

在役混凝土 T 梁疲劳刚度退化及 寿命预测方法

左新黛, 张劲泉, 赵尚传

(交通运输部公路科学研究院 桥梁隧道研究中心, 北京 100088)

摘要:为获取在役混凝土 T 梁疲劳刚度退化规律,开展疲劳寿命预测,基于损伤力学理论构建了考虑开裂损伤的混凝土 T 梁阶梯刚度模型,通过对 3 根 10 m 钢筋混凝土 T 梁足尺模型进行静力和疲劳破坏试验,获取了疲劳剩余刚度随荷载作用次数的演化规律。引入疲劳损伤系数和刚度退化系数,建立了在役混凝土 T 梁疲劳寿命预测模型。分析结果表明:随着荷载作用次数的增加,桥梁剩余刚度呈现三阶段衰减,其中疲劳初期和后期阶段衰减较快,但占总寿命比重相对较小,而疲劳中期阶段呈线性稳定退化,约占疲劳总寿命的 80% 以上,为桥梁服役的主要阶段,疲劳破坏时剩余刚度约为初始刚度的 82.7%。最终,针对在役混凝土 T 梁桥工作性状,提出了在役钢筋混凝土梁桥寿命预测方法,相关研究成果可为此类桥梁寿命预测研究提供理论支持。

关键词:桥梁工程;在役混凝土 T 梁;疲劳寿命;阶梯刚度模型;累积损伤系数

中图分类号:U448.38 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2023)09-2563-10

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211238

Fatigue stiffness degradation and life prediction method of in-service concrete T-beams

ZUO Xin-dai, ZHANG Jin-quan, ZHAO Shang-chuan

(Bridge Tunnel Research Center, Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to obtain the fatigue stiffness degradation law of in-service concrete T-beams and carry out fatigue life prediction. Based on the theory of damage mechanics, a stepped stiffness model of concrete T-beams including cracking damage was constructed. Through the full-scale model of three 10 m concrete T beams, static and fatigue failure tests were carried out to obtain the evolution law of fatigue residual stiffness with the number of loads. The fatigue damage coefficient and stiffness degradation coefficient were introduced to establish a concrete T beam in service fatigue life prediction model. The analysis results show that with the increase of load, the residual stiffness of the bridge exhibits three-stage decay, in which the initial and later stages of fatigue decay rapidly, but account for a relatively small proportion of the whole life. The result shows that more than 80% of the whole service life is the main stage of bridge service, it is about 82.7% of the initial

收稿日期:2021-11-18.

基金项目:交通运输部公路院科技创新专项资金项目(2019-I113);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(2017-9035).

作者简介:左新黛(1979-),女,副研究员,硕士.研究方向:桥梁结构安全与耐久性.E-mail:330217252@qq.com

stiffness at the time of fatigue failure. Finally, according to the working behavior of in-service concrete T-girder bridges, a life prediction method for in-service reinforced concrete girder bridges is proposed, the related research results can provide theoretical support for the study of life prediction of such bridges.

Key words: bridge engineering; in-service concrete T-beam; fatigue life; stepped stiffness model; cumulative damage coefficient

0 引言

截至 2019 年底,我国公路桥梁 87.83 万座,其中,中小跨径桥梁 76.42 万座,占比 87.01%^[1]。与大跨桥梁相比,中小跨径桥梁自重较轻,在车辆荷载反复作用下,桥梁结构更易产生疲劳损伤,从而导致结构功能弱化、承载能力降低,严重时甚至影响桥梁结构安全^[2-4]。因此,如何有效地识别中小桥梁的结构损伤,获取在役桥梁的使用寿命,成为工程技术人员研究的重点。

各国学者针对桥梁疲劳损伤演化规律开展了广泛研究,如刘芳平等^[4]基于截面惯性矩理论并考虑刚度折减,建立了考虑疲劳损伤的钢筋混凝土梁承载力退化模型,描述了其刚度退化变化规律。汪炳等^[5]基于刚度退化函数,结合相关试验数据,建立了钢混组合梁刚度退化模型,并通过试验结果得出此类结构的刚度退化规律和相应评价指标。其他学者也开展了不同桥型的疲劳损伤研究,均得出桥梁结构的疲劳损伤与疲劳刚度退化有关^[6-9],并提出了相关评价指标^[10-13]。Neild 等^[14]研究非线性振动行为下钢筋混凝土梁损伤变化规律,获取了动力效应下桥梁的损伤特性。曹晖等^[15]通过对 PC 梁的疲劳加载和试验,得出随着疲劳荷载的增大,主梁损伤逐渐加重、结构基频值逐渐减小的变化规律。卫军等^[16]采用 5.5 m 缩尺模型,研究了疲劳损伤演化对梁结构模态频率的影响机制,提出了一种以固有频率为损伤变量的桥梁结构疲劳损伤演化规律研究方法。

综上所述:相关学者主要以应变、挠度、频率与刚度间的相关关系,作为桥梁损伤评估的主要方法。大多研究成果采用缩尺模型进行分析,且桥梁结构各截面刚度等效为同一刚度,但实际梁疲劳损伤退化规律和缩尺模型有所差别,且受裂缝影响,桥梁刚度沿梁长度方向近似呈阶梯状分布,使得计算结果与实际情况有所偏差。

因此,基于已有研究成果,本文构建了基于阶梯刚度的在役混凝土 T 梁损伤模型。引入剩余

刚度比和累积损伤系数,推导了损伤桥梁结构振动基频计算公式。通过 3 根 10 m 钢筋混凝土 T 梁足尺模型,进行了静力试验和疲劳破坏试验,获取了桥梁疲劳刚度退化规律,并提出了考虑裂缝分布的在役混凝土梁桥疲劳寿命预测方法。

