

基于裂缝参数的在役桥梁横向分布计算

钱若霖, 苏佩

(陕西工业职业技术学院 土木工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要:刚性横梁法计算桥梁荷载横向分布具有便捷高效的特点,传统计算方法并未考虑主梁刚度折减对于计算结果的影响,完全按照设计截面刚度计算对于新建桥梁适用性较高,但对于在役桥梁,尤其是服役时间较长的桥梁,该方法具有一定局限性,计算结果和桥梁结构真实受力出入较大。为精确在役桥梁横向分布计算,基于裂缝外观参数特征值,引入刚度折减系数的概念,对传统刚性横梁法进行修正,并推导出其理论公式。通过有限元法和实桥荷载试验数据对比分析,结果表明,考虑裂缝参数修正的刚性横梁法计算更加精确,对于在役桥梁的真实受力状态和承载能力的评估具有重要意义,采用该方法进行在役桥梁荷载试验方案的编制,可达到精确校验系数的目的。

关键词:裂缝;刚性横梁法;在役桥梁;横向分布

中图分类号:U443.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2022)02-0010-05

0 引言

对于钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土梁桥,由于其很好地发挥了混凝土材料的抗压性能和钢筋的抗拉性能^[1],在中国的中小跨径桥梁设计中仍然受到工程师的青睐^[2]。钢筋混凝土梁桥在运营过程中,由于外界荷载、环境侵蚀及结构自身耐久性的影响,必然会产生梁体裂缝,大多数梁桥都为部分预应力结构,处于带裂缝工作状态。裂缝的出现会使主梁截面的抗弯惯矩等截面几何特征值发生变化,再加之环境的腐蚀,包括混凝土的碳化及钢筋锈蚀,都对钢筋混凝土结构的刚度造成损伤^[3-4]。因此,考虑在役桥梁结构的刚度折减效应,对于准确评估在役桥梁的承载能力具有重要意义。

魏霞等^[5]依托某大桥预应力混凝土引桥,结合带裂缝工作阶段刚度求解方法,通过有限元分析模型得出带裂缝的边梁相对于中梁对结构的影响较大;郑开启等^[6]提出了一种考虑斜裂缝的混凝土梁桥剪切刚度评估方法,该方法能够精确评估带斜裂缝桥梁的下挠值;安然等^[7]以一钢混组合梁斜拉桥为研究对象,通过计算模型研究了考虑钢混截面滑移效应对组合梁刚度的影响,精确了梁截面刚度的取值;杨家彦等^[8]以三跨连续刚构桥为依托,通过模型分析及实桥试验数据,考虑刚度折减,对结构承载能力进行了计算分析,为同类型桥梁的承载能力评估提供参考。

综上所述,研究在役桥梁的刚度损失,精确其实际刚度值,对于准确评估桥梁的承载能力和内力分析计算具有工程意义。以表观裂缝参数为切入点,探究在裂缝影响下主梁混凝土结构的刚度折减效应,提出相应横向分布计算公式,优化修正既有传统理论方法,可为在役钢筋混凝土带裂缝工作梁桥的横向分布计算提供计算依据,并为精确其内力分析和荷载试验承载力评估提供借鉴。

1 裂缝参数识别与刚度折减系数

1.1 裂缝参数的选取

在役预应力钢筋混凝土桥梁随着运营时间的增加,梁体会产生大量裂缝,这些裂缝深度、宽度各不相同,

收稿日期:2022-01-07 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220002

基金项目:陕西省教育厅一般专项科学研究计划项目(20JK0501);陕西工业职业技术学院院级科研基金(2022YKYB)

作者简介:钱若霖(1993—),男,讲师,研究方向为桥梁结构分析。E-mail:958458312@qq.com

钱若霖,苏佩.基于裂缝参数的在役桥梁横向分布计算[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(2):10-14.

