当 3 个试件的长度与体积被分别确定之后，GFRP 筋横截面积 A (精度为 1mm^2) 为其体积与长度 L 之比：

$$A = \frac{\Delta V}{L} = \frac{V_1 - V_0}{L} \dots\dots\dots (1)$$

式中： ΔV — 试件浸入量筒前后的体积之差，即试件的体积，mL；

V_0 — 在试件浸入量筒之前的液体体积，mL；

V_1 —在试件浸入量筒之后的液体体积，mL；

L —试件长度，mm；

5.3.6 试件的等效直径 d_b 可通过试件的横截面积进行计算：

$$d_b = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \dots\dots\dots (2)$$

式中： d_b - GFRP 筋等效直径，mm

A - GFRP 筋横截面积， mm^2

5.3.7 等效周长 C_b 可以按照下列公式计算：

$$C_b = 2\sqrt{\pi A} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

C_b - 等效周长，mm

A - GFRP 筋横截面积， mm^2

5.4 密度测定

应按照GB/T 1463的规定。

5.5 拉伸性能试验

拉伸性能试验确定GFRP筋试件的抗拉强度、弹性模量、极限应变，试验方法符合本标准附录A的规定。

5.6 剪切强度试验

GFRP筋剪切强度试验方法应符合本标准附录B的规定。

5.7 扭矩试验

将GFRP筋杆体（全长）安装在扭矩试验台上，见图1。杆尾与回转机构连接，杆头与扭矩测定仪器连接，杆体中部加设托扶器。试验时，将扭转机转速调至200r/min ~ 300r/min，将GFRP筋杆体处于空载旋转状态。调整加载装置，在8S内使负载平稳升至规定扭矩（40 N·m）运转40s，杆体不应产生严重变形、断裂。

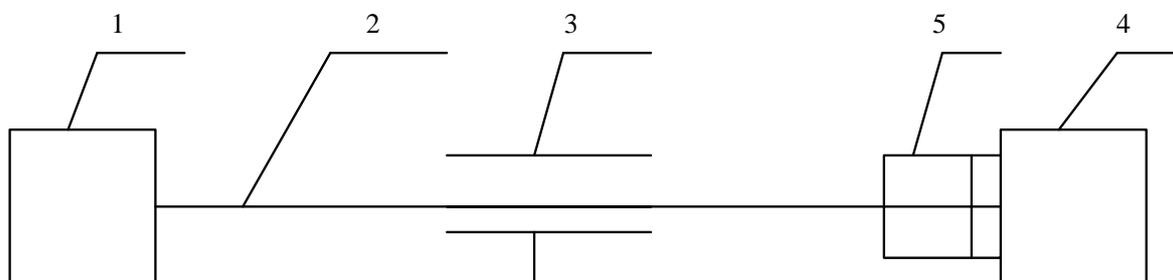


图1 GFRP 筋杆体扭矩试验台示意

1—回转机构 2—GFRP 杆体 3—托扶器 4—加载机构 5—扭矩测定仪

5.8 粘结强度试验

GFRP筋与水泥砂浆、混凝土粘结强度的试验方法应符合本标准附录C的规定。

5.9 抗静电性能试验

抗静电试验应符合GB 16413的规定。

5.10 阻燃性能试验

阻燃性能试验应符合GB 16413的规定。

6 检验规则

6.1 检验分类

产品检验分出厂检验和型式检验，检验项目应按照表4规定进行。

表 4 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	产品外观	4.2	5.2		
2	外形尺寸	4.3	5.3		
3	密度	4.4	5.4		
3	拉伸性能	4.5	5.5		
4	剪切强度	4.5	5.6		
5	扭矩	4.5	5.7		
6	粘结强度	4.6	5.8		
7	抗静电性能	4.7	5.9		
8	阻燃性能	4.8	5.10		

6.2 出厂检验

产品出厂时应进行出厂检验。

每5000米为一批，从中随机抽取1%作为试样，且不少于5根试件。抽取试样在进行出厂项目检验时，如有一项不合格时，应加倍抽样进行复检。复检有一项不合格项时，则判定该批次产品不合格。

6.3 型式检验

6.3.1 有下列情况之一时，应进行型式检验：

- 1) 新产品或老产品转厂生产的试制产品；
- 2) 产品停产二年以上重新恢复生产时；
- 3) 正常生产的产品在结构、材料、工艺等方面有较大改进时；
- 4) 正式生产的产品每两年进行一次型式检验；
- 5) 出厂检验结果与上次型式检验有较大差距时；
- 6) 国家质量监督检验机构提出要求时。

