

纤维对聚氨酯水泥复合材料的增韧作用

崔永曙¹, 李晋^{1*}, 熊大路², 卢忠梅², 张红光²

1. 山东交通学院 交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 济南金日公路工程有限公司, 山东 济南 250022

摘要:为研究纤维对聚氨酯水泥(polyurethane cement, PUC)复合材料的增韧性能及最佳养护龄期,对分别掺加碳纤维、聚乙烯醇纤维(polyvinyl alcohol fiber, PVA)、钢纤维等3种纤维,在不同养护龄期下制备的PUC复合材料进行抗弯强度试验,分析不同纤维在不同养护龄期下对PUC复合材料抗弯强度的提升规律。结果表明:纤维对PUC复合材料增韧性能的提升作用较明显,随掺加纤维体积比的增大,纤维对PUC复合材料的增韧效果呈先增大后减小的趋势,PUC复合材料的抗弯强度随养护龄期的增大而增大,养护龄期为14 d的PUC复合材料的抗弯强度为龄期为28 d材料的95%以上,龄期超过14 d后PUC复合材料的抗弯强度提升缓慢。分别掺加最佳体积比的碳纤维、PVA纤维、钢纤维,养护14 d时,PUC复合材料的抗弯强度较未掺加纤维分别提升了29.1%、54.5%、30.9%,纤维对PUC复合材料有明显的增韧作用。

关键词:纤维;PUC复合材料;增韧;龄期;抗弯强度

中图分类号:U445.7;TU528.58

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)02-0089-06

引用格式:崔永曙,李晋,熊大路,等.纤维对聚氨酯水泥复合材料的增韧作用[J].山东交通学院学报,2023,31(2):89-94.

CUI Yongshu, LI Jin, XIONG Dalu, et al. Toughening properties of polyurethane cement composites by fiber[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(2): 89-94.

0 引言

近年来,因运输量猛增,大量旧桥因结构性问题需进行维修或梁底加固^[1-2]。传统的加固方法有增大截面法^[3-4]、纤维加固法、粘贴钢板法^[5-6]和体外预应力筋加固法^[7-9],这些方法存在施工周期长、增大桥梁自重、钢板腐蚀及对桥梁造成二次伤害等弊端。很多高强度、高韧性的材料,例如密度低、抗弯强度高的聚氨酯水泥(polyurethane cement, PUC)复合材料,开始应用到桥梁加固中,可较大提升桥梁的抗弯能力。

许多学者对PUC复合材料应用到桥梁加固进行研究:Liu等^[10]、王剑琳等^[11]、郭建才等^[12]将聚氨酯复合材料应用到桥梁加固中,提高了桥梁的抗弯承载能力;谷丹丹等^[13]、管泽斌等^[14]采用PUC复合材料对空心板梁进行加固试验,加固后主梁的挠度、刚度提升明显;张继峰等^[15]研究不同密度PUC复合材料的抗弯强度及硬化速度,探讨有利于工程应用的PUC复合材料密度;张可心等^[16]研究不同密度PUC复合材料的力学性能,得到PUC复合材料的密度与抗压、抗弯强度的关系;杨楠等^[17-18]研制碳纤维增韧PUC复合材料,探讨PUC复合材料在桥梁加固中的可行性;李晋等^[19]、刘广波^[20]研究了不同纤维对PUC复合材料抗弯性能的影响,提升了PUC复合材料的抗弯强度及延性。以上研究未涉及不同养护龄

收稿日期:2022-10-17

基金项目:山东省交通运输科技计划项目(2022B04);山东省重点研发计划项目(2019GGX102041)

第一作者简介:崔永曙(1996—),男,山东日照人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail: 2418037943@qq.com。

*通信作者简介:李晋(1976—),男,山东淄博人,教授,工学博士,硕士研究生导师,主要研究方向为道路结构与材料、建筑(工业)固废再生利用、交通基础设施养护材料与技术等,E-mail:sdzblijin@163.com。

