

农村RC梁桥典型病害调查与相关性分析研究

林九龙*, 刘 勇#, 赵 滕, 于瑞祥

山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2025年10月18日; 录用日期: 2025年11月9日; 发布日期: 2025年11月24日

摘 要

为了探究农村钢筋混凝土梁桥病害在不同结构形式下的演化规律和病害间的相关性, 本研究选取农村环境中最为普遍的整体现浇梁桥和预制空心板梁桥进行对比。通过连续5年对489座桥梁的现场检测, 获得了桥梁上部结构、下部结构和桥面系详细的病害数据。本研究采用斯皮尔曼(Spearman)等级相关系数法构建桥梁各部分病害相关性矩阵, 对桥梁系统内部及跨系统的病害关联网络进行解析, 量化了桥龄、环境及荷载等外部条件因素的影响。研究表明, 两类桥型的退化路径和规律存在本质差异: 整体现浇梁桥的退化主要因为下部结构不均匀沉降引发的主梁的开裂及材料的劣化; 预制空心板梁桥的退化则是由于铰缝失效, 进而造成上部承重构件的“单板受力”和桥面纵向贯穿裂缝等连锁反应, 尤其在重载交通情况下表现得尤为明显。本研究阐明了不同结构形式桥梁的病害传导机理, 为制定差异化的养护策略提供了关键理论与数据支持。

关键词

整体现浇梁桥, 预制空心板梁桥, 病害调查, 相关性分析, 斯皮尔曼系数, 差异化养护

Investigation and Correlation Analysis of Typical Diseases of Rural RC Beam Bridges

Jiulong Lin*, Yong Liu#, Teng Zhao, Ruixiang Yu

School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

Received: October 18, 2025; accepted: November 9, 2025; published: November 24, 2025

Abstract

In order to explore the evolution laws of diseases of rural reinforced concrete beam Bridges under

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 林九龙, 刘勇, 赵滕, 于瑞祥. 农村 RC 梁桥典型病害调查与相关性分析研究[J]. 土木工程, 2025, 14(11): 2687-2702. DOI: 10.12677/hjce.2025.1411288

different structural forms and the correlations among diseases, this study selects the most common integral cast-in-place beam bridge and prefabricated hollow slab beam bridge in rural environments for comparison. Through on-site inspections of 489 Bridges over five consecutive years, detailed disease data on the superstructure, substructure and deck system of the Bridges were obtained. In this study, the Spearman rank correlation coefficient method was adopted to construct the disease correlation matrix of each part of the bridge, analyze the disease correlation network within the bridge system and across systems, and quantify the influence of external conditions such as bridge age, environment and load. The research results show that there are essential differences in the degradation paths and laws of the two types of Bridges: The degradation of the integral cast-in-place beam bridge is mainly due to the cracking of the main beam and the deterioration of materials caused by the uneven settlement of the substructure; The degradation of prefabricated hollow slab beam Bridges is due to the failure of hinge joints, which in turn causes a chain reaction of “single plate force” on the upper load-bearing components and longitudinal through cracks on the bridge deck, especially under heavy traffic conditions. This study clarifies the disease transmission mechanism of Bridges with different structural forms, providing key theoretical and data support for formulating differentiated maintenance strategies.

Keywords

Integral Cast Beam Bridge, Prefabricated Hollow Slab Beam Bridge, Disease Investigation, Correlation Analysis, Spearman's Coefficient, Differentiated Maintenance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为道路网络的关键节点，桥梁的技术状况直接影响道路网络的通行和运营安全，极大地影响区域经济的发展。我国农村公路桥梁保有量巨大，且超过半数钢筋混凝土梁桥。由于钢筋混凝土梁桥较高的适用性和经济性，广大农村交通网络中的新增桥梁也多为钢筋混凝土梁桥。然而，我国农村绝大多数桥梁为 1965 年至 1999 年间建造，这批桥梁由于建造年代较早、设计标准偏低及养护投入不足等历史遗留问题，普遍存在桥梁结构性能衰退的问题，导致安全风险逐年上升。如果能够预测桥梁的未来使用性能，将会帮助桥梁管理部门提前进行决策规划，改善桥梁管养决策困难的局面[1]。

在众多桥型中，整体现浇 RC 梁桥与预制拼装空心板简支梁桥是两种最具代表性的结构形式。前者结构整体性强，而后者则施工高效，但其整体性能高度依赖于铰缝等连接构造的可靠性。当前，养护实践中常对这两种结构迥异的桥梁采取相似的管理策略，缺乏针对性的精细化养护方案。这种“一刀切”的模式导致结构的潜在病害未能被早期识别与干预，最终演变为严重的结构缺陷。行业数据显示，预制板桥的铰缝失效与现浇梁桥的主梁裂缝是最典型的损伤模式，且前者病害发生率显著更高。

随着乡村振兴战略的推进，农村交通量，特别是重载车辆比例的持续增长，对老化的桥梁结构构成了严峻挑战。在此背景下，系统研究并厘清不同结构形式桥梁特有的病害发展规律及其内在关联机制，对于推动桥梁养护从“被动修复”向“主动预防”、从“粗放管理”向“精准养护”的模式转变，具有重要的理论与实践意义[2]。

因此，本研究旨在通过对两类典型桥梁的大样本对比分析，运用非参数统计方法，揭示其在病害类型、分布及关联性上的内在差异。研究成果将为解决农村桥梁养护中的关键技术问题、制定差异化的养护决策提供直接、科学的依据。

2. 桥梁分部病害调查与分组数据

2.1. 桥梁概况与调查方法

本研究以山东省某地级市农村公路网为研究范围，系统选取 489 座钢筋混凝土梁桥作为研究样本。定期检测报告中涵盖的主要内容包括桥梁检测项目、桥梁检测用具及方法、技术状况计算过程及结果、桥梁病害分析、严重部件及养护维修建议等[3]。为确保研究结论的科学性与代表性，样本选取综合考虑了地域分布、结构类型、建设年代及使用环境等因素，覆盖了平原、山区及临近水域等不同地理环境条件下的桥梁，力求全面反映区域桥梁结构的典型特征。

依据桥梁结构形式的核心差异，将全部样本划分为两个对比组：

第一组(现浇梁桥组)共包含 341 座桥梁。该组桥梁上部结构均为整体现场浇筑的钢筋混凝土矩形实心板梁或 T 形梁，结构整体性强，受力性能良好。样本桥梁的建设年代跨度较大，分布于 1965 年至 1999 年间，体现了我国不同历史时期桥梁设计与施工的技术特点。组内桥梁平均桥龄为 43 年，原设计荷载等级主要为公路-II级或相应时期的旧标准荷载。该组桥梁是该地区上世纪农村公路网的主力桥型，其长期服役后的性能退化规律具有重要的研究价值[4]。

第二组(预制板桥组)共包含 148 座桥梁。其上部结构采用预制钢筋混凝土空心板，通过后浇混凝土铰缝及桥面铺装层连接成整体，属于典型的装配式结构。这些桥梁的建设年代相对较晚，集中于 1973 年至 2005 年之间，平均桥龄为 38 年，设计荷载等级同样以公路-II级为主。该组桥梁代表了更注重施工效率与经济性的桥型，其连接部位的耐久性与整体性是研究的关注重点[5]。

