

# RC 空心板抗弯承载性能与振动频率的关系\*

徐略勤<sup>1,2</sup>, 李修君<sup>3</sup>, 王佩<sup>1</sup>, 陈叙先<sup>1</sup>, 张洪<sup>1,2</sup>, 周建庭<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学土木工程学院 重庆, 400074)

(2. 重庆交通大学省部共建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** 为了揭示钢筋混凝土 (reinforced concrete, 简称 RC) 空心板抗弯承载性能与其振动频率之间的关系, 从实桥上拆取了 3 片服役 27 年、全长为 11.20 m 的 RC 空心板, 通过实桥原位试验和室内分级加载静、动力试验, 获取了空心板的抗弯承载性能参数和前 3 阶振动频率, 并分析了空心板荷载、挠度、刚度与竖弯频率间的关系, 拟合得到了 1 阶频率比-荷载比、1 阶频率比-割线刚度比的函数表达式。研究表明: 3 片板的荷载-挠度曲线具有明显的双折线特征, 在不同加载状态下前 3 阶振动模态始终为 1 阶竖弯 (对称)、2 阶竖弯 (反对称) 和 3 阶竖弯 (对称), 与半波正弦曲线吻合; 3 片板的前 3 阶振动频率均随荷载、挠度和裂缝宽度的增大而下降, 其中 1 阶频率在屈服前分别下降 4.52%、9.50% 和 11.46%, 屈服后分别下降 27.81%、21.62% 和 23.27%, 1 阶频率在敏感性和规律性方面都更好; 3 片板的 1 阶频率理论与室内实测和原位实测结果均非常接近, 以室内实测结果为准, 误差分别为 7.90%、8.16% 和 1.94%, 但高阶频率的理论与室内实测结果则明显偏大; 1 阶频率比-荷载比和 1 阶频率比-割线刚度比这两个拟合函数理论上可用于近似评估外加荷载是否超过 RC 空心板的屈服荷载, 并预测 RC 空心板割线刚度的退化情况。

**关键词** 钢筋混凝土空心板; 抗弯性能; 振动频率; 受迫振动试验; 弯曲试验

**中图分类号** TU375.1

## 引言

截至 2021 年底, 我国已建成的公路桥梁达 96.11 万座, 共计 7 380.21 万延米<sup>[1]</sup>。其中, 中小跨径 RC 桥梁和预应力混凝土 (prestressed concrete, 简称 PC) 桥梁占总数的 90% 以上。RC 空心板桥梁在我国得到了非常广泛的使用。随着服役龄期的增长, 以及我国经济发展所导致的交通量迅猛增加, RC 空心板桥常年带“病”运营, 安全隐患巨大<sup>[2]</sup>。因此, RC 空心板桥面临着严峻的管养形势。

损伤是工程结构的属性之一<sup>[3]</sup>, 带缝工作是 RC 空心板的常态。从力学上看, 工程结构可看成是由刚度、质量、阻尼等属性所形成的动力系统<sup>[4]</sup>。假如结构出现损伤, 系统的上述属性将发生变化, 引起结构振动频响的变化<sup>[4-5]</sup>。通过监测结构振动频响的改变, 理论上可以发现结构损伤发生的征兆。在实际工程中, 基于振动测试的损伤诊断面临干扰信号、结构非线性、局部损伤与整体频响的对应关系等众

多挑战<sup>[3, 5]</sup>, 而 RC 材料的强非线性使问题更加复杂。文献[6-17]针对从实桥中拆取下来的不同服役年限的 RC 或 PC 梁展开研究, 实测其剩余承载力、损伤破坏特征及弯曲刚度等力学性能状态。

为了研究 RC 空心板承载性能与其振动频率之间的关系, 笔者从某高速公路桥梁上拆取了 3 片服役 27 年、长度为 11.20 m 的 RC 空心板, 通过实桥原位试验和室内分级加载试验对 RC 空心板的抗弯承载性能和竖弯振动频率进行了研究, 重点剖析了 RC 空心板荷载、挠度、刚度等抗弯承载性能指标与其竖弯频率之间的关系。

## 1 试验背景与方案

### 1.1 RC 空心板概况

本研究的 3 片 RC 空心板均取自成渝高速公路某一跨高架桥, 该桥从竣工至拆取时已服役 27 年。空心板构造与配筋见图 1。该空心板全长为 11.20 m,

\* 国家重点研发计划资助项目 (2018YFB1600300, 2018YFB1600301); 重庆市教委科学技术研究资助项目 (KJQN201900737); 重庆市杰出青年科学基金资助项目 (cstc2020jcyj-jqX0006); 重庆英才计划资助项目 (cstc2022ycjh-bgzxm0133)

收稿日期: 2022-06-11; 修回日期: 2022-09-04

计算跨径为 10.76 m, 高为 75 cm, 宽为 95 cm, 采用 C30 混凝土。该桥设计荷载为汽车-超 20, 验算荷载为挂车-120。由于长期处于满负荷运行状态, 在拆除过程中发现, 该桥存在板底泛碱、纵向裂缝、横向裂缝、网状裂缝以及蜂窝等病害。实桥原位静载试验表明, 空心板各测点的挠度校验系数在 0~0.88 之间, 个别板的应变校验系数大于 1.0, 说明结构横向联

