文章编号:1007-9629(2021)06-1307-08

定向钢纤维增强地质聚合物复合梁的抗弯性能

张伟杰1, 谢子令1, 周华飞2

(1. 温州大学 建筑工程学院, 浙江 温州 325000; 2. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310000)

摘要:为研究定向钢纤维层厚度对地质聚合物复合梁抗弯性能的影响,制备了不同纤维层厚度的地 质聚合物复合梁,并进行了三点弯曲试验.结果表明:复合梁的断裂能随钢纤维层厚度增加而提升, 其抗折强度随着钢纤维层厚度的增加呈现先增后减的变化趋势.为深入探讨地质聚合物复合梁钢纤 维层厚度与其抗折强度的关系,建立了定向钢纤维增强地质聚合物复合梁受弯承载力简化计算分析 模型,通过在模型中引入定向钢纤维增强地质聚合物的抗压强度各向异性测试结果,并以定向钢纤 维抗拉强度影响系数(β_u)为变量,对比计算分析了复合梁受弯承载力及界限钢纤维层厚度,发现当 $\beta_u \approx 3$ 时,计算结果与试验结果较为吻合.

Flexural Property of Directional Steel Fiber Reinforced Geopolymer Composite Beams

ZHANG Weijie¹, XIE Ziling¹, ZHOU Huafei²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325000, China;2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China)

Abstract: To investigate the effect of the thickness of directional steel fiber layer on the flexural behavior of geopolymer composite beam, geopolymer composite beams with different steel fiber layer thicknesses were fabricated and three-point bending tests were carried out. The experimental results show that the fracture energy of the composite beam increases as the steel fiber layer thickness increases, whereas the flexural strength increases with the steel fiber layer thickness at the beginning and then descends when the steel fiber layer thickness reaches a certain value. To further explore the reason behind this phenomenon, a simplified bending capacity model is formulated for partial and full sectional steel fiber reinforced geopolymer composite beam, respectively. By introducing the anisotropy of the compressive strength of the directional steel fiber reinforced geopolymer into the model, and taking the influence coefficient (β_{tu}) of directional steel fiber tensile strength as variable, the flexural bending capacity and the optimum thickness of steel fiber layer of composite beam are calculated and analyzed. When β_{tu} is about 3, the calculated results are in good agreement with the experimental results.

Key words: fiber reinforced geopolymer; directional steel fiber; fiber layer thickness; flexural property; fracture energy; anisotropy

地质聚合物的概念首先在 20 世纪 70 年代提出^[1],由于其具有二氧化碳排放量低、强度高、硬化快

等特点,因此被认为是一种更清洁的材料^[2].国内外 学者讨论了不同原料^[3]、养护制度^[4]对于地质聚合物

第一作者:张伟杰(1997—),男,浙江台州人,温州大学硕士生.E-mail:2294953395@qq.com

收稿日期:2020-08-10;修订日期:2020-09-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578424);浙江省科技计划项目(2017C33242);温州市公益性科技计划项目(S20140010)

通讯作者:谢子令(1978—),男,湖南凤凰人,温州大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:xiezl@wzu.edu.cn

力学性能的影响等.与许多水泥基材料类似^[58],地质 聚合物存在脆性大,韧性差等缺陷,掺入钢纤维^[911]是 解决这一问题的重要途径.然而,关于钢纤维取向和 分布对于地质聚合物力学性能影响的研究鲜有报道.

钢纤维取向对基体的增强效果起到了关键作 用.慕儒等^[12-14]制备了定向分布钢纤维水泥砂浆,研 究表明,与乱向分布钢纤维相比,定向分布钢纤维增 强水泥砂浆的抗折强度、弯曲变形能力等均得到显 著提高.由于全截面钢纤维增强混凝土中的钢纤维 用量大且造价过高,因此国内外学者对部分钢纤维 增强混凝土做了一定研究,结果表明,在构件的受拉 侧加入部分钢纤维是经济有效的^[15-16],并且存在一个 最优的钢纤维层厚度,使得部分钢纤维增强混凝土 的增强、阻裂效果可以近似达到全截面钢纤维增强 梁的效果^[17-20].

