

文章编号:1007-9629(2021)03-0584-06

不同维度玻璃纤维对 GRC 抗弯性能的影响

李清海, 赵娇娇, 李清原, 高建伟, 吴玉姣

(中国建筑材料科学研究总院有限公司, 北京 100024)

摘要: 采用一维短切玻璃纤维、二维玻璃纤维网格布、三维间隔连体玻纤织物(3D 织物)对水泥基材料进行增强,得到不同维度玻璃纤维增强水泥(GRC);根据四点弯曲测试得到不同维度 GRC 试件的抗弯荷载-挠度曲线,结合测试过程中的裂缝发展情况,分析不同维度玻璃纤维对水泥基材料抗弯性能的影响规律,并建立不同维度 GRC 试件的抗弯荷载-挠度曲线拟合方程,计算其强度和韧性指标.结果表明:在弹性变形阶段和塑性变形阶段,不同维度 GRC 试件的荷载与挠度均有较好的线性关系,在弹塑性过渡阶段,3D 织物 GRC 试件的抗弯荷载与挠度呈正弦函数关系;与纯水泥砂浆试件相比,一维短切玻璃纤维 GRC 试件、二维玻璃纤维网格布 GRC 试件、3D 织物 GRC 试件的抗弯破坏强度分别提高 53%、92%、193%,韧度指数分别达 26.7、34.3、73.6;3D 织物 GRC 使得 GRC 材料由低强度脆性破坏向高强、高韧性提升.

关键词: 一维短切玻璃纤维;二维玻璃纤维网格布;3D 织物;抗弯强度;韧性

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.019

Influence of Glass Fibers with Different Dimensionality on Flexural Properties of GRC

LI Qinghai, ZHAO Jiaojiao, LI Qingyuan, GAO Jianwei, WU Yujiao

(China Building Material Academy, Beijing 100024, China)

Abstract: The cement-based materials were reinforced by one-dimensional chopped glass fiber, two-dimensional glass fiber mesh and three-dimensional glass fiber fabric(3D fabric) that was woven at intervals. Based on the examination of load-deflection curve from four-point bending test and the crack propagation in glass fiber reinforced cement(GRC) failure process, the bending performance of GRC reinforced by glass fibers with different dimensionality was analyzed. The fitted equations of bending load-deflection curve were established, and the strength and toughness indexes were used for quantitative characterization. The results show that, GRC reinforced by fibers with different dimensionality possesses good linear relationship between bending load and deflection in elastic deformation stage and plastic deformation stage. In the elastic-plastic transition stage, the bending load and deflection of GRC reinforced by 3D fabric shows a sine function relationship. The bending failure strength of GRC reinforced by chopped glass fiber, glass fiber mesh and 3D fabric is increased 53%, 92% and 193% respectively compared with that of reference cement mortar, and the toughness index reaches 26.7, 34.3 and 73.6 respectively compared with that of reference cement mortar(1.0). 3D fabric reinforcement improves the strength and toughness of GRC from a low strength and brittle material.

Key words: one-dimensional chopped glass fiber; two-dimensional glass fiber mesh; 3D fabric; bending strength; toughness

收稿日期:2019-11-24; 修订日期:2019-12-05

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0703500)

第一作者:李清海(1967—),男,内蒙古商都人,中国建筑材料科学研究总院有限公司教授级高级工程师,博士. E-mail:liqinghai@cbm-amail.com.cn

玻璃纤维增强水泥(GRC)是一种以玻璃纤维为增强材料、水泥砂浆为基体的复合材料^[1-2]。在 GRC 材料中,玻璃纤维起配筋作用,可以承受一定的荷载并传递应力,阻止水泥基材开裂,改善水泥基材料抗拉强度低、抗弯强度低、脆性大等问题。GRC 常用的玻璃纤维有短切玻璃纤维(一维)和玻璃纤维网格布(二维)2 种,但短切玻璃纤维有着不连续、在制品中三维乱向分布和掺杂搅拌不均匀的缺点,而玻璃纤维网格布(二维)的铺设过程相对繁琐,且使用多层二维网格布制备的层压复合材料对分层破坏很敏感,在静态荷载、动态荷载或冲击载荷作用下,其剪切和劈裂回弹性能较差^[3-4];另外,一维、二维玻璃纤维对水泥基材料的增强效果有待提高(GRC 的比例极限强度约 8 MPa,抗弯破坏强度约 18 MPa),从而使得 GRC 材料的应用受到限制。随着纤维编织工艺的进步,3D 织物种类日益增多,其应用研究也逐步展开。如本团队在前期探索中研究了 3D 玻璃纤维织物增强水泥基材料的力学性能和耐久性,以及粉煤灰、矿粉的不同配合比对其性能的影响^[5-7]。

