

桥梁荷载试验方案设计与结果分析

江博

安徽省路桥试验检测有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8777

[摘要] 桥梁结构实际工作性能、承载能力及施工质量可通过荷载试验进行验证，由此得到的评价结果直接且可靠。本文以桥梁荷载试验的技术要求及工程实践，系统阐述了荷载试验的方案设计原则、测试内容与方法、加载效率控制及数据分析流程。以某预应力混凝土简支空心板桥（公路—Ⅱ级）的静动载试验为例，详细介绍了试验工况设计、测点布置、加载效率计算及数据处理过程。试验结果表明：控制截面挠度校验系数为 0.61–0.64，应变校验系数为 0.61–0.75，相对残余变形小于 0.05，动测冲击系数为 0.12，各项指标均满足规范要求，结构刚度和强度储备良好。研究认为，科学的方案设计与精准的数据分析是荷载试验发挥“深度体检”作用的关键，建议在既有桥梁评估中推广应用基于实际荷载横向分布系数的精细化评定方法。

[关键词] 桥梁工程；荷载试验；方案设计；校验系数；承载能力评估

Design and Result Analysis of Bridge Load Test Scheme

Jiang Bo

Anhui Provincial Road & Bridge Testing & Inspection Co., Ltd.

[Abstract] The actual operational performance, load-bearing capacity, and construction quality of bridge structures can be validated through load testing, yielding direct and reliable evaluation results. This paper systematically elaborates on the principles of load test scheme design, testing content and methods, loading efficiency control, and data analysis processes based on technical requirements and engineering practices for bridge load testing. Taking the static and dynamic load tests of a prestressed concrete simply supported hollow slab bridge (Highway Class II) as an example, detailed descriptions are provided regarding test condition design, measurement point layout, loading efficiency calculations, and data processing procedures. Test results demonstrate that the control section deflection verification coefficient ranges from 0.61 to 0.64, strain verification coefficient ranges from 0.61 to 0.75, relative residual deformation is less than 0.05, and dynamic impact coefficient is 0.12. All indicators meet regulatory requirements, indicating excellent structural stiffness and strength reserves. The study concludes that scientific scheme design and precise data analysis are critical for load testing to fulfill its "in-depth inspection" role, recommending the adoption of refined assessment methods based on actual load lateral distribution coefficients in existing bridge evaluations.

[Key words] Bridge engineering; Load test; Scheme design; Verification coefficient; Bearing capacity assessment

引言

交通基础设施建设是重要的民生工程，其关键节点为桥梁。桥梁运行是否安全，直接关系到人民的生命财产安全，同时对社会经济的运行也形成较大的影响。目前，我国的公路桥梁数量已经达到 100 万座以上，并呈现出不断上升趋势，在此背景下，既有桥梁开始出现老化、破损、功能适应性不足等缺陷，严重威胁着公路桥梁的正常运行^[1]。为更好的对桥梁的实际承载能力进行科学、准确的评定，则需要采用核心技术应对，

其中荷载试验是常见且高效的评定方法。

荷载试验通过对桥梁结构施加静力或动力荷载，直接测量结构控制截面的应变、挠度、位移等响应参数，对比理论计算值，由此精准对结构的强度、刚度和动力性能进行评价^[2]。和理论计算和外观检查方法对比，荷载试验可以真实反映结构在荷载作用下的实际工作状态，被公认为桥梁“深度体检”的最可靠手段^[3]。实施荷载试验，要求技术高、周期长，对于道路交通具有较大的影响，因而，需要探究在确保测试精度的前提

下优化试验方案、提高试验效率,且深度挖掘试验数据和合理分析,对评估结果的可靠性进行有效评估^[4]。

1 荷载试验方案设计原则

1.1 试验目的与内容确定

荷载试验通常分为静载试验和动载试验两大类。静载试验通过在桥梁指定位置停放载重车辆,模拟设计荷载对结构产生的最大内力效应,测试结构的应变、挠度、裂缝等参数,用以评定结构的强度和刚度。动载试验则通过车辆以不同车速行驶、跨越障碍或环境脉动激励,测试结构的自振频率、阻尼比、冲击系数等动力特性参数^[5]。试验内容根据桥梁结构形式、跨度、设计荷载及既有病害确定:新建桥侧重验证施工质量是否达标,旧桥侧重评定承载能力能否满足运营要求。

1.2 控制截面与测点布置

控制截面是指结构在荷载作用下内力或变形最不利的截面。对于简支梁桥,控制截面通常包括跨中最大弯矩截面、支点剪力截面;对于连续梁桥,还需考虑中间支点负弯矩截面;对于拱桥,则包括拱顶、拱脚及L/4截面。测点布置应遵循以下原则:关键测点优先、对称性与冗余性、温度补偿、基准点设置。