鉴于国内外对于部分定向钢纤维增强地质聚合物的研究鲜有报道,本文利用磁场实现钢纤维定向化分布并选取钢纤维层厚度(*h*_t)为变量,制备不同纤维层厚度的定向钢纤维增强地质聚合物复合梁,对 其抗弯性能进行了试验研究与分析.

1 试验

1.1 原材料

砂采用中砂,细度模数2.3.粉煤灰采用温州某火 力发电厂产 II级粉煤灰,其中的SiO2和Al2O3含量 (质量分数,文中涉及的含量、组成等除特别注明外 均为质量分数)分别为56.74%和24.59%.激发剂由 16 mol/L的NaOH溶液与水玻璃溶液按质量比1:3 混合而成,其中水玻璃溶液密度为1.35g/cm³、模数为 3.3,主要成分SiO2、Na2O和水的含量分别为27.9%、 7.9%、64.2%.超细镀铜钢纤维直径为0.2 mm,长度 为20 mm,抗拉强度为2850 MPa,密度为7.8 kg/m³, 掺量(体积分数)为1%.钢纤维增强地质聚合物配合 比见表1.

表1 钢纤维增强地质聚合物配合比 Table 1 Mix proportion of steel fiber reinforced geopoly

	F F		kg/m ²
Fly ash	Sand	Activator	Steel fiber
680	1 690	310	46

1.2 试件制备

制备了1组无纤维地质聚合物的空白对比试件 (R00)、1组全截面杂向纤维增强复合梁对比试件 (R100)、6组定向钢纤维层厚度不同的复合梁试件 (DX,其中D表示定向,X表示钢纤维层厚度).各组三 点弯曲梁试件尺寸均为100 mm×100 mm×400 mm.

采取分层方式制备定向钢纤维增强地质聚合物复 合梁试件,具体制备工艺如下:首先称取一定质量的 砂、粉煤灰和钢纤维,将其倒入搅拌机中,干拌5min;随 后加入一定质量的激发剂,再次搅拌5min;最后,将拌 和物倒入事先已标出不同高度的模具中,并在图1所示 的磁场环境(实现纤维定向)中振动成型1min,待下部 成型的钢纤维增强地质聚合物初凝后(30min左右), 再浇筑上部不掺钢纤维的地质聚合物拌和物.在制备 过程时,为防止下部钢纤维在二次振动成型过程中取 向发生改变,二次振动成型仍在磁场环境中进行.

为得到地质聚合物基体及定向纤维增强地质聚 合物的立方体抗压性能,同时成型了1组无纤维地质 聚合物的空白对比试件(A0)、2组定向纤维增强地质 聚合物立方体抗压试件(ADV、ADP).3组试件尺寸 均为70.7 mm×70.7 mm.

上述所有试件均在 60 ℃条件下养护 24 h 后拆 模,再室温养护7 d 后进行三点弯曲试验和立方体抗 压试验.



图 1 定向钢纤维增强地质聚合物制备装置 Fig. 1 Preparation device of directional steel fiber reinforced geopolymer

1.3 试验设备与方法

三点弯曲试验在深圳市新三思计量技术有限公司产WDW-A型电子万能试验机上进行.最大载荷为50kN,加载跨距为300mm,利用挠度计记录跨中挠度,加载速率为0.1mm/min,每组测试3个试件. 三点弯曲试验加载示意图见图2.

立方体抗压试验在上海华龙测试仪器有限公司 产WAW-600型微机控制电液伺服万能试验机上进 行,最大载荷为600kN,加载速率控制为2mm/min, 每组测试3个试件,抗压强度值取其平均值.对于定 向钢纤维试件,分别进行2种加载方向试验:一种是 加载方向与纤维取向垂直(试件编号为ADV);另一



Fig. 2 Schematic diagram of three point bending experiment(size:mm)

种是加载方向与纤维取向平行(试件编号为ADP).不同钢纤维取向下立方体抗压试验加载示意图见图3.



