

考虑铰缝构造与损伤参数的空心板桥荷载 横向分布性能分析

郭杰强¹, 孙嘉逸², 刘世忠², 王集忠³

(1. 山西应用科技学院建工学院, 山西 太原 030062; 2. 太原科技大学车辆与交通工程学院, 山西 太原 030024;
3. 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010011)

摘要: 为探究铰缝构造和损伤参数对装配式空心板桥荷载横向分布性能的影响, 为空心板桥的设计优化和状态评估提供定量依据, 以某简支空心板梁桥为工程背景, 采用ABAQUS软件建立精细化实体有限元模型, 系统分析铰缝构造尺寸(大、中、小)、损伤程度(弹性模量折减0%~75%)、损伤长度(0~25 m)、铰缝钢筋配置等参数的敏感性。研究结果表明: 大铰缝构造具有最优的横向荷载传递性能, 与铰接板梁法计算结果吻合良好; 设置铰缝钢筋可显著增强桥梁横向整体性, 使荷载横向分布系数最大降低10.14%; 铰缝损伤会削弱桥梁结构的横向传力能力, 其中损伤程度达75%、损伤长度增至25 m时, 将分别导致荷载横向分布系数较无损状态最大增加8.53%、3.66%, 且损伤长度超过15 m后其影响趋于稳定。因此, 优化铰缝构造和配筋是提升桥梁横向整体性的关键。

关键词: 桥梁工程; 空心板梁桥; 有限单元法; 铰缝损伤; 荷载横向分布; 铰缝构造

中图分类号: U448.21

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0058-05

Analysis on Load Transverse Distribution Performance of Hollow Slab Bridge Considering Hinge Joint Structure and Damage Parameters

GUO Jieqiang¹, SUN Jiayi², LIU Shizhong², WANG Jizhong³

(1. Construction College, Shanxi College of Applied Science and Technology, Taiyuan 030062, China; 2. School of Vehicle and Transportation Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Inner Mongolia Transportation Design and Research Institute Co., Ltd., Hohhot 010011, China)

Abstract: To explore the influence of hinge joint structure and damage parameters on the load transverse distribution performance of prefabricated hollow slab bridges, a quantitative basis is provided for the design optimization and status evaluation of hollow slab bridge. Taking a simple-supported hollow slab beam bridge as the engineering background, a refined solid finite element model is established by using ABAQUS software systematically to analyze the sensibility of parameters such as hinge joint structure sizes (large, medium and small), damage degree (0%-75% reduction in elastic modulus), damage length (0-25 m), and hinge joint reinforcement configuration. The research result shows that the large hinge joint structure exhibits the optimal load transverse transfer performance and the good agreement with the calculation results of the hinged slab beam method. The setup of hinge joint reinforcement can significantly enhance the transverse integrity of the bridge, reducing the transverse distribution coefficient of the load by up to 10.14% at most. The damage of hinge joint will weaken the transverse load-carrying capacity of the bridge structure, in which when a damage degree is to 75% and a damage length increases to 25 m, the maximum increase of 8.53% and 3.66% will be resulted respectively in the transverse distribution coefficient of the load compared with the non-destructive state. And when the damage length exceeds 15 m, its influence tends to stabilize. Therefore, the optimization of hinge joint structure and reinforcement is the key to improve the transverse integrity of the bridge.

Keywords: bridge engineering; hollow slab beam bridge; finite element method; hinge joint damage; load transverse distribution; hinge joint structure

收稿日期: 2025-11-17

基金项目: 山西省教育厅科技创新项目(2023L506); 山西应用科技学院应用型高等教育研究中心资助项目(KJXC202507); 内蒙古自治区交通运输厅建设科技项目(NJ-2019-15)

作者简介: 郭杰强(1987—), 男, 硕士, 讲师, 从事工程BIM建模、桥梁工程管理等教学与科研工作。

0 引言

铰缝作为装配式空心板梁桥实现横向整体受力的核心构造, 其性能状态直接关系到桥梁的荷载分布效率和长期安全^[1-3]。实际工程中, 由于构造复杂

且应力集中显著,铰缝易出现不同程度的损伤,导致梁板间横向传力路径弱化,甚至引发“单板受力”等不利工作状态,严重威胁着桥梁的整体性能和耐久性^[4-6]。因此,深入揭示铰缝损伤对结构受力行为的影响机制,已成为桥梁工程领域亟待解决的关键问题。