系较弱, 安全储备不足。除了静载试验外, 还对实桥的原位动力特性进行了现场测试。原位动载测试包括脉动试验和跑车试验, 前者主要测试桥跨结构的自振频率、振型和阻尼比, 后者主要测试桥跨结构在动载下的时程应力曲线, 以此分析桥跨结构的最大动应变和冲击系数。测试结果表明, 该桥竖弯振动基频实测值为 13.47 Hz, 阻尼比为 1.56%。

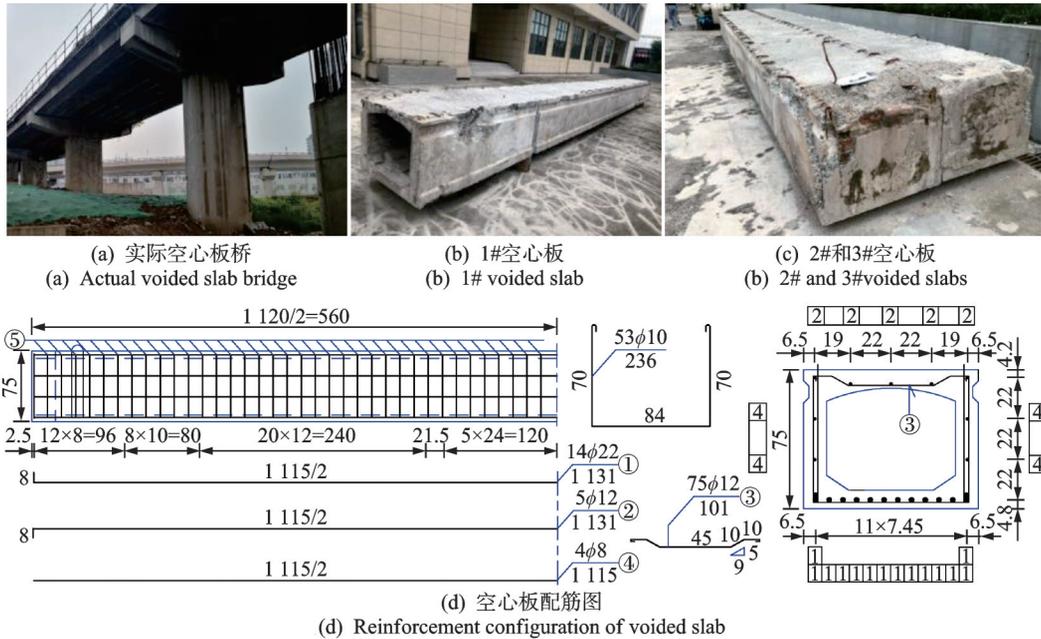


图1 空心板构造与配筋(单位:cm)

Fig.1 Structure and reinforcement of voided slab (unit:cm)

## 1.2 室内试验方案

首先,对3片空心板进行全面清洗和尺寸复核,并记录空心板表面病害状况及位置,尤其是裂缝分布位置、宽度和深度;其次,利用回弹仪测试了混凝土回弹强度,利用钢筋探测仪检测了钢筋位置及保护层厚度等。加载布置与测量仪表如图2所示。采用200T Servotest电液伺服动静力加载系统配合试验室单门反力架进行试验,3片空心板均采用跨中双点对称加载,加载点中心间距为200 cm。试验准备工作包括:①对空心板腹板外侧面进行刷白并绘制网格,以便于观测试验现象;②在空心板跨中截面腹板处打磨、找平并粘贴混凝土应变片,在跨中截面底板处开槽并粘贴钢筋应变片;③采用10个拉线式位移计和4个百分表位移计布测空心板各处位移,每侧7个,具体位置如图2(a)所示,其中支承处采用百分表位移计,跨间采用拉线式位移计。

正式加载前,通过力控制方式对空心板进行2次

预压。其中:1#板的2次预压值为50 kN和100 kN,分别持荷5 min;2#和3#板的2次预压值为40 kN和80 kN,也分别持荷5 min。通过预加载对加载系统和量测系统检验无误后,再完全卸载至零。在正式加载中,静力和动力试验交替进行,在动力试验之前将荷载完全卸至零,以研究逐级加载过程中RC空心板抗弯承载性能与振动频率的变化关系。静力试验采用力-位移混合控制加载,在空心板屈服临界之前采用力控制加载,之后转向位移控制加载,直至空心板完全破坏。1#板在屈服临界前的荷载步长为20 kN,加载速率为0.5 kN/s;在临界后的位移加载步长为4 mm,加载速率为0.1 mm/s。根据1#板的试验结果,2#和3#板将临界前的荷载步长调整为40 kN,加载速率调整为1 kN/s,每级持荷稳定8 min后,再读取静力试验数据,然后完全卸载至零,进行动力试验。将9个拾振器均匀布置在空心板顶面中线上,如图2(b)所示,通过橡皮锤随机敲击的外加激励方式采集空心板各位置处的振动信号。