图 3 不同钢纤维取向下立方体抗压试验加载示意图 Fig. 3 Schematic diagram of cube compression test loading under different steel fiber directions (size:mm)

2 试验结果与分析

2.1 纤维取向

图 4 为 R100 组和 D60 组试件断裂后的截面图. 由图 4 可见: R100 组试件中的钢纤维分布杂乱;而 D60 组试件中的钢纤维分布方向基本一致,且钢纤维 层厚度与试验设计较为吻合,表明试件制备结果良 好,既能让钢纤维达到定向效果,也能得到理想的钢 纤维层厚度;此外分层组试件的裂缝由底部开展,而 不是沿交界面处破坏,证明试件制备方法具有可行性.



(a) R100 (b) D60 图 4 试件断裂后的截面图 Fig. 4 Section after fracture of specimens

2.2 抗压性能

表2为试件7d立方体抗压强度.由表2可见:无 纤维地质聚合物的基体强度为19.36 MPa,而定向钢 纤维增强地质聚合物的抗压强度表现出明显的各向 异性.当钢纤维方向与加载方向垂直时,抗压强度达 到21.96 MPa,较空白组提高了13%;而当钢纤维方 向与受压方向平行时,抗压强度为14.15 MPa,较空 白组降低了27%.

表 2 试件 7 d 立方体抗压强度 Table 2 Cube compressive strength at 7 d of specimens

Specimen No.	Compressive strength/MPa	Increasing rate/%
A0	19.36	0
ADV	21.96	13
ADP	14.15	-27

为进一步探讨定向钢纤维增强地质聚合物抗压 强度出现各向异性的微观机制,对比分析各组试件 的破坏形态,见图5.由图5(a)可知,无纤维地质聚合 物呈现明显的倒锥形破坏,这是由于在受压过程中, 上下端面受到设备压板的摩擦力,从而产生环箍效 应,随着压力的增大,试件中间部位受到摩擦力的影 响最小,从而产生最大的横向位移,导致除上下端面 外的4个侧面向外膨胀.由图5(b)可知,当钢纤维方 向与加载方向垂直时,钢纤维能够抑制基体的横向 变形,因此与钢纤维方向垂直的2个侧面受到约束效 果,基本未发生膨胀,而与钢纤维方向平行的2个无 约束侧面由于环箍效应仍发生膨胀,其抗压强度相 较于无纤维地质聚合物有所提高.由图5(c)可知: (1)当钢纤维方向与加载方向平行时,由于钢纤维抑 制横向变形的作用减弱,钢纤维对4个侧面基本上无 约束作用,导致其破坏形态与无纤维地质聚合物类 似;(2)在钢纤维与基体连接的界面处有更多的细微 裂缝产生,表明钢纤维与基体连接的薄弱界面可能 成为微裂缝产生源,进而导致其抗压强度相较于无 纤维增强地质聚合物有所降低.

2.3 三点弯曲性能

试件的荷载-挠度(*P*-δ)曲线如图6所示.为保 证图幅整洁,每组只分析1条抗折强度最接近平均值 的曲线.由图6可见:在加载初期,试件的荷载随挠度 基本呈线性变化,钢纤维的掺入使其与基体成为一 个整体共同承担拉应力,二者变形协调处于弹性阶 段;在达到峰值荷载之后,无纤维地质聚合物迅速丧 失承载力,*P*-δ曲线迅速下降,呈现明显的脆性破坏; 掺入钢纤维后,由于钢纤维的增强、增韧效果,*P*-δ曲 线下降段变得饱满,表现出良好的韧性,呈延性破



图 5 试件立方体抗压试验破坏形态 Fig. 5 Cube compression failure form of specimens



Fig. 6 Load-deflection curves of specimens

坏;相较于杂向钢纤维,定向钢纤维的掺入使复合梁 承载力得到较大提升,曲线愈发饱满,裂缝扩展缓 慢,延性增加.

由图6还可见,除R00组外,各组试件曲线下降 段均伴随有锯齿形波动现象, 且随着定向钢纤维层 厚度的增加而变得更加明显持久.这是由于钢纤维 发挥了桥连作用,在受弯破坏过程中,钢纤维主要存 在脱黏、拔出、滑移3个阶段,当纤维轴向力增大至纤 维埋入段与基体之间极限黏结承载力时,纤维脱黏 并出现滑拔,从而使荷载出现突降;随着荷载增大, 裂缝不断向上发展,新裂缝间定向纤维的出现阻碍 了裂缝的持续扩展,荷载突降过程终止,桥连纤维停 止滑拔,此时纤维抗滑拔能力由纤维与基体间的静 摩擦主导,纤维的受荷能力增加,从而引起荷载上升. 随着钢纤维层厚度的增加,起到上述桥连作用的钢 纤维数量增多,当裂纹连续张开时,桥连纤维在不断 裂的情况下继续承受并传递应力,锯齿形波动也就 频繁出现,由此可见,定向钢纤维可有效抑制裂纹形 成,控制断裂过程,提供有效的开裂强度.