本文采用一维短切玻璃纤维(1D 玻纤)、二维玻璃纤维网格布(2D 玻纤)、三维间隔连体玻纤织物(3D 织物)作为水泥基材料的增强材料,得到 1D 玻纤 GRC、2D 玻纤 GRC 和 3D 织物 GRC;通过抗弯荷载-挠度曲线分析 3 种维度 GRC 在弯曲破坏过程中不同阶段的变化特征,并建立抗弯荷载-挠度曲线拟合方

程,计算不同维度 GRC 的抗弯破坏强度(σ_{MOR})、抗弯比例极限强度(σ_{LOP})、弹性变形能(E_{N})、塑性变形能(P_{N})和刚度指数(T_1),以此来揭示一维、二维玻璃纤维和 3D 织物对水泥基材料的增强作用。

1 试验

1.1 原材料及配合比

水泥采用 52.5 快硬硫铝酸盐水泥,其主要性能指标见表 1。砂采用普通中砂,最大粒径小于 2.36 mm。减水剂为聚羧酸高性能减水剂,减水率¹⁾ 40%。3D 织物由伯龙三维复合材料有限公司生产,采用 ZrO_2 含量为 16.7%的耐碱玻璃纤维纱(连续纤维)织造的纤维芯柱贯穿连接上下 2 个平面织物层而编织成增强体,内部呈空芯结构,层面之间经由连接线呈“Ω”字形站立连接,具有很好的整体结构形式,3D 织物的主要性能指标见表 2。1D 玻纤为 ZrO_2 含量 16.7%的耐碱短切玻璃纤维;2D 玻纤为 ZrO_2 含量 16.7%的耐碱玻璃纤维网格布,两者的主要性能指标见表 3、4。试件配合比见表 5。

表 1 快硬硫铝酸盐水泥的主要性能指标

Table 1 Main properties of sulphoaluminate cement

Specific surface area/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	Setting time/min		Flexural strength at 3 d/MPa	Compressive strength at 3 d/MPa
	Initial	Final		
415	30	39	8.8	53.7

表 2 3D 织物的主要性能指标

Table 2 Properties of 3D fabric

Thickness/mm	Surface density/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	Surface density of glass fiber mesh below 3D fabric/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	Tensile strength(50 mm)/N		Shear strength/MPa	
			Warp	Weft	Warp	Weft
8	636	170	2 429	2 271	2.3	1.3

表 3 短切玻璃纤维的主要性能指标
Table 3 Properties of chopped glass fiber

Length/mm	Diameter/ μm	Density/tex	Tensile strength(tex)/N
12	15	98	0.25

表 4 玻璃纤维网格布的主要性能指标
Table 4 Properties of glass fiber mesh

Surface density/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	Mesh size/mm		Tensile strength(50 mm)/N	
	Warp	Weft	Warp	Weft
170	5	5	1 350	1 355

表 5 试件配合比
Table 5 Mix proportion of specimens

Specimen code	$m(\text{cement}) : m(\text{sand})$	$w(\text{water reducer})/\%$	Water-cement ratio	Type of glass fiber	Fiber content/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
A0	1 : 1	2.5	0.225		0
A1	1 : 1	2.5	0.225	Chopped glass fiber	17.0
A2	1 : 1	2.5	0.225	Glass fiber mesh	17.0
A3	1 : 1	2.5	0.225	3D fabric	17.0 [*] /63.6 ^{**}

* ;Calculated by the glass fiber mesh(bending zone) below the 3D fabric; ** ;Calculated by the 3D fabric.

