

小铰缝空心板梁的预防性修复

齐正坤

(上海培宏公路养护技术有限公司, 上海市 200082)

摘要: 公路及城市桥梁中, 中小跨径桥梁占比超过80%, 其中大部分上部结构采用小铰缝空心板梁。随着桥梁老化和交通量的不断增加, 铰缝病害日益严重, 由于铰缝损伤造成的单梁受力已经威胁到桥梁安全。通过对多个工程进行跟踪调查后发现, 铰缝损伤具有传导性, 初始破坏的铰缝修复后, 往往相邻的铰缝在短期内会出现破坏, 反过来又使得修复过的铰缝再度损伤, 造成“屡修屡坏、越修越坏”。从预防性修复角度进行研究, 提出除了对已破坏铰缝进行修复外, 还要对“将坏未坏”的铰缝进行预防性修复, 从而提高桥梁的安全性能, 降低全生命周期内的维修费用。为提高修复效果, 围绕铰缝的破坏机理、加固方法、加固材料、工程应用等方面, 系统研究了空心板梁铰缝修复技术。

关键词: 小铰缝空心板梁; 铰缝病害评定; 预防性修复; 全生命周期; 高性能材料; 钢箍法加固

中图分类号: U445.7; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0352-06

Preventive Repair of Small Hinge Joint Hollow Slab Beams

QI Zhengkun

(Shanghai Peihong Highway Maintenance Technology Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: In highways and urban bridges, medium and small span bridges account for over 80%, in which the most of the superstructures are the small hinge joint hollow slab beams. With the aging of bridges and continuous increases of traffic volume, the disease of hinge joints is becoming increasingly serious. The single-beam stress caused by the damage of hinge joint has posed threats to bridge safety. Tracking investigations of multiple projects reveal that the damage of hinge joint is conductive. After the initial damaged hinge joints are repaired, the adjacent hinge joints often fail within a short period, which in turn causes the renewed damage to the repaired joints, resulting in a cycle of “repeated repairs with recurring failures, worsening with each repair”. From a preventive repair perspective, it is proposed that in addition to repairing already damaged hinge joints, the preventive repairs should also be conducted on hinge joints that are on the verge of failure so as to enhance the safety of bridge and reduce the maintenance costs over the full life cycle. To improve the repair effect, the systematic research is conducted on hollow slab beam hinge joint repair technologies by focusing on failure mechanisms, reinforcement methods, strengthening materials and engineering applications of hinge joints.

Keywords: small hinge joint hollow slab beam; evaluation of hinge joint disease; preventive repair; full life cycle; high-performance materials; steel hoop reinforcement method

0 引言

公路及城市桥梁中, 中小桥梁占比超过80%, 其中绝大部分上部结构采用空心板梁, 2005年前建造的空心板梁基本都采用小铰缝空心板梁。由于空心板梁结构自身的固有缺陷^[1-2]、施工影响、运营荷载的增大, 虽然管养单位投入大量人力物力进行维修, 空心板桥梁病害尤其是铰缝病害还是日趋严重, 由于铰缝损坏造成的单梁受力已经威胁到桥梁安全,

小铰缝空心板梁的铰缝病害已成为行业痛点。

近年来国内学者针对空心板梁桥的病害提出了许多防治对策, 但由于问题的复杂性和各种限制因素, 相应的防治效果不够彻底: 对桥梁病害的产生机理和主动修复方式研究不足。大多情况是桥梁病害出现时, 被动的进行加固, 没有透过现象抓住本质, 做到主动修复, 杜绝病害的产生; 对不中断交通条件下的维修技术的研究有所欠缺。桥梁的修复不仅涉及诸多技术“顽疾”, 还涉及交通组织和施工条件, 如何在对交通尽量少影响的情况下完成快速施工并提高修复质量, 需要进一步研究; 工艺、材料、设备不适应养护工作的需求, 需要根据养护工作的特点及施

