

·土木工程·

DOI:10.12454/j.jsuese.202300987



本刊网刊

服役劣化后 RC 空心板桥抗弯承载性能评估

徐略勤^{1,2}, 甘超¹, 李修君^{1,3}, 王佩¹, 周建庭^{1,2}

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074;
3. 重庆交大建设工程质量检测中心有限公司, 重庆 400074)

摘要:为了评估钢筋混凝土材料为主的空心板(后文简称 RC 空心板)桥服役劣化后的抗弯承载性能, 以为同类在役桥梁的服役状态评估和运维决策提供参考, 针对某高速公路服役 27 a 的 RC 空心板桥, 首先, 结合定检资料对桥梁病害状况进行分析, 同时开展实桥原位静载试验, 重点探明铰缝工作性能状态; 然后, 从原桥拆取 3 片空心板进行室内弯曲破坏试验, 对单片空心板的抗弯承载性能进行实测研究; 最后, 基于新老桥梁设计规范, 并考虑铰缝的不同工作状态, 通过数值模拟和理论计算对原桥抗弯承载性能进行综合评估。结果表明: 经过 27 a 服役后, 确定铰缝病害是影响原桥抗弯承载性能的最不利因素, 在汽车偏载作用下, 布载一侧与非布载一侧的横向分布系数相差 11.10 倍, 远远高于理论的 1.90 倍; RC 空心板尽管存在一定数量的初始病害, 但其本身的抗弯承载性能保持良好, 3 片板均发生典型的适筋破坏, 平均屈服和极限荷载分别高达 544.8 kN 和 605.4 kN, 变形延性系数均值达 8.51; 数值模拟与理论计算均能较好地预测 RC 空心板的抗弯承载力, 误差分别仅为 -2.3% 和 -0.3%; 按旧规范验算, 原桥即使在极端单板受力状态下仍有 60.3% 的抗弯承载富余量, 但根据现行规范, 原桥实际极限抗弯富余量仅 15.0%。原桥经服役劣化后, 若出现单板受力状态, 则其空心板将进入塑性变形阶段, 在超载情况下存在严重的安全隐患。

关键词: RC 空心板桥; 铰缝病害; 荷载试验; 荷载横向分布; 弯曲试验; 承载能力

中图分类号: U443.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)06-0142-10

空心板是中国中小跨径梁桥中最常见的主梁形式之一, 早期的空心板主要以钢筋混凝土材料为主, 大部分修建于 20 世纪 90 年代以前, 1993 年随着预应力混凝土空心板(PC 空心板)标准图的广泛推广才逐渐被取代^[1]。目前, RC 空心板桥在中国公路和城市交通线路中仍占据一定的比例, 这些桥的服役年限大多超过 30 a。近年来, 中国公路和城市交通飞速增长, 尤其是超载车辆屡禁不止, 而早期桥梁的设计荷载往往偏低, 加上设计水平和施工质量参差不齐, RC 空心板桥因此常年带“病”工作, 安全隐患巨大。合理评估在役 RC 空心板桥的承载性能是桥梁运维管理的重要方面, 但由于理论研究和模型试验都存在各自的局限性, 再加上桥梁实际服役环境复杂多变, 准确掌握在役 RC 空心板桥的真实承载性能非常困难, 直接对经服役后拆除下来的空心板开展破坏试验无疑是最直

观的研究方法之一。

发达国家的交通基础设施建设普遍早于中国, 比如美国目前约有 61.7 万座桥梁, 其中, 42.0% 已经服役超过 50 a, 7.5% 被认为具有严重的结构性缺陷^[2]。国外学者最早开始对服役旧梁、板进行承载性能研究, Shenoy 等^[3]早在 1991 年就对服役 27 a 的 PC 空心板进行了破坏性加载试验研究, 此后 Miller^[4]、Halsey^[5]、Harrises^[6]、Papé^[7]、Ross^[8]、Lantsoght^[9]等学者也分别针对不同服役年限的各类梁、板进行了承载性能试验, 重点探讨服役劣化、预应力损失等对梁(板)承载能力、变形延性等力学指标的影响, 且这些研究主要以 PC 梁、板为主。近年来, 随着中国空心板桥服役年限的增长和结构病害的累积, 旧桥拆除频率不断增高, 给国内学者提供了良好的研究机遇。较典型的如贾艳敏^[10]、郭凯强^[11]、Wang^[12-13]、Zhang^[14]、Liu^[15]等针对东北季冻区 10 余片

收稿日期: 2023-12-04 修回日期: 2024-01-11 网络出版日期: 2024-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978113; 52378482); 重庆英才计划项目(cstc2022ycjh-bgzxm0133); 重庆市研究生科研创新项目(CYS23473)

作者简介: 徐略勤(1983—), 男, 教授, 博士。研究方向: 桥梁结构长期性能研究。E-mail: xulueqin@163.com

服役20 a的16 m跨先张法PC空心板和2片8 m跨RC空心板开展了多个系列弯曲破坏试验,并结合有限元分析、BP神经网络等方法,研究了空心板的抗弯承载性能、刚度、弹性恢复能力等指标;刘红义等^[16]通过抗弯加载试验发现服役22 a的PC空心板仍具有较好的延性和强度;Liu等^[17]通过试验与数值模拟分析发现,服役30 a的RC空心板梁仍具有良好的抗弯承载能力;杨怀茂等^[18]针对1片服役25 a的8 m跨RC空心板开展了室内剪切破坏试验,发现其抗剪承载力仍有较高的安全储备;Qu等^[19-20]针对1片服役24 a的8 m跨RC空心板进行了室内弯曲破坏试验,发现其抗弯承载力为规范计算值的1.52倍;Di等^[21]从服役若干年的旧桥中拆取了12片长度为20、16和10 m的PC空心板,并开展剪切破坏试验,提出了改进经验公式预测PC空心板的抗剪承载力;杜孟林等^[22]研究发现服役近20 a的PC空心板抗剪承载力仍满足规范要求,但富余量仅剩6%。这些研究对中国空心板桥的服役安全评估与管养决策具有重要的参考价值,但也可以看到,已有研究仍以PC结构为主,且重心都在构件层面。

中国RC空心板桥服役年限大部分都达到了30 a,调研表明这些桥梁的突出病害之一是铰缝破坏导致横向连接失效,进而出现单板受力的极端状态^[23-24]。单板受力会显著提高RC空心板的荷载效应,导致其承载能力储备降低,甚至不足以承担荷载效应,引发灾难性后果。因此,在桥梁层面上,仅凭空心板构件层面的力学性能研究不足以准确地评估整桥的抗弯承载性能,铰缝缺陷这一因素不可或缺。鉴于此,本文以成渝高速公路某服役27 a的RC空心板桥为原型,首先,结合定检资料,对桥梁的病害发展状况进行分析,并开展实桥原位试验,对桥梁结构的应变、挠度等静载响应以及铰缝工作性能进行讨论;然后,从实桥中拆取3片空心板进行室内破坏试验,对单片RC空心板的抗弯承载能力进行实测研究和数值模拟分析;最后,在原位和室内试验结果基础上,对原桥的抗弯承载性能进行综合评估。研究结果可为同类桥梁的服役状态评估和运维决策提供参考。