期对 PUC 复合材料力学性能的影响。

加固服役的实桥既要增强桥梁的承载力,又要尽可能减少阻断交通的时间。加固实桥时所需养护龄期及加固后的增韧效果均具有重要意义。本文研究 PUC 复合材料的增韧性能,将不同纤维按不同体积比加入 PUC 中,研究不同龄期养护后材料的抗弯强度,以期提高 PUC 复合材料的增韧性能。

1 试验

1.1 试验材料

试验材料包括 PUC 复合材料和碳纤维、聚乙烯醇纤维(polyvinyl alcohol fiber,PVA)、钢纤维等 3 种纤维材料。

PUC 复合材料由异氰酸酯、改性聚醚、消泡剂、水泥、催化剂等组成,其中异氰酸酯纯度为 99%,密度为 1.23 g/cm³;改性聚醚(HYPOP-3628)的羟值(1g 样品中的羟基所相当的氢氧化钾 KOH 的毫克数)为 25~29,含水率不超过 0.08%,25 ℃黏度为 2.2~3.0 Pa·s;消泡剂经由厂家改性处理,可减缓化学反应速率;采用 P.C 42.5 复合硅酸盐水泥;催化剂由厂家配制而成,能有效缩短 PUC 复合材料成型时间。PUC 复合材料中异氰酸酯、改性聚醚、消泡剂、水泥、催化剂的质量比为 27.5:35.0:0.5:36.2:0.8,该配比所成型试块的密度为 1300 kg/m³。

碳纤维、PVA 纤维、钢纤维等 3 种纤维材料参数如表 1 所示。

表 1 3 种纤维材料参数

纤维种类	平均长度/mm	平均直径/ μm	弹性模量/GPa	密度/(g·cm ⁻³)
碳纤维	15	7	260	1.75
PVA 纤维	15	8	35	1.29
钢纤维	15	200	200	7.85

1.2 试块制备及抗弯试验

PUC 复合材料试块制备步骤为:按照 PUC 复合材料配比,采用天平称取异氰酸酯及改性聚醚,分别置于烧杯 A、B 中;称取所需质量的水泥,一半置于烧杯 C,一半置于烧杯 D 中,将烧杯 C 中的水泥倒入烧杯 A,与异氰酸酯混合搅拌 5 min;将烧杯 D 中的水泥倒入烧杯 B,与改性聚醚混合搅拌 5 min;搅拌完成后,将烧杯 A、B 中的材料混合并加入消泡剂、催化剂,并掺加纤维与上述步骤所得混合物体积比(以下简称体积比)不同的纤维搅拌 7 min 后再进行浇筑。材料硬化后脱模,分别养护 1、3、5、7、14、28 d 后进行试验。采用 40 mm×40 mm×160 mm 的三联试模,在试模壁上粘贴油纸以便脱模。在试块上粘贴应变片并做防潮处理。制备 PUC 复合材料过程中材料内易产生气泡,体积略微膨胀,为保证试件抗拉强度达到要求,试件制作环境温度为室温(20±3)℃。

根据文献[21]的要求,对分别掺加碳纤维、PVA 纤维、钢纤维的 PUC 复合材料进行抗弯试验。分别制备 6 组不同养护龄期(1、3、5、7、14、28 d)的 40 mm×40 mm×160 mm 试块;掺加碳纤维的 PUC 复合材料每组制备 6 个试块,掺加碳纤维的体积比分别为 0、0.03%、0.04%、0.05%、0.06%、0.07%;掺加 PVA 纤维的 PUC 复合材料每组制备 5 个试块,掺加 PVA 纤维的体积比分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%;掺加钢纤维的 PUC 复合材料每组制备 3 个试块,掺加钢纤维的体积比分别为 0.5%、1.0%、1.5%。试块在养护后分别开展相关试验。

试块的抗弯强度

$$f_b = 1.5FL/b^3,$$
 (1)