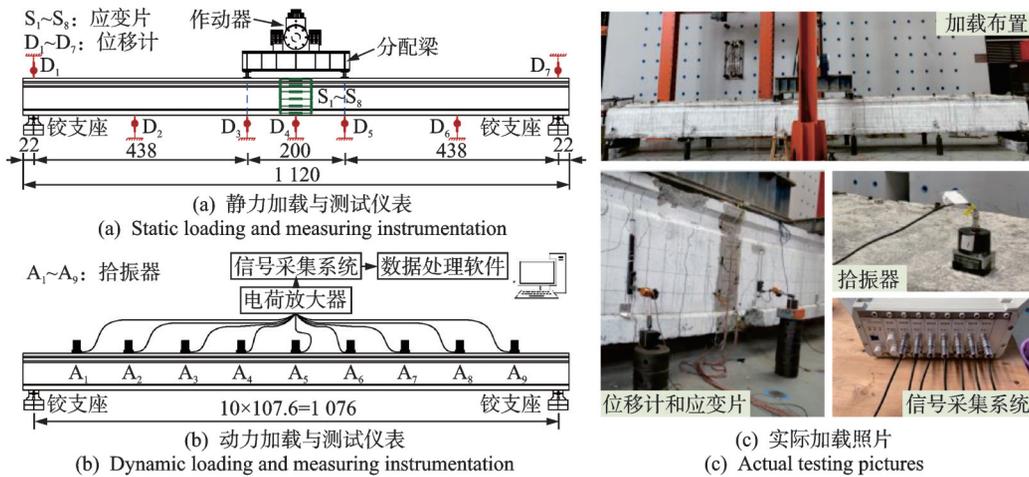


图 2 加载布置与测量仪表(单位:cm)

Fig.2 Test setup and measuring instrumentation (unit:cm)

## 2 试验结果分析

### 2.1 典型加载状态分析

3#板典型加载状态如图 3 所示。加载前,3 片空心板的腹板外侧均存在初始裂缝,这些竖向裂缝随机分布在板跨方向上,高度可达顶板附近,但宽度普遍小于 0.1 mm。此外,3 片空心板的整体状况较好,保护层混凝土无明显脱落,跨中无初始挠度,如图 3(a)所示。加载后,腹板外侧初始裂缝持续发展,在跨中附近新增了大量竖向弯曲短裂缝,但在卸载后大部分裂缝都会重新闭合,空心板加载时的最大挠度和卸载后的残余挠度非常小。当加载至跨中

最大挠度约 32 mm(约为计算跨径的 1/336)时,空心板进入屈服阶段,最大挠度和残余挠度开始快速增长,跨中附近的弯曲裂缝显著增多,高度一般为 0.1~0.8 板高,部分初始裂缝的宽度发展到 0.37 mm,如图 3(b)所示。在破坏阶段,腹板外侧几乎不再新增裂缝,裂缝的高度变化也不明显,但宽度显著增大。主裂缝附近发育了大量小裂缝,并逐渐连通,形成多处主裂缝+小裂缝的裂缝群,这些裂缝群在顶部产生水平连通裂缝,在底部处则与底板的横向裂缝贯通,如图 3(c)所示。

临近破坏时,1#~3#板的最大主裂缝宽度分别达到 49.7,51.5 和 53.9 mm,跨中附近可以听到混凝土和钢筋相对滑移的持续响声,加载点附近混凝土局部压溃隆起,并呈片状剥落,顶板受压钢筋裸露并发生屈曲,如图 3(d)所示。随着空心板荷载陡降,加载终止。3 片空心板均为典型的弯曲破坏,表现出良好的变形延性,加载终止后空心板也并未完全断裂。

图 4 为 3 片空心板的加载曲线与实测振型。由图 4(a)可知,3 片空心板的荷载-挠度曲线几乎重合,均表现出双折线特征,屈服临界和破坏临界非常明显。1#~3#板的屈服临界位移分别约为 31.65, 32.01 和 31.97 mm,破坏临界位移分别约为 285.12, 263.45 和 265.58 mm,延性系数分别为 9.00, 8.23 和 8.31。图 4(b)以 3#板为例,给出了典型加载状态下 RC 空心板前 3 阶实测振型模态。结合图 3 和图 4(b)可知:尽管在屈服和破坏阶段,空心板已出现了大量开裂和残余挠度,但其前 3 阶模态仍以整体竖弯振动为主,没有出现局部高阶振动模态提前的现象;模态振型表现出 1 阶对称、2 阶反对称和 3 阶对称的典型竖弯特征,与半波正弦曲线较为吻合,且受加载状态的影响不大。



图 3 3#板典型加载状态

Fig.3 Typical loading conditions of 3# slab

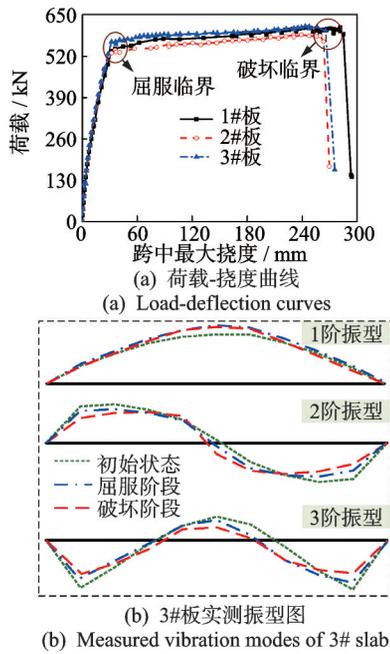


图4 加载曲线与实测振型

Fig.4 Loading curves and measured vibration modes

3#板不同加载状态振动特性如图5所示。由图可知,空心板在不同加载状态下的振动特性发生了

显著改变,前3阶振动频率均随加载的推进而不断下降。相比于初始状态,3#板在破坏阶段时前3阶频率分别下降了34.53%,26.86%和19.81%,其中基本频率下降最快。综合图3~5可知,RC空心板在受载过程中由于裂缝和残余挠度的发展,截面刚度和线形均发生了显著变化,导致前3阶竖弯振动频率大幅下降,但空心板的振动模态却保持不变。此外,为了保证实测频率结果的可靠性,在每级卸载状态下,都对空心板重复采集3次信号数据。由图5(g)~(i)可知,3次重复试验的结果非常接近。