1 RC空心板桥与铰缝病害分析

1.1 桥梁与病害概况

成渝高速上桥立交段某简支RC空心板桥跨径为11.25 m(板长为11.20 m),计算跨径为10.76 m。单幅桥面净宽8.26 m,由9片RC空心板组成;空心板高为75 cm,中板宽为100 cm,边板宽为88 cm,使用C30混凝土进行试验,如图1(a)~(b)所示。桥梁单幅为双车道布置,设计荷载等级为汽车-超20。该桥于1993年

建成通车,至2020年拆除时已服役27 a之久。由于长期处于满负荷运营状态,桥面铺装、伸缩缝等部位都出现了裂缝和破损,空心板底则存在大量横向裂缝、纵向裂缝、网裂、蜂窝、胀裂剥落等病害,如图1(c)所示。该桥板间铰缝的病害最为严重,根据历年桥检报告记录,其铰缝病害呈逐年发展的态势。图1(d)为2020年的部分典型桥检结果,8道铰缝均通常渗水,且存在铰缝填料未浇密实、泛碱等大量病害。空心板桥通过铰缝连接成整体而共同受力,铰缝受损会导致荷载在横桥向无法有效传递。铰缝病害严重时甚至会引发单板受力现象,对桥梁产生极为不利的影

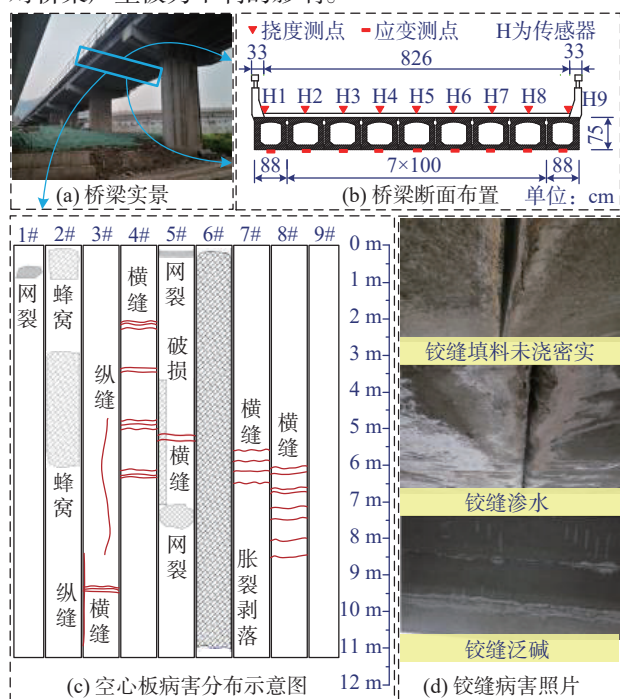


图1 桥梁构造与病害

Fig. 1 Bridge structure and diseases

1.2 原位静载试验

为了检测原桥的真实工作状态,在桥梁拆除之前开展了原位静载试验。根据前期分析结果,原位加载采用2辆三轴载重汽车,每辆总重为340 kN,车辆布局示意图如图2所示。现场测试参数主要包括应变和挠度,在每片空心板跨中底面布置应变测点,在各板顶部沿纵桥向每3 m布置一排挠度测点,测点在横断面上的布置如图1(b)所示,沿纵桥向的布置如图2所示。应变通过半桥电阻式应变片采集,挠度采用高精度电子水准仪采集。考虑到桥梁服役年限较长,设计资料不完善,在规范^[25]的基础上,采用8级加载方式。加载前先测量初始状态各测点的应变和挠度,并观测初始裂缝;每级加载并持荷5 min后进行应变、挠度测量及裂缝观察;所有8级加载完成并卸载后,进行最终状态的测量。原位静载试验共设置4个工况,2辆三轴载重

汽车在横桥向布载方式不变,在纵桥向载重车辆最后 1 组车轮与桥梁跨中截面的距离 d 分别取 3.0、2.5、2.0 和 1.5 m (对应工况 1~4),如图 2 所示。图 2 中,1#~9# 表示空心板编号。

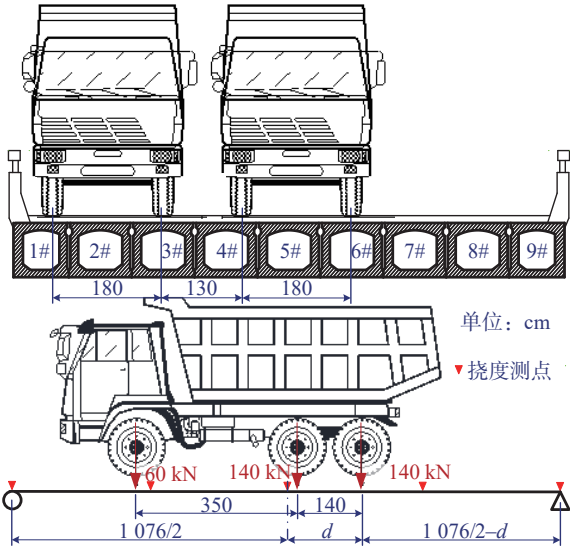


图 2 车辆布局示意图

Fig. 2 Illustration of vehicle layout

图 3 为 4 个工况跨中挠度分布规律的第 8 级加载结果。由于车辆偏载布置在 1#~6# 板上,因此各板跨中挠度的横向分布明显不对称,其中,3#和 4#板的挠度值普遍偏大,其原因有:一方面,与偏载位置有关;另一方面,与 3#、4#板的纵横向裂缝较多有关(图 1(c))。总体来看,各板跨中挠度分布非常不均衡,表明铰缝对各板的连接作用较弱,这与图 1(d)所示的铰缝病害情况是相符的。