出现的位置也有所不同,且都介于规范规定的允许值范围内,桥梁整体结构处于带裂缝工作状态,这些带裂缝工作的主梁相对于完好主梁的初始刚度值有所减小。因此基于桥梁的外观检测,通过裂缝参数特征值对主梁刚度重新进行评估,对于精确在役桥梁的力学计算具有重要意义。现有试验研究成果发现,钢筋混凝土结构刚度值与裂缝的长度、宽度、深度等因素相关,裂缝长度和间距先期发展较快,逐步稳定,而裂缝宽度和深度一直增长且对于梁体刚度的影响较大。梁体结构刚度值与裂缝参数特征值成非线性正相关的关系。

基于断裂力学理论^[9],钢筋混凝土梁体开裂后,应力强度因子

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F(\lambda) \quad (1)$$

式中, σ 为荷载 P 作用在主梁上产生的应力(见图1); a 为裂缝的高度; λ 为裂缝名义损伤比, $\lambda = \frac{a}{h}$, h 为梁高; $F(\lambda)$ 为关于裂缝名义损伤比 λ 的函数。

开裂梁体的刚度除与应力强度因子有关外,还与裂缝开裂宽度值有关,不难看出折减后的刚度值与应力强度因子成正比,与裂缝宽度成反比;因此,选取裂缝的高度 a 、宽度 δ 作为梁体刚度损伤识别的主要表观参数。

1.2 刚度折减系数

为便于后续对桥梁荷载横向分布的计算,引入刚度折减系数 ξ 的概念,表示在役桥梁考虑开裂损伤后的主梁截面真实刚度值与设计值之比。

现实的桥梁结构中,裂缝除上述主要表观参数不同外,还具有长度和分布上的差异,通过外观检查可以将主梁划分成不同刚度的节段,不同验算截面的横向分布计算即可采用对应的刚度折减系数,如图2所示。

周术明等^[10]预制了3种不同参数特征的预裂简支梁,通过加载试验数据,拟合得出了刚度折减系数与名义损伤比 λ 和裂缝宽度值 δ 的计算公式,即

$$\xi_i = 2.988 + \frac{2.866 \times \sqrt{\lambda} \times \ln \lambda}{e^{-0.174\delta}} \quad (2)$$

式中, ξ_i 为主梁某节段的刚度折减系数; λ 为裂缝名义损伤比; δ 为裂缝开裂宽度。

假设主梁截面材料设计刚度为 EI_0 ,开裂后主梁节段截面刚度为 EI_i ,则

$$EI_i = \xi_i EI_0 \quad (3)$$

2 考虑裂缝参数修正的刚性横梁法

刚性横梁法认为主梁之间连接构造刚度无穷大,在荷载作用下各梁的横向变形为一条直线,变形由单位竖向力引起的挠度与单位扭矩下的变形值组成^[11]。在计算中采用式(4)分别计算各梁的影响线竖标值,这里的影响线是指荷载在各梁上横向移动时在某片梁处引起的效应,绘制出影响线后在其上按最不利情况进行车辆布载,进而求得横向分布系数值,按照横向分布系数值设计的桥梁一般具有较高的安全度。

$$\eta_{ij} = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \pm \beta \frac{a_k a_i I_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_i} \quad (4)$$

式中, η_{ij} 为荷载作用在第 j 片梁处第 i 片梁的竖标值; I_i 为第 i 片主梁的截面抗弯惯矩; a_k 为第 i 片主梁形心到桥梁截面扭转中心的水平距离; a_i 为外荷载的偏心距; β 为抗扭修正系数。

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{Gl^2}{12E} \frac{\sum I_{Ti}}{\sum a_i^2 I_i}} < 1 \quad (5)$$

