

纤维增强聚氨酯水泥复合材料抗弯性能试验研究

李晋¹, 熊大路², 董旭¹, 田庆斌², 刘广波^{3*}

(1. 山东交通学院, 山东 济南 250357; 2. 济南金日公路工程有限公司; 3. 山东省交通科学研究院)

摘要:为改善聚氨酯水泥复合材料的受力性能,采用掺加碳纤维、PVA 纤维与钢纤维的方法来增强复合材料的抗弯性能,通过三点试验测试了不同纤维掺比试件的抗弯强度,并采集了加载中试件梁底的应变变化。由此对比总结了不同纤维掺量下复合材料的抗弯强度变化规律;分析了不同纤维掺量下试块受力变形机理。结果表明:3 种纤维均能够显著提升聚氨酯水泥复合材料的抗弯强度与延性。

关键词:碳纤维; PVA 纤维; 钢纤维; 聚氨酯水泥; 抗弯性能

聚氨酯水泥复合材料具有强度高、密度小、成型快等优点,被广泛应用于桥梁加固或抗震加固工程中。刘贵位等研究了聚氨酯水泥复合材料的配比、流动性、密度与强度之间的关系、并建立了最佳配比下材料的本构模型;孙全胜、刘贵位等探究了聚氨酯水泥复合材料的力学性能并运用该材料对桥梁进行加固,结果显示,该材料可显著提升桥梁抗弯承载能力,改善桥梁横向分布系数,荷载作用下应变、挠度等参数变化明显;杨楠等探究了碳纤维聚氨酯水泥复合材料的压敏特性以及碳纤维掺量、聚灰比、硅灰含量对聚氨酯水泥复合材料力学性能的影响。

聚氨酯水泥复合材料作为桥梁加固层位于梁底板受拉区,会受到“重载车”、“超载车”产生的大幅振动以及重复荷载作用下产生的疲劳应力。因此进一步优化聚氨酯水泥复合材料的抗弯性能是提升桥梁加固效果的有效措施。以上学者只是探究了材料本身的力学性能以及碳纤维对材料抗压、抗折、劈拉等基本力学参数的影响,并未深入研究聚氨酯水泥复合材料抗弯性能的改善措施。

碳纤维强度高,抗老化能力强;PVA 纤维密度小;钢纤维抗拉、抗压强度大。3 种纤维常用来提升聚合物改性砂浆和混凝土的力学性能,通过小梁试验,3 种纤维均能减小梁体挠度,改善抗弯性能。该文探究碳纤维、PVA 纤维、钢纤维对聚氨酯水泥复合材料抗弯性能的改善效果,以及不同纤维掺比对材料抗弯性能

的影响规律。

1 试验部分

1.1 材料及配合比

聚氨酯水泥复合材料由液体 A、液体 B、普通硅酸盐水泥、添加剂组成,其配比如表 1 所示。纤维包括碳纤维、PVA 纤维、钢纤维,其外观见图 1,材料参数见表 2。3 种纤维分别按照聚氨酯水泥复合材料试块的体积比进行掺加,具体掺加比例见表 2。

表 1 聚氨酯水泥复合材料各成分质量比例

组成成分	比例/%	组成成分	比例/%
水泥	33.8	液体 B	33.0
液体 A	33.0	添加剂	0.2



(a) 碳纤维



(b) PVA 纤维



(c) 钢纤维

图 1 纤维示意图

1.2 试块制备及试验方法

聚氨酯水泥试块首先由液体材料 A 与水泥混合

收稿日期:2020-09-04

基金项目:山东省交通运输厅科技计划项目(编号:2017B97);山东省科技厅重点研发计划项目(编号:2019GGX102041)