收稿日期: 2025-11-20

作者简介: 齐正坤(1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事路桥养护技术研究工作。

工条件,研发与其相适应的工艺、材料、设备;没有形成标准工艺和质量控制措施,造成施工质量良莠不齐。

本文围绕铰缝的破坏机理、病害检测评价、加固方法、加固材料、工程应用等方面,系统研究了小铰缝空心板梁桥病害处治技术:系统揭示了空心板梁桥铰缝的破坏机理,提出了预防性修复,不仅对已破坏铰缝进行修复,还要对将坏未坏铰缝进行修复;从恢复结构原有状态和增强横向联系两个方面,提出两种修复技术,并根据技术和工艺需要研发了高性能材料和钢抱箍及配套材料;明确前期检测、方案设计、施工管控等各环节要点,细化技术流程。通过应用于实际工程,总结标准工艺和质量控制办法。

1 空心板梁铰缝屡修屡坏原因分析

通过对多个工程进行跟踪调查后发现,对初始破坏铰缝修复后,往往相邻的铰缝短时间内会出现破坏,反过来又使得修复过的铰缝再度损伤,造成“屡修屡坏、越修越坏”。

(1) 铰缝破坏机理

对铰缝破坏机理进行分析^[3-4]后发现,造成铰缝病害的主要因素有结构自身、运营荷载、施工影响、管养四方面,前两个方面为主要因素。

(2) 实际工程调查

S20浦东段某座跨线桥的典型桥跨,2018年发现12#板梁两侧的铰缝破坏,进行了梁底注胶加固。后续从初始破坏的两条铰缝开始,破坏向两侧对称发展,2019年、2020年分两批对该跨进行了梁底注浆加固。2021年4月检测时12#板梁被判定为单梁受力,说明第一批修复的两条铰缝再度破坏,见图1。

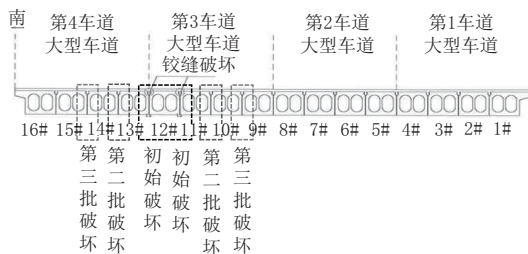


图1 铰缝破坏示意图

(3) 理论计算

理论计算发现:铰缝破坏后,横向传力功能降低,导致相邻两侧的板梁受力大幅增加,以常规4车道16片板梁为例,其受力最大增加47.3%,从而造成相邻的铰缝加速破坏。

(4) 空心板桥自身特性

空心板梁宽度1 m,每片梁设4个支座,每座桥梁的板梁数量、铰缝数量、支座数量巨大,造成风险点多,维修工作难免顾此失彼,造成病害多发。

(5) 管理层面

目前铰缝病害的判断主要依靠表观检查,根据梁底渗水、桥面开裂等情况进行判断,只有铰缝损伤很严重时才会发现。从检测发现病害到立项、设计、施工需要较长的时间周期,在此期间车辆的运营使得铰缝病害情况更加严重,并出现很多将坏未坏的铰缝。

如果仅对破坏铰缝进行修复,对潜在病害(将坏未坏铰缝)没进行修复,修复后又会陆续出现大量破坏的铰缝,恶性循环,导致桥梁状况日趋恶化。

2 预防性修复

2.1 对已破坏及将坏未坏铰缝进行预防性修复

根据大量的铰缝病害案例,在对铰缝病害的发展趋势进行分析总结基础上,提出了预防性修复^[5]的理念,利用封道维修时机,对破坏的铰缝及其相邻的将坏未坏的铰缝进行预防性修复。对比传统的破坏后再修复,不仅能延长铰缝寿命,更能避免因铰缝失效引发的连锁损伤。从而大大延长结构使用寿命,减少维修频次,降低全生命周期成本。

