

钢丝绳聚氨酯水泥复合材料 加固损伤空心板梁试验研究

管泽斌¹,李晋¹,吴鹏²,常德²,董旭^{1*}

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 250101

摘要:为研究钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固损伤空心板梁的力学性能,进行加固条件下损伤空心板梁抗弯性能模型试验,分析板梁挠度、裂缝宽度和承载能力变化规律,研究复合材料加固损伤空心板梁的破坏机理。试验结果表明:采用钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固经过预压的损伤空心板梁,其破坏过程分为钢丝绳断裂、复合材料开裂和整体结构受弯破坏3个阶段,属于适筋梁破坏;此板梁的实测屈服荷载和极限承载力比未加固空心板梁分别提高28.60%、40.00%,相同荷载作用下的挠度降低22.81%,最大裂缝的宽度减小52.73%,梁体延性提高57.14%,梁体的屈服阶段延长,空心板梁的安全性提高。采用钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固损伤空心板梁可显著改善梁体的整体承载性能,提高安全性。

关键词:聚氨酯水泥复合材料;损伤空心板梁;钢丝绳;加固;抗弯承载力

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1672-0032(2022)01-0052-07

引用格式: 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.

0 引言

我国交通事业发展迅速,现有很多旧空心板梁桥在长久使用后出现承载力、耐久性不足等问题^[1],其维修加固问题亟待解决。聚氨酯水泥凝结时间短,自重小,不易腐蚀^[2],可高效、快速地维修加固桥梁^[3],在世界范围内得到广泛应用,并受到学者重视^[4-8]。褚云朋等^[9]进行预应力碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)布加固损伤混凝土空心板抗弯试验,发现空心板极限承载力随CFRP布的粘贴方式、粘贴量不同而有不同程度的提高。王立军等^[10]进行碳纤维布-聚合物砂浆复合加固预应力空心板的力学性能试验,加固后空心板的承载能力、刚度及延性得到显著提升。张鹏飞等^[11]采用复合砂浆预应力钢丝绳加固实桥,可降低主梁挠度与应变,有效提高梁体抗弯承载力和刚度。王希瑞^[12]采用聚合物砂浆预应力钢丝绳加固普通钢筋混凝土旧桥,加固后桥体的抗弯承载能力、强度、刚度及结构的横向整体性明显提高。张利勇等^[13]进行聚氨酯水泥复合材料的力学性能试验,材料质量轻,强度高,韧性高。谷丹丹等^[14]研究聚氨酯水泥复合材料加固空心板梁,张宏祥等^[15]研究聚氨酯水泥复合材料加固简支T梁,加固后梁桥的刚度及承载性能均取得理想效果。Zhang等^[16]将钢丝网加入聚氨酯水泥复合材料加固T

收稿日期:2021-07-17

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019GGX102041);山东省交通运输科技计划项目(2017B97)

第一作者简介:管泽斌(1996—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:2237003167@qq.com。

*通信作者简介:董旭(1983—),男,济南人,讲师,工学博士,主要研究方向为桥梁隧道施工风险评价与安全管理,E-mail:149013293@qq.com。

型梁,梁体的安全性与适用性得到明显提升。

对聚氨酯水泥复合材料的研究主要集中在材料性能方面,相关研究表明仅采用聚氨酯水泥复合材料维修加固桥梁仍存在材料韧性低等问题^[17-19],而钢丝绳聚氨酯水泥复合材料轻质高强,施工简易,不影响交通,比传统的空心板梁加固方式更具优势^[20-22]。钢丝绳质量轻,加固后桥梁总质量增加较少,在使用和搭配材料上更加灵活。在受损空心板梁梁底位置张拉钢丝绳可在梁体受弯时减少试件加固层的拉力,改善聚氨酯水泥材料的受力状态。聚氨酯水泥材料形成加固层,将钢丝绳包裹其中,避免钢丝绳受到外界影响而发生破坏,充分发挥钢丝绳的强度,并提高钢丝绳的耐久性,显著提高梁体的加固效果。采用钢丝绳聚氨酯水泥复合材料比传统的增大截面法、粘贴钢板法缩短了施工周期,施工方法更灵活,复合材料抗腐蚀性强,具有明显优势;与体外预应力钢绞线法、钢丝网复合砂浆法粘贴纤维材料法相比,采用钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固梁体在钢丝绳张拉、锚固方面施工简便灵活,受环境影响较小,聚氨酯水泥复合材料与混凝土材料、钢丝绳间粘结牢固,不易开裂、剥落,加固效果较好且保障了耐久性^[23-25]。