断裂能(G_F,N/mm)是形成单位面积裂缝所需 要的能量.对于脆性材料,其断裂能可由式(1)给出; 对于纤维增强韧性材料,其断裂面除了基体的主断 裂面外,还有纤维与基体间的黏结破裂面.目前尚无 相对成熟的计算公式,本文仍采用式(1)进行复合梁 断裂能的计算.

$$G_{\rm F} = \frac{W_0 + mg\delta_0}{A_{\rm lig}} \tag{1}$$

式中: W_0 为外荷载做的功,通过计算试件P- δ 曲线下的面积得到,N·mm;m为试件的质量,kg;g为重力加速度,N/kg; δ_0 为试件最终破坏时的挠度,mm,本文将荷载降至峰值荷载的10%时视为试件最终破坏; A_{ig} 为试件的断裂韧带面积,mm².

基于式(1)计算得到试件的断裂能,结果如图7 所示.由图7可见:各试件的断裂能随着定向钢纤维 层厚度的增加而增加;D100组断裂能较R00组和 R100组分别提高了55倍、3倍.由于无纤维增强地质 聚合物呈现明显的脆性破坏,在达到峰值荷载后试 件迅速破坏,消耗的能量也就相对较小;而钢纤维的 掺入使地质聚合物脆性破坏转为延性破坏,在达到 峰值荷载后,由于钢纤维的桥接作用,复合梁不会立 即破坏,此时承载力缓慢下降,裂缝缓慢扩展的过程 中伴随着钢纤维的滑拔,断裂能随之大幅提高.钢纤 维在此过程中存在着摩擦阻力和变形抗力,滑拔所 消耗的能量远远大于基体开裂消耗的能量,由此可 见,在复合梁断裂过程中,对能量消耗起主导作用的 是裂缝处钢纤维的滑拔.钢纤维在拉应力上的定向 分布使其横跨裂缝,上述作用效果愈发明显,纤维得 到充分滑拔,所产生的断裂能也就随之增长.



由图7还可见:随着定向钢纤维层厚度的增加, 试件的断裂能总体上呈上升趋势,但增速呈现先快 后慢的变化趋势,当钢纤维层厚度不大于45mm(即 梁高的0.45)时,试件的断裂能增速较快,当钢纤维层 厚度大于45mm时,试件断裂能的增速减缓.这是由 于当钢纤维层厚度较小时,裂缝快速贯通穿过钢纤 维层,且随着荷载的增加,梁下部裂缝宽度越来越 大,虽然钢纤维层厚度较小,但有充分的时间和空间 用以滑拔,滑拔位移不断增大,断裂能随之快速增 长;当钢纤维层厚度较大时,虽然下部处于裂缝宽度 较大的钢纤维能够充分发挥作用,但上部处于裂缝 宽度较小的钢纤维滑拔消耗的能量十分有限,导致 断裂能增速减缓.

各组试件的峰值荷载和抗折强度平均值如表3所示.由表3可见:复合梁的抗折强度随着定向钢纤维层厚度的增加呈现先增后减的变化趋势,当钢纤维层厚度为60mm(梁高的0.6)时抗折强度达到最大值;相较于无纤维地质聚合物,全截面杂向和定向钢纤维增强地质聚合物的抗折强度分别提高了64%和257%.

在弯曲破坏过程中,裂缝自下而上缓慢发展,拉 应力由裂缝处的钢纤维与未开裂的基体共同承担, 钢纤维的存在不仅降低了应力集中,而且可以桥连 微观裂缝,转移荷载,延缓裂缝的发展,从而提高其 抗折强度.当钢纤维定向分布后,钢纤维方向与拉应 力方向一致,钢纤维的增强、增韧效果得到提高,抗 折强度随之增加.