### 2.2 实测结果分析

空心板荷载-频率关系如图6所示。其中,1#板是第1片加载对象,由于拾振器布置和量程等原因,未能得到有效的高阶频率。由图可知,空心板前3阶频率与荷载之间表现出明显的相关性,在屈服之前随着荷载的增大缓慢下降,屈服之后则随着荷载的增大急剧减小。3片板的1阶频率在屈服临界前分别下降了4.52%,9.50%和11.46%,屈服临界后则分别下降了27.81%,21.62%和23.27%。2#和

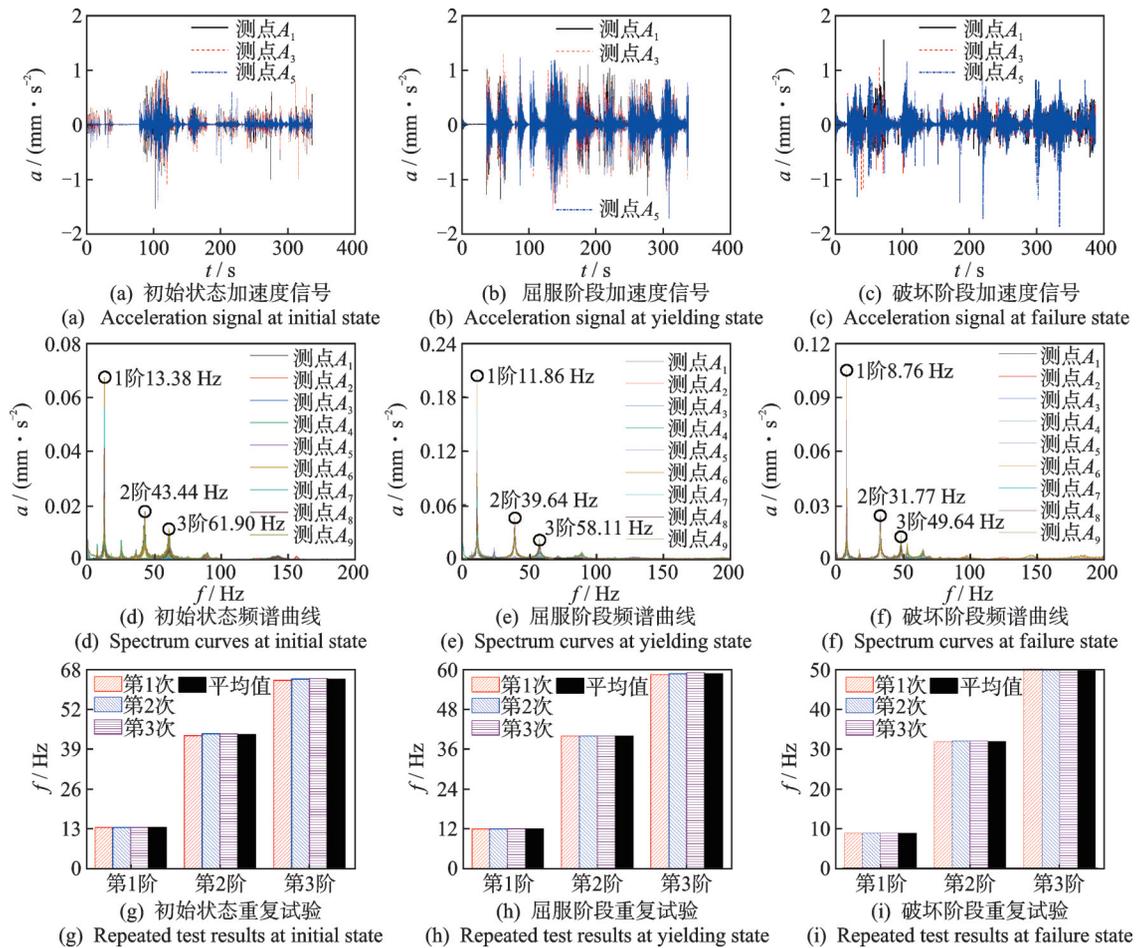


图5 3#板不同加载状态振动特性

Fig.5 Vibration characteristics of 3# slab at different loading states

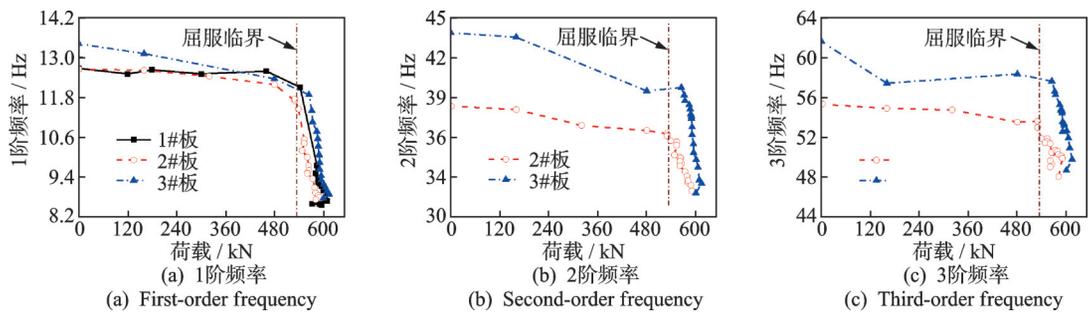


图 6 空心板荷载-频率关系

Fig.6 Load-frequency relationships of voided slabs

3#板的 2 阶频率在屈服临界前分别下降了 5.87% 和 10.02%, 屈服临界后分别下降了 8.78% 和 16.98%; 3 阶频率在屈服临界前分别下降了 3.12% 和 6.46%, 屈服临界后分别下降了 10.04% 和 12.73%。横向对比可知, 3 片板的荷载-1 阶频率曲线非常接近, 而荷载-高阶频率曲线则相对较为离散。以屈服临界之前的曲线来看, 在相同荷载下, 3 片板的 1 阶频率最大相差 5.70%, 2 阶频率最大相差 11.93%, 3 阶频率最大相差 10.19%。其原因如下: ①相比于 1 阶频率, 高阶频率受局部刚度特征的影响更大, 3 片板的初始病害和后期加载所导致的开裂状态有差异, 因此对高阶频率的影响更大; ②高阶频率更难以激发, 对测试仪器和激振方式要求更高, 更易出现误差。从频率随荷载的降幅及 3 片板试验结果的收敛