6.3.2 型式检验的样品应从出厂检验合格的产品中随机抽取。型式检验每次抽取试样 5 根，任一试样有一项不合格时，应加倍抽样进行复检。复检一项不合格时，则判定该批次产品不合格。

7 标志、包装、运输、储存

7.1 标志

产品出厂时应附产品说明书，产品合格证。应包括产品名称、规格、型号、出厂日期、出厂编号、生产厂名、厂址以及执行的标准。

7.2 包装

GFRP 筋杆体在适当的工况下应配有相关的附件。产品每 10 ~ 50 根为一组，应捆扎牢固。

7.3 运输

产品装卸和运输过程中不应抛掷和撞击。

7.4 储存

产品应储存在空气干燥、流通的库房内。产品应水平放置，避免暴晒，杆体端部不应沾染油污。

附录 A

(规范性附录)

GFRP筋拉伸性能的测试方法

- A.1 试件的长度为试件锚固端 (200~300mm) 与 30 倍的杆体直径长度之和;
- A.2 夹持试件时, 应尽量确保试件仅受轴向拉力的作用;
- A.3 开始加载之前, 数据采集装置首先应开通数秒, 在试验过程中 (无论是荷载控制还是位移控制) 其频率都应该保持恒定, 并且试件应在 1 到 10min 之内破坏;
- A.4 增加荷载直到试件破坏为止, 其应变至少达到 50% 极限荷载对应的水平, 甚至更高。
- A.5 根据荷载 (应力) ~ 应变的数据制作荷载 (应力) ~ 应变曲线;
- A.6 根据公式 (A.1) 计算抗拉强度, 精度保留 1 位小数 (修正到 0.5MPa);

$$f_u = F_u / A \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

- f_u - 抗拉强度, MPa;
- F_u - 抗拉承载力, N;
- A - GFRP 筋试件的横截面积, mm^2 。

- A.7 弹性模量可以由极限承载能力的 20% ~ 50% 的对应的数据经过线性回归计算得到, 其计算由 20% 和 50% 极限承载力对应的应变来加以确定, 按公式 (A.2) 计算, 保留 1 位小数。

$$E_L = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)A} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

- E - GFRP 筋轴向弹性模量, MPa
- A - GFRP 筋横截面积, mm^2
- F_1 和 ε_1 - 50% 的承载力水平以及其对应的应变;
- F_2 和 ε_2 - 20% 的承载力水平以及其对应的应变;

- A.8 极限应变与极限承载力是相对应的, 当材料破坏时, 通过应变测试元件测得。如果引伸计不允许使用到材料破坏阶段, 极限应变和弹性模量根据公式 (A.3) 计算, 保留 3 位小数。

$$\varepsilon_u = \frac{F_u}{E_L A} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

- GFRP 筋破坏时的极限应变, %;
- E - GFRP 筋的弹性模量, MPa;
- A - 横截面积, mm^2 ;
- F_u - 抗拉承载力, N;

附录 B

(规范性附录)

GFRP 筋剪切强度的测试方法

B.1 将GFRP筋杆体截成300mm长的试件并放入双剪测试装置中(如图B.1所示),在万能材料试验机上进行剪切强度的测定。

B.2 试件应该固定在剪切试验台的中心,与上部加载装置接触,加载面与试件之间不应看见明显的缝隙。

B.3 荷载施加速率控制在每分钟 30MPa 到 60MPa 之间,试验过程中试件不能被撞击,均匀加载直到试件破坏,由于两个破坏面的出现,荷载可能导致暂时的降低。

B.4 破坏模式是否剪切破坏应该通过视觉进行判断;

B.5 根据公式(B.1)计算剪切强度,保留1位小数。

$$f_v = P/2A \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

- f_v - 剪切强度, MPa;
- P - 最大破坏荷载, N;
- A - GFRP 筋试件横截面积, mm^2

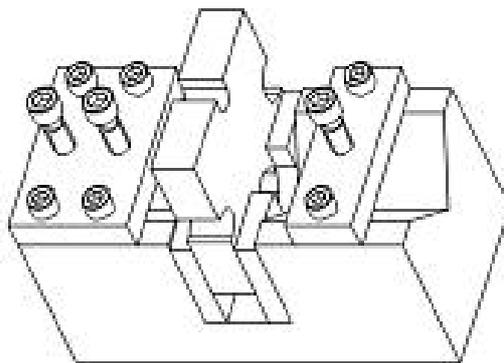


图 B.1 双剪测试装置示意

附录 C

(规范性附录)

GFRP筋粘结强度的测试方法（拉拔试验）

本附录 GFRP 筋粘结强度的测试方法，等同采用 ACI 440.3R-04 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structure (混凝土结构用 FRP 筋性能测试方法)