为最大限度控制无关变量，突出结构形式本身对病害发展规律的影响，本研究在样本筛选时对两组桥梁的关键参数进行了匹配：

桥龄匹配：两组样本的平均桥龄差异为 5 年，控制在总平均桥龄(约 40 年)的 12.5%以内，符合对比研究要求；

环境条件控制：两组中临近水域、处于重度冻融循环区域或腐蚀性环境的桥梁比例经过统计调整，基本保持一致，以排除特殊环境因素的干扰；

荷载水平平衡：通过查阅地方交通量历史记录与现场调研，确保两组桥梁所服务的道路等级、历史交通量及重车比例处于相当水平。

其关键参数分类见表 1。

Table 1. Classification of key parameters
表 1. 关键参数分类

参数	现浇梁桥组	预制板桥组
样本数量(座)	341	148
建设年代	1965-1999	1973-2005
平均桥龄(年)	43	38
设计荷载等级	公路-II级(为主)	公路-II级(为主)
上部结构形式	整体浇筑实心板/T 梁	预制空心板 + 铰缝连接

调查方法采用人工目检与仪器检测相结合的方式，严格执行《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21-2011)的规定。具体流程如下：

资料调阅：收集样本桥梁的设计图纸、竣工资料及历次检测报告，为现场检测提供技术背景；

现场普查：对桥梁的上部结构、下部结构、桥面系及附属设施进行全方位目视检查，初步识别并记录所有可见病害；

仪器精检：

裂缝检测：使用裂缝观测仪与钢卷尺精确测量主要裂缝的宽度、长度与走向，并现场标注于桥梁构件示意图上；

材料性能检测：使用钢筋锈蚀仪对混凝土保护层内的钢筋进行半电位扫描，定性判断锈蚀风险区域；使用回弹仪对混凝土强度进行抽样检测，辅助评估材料劣化程度；

病害量化：对桥面铺装层的网状裂缝、坑槽等分散病害，采用网格法进行拍照和统计，计算破损面积率[6]；

数据录入与归类：将现场采集的病害信息(类型、位置、尺寸、照片)及检测数据统一录入桥梁病害数据库，并按上部结构(主梁、铰缝)、下部结构(墩、台、基础)、桥面系(铺装、伸缩缝、栏杆)三大系统进行归类存储，为后续的分部系相关性分析奠定数据基础。

2.2. 分部系典型病害分布特征对比

通过对泰安市 489 座农村钢筋混凝土梁桥的现场精细调查，本研究获取了系统的一手病害数据。依据桥梁结构体系传力路径与构件功能特点，将病害划分为上部结构、下部结构及桥面系三个子系统进行统计分析，重点对比整体现浇梁桥与预制装配式空心板桥在上部结构方面的典型病害差异。两类桥型上部结构典型病害发生率对比如图 1 所示。

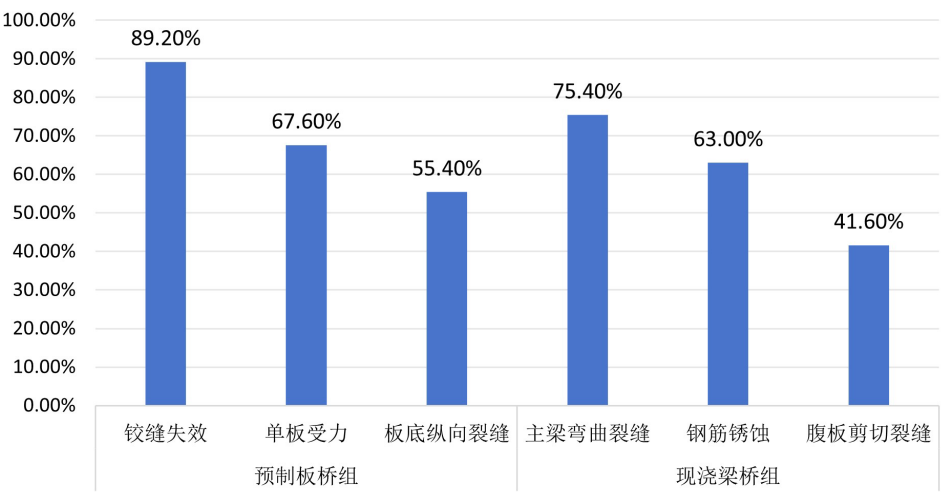


Figure 1. Comparison of the incidence rates of typical diseases of the superstructures of two types of bridges
图 1. 两类桥型上部结构典型病害发生率对比

2.2.1. 上部结构病害对比

上部结构作为直接承受车辆荷载并传递至下部结构的关键承力子系统，其病害特征集中反映了结构的力学响应状态与材料耐久性能。本研究发现，两类桥型在上部结构表现出迥异的病害模式、分布规律与损伤机理。

(1) 现浇梁桥组病害特征

现浇整体式钢筋混凝土梁桥的上部结构病害主要发生于主梁本体，体现了其作为连续整体受力的结构形态。典型病害模式包括：

① 主梁跨中竖向弯曲裂缝：为该类桥型最高发的病害形式，发生率达 75.4%(257/341 座)。裂缝主要分布于主梁底板及下翼缘区域，宽度普遍介于 0.2 mm~1.0 mm 之间，是梁体在恒、活载共同作用下正弯矩区抗弯承载力不足或混凝土材料疲劳劣化的典型标志。此类裂缝导致梁体有效截面高度折减，显著影响结构的抗弯刚度与承载能力。

② 梁端腹板斜向剪切裂缝：发生率为 41.6% (142/341 座)。裂缝多自支座边缘以约 45°向跨中扩展，属主拉应力超限引起的结构性斜裂缝，反映了梁端区域剪 - 弯复合受力下的薄弱性。该类裂缝对构件的抗剪承载力构成严重威胁，且在重载交通反复作用下易进一步扩展。

③ 梁底混凝土保护层剥落与钢筋锈蚀：该复合型病害在桥龄超过 40 年的结构中尤为显著，发生率为 63.0%(215/341 座)。成因主要为混凝土碳化深度超过保护层厚度及氯离子侵入，引发钢筋电化学锈蚀。锈胀效应导致保护层崩落，加速材料性能退化，形成恶性循环，严重削弱结构的耐久性与服役安全。

(2) 预制板桥组病害特征

预制装配式空心板桥的上部结构病害突出表现为“弱连接”结构体系的典型缺陷，病害高度集中于铰接节点与单板层面：

① 铰缝失效：为该类桥型最典型且危害最大的病害，发生率达 89.2%(132/148 座)。具体表现为铰缝混凝土破碎、脱落，联结功能丧失，以及雨水顺缝下渗引发的析白、锈迹等现象。铰缝失效导致荷载横向分布能力大幅降低，是体系性能退化的关键起始点。

② 单板受力：作为铰缝失效的直接后果，发生率为 67.6% (100/148 座)。当铰缝无法有效传递剪力时，车轮荷载由单块空心板独立承担，导致其实际弯矩远超设计假定。该受力模式是预制板桥在正常使用荷载下发生结构性破坏的主要原因。