1 基于阶梯刚度的在役混凝土 T 梁损伤模型基频计算

钢筋混凝土材料由于其抗拉强度较低,在运营期间桥梁处于带裂缝工作状态,车辆等交替荷载作用下易产生疲劳损伤,加剧裂缝的扩展。通过分析桥梁开裂裂缝形态特征,提出了基于损伤阶梯刚度模型的在役混凝土 T 梁分析模型。

1.1 基本假定

(1) 平截面假定:混凝土梁开裂前、后的变形均满足平截面假定。

(2) 损伤梁刚度双阶梯分布:不考虑实际梁体裂缝的差别和分布情况,将开裂损伤后的梁体分为开裂段和未裂段两段,疲劳损伤沿梁截面高度方向均匀分布,裂缝开裂范围内梁段各截面抗弯刚度均相同。

(3) 梁体开裂段刚度单调下降:不考虑疲劳过程中梁体的质量改变与呼吸裂缝的影响,疲劳全过程梁体开裂段抗弯刚度呈单调下降趋势。

(4) 梁体开裂损伤不引起结构质量和边界条件的改变,也不影响梁体宏观受力模式及其响应。

1.2 在役混凝土 T 梁阶梯刚度模型

根据在役混凝土 T 梁开裂裂缝分布及其发展特征(见图 1),以混凝土梁支座处最外侧主要受力裂缝位置为分界,将开裂损伤的钢筋混凝土梁划分为开裂段和未裂段两部分,即考虑阶梯刚度的混凝土梁损伤模型,如图 2 所示。

图 1 和图 2 中, EI_0 为未开裂(无损伤)梁段的抗弯刚度, $MN \cdot m^2$; EI_n 为 n 次交变荷载作用后开裂(损伤)梁段的抗弯刚度,即疲劳剩余刚度, $MN \cdot m^2$; x_1 、 x_2 分别为左、右支座中心至损伤梁体最外侧主要受力裂缝之间的水平距离, m ; l 为混凝土

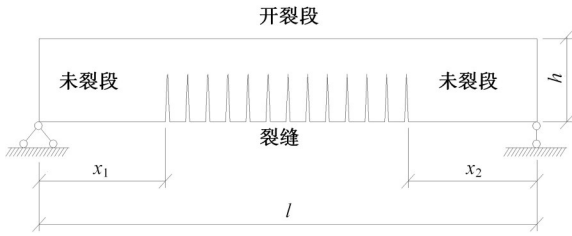


图 1 混凝土 T 梁开裂弯曲裂缝分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cracking and bending crack distribution of concrete T-beam

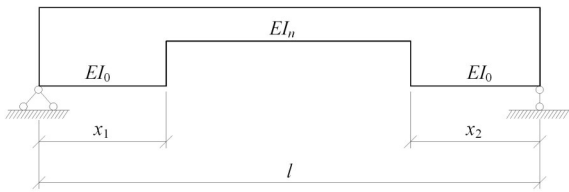


图 2 损伤混凝土 T 梁阶梯刚度模型

Fig. 2 Staircase stiffness model of damaged concrete T-beam

梁的计算跨径, m; h 为混凝土梁截面高度, m。

1.3 在役混凝土 T 梁基频计算公式

桥梁结构的动力特性真实反映其实际工作状态,固有频率作为桥梁结构重要的动力参数之一,其频率变化值与梁体疲劳损伤间存在内在联系。相关研究表明^[17]钢筋混凝土梁的疲劳寿命预测可采用疲劳剩余刚度描述,且易于通过挠度、频率等基本量值的测试求得。

在实际桥梁工程结构中,混凝土 T 梁的跨高比较大 ($l/h > 10$),梁体在运动过程中剪切变形与转动惯量对其振动固有频率影响较小,可以忽略不计,此类梁称为 Euler 梁。根据结构动力学理论,建立 Euler 梁自由振动微分方程,如下所示:

$$EI(x) \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} + \rho A(x) \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中: $EI(x)$ 为沿轴线方向梁各截面的抗弯刚度, $\text{MN}\cdot\text{m}^2$; $\rho A(x)$ 为梁单位长度的质量, kg ; $v(x, t)$ 为梁的横向振动位移, mm ; E 为材料的弹性模量, MPa ; ρ 为材料的密度, kg/m^3 。

在疲劳荷载下不考虑桥梁结构质量随疲劳荷载的变化而变化,梁开裂段抗弯刚度随着疲劳循环次数而不断退化降低,本文定义疲劳作用下开裂梁段的剩余抗弯刚度比 $\eta_n = EI_n/EI_0$,则 n 次疲劳交替荷载作用后混凝土梁体开裂段刚度为 $EI_n = \eta_n EI_0$ 。

采用分离变量法,假定式(1)解的形式为:

$$v(x, t) = \phi(x) \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

式中: $\phi(x)$ 为桥梁振动模态; ω 为桥梁振动圆频率, rad/s ; θ 为桥梁振动初相角。

将式(2)代入式(1)得:

$$\frac{d^4 \phi(x)}{dx^4} + \alpha^4 \phi(x) = 0 \quad (3)$$

式中: $\alpha = \frac{\rho \cdot A(x) \cdot \omega^2}{EI(x)}$ 。

微分方程式(3)的通解为:

$$\phi(x) = C_1 \sin(\alpha x) + C_2 \cos(\alpha x) + C_3 \sinh(\alpha x) + C_4 \cosh(\alpha x) \quad (4)$$

式中: $\phi(x)$ 为结构振型; $C_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 可根据边界条件进行确定。