C.1 范围

C.1.1 本试验方法说明 FRP 筋拉拔试验的相关要求；

C.1.2 本附录提供了 FRP 筋拉拔试验，用以确定 FRP 筋在不同混凝土结构中的粘结强度，试验通过拉拔试件测试 FRP 筋与水泥混凝土、水泥砂浆的粘结强度。

C.1.3 本附录提供两种在试件中浇注混凝土的方法，其中第一种方法如图 C.1 所示，其浇注混凝土的方向为平行于 FRP 筋方向；第二种方法为如图 C.2 所示，其混凝土浇筑方向为垂直于 FRP 筋方向，类似混凝土梁与板的形式；

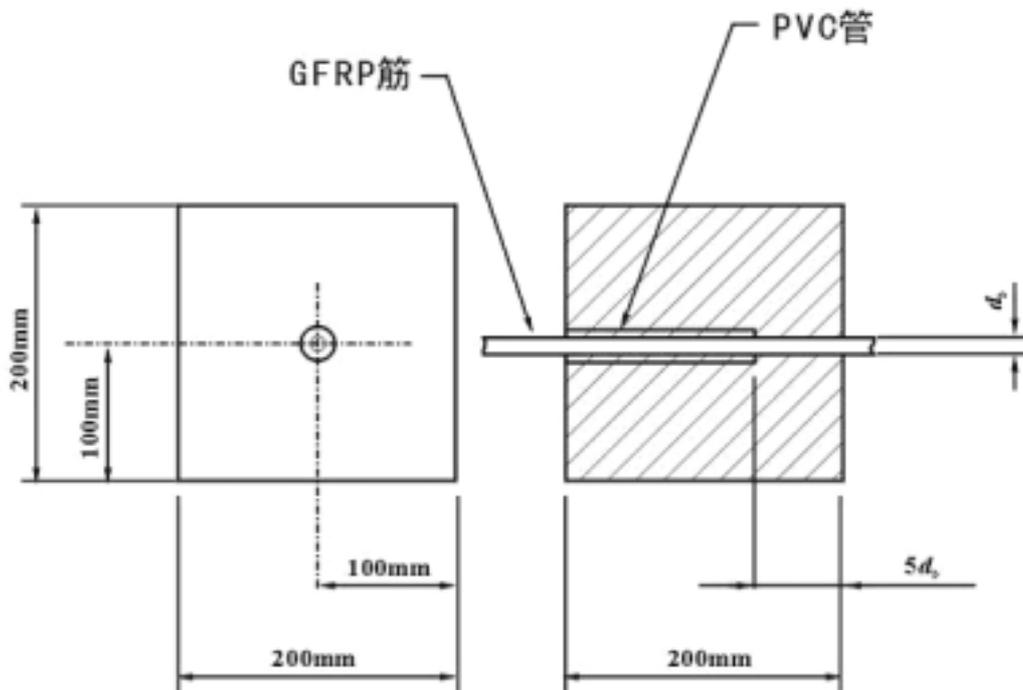


图 C.1 竖向粘结试件

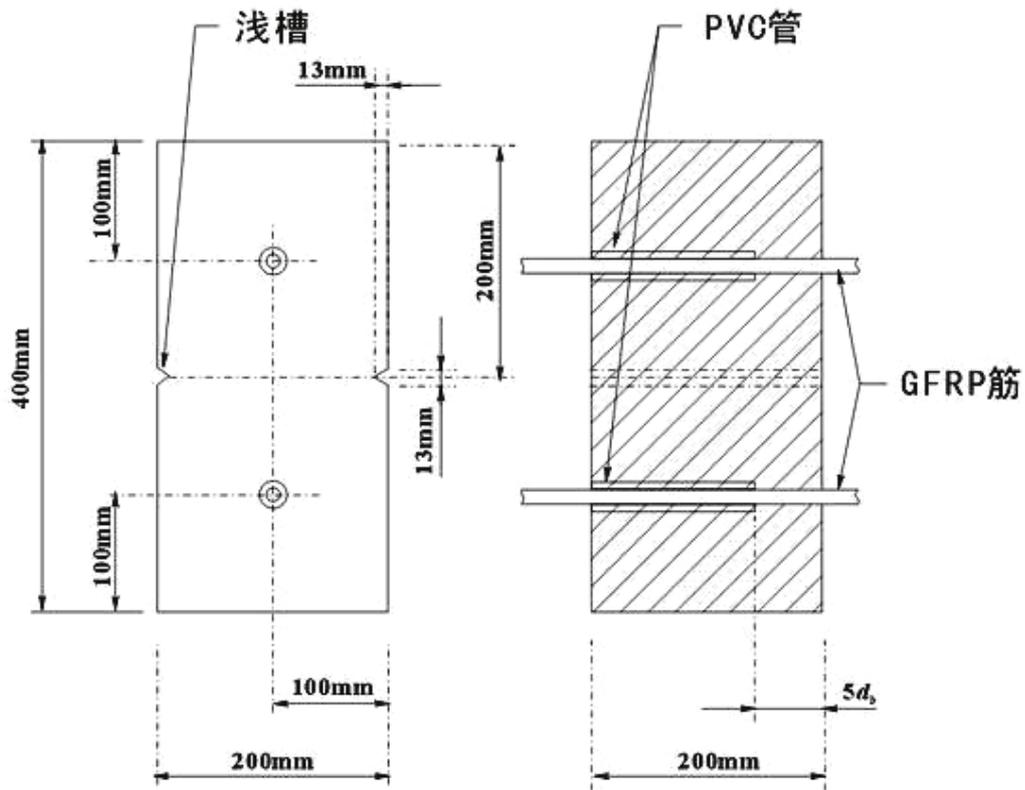


图 C.2 横向粘结试件

C.2 参考文献

C.2.1 ASTM 标准

A 944 用梁端试样比较混凝土和钢筋棒粘结强度的标准试验方法，Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens；

C 39 圆柱形混凝土试件的抗压强度的试验方法，Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens；

C 143 水硬性水泥混凝土坍落度的标准试验方法，Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete；

C 192 实验室中制造和养护混凝土的试验样品，Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory；

C 293 混凝土的抗弯强度的试验方法(用中心荷载的简支梁法)，Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)；

C 511 水硬性水泥和混凝土试验用湿气室、湿气箱和水贮存罐，Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes；

C 617 压顶圆柱型混凝土试样的测试方法，Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete

Specimens ;

D 618 试验用塑料的调理的标准实施规程 , Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing ,

E 4 测试仪的负荷校准 , Standard Practices for Force Verification of Testing Machines.