围绕铰缝损伤识别与桥梁性能评估,学者们已开展了多角度的研究。宋国昕^[7]依据虚拟横梁刚度调整(梁格法),实现了铰缝损伤的量化模拟与荷载横向分布影响线的计算;徐亚林等^[8]通过数值模拟构建了基于加速度幅值比的铰缝损伤评估标准;周明珩等^[9]通过荷载试验,建立了空心板铰缝损伤的分级评价方法;Hu等^[10]提出了物理-视觉铰缝损伤混合检测方法,验证了交通流下铰接板桥服役状态定量评价的可行性;Gong等^[11]采用等效弹性边界,建立了铰缝损伤与桥梁横向模态振型间的解析模型,揭示了损伤与模态振型的内在关联;Zhao等^[12]则开发了动态刚度与机器学习相结合的数据驱动框架,实现了铰缝损伤的智能识别与评估。现有研究从不同角度分析了铰缝损伤对空心板桥的影响,但多集中于整体响应或单一因素,未能系统揭示铰缝构造、损伤长度、损伤程度和配筋等关键参数对桥梁横向传力性能的作用机制。因此,有必要采用精细化有限元模型,深入探究铰缝损伤对桥梁横向荷载传递能力的内在影响规律。

本文以某简支空心板梁桥为工程背景,采用有限元软件ABAQUS建立大、中、小铰缝的空间实体精准有限元模型,通过定义主梁横向分布系数及其计算方法,分析了不同铰缝模型下各主梁的横向分布系数,并与规范铰接板梁法横向分布系数计算值进行比较。以铰缝损伤长度、损伤程度、钢筋设置与否为影响参数,系统分析了铰缝损伤对空心板梁桥横向传力性能的影响,以期为装配式空心板桥的设计优化和在役桥梁的科学管养提供理论依据和方法支持。

1 工程概况

某装配式空心板简支梁桥跨径总长350 m,桥跨布置为14×25 m。桥面全宽26 m,采用分幅设计,其半幅桥横断面由8片空心板梁组成,板梁间距1.54 m,梁高1.15 m,采用“大铰缝”构造以增强其横向整体性^[13]。下部结构采用圆柱式墩台和钻孔灌注桩基础。

空心板桥主梁截面尺寸见图1;桥梁横断面布置图见图2。

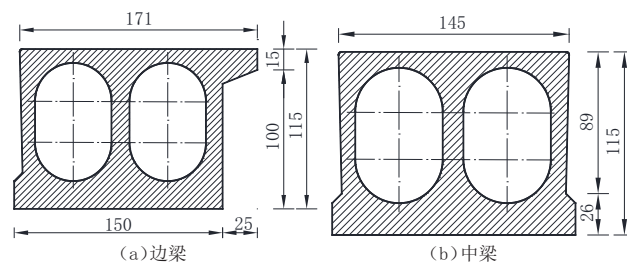


图1 空心板桥主梁截面尺寸(单位:cm)

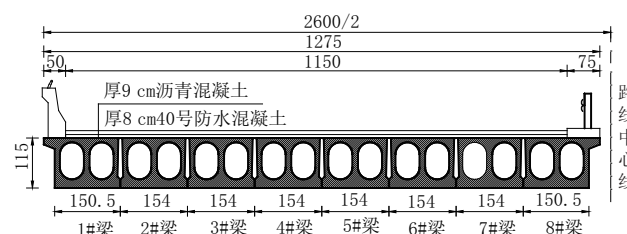


图2 桥梁横断面布置图(单位:cm)

2 精准有限元模型建立

在空心板桥力学性能研究中,三维实体有限元模型展现出显著优势。通过精细化几何建模,可准确构建主梁和铰缝的真实形态;同时基于面-面接触算法来精确模拟构件间的相互作用,特别是铰缝区域的横向传力机制。

2.1 部件建模与材料定义

基于ABAQUS软件特征建模技术,在Part模块中采用“3D+实体拉伸”方式分别建立主梁和铰缝几何模型,铰缝钢筋则采用“3D+直线平面”方式建立,不考虑主梁普通钢筋和预应力钢筋。为准确分析铰缝对桥梁受力性能的影响,模型中主梁、铰缝、钢筋等材料的力学参数均依据工程实际设定,如表1所示。