依据混凝土梁阶梯刚度损伤模型,采用瑞利法(Rayleigh)进行求解,可得 n 次交变荷载作用后损伤混凝土梁基准圆频率 ω_n 为:

$$\omega_n^2 = \frac{\int_0^{x_1} EI_0 [\phi''(x)]^2 dx + \int_0^l \rho A(x) [\phi(x)]^2 dx + \int_{x_1}^{l-x_2} \eta_n EI_0 [\phi''(x)]^2 dx + \int_0^l \rho A(x) [\phi(x)]^2 dx + \int_{l-x_2}^l EI_0 [\phi''(x)]^2 dx}{\int_0^l \rho A(x) [\phi(x)]^2 dx} \quad (5)$$

假设损伤梁体的 1 阶振型函数 $\phi(x) = \sin \frac{\pi}{l} x$, 则 n 次交变荷载作用后损伤混凝土梁基准圆频率为:

$$\omega_n^2 = \left\{ \pi^3 EI_0 (\pi C + lAB) + \eta_n \pi^3 EI_0 [\pi(l - C) - lAB] \right\} / \left(2l^4 \int_0^l \rho A(x) \sin^2 \frac{\pi}{l} x dx \right) \quad (6)$$

式中: $A = \sin \frac{\pi}{l} (l - x_1 - x_2)$; $B = \cos \frac{\pi}{l} (l + x_1 - x_2)$; $C = x_1 + x_2$ 。

当混凝土梁未开始疲劳加载时,梁体处于无损伤状态,则 $n=0, x_1=x_2=l/2, \eta_n=\eta_0=1$,代入式(6)可得无损伤混凝土简支梁 1 阶固有频率(基频) ω_0 的计算公式为:

$$\omega_0^2 = \frac{\pi^4 EI_0}{2l^3 \int_0^l \rho A(x) \sin^2 \frac{\pi}{l} x dx} \quad (7)$$

设梁体为等截面,试验梁单位长度质量为

$m = \rho A$, 代入式(7)可解出等截面简支梁的基频 $\omega_0^2 = (\pi/l)^2 \sqrt{EI_0/m}$, 其计算结果与文献[18]一致, 验证了方法的正确性。

根据圆频率与频率之间的关系, 即 $\omega = 2\pi f$, 其中 ω 为桥梁振动圆频率, rad/s, 频率 $f = 1/T$, T 为桥梁自振周期, s。损伤梁阶梯刚度分布下的剩余抗弯刚度比 η_n 为:

$$\eta_n = \frac{8f^2 l^4 \int_0^l \rho A(x) \sin^2 \frac{\pi}{l} x dx - \pi EI_0 (\pi C + lAB)}{\pi EI_0 [\pi(l - C) - lAB]} \quad (8)$$

后续可通过对混凝土梁进行外观检查和动测试验, 获取 n 次交变荷载作用后损伤混凝土梁的基频 f_n 和开裂段长度 x_1, x_2 , 通过式(8)计算混凝土梁剩余抗弯刚度比 η_n 和 EI_n 。

2 试验设计

2.1 试验准备

(1) 设计及制作

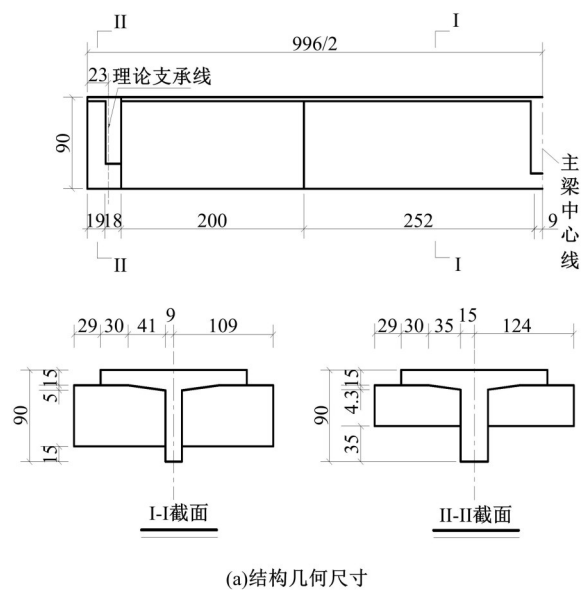
根据试验研究目的, 参照交通运输部装配式钢筋混凝土 T 梁设计标准图, 制作了 3 根 10 m (计算跨径 $l = 9.96$ m) 钢筋混凝土 T 梁足尺模型, 几何尺寸和配筋详如图 3 所示, 现场加工制作如图 4 所示。其中, 1 根试验梁 (编号 TLJ) 进行静载破坏试验, 以确定静力极限荷载 P_u 值; 其余 2 根试验梁 (编号分别为 TLD-1 和 TLD-2) 用于疲劳破坏试验。为减少混凝土材料自身收缩和徐变对试验测试结果的影响, 混凝土梁浇筑后进行了 28 d 的洒水和保温养护措施, 且 3 根梁在试验前均存放 6 个月以上。

(2) 材料相关参数

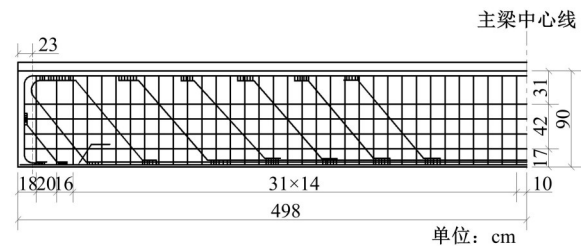
依据交通运输部装配式钢筋混凝土 T 型梁设计标准图的相关设计参数, 本文试验梁采用标号 C30 混凝土浇筑, 混凝土配合比 (质量比) $m_{\text{水泥}} : m_{\text{水}} : m_{\text{砂子}} : m_{\text{石子}}$ 分别为 461 : 175 : 512 : 1252。纵向钢筋 (主筋) 采用直径为 32 mm 和 28 mm 的 HRB400 级热轧带肋钢筋, 箍筋和分布钢筋均采用直径为 8 mm 的 HPB300 级热轧光面钢筋。