作者简介:李晋,男,博士,教授。E-mail:sdzblijin@163.com

* 通信作者:刘广波,男,硕士。E-mail:2043152478@qq.com

表 2 聚氨酯水泥试块纤维掺比

纤维	长度/ mm	直径/ μm	弹性模 量/GPa	密度/ (g·cm ⁻³)	纤维掺量(体积掺量)/ %
碳纤维	15	7	260	1.75	0.03、0.04、0.05、0.06、0.07
PVA 纤维	15	8	35	1.29	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5
钢纤维	15	200	200	7.85	0.5、1、1.5、2、2.5

搅拌 5 min,然后加入液体材料 B 与添加剂快速搅拌 2 min,再进行浇筑,等材料凝结硬化后进行脱模,养护 7 d 后进行试验,试块编号见表 3。试模采用 40 cm×40 cm×160 cm 的三联试模,浇筑前在试模壁上粘贴胶带或油纸方便脱模。试验前在养护好的试块中间贴应变片,并涂抹 704 胶做防潮处理。

表 3 各试块编号

编号	纤维	体积掺比/%
A	无	无
B1~B5	碳纤维	0.03、0.04、0.05、0.06、0.07
C1~C5	PVA 纤维	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5
D1~D3	钢纤维	0.5、1.0、1.5、2.0、2.5

注:钢纤维掺量为 2%、2.5%时,由于纤维掺量太大无法进行充分搅拌,试块制备失败,无法进行试验。

通过三点试验测试试块的抗弯强度、梁底极限拉应变与荷载—梁底应变关系,探究纤维对聚氨酯水泥复合材料的改善效果。试件抗弯强度按式(1)计算,加载图示见图 2。

$$\sigma=\frac{1.5PL}{b^3}$$

(1)

式中:σ 为抗弯强度(MPa);P 为施加荷载(N);L 为两支点间距(mm);b 为棱柱体正方形截面边长(mm)。



图 2 三点加载图示

2 结果与分析

通过三点试验测得试块破坏荷载,并采集了相关应变数据,具体试验结果见表 4。

表 4 试验结果

编号	破坏荷 载/kN	抗弯强 度/MPa	极限微 应变/μm	梁底应变
A	16.14	37.83	6 557.0	0.006 557.0
B1	18.98	44.48	9 799.6	0.009 799 6
B2	20.82	48.80	12 964.2	0.012 964 2
B3	20.54	48.14	7 539.5	0.007 539 5
B4	13.61	31.90	6 510.5	0.006 510 5
B5	9.93	23.27	4 961.9	0.004 961 9
C1	16.28	38.16	7 092.1	0.007 092 1
C2	25.46	59.67	12 232.2	0.012 232 2
C3	18.46	43.27	15 279.1	0.015 279 1
C4	12.06	28.27	4 985.7	0.004 985 7
C5	10.16	23.81	6 894.4	0.006 894 4
D1	18.16	42.56	11 388.3	0.011 388 3
D2	21.46	50.30	17 495.3	0.017 495 3
D3	17.05	39.96	11 884.5	0.011 884 5

2.1 抗弯强度及极限应变分析

由表 4 可以看出:

(1) 聚氨酯水泥复合材料的抗弯强度随纤维掺比的增加先增大后减小。试块制备时,纤维随机分布在材料内部,相互之间搭接,与聚氨酯水泥复合材料组成一个网络,随着纤维掺量的增大该网络连接更紧密、整体性更强,需要更大的梁底拉力将纤维在复合材料中拉出或将纤维拉断,但是当纤维掺量过多时,纤维不易分散造成抗弯强度的减弱,因此当碳纤维掺量为 0.04%、PVA 纤维掺量为 0.2%、钢纤维掺量为 1%时,试件强度最好。

