

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.240417

基于轻量化荷载试验评估桥梁剩余承载能力

杨丙文¹, 黎雅乐²

(1. 南京交通职业技术学院 路桥与港航工程学院, 江苏 南京 211188; 2. 江苏开放大学 建筑工程学院, 江苏 南京 210036)

摘要: 对桥梁的承载能力检测, 目前认为桥梁荷载试验是最直接的方法, 但在桥梁荷载试验检测过程中, 需要较长时间的交通封闭作业, 对车辆与行人的通行会造成一定的影响, 且需要的配重较多, 会给试验带来较为繁重的外业工作量, 而且桥梁荷载试验方法对评估桥梁剩余承载能力是没有理论依据的。通过单辆重车缓慢行驶在桥面, 采集相应的截面的参数响应的研究方法, 结合有限元模型计算, 计算其在单辆重车作用下的加载效率系数和在设计荷载作用下的理论参数值, 推算在设计荷载作用下桥梁实际产生的效应参数值, 来判定桥梁的设计合理性及施工质量的可靠性, 并根据现行设计规范要求, 计算其若达到设计规范限值时, 需加载的荷载值, 该值可作为推算出桥梁剩余承载能力值。

关键词: 桥梁; 承载能力; 参数响应

中图分类号: U448.21; U445.72

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0167-04

Evaluation of Bridge Residual Bearing Capacity Based on Lightweight Load Testing

YANG Bingwen¹, LI Yale²

(1. School of Road, Bridge and Port Engineering, Nanjing Polytechnic of Transportation, Nanjing 211188, China; 2. School of Civil Engineering, Jiangsu Open University, Nanjing 210036, China)

Abstract: The bridge load test is currently considered as the most direct method to detect the bearing capacity of bridges. However, during the detection process of the bridge load test, the traffic requires to be closed for a long time, which has a certain impact on the traffic of vehicles and pedestrians. And more weight is required, which will bring more heavy field work to the test. and a large amount of counterweight is required, bringing a relatively heavy fieldwork workload to the test. Moreover, the bridge load test method has no theoretical basis for evaluating the residual bearing capacity of the bridge. The research method is to collect the parameter response of the corresponding section through a single heavy vehicle driving slowly on the bridge deck. Combined with the calculation of the finite element model, the loading efficiency coefficient under the action of a single heavy vehicle and the theoretical parameter value under the design load are calculated. The actual effect parameter value of the bridge under the design load is deduced to decide the design rationality of the bridge and the reliability of the construction quality. According to the requirements of the current design specifications, the load value that needs to be loaded is calculated if it reaches the limit of the design specification. This value can be used as the deduced residual bearing capacity value of the bridge.

Keywords: bridge; bearing capacity; parameter response

0 引言

我国在世界范围内都属于桥梁大国, 截止到2022年, 我国的公路桥梁总数已达到100多万座^[1], 随着桥梁使用年限的增加和交通运输需求的不断增长, 对桥梁结构的剩余承载能力评估变得越来越重

要。传统的桥梁荷载试验方法, 存在着高成本、工期长以及影响交通等问题, 并且荷载试验结果并不能反映桥梁的剩余承载能力, 它只是对桥梁设计合理性的验证以及施工质量的评定, 或是对即将通行的超重载车辆能否安全通行的分级加载验证, 而不能直接得出桥梁承载能力^[2]。我们现有的桥梁承载能力评估方法^[3-6]是基于《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)中的方法规定, 对桥梁的外观缺损状况进行检查, 对桥梁材质状况与状态是否退化等参数进行检测, 对桥梁刚度相应的自振频率等测定结果, 并引入检算系数Z1或Z2, 依据检查和

收稿日期: 2024-04-17

基金项目: 江苏省产学研合作项目(BY2022665)

作者简介: 杨丙文(1983—), 男, 工学博士, 副教授, 从事桥梁检测与教学工作。

检测结果对桥梁承载能力恶化系数、截面尺寸折减系数进行修正计算。该方法虽然结合了桥梁的现状,但承载能力计算的结果也仅存在于理论的范畴,与实际相差较大。本文的承载能力计算方法是结合桥梁的实际荷载作用下的参数响应与有限元理论计算的方法,能真实反映桥梁的剩余承载能力,为桥梁的安全运营评估提供更为可靠的参考与方法。