性来看, 1 阶频率是相对更好的评价指标。

空心板挠度-频率关系如图 7 所示。由图可知: RC 空心板前 3 阶振动频率均随跨中最大挠度的增大而不断下降, 其中 3 片板的 1 阶频率在屈服临界前下降较缓(3#板略有不同), 在屈服临界后先快速下降而后降速减缓, 呈现出指数曲线的特征; 2#和 3#板的高阶频率在屈服临界前的规律性不一致, 但 2 片板的 2 阶频率在屈服临界之后都近似呈线性下降规律, 而 3 阶频率在屈服临界之后都呈波动式下降规律。横向对比可以看出: 3 片板的挠度-1 阶频率曲线在数值和发展趋势上都最接近; 挠度-高阶频率曲线则在规律性上相对较差。

开裂会大幅削弱 RC 空心板的截面刚度。图 8 给出了空心板裂缝宽度-频率关系, 此处的裂缝宽度

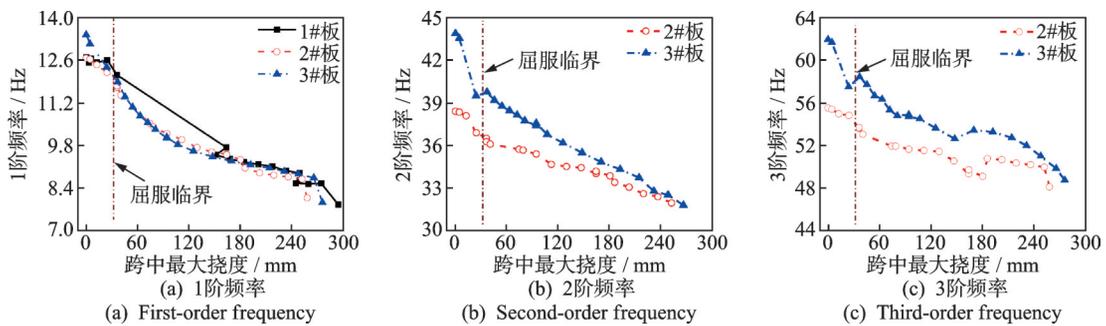


图 7 空心板挠度-频率关系

Fig.7 Deflection-frequency relationships of voided slabs

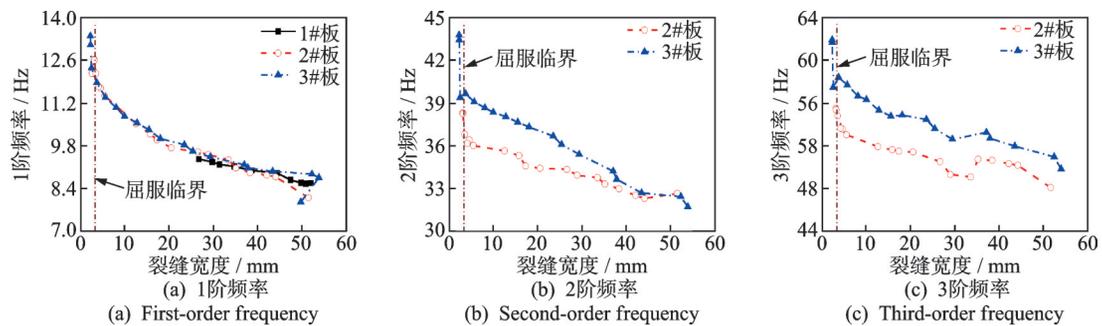


图 8 空心板裂缝宽度-频率关系

Fig.8 Crack width-frequency relationships of voided slabs

指的是加载过程中腹板最大主裂缝的端部宽度。由于裂缝宽度与跨中最大挠度具有强相关性,因此图8表现出的规律与图7非常相似。3片空心板的1阶频率与裂缝宽度的关系基本一致,3条曲线除了末端出现分叉,在裂缝宽度较小的范围内基本重合。高阶频率与裂缝宽度的关系尽管规律上一致,但数值上相差较为明显。