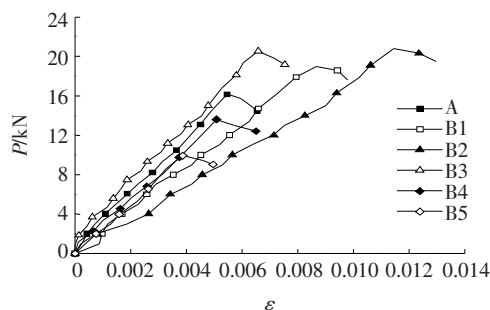
(2) 碳纤维掺比为 0.06%、0.07%时,试块抗弯强度下降了 15.7%、38.5%;PVA 纤维掺比为 0.4%、0.5%时,试块抗弯强度下降了 25.3%、37.1%;钢纤维掺比为 2%、2.5%时,纤维太多无法进行搅拌,因混合不均试块不硬化。搅拌过程中,当碳纤维与 PVA 纤维掺入太多时,纤维容易混杂在一起无法分散,浇筑时可能会存在薄弱区域,首先开裂。因此,当纤维掺量超过极限比例时,会对聚氨酯水泥复合材料抗弯强度

有较大损失。

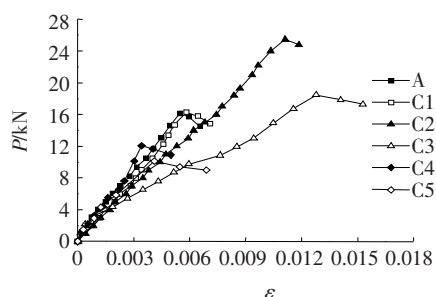
(3) 聚氨酯水泥复合材料试块产生的微应变随纤维掺量的增加先增大后减小。随着纤维掺量的增加试块延性明显提升,在试块破坏时,梁底产生了较大应变,纤维越多韧性越大试块的变形能力就越强。当碳纤维掺比为 0.06%、0.07% 时,试块极限微应变分别降低了 0.7%、24.3%;PVA 纤维掺比为 0.4% 时,试块抗弯强度下降 24.0%。当纤维掺加过量后,纤维在试块内部不能均匀分散,破坏时纤维的增韧效果还未完全发挥,导致试块产生的极限应变减小。因此当碳纤维掺量为 0.04%、PVA 纤维掺量为 0.3%、钢纤维掺量为 1% 时,试块的延性最好。

2.2 荷载—梁底应变曲线分析

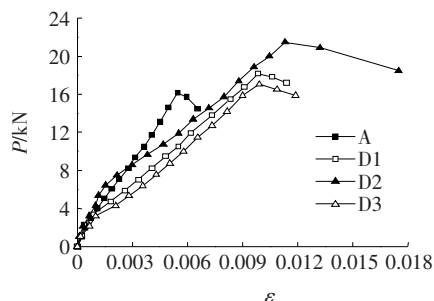
3 种纤维增强聚氨酯水泥复合材料荷载—梁底应变关系见图 3。



(a) 碳纤维



(b) PVA 纤维



(c) 钢纤维

图 3 试块荷载—梁底应变曲线

由图 3 可以看出:

(1) 掺加纤维试件与未掺加纤维试件梁底应变随荷载增加大体上呈线性变化。

(2) 碳纤维掺量为 0.05% 时,试件在加载过程中梁底应变较未掺纤维试件明显减小,承受变形能力始终高于未掺纤维试件;碳纤维掺量为 0.03%、0.04%、0.06%、0.07% 时,试块在加载中抗变形能力较未掺纤维试件减弱,同时掺量为 0.06%、0.07% 时试件的破坏强度与极限应变均小于未掺纤维试件,表明纤维掺加过量后材料抗弯性能明显减弱;纤维掺量为 0.03%、0.04%、0.05% 时,试件抗变形能力先减小再提高。

