

钢纤维对聚氨酯砂浆力学性能及弯曲韧性的影响

朱 涵^{1,2}, 姜金龙¹, 姜雯丽霞¹, 邵建文¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要 目的 提高聚氨酯砂浆的强度, 改善其脆性断裂特性, 从而得到一种高性能路面快速修补材料。方法 选用两种长径比(30、65)的钢纤维, 分别以不同体积分数掺入到聚氨酯砂浆中, 研究其对砂浆抗压抗折强度的影响规律; 通过三点弯曲加载试验得到荷载挠度曲线, 以峰值变形能、峰后变形能和弯曲韧性指数来评价砂浆的弯曲韧性。结果 钢纤维体积分数在2%以下时, 聚氨酯砂浆抗压抗折强度无明显影响, 体积分数为3%、4%时, 抗压抗折强度显著提高。结论 钢纤维提高了砂浆的变形能力, 砂浆由脆性破坏变为延性破坏, 同时大幅度提升了聚氨酯砂浆的弯曲韧性, 且长径比较大的钢纤维对砂浆的弯曲韧性增强效果更好。

关键词 聚氨酯砂浆; 钢纤维; 长径比; 力学性能; 弯曲韧性

中图分类号 TU528

文献标志码 A

Effect of Steel Fiber on Mechanical Properties and Flexural Toughness of Polyurethane Mortar

ZHU Han^{1,2}, JIANG Jinlong¹, JIANG Wenlixia¹, SHAO Jianwen¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, China, 300350; 2. Coastal Civil Engineering Structure and Safety Key Laboratory of the Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin, China, 300072)

Abstract: In order to increase the strength of polyurethane mortar and improve its brittle fracture characteristics, then obtain a high-performance pavement rapid repair material. Steel fibers with aspect ratio of 30 and 65 were incorporated into the polyurethane mortar by different volume fraction, to investigate the effect on the compressive strength, flexural strength and flexural toughness of mortar. The load deflection curve was obtained by the three-point bending load test, and the flexural toughness of mortar can then be evaluated in terms of the peak deformation energy, post-peak deformation energy and flexural toughness index. The results showed that: The compressive and flexural strength of polyurethane mortar changed little with a steel fiber volume

收稿日期: 2020-07-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51708314)

作者简介: 朱涵(1956—), 男, 教授, 博士, 主要从事建筑材料等方面研究。

fraction of 2% or less, the compressive and flexural strength increased significantly as the steel fiber volume fraction grows to 3%–4%. With the incorporation of steel fiber, the deformability of mortar increased, the failure mode showed obvious ductile fracture rather than brittle failure, and the flexural toughness was improved greatly as well. Furthermore, The mortar showed better flexural toughness with steel fibers of a larger aspect ratio.

Key words: polyurethane mortar; steel fiber; aspect ratio; mechanical properties; flexural toughness

树脂砂浆(Polymer Mortar, PM)是用树脂取代水泥将干燥的骨料和填料胶结在一起的复合材料,因其固化时间短,具备优异的力学性能、粘结性能、防腐蚀性能和抗渗性能等,在道面与桥面的快速修补领域得以推广应用^[1-2]。制备PM常用的树脂主要有环氧树脂、丙烯酸酯、呋喃树脂、不饱和聚酯等,但因造价过高、易燃、环保问题等不同因素,限制了其大规模使用^[3-5]。聚氨酯是高分子树脂的一种,因为性能优越且无毒环保,造价适中,被广泛地应用于抢修堵漏、接嵌缝修复、表面涂料等工程领域^[6-8]。但是以聚氨酯为胶粘剂制备的砂浆强度不高,并且有PM脆性破坏的共性缺陷,限制了它的使用^[9-11]。

已有一些学者围绕PM开展了增强、增韧的相关研究。M. A. G Jurumenna等^[12]研究了纺织纤维对不饱和聚酯砂浆断裂性能的影响,发现纺织纤维的加入减缓了基体内裂缝的开展速度,砂浆的脆性得到改善;J. M. L Reis^[13]将经过表面处理的剑麻纤维加入到环氧树脂砂浆和不饱和树脂砂浆中,发现剑麻纤维的加入显著提高了两种树脂砂浆的断裂性能和韧性,剑麻纤维表面处理后对基体断裂性能的提升不大;赵宏等^[14]研究了磨碎玻璃纤维和轻质碳酸钙对环氧树脂砂浆力学性能的影响,结果表明两者的加入均提高了砂浆的抗压抗折强度,同时抑制了基体裂纹的扩展,增强了砂浆的耗能能力;李冠杰等^[15]研究了硅灰石、伊利石、硅藻土和煤气化渣4种填料对环氧树脂砂浆力学性能的影响,发现加入4种填料后基体裂纹的扩展形式从连续长条状且均匀有序转变为不规则状和阶梯状,实现了砂浆从脆性破坏向韧性破