结合图6~8可知,3片空心板的前3阶振动频率与其抗弯承载性能指标具有明显的相关性,尤其在屈服临界以后,其中1阶竖弯频率最具参考价值。

### 3 试验结果讨论

#### 3.1 振动频率对比讨论

本研究空心板的跨高比接近15,可近似认为其满足Euler-Bernoulli梁的基本假设<sup>[18]</sup>。简支空心板示意图如图9所示。根据空心板前3阶实测振型曲线(图4(b)),可近似假设其挠曲方程满足 $z(x,t) = z_0 \sin(n\pi x/l) \cos \omega_n t$ ,其中: $z_0$ 为空心板的振幅; $n=1,2,3$ ; $\omega_n$ 为空心板第 $n$ 阶竖弯振动频率。根据能量原理,求得空心板前3阶竖弯振动频率<sup>[18]</sup>为

$$\omega_n = (n\pi/l)^2 \sqrt{EI/m} \quad (n=1,2,3) \quad (1)$$

其中: $m, l, EI$ 分别为空心板的线质量、计算跨径和截面抗弯刚度。

根据空心板断面尺寸(图1(d)),计算3片空心板在完全无损状态下的理论振动频率,其中线质量

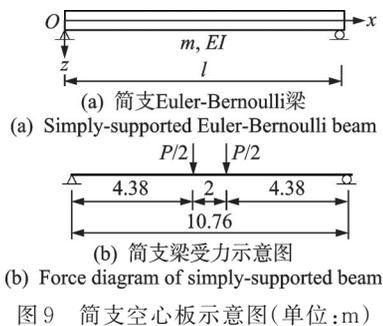


Fig.9 Schematic of simply supported voided slab (unit:m)

$m=919.65 \text{ kg/m}$ ,计算跨径 $l=10.76 \text{ m}$ ,截面抗弯刚度 $EI=9.326\ 237\ 25 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ 。

同时,根据实测荷载-挠度曲线(图4(a))计算3片空心板的初始割线刚度 $K_0$ ,再按照图9(b)所示的简支梁跨中挠度 $\Delta$ 与荷载 $P$ 之间的关系,近似反推空心板的初始截面抗弯刚度 $EI_0$ 。由结构力学可知

$$P = \frac{EI_0}{12.346} \Delta \quad (2)$$

因此,近似取 $K_0 = EI_0/12.346$ ,再根据初始割线刚度 $K_0$ 得到空心板在初始状态下的近似截面抗弯刚度 $EI_0$ ,代入式(1)计算3片空心板的振动频率。由于本研究3片空心板在27年服役中已产生了不少微裂缝,且由于是钢筋混凝土结构,线弹性假设不完全成立,因此按照割线刚度反推截面抗弯刚度只是一种近似处理手段,称之为近似解。

空心板前3阶频率对比如图10所示。其中,原位实测只有1阶频率,且对应的是全桥(9片空心板组成的桥跨结构)1阶竖弯频率。由图10(a)可知,除了近似解明显偏低以外,3片板的理论解与室内实测和原位实测结果都非常接近,理论解稍偏大。从数值上看,3片板1阶频率的理论解为13.66 Hz,原位实测结果为13.47 Hz,室内初始状态实测结果分别为12.66,12.63和13.40 Hz,近似解分别为10.29,10.50和10.3 Hz。可以看到,尽管理论解是在假设空心板为理想弹性状态下得到的结果,但在数值上非常接近室内实测值,误差分别仅为7.90%,8.16%和1.94%,可见初始服役裂缝对RC空心板1阶竖弯频率的影响很小。此外,由于室内试验针对的是单片板,而原位实测则包含了相邻板的约束作用,因此室内实测结果低于原位实测结果。相比室内实测值,近似解的误差分别达到-18.72%, -16.86%和-22.91%,仅具有参考意义。由图10(b)可知,2#和3#板的室内实测2阶频率明显低于理论解,但与近似解较接近,理论解的误差分别为42.77%和25.74%,而近似解的误差分别为9.57%和-4.89%。由图10(c)可知,相比于室内实