1) 本文涉及的减水率、含量、比值等均为质量分数或质量比。

1.2 试验方法

1.2.1 抗弯试件制备

抗弯试件尺寸为 250 mm×50 mm×10 mm,同一配合比成型试件 6 个(No. 1~No. 6). 不同维度 GRC 试件制备方法如下:

(1)1D 玻纤 GRC 试件成型:将水泥、砂、短切纤维等干料按设计配合比预混均匀,加入水与减水剂混合液料,采用行星式水泥胶砂搅拌机慢搅 3 min,倒入模具中机械振动 1 min,成型试件. 短切玻璃纤维掺量过大会造成“打卷”现象,均匀性差,所以本试验中短切玻璃纤维掺量选择 2.5%(以水泥质量为基准)为拌和工艺的最大掺量.

(2)2D 玻纤 GRC 试件成型:按表 5 所示配合比配制纯水泥砂浆,搅拌均匀后分 2 层倒入模具,玻璃纤维网格布则放置在距底模板 2 mm 位置;机械振动 1 min,成型试件. 为使玻璃纤维网格布在抗弯测试时发挥最佳效果,选择玻璃纤维网格布在试件底部铺设.

(3)3D 织物 GRC 试件成型:先将已切割成长 250 mm,宽 50 mm 的 3D 织物放入成型模具中,再按表 5 所示配合比配制纯水泥砂浆,搅拌均匀后倒入模具;振动 1 min,刮平表面,保持 3D 织物上下保护层厚度各 1 mm.

将成型好的试件连同模具在 (20±2)℃、相对湿度 95% 以上的环境中养护 24 h,拆模并继续养护至 7 d 龄期,进行抗弯性能测试.

1.2.2 抗弯性能测试

按照 GB/T 15231—2008《玻璃纤维增强水泥性能试验方法》,采用 WD4100 微机控制电子万能试验机对各试件进行四点弯曲测试. 四点弯曲测试跨距 210 mm,支距 70 mm,加载速率 3 mm/min,并同时采集各试件的挠度变形数据. 依据试验所得抗弯荷载(P)-挠度(δ)曲线,按下式计算各试件的抗弯破坏强度(σ_{MOR})、抗弯比例极限强度(σ_{LOP}).

$$\sigma_{\text{MOR}} = \frac{P_{\text{MOR}}L}{bh^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{LOP}} = \frac{P_{\text{LOP}}L}{bh^2} \quad (2)$$

式中: P_{MOR} 为最大荷载,kN; P_{LOP} 为比例极限荷载,kN; b 为试件宽度,mm; h 为试件厚度,mm; L 为跨距,取 210 mm.

1.2.3 韧性

韧性是指试件在破坏前吸收能量的能力,其值大小取决于材料的强度和变形能力^[8]. 根据美国材料实验协会 ASTM C 1018 提出的弹性变形能 E_N 、

塑性变形能 P_N 和韧度指数 T_1 表征方法,结合 GRC 材料特性,试验采用 2 个加载点 P_{LOP} 和 P_{MOR} 的荷载-挠度曲线与坐标轴所围面积来计算每级荷载下试件所吸收的能量,分别表示试件的弹性变形能和弹塑性变形能,如图 1 所示. 图 1 中: E_N 为零点到 P_{LOP} 值对应荷载曲线下的 oac 面积; P_N 为 P_{LOP} 值对应试验力到 P_{MOR} 值对应试验力曲线下 $abdc$ 的面积. 韧度指数 T_1 是材料的弹塑性变形能与弹性变形能之比,计算公式如下:

$$T_1 = (E_N + P_N) / E_N \quad (3)$$

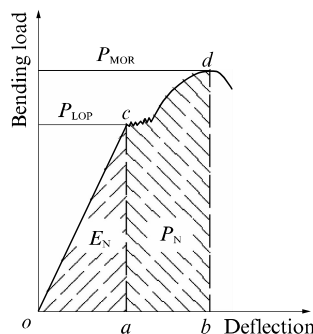


图1 抗弯荷载-挠度曲线图
Fig. 1 Diagram of bending load and deflection

2 结果与讨论

2.1 抗弯荷载-挠度分析

不同维度 GRC 试件的抗弯荷载-挠度(P - δ)曲线图见图 2. 由图 2 可见:纯水泥砂浆试件 A0 发生了脆性断裂,其抗弯荷载随挠度的增加线性增大,荷载达到最大(350 N)时发生瞬时断裂且承受的抗弯挠度很小(0.3 mm);1D 玻纤 GRC 试件 A1 和 2D 玻纤 GRC 试件 A2 的抗弯荷载-挠度曲线变化规律相似,抗弯响应分为弹性变形、塑性变形 2 个阶段;3D 织物 GRC 试件 A3 的抗弯响应分为弹性变形阶段、弹塑性过渡阶段(也称多裂缝形成阶段)、塑性变形阶段,其变形破坏形式见图 3. 分析不同维度 GRC 在各阶段的抗弯荷载及挠度变化规律可知:

(1)第 I 阶段(弹性变形阶段):纯水泥砂浆试件、1D 玻纤 GRC 试件、2D 玻纤 GRC 试件、3D 织物 GRC 试件的初裂挠度分别为 0.30、0.32、0.35、0.36 mm,对应的初裂抗弯荷载分别为 350、350、354、358 N,说明玻璃纤维对水泥基材料的初裂性能影响不大,脆性的水泥砂浆基体仍是影响试件初裂变形的主要因素.