1 理论方案

轻量化荷载试验与传统的荷载试验类似,其试验流程按照试验准备工作、现场荷载试验实施以及试验结果分析三个阶段进行^[6]。

试验准备内容包括:资料准备(施工图纸、施工资料、维修资料等)、现场检测(桥梁缺陷及病害状况、桥梁主要截面尺寸、材料强度等)、测试控制截面的选择和试验方案的编制。

现场实施内容包括:控制截面确定、测点定位、加载位置布置、等效荷载加载及参数采集合理数据。

试验结果分析是指结合理论计算结果,对试验采集数据进行对比分析。

本研究方法的试验方案与传统荷载试验所不同之处在于,传统荷载试验在编制方案时,按照《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015)中试验控制荷载作用下的桥梁结构控制截面的内力、变位,按荷载效应值等效原则拟定试验荷载大小,根据规程建议,对交(竣)工验收的情况下的静载试验的荷载效率 η_q ,宜介于0.85至1.05之间,对于承载力检验的宜介于0.95至1.05之间。

$$\eta_q = \frac{S_s}{S(1+\mu)} \quad (1)$$

式中: S_s 为静载试验中,实际荷载作用下,针对加载控制截面试验项目所对应的截面内力或位移的最大计算值; S 为在设计荷载作用下,产生的控制截面最不利情况,其内力或位移的计算值; μ 为汽车荷载的冲击系数。

如上所述,根据桥梁大小、设计荷载等级计算以及荷载试验经验,若达到规范给定的荷载效率值,少则需要4辆标准配重渣土车,多则需要十几辆甚至几十辆配重标准渣土车,而且在试验过程中,调度如此多的车辆耗时耗力且成本较高。

轻量化荷载试验,只需要一辆配重标准渣土车,计算出该车辆在控制截面处产生的最大荷载效应值 $S_{\text{单}}$ (内力或位移)。

$S_{\text{单}}$ 与设计荷载并考虑冲击系数在最不利效应情况下产生的同一加载控制截面上的内力或位移计算值的比值 K 为:

$$K = \frac{S(1+\mu)}{S_{\text{单}}} \quad (2)$$

当一辆配重标准渣土车产生的应变或挠度为 $\xi_{\text{单}}(\omega_{\text{单}})$,则在控制荷载作用下产生的应变或挠度:

$$\xi(\omega) = \xi_{\text{单}}(\omega_{\text{单}}) \times K \quad (3)$$

$\xi(\omega)$ 与有限元理论计算的控制荷载产生的应变或挠度值 $\xi_{\text{理}}(\xi_{\text{理}})$ 进行对比:

$$\text{校验系数 } \eta = \frac{\xi(\omega)}{\xi_{\text{理}}(\xi_{\text{理}})} \quad (4)$$

计算出来的校验系数与《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015)第5.7.8节常见桥梁结构试验校验系数常值表进行对比判定,可验证桥梁在设计荷载作用下,该桥是否处于安全稳定运营状态。

2 剩余承载能力评估方法

对预应力混凝土受弯构件正截面抗裂验算,行业标准《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)有如下规定。

(1)正截面边缘混凝土拉应力应满足:

一是对于全预应力混凝土预制构件

$$\sigma_{st} - 0.85\sigma_{pc} \leq 0 \quad (5)$$

二是对于A类预应力混凝土构件

$$\sigma_{st} - \sigma_{pc} \leq 0.7f_{tk} \quad (6)$$

三是对于B类预应力混凝土受弯构件在结构自重作用下控制截面受拉边缘不得消压。

(2)斜截面混凝土主拉应力应符合下列要求:

一是对于全预应力混凝土构件

$$\begin{cases} \sigma_{tp} \leq 0.6f_{tk} \text{ (预制构件)} \\ \sigma_{tp} \leq 0.4f_{tk} \text{ (现场浇筑)} \end{cases} \quad (7)$$

二是对于A类和B类预应力混凝土构件

$$\begin{cases} \sigma_{tp} \leq 0.7f_{tk} \text{ (预制构件)} \\ \sigma_{tp} \leq 0.5f_{tk} \text{ (现场浇筑)} \end{cases} \quad (8)$$

式(5)至(8)中: σ_{st} 为在频遇组合作用下,混凝土构件截面边缘混凝土的法向拉应力, $\sigma_{st} = \frac{M_s}{W_0}$; σ_{pc} 为在准永久组合作用下,混凝土构件截面边缘混凝土的法向拉应力, $\sigma_{pc} = \frac{M_l}{W_0}$; σ_{pc} 为预加力作用下,在构件边缘产生的混凝土预压应力值; σ_{tp} 为由频遇组合作

用和预加力作用产生的混凝土主拉应力值; f_{tk} 为混凝土的抗拉强度标准值; M_s 为按频遇组合作用计算的弯矩值; M_l 为由结构自重、施加于结构上的汽车荷载、人群荷载、风荷载等作用按准永久作用组合计算的弯矩值。