基于室内空心板梁模型,本文采用钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固受损空心板梁,与未加固空心板梁进行力学性能试验对比,比较两者的加固效果,并分析受损空心板梁加固后的梁体破坏机理。

1 力学试验

1.1 模型梁制作

1.1.1 空心板梁制备

为研究钢丝绳聚氨酯水泥复合材料对损伤空心板梁桥的加固效果,对比未加固非预应力钢筋混凝土空心板梁与加固后的非预应力钢筋混凝土损伤空心板梁的抗弯试验结果,验证复合材料对非预应力钢筋混凝土损伤空心板梁的加固效果。

采用 C50 混凝土制备 2 块非预应力混凝土空心板梁,梁体为 3.0 m×0.5 m×0.4 m,板梁截面中心为直径 25 cm 的圆柱形空心部分。在空心板梁梁底布置 4 根直径为 16 mm 的受拉钢筋,钢筋的抗拉强度为 330 MPa,弹性模量为 2.0 GPa;每隔 15 cm 布置 1 道直径为 12 mm 的箍筋,箍筋的抗拉、抗压强度均为 280 MPa,弹性模量为 2.0 GPa。根据空心板梁制作木质梁体模板,将梁底受拉钢筋与箍筋绑扎牢固,将长 3 m、直径 25 cm 的 PVC 管布置在钢筋笼中心位置并密封两端,混凝土浇筑后形成空心板梁的中空部分。钢筋及模板布置完成后,浇筑混凝土并在浇筑完成 24 h 后拆除模板,养护 28 d 后完成空心板梁的制备。其中 1 块作为试验梁 B₁。

1.1.2 钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固损伤空心板梁

另 1 块空心板梁在梁体跨中进行预压,预压压力加载至试验梁设计承载能力的 80%,梁体跨中位置及跨中两侧的梁底位置产生多条裂缝,再进行梁底钢丝绳张拉。根据文献[26]中钢丝绳伸长率的公式计算得到钢丝绳长 2 993.4 mm,在钢丝绳两端预留 15 cm 的锚固长度,采用公称抗拉强度为 1960 MPa、直径为 4.0 mm 的 6×7+IWS 的镀锌钢丝绳,在钢丝绳两端设置铝套并由液压机将铝套和钢丝绳压牢,对空心板梁梁底进行凿毛处理后,采用螺栓和开槽角钢将 7 根钢丝绳(张拉控制应力为 300 MPa)均匀布置并固定在空心板梁梁底位置(复合材料厚 3 cm),采用手持张拉设备将钢丝绳张拉至预定位置。

钢丝绳张拉完成后,围绕空心板梁粘贴浇筑模板,并进行聚氨酯水泥浇筑。按照聚氨酯 A 料、聚氨酯 B 料、水泥、外加剂的质量比为 33.0:33.0:33.8:0.2 称取制备聚氨酯水泥的各材料,外加剂可抑制聚氨酯 A 料和聚氨酯 B 料混合后产生发泡现象。先将聚氨酯 A 料与水泥、外加剂混合后充分搅拌 10~15 min,再添加聚氨酯水泥 B 料继续搅拌 3~5 min;将充分混合的材料浇筑在已张拉钢丝绳的空心板梁底面,聚氨酯水泥材料与试验梁底面、钢丝绳充分接触,在空心板梁底面逐渐硬化直至形成粘接牢固的加固层,拆除模板,在常温下养护 28 d 完成制备,制备的空心板梁作为试验梁 B₂,可进行下一步试验。在搅拌和浇筑过程中聚氨酯水泥材料产生热量,应选择温度波动小的时间段进行浇筑。