坏的转变。

微细钢纤维以高模量著称,能有效桥接裂缝,可在较高掺量下大幅度提高基体的力学性能,是一种理想的增强、增韧填料^[16-17]。以往的研究通过外掺柔性纤维或者粉末填料来改善PM力学性能,通过钢纤维增强PM性能的研究则少有报道。此外,已有研究大多围绕环氧树脂砂浆和不饱和聚酯砂浆展开,对聚氨酯砂浆的研究鲜有报道。基于此,为寻求一种高性能、环保且适合大范围使用的快速修补材料,笔者选用两种长度的超短超细钢纤维作为嵌入填料,一种新型的环保聚氨酯作为胶粘材料,研究不同掺量、不同长径比的钢纤维对聚氨酯砂浆强度和弯曲韧性的影响,探析其影响机理。研究表明不同长径比的钢纤维对聚氨酯砂浆基体影响规律不同,但总体上钢纤维的加入大幅增强了聚氨酯砂浆的抗压抗折强度和弯曲韧性,利于材料在路面修补领域的应用。

1 试验

1.1 试验材料

树脂材料选用广州吉必盛科技实业有限公司生产的聚氨酯胶粘剂,分为多元醇组份(A组份)、MDI组份(B组份),各项指标见表1。稀释剂选用聚氨酯环保稀释剂,试验用砂为天然河砂,最大粒径为2.36 mm,表观密度2 650 kg/m³,细度模数2.55。长径比不同的两种钢纤维均为永康钢纤维厂生产,LSF代表长径比较大的钢纤维,SSF代表长径比较小的钢纤维,技术指标见表2。消泡剂采用粤冠有机硅消泡剂。

表 1 聚氨酯参数
Table 1 Parameters of polyurethane

A 组份黏度 /cps	B 组份黏度/cps	可操作时间/min	固化时间/h	剪切强度/MPa
35 000	250	40	3. 5	5. 5

表 2 钢纤维参数
Table 2 Parameters of steel fiber

类型	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	长度/mm	直径/mm	极限拉伸强度 /MPa
LSF	7 810	13	0. 2	2 850
SSF	7 810	6	0. 2	2 850

1.2 配合比

聚氨酯砂浆试件的配合比见表 3。试验中采用质量比配置砂浆,设置胶砂比为 0. 3,质量比 $m(\text{A}):m(\text{B})=5:1$ 。为保证砂浆的工作性能,加入聚氨酯胶粘剂质量分数 5% 的稀释剂,为减少胶粘剂制备过程中产生的气泡对基体密实度的影响,加入消泡剂组份,掺量为聚氨酯胶粘剂质量的 0. 24%。两种钢纤维采用等体积替代砂的方式掺入,根据文献[17],对于长径比 65 的微细钢纤维,在

水泥混凝土中体积分数最高可达 4%,长径比 30 的微细钢纤维,体积分数最高可达 7%。为探究钢纤维长径比和体积分数两个变量对聚氨酯砂浆性能的影响,笔者将两种长径比的钢纤维体积分数均设置为 1%、2%、3%、4%,设置基准组钢纤维体积分数 0%,共 9 个配合比。其中 PM0 为砂浆基准组,PLSF、PSSF 分别表示掺入 LSF、SSF 的试件,数字 1、2、3、4 代表钢纤维体积分数。

表 3 聚氨酯砂浆试件配合比
Table 3 Mix design of polyurethane mortar

试件	ρ (砂)	ρ (钢纤维)	ρ (A 组份)	ρ (B 组份)	ρ (稀释剂)	ρ (消泡剂)
PM0	1 783. 9	0	—	—	—	—
PLSF-1/PSSF-1	1 757. 3	78. 1	446. 0	89. 2	26. 8	1. 3
PLSF-2/PSSF-2	1 730. 9	156. 3	446. 0	89. 2	26. 8	1. 3
PLSF-3/PSSF-3	1 704. 3	234. 2	446. 0	89. 2	26. 8	1. 3
PLSF-4/PSSF-4	1 677. 9	312. 4	446. 0	89. 2	26. 8	1. 3