令式(5)至式(8)中的不等号换算为等号,即可求出正常使用极限状态下的极限法向拉应力 σ_{st} 和极限主应力值 σ_{tp} 。

令不变荷载产生法向拉应力 σ_{Gst} 和极限主应力值 σ_{Gtp} ,则由活载产生的:

$$\text{极限法向拉应力 } \sigma_{Qst} = \sigma_{st} - \sigma_{Gst} \quad (9)$$

$$\text{极限主应力值 } \sigma_{Qtp} = \sigma_{tp} - \sigma_{Gtp} \quad (10)$$

由单辆配重标准重车产生的控制截面弯矩计算值为 $M_{单}$,剪力计算值为 $V_{单}$,在控制截面上产生的应力测试值为 $\sigma_{单s}(\sigma_{单t})$ 。

则桥梁剩余承载能力可为:

$$M_{剩}(V_{剩}) = \frac{\sigma_{Qst}(\sigma_{Qtp})}{\sigma_{单s}(\sigma_{单t})} M_{单}(V_{单}) \quad (11)$$

3 应用实例

某桥上部结构为梁跨径组合为 3×20 m的预应力空心板梁,主桥桥面全宽为8.0 m,横向布置形式为0.5 m的防撞墙加7.0 m的机动车道加0.5 m的防撞墙。梁体采用C50混凝土,预应力钢绞线采用公称直径为15.2 mm的钢绞线,该钢绞线抗拉标准强度为 $f_{pk}=1860$ MPa,其锚下张拉控制应力 $\sigma_{con}=0.75 f_{pk}=1395$ MPa。设计荷载等级为公路—II级,结构重要性系数为1.0。桥梁立面图和横断面图如图1和图2所示,梁截面图如图3所示。

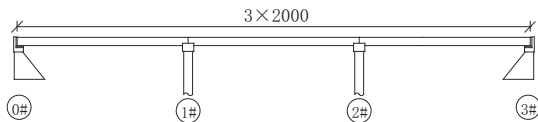


图1 桥梁立面图(单位:cm)

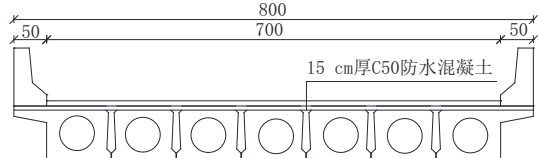


图2 桥梁横断面图(单位:cm)

由于三跨为等跨结构,且结构形式及截面尺寸均相同,经外观检查,该桥无明显病害,故选取其中一跨为荷载试验跨。对于简支梁桥,跨中为最不利截面,根据活载横向分布系数计算得到边梁的横向分布系数值最大,该桥的边梁横向分布系数值为

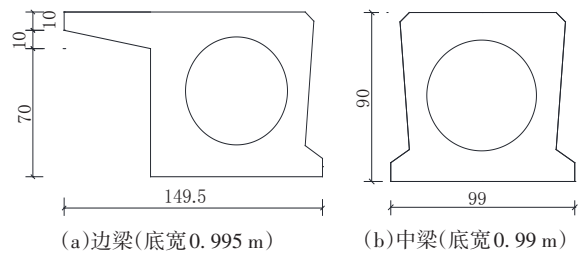


图3 空心板截面尺寸图(单位:mm)

0.361,故把边梁的跨中截面作为该试验的控制截面。经有限元计算,若荷载试验加载效率值按照《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015)要求,需4辆配重渣土车,单辆车总重340 kN(前两轴各重68 kN,后两轴各重102 kN,由前至后,轴距分别为190、225、135 cm),其效率系数值为0.98。布载示意图如图4和图5所示。

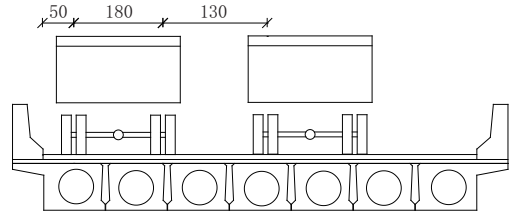


图4 立面布载图(单位:cm)

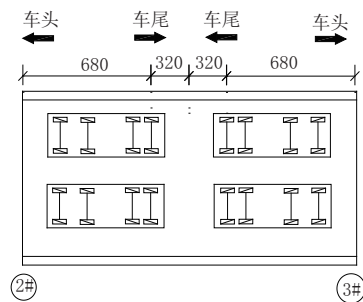


图5 平面布载图(单位:cm)

若采用一辆车作用在最不利位置,其效率系数值为0.35,则布载示意图如图6和图7所示。试验结果分析如表1所列。

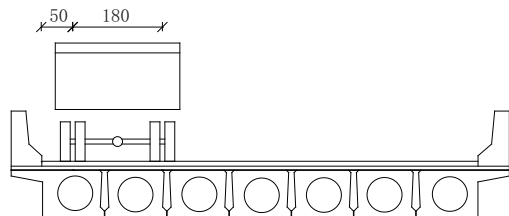


图6 立面布载图(单位:cm)