注 : 采用 ASTM 部分标准时 , 可参照下列标准执行。

C 39 可参照 GB/T 50081—2002 《普通混凝土力学性能 试验方法标准》

C 143 可参照 GB/T50080-2002 《普通混凝土拌合物性能 试验方法标准》 ;

C 192 可参照 GB/T50080-2002 《普通混凝土拌合物性能 试验方法标准》 ;

D 618 可参照 GB/T2918-1998 《塑料试样状态调节和试验的标准环境》 ;

C.3 意义和使用

C.3.1 本试验方法用以测试不同类型和不同尺寸的 FRP 筋与混凝土的粘结强度 , 这个试验方法不能用来确定粘结强度值和 FRP 筋在混凝土中的锚固长度。

C.3.2 本试验倾向于研究材料的粘结性状和质量保证 , 其粘结性状主要由试件的外部形式决定 , 这一点既影响设计也影响分析。对于正常质量的混凝土 , 试件的粘结强度是一个最重要的测试结果 , 它也是 FRP 筋在混凝土结构中应用的最重要的考虑因素。

C.3.3 本试验方法可以用来确定同一种材料的一致性和 FRP 筋与混凝土粘结强度有关的一些影响因素。本试验获得的数值仅仅是为了比较材料间的各自参数。本试验方法也可以用来观察 FRP 筋在混凝土内的长期作用效果 , 包括确定 FRP 筋在混凝土结构中应用时的环境折减系数。

C.4 术语

C.4.1 粘结长度 Bonded length (测试时 , FRP 筋与混凝土接触的长度)

C.4.2 线性差动变压传感器 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

C.5 测试仪器和准备

C.5.1 使用的测试仪器的量程需要超过试件的极限承载力 , 并且根据 ASTM E 4 进行校正 , 荷载增加方式可以按照荷载和位移两种方式进行控制 , 其中每分钟荷载增加值不能超过 20kN , 位移增加值不能超过每分钟 1.3mm , 主要取决于试验机器类型和加载的方式。

C.5.2 如图所示的荷载板 (图 C.3) 是一个经过加工的钢板 , 尺寸为 200mm 的方形 , 厚度 20mm , 中心穿孔以配合 FRP 筋进行试验。

C.5.3 FRP 筋加载端应该与锚固端相适应 , 直到试件破坏。传力装置应该传递轴向荷载 , 不允许施加任何扭矩或者偏心荷载。

C.5.4 FRP 筋自由端和锚固端的位移测量通过 LVDTs 或者测试元件测量 , 精度为 0.01mm。可以采用在加载端 3 个 120 度布置的 LVDTs 或者采用在自由端的 2 个 180 度布置的 LVDTs。