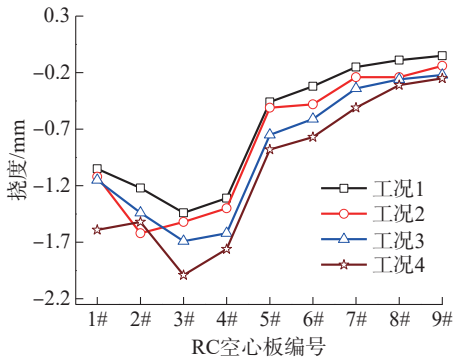


图 3 跨中挠度分布规律

Fig. 3 Distributions of mid-span deflection

1.3 荷载横向分布系数分析

荷载横向分布系数是表征活载在桥梁横向分布特征的参数,也是评估铰缝工作状态的重要指标。桥梁跨中截面实测荷载横向分布系数由各片梁跨中挠度与各片梁跨中挠度和之比来近似计算^[26-27],由于边、中板宽度不一致,需考虑各板抗弯刚度的差异,因此各板实测荷载横向分布系数可按式(1)进行计算:

$$m_i = EI_i f_i / \sum_{i=1}^N EI_i f_i \quad (1)$$

式中, m_i 为第 i 片板跨中截面实测荷载横向分布系数, EI_i 为第 i 片板的抗弯刚度, f_i 为第 i 片板在荷载作用下的跨中挠度, N 为主梁片数。采用式(1)计算得到的各板实测荷载横向分布系数见表 1,表 1 中同时列出了采用铰接板法计算得到的各板理论横向分布系数。需要说明的是,为了体现可比性,表 1 中的理论值并非传统意义上的荷载横向分布系数,而是在图 2 固定车辆布置的前提下,各片板按照铰接板法得到的影响线进行布载计算的结果。

表 1 各空心板横向分布系数

Tab. 1 Transverse load distribution coefficients of each slab

编号	工况				平均值	理论值	误差/%
	1	2	3	4			
1#	0.310 2	0.277 0	0.255 8	0.299 1	0.285 5	0.298 3	4.5
2#	0.409 5	0.455 1	0.363 8	0.324 8	0.388 3	0.313 6	-19.2
3#	0.483 4	0.427 0	0.427 0	0.425 2	0.440 7	0.287 8	-34.7
4#	0.439 7	0.393 3	0.409 3	0.376 1	0.404 6	0.267 2	-34.0
5#	0.154 4	0.143 3	0.189 5	0.188 0	0.168 8	0.235 0	39.2
6#	0.107 4	0.134 8	0.154 1	0.164 5	0.140 2	0.187 4	33.6
7#	0.050 4	0.067 4	0.085 9	0.109 0	0.078 2	0.146 8	87.8
8#	0.030 2	0.067 4	0.065 7	0.066 2	0.057 4	0.121 9	112.4
9#	0.014 8	0.034 6	0.048 9	0.047 0	0.036 3	0.108 2	197.8

由表 1 可见,4 个工况下各板的实测荷载横向分布总体较为接近。在偏载作用下,布载一侧的实测荷载分布系数远高于非布载一侧,如:布载一侧的最大横向分布系数均值达 0.440 7(3#板),而非布载一侧的 7#~9#板最大横向分布系数均值仅为 0.078 2,说明荷载无法有效传递到非布载一侧的空心板上。从实测值和理论值的对比来看,布载一侧的 2#~4#板实测值均明显大于对应的理论值,其中,3#和 4#板的理论计算误差最大,分别达 -34.7% 和 -34.0%。可见,经过 27 a 的服役劣化之后,铰缝已经无法有效发挥横向连接作用,严重影响了桥梁的整体抗弯承载性能。

2 室内弯曲破坏试验

2.1 试验方案

为了进一步研究服役劣化对 RC 空心板桥抗弯承载性能的影响,从原桥上拆取了 3 片空心板开展室内弯曲破坏试验,图 4(a) 显示了 RC 空心板的构造与配筋细节。采用 200 T Servo Test 电液伺服加载系统开展四点对称弯曲破坏试验。如图 4(b)~(c) 所示,作动器

通过分配梁作用于空心板上,两个加载点的中心间距为 200 cm; 14 个位移计分别设置在空心板前后 2 个腹板的侧面; 跨中截面处沿腹板高度按一定间距表贴 7 个 10 cm 纸质免焊型应变片,同时凿开跨中截面梁底最外侧 2 根纵筋的混凝土保护层,沿钢筋纵向布设电

阻式应变片。加载前,首先对空心板腹板表面刷白并绘制网格,以便观测试验现象;然后,进行 2 次预加载,以确保加载装置和各测量仪器都能正常工作。采用力和位移混合控制加载,在屈服前采用力控制,屈服后转为位移控制,直至空心板完全被破坏。

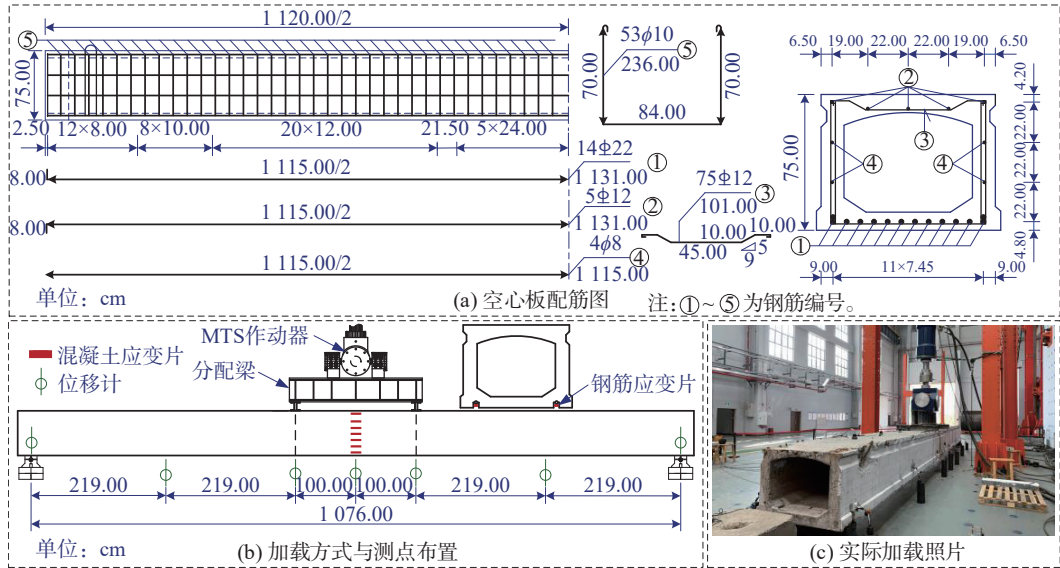


图 4 RC 空心板配筋与加载设计

Fig. 4 Reinforcement and test setup of RC voided slabs

2.2 材性试验

在弯曲破坏试验之后,采用钻芯法^[28]在 3 片空心板无明显损伤处共取样 30 个,所钻取的混凝土圆柱体试件直径和高度均为 100 mm,经打磨、找平等处理后进行单轴抗压试验。按照规范^[28]的方法,剔除部分不正常数据,将剩下的 25 个芯样试件的实测强度换算为混凝土轴心抗压强度,平均结果为

51.83 MPa,约为规范^[29]中 C30 混凝土抗压强度标准值的 2.5 倍。考虑空心板的加载受力、钢筋锈蚀和保护层状况,选择在板端受力较小的部位截取 12 根受拉纵筋(HRB335 钢筋)进行标准拉伸试验,实测结果显示其屈服强度 f_y 为 376.58 MPa,极限强度 f_u 为 556.68 MPa,弹性模量 E 为 2.245×10^5 MPa。实测结果如图 5 所示。