式中: F 为破坏荷载,N; L 为 2 支点间距,mm; b 为棱柱体正方形截面边长,mm。

测试前,在每个试块中央粘贴电阻应变片,连接动态应变采集仪,采集应变数据并绘制应力-应变

曲线。

2 试验结果与分析

2.1 养护龄期对抗弯强度的影响

分别养护1、3、5、7、14、28 d,碳纤维、PVA纤维、钢纤维的体积比不同时,试块的抗弯强度随养护龄期的变化曲线如图1所示。

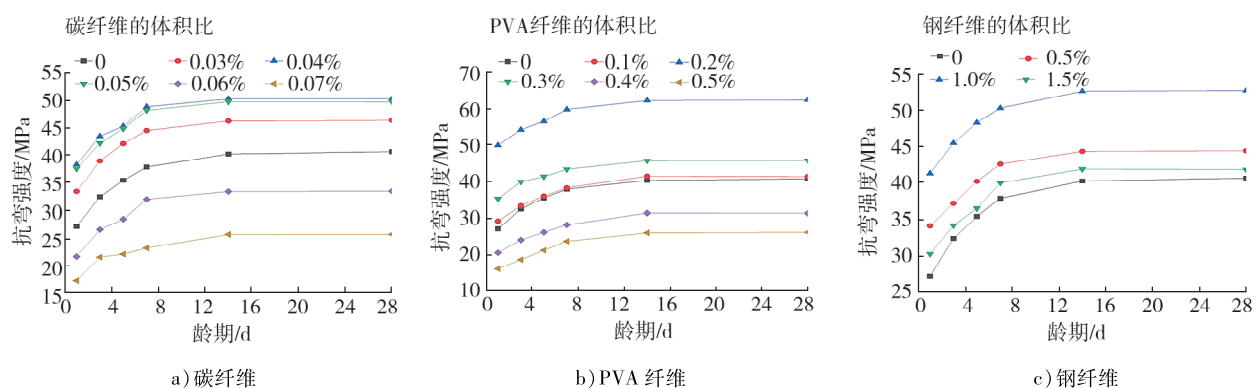


图1 3种纤维的体积比不同时试块的抗弯强度随养护龄期的变化曲线

由图1可知:随养护龄期的增大,掺加3种纤维后试块抗弯强度的变化趋势基本相同。养护龄期小于7 d时,掺加3种纤维后试块的抗弯强度迅速增大;养护14 d后,掺加3种纤维试块的抗弯强度增长趋缓。

由图1a)可知:与养护龄期为1 d的试块相比,养护龄期为14 d时,碳纤维体积比分别为0、0.03%、0.04%、0.05%、0.06%、0.07%时试块的抗折强度分别提高了47.8%、38.8%、31.3%、32.5%、53.7%、48.1%;与养护龄期为14 d的试块相比,养护龄期为28 d时,碳纤维体积比相同的试块的抗折强度增大均小于2.0%。

由图1b)知,与养护龄期为1 d的试块相比,养护龄期为14 d时,PVA纤维的体积比分别为0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%时试块的抗折强度分别提高了47.8%、41.4%、24.7%、29.7%、51.8%、60.7%;与养护龄期为14 d的试块相比,养护龄期为28 d时,PVA纤维体积比相同的试块的抗折强度增大均小于2.0%。

由图1c)知,与养护龄期为1 d的试块相比,养护龄期为14 d时,钢纤维的体积比分别为0、0.5%、1.0%、1.5%时试块的抗折强度分别提升47.8%、29.7%、27.5%、38.3%;与养护龄期为14 d的试块相比,养护龄期为28 d,钢纤维体积比相同时,试块的抗折强度增大均小于2.0%。

因此,与养护龄期为1 d的试块相比,养护龄期为14 d的PUC复合材料的抗折强度明显增大,延长养护龄期能有效提升PUC复合材料的抗折强度;养护龄期为14~28 d时,掺加纤维后试块的抗折强度增大缓慢,考虑到经济成本且尽可能减轻交通压力,选择施工养护龄期为14 d。