2.2 铰缝病害的评定

建立多维度的空心板梁桥病害评价体系,结合病害影响范围与结构安全风险,形成科学分类依据,避免单一指标判定的局限性^[6-7]。

(1) 表观检查

对梁底渗水、梁底横向裂缝、梁底纵向裂缝、桥面开裂、梁端腹板斜向裂缝、支座、梁体变形等情况进行检查。

(2) 挠度专项检查

挠度专项检查采用相对位移法^[8],通过检查相邻空心板梁挠度的差异来判断铰缝是否完好。相对位移法测试系统由位移计、动态数据采集仪、便携式电脑和联接件组成。采用无量纲参数 α 作为铰缝状态的评判指标:

$$\alpha = \frac{\Delta}{L} \times 10\,000$$

式中: Δ 为实测相对位移,mm; L 为跨径,mm;10 000为系数。

数据经数理统计分析后得出铰缝损坏(将坏未坏)和破坏的界限值,即为铰缝损伤程度判定准则。

采用相对位移法对铰缝进行检测,在交通正常通行的情况下,通过检测相邻板梁的相对位移值来判断铰缝状态,能及时发现铰缝损伤情况,尤其是潜在的眼无法观察到的铰缝损伤,达到提前预判的目的。

2.3 维修加固范围的确定

2.3.1 单条铰缝维修

(1) 单条铰缝轻微损伤

将该条铰缝进行维修,将铰缝两侧各 0.5 m 范围内桥面铺装层凿除,重植钢筋(原来的钢筋保留),重新浇筑桥面。

(2) 单条铰缝中度损伤

单条铰缝中度损伤,且每侧相邻的 3 块空心板宽度范围内无其他铰缝损伤时,可仅维修单条铰缝及铺装。将铰缝 1 m 范围内桥面铺装层凿除,将铰缝内混凝土凿除,重植铰缝钢筋、浇筑铰缝和桥面混凝土铺装层。

2.3.2 整体维修

运用预防性修复理念,对预期将要发生破坏的铰缝进行预防性修复,从而提高桥梁的安全性能,减少维修次数。

(1) 单条铰缝重度损伤时

将破坏的及其相邻的总计 3 条铰缝及铺装进行整体维修。

(2) 多条铰缝中度损伤时

当损伤铰缝间隔不大于 3 块空心板宽度时,应凿除其间所有铺装进行整体维修;多条铰缝存在中等损伤时,整跨混凝土铺装凿除进行整体修复。

(3) 多条铰缝严重损伤时

将整跨的铰缝和混凝土铺装层整体维修。

3 修护方案

3.1 开挖修复空心板铰缝方案

本方案立足于将损伤的结构恢复到原有状态,为提高修复质量,对技术方案、施工条件、施工工艺、材料特性进行综合研究,制定出标准工艺和质量控制办法。

3.1.1 技术方案

对破损铰缝及铺装混凝土凿除重做,该方法整治比较彻底,质量易于把握。将破坏铰缝内的混凝土及两侧各 0.5 m 范围内沥青铺装、钢筋混凝土铺装凿除,在铰缝内部放入钢筋笼,铺设桥面铺装钢筋网,铰缝两侧相邻板梁腹板区域植入钢筋,重新浇筑

铰缝内混凝土和桥面混凝土铺装层。

常用的桥面混凝土铺装层厚度为 8 cm(实际上大部分小于 8 cm),因此桥面混凝土铺装层内采用单层钢筋网。为保证浇筑质量,铰缝内采用高性能混凝土浇筑;如果铰缝内和桥面铺装层都采用高性能混凝土,宜一次浇筑,形成共同受力,效果更好。具体构造见图 2。

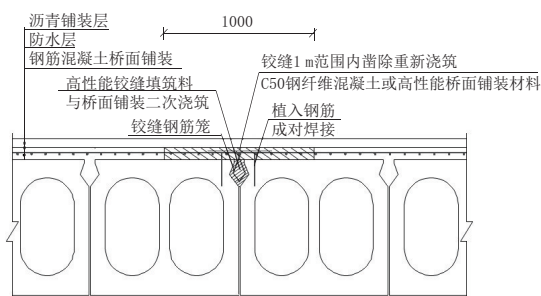


图 2 开挖修复空心板铰缝示意图(单位:mm)