③ 板底纵向裂缝及伴随锈蚀：在单板受力模式下，空心板底弯矩显著增大，诱发沿主筋方向的纵向弯曲裂缝，发生率为 55.4% (82/148 座)。裂缝成为水分与侵蚀介质渗入通道，加速内部钢筋锈蚀，锈胀作用进一步加剧混凝土开裂，最终导致板体承载力丧失。

2.2.2. 下部结构病害对比

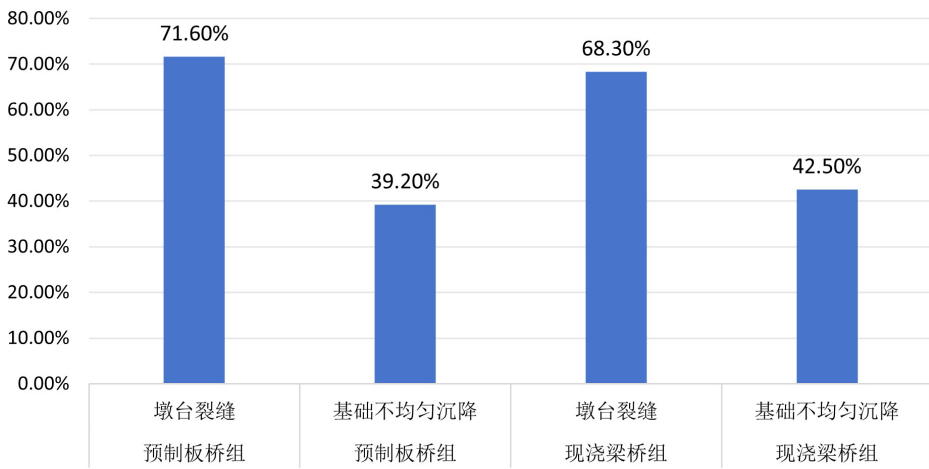


Figure 2. Comparison of the incidence rates of typical diseases of the substructures of two types of Bridges
图 2. 两类桥型下部结构典型病害发生率对比

下部结构作为桥梁的支承体系，其技术状况直接影响整体结构的受力安全与长期稳定性。本研究表明，尽管现浇梁桥与预制板桥在下部结构的表现病害类型上具有一定相似性，但其成因机制与发展规律

存在本质区别,主要体现在上部结构工作状态对下部结构的反馈作用方面。两类桥型下部结构典型病害发生率对比如图2所示。

(1) 共有的典型病害类型

现场调查表明,两类桥梁下部结构的病害主要集中于桥墩、桥台及基础部位,共性病害包括:

① 墩台身竖向及斜向裂缝:为该部位最高发的病害类型,现浇梁桥组与预制板桥组的发生率分别为68.3%(233/341座)和71.6%(106/148座)。裂缝成因主要包括混凝土收缩、温度梯度作用以及墩台在偏心力或弯矩作用下的应力集中。竖向裂缝多分布于墩柱表面,斜向裂缝常见于桥台翼墙或墩身弯矩较大区域,是结构受力异常的重要表征[7]。

② 基础不均匀沉降:现浇梁桥组与预制板桥组的发生率分别为42.5%(145/341座)和39.2%(58/148座)。其主要诱因为地基土体固结、软土地基剪切滑移或地下水位变化。不均匀沉降导致墩台发生倾斜及转动,进而引起上部结构产生次内力,是诱发梁体开裂及桥面线形变化的重要外因。

③ 桥台前墙开裂伴台背下沉:此类病害在台后填土较高的桥台中较为突出(合计发生率约31%)。台背土压力、水分渗入及冻胀效应共同作用,导致前墙出现水平或斜向裂缝,并伴随台帽不均匀沉降,严重时可引发伸缩装置挤压损坏或桥头跳车。[8]

④ 基础局部冲刷与掏空:多见于跨河、跨沟桥梁,约25%的样本存在该类病害。水流冲刷作用导致基础周围土体流失、基底掏空甚至基桩外露,显著降低基础的竖向与水平承载力,对结构稳定构成严重威胁。

(2) 结构形式差异对病害机理的影响

尽管病害表象相似,预制板桥下部结构的病害发展机理较现浇梁桥更为复杂。预制板桥特有的“铰缝失效”这一上部结构病害,对其下部结构工作性能产生显著的反馈影响。

当铰缝失效引发“单板受力”时,车辆荷载无法实现在横桥向的有效分布,转而集中于少数几块板梁及其下方支承区域。这种荷载横向重分布效应导致下部结构承受严重的局部冲击与显著偏载,具体表现为:

盖梁损伤:在集中轮载反复作用下,盖梁顶板相应位置易发生混凝土压溃、磨损或开裂;

桥墩性能退化:偏心荷载加剧墩身的弯曲变形,促使既有裂缝扩展、新裂缝生成,并加速材料疲劳;

支座工作状态异常:易引发支座局部脱空、剪切变形超限及不均匀损坏等问题[8]。

因此,预制板桥下部结构的病害实为上部结构铰缝失效与自身直接荷载响应(如地基沉降、环境侵蚀)共同作用的结果。反观现浇梁桥,因其结构整体性强、荷载传递路径明确,下部结构病害更多源于地基变形、材料性能退化及环境作用,受上部结构工作状态的耦合影响相对较弱。

2.2.3. 桥面系病害对比

桥面系作为直接承受车轮荷载和环境作用的部位,其技术状况直接影响行车的安全性、舒适性及耐久性。本研究发现,尽管两组桥梁的桥面系均存在铺装层破损、伸缩缝损坏等常见病害,但其病害的分布模式、成因及与主体结构的关联性存在系统性差异,这些差异直接反映了上部结构受力性能的本质不同。

两类桥型桥面系典型病害发生率对比如图3所示。

(1) 现浇梁桥组桥面系病害特征

现浇整体式梁桥的桥面系病害与其整体受力特性密切相关,主要表现为与主梁变形协调的追随性损坏:

① 与主梁裂缝位置对应的铺装层裂缝:这是最具代表性的病害模式。调查发现,在68.9%(235/341座)的现浇梁桥中,桥面铺装层上出现了沿主梁腹板正上方的纵向裂缝。该裂缝是下部主梁发生竖向弯曲变形(产生裂缝后刚度降低,挠度增大)或扭转时,桥面铺装层因无法协调变形而被拉裂的结果[9]。此类裂

缝清晰地标示了下部主梁的受力不利位置，是主体结构性能退化的“表面映射”。

② 伸缩缝破损：发生率较高(59.2%，202/341 座)，主要表现为止水带老化破损、型钢开裂、混凝土锚固区碎裂及缝内堵塞。破损原因除材料老化外，主要与墩台的不均匀沉降、移位以及主梁的端部转角变形超限有关。