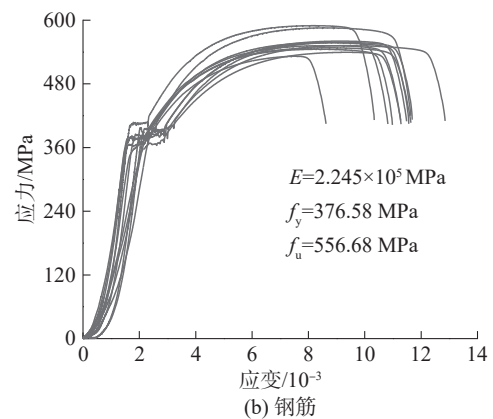
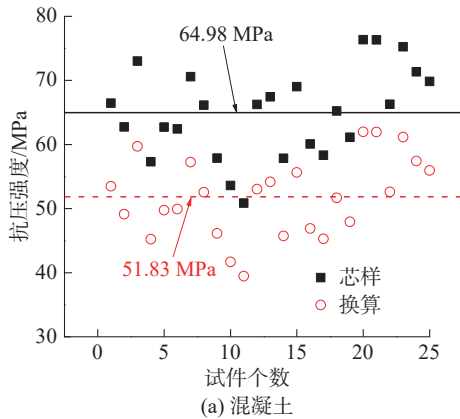


图 5 材性试验结果

Fig. 5 Test results of material properties

2.3 试验现象与破坏模式

由于长期满负荷运营,3 片板的底板和腹板均存在可见的初始裂缝,其中,腹板上的竖向裂缝高度范围为 $0.1h \sim 0.8h$ (h 为空心板高度),最大宽度达 0.37 mm,但在预加载时这些裂缝并未发展,也未产生

新裂缝。在正式加载中,当荷载小于 $0.3P_{max}$ (P_{max} 为最大加载值)时,3 片板均未新增裂缝,初始裂缝随荷载的增大而微微张开,但无明显延伸;随着荷载的增大,初始裂缝张开并向上延伸,纯弯段新增竖向裂缝并不断向上发展,梁体开始下挠;当荷载达到 $0.9P_{max}$ 左右

时,3片板进入屈服阶段,加载转为位移控制,此时腹板不再萌生新裂缝,原有裂缝宽度增大,但高度基本不变,在主裂缝附近,众多小裂缝密集发育并逐渐联通,形成裂缝群。裂缝发展过程如图6(a)所示,其中,黑色表示初始裂缝,红色表示新增裂缝。在破坏阶段,3片板的跨中挠度分别达285.1、263.5和265.6 mm,最大裂缝宽度分别达49.7、51.5和53.9 mm,加载点附近

的混凝土被局部压溃,呈片状隆起剥落,受压区钢筋裸露且发生明显屈曲,如图6(b)~(c)所示。随着一声巨大的“嘭”响过后,作动器突然失载,实测荷载-位移曲线陡降,加载终止。总体来说,3片板的加载现象和破坏过程几乎一致,均为典型的适筋梁弯曲破坏,变形延性良好,加载终止后跨中残余位移均超过200 mm,但空心板并没有断裂。

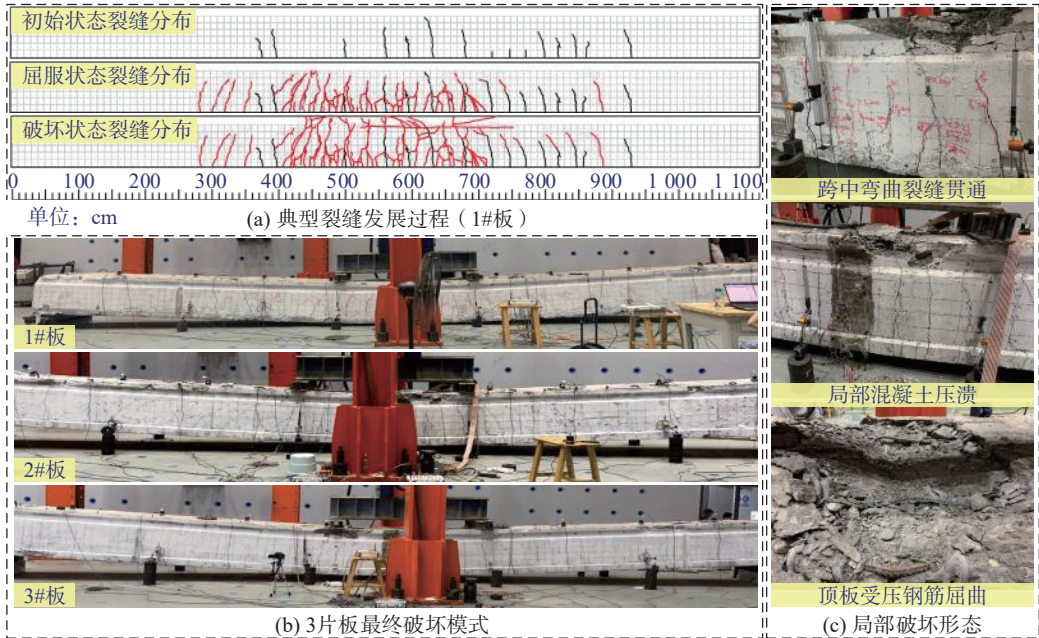


图6 RC空心板破坏现象

Fig. 6 Failure phenomenon of RC voided slabs

2.4 试验结果分析

图7为RC空心板典型试验加载结果,其中图7(a)为3片板的荷载-跨中挠度曲线。从图7(a)可以看到,3条实测曲线基本重合,表明原桥空心板的浇筑质量和力学性能总体较为稳定。曲线存在明显的屈服和破坏临界,可近似看作由3段斜率不同的直线所组成,其中屈后平台段平缓而稳定,显示出良好的变形延性能力。

图7(b)~(c)以1#板为例,给出了跨中截面底板受拉钢筋、腹板混凝土应变的发展趋势。由图7(b)可见,受拉钢筋稍晚于空心板进入屈服,即:当空心板的

荷载已经出现屈服时,受拉钢筋的应变值尚未达到屈服临界,其原因可能是大量弯曲裂缝的发展导致受拉钢筋应变分布不均匀,局部应变稍有滞后;此外,空心板在实际服役中端部和跨中钢筋的应力状态显著不同,但本文数值模拟中采用的是板端钢筋的实测材性数据。类似的现象在图7(c)中也有所体现,由于跨中区段腹板裂缝开展较为剧烈,因此混凝土应变记录仅在220 kN之前较为完整。这些应变分布规律表明,在荷载较小时,空心板跨中截面基本满足平截面假定,随着荷载的增大,应变曲线的0点位置不断向顶板方向移动,表明截面的中性轴逐渐上移。