式中, I_{Ti} 为第 i 片主梁的截面抗扭惯矩; G 为剪切模量; E 为弹性模量; l 为桥梁跨径。

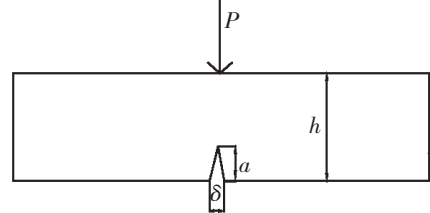


图1 梁体开裂示意图

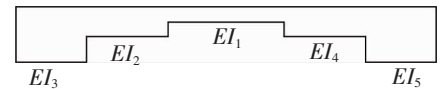


图2 带裂缝主梁刚度分布

引入刚度折减系数 ξ 后,由于不同主梁和每片梁不同节段的开裂情况均有所不同,导致裂缝参数特征值不同,不同开裂截面的等效截面惯性矩 I_i 也发生变化,将刚度折减系数代入式(4)得到考虑裂缝参数修正的刚性横梁法计算公式。

$$\eta_{ij} = \frac{\xi_i I_0}{\sum_{i=1}^n \xi_i I_i} \pm \beta \frac{\xi_i a_k a_i I_i}{\sum_{i=1}^n \xi_i a_i^2 I_i} \quad (6)$$

式中, I_0 为第 i 片主梁的设计截面抗弯惯矩; ξ_i 为开裂梁体的刚度折减系数。

求得各梁影响线竖标值后,绘制影响线并将车辆荷载按最不利情况布置于影响线上,计算得到各车轮荷载处竖标值 η_i ,则汽车荷载作用下各梁横向分布系数

$$m = \frac{1}{2} \sum \eta_i \quad (7)$$

3 实桥荷载试验分析

3.1 有限元建模

试验桥梁上部结构采用预应力混凝土先简支后结构连续 T 梁,主梁跨中截面如图 3 所示。

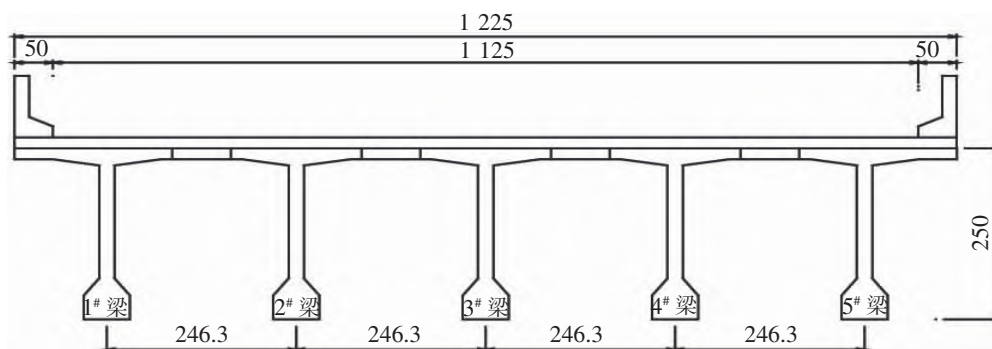


图 3 主梁跨中横断面(单位:cm)

桥面铺装为 10 cm 厚 C50 混凝土现浇层和 10 cm 厚沥青混凝土,以二期恒载施加于模型上。该桥设计荷载为公路-I 级。分析计算时,主梁采用 C50 混凝土,弹性模量取 3.451 04 MPa,容重为 26 kN/m³,采用梁单元建模,支座采用一般支承模拟约束条件。桥面铺装的沥青混凝土和 C50 混凝土,容重分别取 24、26 kN/m³。有限元模型如图 4 所示。

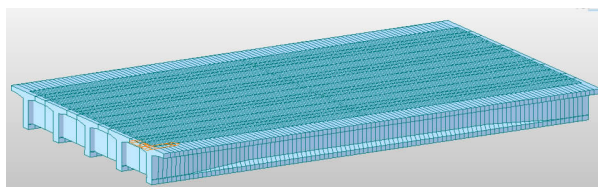


图 4 有限元模型

建立跨中集中力荷载下 5 种不同工况,提取不同工况下各梁的挠度值,利用式(8)反算各梁影响线竖标值。

$$\eta = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (8)$$

式中, η 为反算竖标值; f_i 为第 i 片梁挠度值。

3.2 实桥荷载试验

在进行荷载试验前,对全桥进行外观检查发现:其上部结构部分主梁发生裂缝病害,2#主梁和 5#主梁相对完好,1#、3#和 4#主梁跨中区域均发生不同程度的裂缝病害,现场照片如图 5 所示。