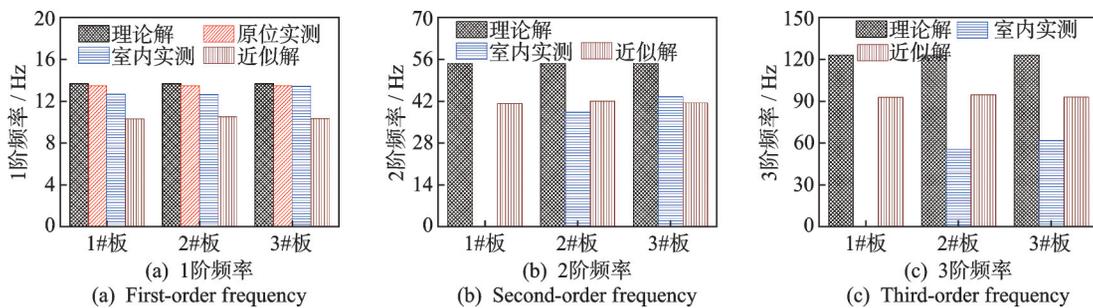


图10 空心板前3阶频率对比

Fig.10 Comparison of the first three vibration frequencies of voided slabs

测 3 阶频率,2#和 3#板的理论解和近似解均明显偏大,前者的误差分别高达 122.28% 和 99.63%,后者的误差分别达到 70.88% 和 51.00%。根据本研究,RC 空心板 1 阶频率具有较好的理论可预测性。

### 3.2 1 阶频率讨论

分别定义 1 阶频率比  $f_i/f_0$  为第  $i$  个加载状态下的 1 阶频率  $f_i$  与初始状态 1 阶频率  $f_0$  之比,荷载比  $P_i/P_y$  为第  $i$  个加载步的荷载  $P_i$  与屈服荷载  $P_y$  之比,割线刚度比  $K_i/K_0$  为第  $i$  个加载状态下的割线刚度  $K_i$  与初始割线刚度  $K_0$  之比,则 1 阶频率比-荷载比关系、1 阶频率比-割线刚度比关系分别如图 11,12 所示。

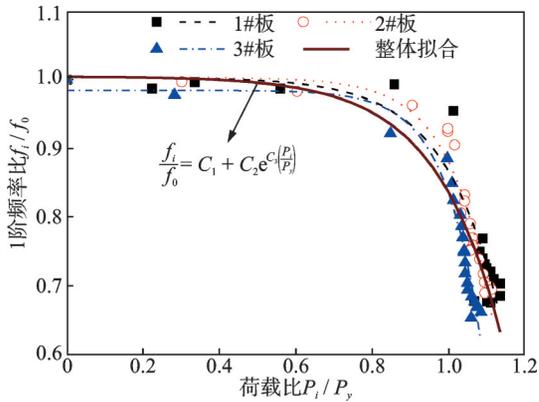


图 11 1 阶频率比-荷载比关系

Fig.11 First-order frequency ratio-load ratio relationships

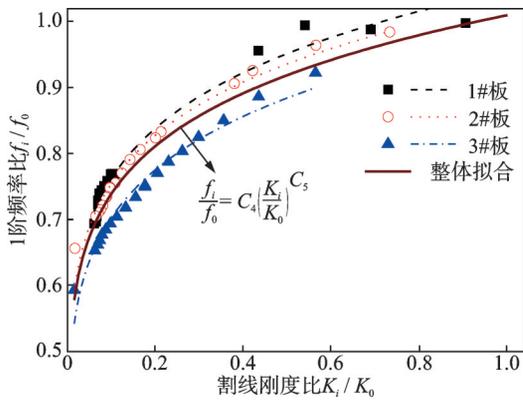


图 12 1 阶频率比-割线刚度比关系

Fig.12 First-order frequency ratio-secant stiffness ratio relationships

由图 11 可知,3 片板各自及整体的 1 阶频率比-荷载比均近似满足指数函数拟合关系,其中 3 片板各自的拟合相关系数分别为 0.882, 0.930 和 0.927,而以整体数据拟合的相关系数稍低,但也达到 0.817。现以整体拟合函数为准,移项后对函数左右求自然对数,即

$$\ln\left(C_1 - \frac{f_i}{f_0}\right) = \ln(-C_2) + C_3\left(\frac{P_i}{P_y}\right) \quad (3)$$

将各系数的拟合值代入,可得

$$\frac{P_i}{P_y} = 0.171 \ln\left(1.005 - \frac{f_i}{f_0}\right) + 1.305 \quad (4)$$

由图 10(a)可知,3 片板的 1 阶频率理论解与空心板初始状态的室内实测值非常接近,若以理论解近似代替  $f_0$ ,则式(4)可进一步转换为

$$\frac{P_i}{P_y} = 0.171 \ln\left(1.005 - \frac{2l^2}{\pi} \sqrt{\frac{m}{EI}} f_i\right) + 1.305 \quad (5)$$

从理论上来说,可根据 RC 空心板服役过程中的实测 1 阶竖弯频率  $f_i$ ,利用式(5)近似判断外加荷载  $P_i$  是否超过了 RC 空心板的屈服荷载  $P_y$ 。

由图 12 可知,3 片板各自及整体的 1 阶频率比-割线刚度比均近似满足多项式函数拟合关系,其中 3 片板各自的拟合相关系数分别为 0.976, 0.974 和 0.964,而以整体数据拟合的相关系数也达到 0.911。从拟合效果来看,割线刚度比荷载更具优势。以整体拟合函数为准,可以得到如下关系

$$\frac{f_i}{f_0} = 1.009 \left(\frac{K_i}{K_0}\right)^{0.136} \quad (6)$$

以空心板的 1 阶频率理论解近似代替  $f_0$ ,则式(6)可转换为

$$\frac{K_i}{K_0} = \left(\frac{1.982l^2}{\pi} \sqrt{\frac{m}{EI}} f_i\right)^{7.353} \quad (7)$$