③ 护栏与缘石损坏：多为车辆撞击所致(占比约 35%)，但也存在因主梁横向振动过大或桥面板位移导致的护栏底座混凝土开裂。

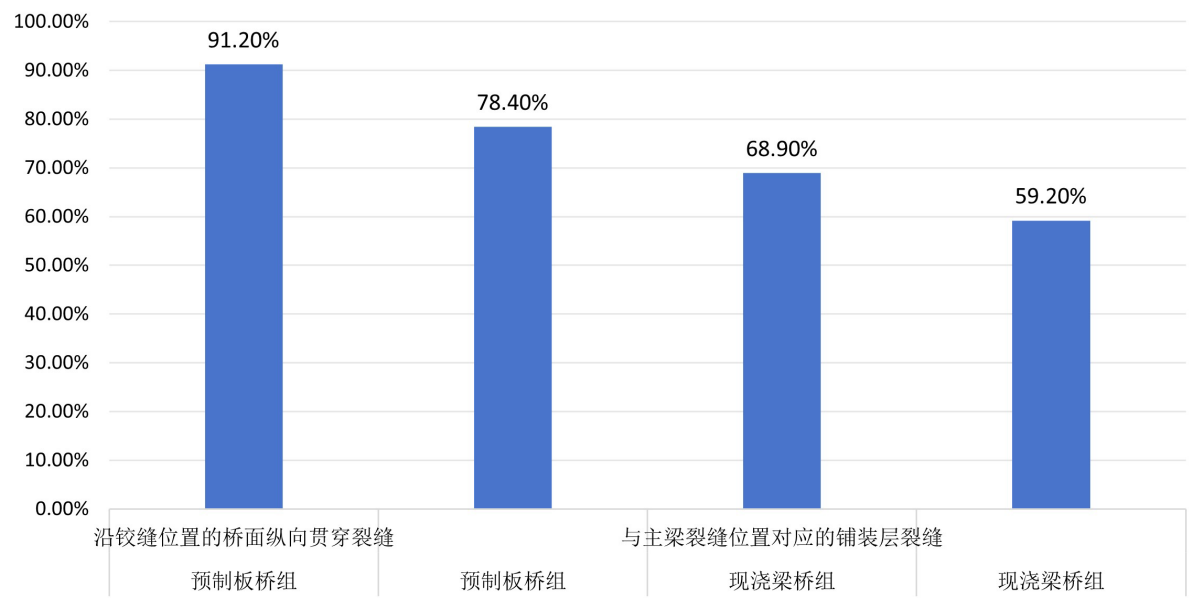


Figure 3. A comparison chart of the incidence rates of typical diseases of two types of bridge deck systems

图 3. 两类桥型桥面系典型病害发生率对比图

(2) 预制板桥组桥面系病害特征

预制板桥的桥面系病害则强烈地体现了其装配式结构的“铰缝核心”问题，病害具有鲜明的特征性和指示性：

① 沿铰缝位置的桥面纵向贯通裂缝：这是预制板桥最特征性、最具指示意义的病害，在所调查的桥梁中，其出现率高达 91.2%(135/148 座)。该裂缝严格沿铰缝线位发展，通常贯穿整个桥面宽度。其根本成因并非铺装材料本身，而是下部铰缝构造失效。当铰缝失去传力能力后，相邻空心板在荷载作用下产生** differential vertical displacement (differential 竖向位移)**，即“错台”趋势，这种反复的相对变形极易将上覆的桥面铺装层拉裂。因此，这条纵向裂缝是判断铰缝工作状态的直观、可靠的表面证据。

② 坑槽、松散与网裂：这些病害在预制板桥中的普遍性和严重程度(出现率 78.4%，116/148 座)显著高于现浇梁桥。其成因复杂：一方面，沿铰缝的纵向裂缝为水进入结构内部提供了通道，在行车荷载动水压力作用下引发铺装层材料剥落(水损害)；另一方面，下部空心板在“单板受力”下的过大变形加剧了铺装层的疲劳损伤，导致材料加速松散和破坏。

2.3. 影响因素筛选与量化

2.3.1. 公共影响因素的筛选与量化

为系统探究不同类型桥梁病害间的内在关联及其主导影响因素，本研究基于现场检测数据，对影响

桥梁技术状况的潜在因素进行了科学筛选与定量化处理。所有量化指标将作为后续斯皮尔曼相关性分析的输入变量，以期客观揭示变量间的单调关系。

公共影响因素是指对两类桥梁结构均可能产生普遍作用的宏观因素。本研究主要筛选并量化以下三项指标：

① 桥龄(Age):

定义为桥梁自建成通车至检测年份的时间间隔，以“年”为单位作为连续变量进行量化。该指标是反映材料老化、性能退化及疲劳累积等效应的关键参数。

② 环境湿度因子(Humidity Factor):

为表征桥位环境侵蚀性的综合指标，依据桥梁所处局部环境条件划分为三个等级并进行序数量化：

等级 1 (干燥)：桥位地处高地，远离水域，排水条件良好；

等级 2 (潮湿)：桥位临近河流、水库或沟渠，或处于地势低洼、易积水区域；

等级 3 (临水)：桥梁直接跨越水域，桥墩、基础等下部结构长期处于高湿度环境或水位变动区。

该因子主要用于反映环境水分对混凝土碳化、钢筋锈蚀及冻融循环破坏的促进作用。

③ 交通荷载等级(Traffic Load Level):

作为历史荷载状况的代理指标。因难以获取精确历史交通量数据，本研究结合现场调研(包括路面车辙与磨损状况、邻近区域经济产业特征、重车通行迹象等)及地方交通资料，将其划分为三个等级并进行序数量化：

等级 1 (轻)：以小型客车、农用车通行为主，未见明显重车通行痕迹；

等级 2 (中)：存在定期通行的重车(如货运卡车、公交车)，但频率较低；

等级 3 (重)：属主要运输干道，重车交通频繁，或周边分布有矿区、石料场等重交通源。

该指标用于反映反复荷载作用对结构疲劳损伤与累积变形的长期影响。

2.3.2. 特异性病害指标的筛选与量化

为精确表征桥梁各子系统病害的严重程度，本研究针对上部结构、下部结构及桥面系筛选了特异性病害指标，并制定了科学的量化方法，以服务于后续相关性分析。

(1) 上部结构(Superstructure)

最大裂缝宽度(Max Crack Width)：于主要承重构件(主梁或空心板)上选取最具代表性的受力裂缝，采用裂缝观测仪测量其最大宽度，以毫米(mm)为单位记录，用于评估构件开裂严重程度与受力状态[9]。

钢筋锈蚀率(Rebar Corrosion Ratio)：采用钢筋锈蚀仪对选定构件进行普查，统计钢筋锈蚀电位超过临界值的测点数量，计算其占总测点的百分比(%)，以此定量评估内部钢筋锈蚀范围及活性。

铰缝损坏程度(Joint Damage Degree)：(此为预制板桥特异性指标)。依据铰缝混凝土的破碎、脱落及渗水状况，将其技术状态划分为 4 个等级进行序数量化：

0：完好；

1：轻微破损(表面裂纹，无脱落)；

2：明显破碎/渗水(局部脱落，可见渗水痕迹)；

3：严重失效(大面积脱落，完全失去传力能力)。

(2) 下部结构(Substructure)

墩台沉降差(Settlement Difference)：采用精密水准仪测量相邻墩台帽梁顶面或桥台间的相对高差，以毫米(mm)为单位记录，该指标直接反映基础的不均匀沉降状况[10]。

裂缝长度(Crack Length)：统计墩、台身出现的结构性裂缝(主要包括竖向及斜向裂缝)的总延伸长度，以米(m)为单位记录，用以量化墩台开裂的整体严重程度。

(3) 桥面系(Deck System)