从表1的试验结果可以看出,当桥梁无明显病害时,4辆加载车加载工况与1辆加载车加载工况试验结果基本呈线性比例关系,校验系数都比较接近,是因为挠度和应变响应只与桥梁刚度和作用效应有关。当一座桥无明显病害时,刚度不会因作用效应改变而改变。在目前桥梁设计中,特别是预应力桥

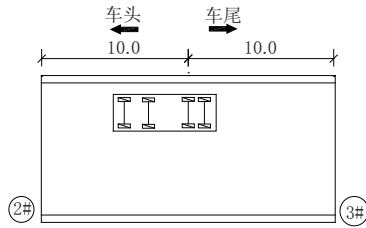


图7 平面布载图(单位:cm)

表1 荷载试验结果分析表

荷载工况	理论值		实测值		校验系数	
	应变 $\mu\epsilon$	挠度/ mm	应变 $\mu\epsilon$	挠度/ mm	应变	挠度
4辆加载车	121	9.13	56	4.82	0.462	0.528
1辆加载车	43	3.26	20	1.69	0.465	0.518

梁,设计荷载是在梁的弹性受力范围内,故一辆车的加载作用反映的桥梁工作状态可以代替多辆车作用的工作状态。

该桥空心板梁属于部分预应力中的A类构件,根据设计规范规定,在作用频遇组合下构件抗裂验算截面边缘混凝土的法向拉应力与预加力在构件抗裂验算边缘产生的混凝土预压应力之差小于或等于0.7倍的混凝土抗拉强度标准值。对于C50混凝土 $0.7f_{tk} = 0.7 \times 2.65 \text{ MPa} = 1.855 \text{ MPa}$,经有限元理论计算,边梁跨中截面底板在预应力作用下产生的最大压应力为14.6 MPa,由恒载产生的跨中截面底板边缘最大拉应力为7.5 MPa。

$$\sigma_{st} - \sigma_{pc} = 0.7f_{tk} \Rightarrow \sigma_{st} = 16.455 \text{ MPa}$$

由荷载产生的最大频遇值组合产生的底板拉应力可为 $16.455 - 7.5 = 8.955 \text{ MPa}$ 。

根据荷载试验结果,一辆340 kN的标准渣土车,产生的底板应变为 $20 \mu\epsilon$ (假定结构受力为弹性范

围,C50混凝土的弹性模量为 $3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$,则底板拉应力为0.69 MPa),边梁产生的弯矩为285 kN·m,则 $M_{剩} = \frac{\sigma_{Qst}}{\sigma_{单s}} M_{单} = \frac{8.955}{0.69} \times 285 = 3698 \text{ kN}\cdot\text{m}$,故根据以上分析,该桥跨中截面剩余承载能力为3698 kN·m。

4 结论

本研究基于轻量化荷载试验结果,与设计规范要求对预应力混凝土受弯构件正截面边缘混凝土拉应力限值的理论相结合,给出运营期桥梁剩余承载能力计算方法,使运营期桥梁的剩余承载能力的评估更准确,对桥梁后期养护所采取的方案设计具有更合理的指导意义。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部.2022年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].(2023-06-21)[2024-04-17].https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202306/content_6887539.htm
- [2] 郑旭,伊廷华,杨东辉,等.中小跨径桥梁承载能力快速检测与虚拟评定方法研究[J/OL].工程力学,2023;1-6(2023-06-12)[2024-04-17].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20230609.1641.004.html>.
- [3] 徐望喜,钱永久,张方,等.基于可靠度理论考虑验证荷载的既有桥梁评估分项系数研究[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(2):222-228.
- [4] 冯宇航.服役公路桥梁承载能力评定探析[J].黑龙江交通科技,2021,44(1):114-116.
- [5] 周晓杰.钢筋混凝土桥梁承载能力评定应用与浅析[J].科学技术创新,2020(15):91-93.
- [6] JTG/T J21-01—2015,公路桥梁荷载试验规程[S].
- [7] JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力检测评定规程[S].

(上接第131页)

- 南京市水利规划设计院股份有限公司,2021.
- [2] SL 252—2017,水利水电工程等级划分及洪水标准[S].
 - [3] SL 189—2013,小型水利水电工程碾压式土石坝设计规范[S].
 - [4] SL/T791—2019,水库降等与报废评估导则[S].

- [5] 中华人民共和国水利部.水库降等与报废管理办法(试行)(水利部令第18号)[EB/OL].(2024-07-19)[2003-05-26].https://www.gov.cn/gongbao/content/2003/content_62385.htm.
- [6] SL 605—2013,水库降等与报废标准[S].