在对试验跨主梁裂缝参数,包括裂缝高度和宽度进行统计后,利用式(2)计算出五片梁跨中节段的刚度折减系数,进一步

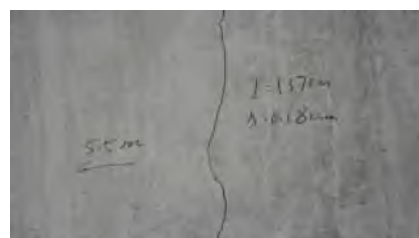


图 5 主梁跨中节段腹板裂缝示意

采用考虑裂缝参数修正后的刚性横梁法计算各梁的影响线竖标值,如表1所示。

表1 中梁影响线竖标值

梁号	修正的刚性横梁法	有限元法	荷载试验实测挠度值/mm
1 [#]	0.195	0.202	6.30
2 [#]	0.195	0.191	6.40
3 [#]	0.195	0.213	6.80
4 [#]	0.195	0.191	6.60
5 [#]	0.195	0.202	6.10

荷载试验工况选取跨中截面弯矩及挠度最不利位置进行布载,横桥向采用三列车对称中载进行布置,如图6所示。试验采用标准车型,按每车道试验车辆递增加载,每级稳定时间为5~10 min,每一次加载过程中,车辆开到指定位置后,停车后持荷5~10 min,待数据稳定后进行读数并记录。卸载后等待5~10 min以恢复弹性变形,再进行重复加载,尽可能减小塑性残余变形对试验数据精度的影响。挠度的测量选用棱镜和全站仪,棱镜位于测试截面位置。试验开始前对其认真检查确保处于正常工作状态,一切无误后按试验工况进行荷载试验。

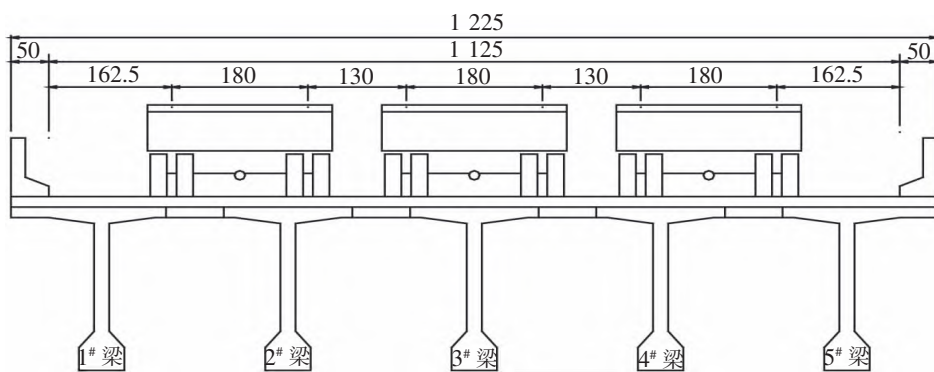


图6 横桥向中载布置(单位:cm)

荷载横向分布系数计算

$$m_i = n \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (9)$$

式中, n 为车道数,在本试验工况中取3。

以3[#]中梁为例,根据荷载试验数据反算横向分布值见表1。

由表1中梁影响线竖标值可求得基于裂缝参数修正的刚性横梁法横向分布系数为0.585,实桥荷载试验对应工况下主梁的横向分布系数为0.634,结果较为接近但仍有误差,仅为7.7%,这是因为外观裂缝统计工作存在检测设备误差、人为测量误差、等效抗弯刚度拟合误差等,梁体的截面刚度不仅受到表观裂缝的影响,还与内部材料、环境因素等特性息息相关,以及一些未被检测人员发现的隐藏裂缝,均对计算结果产生影响,或是荷载试验过程中挠度测量误差导致。而有限元法横向分布系数计算结果为0.486,与实测值误差较大达到23.3%,主要是由于有限元法建模过程未考虑梁体刚度的折减,与实际梁体刚度值存在出入,这一建模计算方法虽与常规荷载试验求校验系数中的理论值计算方法相同,对于新建桥梁吻合度较高,但对于在役桥梁,则应考虑其梁体开裂对于刚度的折减效应,才能达到精确计算,对在役桥梁的承载能力做出准确判断。