在养护龄期为14~28 d时,未掺加纤维的试块的抗折强度达到最终抗折强度的97%,掺加纤维的试块的抗折强度达到最终抗折强度的99%,掺加纤维可缩短PUC复合材料到达最终抗折强度的时间。

异氰酸酯指数 R 表示聚氨酯配方中异氰酸酯过量的程度。当 R 固定时,试块的力学性能主要受异氰酸酯与改性聚醚发生化学反应的影响^[22]:随养护龄期的增加,试块中的异氰酸酯与改性聚醚逐渐发生反应,反应后的产物显著增大试块的抗弯强度,聚氨酯材料需硬化、熟化后才能进一步提升试块的力学性能。 $R=1$ 时,养护14 d后熟化完成^[23],试块的抗弯强度达到养护28 d的97%以上。

2.2 纤维的体积分数对抗弯强度的影响

分别养护1、3、5、7、14、28 d,碳纤维、PVA纤维、钢纤维的体积比不同时,试块的抗弯强度随纤维体积

比的变化曲线如图 2 所示。

由图 2 可知:不同养护龄期下,试块的抗弯强度随 3 种纤维体积比的增大均先增大后减小;养护龄期为 14、28 d 时,试块的抗弯强度较大。养护龄期为 14 d,碳纤维的体积比分别为 0.03%、0.04%、0.05% 时,试块的抗弯强度比未掺加碳纤维分别增大 14.9%、24.9%、23.7%;PVA 纤维的体积比分别为 0.1%、0.2%、0.3% 时,试块的抗弯强度比未掺加 PVA 纤维分别增大 2.9%、54.5%、13.5%;钢纤维的体积比分别为 0.5%、1.0%、1.5% 时,试块的抗弯强度比未掺加钢纤维分别增大 10.2%、30.9%、1.6%。

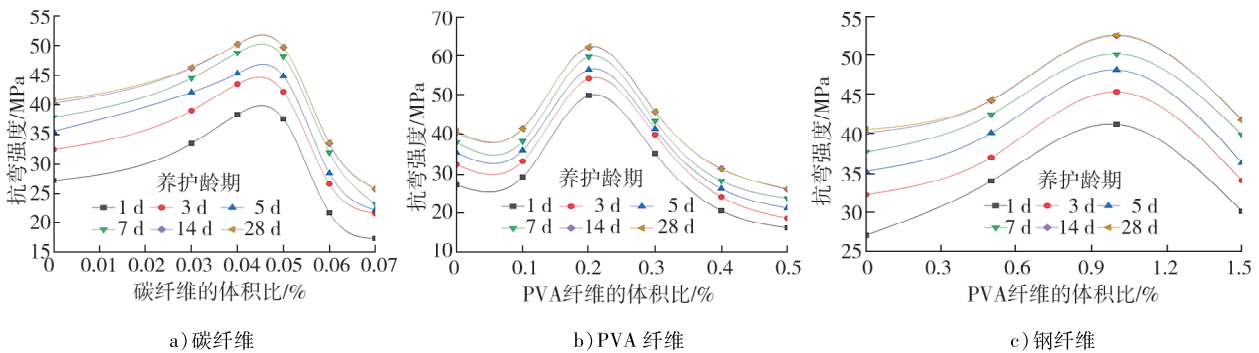


图 2 不同养护龄期下试块抗弯强度随掺加纤维体积比的变化曲线

碳纤维、PVA 纤维的体积比分别大于 0.05%、0.2% 时,试块的抗弯强度明显下降。若纤维的体积比在一定范围内,纤维在试块中分布均匀,与 PUC 复合材料间的连接性较好且形成空间网格状结构,需较大拉力才能拉断试件;但纤维的体积比超过一定范围时,纤维分散性变差,易发生聚集,在纤维聚集处试块更易遭到破坏,抗弯强度减小。由试块制备及测试情况可知:纤维的体积比超过一定量时,搅拌复合材料时纤维易成团,试块可能存在薄弱区域,进行抗弯强度测试时在薄弱区域易开裂。