桥面裂缝率(Deck Cracking Ratio): 采用网格法, 将桥面划分为标准单元, 计算铺装层上网状裂缝与纵向裂缝所占面积之和与总面积的比值, 以平方米/平方米(m^2/m^2)或百分比(%)表示, 用于评价桥面破损的密集程度[11]。

伸缩缝损坏程度(Expansion Joint Damage Degree): 根据伸缩缝锚固区混凝土破损、钢构件锈蚀与断裂、密封性失效等情况, 将其技术状态划分为 4 个等级:

- 0: 完好(无损坏, 功能正常);
- 1: 轻微损坏(局部锈蚀或密封老化, 功能未受影响);
- 2: 中等损坏(锚固混凝土开裂、钢件变形, 功能部分丧失);
- 3: 严重损坏(构件断裂、严重错台, 功能完全丧失)。

3. 基于斯皮尔曼方法的病害相关性对比分析

3.1. 斯皮尔曼相关性分析法

为科学揭示农村钢筋混凝土梁桥各类病害之间及其与影响因素的内在联系, 本研究采用斯皮尔曼等级相关系数(Spearman's rank correlation coefficient, ρ)作为核心分析方法。该方法由 Charles Spearman 提出, 属于非参数统计方法, 用于评估两个变量之间单调关系(monotonic relationship)的强度与方向。其核心优势在于不要求观测数据服从特定概率分布(如正态分布), 且对异常值(Outliers)不敏感, 这一特性使其特别适合处理工程检测中获得的、往往存在偏差且分布未知的数据集[12]。

斯皮尔曼相关系数的计算基于变量的秩次(Rank)而非原始数值。计算过程如下: 首先将两个变量 X 和 Y 的观测值分别按从小到大的顺序独立编秩, 记 $R\{X_i\}$ 和 $R\{Y_i\}$ 为第 i 对观测值的秩次。若存在相同观测值, 则取秩次平均值。随后计算每一对观测值的秩次之差 $d_i = R\{X_i\} - R\{Y_i\}$ 。斯皮尔曼相关系数 ρ 的计算公式为:

$$\rho = 1 - \left[6 \times \sum (d_i)^2 \right] / \left[n(n^2 - 1) \right]$$

式中:

d_i 表示第 i 对观测值的秩次差;

n 表示样本量(观测值对数);

$\sum$ 表示对所有观测对的 d_i^2 求和。

ρ 的取值范围为 $[-1, 1]$:

$\rho > 0$: 表示两变量之间存在正相关关系, 即一个变量的秩次随另一个变量秩次的增加而增加, 呈现单调递增趋势;

$\rho < 0$: 表示两变量之间存在负相关关系, 即一个变量的秩次随另一个变量秩次的增加而减少, 呈现单调递减趋势;

$\rho = 0$: 表示两变量之间无单调相关关系。

$|\rho|$ 的绝对值大小表示相关性的强弱程度, 通常采用以下划分标准:

$|\rho| \geq 0.8$: 极强相关

$0.6 \leq |\rho| \leq 0.8$: 强相关

$0.4 \leq |\rho| \leq 0.6$: 中等相关

$0.2 \leq |\rho| \leq 0.4$: 弱相关

$|\rho| < 0.2$: 极弱相关或无相关

然而，仅有关联强度不足以保证结果的可靠性，必须进行显著性检验以判断所观察到的相关性是否具有统计学意义。本研究采用 t 检验进行显著性判断，其原假设(H_0)为：总体斯皮尔曼相关系数为 0。通过计算得出的 p 值与显著性水平 α (取 $\alpha = 0.05$)进行比较：

若 $p < 0.05$ ，则在 95%置信水平下拒绝原假设，认为两个变量之间存在显著的单调相关性；

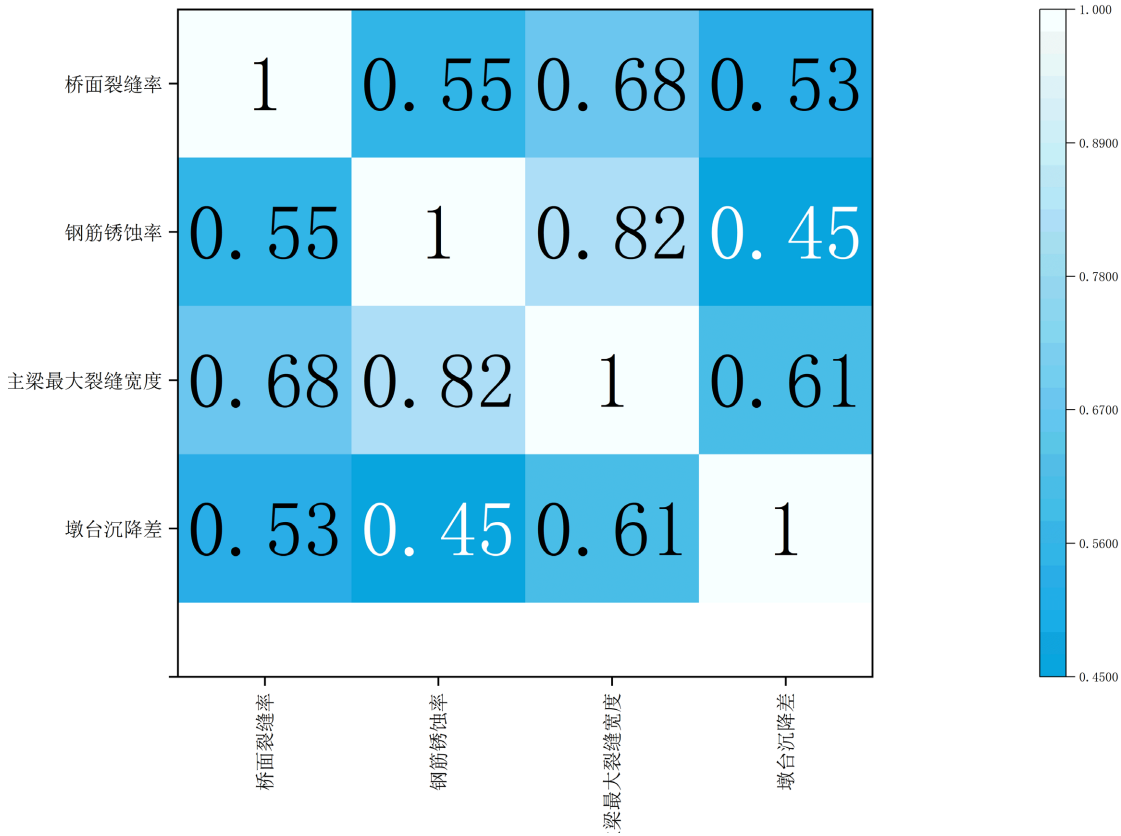
若 $p \geq 0.05$ ，则没有充分证据拒绝原假设，不能认为两变量间存在显著的单调相关性。

本研究将同时报告 ρ 值与 p 值，以全面表征变量间关系的强度与统计显著性。所有计算均通过 Python 的 SciPy 统计库(version 1.10.1)实现，确保了计算过程的准确性与可重复性。

3.2. 关联性分析

3.2.1. 现浇梁桥组内部病害关联性分析

基于 341 座现浇梁桥的现场检测数据，本研究采用斯皮尔曼等级相关分析法对上部结构、下部结构及桥面系病害指标进行了相关性分析，并绘制了病害相关性热力图(图 4)。分析结果系统揭示了该类桥梁以主梁本体损伤为核心、多系统联动的退化机制[13]。