损伤空心板梁加固布置方式及截面如图 1 所示。

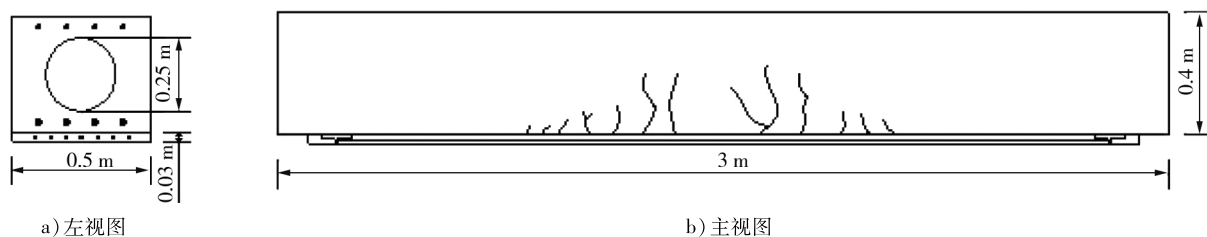


图1 损伤空心板梁示意图

1.2 测点布置与加载方案

采用位移计在空心板梁梁底的跨中位置处测量位移;试验梁所受荷载由位于跨中位置的2个分配梁传递至梁体,分配梁间距为30 cm,通过布置在千斤顶与反力架间的压力传感器测试加载过程中的压力。先将压力加载至5 kN 再开始试验,并开始采集试验梁梁体位移的初始数据,在每级加载10 kN 和接近试验梁极限荷载时测量梁体的位移,采集每次加载后试验梁梁底跨中位置产生的位移,直至试验梁破坏。加载过程中记录梁体裂缝出现时的荷载及每片试验梁的极限荷载。

2 试验结果分析

2.1 试验现象及裂缝分布

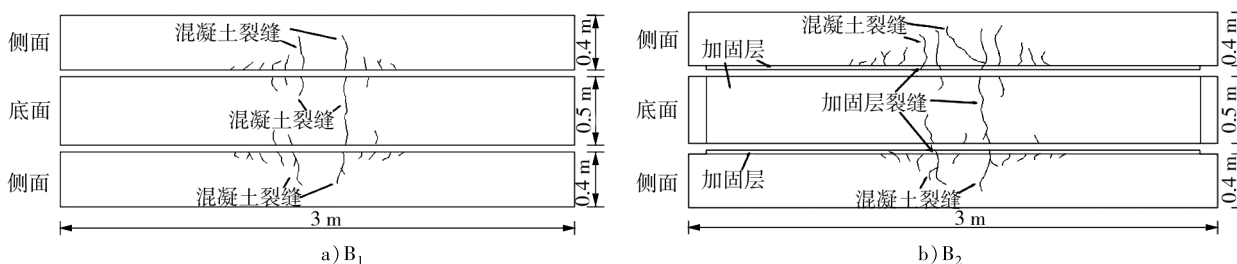
对试验梁进行力学性能试验,得到 B_1 、 B_2 的开裂荷载、极限承载能力、跨中挠度并记录梁体的破坏过程。

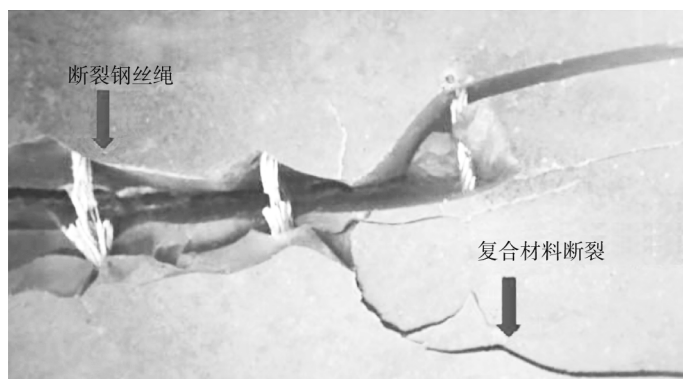
B_1 未经过加固,梁体上荷载未达到90 kN 时, B_1 处于弹性阶段,梁跨中位置未出现明显裂缝;梁体上荷载达到90 kN 时,在距离梁体跨中右侧6 cm 的梁底位置开始出现裂缝;荷载达到120 kN 时,在距梁体跨中4~20 cm 的两侧出现多条竖直发展的裂缝,此时裂缝最大宽度为0.12 mm;荷载达到150 kN 时,已产生的裂缝继续发展,裂缝最大延伸至距梁底26.9 cm 处,裂缝最大宽度为0.55 mm, B_1 在跨中位置挠度急速增加,此时 B_1 受弯破坏,破坏表现符合塑性破坏特征。

加载前, B_2 最大裂缝宽度为0.09 mm,位于距梁体跨中右侧7.50 cm 处,延伸至距梁底16 cm 处。施加荷载增大至130 kN,梁体跨中既有裂缝处的加固层产生裂缝。荷载增加到150 kN 时,加固层裂缝的最大宽度为0.26 mm,梁体挠度快速增大;荷载为170 kN 时,梁体加固层内部分钢丝绳断裂并产生剧烈声响,随后梁体持续发出细微碎裂声;荷载增加到210 kN 时加固层内的钢丝绳全部拉断,断裂处的聚氨酯水泥复合材料破碎,梁体裂缝最宽为0.95 cm,裂缝最大延伸至距梁底32.10 cm 处。 B_2 加载直至破坏的过程中没有出现加固层剥离现象。