(3) 力学指标

试验梁浇筑时, 依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2016) 分别制作了 3 组标准混凝土立方体和棱柱体试块, 测试混凝土立方体和棱柱体抗压强度、弹性模量等相关力学性能指标。依据《金属拉伸试验法》(GB 228—



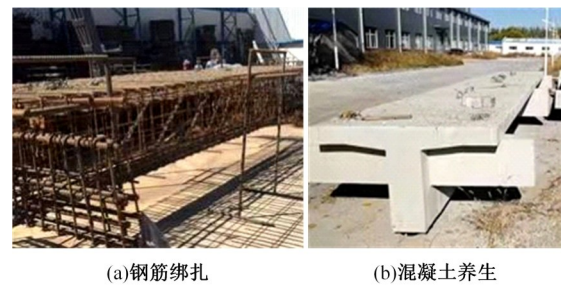
(a) 结构几何尺寸



(b) 结构配筋示意图

图 3 T 梁布置图

Fig. 3 Layout of T beam



(a) 钢筋绑扎

(b) 混凝土养生

图 4 试验梁制作

Fig. 4 Fabrication of test beam

87) 对钢筋的力学性能进行了测试, 试验梁混凝土与钢筋的主要力学性能指标如表 1 所示。

表 1 试验梁混凝土与钢筋力学性能指标

Table 1 Mechanical properties of concrete and steel bars for test beam

材料种类	立方体抗压强度/ MPa	棱柱体抗压强度/ MPa	屈服强度/ MPa	弹性模量/ 10^4 MPa
C30 混凝土	36.8	26.2	—	3.20
32 mm HRB400	—	—	485	20.5
28 mm HRB400	—	—	467	20.5
HPB300	—	—	347	21.0

2.2 加载方案和参数设置

采用 SERVO-TEST 2000 kN 数显式脉动试验机对试验梁进行单点加载,精度为 1 kN。为防止梁体局部压碎,试验机作动器在试验梁跨中处通过橡胶垫板施加单点作用荷载,如图 5 所示。



图 5 试验梁加载

Fig. 5 Test beam loading

在进行静力试验时,通过控制液压伺服作动器对试验梁 TLJ 进行分级静力加载直至失效破坏,测得混凝土 T 梁的极限荷载 $P_u=930$ kN。疲劳加载时,交变荷载采用正弦波加载方式,加载频率为 3 Hz,通过自编疲劳-荷载加载曲线控制作动器,施加交变力进行疲劳累积损伤测试,加载参数如表 2 所示。表 2 中, P_{max} 、 P_{min} 分别为疲劳荷载的上、下限, kN, 疲劳荷载上限近似取为极限荷载,为 $0.4P_u$ 。

表 2 疲劳试验加载参数

Table 2 Loading parameters of fatigue test

试验梁编号	P_{min}/kN	P_{max}/kN	应力幅/kN
TLD-1	50	370	320
TLD-2	50	370	320

试验加载工序参考《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012),即全过程包括预加载、等幅疲劳加载、静力加载和动测加载 4 个加载工况,并测试在不同疲劳累积次数 n 下试验梁的基频和裂缝变化情况,其主要工序如下所示。

(1)对初始未加载无损伤试验 T 梁进行动测试验,采集加速度传感器信号进行频谱分析,获取试验梁开裂前基频值。

(2)在疲劳试验开始前进行预加载,预加载值为 20 kN,用以消除作动器及支座等连接部位之间的接触空隙,并检查试验仪器的工作状况。

(3)利用试验加载设备控制模块设置疲劳上、下限和加载频率,对试验梁 TLD-1、TLD-2 进行

等幅疲劳试验。

(4)当疲劳荷载每循环 10 万次后停机,分别对试验梁进行 1 次动测试验和 1 次静力试验,动测试验如前所述,静力加载采用分级加载至疲劳上限,每级荷载取为疲劳上限的 20%,测量各级荷载下混凝土梁挠度和裂缝变化情况(监测不同疲劳荷载作用次数下 T 梁最外侧裂缝位置,以确定梁体损伤段长度 x_1 、 x_2)。

2.3 测点布置和数据采集

在试验梁跨中、四等分点和支点 5 个断面位置布设位移计,采用 UCAM-60B 静态数据采集仪采集试验梁挠度值;同时,采用混凝土裂缝测试仪监测加载过程梁体裂缝情况,相关设备如图 6 所示。此外,在试验梁的四等分点布设加速度传感器,进行模态参数识别,测点布置如图 7 所示。动测试验采用锤击法进行激励,利用 INV 3062T 动态信号采集分析仪采集动态数据。



(a)UCAM-60B 静态数据采集仪 (b)HC-F800 混凝土裂缝缺陷综合测试仪

图 6 试验数据采集设备

Fig. 6 Test data acquisition equipment



图 7 试验梁测点布置图

Fig. 7 Measuring point layout of test beam

3 试验结果分析

3.1 试验现象

试验梁 TLJ 在静载试验时,当荷载从 0 kN 增大到 135 kN 时,跨中截面梁肋下缘首先出现竖向弯曲裂缝。随着作用荷载的增大,T 梁跨中附近两侧腹板在弯矩和剪力的共同作用下出现腹剪型斜裂缝,不断向两侧扩展;随着作用荷载的继续增大,试验梁 TLJ 达到破坏,其破坏形态为 T 梁截面下侧受拉钢筋屈服(未断裂),跨中翼缘板顶面混