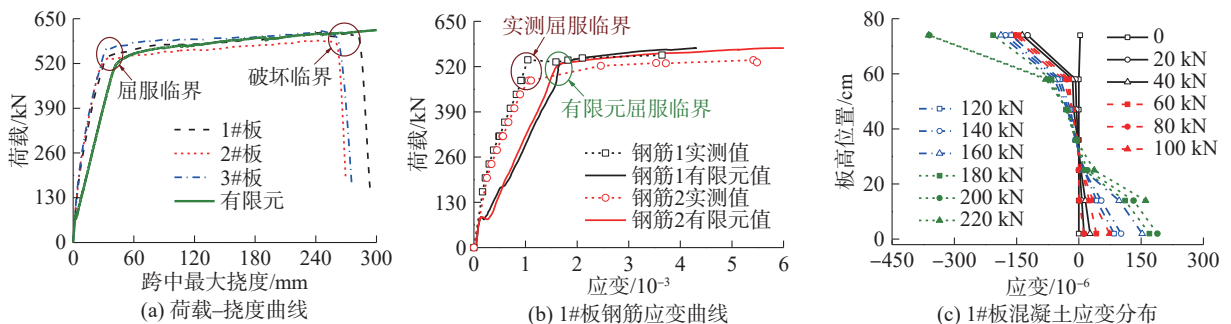


图7 典型试验结果

Fig. 7 Typical test results

3 抗弯承载性能评价

3.1 数值模拟分析

根据原桥设计图纸,并参照实测几何尺寸和钢筋布置,利用ABAQUS建立 RC 空心板 3 维非线性实体模型。其中,混凝土采用 C3D8R 实体单元模拟,钢筋采用 T3D2 桁架单元模拟。首先装配所有钢筋并通过 Merge 功能形成完整的钢筋笼,然后将钢筋笼通过 Embedded 功能内嵌至混凝土单元,由此组成最终的 3 维实体模型。在材料本构方面,混凝土按照损伤塑性模型 CDP 进行模拟,并根据规范^[29]计算 CDP 模型的相关参数,同时根据能量法计算损伤因子;钢筋采用双线性本构模型,相关参数根据前述材性试验确定。分析模型如图 8 所示。

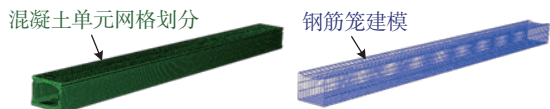
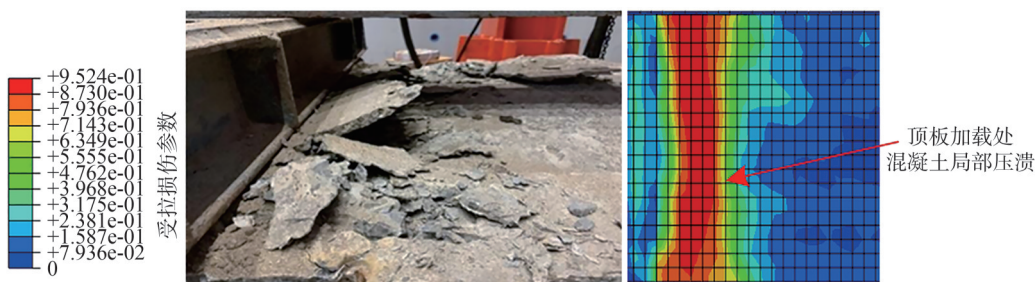


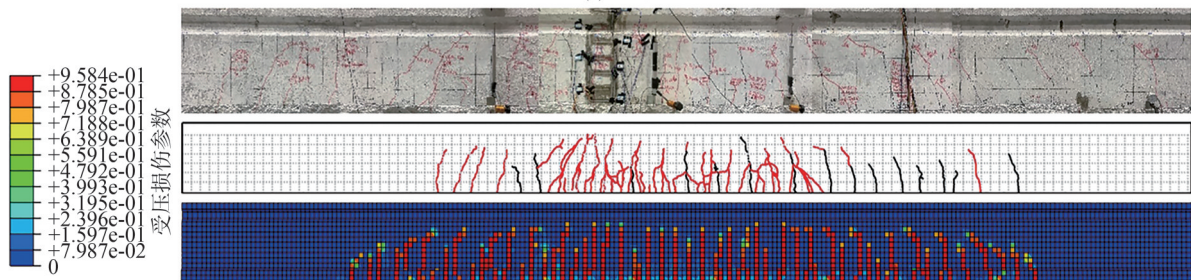
图 8 分析模型

Fig. 8 Analytical model

空心板在加载过程中主要经历了 3 个阶段:首先,纯弯段产生竖向裂缝;然后,剪跨段生成斜裂缝,同时纯弯段的竖向裂缝持续延伸;最后,斜裂缝和竖向裂缝持续发展并连通,顶板受压区混凝土压溃。在数值模拟中,根据混凝土塑性应变定义其拉伸与压缩损伤,可直观表示出混凝土的损伤位置。图 9 为顶板加载处混凝土局部压溃以及腹板裂缝分布的对比结果,可见两者吻合较好,表明数值模拟可有效再现前述主要加载现象。



(a) 局部破坏对比



(b) 开裂状态对比

图 9 数值模拟与加载结果对比

Fig. 9 Comparison between simulated and tested results

另外,由图 7(a)可见,数值模拟曲线与 3 片板的实测曲线总体上非常接近,只是初始刚度相对更小;而图 7(b)的钢筋应变对比表明,数值模拟结果可较好地反映受拉钢筋与空心板的同步屈服现象,其原因在于,相比实际钢筋可能存在的应变不均匀的分布现象,数值模拟是相对理想化的分析结果。

表 2 列举了 3 片空心板抗弯承载性能的主要实测与数值模拟结果。3 片板的抗弯承载性能指标非常接近,变形延性系数均超过 8.0,承载潜力大。数值模拟在屈服荷载上与试验结果吻合良好,模拟误差仅为 -2.3%,但屈服挠度的模拟误差较大,达 48.9%。尽管原桥已服役了近 30 a,产生了大量病害,但主要集中在接缝上,空心板本身的状态仍然较好,尤其是受拉纵筋没有发生明显锈蚀。因此,数值模拟可以有效地还原

原桥空心板的抗弯承载性能。总体而言,除试验外,数值模拟也可成为一种有效的补充研究手段,为在役 RC 空心板桥承载性能评估提供更多的视角。

表 2 RC 空心板抗弯承载能力

Tab. 2 Flexural bearing capacity of RC voided slabs

类别	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	屈服挠度/mm	极限挠度/mm	延性系数
1#板	542.6	610.8	31.7	285.1	9.00
2#板	531.5	590.3	32.0	263.5	8.23
3#板	560.3	615.1	32.0	265.6	8.31
试验均值	544.8	605.4	31.9	271.4	8.51
数值模拟	532.2	—	47.5	—	—
模拟误差/%	-2.3	—	48.9	—	—