2.3 应力-应变曲线

将 PUC 复合材料用于改善桥梁的承载能力,提高桥梁的结构稳定性,需满足养护龄期要求,即各项力学指标稳定后再应用到工程中。对养护 14 d 的试块采集应变数据,绘制应力-应变曲线,如图 3 所示。

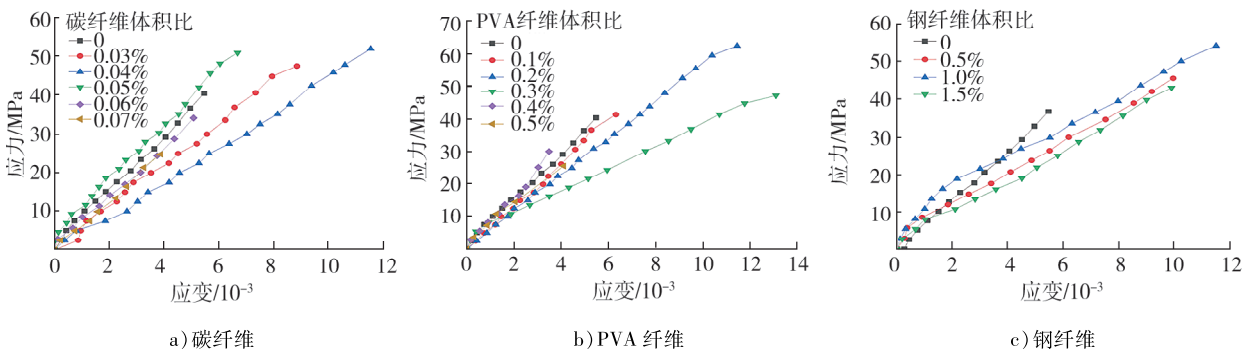


图 3 纤维的体积比不同时材料的应力-应变曲线

由图 3a) 可知:试块的应变及应力随碳纤维体积比的增大而先增大后减小,碳纤维的体积比为 0.03%~0.05% 时,试块的最大应力及应变大于未掺加碳纤维的试块,碳纤维对材料有增强增韧的作用。碳纤维的体积比为 0.04% 时,试块的抗弯强度为 51.9 MPa,比未掺加碳纤维的试块增大 29.1%。

由图 3b) 可知:PVA 纤维的体积比小于 0.3% 时,试块的应力及应变都大于未掺加纤维的试块;PVA 纤维的体积比超过 0.3% 时,试块的最大应力和最大应变都小于未掺加纤维的试块,可见掺加过多 PVA 纤维对试块的抗弯强度及韧性有抑制作用,不利于材料的增强增韧。PVA 纤维的弹性模量较小,抑制试块变形的能力较弱,因此掺加 PVA 纤维试块的应力-应变斜率小于未掺加纤维的试块,PVA 纤维的体积比为 0.2% 时,试块的抗弯强度最大,最大抗弯强度为 62.51 MPa,比未掺加 PVA 纤维的试块增

大 55.5%。

由图 3c)可知:钢纤维的体积比为 1.0%时,试块的应力、应变最大,钢纤维的最佳体积比为 1.0%,试块的抗弯强度为 52.7 MPa,比未掺加钢纤维的试块增大 31.1%。