3.1.2 钢筋施工技术标准

通过对大量实际工程的跟踪,发现钢筋的设计、施工等没有标准化,从而造成修复质量良莠不齐。根据铰缝受力行为分析^[9]的结果,将铰缝钢筋的设计、施工标准化。钢筋布置见图 3。



图 3 现场钢筋布置

(1) 铰缝内置钢筋直径为 10 mm,间距 150 mm。

(2) 种植的铰缝两侧钢筋直径为 10 mm,间距 150 mm,不考虑原来老钢筋的残余强度,全长范围内重新种植。

(3) 植筋队伍要专业化,按照标准工艺进行施工,以保证植筋的质量。种植的钢筋深度和抗拔力要达到设计要求。

(4) 植筋位置要准确(应与原来钢筋位于同一直线),保证植在腹板中,不得打穿顶板。

(5) 桥面钢筋网片钢筋直径为 12 mm(间距 10 cm),纵向钢筋置于底层,横向钢筋置于顶层,根据混凝土铺装层的实际厚度来确定保护层厚度,设置垫块来确保垫层的厚度。底面保护层厚度不宜小于 10 mm,顶面保护层厚度不宜小于 20 mm。钢筋网片的搭接位置要避开铰缝,搭接长度满足规范要求。

(6) 铰缝两侧钢筋弯折后压在桥面钢筋网上,成

对进行焊接,焊接长度满足规范要求。

3.1.3 采用高性能材料提高修复质量

较缝开挖维修时,常规采用钢纤维混凝土或者 C50 快硬混凝土,这两种材料存在较缝内振捣不密实、相邻车道行车震动会造成材料实际强度损失、新浇筑混凝土与板梁混凝土界面黏结不好等问题。随着活性粉末混凝土材料^[10]的运用日渐成熟,研发适合较缝修复的快硬型高强度高韧性细骨料高性能混凝土^[11]非常有必要。

根据空心板梁的受力要求及施工条件确定材料的性能指标,尤其是明确了抗折指标。参照了 UHPC 的力学性能(抗折能力)和高强无收缩灌浆料的良好施工性能。经过反复试验,确定材料的成分构成、水胶比、外加剂掺量、砂级配、钢纤维含量等关键因素。通过工厂预拌制成具有良好工作性能和优异的力学性能的材料,现场加水搅拌即可浇筑。

高性能混凝土具有快硬、高强度、高韧性、施工性能好、微膨胀性、界面性好、黏结强度高、低温性能好、抗动载性好、耐久性好等特点。对比于常用的快硬混凝土,高性能混凝土掺加微细钢纤维来增加韧性。对比于 UHPC,改善了施工性能,现场加水搅拌就可以浇筑,新老混凝土界面良好,不用特殊养生。

3.1.4 施工工序

开挖修复空心板较缝的施工工序为:铣刨沥青铺装层—凿除混凝土铺装层—将较缝内破损混凝土凿除—将较缝清理干净—较缝底部封堵—放置较缝钢筋笼—放置桥面铺装钢筋网片—种植较缝钢筋—浇筑较缝内和桥面铺装混凝土—铺防水层—铺沥青铺装层—沥青灌缝。

3.2 钢箍法增强空心板横向联系方案

空心板梁的整体性不强,是造成较缝病害及桥面铺装破坏的主要原因,若要提高空心板梁修复质量,必须提高结构的整体性。

国内开展了一些增加空心板梁整体性的研究,比如增厚桥面铺装法^[12]、横向预应力钢筋方法^[13]、横向预应力碳纤维板法^[14]、梁底钢横梁法^[15]、梁底增设横向钢板法^[16]、锚夹板拉杆法加固较缝^[17]等。但各种方案因为加固效果、施工影响、施工难度等原因没有得到推广。