注：图中应为颜色梯度表示的相关性矩阵，深蓝色表示强正相关，白色表示无相关性；每个单元显示斯皮尔曼相关系数 ρ 值，并以星号标注显著性水平(* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)。

Figure 4. Heat map of disease correlation of cast-in-place beam bridge groups
图 4. 现浇梁桥组病害相关性热力图

(1) 上部结构内部及与桥面系的强关联性

分析结果表明，上部结构内部病害间及与桥面系病害间存在显著关联：

主梁最大裂缝宽度与钢筋锈蚀率呈显著强正相关($\rho = 0.82, p < 0.001$), 表明裂缝为侵蚀介质提供通道, 加速钢筋锈蚀, 而锈胀效应又进一步加剧混凝土开裂, 形成相互促进的退化循环。

主梁最大裂缝宽度与桥面裂缝率呈中等强度正相关($\rho = 0.68, p < 0.001$), 说明主梁开裂导致结构刚度退化、变形增大, 进而引起桥面铺装层产生追随性裂缝, 体现了现浇梁桥作为整体受力体系的传力路径一致性。

(2) 下部结构对上部结构的驱动作用

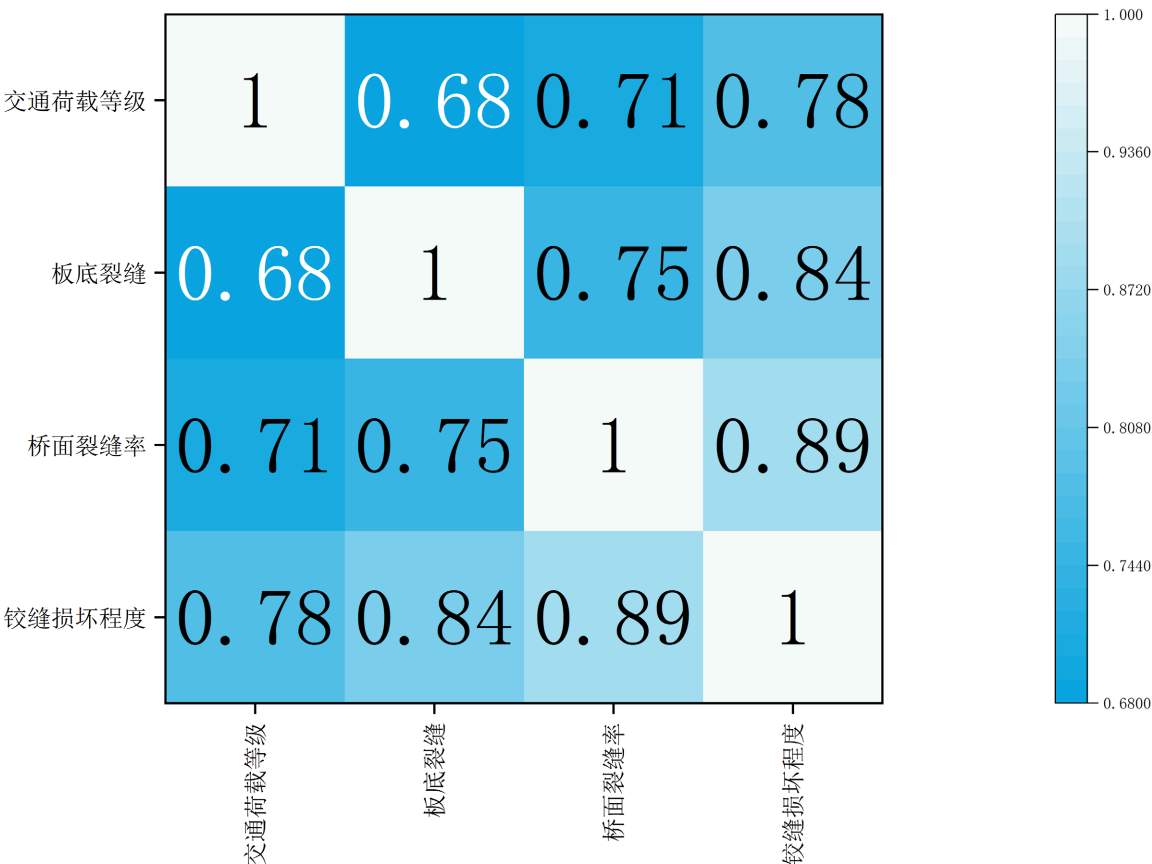
相关性分析进一步揭示了下部结构病害对上部结构的显著影响:

墩台沉降差与主梁最大裂缝宽度呈显著正相关($\rho = 0.61, p < 0.001$), 表明基础不均匀沉降引起结构内力重分布, 在主梁中产生附加应力, 成为诱发梁体开裂的关键外部因素。

墩台沉降差与桥面裂缝率亦呈正相关($\rho = 0.53, p < 0.001$), 证实下部结构变形通过改变支承条件直接影响上部结构整体工作状态, 导致桥面系发生相应损坏。

上述相关性结果表明, 现浇梁桥的病害发展呈现出清晰的“下部结构 - 上部结构 - 桥面系”链式传导路径, 体现了其作为整体受力结构的行为特性。相关性热力图如图 4 所示。

3.2.2. 现浇梁桥组内部病害关联性分析



注: 图中采用颜色梯度表示相关性强度, 深蓝色表示强正相关, 白色表示无相关性, 深红色表示强负相关; 突出显示以“铰缝损坏程度”为中心形成的强相关集群; 每个单元标注斯皮尔曼相关系数 ρ 值, 并以星号标示显著性水平(* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)。

Figure 5. Heat map of the correlation between diseases of prefabricated slab bridge groups
图 5. 预制板桥组病害相关性热力图

基于 148 座预制装配式空心板桥的现场检测数据, 本研究采用斯皮尔曼等级相关分析法对各类病害指标进行了相关性分析, 并绘制了病害相关性热力图(图 5)。分析结果充分验证了本研究的核心假设, 表明该类桥梁的退化机制始于铰缝失效, 并由此引发多系统连锁病害反应。

(1) 铰缝失效的核心枢纽作用

分析结果明确显示了铰缝损坏在病害体系中的中心地位:

铰缝损坏程度与桥面裂缝率呈现出极强的正相关关系($\rho = 0.89, p < 0.001$), 这与该类桥梁桥面沿铰缝位置出现纵向贯通裂缝的典型病害现象高度吻合。

铰缝损坏程度与板底裂缝(单板受力的典型表征)也呈现极强的正相关($\rho = 0.84, p < 0.001$)。这两项结果表明, 铰缝失效是触发预制板桥上部结构及桥面系系列病害的关键因素, 直接导致荷载横向分布能力丧失(即“单板受力”)和桥面铺装的受拉破坏。

(2) 外部荷载对铰缝损伤的加剧作用

与现浇梁桥不同, 预制板桥表现出对交通荷载的特殊敏感性:

交通荷载等级与铰缝损坏程度之间存在显著的强正相关($\rho = 0.78, p < 0.001$), 表明重载交通的反复冲击作用对铰缝这一薄弱构造的疲劳损伤效应尤为显著, 是加速其破坏的重要外部因素。