当定向钢纤维层厚度较小时,钢纤维始终存在 于受拉区中,开裂后裂缝很快扩展贯通纤维层,钢 纤维起到的增强、增韧效果十分有限;当钢纤维层 厚度较大时,虽然受拉区钢纤维充分发挥增强作 用,但受压区也存在钢纤维,且该钢纤维的方向与 压应力方向一致,钢纤维存在于受压区并不能发挥 其优异的抗拉作用,反而可能影响受压区基体孔隙 和密实度,导致内部薄弱区不断增大,抗折强度不 增反减.

表 3 各组试件的峰值荷载和抗折强度 Table 3 Peak load and flexural strength of each specimen

Specimen No.	Peak load/ kN	Flexural strength/ MPa	Increasing rate of flexural strength/%
R00	6.80	3.06	0
R100	11.18	5.03	64
D15	16.54	7.44	143
D30	21.93	9.87	223
D45	26.21	11.80	286
D60	27.54	12.39	305
D75	25.77	11.60	279
D100	24.25	10.91	257

2.4 讨论

为更好地描述定向钢纤维层厚度与地质聚合物 正截面抗弯承载力之间的关系,对比分析部分和全 截面钢纤维增强地质聚合物的正截面承载力.本文 将部分和全截面钢纤维增强计算模型中受压区应力 分布均简化为等效矩形应力,其强度值分别为无纤 维和钢纤维增强地质聚合物的轴心抗压强度,分别 用f_{cm}和f_{cm1}表示.不考虑基体承担的拉力,将受拉区 应力分布也简化为矩形,其强度值为钢纤维增强地 质聚合物抗拉强度,用f_{fm}表示.

图 8 为部分钢纤维增强地质聚合物受弯承载力 计算模型.其中 b 和 h 分别为梁的宽度和高度,ε,和ε。 分别为受拉区、受压区应变,x₀为受压区高度,x 为等 效受压区高度,M₀为正截面受弯承载力.



图8 部分钢纤维增强地质聚合物受弯承载力计算模型

Fig. 8 Calculation model of flexural capacity of partially steel fiber reinforced geopolymer

$$f_{\rm cm}bx = f_{\rm ftb}bh_{\rm f}$$

$$f_{\rm cm}bx = f_{\rm ftb}bh_{\rm f}$$

$$f_{\rm cm}bx = f_{\rm ftb}bh_{\rm f} \left(h - \frac{h_{\rm f}}{h} - \frac{x}{h}\right)$$

$$(3)$$

$$M_{\rm fu} = f_{\rm fib} b h_{\rm f} \left(h - \frac{n_{\rm f}}{2} - \frac{x}{2} \right) \tag{3}$$

将式(4)代入式(3),可得:

 $x = \frac{f_{\rm ftb} h_{\rm f}}{f_{\rm cm}}$

(4)

$$M_{\rm fu} = f_{\rm ftb} b h_{\rm f} h - \frac{1}{2} f_{\rm ftb} b h_{\rm f}^2 - \frac{f_{\rm ftb}^2 b h_{\rm f}^2}{2 f_{\rm cm}} \qquad (5)$$

式(5)给出了部分钢纤维增强地质聚合物正截 面受弯承载力与钢纤维层厚度的关系,对式(5)中的 $h_{\rm f}$ 求导,并令 $\frac{\partial M_{\rm fu}}{\partial h_{\rm f}} = 0$,可得:

$$\frac{\partial M_{\rm fu}}{\partial h_{\rm f}} = f_{\rm ftb}bh - f_{\rm ftb}bh_{\rm f} - \frac{f_{\rm ftb}^2bh_{\rm f}}{f_{\rm cm}} \tag{6}$$

则
$$h_{\rm f} = \frac{h}{1 + \frac{f_{\rm ftb}}{f_{\rm cm}}}$$
 (7)

表明当
$$h_f = \frac{h}{1 + \frac{f_{fib}}{f_{cm}}}$$
时, M_{fu} 存在极值.对式(5)

中的*h*_f进行二次求导,可得:

$$\frac{\partial^2 M_{\rm fu}}{\partial h_{\rm f}^2} = -f_{\rm ftb}b - \frac{f_{\rm fb}^2b}{f_{\rm cm}} < 0 \tag{8}$$

上述推导表明:存在1个界限钢纤维层厚度,使

得部分钢纤维增强地质聚合物的正截面受弯承载力 达到极大值.对式(7)进一步分析可知,该界限钢纤 维层厚度与钢纤维增强地质聚合物抗拉强度和地质 聚合物基体抗压强度的比值有关,表明该界限钢纤 维层厚度并非一个定值.