表1 桥梁材料力学性能参数

部件	材料	弹性模量/ MPa	抗压强度 设计值/MPa	抗拉强度 设计值/MPa
主梁	C40	3.25×10^4	19.1	1.71
铰缝				
铰缝钢筋	HRB400	2.1×10^5	335	335

2.2 接触设置与相互作用

考虑到铰缝与主梁界面的黏结力相对较小^[2],分析中忽略界面黏结效应影响。在Interaction模块中采用“面-面”接触技术来模拟铰缝与主梁界面力学行为,接触属性法向为“硬接触”(防止穿透)、切向为“罚函数”(摩擦系数取0.5);主从面按刚度与网格密度协调原则划分,主梁面设为主面,铰缝面设为从

面,并对从面网格进行局部加密以提升计算精度。铰缝钢筋采用"Embedded Region"方法嵌入混凝土实体内(与混凝土实体绑定),确保钢筋与混凝土协同工作,准确反映连接钢筋在横向传力中的作用。

2.3 网格划分与边界条件

基于分区域网格划分原则,对空心板梁桥各构件实施差异化离散处理,采用结构化网格划分技术对主梁和铰缝进行离散。主梁和铰缝均采用C3D8R实体单元,铰缝钢筋采用T3D2桁架单元。在网格控制方面,采用渐进式种子布设方案,全局基础尺寸设定为200 mm,对应力集中显著的铰缝区域实施局部加密处理,曲率控制参数取0.1,以确保几何特征捕捉精度。通过六面体主导的网格形状和进阶算法技术,在关键区域形成高质量的结构化网格,采用基础网格与局部加密相结合的策略,实现了计算精度与效率的最优平衡。

边界条件根据简支梁实际支承情况设置:模型左端每片梁支座位置施加三向位移约束($U1=U2=U3=0$);右端每片梁支座位置约束横向、竖向位移($U2=U3=0$)。

空心板桥三维实体空间有限元模型见图3。

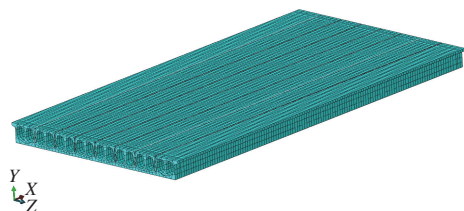


图3 空心板桥三维实体空间有限元模型

3 荷载横向分布系数及计算方法

荷载横向分布系数是表征桥梁结构在活载作用下各主梁协同工作性能的重要指标,其物理意义为单个主梁承担的最大荷载与总荷载的比值。该系数不仅反映了荷载在桥梁横向各承重构件间的分配规律,更是评估桥梁整体受力性能的关键参数。对于装配式空心板桥而言,荷载横向分布系数的准确性直接关系到结构安全评估的可靠性^[14]。

3.1 规范计算方法及其局限性

现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)推荐采用铰接板梁法来计算空心板桥的荷载横向分布系数。该方法假定铰缝连接为理想铰接状态,各板梁间仅通过铰缝传递竖向剪力,忽略弯矩在板梁间的传递作用。然而,实际工程中的铰缝对其相邻构件的转动会形成约束效

应,具有一定的弯矩传递能力(抗弯刚度),导致规范方法存在局限。特别是对于大铰缝构造,其计算结果往往偏离桥梁实际受力状态,难以准确反映桥梁横向传力特征。

3.2 有限元计算方法

三维有限元模型可以真实模拟铰缝与主梁间的约束关联,真实还原铰缝的约束刚度,准确反映空心板桥实际荷载横向传力情况。有限元法计算荷载横向分布系数的步骤如下:

(1)步骤1:模型加载与挠度提取。建立桥梁三维有限元模型,在各主梁跨中位置依次施加单位集中荷载(如1 kN),然后计算每片梁在荷载作用下的跨中挠度值。设单位集中荷载作用于第 j 片主梁时,第 i 片主梁跨中产生的挠度为 y_{ij} 。

(2)步骤2:影响线竖标计算。以第 i 片梁为例,根据步骤1计算的挠度数据 y_{ij} ,计算该梁荷载横向分布影响线竖标值 η_{ij} :

$$\eta_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_j y_{ij}} \quad (1)$$