2.4 不同纤维材料断面分析

未掺加纤维及掺加 3 种纤维的试块断面如图 4 所示(图左侧为试块顶部,右侧为试块底部)。

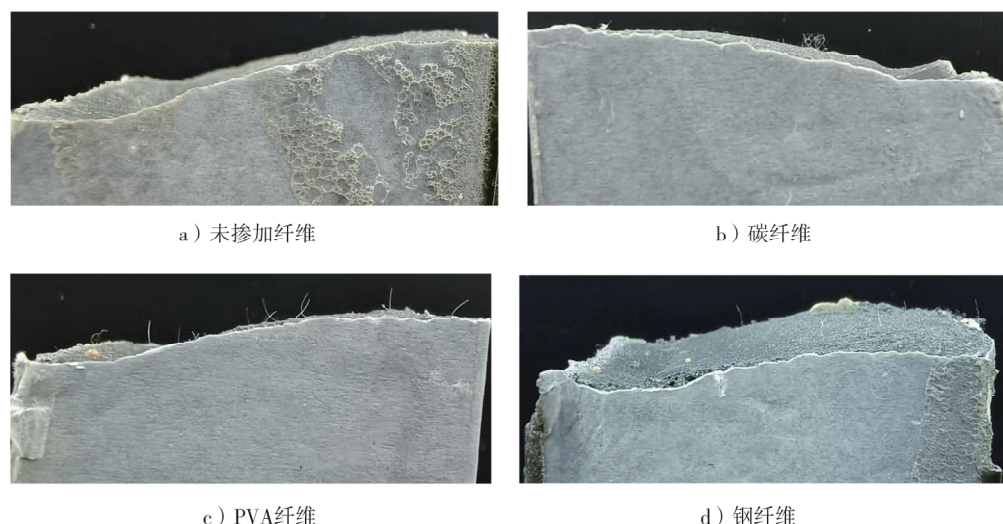


图 4 试块断面图

图 4b)c)试块顶部及底部纤维分布均匀,图 4d)试块顶部基本无纤维,试块底部钢纤维分布密集。放大图 4b)可看到断裂表面微小绒毛状物体为断裂纤维,掺加碳纤维试块的断裂方式为纤维断裂;图 4c)d)试块断裂表面纤维较长,为拔出纤维,掺加 PVA 纤维、钢纤维试块的断裂方式为拔出断裂。原因是碳纤维、PVA 纤维的密度与 PUC 复合材料相差不大,与 PUC 复合材料混合未出现分层现象;钢纤维密度远大于 PUC 复合材料,试块断面出现分层现象。碳纤维的抗弯强度高,与 PUC 复合材料的黏结性较好,断裂方式为纤维断裂,有利于发挥碳纤维的高强度优势;PVA 纤维与 PUC 复合材料黏结性较差,断裂方式为拔出断裂;钢纤维的抗弯强度大于 PUC 复合材料,钢纤维直径较大,与 PUC 复合材料的黏结性较差,因此试块断裂时钢纤维拔出。

3 结论

1) 聚氨酯水泥复合材料的抗弯强度随养护龄期的增大而增大,在养护龄期从 1 d 增至 14 d 时抗弯强度增大明显,养护龄期在 14 ~28 d 时,聚氨酯水泥复合材料的抗弯强度增幅减小;养护龄期为 14 d 时,掺加纤维后的聚氨酯水泥复合材料的抗弯强度超过养护 28 d 的 99%。为减少阻断交通时间,实桥可在养护 14 d 后通车。

2) 随碳纤维、PVA 纤维、钢纤维体积比的增大,聚氨酯水泥复合材料的抗弯强度先增大后减小,碳纤维、PVA 纤维、钢纤维的最佳体积比分别为 0.04%~0.05%、0.2%、1.0%,相应试块的抗弯强度分别为 51.90、62.51、52.70 MPa,掺加 PVA 纤维试块的抗弯强度最大。

参考文献:

- [1] 杨国立,李瑞鸽.某旧拱桥病害分析及加固设计与施工[J].混凝土与水泥制品,2013(9):71-74.
YANG Guoli, LI Ruige. Diseases analysis on an old arch bridge and reinforcement design and construction[J]. China Concrete and Cement Products, 2013(9):71-74.
- [2] 邵志元.浅谈现代桥梁加固技术[J].施工技术,2016,45(增刊2):295-299.