图 9 为全截面钢纤维增强地质聚合物受弯承载 力计算模型.其中, ε_{s1}和 ε_{c1}分别为受拉区、受压区应 变; x₀₁为实际受压区高度; x₁为等效受压区高度,其 值取实际受压区高度的 0.8; x₁₁为受拉区高度, M_{fu1}为 正截面受弯承载力.

由图9可列出以下基本方程:

$$f_{\rm cm1}bx_1 = f_{\rm ftb}bx_{\rm t1} \tag{10}$$

$$M_{\rm ful} = f_{\rm ftb} b x_{\rm tl} \left(h - \frac{x_{\rm tl}}{2} - \frac{x_{\rm l}}{2} \right) \tag{11}$$

$$x_{\rm tl} = h - 1.25 x_1 \tag{12}$$

将式(12)代入式(10),可得:

$$x_1 = \frac{f_{\rm ftb}h}{f_{\rm cm1} + 1.25f_{\rm ftb}}$$
(13)

再将式(12)、(13)代入式(11),可得:

$$M_{\rm ful} = \frac{4f_{\rm ftb} f_{\rm cm1} b h^2 (3f_{\rm ftb} + 2f_{\rm cm1})}{(5f_{\rm ftb} + 4f_{\rm cm1})^2}$$
(14)

为进一步判定部分钢纤维增强地质聚合物的 正截面受弯承载力的极大值是否为全截面纤维厚 度范围内的最大值,将式(14)与式(9)进行作差对 比,见式(15).



图 9 全截面钢纤维增强地质聚合物受弯承载力计算模型 Fig. 9 Calculation model of flexural capacity of full section steel fiber reinforced geopolymer

$$M_{
m ful} - M_{
m fu} = {f_{
m fb}^2 bh^2 \Big[24 f_{
m ftb} (f_{
m cm1} - f_{
m cm}) - f_{
m fb} f_{
m cm} + 16 f_{
m cm1} (f_{
m cm1} - f_{
m cm}) \Big] \over 2 (f_{
m fb} + f_{
m cm}) (5 f_{
m fb} + 4 f_{
m cm1})^2}$$

(15)

结合表2可知,与压应力方向平行的钢纤维增强地质聚合物抗压强度小于无纤维增强地质聚合物抗压强度小于无纤维增强地质聚合物抗压强度,即 $f_{cm1} < f_{cm}$.同时对式(15)进行分析可知,当 $f_{cm1} - f_{cm} < 0$ 时, $M_{fu1} - M_{fu} < 0$,说明全截面钢纤维增强地质聚合物的受弯承载力小于部分钢纤

维增强地质聚合物的最大受弯承载力,与试验结果吻合.

为了进一步分析理论模型的合理性,对钢纤维 增强地质聚合物承载力计算值与试验值进行量化对 比分析.由式(5)、(14)可知,fm和ftb值是计算钢纤维 增强地质聚合物承载力的关键.鉴于目前对于地质 聚合物材料尚未有成熟的公式可以借鉴,参考GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》和CECS 38: 2004《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》,fm和ftb 按式(16)、(17)进行计算:

$$f_{\rm cm} = 0.88\alpha_{\rm c1}\alpha_{\rm c2} f_{\rm cu} \tag{16}$$

式中: α_{c1} 为混凝土轴心抗压强度平均值与立方体抗 压强度平均值的比值,C50及以下混凝土取为0.76; α_{c2} 为混凝土的折减系数,C40及以下混凝土取为1.0; f_{c2} 为混凝土立方体抗压强度.

$$f_{\rm ftb} = \beta_{\rm tu} \lambda_{\rm f} f_{\rm t} \tag{17}$$

式中: β_{u} 为钢纤维抗拉强度影响系数,可通过试验确 定,当钢纤维混凝土的强度等级为C20~C40时, β_{u} = 1.3; λ_{f} 为钢纤维掺量特征值, $\lambda_{f} = \rho_{f} \frac{l_{f}}{d_{f}} (\rho_{f}$ 为钢纤维 体积分数, l_{f} 为钢纤维长度, d_{f} 为钢纤维直径); f_{f} 为混 凝土抗拉强度($f_{f} = 0.395 f_{cu}^{0.55}$).