上述分析结果表明, 预制板桥的病害发展呈现出以“铰缝失效”为核心、向周边系统辐射的退化模式, 体现了其装配式结构体系的行为特性。

相关性热力图如图 5 所示。

3.3. 组内分析: 跨系统病害关联性对比

前述分析揭示了两类桥梁系统内部的病害关联, 从而厘清病害在不同系统(上部结构、下部结构、桥面系)之间的传导路径, 对于理解桥梁整体退化机理至关重要。本节的跨系统关联性分析清晰地展现了两类桥型截然不同的病害传递模式。

3.3.1. 现浇梁桥组跨系统病害关联路径

斯皮尔曼相关性分析结果表明, 现浇整体式梁桥的退化遵循清晰的自下而上(Bottom-up)链式传导路径, 其病害根源主要始于下部结构。这一发现揭示了该类桥梁作为整体受力结构的典型退化特征。

(1) 下部结构作为病害的起源

分析表明, 墩台沉降差与主梁最大裂缝宽度之间存在显著正相关关系($\rho = 0.61, p < 0.001$)。这一强关联性证实, 基础不均匀沉降是引发上部结构产生附加内力的首要外部诱因[14]。沉降差导致桥墩或桥台发生不均匀位移, 改变了结构的原始支承条件, 使主梁在恒载作用下即承受额外的次内力, 最终在受力最不利截面(如跨中、支座附近)表现为特定的弯曲或剪切裂缝。

(2) 上部结构作为传导的枢纽

当下部结构病害引发主梁开裂后, 上部结构成为病害传导的中间枢纽。主梁裂缝的出现不仅标志着其自身刚度和承载力的下降, 还导致结构整体变形特性的改变。分析显示, 主梁最大裂缝宽度与桥面裂缝率之间存在显著的中等强度正相关($\rho = 0.68, p < 0.001$)。这表明主梁因损伤而产生的过大挠度或扭转变形, 对桥面铺装层形成“强约束拉伸”作用, 导致铺装层无法协调追随主梁的变形而出现反射裂缝。这类裂缝通常严格对应于主梁的裂缝位置和走向。

(3) 桥面系作为最终的损害表现

桥面铺装的损坏在此路径中表现为“结果性”损害, 是下部结构沉降和上部结构损伤共同作用的最终体现。此外, 分析发现墩台沉降差与伸缩缝损坏程度之间存在正相关($\rho = 0.57, p < 0.001$), 因为墩台的

不均匀位移会导致梁端过大的转角或位移，从而加剧伸缩缝的破坏。

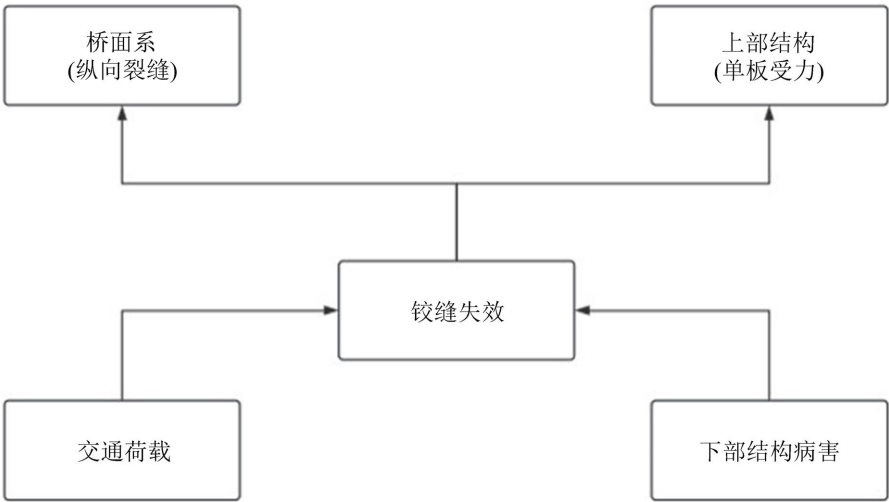
传导路径总结：

现浇梁桥的跨系统病害关联呈现出典型的“下部结构→上部结构→桥面系”单向传导模式。

这一路径反映了其作为整体受力结构的特性：任何下部支承条件的改变，都会通过整体刚度矩阵影响整个结构的受力状态，最终在薄弱环节显现出来。

3.3.2. 现浇梁桥组跨系统病害关联路径

与现浇梁桥的自下而上传导路径截然不同，预制装配式空心板桥的跨系统病害关联分析揭示了一种以上部结构为核心、由连接构件失效主导的辐射状退化模式。其病害根源始于上部结构内部的薄弱环节——铰缝。



注：图示为一个以“铰缝失效”为中心的放射状模型：中心是“上部结构(铰缝损坏)”，同时发出两个箭头，分别指向“上部结构(板底裂缝)”和“桥面系(纵向裂缝)”；“下部结构病害”和“交通荷载”则用箭头指向中心的“铰缝失效”，表示其加剧作用。

Figure 6. Synchrotron radiation pattern diagram
图 6. 同步辐射模式图

(1) 铰缝失效：跨系统病害的触发点

斯皮尔曼相关性分析结果凸显了铰缝在病害体系中的核心作用：

铰缝损坏程度与桥面裂缝率呈现出极强的正相关($\rho = 0.89, p < 0.001$)，这是所有变量对中最强的相关性。其机理在于：当铰缝混凝土破碎、失效后，相邻空心板之间失去联系，无法实现荷载的横向分布。在车轮荷载作用下，相邻板体产生差动竖向位移(即“错台”效应)，这种反复的相对变形直接导致上覆桥面铺装层发生剪切破坏和拉伸裂缝，从而形成严格沿铰缝发展的纵向贯通裂缝。因此，桥面系的严重损坏在此类桥型中是铰缝失效的直接后果，而非缓慢传导的结果。

(2) 上部结构内部的连锁反应

铰缝失效同时在上部结构内部引发了连锁反应：

铰缝损坏程度与板底纵向裂缝(单板受力的典型标志)也呈现极强的正相关($\rho = 0.84, p < 0.001$)。荷载无法通过铰缝实现横向分布，导致车轮荷载由单块板独立承担，使其实际弯矩远超设计假定，从而引发板底纵向受力裂缝。这表明，上部结构的整体性丧失和构件本身的损伤，均源于同一病因——铰缝失效。

(3) 下部结构的角色：加剧而非起源

预制板桥的跨系统关联分析显示，下部结构病害与上部核心病害的关联强度明显较弱：

墩台沉降差与铰缝损坏程度的相关性虽显著但强度仅为中等($\rho = 0.45, p < 0.01$)，表明下部结构的缺陷(如不均匀沉降)在预制板桥中主要扮演“加剧者”而非“发起者”的角色。沉降差会进一步恶化铰缝的受力状态，加速其失效进程，但通常并非铰缝破坏的最主要原因。外部荷载(尤其是重载)的反复冲击才是铰缝疲劳损伤的主因，这与之前发现的交通荷载等级与铰缝损坏程度的强相关性($\rho = 0.78$)相互印证。