1.3 试样制备

按配合比称料并制备试样,为使钢纤维均匀分散避免出现结团和分层现象,将钢纤维加入到砂子中干拌 2 min 备用,再将 A、B 组份混合,并加入稀释剂和消泡剂搅拌 2 min 至颜色均匀,静置 5 min 待其充分反应后,加入到钢纤维和砂子的混合料中,搅拌 2 min。待新拌混合物有良好的工作性能后,分层将砂浆装入 40 mm×40 mm×160 mm 的钢模中,插捣压实成型,24 h 后拆模并进行标号,在室温下干燥养护至规定龄期。

1.4 试验方法

1.4.1 抗压抗折试验

依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO)法》(GB/T 17671—1999)^[18],分别测定各配合比试件的 1 d、3 d、7 d 抗压抗折强度。试验共 9 组配合比,每组配合比设置 3 个试件,共 81 个试件,取 10% 误差范围内的数据平均值作为试验值。

1.4.2 弯曲韧性试验

试验参考《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13—2009)^[19],使用济南时代试金公

司生产的 WDW-100E 微电脑控制电子万能试验机对试件加载,加载速度为 0.2 mm/min,跨距 120 mm,通过灵敏度 0.3 mV/mm、量程 30 mm 的位移计来测量试件跨中挠度,采集频率为 1 次/s。当砂浆

强度降低到峰值荷载的 80% 时视为破坏,停止试验。试验共 9 组配合比,每组配合比测试 3 次,取 3 次试验的平均值作为试验值,绘制荷载挠度曲线。试件初始加载形态和破坏形态如图 1 所示。



图 1 三点弯曲试验

Fig. 1 Three point bending test

2 试验结果与分析

2.1 钢纤维聚氨酯砂浆的强度及发展速度

材料的早期强度及强度发展速度对其在路面快速修补工程的应用至关重要。聚氨酯砂浆不同龄期下的抗压抗折强度如图 2、图 3 所示,折线各段斜率代表砂浆强度的发展快慢。

由图 2 可得,LSF 体积分数在 2% 以下时,减缓了砂浆早期(1~3 d)强度的发展速度,对砂浆后期(3~7 d)强度发展无明显影响,LSF 掺量在 3% 以上时,砂浆强度发展速度呈增大趋势。其中对于抗压强度,早期强度发展速度在 LSF 体积分数 3% 时最大,较基准组提升了 21.4%,LSF 体积分数达到 4% 时后期强度发展速度最快,较基准组提升了 100%。对于抗折强度,LSF 体积分数达到 4% 时强度发展最快,早期、后期强度的发展速度较基准组分别提升了 58.3%、146.2%。而由图 3 可以看到,SSF 对砂浆强度发展规律的影响与 LSF 明显不同,当钢纤维体积分数在 1%~4% 变化时,SSF 的加入

对早期强度发展速度无明显影响,但显著提升了后期强度的发展速度。当 SSF 体积分数为 4% 时,砂浆 3d~7 d 的抗压、抗折强度发展速度最快,较砂浆基准组分别提高了 270%、107.7%。

对于早期强度,LSF 体积分数在 4% 时,砂浆的 1 d、3 d 抗压强度较基准组分别提高了 57.8%、31.8%,1 d、3 d 抗折强度较基准组分别提高了 55.8%、56.6%。SSF 在体积分数 1% 时对抗压强度增强效果最好,但 1 d、3 d 抗压强度较基准组也只分别提高了 15.6%、7.6%;其 1 d 抗折强度在 SSF 体积分数 1% 时较基准组只提高了 9.6%,3 d 抗折强度在 SSF 体积分数 3% 达到最高,较基准组仅提高了 3.9%。可以看到,LSF 的加入大幅提升了砂浆 1 d、3 d 抗压抗折强度,使砂浆能满足高等级路面材料的性能要求,同时缩短了修补后路面的开放时间,以保证交通效率。而对于 SSF,掺入后对聚氨酯砂浆早期强度影响很小,表明 SSF 的加入对砂浆在路面快速修补的应用意义不大。