借鉴各种研究成果,升级创新出一种加固效果好、构造简单、施工方便快捷的加固技术:钢箍法增强空心板梁横向联系^[18]。

3.2.1 技术方案

钢箍法增强空心板梁横向联系^[19],是在空心板梁底横桥向设置下钢箍、梁顶横桥向设置上钢箍、在梁缝处设竖向拉杆将上下钢箍锚固成一个整体。钢抱箍与空心板梁之间采用配套的材料填充密实,将所有空心板梁箍在一起,相当于设一道横梁。具体构造见图 4、图 5。

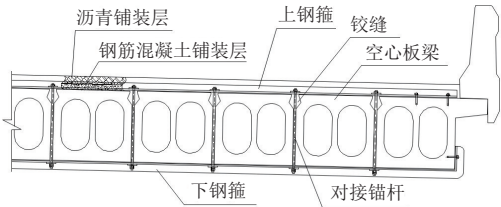


图 4 钢箍立面图

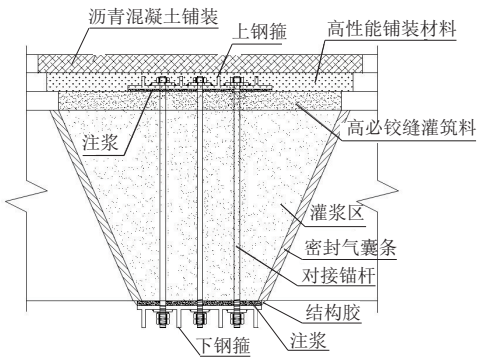


图 5 钢箍横断面图

3.2.2 钢箍法增强空心板梁横向联系的结构

(1) 梁顶上钢箍

钢箍采用工厂制作,钢材采用 Q355B 钢材。主钢板宽 620 mm,厚 16 mm;设 4 道 16 mm 的加劲肋,肋高 30 mm;主钢板上在对应梁缝位置开孔来穿对拉锚杆。

(2) 梁底下钢箍

钢箍采用工厂制作,钢材采用 Q355B 钢材。主钢板宽 500 mm,厚 16 mm;在主钢板上设 3 道 16 mm 的加劲肋,肋高 80 mm;主钢板上在对应梁缝位置开孔来穿对拉锚杆。

(3) 竖向对拉锚杆

采用 $\phi 24$ mm 圆钢制作螺杆,杆长根据梁高来确定,螺杆上端固定钢板与锚杆采用剖角焊,下端加工出螺纹。

(4) 钢箍与板梁之间注浆

上钢箍与梁顶之间、下钢箍与梁底之间、梁缝空隙处采用快硬型高强无收缩灌浆料压力注浆以达到密实。

(5) 较缝与混凝土铺装层浇筑

钢箍施工范围内的桥面混凝土铺装层和较缝混

凝土需要凿除,钢箍施工后采用配套研发的快硬型高性能材料进行填筑。

3.2.3 施工工艺

(1)空心板梁的顶部设置上钢箍,梁底设置下钢箍,在梁缝处设置竖向锚杆将上下钢箍对拉形成一个整体。上钢箍肋板顶与混凝土铺装层顶面平齐,下钢箍与梁底之间预留2 cm缝隙。钢箍与梁之间的空隙及梁缝内用高强无收缩灌浆料灌浆至饱满,不得留有空隙;铰缝采用高性能铰缝灌筑料填筑;肋板间及桥面铺装层采用高性能材料浇筑。

(2)钢箍和对拉锚杆采用工厂制作,现场安装。灌浆材料、铰缝灌筑材料、桥面混凝土铺装材料采用配套的高性能材料。

(3)根据施工工艺进行流水施工:沥青铣刨一桥面及铰缝凿除一梁缝间钻孔一混凝土面凿毛一钢箍安装调平一对拉锚栓安装一锚端焊接固定一安装侧板一密封、注浆、填筑一桥面铺装系统恢复。