(3) PVA 纤维试件加载中抗变形能力均小于未掺纤维试件,在荷载施加到 6 kN 之前,各试件梁底应变随荷载增加变化规律相同;掺量为 0.3%、0.5% 的试件在荷载达到 6 kN 后,曲线斜率减小,抗变形能力较其他掺比试件明显减弱;掺量为 0.1%、0.2%、0.4% 的试件在加载过程中曲线的变化规律与未掺纤维试件基本相同,不同荷载下抗变形能力略有减弱;掺量为 0.4%、0.5% 时试块抗弯性能较差,掺量为 0.1% 时试件随荷载增加变形规律与未掺纤维试件基本相同,掺量为 0.3% 时试块应变的发展规律发生了较大改变,相同荷载下试件发生了更大的变形,掺量为 0.2% 时,曲线在 21、24 kN 处斜率变大,说明试件有增强趋势。

(4) 对于钢纤维试件,荷载在 4 kN 前纤维对试块并没有增强作用,图中 4 条曲线基本重合;荷载施加大于 4 kN 时,纤维掺量为 0.5%、1.5% 的曲线斜率变小,随荷载增大呈线性变化,相同荷载下该掺比的试件较未掺纤维试件产生了更大变形,但试件破坏荷载仍大于未掺纤维试件;纤维掺量为 1% 的曲线在荷载达到 4 kN 时斜率增大试件增强,荷载增大到 6 kN 时斜率减小,随荷载增大到 20 kN 呈线性变化,随后梁底产生较大拉伸,试件破坏。

2.3 试件破坏模式及纤维增强机理

3 种纤维中碳纤维与钢纤维模量较大,而 PVA 纤维则模量较小;碳纤维与 PVA 纤维直径较小属于细纤维,钢纤维属于粗纤维。高模量细纤维在基体受力产生微小变形时会抑制变形的发展,改变材料内部的应力分布,使试件应力分布更均匀;低弹模粗纤维会在基体产生较大变形时充分发挥作用,延缓变形的发展。

图 4 为各类纤维试件的典型破坏形态。

由图 4 可以看出:未掺加纤维试件断面平整且裂缝从梁底中间竖直延伸至试件顶面。掺加碳纤维试件首先在梁底中间开裂,随后裂缝沿斜面延伸,该纤维试

件破坏断面没有规则且不平整,断裂面没有纤维拔出,纤维随裂缝开展断裂破坏;PVA 纤维试件与钢纤维试件梁底中间开裂,裂缝竖直向上发展,断裂面不平整,但纤维并未断裂,断裂面存在拔出纤维。由于碳纤维直径小,所以与基体材料的黏结较好,且弹模高,当试件受力变形时碳纤维受拉,随着荷载的提高碳纤维断裂。PVA 纤维弹模小,钢纤维直径大,试件在变形较小时纤维并未充分发挥作用,当变形不断增大,PVA 纤维与钢纤维才发挥作用,这也解释了 PVA 纤维与钢纤维试件梁底应变发展规律无显著变化的原因。当 PVA 纤维与钢纤维拔出时能够消散掉破坏能量,消除尖端应力,并通过纤维与基体的摩擦力获得一个新的应力分布,解释了 PVA 纤维掺量为 0.2% 的试件在加载后期曲线斜率不断变化与钢纤维掺量为 1% 的试件加载后期突变的原因。