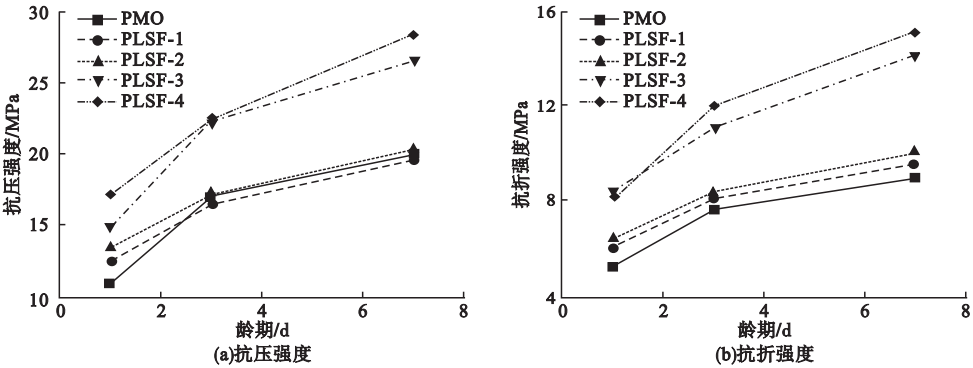


图 2 PLSF 不同龄期下的抗压抗折强度

Fig. 2 Compressive and flexural strength of PLSF at different ages

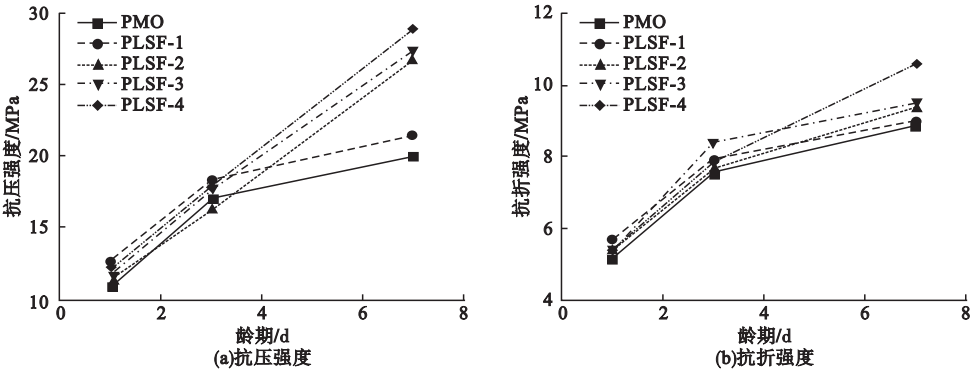


图 3 PSSF 不同龄期下的抗压抗折强度

Fig. 3 Compressive and flexural strength of PSSF at different ages

2.2 钢纤维掺量对砂浆力学性能的影响

图 4 为不同掺量的钢纤维与聚氨酯砂浆力学强度的关系,4 条曲线的拟合优度 R^2 分别为 0.995 6、0.984 7、0.960 4、0.864 5。可以看到,LSF 体积分数在 2% 以下时,PLSF 的抗压抗折强度较基准组均无明显提升,

LSF 体积分数在 3%、4% 时,抗压强度分别提高了 33.0%、42.0%,抗折强度分别提高了 58.4%、69.7%。PSSF 的抗压强度在钢纤维 1%~4% 变化时较基准组分别提高了 7.5%、9.5%、27%、45%,抗折强度分别提高了 1.1%、5.6、6.7%、19.1%。