(2)第 II 阶段(弹塑性过渡阶段,也称多裂缝形成阶段):抗弯荷载波动变化(302~409 N),挠度持

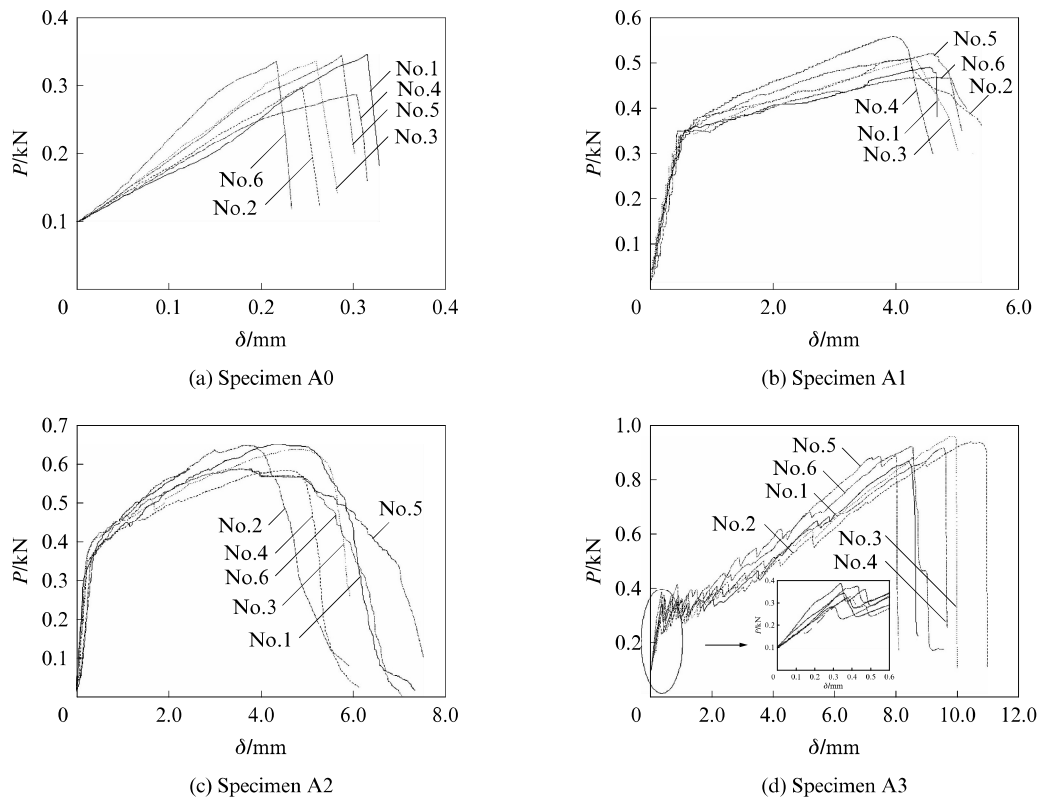


图2 各试件抗弯荷载-挠度曲线
Fig. 2 Bending load-deflection curves of specimens

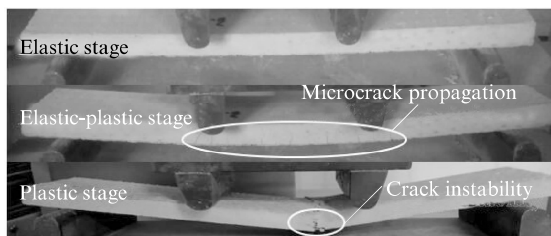


图3 3D 织物 GRC 试件在不同加载阶段的变形破坏形式
Fig. 3 Modes of deformation and failure of 3D fabric reinforced GRC specimen in different loading stages

续增加(由 0.36 mm 增至 2.48 mm). 作用力由水泥砂浆基体传递给玻璃纤维,在其内部相互传递并拉长纤维丝,然后又返递给未开裂的水泥砂浆基体. 玻璃纤维与水泥砂浆基体相互往复传递作用力,在宏观上即表现为试件表面出现大量间距大致相等的微裂纹^[2],微裂纹之间仍由玻璃纤维连接. 当裂纹间距缩小到不能使玻璃纤维与水泥砂浆基体相互传递作用力时,该阶段达到终点.

(3)第Ⅲ阶段(塑性变形阶段):此阶段水泥砂浆基体完全丧失承载能力,由 1D 玻纤、2D 玻纤、3D 织物承担全部承载作用,试件破坏时达到最大荷载,分别为 530、674、1 019 N,最大挠度分别为

4.5、5.5、10.0 mm. 此过程中 1D 玻纤被拉断或拔出、2D 玻纤和 3D 织物下面层纤维伸长直至拉断(见图 4),且塑性变形阶段的斜率较小,这与 1D 玻纤、2D 玻纤、3D 织物在水泥基复合材料中的杨氏模量、纤维分布及其掺量有关.

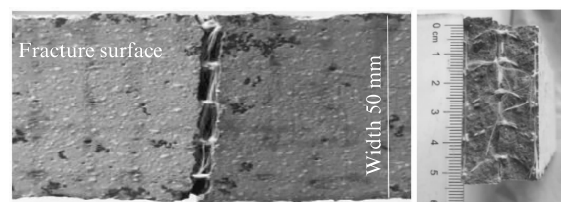


图4 3D 织物 GRC 试件的底部破坏断面
Fig. 4 Failure section of the bottom of 3D fabric reinforced GRC specimen

2.2 抗弯荷载-挠度拟合方程及性能分析

根据 A0~A3 这 4 组试件的抗弯荷载-挠度曲线及其破坏特性,采用 Origin 软件中最优模型选择分段函数(Piecewise)进行拟合,拟合曲线如图 5 所示;各试件抗弯荷载与挠度在各个变形阶段的数学模型如式(4)~式(7)所示. 各段拟合曲线的皮尔森相关系数均大于 0.90,说明拟合曲线均与原曲线较为接近.

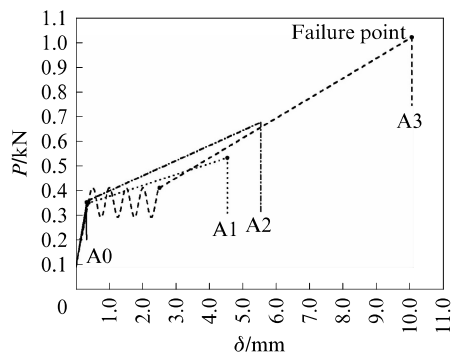


图5 各试件抗弯荷载-挠度拟合曲线

Fig. 5 Bending load-deflection fitted curves of specimens

试件 A0:

$$P=0.0986+0.8384\delta, \delta \leq 0.30 \text{ mm} \quad (4)$$

试件 A1:

$$P=0.0940+0.7923\delta, \delta \leq 0.32 \text{ mm};$$

$$P=0.3308+0.0443\delta, 0.32 \text{ mm} < \delta \leq 4.50 \text{ mm} \quad (5)$$