3.2 抗弯承载力理论分析

计算抗弯承载能力时,可将空心板截面等效为“工”字形截面,如图 10 所示。图 10 中, a 为受拉钢筋保

护层厚度, b 为等效腹板宽度, h 为空受心板高度, h_0 为受拉区钢筋的合力点至空心板上缘有效的距离, x 为混凝土受压区高度, A_s 为受拉钢筋面积, A'_s 为受压钢筋面积, b'_f 为翼板有效宽度, h'_f 为翼板厚度, a'_s 为受压区钢筋的合力点至受压区边缘的距离。

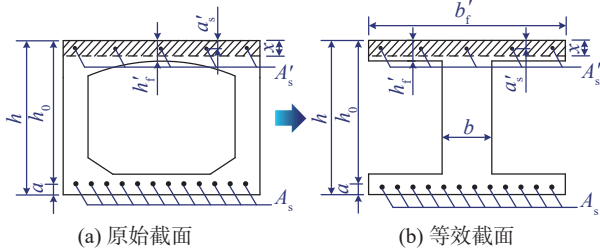


图 10 空心板等效截面

Fig. 10 Cross-section of voided slab

按照规范^[29], 当截面满足式(2)时, 空心板正截面抗弯承载力应以宽度为 b'_f 的矩形截面来计算。

$$f_s A_s \leq f_c b'_f h'_f + f'_s A'_s \quad (2)$$

式中: f_s 为受拉钢筋抗拉强度, 取 376.58 MPa; A_s 取 5 319.16 mm²; f_c 为混凝土抗压强度, 取 51.83 MPa; b'_f 等效后取 950 mm; h'_f 取 100 mm; f'_s 为受压钢筋抗压强度, 取 376.58 MPa; A'_s 取 565.20 mm²。将上述数据代入后, 结果表明式(2)成立, 因此双筋矩形截面受压区高度 x 可按式(3)计算:

$$x = \frac{f_s A_s - f'_s A'_s}{f_c b'_f} = 36.36 \text{ mm} \quad (3)$$

由式(3)可见, $x < 2a'_s = 2 \times 42 \text{ mm} = 84 \text{ mm}$, 其中, a'_s 为受压区钢筋的合力点至受压区边缘的距离。因此, RC 空心板正截面抗弯承载力 M_u 可近似按式(4)计算:

$$M_u = f_s A_s (h_0 - a'_s) = 1 322.04 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (4)$$

对比 3 片板的平均实测结果 $(605.4/2) \times (10.76/2 - 1.0) = 1 325.83 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 可知, 理论值与试验值非常接近, 误差仅 -0.3%。由此可见, 经过近 30 a 的服役, 原桥的 RC 空心板仍然状态良好, 与理论计算结果完全吻合。

3.3 原桥抗弯承载力评价

按承载力极限状态对原桥进行抗弯承载力评价, 在计算全桥作用效应时, 采用基本组合值, 其计算公式为:

$$S_u = 1.2S_G + 1.4S_Q \quad (5)$$

式中, S_u 为承载力极限状态下的基本组合效应值, S_G 为永久作用效应值, S_Q 为汽车作用效应值(计入汽车冲击力)。

在计算汽车作用效应时, 分别按照现行规范^[29]和原桥设计时期的规范^[30](简称旧规范)进行计算。其中, 旧规范^[30]采用汽车-超 20 计算汽车作用效应, 其车辆荷载横向布置与图 2 的原位荷载试验一致, 冲击力系数 μ 为 0.3; 现行规范^[19]采用公路-I 级车道荷载计算汽车作用, 原桥

原位实测 1 阶频率为 13.47 Hz, 据此计算得到冲击力系数 μ 为 0.443 8。按铰接板法计算得到的理论最大横向分布系数为 0.313 6, 但实桥原位试验表明, 原桥的铰缝病害非常严重, 有必要根据表 1 所列的实测最大荷载横向分布系数来对比评价原桥的抗弯承载能力。因此, 本节考虑 3 种铰缝连接状态: 理论最大横向分布系数、实测最大横向分布系数和极端的单板受力状况(后文分别简称理论、实测、单板), 表 3 列出了所要对比分析的 6 种工况。

表 3 最大弯矩计算工况

Tab. 3 Calculation cases of maximum bending moment				
工况编号	汽车荷载	铰缝状态	横向分布系数	冲击系数
1		理论	0.313 6	0.3
2	汽车-超 20	实测	0.440 7	0.3
3		单板	0.500 0	0.3
4		理论	0.313 6	0.443 8
5	公路-I 级	实测	0.440 7	0.443 8
6		单板	0.500 0	0.443 8

图 11 给出了 6 种工况下 RC 空心板的弯矩效应值与实测抗弯能力。由图 11 可见: 按照旧规范计算的弯矩效应值明显低于新规范, 3 种铰缝状态下分别仅为新规范的 68.2%、65.6% 和 64.8%; 由于铰缝劣化严重, 按照理论横向分布系数计算的弯矩效应值明显偏低, 分别仅为实际弯矩效应的 80.0%(旧规范)和 76.9%(现行规范)。按照旧规范的标准, 即使在单板受力的极端状况下, 原桥 RC 空心板的抗弯承载能力仍能满足要求, 极限抗弯能力的富余量仍高达 60.3%; 而按照现行规范, 3 种铰缝状态下的极限抗弯能力富余量分别仅为 49.5%、15.0% 和 3.8%。若以屈服弯矩为依据, 则原桥 RC 空心板在实测铰缝状态下的抗弯能力富余量仅为 3.5%, 如果铰缝进一步劣化并出现单板受力状态, 那么 RC 空心板的抗弯能力将低于弯矩效应值, 此时空心板将进入塑性变形状态, 跨中挠度迅速发展, 严重影响桥梁的正常使用。可见, 在交通量持续增大的情况下, 服役劣化后的 RC 空心板桥存在较为严重的安全隐患。

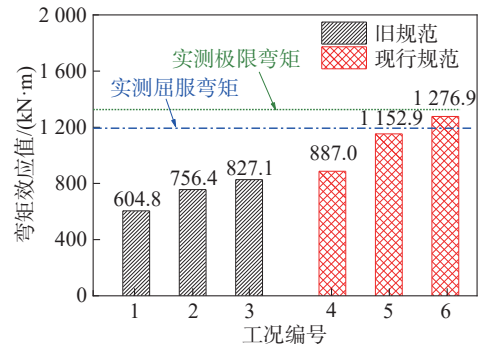


图 11 抗弯承载力对比

Fig. 11 Comparison of flexural bearing capacity

4 结 论

1) 经过27 a服役后,铰缝病害成为影响原桥抗弯承载性能的最不利因素。在汽车偏载作用下,布载一侧的最大横向分布系数高达0.440 7,而非布载一侧的最小值仅为0.036 3,两者相差11.10倍,远高于理论的1.90倍,表明铰缝已无法将活载相对均匀地传递给各片空心板。