利用式(7),理论上可根据 RC 空心板服役过程中的实测 1 阶竖弯频率值  $f_i$  近似预测空心板割线刚度的退化情况。但是,尽管图 11(a)显示的 RC 空心板桥的原位实测 1 阶频率与单片空心板的 1 阶频率非常接近,但两者始终存在空间受力上的差别,且试验中的  $P_i$  没有包含汽车荷载冲击效应。另外,在实际桥梁中,1 阶竖弯频率的改变会受到其他因素的影响,而不仅仅是加载的原因,再考虑到本研究试验数据样本较小、加载方式单一等因素,式(5)和式(7)的普适性和工程应用价值还有待进一步验证。

## 4 结 论

1) 3 片 RC 空心板均发生弯曲破坏,其荷载-挠度曲线几乎重合,具有明显的双折线特征,延性系数分别达到 9.00, 8.23 和 8.31。在初始、屈服和破坏 3 个加载阶段中,空心板前 3 阶振动模态均为 1 阶竖弯(对称)、2 阶竖弯(反对称)和 3 阶竖弯(对称),振型与半波正弦曲线吻合,受加载影响不大。

2) RC空心板前3阶振动频率与其荷载、跨中最大挠度和裂缝宽度等抗弯承载性能指标表现出强相关性,均随荷载、挠度和裂缝宽度的增大而下降,其中3片板的1阶频率下降曲线几乎重合,而高阶频率曲线则存在差异,因此1阶频率是RC空心板更好的评价指标。

3) 在屈服临界之前,3片空心板的1阶频率分别下降了4.52%,9.50%和11.46%;在屈服临界之后分别下降了27.81%,21.62%和23.27%,表明1阶频率对荷载比较敏感。

4) 3片空心板1阶频率的理论解与室内实测和原位实测结果都非常接近,理论解稍偏大,以室内实测结果为准,理论解误差分别为7.90%,8.16%和1.94%,而近似解的误差则都超过-15%。高阶频率的理论解明显偏大,近似解的误差更小。例如,2阶频率理论解的最小误差为25.74%,近似解为-4.89%;3阶频率理论解的最小误差达99.63%,而近似解为51.00%。

5) 根据3片板的室内实测数据,得到了RC空心板1阶频率比-荷载比、1阶频率比-割线刚度比拟合函数公式,利用这2个公式,理论上可以通过监测空心板服役过程中的1阶频率来评估外加荷载是否超过屈服荷载,并预测空心板割线刚度的退化情况。

## 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2021年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2022-05-25) [2022-06-10]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524\\_3656659.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html).
- [2] 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.
- [3] AVCI O, ABDELJABER O, KIRANYAZ S, et al. A review of vibration-based damage detection in civil structures: from traditional methods to machine learning and deep learning applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147: 107077.
- [4] 周牧, 贺拴海, 袁万城. RC梁桥承载力的振动测试评估方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 62-67. ZHOU Mi, HE Shuanhai, YUAN Wancheng. Capacity evaluation of RC girder bridge with vibration testing technique [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 62-67. (in Chinese)
- [5] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B. A summary review of vibration-based damage identification methods[J]. The Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91-105.
- [6] HARRIS K A. Structural testing of prestressed concrete girder from the lake view drive bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(2): 78-92.
- [7] ROSS B E, ANSLEY M H, HAMILTON I H R. Load testing of 30-year-old AASHTO type III highway bridge girders[J]. PCI Journal, 2011, 56(4): 152-163.
- [8] ZHANG J R, PENG H, CAI C S. Destructive testing of a decommissioned reinforced concrete bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(6): 564-569.
- [9] DI J, SUN Y F, YU K, et al. Experimental investigation of shear performance of existing PC hollow slab[J]. Engineering Structures, 2020, 211: 110451.
- [10] QU G Z, ZHOU G L, LV S Z, et al. Flexural capacity and behavior of RC hollow bridge beams after a time service of 24 years[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 6: 1-13.
- [11] 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, 36(6): 57-66. 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, 36(6): 57-66. (in Chinese)
- [12] 康省楨. 预应力混凝土空心板梁桥破坏机理试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- [13] 赖小军. 钢筋混凝土梁桥损伤与承载性能关系研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [14] 曾鹏, 贾艳敏, 王佳伟. 既有钢筋混凝土空心板梁抗弯承载力分析[J]. 铁道建筑, 2017, 57(9): 39-42. ZENG Peng, JIA Yanmin, WANG Jiawei. Analysis of bending bearing capacity of existing reinforced concrete hollow slab beam [J]. Railway Engineering, 2017, 57(9): 39-42. (in Chinese)
- [15] 郭凯强. 既有预应力混凝土空心板梁抗弯承载力分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
- [16] 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, 2018.
- [17] SHEN D J, LIU X Z, ZHOU B Z, et al. Influence of initial cracks on the frequency of a 60-year-old reinforced-concrete box beam[J]. Magazine of Concrete Research, 2019, 73(3): 121-134.
- [18] 宋一凡. 桥梁结构动力学[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020: 2-4.



**第一作者简介:**徐略勤,男,1983年7月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁抗震与结构动力学。  
E-mail: xulueqin@163.com

**通信作者简介:**张洪,男,1987年5月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁健康监测及无损检测。  
E-mail: hongzhang@cqjtu.edu.cn