混凝土压碎,属于典型的适筋梁破坏,荷载-跨中挠度曲线如图 8 所示,其极限荷载 $P_u=930$ kN。

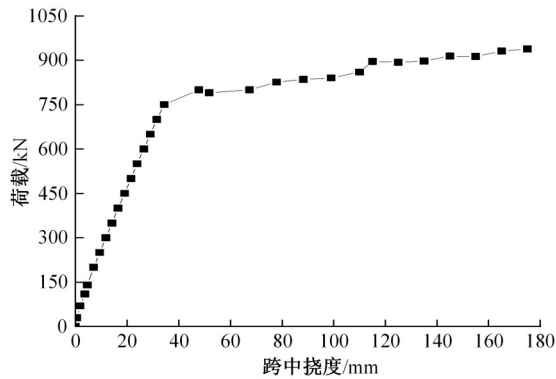


图 8 TLJ 梁荷载-跨中挠度曲线

Fig. 8 Load-midspan deflection curve of TLJ beam

试验梁(TLD-1、TLD-2)在疲劳试验初期,受截面弯矩的影响,简支 T 梁在跨中截面下侧受拉区首先出现竖向开裂,但裂缝数量少且较细小,试验梁处于带裂缝工作阶段;在疲劳试验中期,随着荷载循环次数的增加,竖向裂缝逐渐增多、变长,在跨中加载位置下方梁腹板两侧中部区域开始出现腹剪型斜裂缝并逐步沿支座向跨中 45° 方向扩展,随荷载作用不断呈张合状态交替变化,同时裂缝长度、宽度和数量不断扩展,在 1/4 跨至跨中区域裂缝分布较为密集;在疲劳试验后期,结构裂缝尺寸和数量呈较快增长,梁跨中下侧受拉区部分混凝土出现剥落现象,开裂处钢筋和混凝土材料不再保持协同关系;疲劳破坏时,钢筋混凝土 T 梁出现较为显著的斜向裂缝,普通钢筋突然断裂破坏,钢筋疲劳断口平整光滑,钢筋失效后混凝土梁的承载力明显下降,试验梁发生疲劳破坏,其破坏类型均为跨中下侧受力纵筋发生疲劳断裂,如图 9(a)(b)所示。疲劳寿命和最大裂缝宽度如表 3 所示。

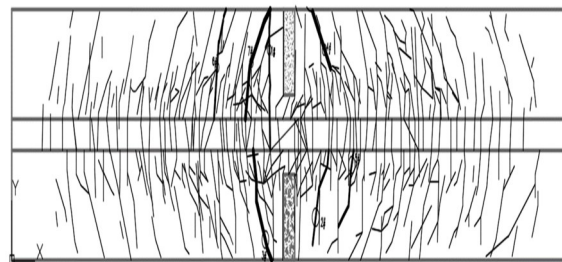
3.2 开裂梁段疲劳刚度退化

工程结构的基频(1 阶固有频率)能够真实地反映结构的工作性状,桥梁基频与结构的刚度密切相关,疲劳荷载作用下桥梁结构开裂段刚度变化与结构基频变化也是一一对应^[19]。梁体在疲劳试验前各截面刚度可按换算截面刚度确定^[20]。为验证本文混凝土梁阶梯刚度模损伤型的正确性,测试获取试验梁 TLJ、TLD-1 与 TLD-2 的基频,并用式(6)计算结果进行比对,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,3 片试验梁基频测试值基本一



(a) 试验梁疲劳破坏裂缝情况



(b) 试验梁疲劳破坏裂缝分布示意图

图 9 试验梁破坏形态

Fig. 9 Failure mode of test beams

表 3 试验梁疲劳寿命及最大裂缝宽度

Table 3 Loading parameters of fatigue test

试验梁编号	疲劳寿命/ 10^4 次	最大裂缝宽度 w_{max} /mm
TLD-1	132	2.23
TLD-2	141.5	1.75

表 4 未开裂试验梁基频对比

Table 4 Comparison of fundamental frequency of uncracked test beams

试验梁编号	基频 f /Hz		误差/%
	试验值	理论计算值	
TLJ	15.01	15.23	1.44
TLD-1	15.13	15.23	0.66
TLD-2	14.96	15.23	2.43

致,与理论计算值误差均小于 3%。通过对试验梁 TLD-1 与 TLD-2 在不同荷载循环次数下进行动测试验,获取其基频值,并根据式(8)计算损伤梁段的剩余刚度比 η_n 与剩余刚度 B_n ,如表 5 所示,试验梁剩余刚度随荷载作用次数的变化曲线如图 10 所示。

由图 10 可知,在疲劳试验中,2 根试验梁 TLD-1 和 TLD-2 的疲劳剩余刚度 B_n 随荷载作用次数 n 的增加而降低,剩余刚度呈现“快-慢-快”三阶段衰退变化趋势。疲劳初期(荷载作用次数

表 5 不同荷载作用次数下试验梁基频实测值与剩余刚度计算值

Table 5 Calculated values of fundamental frequency and residual stiffness of test beams under different loading times