3.3 方案选择

根据检测结果及预养护理念确定修护范围,结合全生命周期选择合适的修护方案。

(1)开挖修复空心板铰缝,可对单条或者多条损伤的铰缝进行修复,以恢复结构原有状态。根据施工条件,修复材料可采用高性能混凝土或普通快硬型混凝土。

(2)修复破坏铰缝+钢箍法增强横向联系,适用于重载交通、单跨内多条铰缝出现病害的区域,可弥补空心板梁横向联系不足的问题,增强板梁整体性,提高横向传力性能,增加结构的耐久性。

4 案 例

4.1 对将坏未坏铰缝进行开挖修复

浦东S20某座跨线桥,除了传统的通过表观来判断铰缝损坏情况外,还采用相对位移法对铰缝进行检测,通过检测相邻板梁相对位移值判断铰缝状态,及时发现铰缝损伤情况,尤其是潜在的肉眼无法观察的铰缝损伤,判定标准见表1。

表1 铰缝不同状态的无量纲参数a范围	
铰缝状态	无量纲参数a
完好	小于0.14
损坏、预期破坏	0.14~0.57
已破坏	大于0.57

检查范围包括40跨,根据检测情况对45条铰缝进行开挖植筋修复,其中破坏的有18道、损坏(预期

破坏)的有27道,见图6。

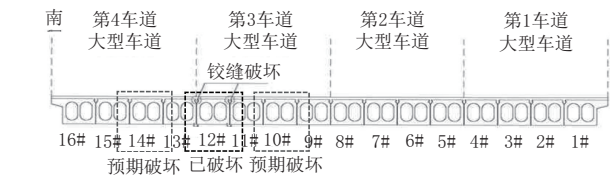


图6 铰缝开挖修复范围示意图

维修采用开挖修复方案,采用研发的铰缝专用快硬型高强度高韧性细骨料高性能混凝土进行浇筑。该材料具有快硬、高强度、高韧性、抗冲击、界面良好等优点。干粉工厂拌合,现场加水搅拌即可,不用特殊养生,浇筑后5 h可开放交通,见图7。



图7 高性能材料修复铰缝

4.2 增加空心板梁横向联系

(1)S1浦东运河桥K2跨

2021年5月对S1浦东运河桥K2跨进行钢箍增强横向联系施工。在L/4、跨中、3L/4设置3道钢箍,并对已破坏的两条铰缝进行开挖重新植筋修复。加固后做了相对位移测试,证明加固效果良好。目前状况良好:桥面完整、梁底完整、铰缝处没出现渗水现象。

(2)S20上南路跨线桥抢修

2021年8月对全桥铰缝进行了相对位移检测,发现铰缝损伤情况严重,并出现多个单梁受力,2021年12月对上南路跨线桥进行了抢修。因为抢修费用受限,同时施工时间也受限,设计方案采用半箍将外侧重车道的8片梁连为一体,对单梁受力的桥跨将铰缝与桥面铺装凿除进行修复并设3道钢箍,其余桥跨仅增设2道钢箍,对破坏特别严重的(桥面开裂)铰缝进行了开挖修复,见图8。

为了验证加固后的受力性能^[20],在钢箍底板和肋板贴应变花、对拉锚杆上贴应变片、空心板梁底板跨中位置处贴应变片。分别在加固施工前、加固施工后进行荷载试验,测量钢箍、对拉锚栓、空心板梁梁底混凝土的应变情况。通过检测数据看出,钢箍能显著提高空心板梁整体性,增强空心板梁的横向传力能力^[21]。



图8 钢抱箍加固

5 结 语

本文的研究可为空心板梁的加固提供参考,具有良好的应用推广价值。

(1)现行铰缝病害的评定方法具有一定的滞后性,往往在铰缝破坏比较严重时才能发现,铰缝损伤后,会使该铰缝连接的板梁的受力有大幅增加。辅以相对挠度检测等方法,可以及早发现铰缝病害并开展修复工作。