需要说明的是,式(17)中 β_u 的参考取值是基于 传统杂向钢纤维试验结果的,对于定向超细镀铜钢 纤维增强地质聚合物材料,该系数的取值还有待深 入研究.故本文以 β_u 为参数,探讨钢纤维增强地质聚 合物材料受弯承载力随 β_u 的变化规律,其计算结果 如图10所示.



图 10 不同 β_{tu}下钢纤维增强地质聚合物材料受弯承载 力随钢纤维层厚度变化曲线

Fig. 10 Bending curves of steel fiber reinforced geopolymer with steel fiber layer thickness under different β_{tu}

由图 10 可见: 当 β_{u} 一定时, 钢纤维增强地质聚合物材料受弯承载力随钢纤维层厚度的增加呈现先增后减的变化趋势; 随着 β_{u} 的增大, 曲线逐渐上移; 当 β_{u} 达到 3 时, 钢纤维增强地质聚合物材料的承载力与试验结果较为吻合, 随着钢纤维层厚度的增加, 二者的偏差逐渐减小, 在钢纤维层厚度达到梁高的 0.45 (45 mm)之后, 曲线几乎重合.

对不同 β_u下承载力最大值对应的钢纤维层厚度 进行统计,发现当 β_u≈3,界限钢纤维层厚度为梁高 的0.68左右时,与试验结果0.6较为吻合.

3 结论

(1)定向钢纤维增强地质聚合物在抗压强度上表现出各向异性,当定向钢纤维方向与加载方向垂直时,抗压强度提高13%;当定向钢纤维方向与加载方向一致时,抗压强度降低27%.

(2)定向钢纤维的掺入显著提高了地质聚合物的断裂能,较空白试件最多提高55倍,且断裂能增速随着钢纤维层厚度的增加呈现先快后慢的变化趋势.

(3)复合梁的抗折强度随着钢纤维层厚度的增加 呈现先增加后降低的趋势,与空白组相比,钢纤维层厚 度为梁高的0.6时抗折强度达到最大值,从3.06 MPa 增加到12.39 MPa.

(4)界限钢纤维层厚度并非定值,它与定向钢纤 维增强地质聚合物抗拉强度及无纤维增强地质聚合 物抗压强度有关.结合定向钢纤维增强地质聚合物 抗压强度的各向异性测试结果,所建立的简化模型 较好地诠释了部分定向钢纤维增强地质聚合物抗折 强度随钢纤维层厚度的变化趋势.以定向钢纤维抗 拉强度影响系数(β_{u})为参数,计算并对比分析了部分 定向钢纤维增强地质聚合物受弯承载力与界限钢纤 维层厚度,表明当 $\beta_{u} \approx 3$ 时,计算结果与试验结果较 为吻合.

参考文献:

- [1] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymers materials
 [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1989, 35

 (2):429-441.
- [2] ZHUANG X Y, CHEN L, KOMARNENI S, et al. Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 125: 253-267.
- [3] ZANNERNI G M, FATTAH K P, AL-TAMIMI A K. Ambient-cured geopolymer concrete with single alkali activator [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2020, 23: e00131.
- [4] 沙建芳,孙伟,张云升.地聚合物-粉煤灰复合材料的制备及 力学性能[J].粉煤灰,2004(2):12-13.
 SHA Jianfang, SUN Wei, ZHANG Yunsheng. Preparation of geopolymer-fly ash compound material and its mechanical performance [J]. Coal Ash, 2004(2):12-13.(in Chinese)
- [5] 汤寄予,高丹盈,朱海堂,等.钢纤维对高强混凝土弯曲性能影响的试验研究[J].建筑材料学报,2010,13(1):85-89.
 TANG Jiyu, GAO Danying, ZHU Haitang, et al. Influence of steel fiber on flexural properties of high strength concrete
 [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1):85-89.(in Chinese)