式中: i 表示所求影响线的梁号; j 表示单位集中荷载作用的梁号。

(3)步骤3:最不利荷载位置及其影响线竖标值确定。采用光滑曲线连接步骤2中求得的各影响线竖标,绘制各梁影响线图。依据力学原理确定车辆荷载的最不利荷载位置,并按照几何关系计算最不利荷载位置处影响线竖标值。以第 i 片梁为例,其最不利荷载位置对应的的影响线竖标可表示为 η_{ik} ,其中 k 表示最不利车辆荷载作用位置。

(4)步骤4:荷载横向分布系数计算。根据步骤3中求得的最不利荷载位置处影响线竖标值,可求得各梁荷载横向分布系数 m_{cq} 。以第 i 片梁为例,其荷载横向分布系数 m_{cq} 为:

$$m_{cq} = \frac{\sum_k \eta_{ik}}{2} \quad (2)$$

4 铰缝构造尺寸影响分析

铰缝构造尺寸是决定装配式空心板桥横向整体性能的关键设计参数。为定量研究其影响机制,本文针对工程中常见的3种铰缝型式(大、中、小)建立了精细化有限元模型,通过系统对比分析,揭示了铰缝尺寸对荷载横向分布规律的显著影响。以本文装配式简支空心板桥(大铰缝)为基准,设计了小铰缝

和中铰缝构造,见图4。

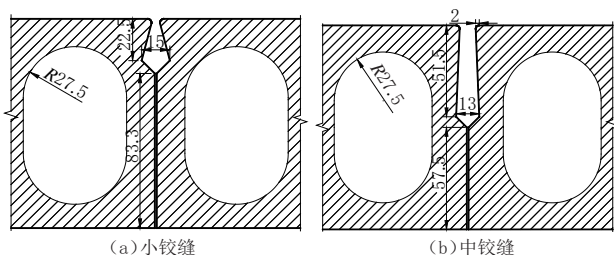


图4 设计中小铰缝构造图(单位:cm)

鉴于桥梁结构的横向对称性,分析结果以1#梁至4#梁为代表进行阐述。

不同铰缝构造下,各主梁荷载横向分布影响线对比见图5。

由图5可见,大铰缝模型影响线与铰接板法计算结果最为接近,横向分布影响线分布最为均匀。这是由于大铰缝具有更大的混凝土咬合面积和更优的力传递路径,表现出最佳的横向荷载传递性能,使得荷载能在各主梁间更为均匀地分布,因此其计算结果与铰接板梁法最为接近。中铰缝性能次之,而小铰缝由于横向连接刚度较弱,导致荷载更集中于直

接受载的主梁,横向分布均匀性最差。因此,在设计中优先采用大铰缝构造是提升空心板桥横向整体性的有效途径。

表2为不同铰缝构造下各主梁荷载横向分布系数。

表2 不同铰缝构造下各主梁荷载横向分布系数

铰缝构造	1#梁	2#梁	3#梁	4#梁
大铰缝	0.328	0.325	0.321	0.310
中铰缝	0.351	0.348	0.325	0.326
小铰缝	0.370	0.369	0.346	0.348

由表2可见,大铰缝模型各主梁荷载横向分布系数分布最为均匀,横向荷载传递性能最好。

5 铰缝损伤参数敏感性分析

铰缝损伤是影响装配式空心板桥横向整体性能的根本原因。为系统评估铰缝损伤对桥梁受力行为的影响,本文基于精细化有限元模型,对铰缝钢筋、损伤长度、损伤程度开展敏感性分析。