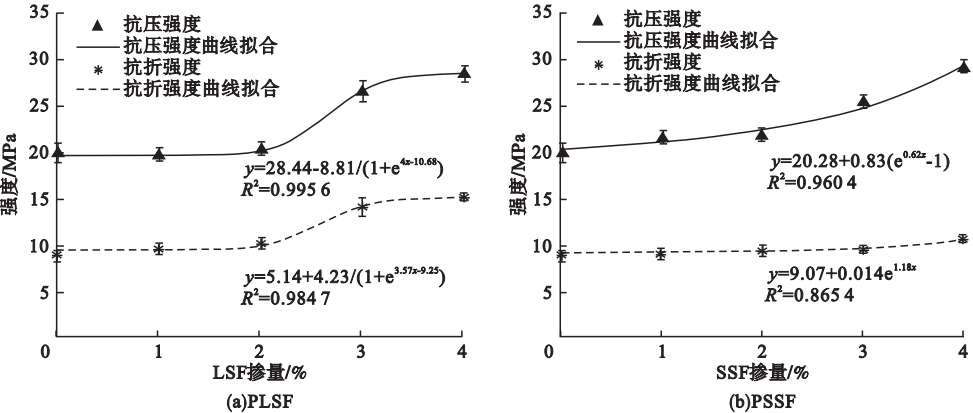


图 4 钢纤维掺量对抗压抗折强度的影响

Fig. 4 Effect of steel fiber content on compressive and flexural strength

PLSF、PSSF 在钢纤维体积分数 2% 以下时强度均无较大提升,在 3% 以上时提高幅度很大,这是因为钢纤维掺量较小时,基体断裂后钢纤维桥接作用不足以承担更大的荷载,基体断裂强度视为砂浆破坏强度。不同的是,PLSF 在体积分数达到 4% 时,曲线变平缓,表明钢纤维体积分数 4% 以上时,砂浆的力学强度增加随钢纤维掺量变化的敏感度下降,这是因为 LSF 掺量过大导致分散困难,结团对基体造成缺陷,影响钢纤维的增强效果;而 PSSF 强度随钢纤维掺量呈指数关系增长,表明 SSF 体积分数大于 4% 时,PSSF

强度提高幅度有进一步增大的趋势,这是因为 SSF 尺寸较小,更好地与骨料相协调,可在更高掺量下大幅增强砂浆的力学性能,这与文献[17]的研究结果一致。

2.3 钢纤维长径比对砂浆力学性能的影响

长径比对钢纤维强度的影响如图 5 所示。从图中可以得出,当钢纤维体积分数在 1%~4% 变化时,SSF 对抗压强度的提高幅度相比于 LSF 分别增大了 9.7%、8.4%、0.8%、2.1%;而对于抗折强度,LSF 相较于 SSF 分别提高了 5.6%、6.4%、48.4%、42.5%。

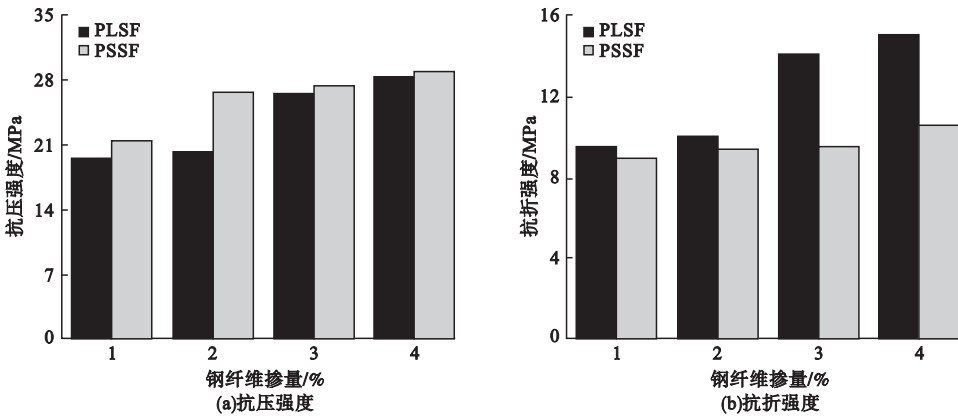


图 5 长径比对砂浆力学性能的影响

Fig. 5 Effect of aspect ratio on mechanical properties of mortar

从图 5 中可以看出,LSF 的加入对 PLSF 抗压抗折强度提高幅度都很大,但是 SSF 的加入主要提高了砂浆的抗压强度,对抗折强度提高幅度不大。观察试件断裂破坏面发现,PLSF 的断裂面钢纤维的长度明显长于 PSSF 断裂面的钢纤维,表示 LSF 在基体内锚固长度较大,拔出耗能能力较强,能很好地桥接裂缝。因此 LSF 对砂浆的抗折强度增强效果优于 SSF,SSF 尺寸较小与骨料相容性好,因而对抗压强度增强效果更好。

2.4 钢纤维对砂浆变形性能的影响

钢纤维砂浆试件的荷载-挠度曲线如图 6 所示。从图中可以看出,试件 PM0 荷载在达到峰值后,曲线由峰值迅速跌落,呈脆性破坏,掺入钢纤维后明显看到曲线峰值荷载非

线性段变长,表示试件裂缝开展后,塑性区变长。荷载达到峰值后,挠度一直增长,在峰值附近出现平台,峰值后荷载的降低趋势也较为平缓,呈延性破坏模式,表示钢纤维的掺入有效改善了聚氨酯砂浆的变形性能。