B_2 破坏表现为:梁体加固层在混凝土梁既有裂缝位置产生新的裂缝,裂缝随荷载增加而发展;钢丝绳被拉断的同时断裂处的聚氨酯水泥复合材料破碎。经预压后再加固的空心板梁破坏主要分为钢丝绳断裂、复合材料开裂和整体结构受弯破坏3个阶段。梁体破坏表现符合塑性破坏特征,属于适筋梁破坏。

B_1 、 B_2 在经过试验加载后梁体的裂缝分布如图2所示。 B_2 加固层破碎如图3所示。

图2 试验梁 B_1 、 B_2 裂缝分布

图3 B₂加固层破碎

2.2 挠度

为研究钢丝绳聚氨酯水泥材料对损伤空心板梁的加固效果,通过模型试验可得各试验梁在分级荷载下跨中截面的挠度变化。选择主要分级荷载下各试验梁的跨中截面挠度,对比分析复合材料对未加固试验梁和预载后损伤试验梁的加固效果。B₁、B₂在各级荷载作用下跨中截面实测挠度变化曲线如图4所示。

由图4可知:B₂与B₁在弹性阶段内相同荷载作用下的挠度接近且发展趋势相同,B₂在150 kN荷载作用下,跨中截面挠度为4.4 mm,比B₁降低了22.81%。因此,钢丝绳聚氨酯水泥复合材料可提高空心板梁的整体刚度和承载性能,抑制了梁体变形。

2.3 延性

位移延性系数是试验梁跨中极限挠度与屈服挠度的比值。采用位移延性系数分析试验梁的延性,B₁、B₂的延性如表1所示。

由表1可知:B₂的延性比B₁增大了57.14%,B₂梁体跨中位置的挠度发展较快。由图4可知:B₂的屈服阶段较长,试验梁延性提升较明显。预压损坏后采用加固方式维修旧桥或受损空心板梁时,因其屈服段较长可在桥梁破坏前提供充足的预警信息,增强了桥梁的安全性。

2.4 梁体裂缝宽度

随施加在梁体上的荷载不断增大,梁体由弹性阶段进入塑性阶段并开始出现裂缝,裂缝随荷载增大不断发展,裂缝的最大宽度随荷载的增大而持续增大。每级加载后梁体稳定时,采用裂缝观测仪观测梁体裂缝的宽度,得到各级荷载作用下梁体的最大裂缝宽度。B₁、B₂在各级荷载作用下的最大裂缝宽度曲线如图5所示。

由图5可知:B₁、B₂的荷载-最大裂缝宽度曲线趋势相似,荷载为150 kN时,B₂的最大裂缝宽度为0.26 mm,比B₁减小了52.73%;加固后梁体的破坏荷载大幅提升;破坏时最大裂缝宽度有减小趋势。

2.5 抗弯承载能力

B₁、B₂的实测屈服荷载分别为140、180 kN,极限荷载分别为150、210 kN。B₂的实测屈服荷载、极

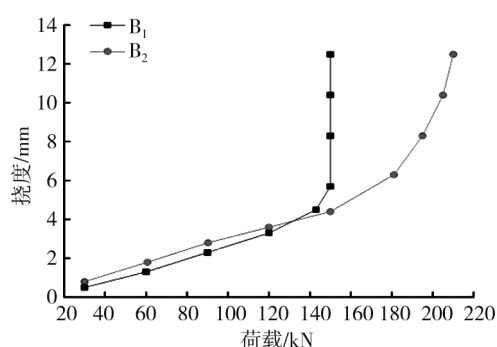


图4 试验梁跨中截面实测荷载-挠度曲线

表1 试验梁延性测试结果

试验梁	屈服挠度/mm	极限挠度/mm	延性系数
B ₁	4.5	5.7	1.26
B ₂	6.3	12.5	1.98

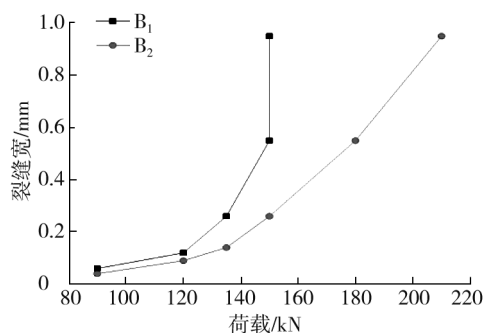


图5 试验梁荷载-最大裂缝宽度曲线

限承载力比 B_1 分别提高 28.60%、40.00%, B_2 的抗弯承载能力比 B_1 明显提升,空心板梁梁体的屈服阶段有所延长。采用钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固受损空心板梁提高了梁体的抗弯承载能力,加固效果明显。