C.5.5 需要两种试件模子 : 200mm 混凝土立方体 , 保证 FRP 筋垂直插入 和 200mm × 200mm × 400mm 的长方体 , 可以保证水平插入两个 FRP 筋。每个模子由厚度大于 6mm 的金属制作 , 并且模子应是防水的 , 容易操作而不影响已经嵌入混凝土的 FRP 筋。

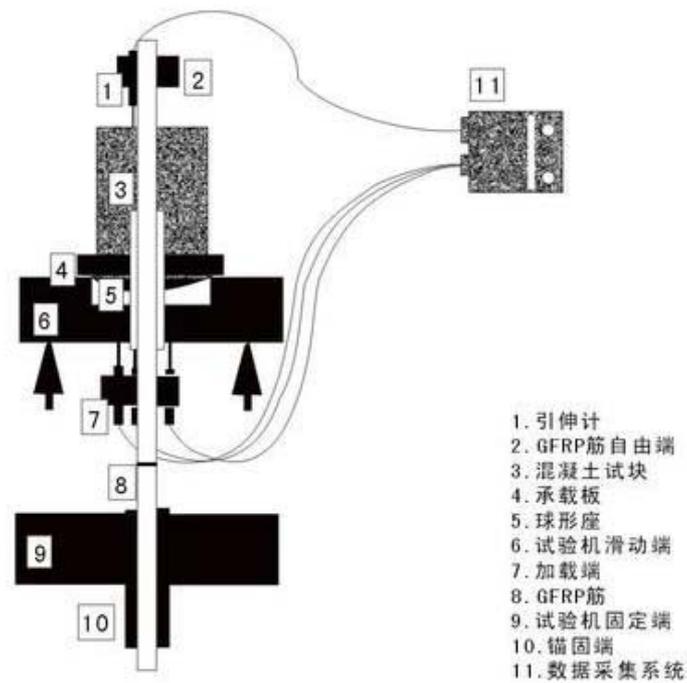


图 C.3 粘结拔出试验的详细试验程式

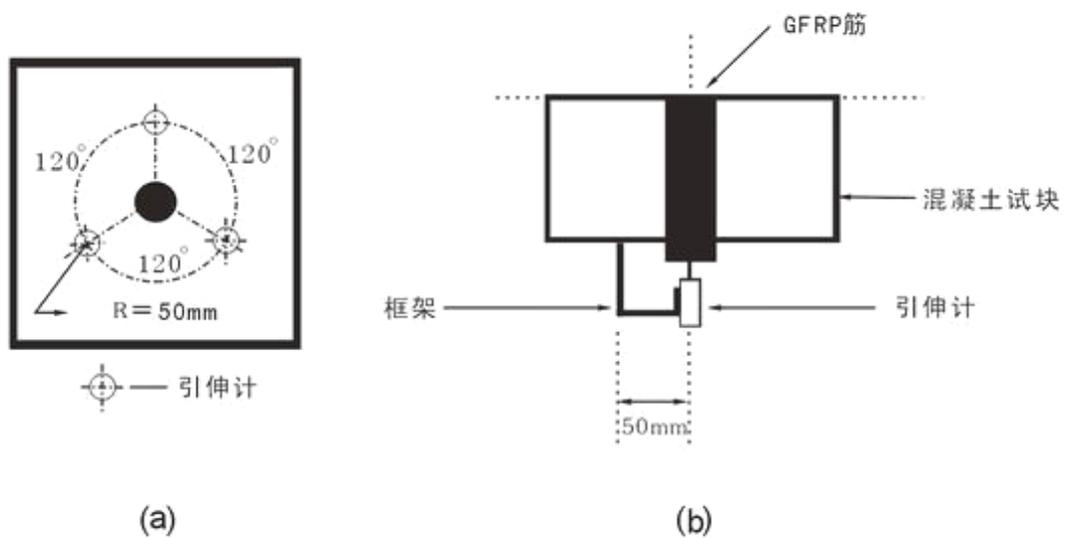


图 C.4 引伸计在混凝土试块表面的位置

(a) 荷载端的 3 个引伸计平面布置 ;(b) 自由端的一个引伸计

C.6 试件准备

C.6.1 FRP 筋试件应该取自有代表性材料批次。每组试件被切割为 1200mm ,并且在一端用锚具固定。试件的制作方可以是如图 C.1 垂直插入 FRP 筋得到,或者是如图 C.2 两根水平插入得到,其中每组要求制作 5 个试件,如果试件在锚固端发生滑移或者混凝土保护层劈裂,那么相同的试验需要重新进行,试件也要求来自同一批次。