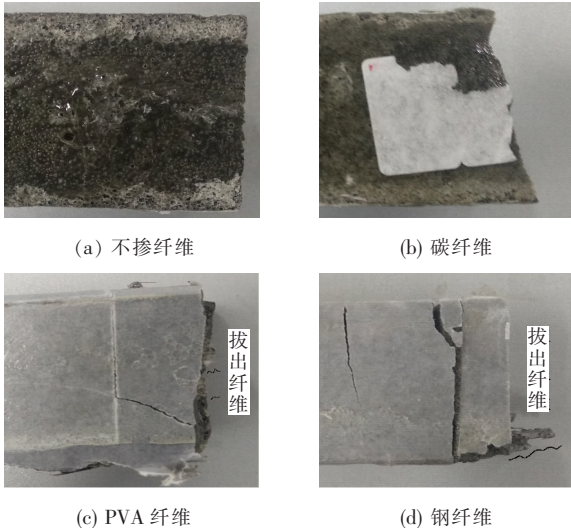


图 4 试块破坏形态

当纤维掺加过多时,不但影响搅拌质量,且纤维的分散性不好,纤维之间容易絮凝为一体,随机分布在试件内部,具有不确定性,成为试件薄弱点。通过以上分析碳纤维掺比最佳范围为 0.04%~0.05%,在此范围内纤维掺量越大试件变形能力越强,掺比越小试件强度越大,此范围内试件强度变化不大;PVA 纤维最佳掺比范围为 0.2%~0.3%,在此范围内纤维掺量越大,变形能力越强,掺量越小强度越大;钢纤维掺比为 1% 时,强度、变形能力都达到最佳。

3 结论

(1) 纤维增强聚氨酯水泥复合材料能够显著提高

材料的抗弯强度与变形能力,通过试验确定了碳纤维、PVA 纤维最佳掺比范围为 0.04%~0.05%、0.2%~0.3%,钢纤维最佳掺比为 1%。

(2) 碳纤维试件为纤维拉断破坏,试件在产生小变形时,碳纤维受拉发挥作用,试件刚度较大;PVA 纤维与钢纤维为纤维拔出破坏,纤维在试件产生较大变形时才充分发挥作用,试件变形能力较强。工程应用中应根据建筑物受力特点选取相应纤维类型及体积掺比。

参考文献:

- [1] Guiwei Liu, Hisanori Otsuka, Atsuo Shimitsu. A Foundational Study on Static and Dynamic Mechanical Characteristics of the Super Lightweight and High Strength Material Using Fly-Ash[J]. Journal of the Society of Materials Science Japan, 2006, 55(8): 738-745.
- [2] Hussain H K, Zhang L Z, Liu G W. An Experimental Study on Strengthening Reinforced Concrete T-Beams Using New Material Poly-Urethane-Cement (PUC)[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 104-117.
- [3] 周永洪. MPC 复合材料快速加固铁路桥梁的基础研究[J]. 公路, 2017(6).
- [4] 谷丹丹, 孙全胜. MPC 复合材料加固空心板梁桥静载试验研究[J]. 世界桥梁, 2015(6).
- [5] 郭建才, 张彦群, 陈炳均, 等. 基于 MPC 复合材料进行钢筋混凝土实心板梁桥加固[J]. 公路, 2017(3).
- [6] 杨楠, 孙全胜, 李春玮. 碳纤维聚氨酯水泥复合材料压敏特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018(17).
- [7] 张可心, 孙全胜. 高韧性聚氨酯水泥复合材料力学性能研究[J]. 新型建筑材料, 2018(1).
- [8] 杨楠, 孙全胜. 碳纤维聚氨酯水泥复合材料力学性能试验研究[J]. 聚氨酯工业, 2019(4).
- [9] 魏慧, 吴涛, 杨雪, 等. 纤维增韧轻骨料混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 工程力学, 2019(7).
- [10] 杨娟, 朋改非, 税国双. 再生钢纤维增韧超高性能混凝土的力学性能[J]. 复合材料学报, 2019(8).
- [11] 郭丽萍, 陈波, 杨亚男. PVA 纤维对混凝土抗裂与增韧效应影响的研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015(6).
- [12] 贾兴文, 司端科, 张新, 等. 碳纤维增强磷酸镁水泥砂浆的力学性能研究[J]. 材料导报, 2016(22).
- [13] 杨才千, 刘飞, 潘勇, 等. 冻融循环作用下聚乙烯醇纤维增强快硬混凝土的力学性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019(2).
- [14] 夏雨, 关博文, 刘开平, 等. 氯氧镁水泥道路混凝土弯曲增韧性能研究[J]. 混凝土, 2017(5).
- [15] DLT 5126-2001 聚合物改性水泥砂浆试验规程[S].
- [16] 何锐, 李永鹏, 陈拴发, 等. 纤维组合对混杂纤维混凝土弯曲性能的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2013(6).