3 结论

1) 预压后采用钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固的空心板梁,其破坏过程主要分为钢丝绳断裂、复合材料开裂和整体结构受弯破坏 3 个阶段,梁体破坏表现符合塑性破坏特征,为适筋梁破坏。

2) 在相同荷载作用下,预压后再加固的损伤空心板梁梁体挠度最大下降 22.81%,梁体位移延性系数上升 57.14%,梁体的屈服阶段明显延长,提升了梁桥整体的耐久性,可为桥梁破坏提供预警信息,保障桥梁的安全性。

3) 在相同荷载作用下,钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固的空心板梁梁体最大裂缝宽度比未加固空心板梁减小了 52.73%。采用钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固损伤空心板梁,可有效抑制空心板梁体裂缝的发展且抗弯效果显著。

4) 钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固的空心板梁的实测屈服荷载、极限荷载比未加固空心板梁分别提高 28.60%、40.00%。采用钢丝绳聚氨酯水泥复合材料加固梁体可显著提高已损伤空心板梁桥体的整体承载性能。

参考文献:

- [1] 刘云浩, 贾艳敏. 先张法预应力混凝土空心板梁的抗剪加固技术[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(6): 110-117.
LIU Yunhao, JIA Yanmin. Shear performance of strengthening methods for pre-stressed hollow core concrete slabs with pretensioning method[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(6): 110-117.
- [2] HUSSAIN H K, LIU G W, YONG Y W. Experimental study to investigate mechanical properties of new material polyurethane-cement composite (PUC)[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50(1): 200-208.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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, 62(6): 271-275.
- [6] 张立东, 孙全胜. MPC 高韧性聚合物在简支 T 梁加固中的应用[J]. 公路, 2016, 61(4): 90-94.
ZHANG Lidong, SUN Quansheng. Application of simply supported T-beam strengthened by MPC high toughness polymer[J]. Highway, 2016, 61(4): 90-94.
- [7] 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, 62(3): 126-130.
- [8] ZHANG K, SUN Q. Experimental study of reinforced concrete T-beams strengthened with a composite of prestressed steel wire ropes embedded in polyurethane cement (PSWR-PUC)[J]. International Journal of Civil Engineering: Transaction A: Civil Engineering, 2018, 16(9): 1109-1123.
- [9] 褚云朋, 姚勇, 贾彬, 等. CFRP 布加固损伤混凝土空心板抗弯试验研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(1): 70-75.
CHU Yunpeng, YAO Yong, JIA Bin, et al. Experimental study on the bending of damaged rc hollow core slabs strengthened with CFRP[J]. Building Science, 2016, 32(1): 70-75.
- [10] 王立军, 贾吉龙, 乔慧英, 等. 碳纤维布-聚合物砂浆复合加固预应力空心板受力性能试验研究[J]. 混凝土, 2018(3): 141-144.
WANG Lijun, JIA Jilong, QIAO Huiying, et al. Experimental study on mechanical performances of prestressed hollow slabs strengthened with carbon fiber reinforced plastic and polymer mortar[J]. Concrete, 2018(3): 141-144.
- [11] 张鹏飞, 孙全胜. 复合砂浆预应力钢丝绳加固实桥的试验分析[J]. 建筑结构, 2014, 44(3): 67-70.
ZHANG Pengfei, SUN Quansheng. Experimental analysis of the bridge strengthening by composite mortar prestressed steel