试件 A2:

$$P=0.0986+0.7441\delta, \delta \leq 0.35 \text{ mm};$$

$$P=0.3359+0.0615\delta, 0.35 \text{ mm} < \delta \leq 5.50 \text{ mm} \quad (6)$$

试件 A3:

$$P=0.1012+0.6882\delta, \delta \leq 0.36 \text{ mm};$$

$$P=0.3489+0.06\sin[\pi(\delta-0.36)/0.25],$$

$$0.36 \text{ mm} < \delta \leq 2.48 \text{ mm};$$

$$P=0.2077+0.0811\delta, 2.48 \text{ mm} < \delta \leq 10.00 \text{ mm} \quad (7)$$

由以上分析可知:不同维度 GRC 在抗弯荷载作用下,其弹性变形阶段和塑性变形阶段的荷载与挠度均有较好的线性关系;3D 织物 GRC 在弹塑性过渡阶段的荷载与挠度更接近正弦函数关系.以上方法可较好地表示出不同维度 GRC 在抗弯荷载作用下荷载与挠度之间的数学模型,式中各常数项与玻璃纤维掺量、试件尺寸等因素有关.

根据图 2 中各试件的抗弯荷载-挠度曲线,按照 GB/T 15231—2008 规定方法计算各试件抗弯比例极限强度 σ_{LOP} 和抗弯破坏强度 σ_{MOR} ;以图 5 抗弯荷载-挠度拟合曲线与坐标轴所围面积分别计算各试件的弹性变形能 E_N 和塑性变形能 P_N ,并由此计算其弹塑性变形能 $(E_N + P_N)$ 和韧度指数 T_1 ,结果见表 6.

由表 6 可知:1D 玻纤 GRC、2D 玻纤 GRC、3D 织物 GRC 试件的弹性变形能分别为 71、79、81 N·mm,抗弯比例极限强度分别为 8.60、8.70、8.80 MPa,与

表6 各试件的抗弯强度和韧性

Table 6 Bending strength and toughness of specimens

Specimen code	$E_N/$ (N·mm)	$P_N/$ (N·mm)	$(E_N+P_N)/$ (N·mm)	T_1	$\sigma_{LOP}/$ MPa	$\sigma_{MOR}/$ MPa
A0	67	0	67	1.0	8.59	8.59
A1	71	1 833	1 886	26.7	8.60	13.10
A2	79	2 657	2 711	34.3	8.70	16.47
A3	81	5 883	5 939	73.6	8.80	25.21

纯水泥砂浆试件相比没有明显增加,说明 3 种维度玻璃纤维对水泥基材料的抗初裂能力影响不大.

纯水泥砂浆试件的塑性变形能为 0、韧度指数为 1.0;1D 玻纤 GRC、2D 玻纤 GRC、3D 织物 GRC 试件的塑性变形能分别为 1 833、2 657、5 883 N·mm,韧度指数分别为 26.7、34.3、73.6,说明 3 种维度玻璃纤维能够大幅度提高水泥基材料的塑性变形能力,且材料的韧性逐渐增强.3 种维度 GRC 试件的抗弯破坏强度分别为 13.10、16.47、25.21 MPa,比纯水泥砂浆试件分别提高 53%、92%、193%,说明 3 种维度玻璃纤维对水泥基材料的抗弯破坏强度影响显著,且 3D 织物的增强效果最佳.在此过程中,1D 玻纤受到掺量限制且与水泥黏结的强度较低,纤维易被拔出;2D 玻纤仅有径向纤维起到增强作用,受弯时易被拉断,纬向纤维没能发挥作用;3D 织物一方面因其特别的构造,在试件中纤维掺量明显增加,另一方面则由经纱、纬纱和芯柱相互交织成网络结构,该结构具有一定的拉伸强度(经向 2 429 N,纬向 2 271 N,均以 50 mm 计)、剪切强度(经向 2.3 MPa,纬向 1.3 MPa).在弯曲荷载作用下,3D 织物上、下面层不但可以承受拉伸应力,而且上、下面层可以通过芯柱相互传递所受荷载(传递路径长)而不发生破坏,只有增大剪切应力,使 3D 织物的部分纤维芯柱发生倾斜而逐渐错位时,芯柱和上、下底面层相接处才会发生破坏.所以在弯曲荷载作用下,3D 织物 GRC 试件要比 1D 玻纤 GRC 试件、2D 玻纤 GRC 试件抗弯强度和韧性的增强效果更好.