1.3 试验荷载与加载效率

试验荷载中,需要考虑最大不利效应,由此开展模拟设计,然而实践中,因车辆数量、场地限制等因素影响,一般会利用等效加载原则。荷载效率系数 η 定义为试验荷载产生的内力与设计荷载(含冲击)产生的内力之比:

$$\eta = \frac{S_{\text{test}}}{S_{\text{design}}} \quad (1-1)$$

根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011),验收性试验的荷载效率宜控制在0.80—1.05之间,且最大值不宜超过1.05。 η 过小则试验不能充分检验结构性能, η 过大则可能对结构造成损伤。加载工况设计需综合考虑多个控制截面的最不利加载位置。通常采用多级加载,以便观测结构响应的线性与非线性特征,并计算残余变形。

1.4 有限元模型建立

试验方案需依托有限元模型开展,常用MIDAS Civil、ANSYS等软件建立桥梁空间模型,计算设计荷载与试验荷载下截面内力、位移理论值。结合设计图纸与施工现状确定边界条件、材料特性、预应力等参数,并对关键指标进行校核。

2 静载试验数据分析方法

静载试验数据的核心分析指标包括校验系数、相对残余变形和横向分布系数。

2.1 校验系数

校验系数 ζ 是实测弹性值与理论计算值的比值,反映了结构实际工作状态与设计期望的符合程度:

$$\zeta = \frac{S_{\text{实测}}}{S_{\text{理论}}} \quad (2-1)$$

式中, S 可为应变、挠度或位移。 $\zeta < 1$ 表明结构实际刚度或强度大于理论预期,结构安全储备良好; $\zeta > 1$ 则说明结构实际性能低于理论值,可能存在缺陷或损伤。根据规范,预应力

混凝土桥的应变校验系数宜在0.50—0.90之间,挠度校验系数宜在0.60—1.00之间。校验系数过小(如 < 0.5)虽然表明结构安全储备大,但也可能意味着理论计算过于保守或测试数据异常,需结合其他指标综合判断。

2.2 相对残余变形

相对残余变形 α_1 反映了结构在卸载后的弹性恢复能力,是评价结构是否进入塑性工作状态的重要指标:

$$\alpha_1 = \frac{S_p}{S_{\text{tot}}} \quad (2-2)$$

式中, S_p 为残余变形值, S_{tot} 为总变形值(弹性+残余)。规范要求预应力混凝土桥的相对残余变形应不大于0.20。 α_1 越小,说明结构弹性越好,工作状态越健康。

2.3 横向分布系数识别

装配式多主梁桥的横向连接性能决定主梁受力分配。设计阶段常用刚性横梁法或铰接板法计算荷载横向分布系数,而运营期因铰缝损伤、横隔板开裂等,实际横向分布会明显改变。最新研究提出基于移动荷载试验的横向分布系数快速识别法,通过车辆过桥时各主梁变形时程响应反演横向传递性能,误差小于3%,可识别单梁富余承载力及铰缝损伤程度。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

某公路桥梁为装配式预应力混凝土简支空心板桥,跨径16m,桥面宽度12.5m,设计荷载等级为公路-II级。该桥已运营8年,为评定其当前承载能力,决定进行静动载试验。

3.2 试验方案设计

3.2.1 控制截面与测点布置

跨中0.5L截面为正弯矩最大控制截面,是静载试验核心测点,布设5个空心板底面挠度测点,用精密水准仪配合钢钢尺测量,精度0.01mm;另在支点、1/4L、3/4L截面设辅助挠度测点,用于对比理论变形曲线。跨中截面共布设8个应变测点,分别位于底板受拉区与腹板中性轴附近,采用100mm标距应变片纵向粘贴,并设置温度补偿片消除温度影响,以监测拉应变与应力分布。

3.2.2 试验荷载与加载效率

本次试验选用4辆三轴载重货车作为加载车辆,单辆车货总重约27t,轴重分布为前轴6t、中轴10t、后轴11t,轴距为3.8m+1.4m。加载车数量及总重经过多轮有限元试算确定:以设计荷载公路-II级产生的跨中最大弯矩520kN·m为目标值,通过MIDAS Civil软件建立全桥空间梁格模型,反复模拟不同车辆数量、排列方式及加载位置下的跨中弯矩效应,最终确定采用4辆加载车并排(横向)及纵向排列的方式,可使试验荷载产生的跨中弯矩达到517kN·m,荷载效率系数 $\eta = 517/520 = 0.99$,严格控制在《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)规定的0.80—1.05内。

试验采用4级分级加载、一次卸载,每级增载1辆车,持荷15分钟,待变形稳定后采集应变与挠度数据,观测线性响应。车辆对称布置于跨中两侧3m范围内,全站仪定位误差 $<$

5cm。加载前全面检查桥梁外观, 确认无结构性损伤后方可实施加载。

3.2.3 动载试验

动载试验用于测定桥梁动力特性与车辆荷载下的动力响应, 评价行车性能及整体工作状态, 主要包含三项试验:

第一, 无障碍行车试验。采用 27t 三轴货车以 20、30、40km/h 匀速过桥, 每车速重复 3 次, 采集跨中动挠度与应变, 计算冲击系数。

第二, 有障碍跳车试验。在跨中设置 7cm 高弓形木板, 车辆以 10km/h 低速跨越产生冲击, 分析振动衰减与最大响应, 为养护提供依据。

第三, 脉动试验。通过环境随机激励测试桥梁自振频率、振型与阻尼比, 布设传感器采集数据并经频谱分析, 将实测频率与理论值对比, 评判结构实际刚度。

3.3 试验结果分析

3.3.1 挠度分析

各测点挠度实测值及校验系数如表 1 所示:

表 1 跨中截面各测点挠度测试结果

测点号	测点位置	各级荷载挠度实测值 (mm)				理论值
		一级	二级	三级	四级	
N1	0#支座	0.00	0.00	0.00	0.00	
N2	1/4L	-0.90	-1.76	-2.40	-2.99	
N3	1/2L (跨中)	-1.14	-3.13	-3.91	-4.37	
N4	3/4L	-0.77	-1.82	-2.28	-2.75	
N5	1#支座	0.00	0.00	0.00	0.00	

根据表 1 所示: 跨中控制点 (N3) 实测弹性挠度为 -4.35mm, 理论计算值为 -6.76mm, 校验系数 0.64, 在规范 0.60~1.00 范围内。各测点校验系数介于 0.61~0.64 之间, 且纵向挠度曲线

表 4 动载试验结果

试验类型	测试参数	实测值	理论值/设计范围	结果评价
脉动试验	一阶竖弯频率	6.82 Hz	6.21 Hz	高于理论值, 刚度良好
无障碍行车试验	冲击系数	0.12~0.15	设计考虑范围内	符合要求
有障碍行车试验	冲击系数	0.18~0.22	设计考虑范围内	符合要求

根据表 4 所示: 脉动试验测得桥梁一阶竖弯频率为 6.82 Hz, 高于理论计算值 6.21 Hz, 说明结构整体刚度良好。无障碍行车试验 (车速 20~40 km/h) 测得冲击系数为 0.12~0.15, 有障碍行车试验 (弓形板高 7 cm) 测得冲击系数为 0.18~0.22, 均在设计考虑范围内, 动力性能满足要求。

4 结论

本文结合某预应力混凝土筒支空心板桥的荷载试验实例, 系统阐述了方案设计与数据分析方法。试验结果表明: 控制截面挠度校验系数 0.64、应变校验系数 0.71、相对残余变形小于 0.05, 动测冲击系数 0.12~0.22, 各项指标均满足规范要求, 结构刚度和强度储备良好。研究表明, 科学的方案设计与精准的数据分析是荷载试验发挥“深度体检”作用的关键, 建议在既有桥梁评估中推广应用基于实际荷载横向分布系数的精细

与理论变形趋势吻合, 表明结构整体刚度良好。

3.3.2 应变分析

跨中截面底板应变控制点 (Y4) 实测弹性应变为 $85 \mu \epsilon$, 理论计算值为 $120 \mu \epsilon$, 校验系数 0.71。跨中截面应变测试结果见表 2 所示:

表 2 跨中截面应变测试结果

测点号	位置	四级加载	卸载残余	弹性值	理论值	校验系数
Y1	翼缘板	-31	-3	-28	-45	0.63
Y2	腹板 1	31	2	29	43	0.68
Y3	腹板 2	63	2	61	94	0.65
Y4	底板 1	89	4	85	120	0.71
Y5	底板 2	84	3	81	108	0.75
Y6	底板 3	70	2	68	102	0.66

根据表 2 所示: 所有应变测点校验系数为 0.61~0.75, 在规范 0.50~0.90 范围内, 表明结构强度满足设计要求。试验过程中未发现新裂缝开展。

3.3.3 残余变形与弹性恢复

残余变形与弹性恢复测试结果, 如表 3 所示:

表 3 残余变形与弹性恢复测试结果

测点类型	残余变形	总变形	相对残余变形 α_1	规范限值	结果评价
挠度控制点	-0.02 mm	-4.37 mm	0.01	≤ 0.20	满足要求
应变控制点	$4 \mu \epsilon$	$89 \mu \epsilon$	0.04	≤ 0.20	满足要求

根据表 3 所示: 挠度控制点残余变形为 -0.02mm, 总变形为 -4.37mm, 相对残余变形 $\alpha_1=0.01$; 应变控制点残余变形 $4 \mu \epsilon$, 总变形 $89 \mu \epsilon$, $\alpha_1=0.04$ 。两者均远小于规范限值 0.20, 表明结构处于良好的弹性工作状态。

3.3.4 动载试验结果

动载试验结果, 如表 4 所示:

化评定方法。

[参考文献]

- [1]周特.桥梁荷载试验方案优化及技术应用要点分析[J].工程技术研究, 2022, 7(24): 74-76.
- [2]张军飞.复杂桥梁静载试验方案及结果分析[J].价值工程, 2022(019): 041.
- [3]张争超.公路桥梁荷载试验过程控制要点分析[J].安防科技, 2021, 000(001): 135-135.
- [4]何泽恒.桥梁荷载试验检测要点及工程实践分析[J].四川水泥, 2024(11): 272-274.
- [5]王占鲁, 丁振亚.基于动、静载试验法的公路桥梁建设应力应变试验分析[J].冶金丛刊, 2021(002): 6.