传导路径总结：

预制板桥的跨系统病害关联呈现出独特的“上部结构(铰缝)→上部结构(主板)+ 桥面系”同步辐射模式(图 6)。其退化是由上部结构内部连接构造的失效所触发，几乎同时向上部构件和桥面系两个方向引发破坏，而下部结构的影响是次要和加剧性的。

4. 结论与差异化养护建议

基于对泰安市 489 座农村钢筋混凝土梁桥的系统调查、病害量化及斯皮尔曼相关性分析，本研究揭示了两类主要桥型的病害发展规律与内在关联机制，据此形成以下主要结论与差异化养护建议。

4.1. 主要结论

(1) 路径结构形式主导病害发展规律

本研究证实，农村 RC 梁桥的病害发展规律高度依赖于其结构形式。整体浇筑梁桥与预制空心板梁桥具有截然不同的病害谱系和关联网络，其退化机理、路径及关键影响因素存在本质区别。这一发现表明，在桥梁养护管理中应摒弃“一刀切”策略，转而采用基于结构形式的精细化分类指导方法。

(2) 现浇梁桥的病害根源在于下部结构

对于现浇整体式梁桥，相关性分析揭示了一条清晰的“自下而上”病害传导路径。下部结构的不均匀沉降是引发上部结构及桥面系连锁病害的主要诱因。分析表明，墩台沉降差与主梁裂缝宽度呈显著正相关($\rho = 0.61, p < 0.001$)，是导致主梁产生附加内力并开裂的关键起始因素，继而引发桥面铺装的跟随性损坏。该类桥梁的整体性较强，病害更多表现为系统性响应。

(3) 预制板桥的病害核心在于上部铰缝

对于预制装配式板桥，其退化始于上部结构的连接构造失效，呈现“由核心向周边辐射”的模式。铰缝的技术状况是控制其整体退化的核心枢纽。分析表明，铰缝损坏程度与桥面纵向裂缝率呈现出极强的正相关($\rho = 0.89, p < 0.001$)，是所有变量对中相关性最强的一对。桥面沿铰缝方向的纵向贯通裂缝是铰缝失效最直观、最可靠的早期标志，其出现意味着结构已处于荷载横向分布失效的危险状态。

预制板桥对重载交通更为敏感

研究表明，交通荷载等级与预制板桥铰缝损坏程度的相关性($\rho = 0.78, p < 0.001$)显著高于其与现浇梁桥主梁裂缝的相关性。这证明预制板桥对重载交通的敏感性远高于现浇梁桥。重载车辆对铰缝的反复冲击和疲劳效应是加速其破坏的首要外部因素。

4.2. 差异化养护建议

基于上述研究结论，本研究提出针对性的差异化养护建议，旨在提升农村桥梁养护资源的利用效率与结构安全保障水平。

(1) 对预制空心板梁桥的养护建议

养护重点：应将铰缝的技术状况作为日常检查、定期检测与状态评估的核心内容。铰缝的完整性直

关系到结构整体受力性能，对其状态的忽视可能导致灾难性的结构性能退化。

预警指标与响应：桥面纵向贯通裂缝是铰缝失效的明确预警信号。一旦发现此类裂缝，应立即启动对铰缝的专项详细检测(如敲击检查、探地雷达检测等)，并据此采取压力灌浆、凿除重浇等修复措施，恢复结构的整体性。严禁在铰缝失效的情况下继续运营。

检查频率：在重载交通频繁行驶的路段，应显著提高对铰缝技术状况的检查频率(建议将检查周期缩短至一年一次)，以及时发现并处置早期损伤。

(2) 对整体浇筑梁桥的养护建议

养护重点：应重点关注下部结构(尤其是基础)的稳定性以及上部结构主梁关键截面(跨中、支点)的裂缝发展状况。养护策略应从控制病害源头入手。

监测与处治：需定期监测墩台的不均匀沉降、位移及倾斜情况。对发现的基础沉降问题，需从根本上调原因并采取地基加固等措施。对主梁的受力裂缝，应及时进行封闭、注胶或粘贴钢板/FRP 等加固处理，以阻止其进一步发展并诱发钢筋锈蚀。

系统性评估：当发现桥面铺装出现有规律的纵向裂缝时，应认识到这可能是下部主梁变形或开裂的映射，需要进行从上至下的系统性检查，而非仅仅处理桥面问题。

(3) 共通性建议

建议各级养护管理单位依据本研究结论，制定针对不同结构形式农村桥梁的差异化检查清单与养护技术指南，将有限的养护资源精准投入到最关键的结构部位和最危险的病害上，最终实现从“被动修复”向“主动预防”、“精准养护”的科学转变。

其具体养护维度见表 2。

Table 2. Maintenance dimension
表 2. 养护维度

养护维度	对预制空心板梁桥的建议	对整体浇筑梁桥的建议
核心关注点	铰缝的技术状况	下部结构的稳定性与主梁裂缝发展
关键预警信号	桥面沿铰缝的纵向贯通裂缝	桥面铺装层与主梁对应的裂缝
主要检查内容	铰缝的完整性、有无渗水破损	墩台不均匀沉降、主梁关键截面裂缝
优先处治措施	对失效铰缝进行压力灌浆或凿除重浇	对基础进行加固、对主梁裂缝进行封闭处理
频率调整建议	重载路段应提高检查频率(如一年一次)	定期进行沉降监测

参考文献

[1] 蒋家恒. 基于 BP 神经网络和 MCMC 的桥梁构件退化预测[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2022.

[2] 刘梦. 基于定检数据的桥梁技术状况退化预测及维养方案优化[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2023.

[3] 张杨怡. 基于海量检测信息挖掘的桥梁服役性能演化规律研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.

[4] 田育禾. 高速公路沥青路面损坏状况指数分析与时空演化预测研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2024.

[5] Shi, C., Wu, Z. and Banthia, N. (2024) Ultra-High Performance Concrete. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003203605>

[6] 陈锋. 钢筋混凝土空心板桥常见病害与技术状况分析[J]. 公路与汽运, 2022(5): 103-107.

[7] 陈海威. 某钢筋混凝土空心板桥承载能力检测与评定[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(8): 129-132.

[8] 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.

-
- [9] 滕秀元, 李厚海, 杨晋, 等. 某钢筋混凝土空心板桥的检测及加固建议[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(1): 89-93.
- [10] 陈劲超. 装配式空心板桥破坏机理与加固技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [11] Mohammed Abdelkader, E., Moselhi, O., Marzouk, M. and Zayed, T. (2021) Entropy-Based Automated Method for Detection and Assessment of Spalling Severities in Reinforced Concrete Bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **35**, 673-703. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001544](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001544)
- [12] 袁佳佳, 王洪欣, 孙占琦, 等. 预制预应力混凝土空心板研究及应用综述[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(9): 45-49.
- [13] Zhang, H., Tian, C., Zhang, A., Liu, Y., Gao, G., Zhuang, Z., *et al.* (2025) A Bridge Defect Detection Algorithm Based on UGMB Multi-Scale Feature Extraction and Fusion. *Symmetry*, **17**, Article 1025. <https://doi.org/10.3390/sym17071025>
- [14] Liu, L.Y., Tao, W.J., Wang, M.C., *et al.* (2025) Structural Performance of Concrete Beams Reinforced with HRB635 Steel Rebars: Effects of the Rebar Ratio and Diameter. *Structures*, **82**, Article 110520. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2025.110520>