3 结论

(1)一维、二维 GRC 的抗弯破坏过程主要包含弹性变形阶段、塑性变形阶段;3D 织物 GRC 的抗弯破坏过程又新增弹塑性过渡阶段.GRC 在弹性变形阶段的力学性能主要由水泥基材性能决定,弹塑性过渡阶段的力学性能由水泥基材和玻璃纤维共同决定,塑性变形阶段的力学性能主要由玻璃纤维决定.

(2)在抗弯荷载作用下,不同维度 GRC 在弹性变形阶段和塑性变形阶段的荷载与挠度均有较好的

线性关系;3D 织物 GRC 在弹塑性过渡阶段的荷载与挠度呈正弦函数关系。

(3)一维短切玻璃纤维、二维玻璃纤维网格布、3D 织物这 3 种类型玻璃纤维均能使水泥基材料的强度和韧性有大幅度提高,尤其是在塑性变形阶段表现明显,具体表现在其抗弯破坏强度比纯水泥砂浆分别提高 53%、92%、193%,韧度指数分别达 26.7、34.3、73.6;其中 3D 织物的增强效果最佳。原因一方面是 3D 织物的纤维有效掺量较高,另一方面是由经纱、纬纱和芯柱相互交织成了具有很高拉伸强度和剪切强度的三维网络结构。

参考文献:

- [1] 曹巨辉. 玻璃纤维增强普通硅酸盐水泥耐久性研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
CAO Juhui. Study on durability of glass fiber reinforced ordinary Portland cement [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- [2] 沈荣熹,崔琪,李清海. 新型纤维增强水泥基复合材料[J]. 北京:中国建材工业出版社,2004.
SHEN Rongxi, CUI Qi, LI Qinghai. New type fiber reinforced cement-based composites[J]. Beijing: China Building Materials Press, 2004. (in Chinese)
- [3] SASI E A, PELED A. Three dimensional(3D) fabrics as reinforcements for cement-based composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 74:153-165.
- [4] 苏丹,李敏,王绍凯,等. 三维间隔连体织物复合材料工艺相关结构因素及其控制[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会学术年会. 深圳:中国航空学会,2007:2168-2173.
SU Dan, LI Min, WANG Shaokai, et al. Structural factors related to the process of three-dimensional spaced fabric composites and their control[C]//High-Level Forum on Key Technologies of Large Aircraft and Annual Meeting of China Aviation Society. Shenzhen: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2007:2168-2173. (in Chinese)
- [5] 朱雪峰,张朋,李清海,等. 粉煤灰对 3D 玻璃纤维织物增强水泥基材料力学性能及耐久性影响的研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(7):46-48.
ZHU Xuefeng, ZHANG Peng, LI Qinghai, et al. Study of fly ash on mechanical properties and durability of 3D glass fiber fabric reinforced cement [J]. New Building Materials, 2016, 43(7):46-48. (in Chinese)
- [6] 朱雪峰,李清海,李东旭. 矿渣微粉对 3D 玻璃纤维织物增强水泥基材料力学性能及耐久性的研究[J]. 混凝土, 2017(2): 69-72.
ZHU Xuefeng, LI Qinghai, LI Dongxu. Study of slag on mechanical properties and durability of 3D glass fiber fabric reinforced cement[J]. Concrete, 2017(2):69-72. (in Chinese)
- [7] 朱雪峰,张朋,李清海,等. 复掺粉煤灰和矿粉对 3D 玻璃纤维织物增强水泥耐久性的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(8): 46-49.
ZHU Xuefeng, ZHANG Peng, LI Qinghai, et al. Study of fly ash and slag on durability of 3D glass fiber fabric reinforced cement[J]. Concrete and Cement Products, 2016(8):46-49. (in Chinese)
- [8] BARR B, GETTU R, AL-ORAIMI S K A, et al. Toughness measurement—The need to think again[J]. Cement and Concrete Composites, 1996, 18(4):281-297.