随着 LSF 掺量的增加,PLSF 挠度相对基准组增长了 1.2~1.6 倍,呈先增大后减小趋势。对于 PSSF,SSF 体积分数在 1%~4% 变化时,挠度相较基准组增长了 1.4~1.9 倍,SSF 体积分数 1% 时最大,随着掺量的增加,挠度提高幅度减小。这是因为钢纤维能有效桥接裂缝,增大了砂浆的变形能力,但钢纤维掺量较高时,砂浆刚度变大,限制了砂浆挠度的发展。

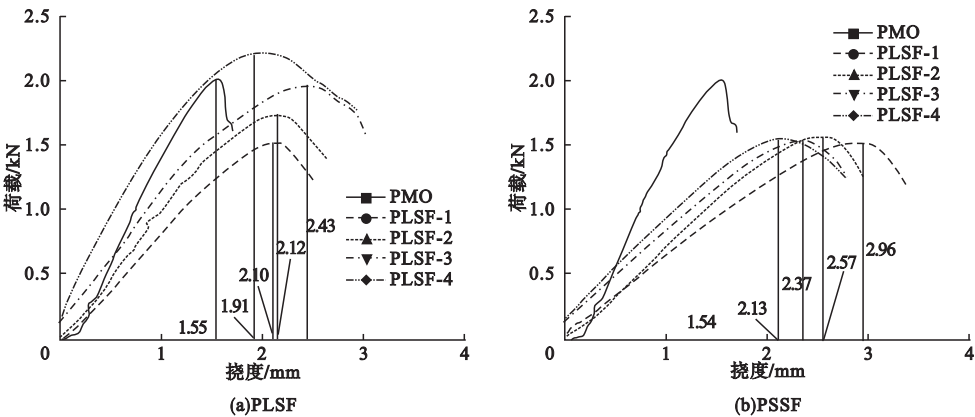


图 6 荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load deflection curves

2.5 钢纤维对砂浆弯曲韧性的影响

2.5.1 弯曲韧性评价方法

目前钢纤维混凝土的评价方法主要有美国材料协会提出的 ASTM—C1018 标准^[20],我国的《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13—2009),日本 JCI SFRC 委员会提出的韧度指数法(JSCE—SF4)^[21]。前两种规范通过找初裂点来确定其他特征点,由于初裂点的位置难以确定,其微小的差异对弯曲韧性的计算结果有很大影响,存在较大误差和随机性^[22-23]。日本的 JSCE—SF4 未考虑试件的尺寸效应,不适用于本试验砂浆的弯曲韧性的计算。

笔者参考文献[24],以峰值变形能 D_p 和峰后变形能 D_k 来评价砂浆的峰值、峰后弯曲韧性,计算方法如图 7 所示。

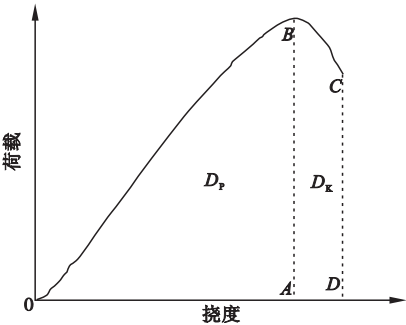


图 7 能量吸收计算示意图

Fig. 7 Calculation of energy absorption

图中 D_p 、 D_k 分别对应 OAB 和 $ABCD$ 的面积,通过对荷载挠度曲线积分,按式(1)计算:

$$D_n = \int_{\delta_1}^{\delta_2} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

式中: D_n 为砂浆的变形能; δ_1 、 δ_2 为计算区间的挠度; $F(\delta)$ 为相应挠度时对应的荷载。采用能量比值法评价砂浆整体的弯曲韧性,根据式(2)计算弯曲韧性指数 R_e :

$$R_e = \frac{(D_p + D_k)}{D_p} \quad (2)$$

2.5.2 弯曲韧性计算结果及分析

弯曲韧性的计算结果见表 4。

表 4 不同配合比下砂浆弯曲韧性计算结果

Table 4 Flexural toughness of specimens with different mixing ratio

试件	$D_p / (kN \cdot mm)$	$D_k / (kN \cdot mm)$	R_e
PM0	6.14	1.14	1.19
PLSF-1	6.82	2.11	1.31
PLSF-2	8.44	3.04	1.36
PLSF-3	12.00	3.93	1.33
PLSF-4	11.00	7.87	1.71
PSSF-1	10.45	2.37	1.23
PSSF-2	9.01	2.23	1.25
PSSF-3	9.06	2.46	1.27
PSSF-4	8.24	3.78	1.46