有限元建模过程中若要考虑梁体的刚度折减,一般采用实体单元进行仿真模拟,这样增加了工作量,不利于提高荷载试验的工作效率,因此建议采用考虑裂缝参数的修正刚性横梁法计算横向分布系数,并利用单梁模型计算荷载试验不同工况下的理论值,对于提高建模效率,精确在役桥梁内力计算和承载能

力评估具有重要意义。

4 结论

(1) 基于裂缝参数的修正刚性横梁法应用简便, 计算精度较高, 更贴近在役桥梁真实受力状况, 其计算结果更偏安全, 能够精确在役桥梁横向分布计算和准确评估其承载能力。

(2) 在编制荷载试验方案或报告时, 采用本文方法计算在役桥梁的横向分布系数, 并结合有限元单梁模型, 计算实桥内力理论值, 具有简洁高效的特点, 同时还能够精确实桥应变和挠度校验系数区间范围, 对于在役桥梁承载力的评估和旧桥加固具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 陈玉峰, 陈万雄. 预应力钢筋混凝土简支 T 型梁桥的常见病害与加固[J]. 兰州工业学院学报, 2016, 23(6): 45-48.
- [2] 翟晓亮, 陈定市. 中小跨径桥梁结构形式优选[J]. 中外公路, 2018, 38(3): 185-189.
- [3] 邬晓光, 钱若霖, 苏佩. 考虑刚度损伤的装配式 T 梁桥横向分布计算[J]. 公路交通科技, 2018, 35(6): 61-66.
- [4] 徐向锋, 张峰, 韦成龙. 预应力混凝土箱梁开裂后的刚度损伤评估[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 95-102.
- [5] 魏霞, 梁清宇, 张剑, 等. 预应力混凝土梁桥的刚度折减效应研究[J]. 新技术新工艺, 2018(5): 48-52.
- [6] 郑开启, 刘钊, 张宇峰, 等. 腹板斜向开裂混凝土梁桥的剪切刚度评估方法[J]. 桥梁建设, 2015, 45(4): 46-51.
- [7] 安然, 王有志, 张光桥, 等. 考虑施工阶段界面滑移钢-混组合梁刚度折减研究[J]. 世界桥梁, 2020, 48(5): 51-56.
- [8] 杨家彦, 王磊. 基于刚度折减和预应力损失估算的三跨连续刚构桥承载能力分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(7): 153-155.
- [9] Tada H, Paris P C, Irwin G R. The stress analysis of cracks handbook [M]. Hellertown: Del Research Corporation, 1973.
- [10] 周术明, 颜东煌. 基于裂缝参数的钢筋混凝土预裂梁刚度试验研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(1): 53-59.
- [11] 贺栓海. 公路桥梁荷载横向分布计算方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.

Calculation of Lateral Distribution of In-Service Bridges Based on Crack Parameters

Qian Ruolin, Su Pei

(Civil Engineering College, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

Abstract: The rigid beam method is convenient and efficient to calculate the lateral load distribution of the bridge. The traditional calculation method did not consider the influence of the main girder stiffness reduction on the calculation results. The calculation based on the design section stiffness is more suitable for new bridges, but for in-service bridges. Especially for bridges that have been in service for a long time, this method has certain limitations, and the calculation results differ greatly from the actual forces of the bridge structure. In order to accurately calculate the lateral distribution of in-service bridges, based on the characteristic values of the crack appearance parameters, the concept of stiffness reduction coefficient was introduced, the traditional rigid beam method was revised, and its theoretical formula was derived. Through the comparative analysis of the finite element method and the actual bridge load test data, the results show that the rigid beam method considering the correction of the crack parameters is more accurate, and it is of great significance for the evaluation of the real stress state and bearing capacity of the in-service bridge. This method can be used for the preparation of the in-service bridge load test plan to achieve the purpose of accurately verifying the coefficients.

Key words: cracks; rigid beam method; in-service bridges; lateral distribution