C.6.1.1 对于垂直放置的 FRP 筋试件 (图 C.1), 该试件应该由 200mm 的混凝土立方体和一个中心垂直嵌入的 FRP 筋构成。FRP 筋通过试验机器和承载机构的帮助应保证从最上面向外部突出足够的长度, 同时 FRP 筋夹持段也应有足够长度以保证荷载的施加。如果混凝土发生了劈裂破坏, 就需要制作 300mm 的立方体试件来重新进行相关试验。

C.6.1.2 平行放入的两根 FRP 筋试件 (图 C.2), 试件应该为 200mm × 200mm × 400mm 的混凝土长方体, 并拥有两根平行放入的 FRP 筋构成。在垂直方向上, FRP 筋与模具一端的距离为 100mm, 另一端为 300mm。FRP 筋通过试验机器和承载机构的帮助应保证从最上面向外部突出足够的长度, 同时 FRP 筋夹持段也应该有足够长度以保证荷载的施加。在混凝土试块的两端中心部位挖出一个正三角形的槽, 其平行于 FRP 筋的布置方向, 此槽最浅为 13mm 深, 并垂直于混凝土表面。进行粘结强度试验之前, 这个槽应有助于将该试块分裂为 2 个试块。

FRP 筋与混凝土的粘结长度应该为 FRP 筋直径的 5 倍。如果之前定义的粘结长度不能有代表性的反映 FRP 筋与混凝土的粘结性能, 这个粘结长度值可以被适当的加长, 混凝土内部非粘结的 FRP 筋应该使用 PVC 管 (或者其他的材料) 进行隔离。自由端的 FRP 筋明显突出, 使得 LVDTs 可以固定在 FRP 筋上面。

C.6.2 FRP 筋应该通过下面的方法进行的操作

C.6.2.1 插入 FRP 筋的模具开口应该使用油、腻子 and 相似的材料以阻止水或者其他物质侵入。

C.6.2.2 在脱模之前, 试件的位置不能改变。

C.6.3 在浇注混凝土之前, 模具开口的一侧的应该用矿物油、石油胶体和硬脂酸性软膏进行密封。在更好的试验方法出现之前, 推荐采用如下的混凝土试件制作方式。

C.6.3.1 对于 200mm × 200mm × 400mm 的长方体模具来说, 放置 4 层等厚度的混凝土, 逐层浇筑, 每层用直径 16mm 的振捣棒振捣 25 次;

C.6.3.2 对于 200mm 的立方体模具来说, 放置 4 层等厚度的混凝土, 逐层浇筑, 每层用直径 16mm 的振捣棒振捣 25 次;

C.6.3.3 在第一层混凝土已经固结后, 根据 ASTM C 192 中 7.1 的要求, 应该用泥铲刀刮平, 防止水汽的蒸发。特别注意的是不要在那种垂直浇注的试件上, 使得与 FRP 筋接触的混凝土发生水分蒸发。

C.6.4 混凝土应该采用标准拌和, 粗糙骨料的最大粒径在 20 ~ 25mm, 拌和的试验方法依据 ASTM C 192 相关的部分内容, 混凝土的塌落度根据 ASTM C 143 的要求在 100 ± 20 mm 的范围内, 其 28 天养护强度应该在 30 ± 3 MPa (根据 ASTM C 39), 需要最少制作 5 个试块以确定混凝土的抗压强度, 试件的尺寸可以为 150mm × 300mm 或者 100mm × 200mm。

C.6.5 在试件浇注混凝土 20h 之内, 不可移动模具, 尤其要注意模具的撞击和对 FRP 筋的干扰。在脱模之后应该按照 ASTM C 192 的原则进行养护, 直到试验进行。试件应该测试 28 天的混凝土抗压强度。

C.6.6 当养护时间在 7 到 14 天之间, 那个 200 × 200 × 400mm 的试块应该通过中部钱槽将其分离为 2 个试块, 根据 ASTM C 293 的试验方法, 试块通过简单的抗弯试验 (简支梁三点弯曲试验) 就可以

实现，注意的问题是试块中间的两个槽应该被固定在跨中位置，其中荷载应该施加到上层刻槽部分的 19mm 的 FRP 筋上，直到破坏发生。仔细注意试块不要被撞击，否则会影响 FRP 筋的相关试验。

C.6.7 其中 200mm 的立方体试块在 FRP 筋开口的一侧要注意密封，以利于 FRP 筋粘结试验的进行，其中内容可以参考 ASTM C 617 中相关要求执行。