(2)开挖修复铰缝植筋及施工工艺应规范化,有条件时可采用高性能修复材料。高性能材料适合养护抢修施工,具有高韧性、早强、高强、界面性好、施工性能好和抗动载性能好等特点。通过使用高性能材料来提高修复效果,可减少返修次数,增加结构的耐久性,提高道路服务水平。

(3)为弥补空心板梁桥的小铰缝薄弱的先天不足,可采用抱箍法增加空心板梁横向联系。该加固技术不破坏原结构、科学可靠,施工方便快捷,同时可满足不中断交通条件下分幅施工的需要。

(4)树立全生命周期预防性养护的理念,不再单纯地坏了再修,而是基于检测和大数据预测,在将坏未坏时进行预防性修复,从而大幅延长使用寿命,降低全生命周期成本。

参考文献:

[1] 俞博,叶见曙,张剑,等.装配式混凝土铰接板桥铰缝剪力计算[J].

深圳大学学报(理工版),2011,28(1):60-64.

[2] 石云冈.装配式空心板铰缝受力分析[J].公路工程,2014,39(3):275-279.

[3] 刘明选.空心板梁桥铰缝病害分析和维修方法研究[J].四川理工学院学报(自然科学版),2014,27(4):65-68.

[4] 张鹏.空心板梁桥铰缝破坏机理分析与加固方法[J].中国市政工程,2025(3):172-176.

[5] 上海市城市建设设计研究院(集团)有限公司,等.空心板梁桥病害处治关键技术及工程应用[R].上海,2025.

[6] 郭晓光,李院军,时元绪,等.装配式空心板梁桥铰缝损伤评估方法[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(4):637-644.

[7] 王昕.空心板铰缝破坏机理及状态评估[D].济南:山东交通学院,2020.

[8] 上海浦公建设工程质量检测有限公司,等.上海地区空心板梁桥铰缝的检测、修复与加固技术研究[R].上海,2012.

[9] 项贻强,邢聘,邵林海,等.铰接预应力混凝土空心板梁桥的空间受力行为及加固分析[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(4):734-738.

[10] 鞠杨,刘红彬,孙华飞.活性粉末混凝土的制备与物理力学性能[M].北京:科学出版社,2018.

[11] 张刚正.高性能材料在空心板桥梁维修中的应用[J].上海公路,2023(2):82-86.

[12] 郭建民,徐飞萍,康良,等.考虑整体化层作用的空心板梁桥横向分布计算与承载能力分析[J].结构工程师,2021,37(2):194-199.

[13] 陈淮,张云娜,葛素娟.横向体外预应力加固装配式空心板桥的探讨[J].铁道科学与工程学报,2008,5(6):22-25.

[14] 宋洪雨.既有空心板梁桥横向预应力碳纤维板加固技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.

[15] 何弘.钢筋混凝土空心板整体化加固试验[D].重庆:重庆交通大学,2013.

[16] 宋泽冈,邓旭东,殷继华.空心板梁桥加固前后受力性能对比试验研究[J].公路,2008(6):84-89.

[17] 马春辉.预应力空心板铰缝抗剪加固技术研究[J].江西建材,2022(5):207-210.

[18] 王宝红,颜利,张亮,等.空心板梁桥钢抱箍加固技术研究与应用[J].2023(11):139-144.

[19] 王宝红,赵健,张鹏,等.钢抱箍增强空心板梁横向联系的结构:中国,0312129.1[P].2021-02-03

[20] 康永亮,李雪峰,李海翔.装配式空心板梁铰缝加固后抗剪性能的试验研究[J].工程抗震与加固改造,2024,46(6):103-110.

[21] 葛继平,龚升,赵世壮.钢抱箍法加固空心板梁桥的车振响应分析[J].市政技术,2025,43(5):180-186.