2) 尽管存在一定数量的初始病害,但RC空心板的抗弯承载性能保持良好。3片板均为典型的适筋破坏,平均屈服和极限荷载分别达544.8 kN和605.4 kN,跨中极限挠度均值为271.4 mm,变形延性均值达8.51,加载结束后残余挠度超过200 mm,但空心板仍未断折。

3) 数值模拟可以较好地反演RC空心板的裂缝开展与板件失效过程,模拟的荷载-挠度曲线与3片板的实测曲线基本吻合,屈服荷载的模拟误差仅为-2.3%,但屈服挠度的模拟误差较大。另外,数值模拟可以更好地反映受拉钢筋与RC空心板的同步屈服现象。

4) 理论计算表明,RC空心板抗弯承载能力计算值与实测值的误差仅-0.3%,侧面反映原桥空心板状态良好。按旧规范验算,原桥在极端的单板受力状态下仍有60.3%的抗弯富余量,但根据现行规范,原桥实际的极限抗弯富余量仅15.0%。若考虑单板受力,则原桥空心板将进入塑性变形状态,在超载情况下存在非常严重的安全隐患。

参考文献:

- [1] Wang Gang. Mechanism analysis on typical disease of prestressed concrete hollow-core slab bridges[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. [王岗. 混凝土空心板梁桥典型病害机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.]
- [2] ASCE. A comprehensive assessment of America's infrastructure[R]. https://infrastructurereportcard.org/wp-content/uploads/2020/12/National_IRC_2021-report.pdf.
- [3] Shenoy C V, Frantz G C. Structural tests of 27-year-old prestressed concrete bridge beams[J]. PCI Journal, 1991, 36(6): 80-90.
- [4] Miller R, Parekh K. Destructive testing of deteriorated prestressed box bridge beam[J]. Transportation Research Record, 1994, 1460: 37-44.
- [5] Halsey J T, Miller R. Destructive testing of two forty-year-old prestressed concrete bridge beams[J]. PCI Journal, 1996, 41(5): 84-93.
- [6] Harries K A. Structural testing of prestressed concrete girders from the lake view drive bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(2): 78-92.
- [7] Papé T M, Melchers R E. The effects of corrosion on 45-year-old pre-stressed concrete bridge beams[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(1/2): 101-108.
- [8] Ross B E, Ansley M H, Hamilton H R. Load testing of 30-year-old AASHTO Type III highway bridge girders[J]. PCI Journal, 2011, 56(4): 152-163.
- [9] Lantsoght E, van der Veen C, Boer A de, et al. Collapse test and moment capacity of the Ruytenschildt reinforced concrete slab bridge[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13: 1130-1145.
- [10] Jia Yanmin, Guo Kaiqiang, Zhao Xue, et al. Analysis and experimental study on ultimate flexural capacity of PC hollow slab beams in service for 20 years[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(28): 269-273. [贾艳敏, 郭凯强, 赵学, 等. 服役20年的PC空心板梁抗弯承载力分析及试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(28): 269-273.]
- [11] Guo Kaiqiang. Analysis of flexural capacity of existing prestressed concrete hollow slab beams[D]. Harbin: Master thesis of Northeast Forestry University, 2018. [郭凯强. 既有预应力混凝土空心板梁抗弯承载能力分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.]
- [12] Wang Jiawei, Zhang Guanhua, Liu Jinliang, et al. Research on destructive test of pretensioning prestressed concrete hollow slab in service[J]. International Journal of Structural Integrity, 2018, 9(4): 429-441.
- [13] Wang Jiawei, Jia Yanmin, Zhang Guanhua, et al. Experimental study on prestressed concrete hollow slabs in service strengthened with prestressed CFRP plates[J]. International Journal of Structural Integrity, 2018, 9(5): 587-602.
- [14] Zhang Guanhua, Wang Jiawei, Liu Jinliang, et al. Analysis of loss in flexural stiffness of in-service prestressed hollow plate beam[J]. International Journal of Structural Integrity, 2019, 10(4): 534-547.
- [15] Liu Jinliang. Study on bearing capacity degradation of in-service PC plate beam in seasonal frozen area based on crack calculation[D]. Harbin: Doctoral dissertation of Northeast Forestry University, 2019. [刘金亮. 基于裂缝计算的季冻区在役PC板梁承载力退化研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.]
- [16] Liu Hongyi, Zhang Jinqian, Zhou Jianting, et al. Study of using full-scale bending test to investigate crack variation in PC hollow core beam[J]. Bridge Construction, 2021, 51(6): 92-98. [刘红义, 张劲泉, 周建庭, 等. PC空心板梁裂缝变化抗弯足尺试验研究[J]. 桥梁建设, 2021, 51(6): 92-98.]
- [17] Liu Long, Wang Lifeng, Xiao Ziwang. Flexural bearing capacity of RC hollow slab beam strengthened by steel plates of different thicknesses[J]. International Journal of Structural Integrity, 2021, 12(4): 613-628.
- [18] Yang Huaimao, Han Zhaoyou, Liu Gao, et al. Shear capacity

- analysis of existing reinforced concrete hollow slab beam [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(6): 1089–1092. [杨怀茂, 韩兆友, 刘高, 等. 既有钢筋混凝土空心板梁抗剪承载力分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(6): 1089–1092.]
- [19] Qu Guangzhen, Zhou Guangli, Lv Sizhong, et al. Flexural capacity and behavior of RC hollow bridge beams after a time service of 24 years [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8814728.
- [20] Qu Guangzhen, Zhou Guangli, Huang Pingming, et al. In-house destructive test of dismantled component of existing hollow slab bridge [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(6): 57–66. [渠广镇, 周广利, 黄平明, 等. 在役空心板桥梁拆除构件室内破坏试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(6): 57–66.]
- [21] Di Jin, Sun Yifei, Yu Kun, et al. Experimental investigation of shear performance of existing PC hollow slab [J]. Engineering Structures, 2020, 211: 110451.
- [22] Du Menglin, Zong Zhouhong, Liao Yuchen, et al. Shear bearing capacity of existing prestressed concrete hollow slab girder [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 384–390. [杜孟林, 宗周红, 廖聿宸, 等. 服役预应力混凝土空心板梁抗剪承载性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 384–390.]
- [23] Li Chunliang, Lin Zhihao, Zhao Gege. Effect of damaged hinge joint and damaged slab on transverse force of hollow slab bridge [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(2): 611–619. [李春良, 林志豪, 赵璐璐. 铰缝及板损伤后对空心板桥横向受力的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(2): 611–619.]
- [24] Liu Xuzheng, Guo Wei, Wu Gang. Influence of hinge joint damage on the structural performance of precast hollow slab bridge [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(3): 23–30. [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]
- [25] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁荷载试验规程: JTG/T J21-01—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [26] Wei Lilin, Wang Wenning, Wang Jianjun. The method for analyzing transverse distribution factors in load test of simple supported bridge [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2007, 9(2): 183–185. [韦立林, 王文宁, 王建军. 简支梁桥荷载试验横向分布系数分析方法[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2007, 9(2): 183–185.]
- [27] Li Yuanjun, Wu Xiaoguang, Huang Cheng, et al. Calculation of transverse load distribution coefficient of assembled girder bridge considering main girder damage [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1459–1465. [李院军, 邬晓光, 黄成, 等. 考虑主梁损伤的装配式梁桥荷载横向分布系数计算[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1459–1465.]
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钻芯法检测混凝土强度技术规程: JGJ/T 384—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [29] 交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [30] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTJ023-85[S]. 北京: 人民交通出版社, 1985.