C.7 试验条件

C.7.1 除非有特殊的要求，否则试验室拉拔试验的标准环境要求如下：温度为 23 ± 3 ，相对湿度为 $50\% \pm 10\%$ 。

C.7.2 在混凝土浇注之前，FRP 筋的任何预处理，比如产品的磨损以及相关的过程都是允许的，但需要记录在案。

C.8 试验方法

C.8.1 试块应该放置在试验仪器之上，采用下面介绍的两个方法之一：

C.8.1.1 试块承载面与承载板应接触紧密，参见 C.4。

C.8.1.2 混凝土立方体放置在测试仪器的固定端上，LVDTs 也需要根据图 C.4 在固定端和加载端固定好，用以测量 FRP 筋的滑移。锚固端通过试验机器的移动头拧紧或者夹紧。

C.8.2 在试块上安装测试元件，仔细记录，FRP 粘结长度部分上表面与 FRP 筋测试元件观测的距离大约是 0.5mm，计算 FRP 筋的伸长率，并且减去测试到的滑移位移就是加载端产生的位移，此外自由端的滑移位移测量值接近 0.5mm。

C.8.3 测试仪器的加载频率不应超过 20kN/min。测试仪器的位移增幅不要超过 1.3mm/min。

C.8.4 就加载端来说，当滑移位移达到 0.25mm 左右时，记录数据应该足够达到 15 组以上。用以描述与施加荷载对应的滑移位移，其精度达到 0.01mm。

C.8.5 继续施加荷载和记录读数直到 FRP 筋试件破坏。混凝土中嵌入的 FRP 筋在混凝土开裂之前的位移应该达到 2.5mm。

C.8.6 若发现锚固段已破坏，尤其是发现 FRP 筋与混凝土滑移之前锚固段已破坏，或者由于混凝土的劈裂而导致荷载的明显减小，获得的这类试验数据应该忽略，需要进行额外的试验直到满足相关的试验要求。