- cable[J]. Building Structure, 2014, 44(3): 67-70.
- [12] 王希瑞. 聚合物砂浆预应力钢丝绳抗弯加固 RC 旧桥研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
WANG Xirui. The research of the rc old bridge is reinforced by the prestressed steel wire rope of polymer morta[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [13] 张利勇, 王天良, 吴长震, 等. 聚氨酯水泥复合材料的物理力学性能研究[J]. 科学技术创新, 2019(23): 32-33.
- [14] 谷丹丹, 孙全胜. MPC 复合材料加固空心板梁静载试验研究[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.
- [15] 张宏祥, 陈超, 于天来. MPC 材料在简支 T 梁加固中的应用[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(3): 59-61.
ZHANG Hongxiang, CHEN Chao, YU Tianlai. The application of simply supported T beam strengthened by MPC material [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015, 37(3): 59-61.
- [16] ZHANG K, SUN Q. The use of wire mesh-polyurethane cement (WM-PUC) composite to strengthen RC T-beams underflexure[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 15: 122-136.
- [17] 谢剑, 李明, 白伟亮. MPC 混凝土制备及其力学性能试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(8): 948-955.
XIE Jian, LI Ming, BAI Weiliang. Experimental study on preparation and mechanical properties of MPC concrete[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(8): 948-955.
- [18] KEXIN Z, QUANSHENG S. Strengthening of a reinforced concrete bridge with polyurethane-cement composite (PUC)[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2016, 10(1): 768-781.
- [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 reinforce polyurethane cement composites[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 249-252.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 李兴贵, 吴燕华, 朱杰. 无溶剂聚氨酯改性水泥砂浆及其性能研究[J]. 新型建筑材料, 2007(7): 45-47.
LI Xinggui, WU Yanhua, ZHU Jie. Study on solventless polyurethane modified cement mortar and its performance[J]. New Building Materials, 2007(7): 45-47.
- [24] LIU Guiwei, OTSUKA Hisanori, MIZUTA Yoji, 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.
- [25] 张盛然. 聚氨酯水泥钢丝绳复合加固桥梁试验及有限元数值分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
ZHANG Shengran. Experiment and finite element numerical analysis of polyurethane cement steel wire rope composite reinforcing bridge[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [26] 中交第一公路工程局有限公司. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T F50—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

Experimental study on damaged hollow slab beams reinforced by steel wire rope polyurethane cement composite

GUAN Zebin¹, LI Jin¹, WU Peng², CHANG De², DONG Xu^{1*}

1. School of Civil Transportation Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Jinan Jinyue Highway Engineering Co., Ltd., Jinan 250101, China

Abstract: In order to study the mechanical properties of damaged hollow slab beams reinforced by steel wire

rope polyurethane cement composites, the model test of flexural properties of damaged hollow slab beams under reinforcement conditions is carried out, the variation laws of deflection, crack width and bearing capacity of slab beams are analyzed, and the failure mechanism of damaged hollow slab beams reinforced by composite materials is studied. The test results show that, the failure process of preloaded damaged hollow slab beam reinforced by steel wire rope polyurethane cement composite is divided into three stages: steel wire rope fracture, composite cracking and bending failure of the whole structure, which belongs to the failure of properly reinforced beam. The measured yield load and ultimate bearing capacity of the slab beam are 28.60% and 40.00% higher than that of the unreinforced hollow slab beam, respectively. The deflection under the same load is reduced by 22.81%, the width of the maximum crack is reduced by 52.73%, and the ductility of the beam body is increased by 57.14%. The yield stage of the beam body is prolonged, and the safety of the hollow slab beam is improved. Damaged hollow slab beam reinforced by steel wire rope polyurethane cement composites can significantly improve the overall bearing performance and safety of the beam body.

Keywords: polyurethane cement composite; damaged hollow slab beam; wire rope; reinforcement; flexural capacity

(责任编辑:郭守真)

.....
(上接第 21 页)

The calculation of passenger flow scattering in urban subway network based on travel impedance

YANG Qun, LUO Qin, LAI Yichun, GUO Zhengyang, LAI Zhipeng

College of Urban Transportation and Logistics, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China

Abstract: In order to improve the predictive accuracy of passenger flow scattering around urban subway network, a comprehensive trip impedance formula was established based on the trip impedance, waiting impedance and transfer impedance, etc. The calculation model of multi-path passenger flow scattering was formed based on comprehensive trip impedance, after the effective paths cluster was searched and filtered through the impedance formula, then the transfer penalty coefficient was set up to reasonably modify the passenger flow scattering with different routes. Taken the newly opened Line 11 of Shenzhen metro as a numerical example, the variation of passenger flow scattering in urban subway network is analyzed compared with the old ones of metro Line 1, Line 2, Line 3 and Line 5. The results show that the increase of the transfer passenger flow of each line with the newly opened Line 11 is different, and the passenger travel alternative paths are added. The centralization of population and jobs around Line 11 railway station lead to the passenger flow further increase at the Line 11, which is consistent with the actual operation of passenger flow characteristics, so the calculation model was verified in terms of validity and applicability.

Keywords: urban railway transit; travel impedance; metro network; passenger flow scattering; transfer penalty factor

(责任编辑:杨秀红)