荷载循环次数 $n/10^4$ 次	TLD-1					TLD-2				
	x_1/m	x_2/m	基频 f/Hz	剩余刚度比 η_n	剩余刚度 $B_n/$ ($MN \cdot m^2$)	x_1/m	x_2/m	基频 f/Hz	剩余刚度比 η_n	剩余刚度 $B_n/$ ($MN \cdot m^2$)
0.0	0.0	0.0	15.13	1.000	765.712	0.0	0.0	14.96	1.000	738.627
10.0	4.1	4.1	14.94	0.907	694.803	4.1	4.2	14.94	0.900	664.674
20.0	3.9	3.9	14.85	0.895	685.169	4.0	4.0	14.88	0.894	660.385
30.0	3.7	3.6	14.74	0.885	677.781	4.0	3.9	14.86	0.892	659.215
40.0	3.7	3.5	14.71	0.881	674.787	3.5	3.7	14.75	0.892	659.165
50.0	3.5	3.4	14.66	0.881	674.727	3.4	3.4	14.68	0.890	657.288
60.0	3.4	3.2	14.61	0.880	674.200	3.2	3.2	14.62	0.889	656.816
70.0	3.3	3.1	14.57	0.878	672.651	3.1	3.0	14.58	0.889	656.865
80.0	3.3	3.1	14.56	0.876	671.021	2.9	3.0	14.54	0.887	654.868
90.0	3.1	3.0	14.52	0.877	671.895	2.9	2.8	14.51	0.886	654.229
100.0	2.8	2.6	14.40	0.873	668.518	2.8	2.8	14.48	0.883	651.935
110.0	2.8	2.6	14.39	0.871	667.220	2.8	2.6	14.44	0.880	649.888
120.0	2.8	2.6	14.37	0.868	664.627	2.8	2.6	14.41	0.875	646.124
130.0	1.8	1.5	14.11	0.860	658.861	2.3	2.2	14.16	0.853	629.929
132.0	1.6	1.5	13.90	0.835	639.407	—	—	—	—	—
140.0	—	—	—	—	—	2.1	1.8	13.98	0.836	617.775
141.5	—	—	—	—	—	2.1	1.8	13.85	0.819	604.714

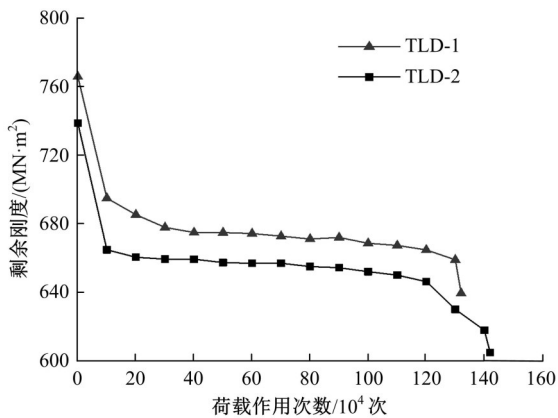


图 10 试验梁剩余刚度随荷载作用次数变化曲线
Fig. 10 Curve of residual stiffness of test beam changing with number of load actions

$n < 10 \times 10^4$ 次), T 梁跨中梁肋疲劳裂缝产生并快速扩展, 试验梁剩余刚度衰减较快, 退化率在 10% 左右, 该阶段约占梁疲劳全寿命的 5%~10%; 当荷载循环次数 $n \geq 10 \times 10^4$ 次时, 为疲劳中期阶段, 此阶段刚度退化基本稳定, 呈线性稳定退化趋势, 梁体疲劳裂缝增加缓慢, 此阶段约占梁疲劳全寿命的 80%~85%; 在疲劳末期(荷载循环次数 $n > 120 \times 10^4$ 次), 试验梁剩余刚度又呈现快速退化且变化时间较短, 梁体裂缝数量与宽度扩展迅速, 刚度退化率在 15% 左右, 此阶段约占梁疲劳全寿命的 5%~10%。

4 在役混凝土 T 梁疲劳寿命预测

4.1 疲劳累积损伤系数

桥梁抗弯刚度为绝对量值, 受结构尺寸、材料和约束不同的影响, 其抗弯刚度量值相差甚远, 为定量衡量构件或结构在不同荷载循环作用次数下的疲劳损伤程度, 引入疲劳累积损伤系数 D , 其公式如下:

$$D = \beta(1 - B_n/B_0) \quad (9)$$

式中: D 为混凝土梁疲劳累积损伤系数, 取值为 0~1 (代表结构处于无损伤~疲劳破坏状态); B_0 为梁体未发生疲劳损伤时的初始刚度 ($MN \cdot m^2$), 可按照桥梁设计图纸计算或通过桥梁基频进行反算, $B_0 = EI_0$; B_n 为 n 次荷载循环作用后梁体开裂段的剩余刚度 ($MN \cdot m^2$), 可基于动测试验基频进行反算获得; β 为修正系数。

4.2 疲劳寿命预测模型

由图 10 可知, 试验梁剩余刚度变化曲线中疲劳中期阶段约占梁疲劳总寿命的 80% 以上, 且该阶段梁剩余刚度变化基本呈线性, 该阶段初始剩余刚度为 $0.9B_0$, 该阶段梁剩余刚度 B_n 与荷载作用次数 n 之间具有很好的线性相关性, 其表达式为:

$$B_n = 0.9B_0 - kn \quad (10)$$

式中: k 为梁开裂段剩余刚度随荷载作用次数的退化速率; n 为疲劳荷载循环作用次数。

根据式(10)和表 5 可知,试验梁破坏时结构的刚度比 B_{N_i}/B_0 分别为 0.835 和 0.819,其中 B_{N_i}

为试验梁破坏时的剩余刚度($\text{MN}\cdot\text{m}^2$),平均值为 0.827,标准差为 0.008,表明试验梁疲劳破坏时剩余刚度约为初始刚度的 82.7%。计算试验梁(TLD-1、TLD-2)剩余刚度退化率 k ,如表 6 所示。

表 6 试验梁疲劳试验结果

Table 6 Fatigue test results of test beams

试验梁编号	初始刚度 $B_0/(\text{MN}\cdot\text{m}^2)$	破坏刚度 $B_{N_i}/(\text{MN}\cdot\text{m}^2)$	刚度比 B_{N_i}/B_0	刚度退化率 $k/(10^{-4}\text{MN}\cdot\text{m}^2)$	疲劳寿命 $N_f/10^4$ 次
TLD-1	765.712	639.407	0.835	0.271	132.0
TLD-2	738.672	604.714	0.819	0.241	141.5