- SHAO Zhiyuan. Reinforcement technique of modern bridge[J]. Construction Technology, 2016,45(Suppl. 2):295-299.
- [3] 李嘉,李有志,江建. 增大截面结合预应力加固矩形梁模型对比试验研究[J]. 中外公路,2021,41(6):134-136.
- LI Jia, LI Youzhi, JIANG Jian. Comparative experimental study on bridge reinforcement by enlarging section-prestress method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021,41(6):134-136.
- [4] 陈致淳,单韧,方志. 基于抗裂性的预应力混凝土梁加固材料力学性能需求研究[J]. 中外公路,2018,38(4):311-315.
- CHEN Zhichun, SHAN Ren, FANG Zhi. Research on mechanical property requirements of reinforcement material for PSC beams based on cracking resistance[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018,38(4):311-315.
- [5] 丁鹏程. 粘贴钢板法在桥梁加固工程中的应用[J]. 科技与创新,2018(19):141-142.
- [6] 杨光培. 钢板加固技术在土木工程中的运用[J]. 工业建筑,2022,52(2):251.
- [7] 蔡惠菊,周建民. 体外预应力加固低强度混凝土简支梁试验研究[J]. 建筑结构,2018,48(6):31-34.
- CAI Huiju, ZHOU Jianmin. Experimental study on low strength concrete simply supported beam reinforced by external prestressing[J]. Building Structure, 2018,48(6):31-34.
- [8] 季广军. 碳纤维结合体外预应力筋加固空心板梁的试验研究[J]. 交通标准化,2012(4):144-147.
- JI Guangjun. Experimental study on reinforced hollow beam with carbon fiber reinforced polymer and external prestressed strand[J]. Transport Research, 2012(4):144-147.
- [9] 王荣霞,金克喜,王玲. 体外预应力筋加固不同初始状态箱梁受力性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(增刊2):224-229.
- WANG Rongxia, JIN Kexi, WANG Ling. Experimental analysis on mechanical property of externally prestressed box beams based on different original status[J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(Suppl. 2):224-229.
- [10] LIU Guiwei, OTSUKA H, MIZUTA Y, et al. 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.
- [11] 王剑琳,刘贵位,叶李水. 利用 MPC 复合材料进行空心板梁桥加固的应用技术研究[J]. 公路,2013(8):39-43.
- [12] 郭建才,刘贵位,高峰,等. 钢筋混凝土空心板梁桥加固前后的破坏性荷载试验研究[J]. 公路,2017,62(4):152-157.
- [13] 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,2015,43(6):88-92.
- GU Dandan, SUN Quansheng. Study of static tests for using MPC composite material to strengthen void plate girder bridge[J]. World Bridges, 2015,43(6):88-92.
- [14] 管泽斌,李晋,吴鹏,等. 钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固损伤空心板梁试验研究[J]. 山东交通学院学报,2022,30(1):52-58.
- GUAN Zebin, LI Jin, WU Peng, et al. Experimental study on damaged hollow slab beams reinforced by steel wire rope polyurethane cement composite[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022,30(1):52-58.
- [15] 张继峰,庄柏舟,张可心. 聚氨酯水泥复合材料力学性能试验研究[J]. 低温建筑技术,2016,38(7):10-12.
- ZHANG Jifeng, ZHUANG Bozhou, ZHANG Kexin. Experimental study to investigate mechanical properties of polyurethane-cement composite[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2016,38(7):10-12.
- [16] 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,2018,45(1):126-128.
- ZHANG Kexin, SUN Quansheng. Research on mechanical properties of the high-toughness polyurethane-cement composite (PUC) materials[J]. New Building Materials, 2018,45(1):126-128.
- [17] 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,2018,18(17):27-32.
- YANG Nan, SUN Quansheng, LI Chunwei. Experimental study on pressure sensitive characteristics of carbon fiber reinforced polyurethane cement composites[J]. Science Technology and Engineering, 2018,18(17):27-32.
- [18] 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,2019,34(4):35-38.
- YANG Nan, SUN Quansheng. Experimental study on mechanical properties of carbon fiber polyurethane cement[J]. Polyurethane Industry, 2019,34(4):35-38.
- [19] 李晋,熊大路,董旭,等. 纤维增强聚氨酯水泥复合材料抗弯性能试验研究[J]. 中外公路,2021,41(1):249-252.
- LI Jin, XIONG Dalu, DONG Xu, et al. Experimental study on flexural properties of fiber reinforced polyurethane cement composites[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021,41(1):249-252.