5.1 铰缝钢筋

钢筋在铰缝构造中承担着传递拉应力和协调混

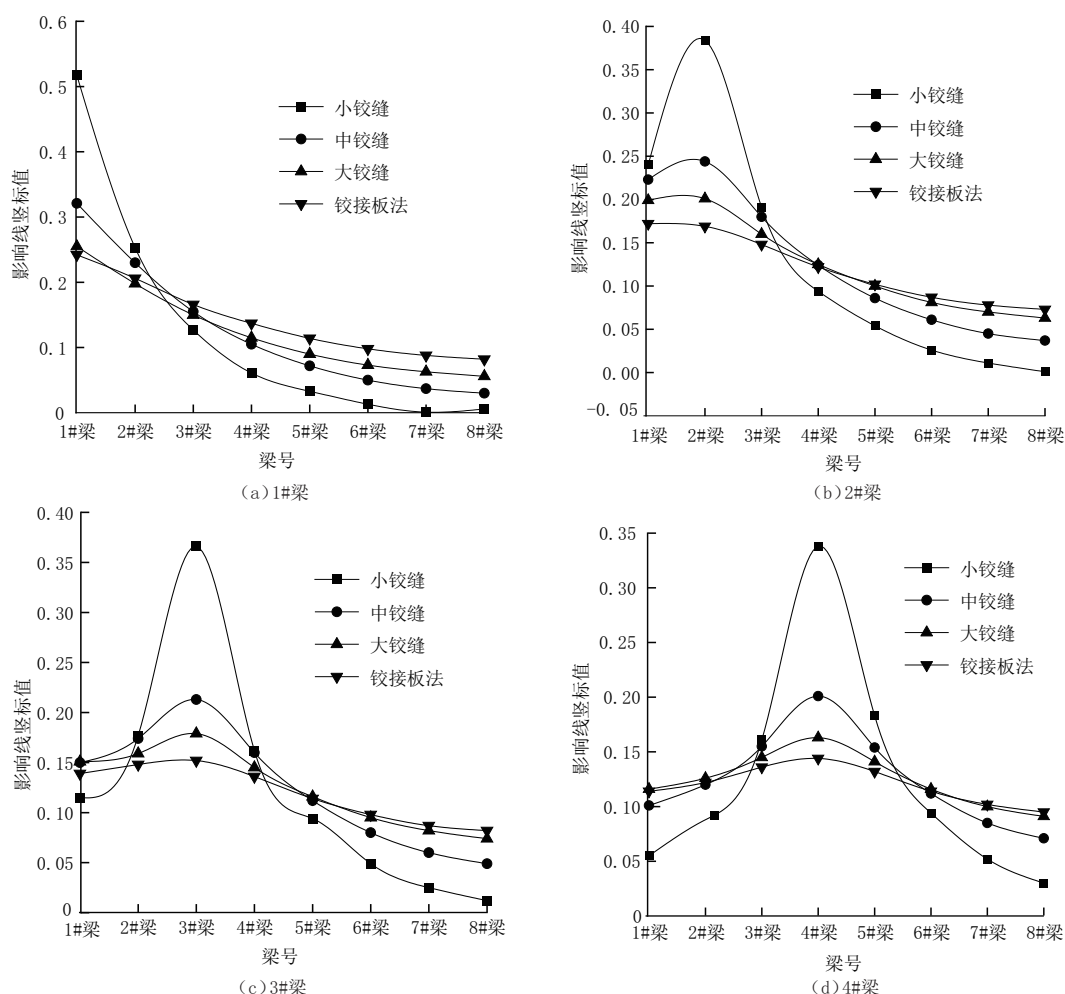


图5 不同铰缝构造下各主梁荷载横向分布影响线对比

凝土变形的重要作用,其配置直接影响着铰缝的横向传力效率。为量化铰缝钢筋对荷载横向分布性能的增强效果,计算了铰缝未损伤工况下有钢筋与无钢筋的各梁荷载横向分布系数,如表3所示。

表3 有无钢筋情况下各梁荷载横向分布系数

铰缝钢筋设置	1#梁	2#梁	3#梁	4#梁
有钢筋	0.328	0.325	0.321	0.310
无钢筋	0.365	0.342	0.335	0.323

由表3可知,设置铰缝钢筋后,桥梁荷载横向分布系数最大降低了10.14%,说明铰缝钢筋能有效提升结构的荷载横向传递能力。这主要源于铰缝钢筋对混凝土开裂的约束作用,其通过抗拉刚度有效增强了铰缝界面的剪切传递能力,从而提升了荷载的横向分布均匀性。

5.2 铰缝损伤程度

采用材料弹性模量折减方式模拟铰缝损伤,以4#与5#梁板间铰缝为对象,损伤长度取为25 m;通过调整弹性模量折减率(0%、25%、50%、75%)来分析铰缝损伤程度的影响,并考虑铰缝钢筋作用。