由式(9)可知:混凝土 T 梁疲劳损伤破坏时疲劳累积损伤系数 $D=1.0$,疲劳剩余刚度 $B_{N_i}=0.827B_0$,代入式(9)中可得 $\beta=5.78$ 。

根据疲劳破坏相关试验结果,绘制荷载循环作用寿命比与累积损伤系数退化曲线,如图 11 所示。试验梁(TLD-1、TLD-2)在疲劳破坏试验中期末,疲劳累积损伤系数 D 分别为 0.860 与 0.875,其平均值为 0.868,荷载循环作用次数与疲劳寿命比值分别为 0.985 和 0.848,其平均值 0.917,将相关数据代入式(9)(10),可求出试验梁疲劳寿命 N_f 为:

$$N_f = 0.05B_0/k \quad (11)$$

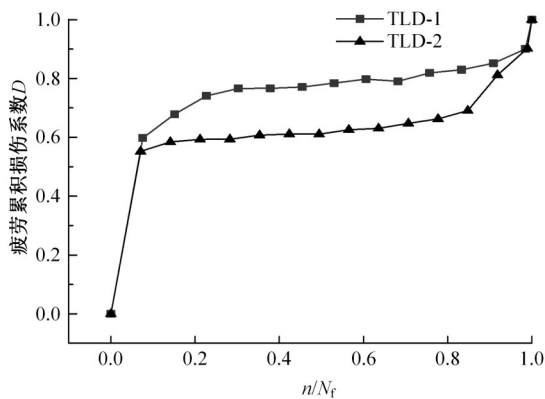


图 11 试验梁疲劳累积损伤系数-循环寿命比曲线

Fig. 11 Test beam fatigue cumulative damage coefficient - cycle life ratio curve

通过式(11)可对试验梁疲劳寿命进行预测,如表 7 所示。试验梁 TLD-1、TLD-2 预测寿命分别与疲劳试验测试值最大相差 7.0% 和 8.3%。

表 7 疲劳寿命预测相对误差

Table 7 Relative error of fatigue life prediction

试验梁编号	疲劳寿命/ 10^4 次	预测寿命/ 10^4 次	相对误差%
TLD-1	132.0	141.3	7.0
TLD-2	141.5	153.3	8.3

4.3 疲劳寿命预测方法

目前,在役混凝土 T 梁大都处于疲劳中期,根据试验梁疲劳寿命预测模型,提出在役混凝土 T 梁桥疲劳寿命预测方法,具体步骤如下所示。

Step1 根据桥梁设计图纸,计算无损伤混凝土 T 梁初始刚度 B_0 。

Step2 通过外业调查,获取 t_0 时刻桥梁裂缝的相关分布,确定 x_1^0 和 x_2^0 取值。

Step3 在桥梁 $L/4$ 、跨中和 $3L/4$ 位置分别布置加速度传感器,采用环境激励法测量 t_0 时刻主梁的基频 f_1^0 。

Step4 考虑间隔 Δt (一般可取 3~6 个月),重复 Step2 和 Step3,获取桥梁 t_1 时刻的 x_1^1 、 x_2^1 与 f_1^1 。

Step5 分别计算 t_0 、 t_1 时刻主梁的剩余抗弯刚度 B_{n_0} 和 B_{n_1} 。

$$B_{n_0} = 0.90B_0 - kn_1 \quad (12)$$

$$B_{n_1} = 0.90B_0 - kn_2 \quad (13)$$

式中: n_1 和 n_2 分别为 t_0 、 t_1 时刻的桥梁荷载作用次数。

Step6 确定在役混凝土 T 梁刚度退化率 k 。

$$k = \frac{B_{n_0} - B_{n_1}}{n_1 - n_0} \quad (14)$$

假设在役混凝土 T 梁在运营阶段第 i 月的交通荷载作用次数为 m_i 次,则 $n_1 - n_0 = \sum_{i=1}^{\Delta t} m_i$,其中 Δt 为交通荷载作用间隔时间,月。

Step7 连续观测 p 个时段的裂缝扩展情况和基频值,重复 Step1~Step6,则 T 梁刚度退化率平均值 \bar{k} 值为:

$$\bar{k} = \sum_{j=1}^p k_j / p = \left(\frac{B_{n_0} - B_{n_1}}{n_1 - n_0} + \frac{B_{n_1} - B_{n_2}}{n_2 - n_1} + \dots + \frac{B_{n_{(p-1)}} - B_{n_p}}{n_p - n_{p-1}} \right) / p \quad (15)$$

式中: \bar{k} 为刚度退化率平均值; p 为观测时段,月。

Step8 将 \bar{k} 和 B_0 代入式(11),即可确定桥梁的疲劳寿命 N_{f_0} 。

5 结 论

(1)基于损伤力学相关理论,引入了剩余刚度比和疲劳累积损伤系数,综合考虑主梁裂缝扩展,建立了基于阶梯刚度的在役混凝土T梁损伤模型,推导出在役混凝土T梁基频计算公式。

(2)通过3根10m钢筋混凝土T梁足尺模型,开展静力和疲劳破坏试验,获取试验梁疲劳剩余刚度随荷载作用次数的三阶段退化规律。在疲劳初期,试验梁剩余刚度衰减较快,但退化率相对较小;在疲劳中期,试验梁剩余刚度近似呈线性稳定退化,占疲劳寿命的主要阶段,为混凝土T梁桥服役的主要阶段;在疲劳后期,试验梁呈快速退化但变化时间较短。