- [6] 梁兴文,胡翱翔,于婧,等.钢纤维对超高性能混凝土抗弯力 学性能的影响[J].复合材料学报,2018,35(3):722-731.
 LIANG Xingwen, HU Aoxiang, YU Jing, et al. Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 722-731.(in Chinese)
- [7] SOLTANZADEH F, CUNHA V M C F, BARROS J A O. Assessment of different methods for characterization and simulation of post-cracking behavior of self-compacting steel fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 227:116704.
- [8] CHAIKAEWC SUKONTASUKKULP, CHA-ISAKULKIET U, et al. Properties of concrete pedestrian blocks containing crumb rubber from recycle waste tyres reinforced with steel fibres [J]. Case Studies in Construction Materials, 2019, 11: e00304.
- [9] TRAN T T, PHAM T M, HAO H. Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of ambient cured geopolymer concrete beams reinforced with steel fibers [J]. Engineering Structures, 2019, 200:109707.
- [10] DING Y, BAI Y L. Fracture properties and softening curves of steel fiber-reinforced slag-based geopolymer mortar and concrete [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2018, 11(8):1-18.
- [11] 陶鑫,谢子令,郝圣旺,等.钢纤维增强粉煤灰地质聚合物单 轴受压过程的声发射特性[J].复合材料学报,2014,31(6): 1467-1475.

TAO Xin, XIE Ziling, HAO Shengwang, et al. Acoustic emission behavior of steel fiber reinforced fly ash geopolymer under uniaxial compression [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(6):1467-1475.(in Chinese)

- [12] 慕儒,赵全明,田稳苓.单向分布钢纤维增强水泥浆的制备与性能研究[J].河北工业大学学报,2012,41(2):101-104.
 MU Ru, ZHAO Quanming, TIAN Wenling. Investigation on the preparation and properties of aligned steel fiber reinforc cement paste [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2012, 41(2):101-104.(in Chinese)
- [13] 慕儒,李辉,王晓伟,等.单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(Ⅱ):制备及钢纤维增强作用[J].建筑材料学报,2015,18

(3):387-392.

MU Ru, LI Hui, WANG Xiaowei, et al. Aligned steel fiber reinforced cement based composites (II): Preparation and reinforcement of aligned steel fibers [J].Journal of Building Materials, 2015, 18(3):387-392.(in Chinese)

 [14] 田稳苓,马林翔,卿龙邦,等.钢纤维分布形式及试件尺寸对水泥基复合材料弯曲性能的影响[J].混凝土,2016(8): 71-74.

TIAN Wenling, MA Lingxiang, QING Longbang, et al. Influence of steel fiber distribution and specimen size on flexural properties of cement-based composite materials [J]. Concrete, 2016(8):71-74.(in Chinese)

- [15] PADMARAJAIAH S K, RAMASWAMY A. A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement [J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24(2):229-241.
- [16] PADMARAJAIAH S K, RAMASWAMY A. Flexural strength predictions of steel fiber reinforced high-strength concrete in fully/partially prestressed beam specimens [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(4):275-290.
- [17] 关战伟.钢纤维增强部分截面混凝土梁抗弯性能研究[J].工 程建设,2009,41(3):7-10.
 GUAN Zhanwei. Study on flexural performance of partial steel fiber reinforced concrete beams [J]. Engineering Construction, 2009, 41(3):7-10.(in Chinese)
- [18] 孙伟,黄熙.纤维混凝土在路面工程中的应用及其双重复合效应[J].混凝土与水泥制品,1989(6):25-29.
 SUN Wei, HUANG Xi. Application of fiber concrete in pavement engineering and its double composite effect [J]. China Concrete and Cement Products, 1989(6):25-29.(in Chinese)
- [19] ZHU H T, CHENG S Z, GAO D Y, et al. Flexural behavior of partially fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars [J]. Construction and Building Materials, 2018, 161:587-597.
- [20] RAVINDRARAJAH R S, TAM C T. Flexural strength of steel fibre reinforced concrete beams[J]. International Journal of Cement Composites & Lightweight Concrete, 1984, 6(4): 273-278.