从表中可以看出,当体积分数在1%~4%变化时,PLSF峰值变形能 D_p 相比于基准组分别增长了11.1%、37.4%、95.5%、79.3%,LSF在体积分数3%时效果最好;PSSF的 D_p 相比于基准组分别提高了70.3%、46.8%、47.5%、34.3%,SSF在体积分数1%时效果最好。

分析原因,钢纤维掺量增大,纤维与基体间形成的界面数量增加,钢纤维拔出耗散的总能量越多,弯曲韧性越大,但由于砂浆在断裂时并不仅仅依靠纤维拔出耗散能量,还有骨料之间的断裂和破坏,当钢纤维掺入量过高时,砂浆的工作性能下降,纤维发生团聚,钢纤维的掺入导致的基体内部缺陷增大导致基体耗能下降,峰值变形能的提高幅度有所降低。

峰后变形能 D_k 随着钢纤维掺量增加而大幅度提高,钢纤维体积分数在1%~4%变化时,PLSF的 D_k 相较于基准组分别提高了85.3%、166.9%、245.0%、591.2%,PSSF分别提高了108.5%、96.3%、113.0%、231.8%。分析原因为试件承载达到峰值后,出现裂缝,PM0因应力集中裂缝急剧扩展,应力陡然下降,无较大耗能能力。而掺入钢纤维后,砂浆出现裂缝后依靠钢纤维的桥接作用承载,此时砂浆的耗能能力主要取决于破坏面钢纤维的数量,破坏面钢纤维数量越多,纤维拔出时耗能越大,相应的峰后变形能也就越大。因此,随着钢纤维掺量的增加,砂浆的峰后韧性大幅度提高,砂浆的脆性断裂特性得到改善。

由表4还可以看到, R_e 随钢纤维掺量的增加而增大,表示钢纤维的掺入有效改善了聚氨酯砂浆整体的弯曲韧性。此外,钢纤维体积分数相同时,PLSF的 R_e 相较于PSSF分别提高6.5%、8.8%、4.7%、17.1%,表明LSF对砂浆弯曲韧性的改善效果优于SSF。

3 结 论

(1)钢纤维体积分数在2%及以下时,

LSF、SSF对聚氨酯砂浆的抗压抗折强度均无明显影响。LSF体积分数在3%及以上时,大幅提升了砂浆的1 d、3 d、7 d强度;SSF对砂浆1 d、3 d抗压抗折强度无明显影响,主要提高砂浆的7 d抗压强度。

(2)LSF、SSF的加入将聚氨酯砂浆的挠度分别提高了1.2~1.6倍、1.4~1.9倍,有效提高了砂浆的变形能力,砂浆破坏模式由脆性破坏变为延性破坏。

(3)钢纤维的加入大幅提高聚氨酯砂浆的弯曲韧性,峰后韧性提高尤为显著,体积分数4%时,PLSF、PSSF峰后断裂能提高幅度最大,试件在破坏后仍有很强的耗能能力和承载能力;PLSF的 R_e 相较于PSSF较大,表明LSF对聚氨酯砂浆的增韧效果相较于SSF更好。

参考文献

- [1] REIS J M L, FERREIRA A J M. Fracture behavior of glass fiber reinforced polymer concrete[J]. Polymer testing, 2003, 22(2): 149-153.
- [2] AVCI A, AKDEMIR A, ARIKAN H. Mixed-mode fracture behavior of glass fiber reinforced polymer concrete[J]. Cement and concrete research, 2005, 35(2): 243-247.
- [3] 王赞,张波,张科强,等.树脂混凝土制备及力学性能研究进展[J].硅酸盐通报,2013,32(10):149-153.
(WANG Yun, ZHANG Bo, ZHANG Keqiang, et al. Research progress on the preparation and mechanical properties of resin concrete[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2013, 32(10): 149-153.)
- [4] AGAVRILOAIE L, OPREA S, BARBUTA M, et al. Characterisation of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matrix[J]. Construction and building materials, 2012, 37: 190-196.
- [5] 钟世云,袁华.聚合物在混凝土中的应用[M].北京:材料科学与工程出版中心,2003.
(ZHONG Shiyun, YUAN Hua. Application of polymer in concrete[M]. Beijing: Publishing Center for Materials Science and Engineering, 2003.)
- [6] LIU X, WANG J, HUANG K, et al. Experimental study on dynamic water grouting of modified water-soluble polyurethane[J]. KSCE journal of civil engineering, 2019, 23(9): 3897-3906.
- [7] SHEN D, SHI S, XU T, et al. Development of shape memory polyurethane based sealant for