C.9 计算

C.9.1 根据公式 (C.1) 计算 FRP 筋与混凝土的平均粘结应力，精度保留 1 位小数。并绘制自由端和加载端的拔出与粘结应力曲线。

$$\tau = \frac{F}{C_b \times l} \dots\dots\dots (C.1)$$

- 其中：
- 平均粘结应力，MPa、
 - F - 施加荷载，N；
 - C_b - FRP 筋等效周长，mm；
 - l - 粘结长度，mm；

C.9.2 自由端和加载端发生 0.05mm、0.10mm、0.25mm 位移的平均粘结强度需要记录，以及计算破坏时的最大粘结应力（粘结荷载）。

C.10 报告

试验报告应该包括以下内容：

C.10.1 混凝土的材性

C.10.1.1 混凝土的级配，包括细骨料、粗骨料和添加剂（如果使用），以及水灰比；

C.10.1.2 根据 ASTM C 143 试验方法确定的混凝土塌落度；

C.10.1.3 根据 ASTM C 39 试验方法确定的混凝土 28 天抗压强度，MPa；

C.10.1.4 与规定标准有关的任何偏差，比如拌和、养护和脱模日期、试验控制等等；

C.10.2 FRP 筋的材性

C.10.2.1 商标名称、形式和生产日期，如果可能可以记录产品的批号；

C.10.2.2 由厂商提供的纤维和树脂的类型，纤维的体积含量，表面处理工艺和 FRP 筋的预处理等等；

C.10.2.3 FRP 筋的命名、等效直径和横截面积，可以根据本文试验方法 5.3 提供；

C.10.2.4 FRP 筋的弹性模量，极限伸长率；

C.10.2.5 FRP 筋的全周照片；

C.10.3 试件的测试编号；

C.10.4 测试日期、温度、荷载控制；

C.10.5 试件的尺寸和 FRP 筋的粘结长度；

C.10.6 夹持器具的简单描述；

C.10.7 每组试件当自由端位移为 0.05mm，0.10mm，0.25mm 时的平均粘结强度；

C.10.8 每组试件当加载端位移由 0 到 0.25mm 之间的平均粘结强度；

C.10.9 最大粘结强度、破坏模式和每组试件的平均值；

C.10.10 每组试件的粘结应力和位移曲线（自由端和荷载端）。

附录 D

(资料性附录)
GFRP 筋应力 - 应变曲线

D. GFRP 筋应力 ~ 应变曲线

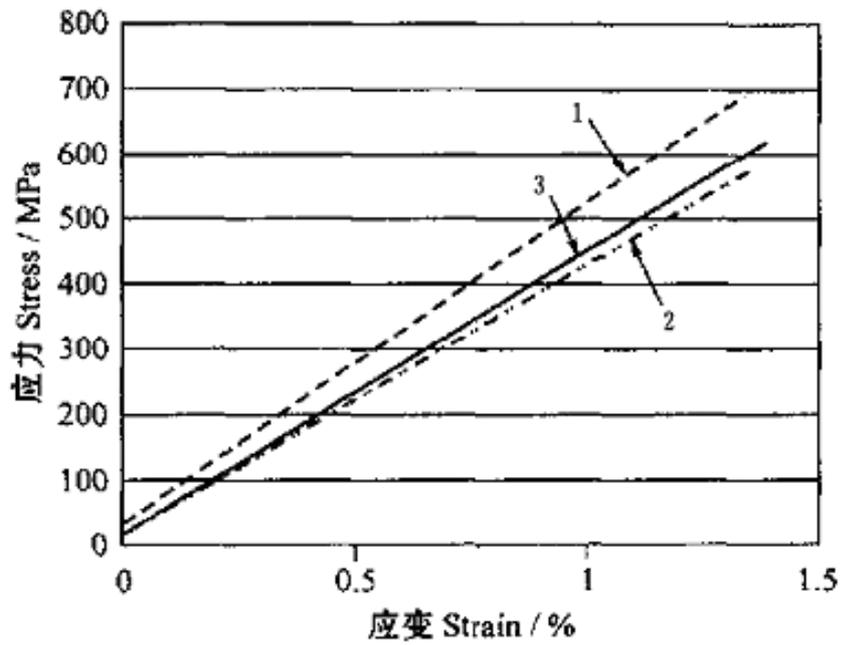


图 D.1 GFRP 筋的应力-应变曲线

注；其中图例 1 和图例 2 分别表示 GFRP 筋应力-应变曲线的范围；图例 3 表示一般 GFRP 筋应力-应变曲线。

附录 E

(资料性附录)
GFRP 筋基本设计要求

E.1 GFRP 筋在混凝土结构中的锚固长度根据公式 (E.1) 确定

$$l_a = \beta \times f_d \times d \dots\dots\dots (E.1)$$

- 计算系数, 按照经验取为 1/18.5。

f_d - GFRP 筋抗拉强度设计值, MPa; 根据 ACI 440.1R-03 的规定, GFRP 筋抗拉强度标准值乘以 0.7 为 GFRP 筋抗拉强度设计值。

l_a - GFRP 筋在混凝土结构中锚固长度, mm;

d - GFRP 筋的直径, mm;

另外考虑位置影响系数和混凝土保护层、混凝土强度的影响, 锚固长度修正系数为 1.3 ~ 1.5;

表 E.1 GFRP 筋在混凝土结构中锚固长度参考值

混凝土等级	C20	C30	C40	C50
锚固长度	34d	31d	29d	27d

E.2 GFRP 筋在混凝土结构中的搭接长度根据公式 (E.2) 确定。

$$l_1 = \alpha l_a \dots\dots\dots (E.2)$$

- 修正系数, 一般取1.6;

l_a - GFRP筋在混凝土结构中锚固长度, mm;

l_1 - GFRP筋在混凝土结构中搭接长度, mm;

如果GFRP筋搭接处的应力要求不超过其极限抗拉强度的50%, 那么修正系数 由1.6减小到1.3。

E.3 GFRP 筋弯曲最小半径有关规定根据公式 (E.3) 确定。

$$r_b \geq 14d_b \dots\dots\dots (E.3)$$

根据实际需要, GFRP 筋弯曲半径不能满足以上要求时, 弯曲后的 GFRP 筋弯曲部位强度设计值可以按照公式 (E.4) 计算。

$$f_b = (\gamma \times \frac{r_b}{d_b} + 0.3) \times f_d \dots\dots\dots (E.4)$$

其中： - 计算系数，根据经验取为 0.05；

f_b - GFRP 筋弯曲部位抗拉强度设计值不大于 f_d ，MPa；

r_b - GFRP 筋弯曲部分的半径，mm；

d_b - GFRP 筋的有效直径，mm；

f_d - GFRP 筋的抗拉强度设计值，考虑环境因素进行适当的折减，MPa；

E.4 一般环境下GFRP筋抗拉强度设计值根据公式 (E.5) 的确定。

GFRP材料会在不同的化学环境中（包括酸、碱）发生性能的劣化，当需要进行GFRP筋抵抗化学介质试验时，研究人员可参考GB/T 3857-2005玻璃纤维增强热固性塑料耐化学介质性能试验方法的要求执行。这种劣化随着温度的升高而加剧，暴露于环境中的构件，采用GFRP筋进行构件增强时，强度标准值应乘以0.7的安全系数，以作为设计强度，GFRP筋抗拉强度设计值根据公式 (E.5) 的确定。

$$f_d = C_E f_k \dots\dots\dots (E.5)$$

环境情况	环境因素引起的折减系数， C_E
暴露在室内	0.8
暴露在室外	0.7