不同铰缝损伤程度下,各梁荷载横向分布系数如表4所示。

表4 不同铰缝损伤程度下各梁荷载横向分布系数

铰缝损伤程度/%	1#梁	2#梁	3#梁	4#梁
0	0.328	0.325	0.321	0.310
25	0.340	0.337	0.332	0.321
50	0.349	0.346	0.341	0.329
75	0.356	0.352	0.347	0.335

由表4可知,随着铰缝损伤程度的增加(0%~75%),各梁荷载横向分布系数呈现单调上升,整体平均增幅约8.5%,反映出铰缝刚度衰减将显著削弱荷载横向传递能力;其中,损伤初期(0%~25%)的荷载横向分布系数增长最快(平均增幅3.6%)。

5.3 铰缝损伤长度

铰缝损伤长度是表征铰缝病害空间扩展程度的关键参数,其增长会逐步削弱铰缝的连续传力能力。以4#与5#梁板间铰缝为对象,铰缝损伤程度设定为25%(即弹性模量折减25%),考虑铰缝钢筋作用;通过改变损伤长度(0、5、15、25 m)来分析其对各梁横向分布系数的影响。

不同损伤长度下,各梁荷载横向分布系数如表5所示。

由表5可知,随着铰缝损伤长度的增加,各梁荷载横向分布系数呈现单调上升趋势(平均增幅3.4%~3.7%),表明铰缝横向传力能力降低。损伤长度超过

表5 不同损伤长度下各梁荷载横向分布系数

铰缝损伤长度/m	1#梁	2#梁	3#梁	4#梁
0	0.328	0.325	0.321	0.310
5	0.332	0.331	0.326	0.316
15	0.338	0.335	0.329	0.319
25	0.340	0.337	0.332	0.321

15 m后,荷载横向分布系数变化趋于稳定,说明铰缝传力能力的削弱存在临界长度阈值。这是由于损伤长度较小时,未损伤区段仍能通过剪力传递实现荷载重分布;而当损伤扩展至一定范围后,铰缝的传力路径被显著截断,导致荷载向相邻梁板转移的趋势加剧。

6 结 语

(1)铰缝构造尺寸显著影响着荷载横向分布性能。大铰缝构造具有最优的横向荷载传递性能,与铰接板梁法计算结果吻合良好;中、小铰缝模型的荷载横向分布系数依次增大,横向整体性逐级减弱。

(2)铰缝钢筋配置可显著增强桥梁横向整体性。设置铰缝钢筋后,桥梁荷载横向分布系数最大降低10.14%,有效提升了结构的荷载传递效率。

(3)铰缝损伤参数中,损伤程度与损伤长度均会导致荷载横向分布系数增大。损伤初期(0%~25%)的荷载横向分布系数增长最快;损伤长度超过15 m后,荷载横向分布系数变化趋于稳定,说明铰缝传力能力的削弱存在临界长度阈值。

参考文献:

- [1] 邹育祥.既有空心板梁桥横向预应力碳纤维板加固技术研究[J].工程技术研究,2024,9(13):31-33.
- [2] 饶珂,姜福香,秦艺鸣.装配式空心板桥铰缝失效机理分析[J].城市道桥与防洪,2023(6):118-120.
- [3] 刘永超.空心板梁桥横向刚度对主梁受力性能影响分析[J].北方交通,2021(11):44-47.
- [4] 康爱红,顾倩倩,唐站站,等.空心板梁桥铰缝疲劳损伤试验及评估方法研究[J].河南科技大学学报(自然科学版),2023,44(2):65-72.
- [5] 刘旭政,郭维,吴刚,等.铰缝损伤对装配式空心板桥受力性能影响研究[J].华东交通大学学报,2021,38(3):23-30.
- [6] 孙璐,李玉萍.不封闭交通桥梁铰缝加固技术在桥梁施工中的应用[J].交通世界,2020(31):128-129.
- [7] 宋国昕.基于荷载横向分布影响线的空心板桥铰缝损伤识别方法研究[D].大连:大连理工大学,2020.
- [8] 徐亚林,顾万,肖鹏,等.基于协同工作系数的空心板桥铰缝性能评估[J].扬州大学学报(自然科学版),2020,23(3):59-64.
- [9] 周明晖,郝爽,赵辉,等.基于活载横向分配的空心板桥铰缝损伤分级[J].城市道桥与防洪,2020(8):271-275.

(下转第87页)