(3)基于疲劳中期剩余刚度线性退化特征,建立了钢筋混凝土T梁疲劳寿命预测模型。针对在役混凝土T梁桥服役状况,提出了在役混凝土T梁桥的疲劳寿命计算方法,其相关研究方法可为我国中小跨径桥梁疲劳寿命预测提供借鉴。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2019年年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京:交通运输部, 2020.
- [2] 宋秀华, 肖新辉, 鲁乃唯. 基于疲劳损伤的中小跨径桥梁限载取值研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 58-63.
Song Xiu-hua, Xiao Xin-hui, Lu Nai-wei. Study on vehicle load limit of medium and small span bridges based on fatigue damage[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 58-63.
- [3] 卫军, 杜永潇, 梁曼舒. 梁结构疲劳刚度退化对模态频率的影响[J]. 浙江大学学报:工学版, 2019, 53(5): 899-909.
Wei Jun, Du Yong-xiao, Liang Man-shu. Influence of fatigue stiffness degradation for beam structure on modal frequency[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(5): 899-909.
- [4] 刘芳平, 易文韬. 钢筋混凝土梁基于疲劳刚度退化的承载力退化模型研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(22): 99-104, 66.
Liu Fang-ping, Yi Wen-tao. Research on bearing capacity degradation model of reinforced concrete beams based on fatigue stiffness degradation[J]. Building Structure, 2020, 50(22): 99-104, 66.
- [5] 汪炳, 黄侨, 刘小玲. 组合梁疲劳后的刚度退化规律及计算模型[J]. 振动与冲击, 2021, 40(6): 265-271.
Wang Bing, Huang Qiao, Liu Xiao-ling. Stiffness degradation and its calculation model for composite beams after fatigue[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(6): 265-271.
- [6] 周虎, 肖勇刚, 谭斌. 基于断裂力学的混凝土桥梁疲劳损伤及寿命评估分析[J]. 湖南城市学院学报:自然科学版, 2018, 27(4): 6-10.
Zhou Hu, Xiao Yong-gang, Tan Bin. Fatigue damage and life evaluation of concrete bridges based on fracture mechanics[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2018, 27(4): 6-10.
- [7] 陈万. 重载交通作用下桥梁结构的疲劳损伤数值分析[D]. 邯郸:河北工业大学土木工程学院, 2015.
Chen Wan. Numerical analysis on fatigue damage of bridge caused by heavy load traffic[D]. Handan: School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, 2015.
- [8] 赵少杰, 任伟新. 超限超载交通对桥梁疲劳损伤及可靠度的影响[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2017, 48(11): 3044-3050.
Zhao Shao-jie, Ren Wei-xin. Effect of overrun and overloaded vehicles on fatigue damage and reliability of highway bridges[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(11): 3044-3050.
- [9] Natário F, Fernández R M, Muttoni A. Experimental investigation on fatigue of concrete cantilever bridge deck slabs subjected to concentrated loads[J]. Engineering Structures, 2015, 89: 191-203.
- [10] Liu Fang-ping, Zhou Jian-ting, Yan Lei. Study of stiffness and bearing capacity degradation of reinforced concrete beams under constant-amplitude fatigue[J]. PLoS ONE, 2018, 13(3): No. e0192797.
- [11] 朱红兵. 公路钢筋混凝土简支梁桥疲劳试验与剩余寿命预测方法研究[D]. 长沙:中南大学土木工程学院, 2011.
Zhu Hong-Bing. Method and experiment research on highway reinforced concrete simply-supported girder bridge's fatigue residual service life forecast[D]. Changsha: School of Civil Engineering, Central South University, 2011.
- [12] 刘芳平, 周建庭. 基于疲劳应变演化的混凝土弯曲强度退化分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4):

- 97-105.
- Liu Fang-ping, Zhou Jian-ting. Concrete bending strength degradation analysis based on fatigues strain evolution[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(4): 97-105.
- [13] Cheng L J. Flexural fatigue analysis of a CFRP form reinforced concrete bridge deck[J]. Composite Structures, 2011, 93(11):2895-2902.
- [14] Neild S A, Williams M S, Mcfadden P D. Nonlinear vibration characteristics of damaged concrete beams [J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2003, 129(2): 260-268.
- [15] 曹晖, 郑星, 华建民, 等. 基于非线性振动特性的预应力混凝土梁损伤识别[J]. 工程力学, 2014, 31(2): 190-194.
- Cao Hui, Zheng Xing, Hua Jian-min, et al. Damage detection of prestressed concrete beams based on non-liner dynamic characteristics[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2): 190-194.
- [16] 卫军, 杜永潇. 基于固有频率的梁结构疲劳损伤演化规律[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2019, 50(8): 1866-1875.
- Wei Jun, Du Yong-xiao. Fatigue damage evolution of Timoshenko beams based on natural frequency[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(8): 1866-1875.
- [17] 朱红兵, 赵耀, 李秀, 等. 疲劳荷载作用下钢筋混凝土梁的刚度退化规律及计算公式[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(2): 1-13.
- Zhu Hong-bing, Zhao Yao, Li Xiu, et al. Reinforced concrete beam's stiffness degeneration regulation and its calculation formula under the action of fatigue load [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2014, 36(2): 1-13.
- [18] 姚恒盈. 装配式预应力混凝土箱梁静动刚度足尺试验全过程分析[D]. 西安:长安大学公路学院, 2020.
- Yao Heng-ying. Dynamic and static stiffness analysis of full-scale prefabricated prestressed concrete girder [D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2020.
- [19] 廉伟, 姚卫星. 复合材料层压板剩余刚度-剩余强度关联模型[J]. 复合材料学报, 2008, 25(5): 151-156.
- Lian Wei, Yao Wei-xing. Residual stiffness-residual strength coupled model of composite laminates[J]. Acta Materiae Composites Sinica, 2008, 25(5): 151-156.
- [20] Ma Y, Xiang Y, Wang L, et al. Fatigue life prediction for aging RC beams considering corrosive environments [J]. Engineering Structures, 2014(79): 211-221.