- concrete pavement [J]. Construction and building materials, 2018, 174: 474 – 483.
- [8] MEENA M K, TUDU B K, KUMAR A, et al. Development of polyurethane-based superhydrophobic coatings on steel surfaces [J]. Philosophical transactions of the royal society amathematical physical and engineering ences, 2020, 378(2167): 1 – 13.
- [9] GRIFFITHS R, BALL A. An assessment of the properties and degradation behaviour of glass-fiber-reinforced polyester polymer concrete [J]. Composites science and technology, 2000, 60(14): 2747 – 2753.
- [10] REIS J M L, FERREIRA A J M. Assessment of fracture properties of epoxy polymer concrete reinforced with short carbon and glass fibers [J]. Construction and building materials, 2004, 18: 523 – 528.
- [11] HUANG H, PANG H, HUANG J, et al. Synthesis and characterization of ground glass fiber reinforced polyurethane-based polymer concrete as a cementitious runway repair material [J]. Construction and building materials, 2020, 242: 117 – 221.
- [12] JURUMENHA M A G, REIS J M L. Fracture mechanics of polymer mortar made with recycled raw materials [J]. Materials research, 2010, 13(4): 475 – 478.
- [13] REIS J M L. Sisal fiber polymer mortar composites: Introductory fracture mechanics approach [J]. Construction and building materials, 2012, 37: 177 – 180.
- [14] 赵宏, 邓安仲, 陈静波, 等. 填料和稀释剂对环氧树脂砂浆性能的影响研究 [J]. 材料导报, 2015, 29(增刊2): 572 – 577.
(ZHAO Hong, DENG Anzhong, CHEN Jingbo, et al. Influence of fillers and thinner on properties of epoxy mortar [J]. Materials review, 2015, 29(S2): 572 – 577.)
- [15] 李冠杰, 雒锋. 填料形态对环氧树脂道路修补砂浆性能的影响 [J]. 非金属矿, 2019, 42(5): 35 – 38.
(LI Guanjie, LUO Feng. Effect of filler morphology on properties of epoxy resin road repair mortar [J]. Non-metallic mines, 2019, 42(5): 35 – 38.)
- [16] 孙林柱, 路鹏飞, 杨芳, 等. 超短超细钢纤维混凝土弯曲性能研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(7): 63 – 68.
(SUN Linzhu, LU Pengfei, YANG Fang, et al. Investigation on the flexural behavior of extra-short extra-fine steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2016, 38(7): 63 – 68.)
- [17] 石飞. 超短超细钢纤维增强混凝土性能研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
(SHI Fei. Research on the performance of extra-short and extra-fine steel fiber reinforced concrete [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012.)
- [18] 国家质量技术监督局. 水泥胶砂强度检验方法 (ISO) 法: GB/T 17671—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
(The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Cement mortar strength testing method (ISO method): GB/T 17671—1999 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.)
- [19] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS13:2009 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
(China Association for Engineering Constructure Standardization. Test methods used for steel fiber reinforced concrete: CECS13:2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.)
- [20] American Society of Testing Materials. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading): ASTM C 1018 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2006.
- [21] Japan Concrete Institute. Method of test for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete: JSCE—SF4 [S]. Tokyo: Japan Concrete Institute, 1984.
- [22] 卫明山, 李利莎, 郑全平, 等. 钢纤维混凝土韧性指数评价方法对比研究 [J]. 建筑结构, 2007(12): 90 – 92.
(WEI Mingshan, LI Lisha, ZHENG Quanping, et al. Comparative study of evaluate method for toughness factor of steel fiber reinforced concrete (SFRC) [J]. Building structure, 2007(12): 90 – 92.)
- [23] 高丹盈, 赵亮平, 冯虎, 等. 钢纤维混凝土弯曲韧性及其评价方法 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 783 – 789.
(GAO Danying, ZHAO Liangping, FENG Hu, et al. Flexural toughness and it's evaluation method of steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of building materials, 2014, 12(5): 783 – 789.)
- [24] American Concrete Institute Committee 544. 2R-89 Measurement of properties of fiber reinforced concrete [S]. Dtroit: American Concrete Institute, 2002.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)