Flexural Bearing Performance Evaluation of Deteriorated RC Voided Slab Bridges

XU Lueqin^{1,2}, GAN Chao¹, LI Xiujun^{1,3}, WANG Pei¹, ZHOU Jianting^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Chongqing Jiaoda Construction Engineering Quality Test Center Co. Ltd., Chongqing 400074, China)

Abstract:

Objective Accurate assessment of the flexural bearing capacity of reinforced concrete (RC) voided slab bridges after service degradation is a critical aspect of bridge operation and maintenance management. It provides a reference for evaluating service conditions and making maintenance decisions for similar in-service bridges. This study focuses on a simply supported RC voided slab bridge with 27 years of service history located in the Shangqiao Interchange section of the Chengdu–Chongqing Expressway. Based on inspection data, in-situ static load tests, bending failure tests in the laboratory, numerical simulations, and theoretical analysis, the research systematically investigates the flexural bearing capacity of the bridge structure and evaluates its operational safety based on current and outdated design codes.

Methods Firstly, the historical inspection reports of the bridge structure were reviewed, with the inspection results obtained in 2020 serving as the baseline for a comprehensive analysis of the bridge's disease characteristics and distribution. Secondly, prior to the bridge's demolition, in-situ static load tests were conducted using two tri-axle heavy-duty trucks, applying four loading conditions and eight-stage loading methods to measure and analyze the strain and deflection of each RC voided slab. Based on the measured deflection data, a calculation method for the measured load transverse distribution coefficient of RC voided slab bridges was proposed and compared to theoretical results. The working perfor-

mance of the hinge joints between the RC voided slabs was then evaluated. Thirdly, three voided slabs were dismantled from the original bridge for bending failure tests in the laboratory, enabling experimental investigations on the flexural bearing capacity of individual slabs and revealing the failure process and mechanism of RC hollow slabs. Fourthly, a three-dimensional nonlinear solid model of the RC hollow slab was developed in ABAQUS, numerically reproducing the mechanical behavior throughout the failure process, which demonstrated high consistency with the experimental results. Finally, by considering different working states of the hinge joints, the flexural bearing capacity of the original bridge was comprehensively evaluated through theoretical calculations, and a comparative analysis of its service performance and structural safety was performed based on both current and historical bridge design codes in China.

Results and Discussions After 27 years of service, due to prolonged full-load operation, transverse cracks, longitudinal cracks, mesh cracks, honeycombing, bursting, spalling, and other defects were observed almost at the bottom of each RC voided slab, with hinge joint deterioration identified as the most critical factor compromising the bridge's flexural bearing capacity. The damaged hinge joints impeded effective load distribution across the transverse direction and, in severe cases, even caused single-slab load-bearing phenomena, significantly undermining the bridge's structural integrity. In-situ tests revealed highly uneven mid-span deflection distributions among slabs, confirming weakened hinge joint connections, which aligned with the observed hinge joint deterioration. Under the four loading conditions, the measured load distribution coefficients across the RC voided slabs were generally similar. Under eccentric vehicle loading, the maximum distribution coefficient on the loaded side reached 0.440 7, while the minimum on the unloaded side was only 0.036 3, an 11.1-fold difference, far exceeding the theoretical 1.9-fold ratio. This finding demonstrated that after 27 years of service degradation, the original bridge's hinge joints no longer functioned effectively as transverse connectors, severely impairing the overall flexural performance of the bridge structure. Bending failure tests in the laboratory showed that despite initial defects, the flexural capacity of RC voided slabs remained satisfactory. The loading behavior and failure processes of the three tested slabs were nearly identical, exhibiting typical under-reinforced beam bending failures, with residual mid-span displacements exceeding 200 mm after loading termination, yet without slab fracture. The load-mid-span deflection curves of all three slabs displayed distinct yield and failure thresholds, approximating three linear segments with varying slopes. The post-yield plateau segment exhibited stable and gradual deformation, indicating good ductility. The average yield and ultimate loads were 544.8 kN and 605.4 kN, respectively, with a mean ultimate deflection of 271.4 mm and a ductility coefficient of 8.51. Numerical simulations incorporating a plastic damage constitutive model successfully replicated crack propagation and slab failure processes, with simulated load-deflection curves closely matching the experimental data. Although the yield load simulation error was minimal (-2.3%), the yield deflection prediction exhibited larger discrepancies. The simulations more accurately captured the simultaneous yielding of tensile reinforcement and slab concrete. Therefore, numerical modeling is a valuable complementary tool to experimental studies, providing additional perspectives for assessing the in-service capacity of RC voided slab bridges. Theoretical calculations indicated a mere -0.3% error between the computed and measured flexural capacities. Comparative analyses of the original bridge's flexural performance under current and historical design codes (referred to as "old code") were conducted by considering three hinge joint conditions: theoretical maximum distribution coefficient, measured maximum coefficient, and extreme single-slab loading. Results showed that the bending moment effects calculated under the old code were significantly lower than those under the new code, reaching only 68.2%, 65.8%, and 64.8% of the new code's values, respectively. Even under the extreme single-slab condition, the old code's requirements were met with a 60.3% reserve capacity. In contrast, the current code yielded reserves of only 49.5%, 17.0%, and 3.8% for the three conditions. When based on the yield moment, the reserve capacity under the measured shear key condition was merely 5.3%. Further deterioration leading to single-slab loading will reduce the flexural capacity below the moment effect, pushing the slab into plastic deformation and posing severe safety risks under overload scenarios.

Conclusions This study systematically analyzes post-service degradation characteristics employing multiple research methodologies on actual RC hollow slab bridges. The research provides reliable methodologies for assessing the service conditions of numerous in-service RC hollow slab bridges and offers essential decision-making references for the maintenance operations of similar structures.

Key words: RC voided slab bridge; hinge joint disease; load tests; transverse distribution of load; bending tests; bearing capacity

(编辑 张 琼)

引用格式: Xu Lueqin, Gan Chao, Li Xiujun, et al. Flexural bearing performance evaluation of deteriorated RC voided slab bridges[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(6): 142-151. [徐略勤, 甘超, 李修君, 等. 服役劣化后 RC 空心板桥抗弯承载性能评估[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(6): 142-151.]