

有限元分析模型与无线应变测试系统在连续刚构桥成桥检测中的应用

吴 君

(中国核工业第二二建设有限公司, 湖北 武汉 443101)

摘 要 检测桥梁施工质量、判断新建桥梁荷载能力的有效手段是成桥荷载试验。为准确评价新建桥梁实际技术状况, 评定其承载能力, 对连续梁桥开展成桥荷载试验研究。试验加载工况的荷载效应理论值数据计算使用有限元分析软件 Midas/Civil; 用等效车辆荷载, 测试计算出静、动载工况下各控制截面的应力与挠度, 保证桥梁承载能力和刚度满足设计要求, 确保桥梁安全投入使用。

关键词 成桥荷载试验; 有限元分析; 无线应变测试系统; 等效车辆荷载; 静、动载

中图分类号: TP3; U446

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.005

0 引言

检验新建桥梁的工程结构、实际工作状态、评估新建桥梁的承载能力和桥梁使用性能的有效手段是对该桥梁进行荷载试验。连续刚构桥成桥检测采用模拟设计的荷载工况, 通过可操控的方式对桥梁施加荷载, 采集结构受荷载作用时静动力响应的实测数值, 对实验采集得来的数据和模型计算结果进行交叉验证。这是针对桥梁结构设计、施工流程及质量控制的整体评判, 而且为桥梁交(竣)工验收及后期运营健康监测工作提供了关键的科学凭据与数据支撑^[1]。

1 有限元分析模型与无线应变测试系统成桥检测技术原理

检测试验针对桥跨结构在静力荷载作用下的应力与变形开展测量, 验证其实际力学状况, 按照设计承载等级在桥面上布置若干加载车辆, 对桥跨结构的力学响应实施检测, 主要针对挠度、应力、沉降与裂缝发展等参数实施实测, 获取桥跨结构整体的变形样式及受力特性, 以此得到桥梁结构在荷载作用下的实际受力情形与运行状态, 分析是否符合检验荷载的要求。动载试验重点探究结构的振动特性与抵抗外部动荷载的综合能力, 进而对结构现实的工作状态加以分析, 还可为结构服役阶段的安全评估留存原始的资料。掌握结构分别在静力、动力两类不同荷载作用下的响应特性, 综合评估桥梁结构的荷载承受力以及功能特性, 作为试验桥运营阶段对结构性能评估的参考依据^[2]。

2 有限元分析模型与无线应变测试系统检测技术分析

根据设计图纸和规范, 凭借 Midas/Civil 等有限元软件搭建全桥的空间计算模型, 实施设计荷载效应分析工作, 明确试验的控制荷载及最不利加载工况。制定科学全面的静、动载试验规划, 涉及加载车辆的分布、测试截面及测点的布置、测试举措等。现场实施荷载方面的试验, 采集结构在静载作用期间的应变、挠度数据, 以及动载施加于结构时的振动响应数据。处理分析所获取的试验数据, 把关键指标(应力、挠度、频率、振型等)的实际测量数值与理论计算值对比, 综合评判结构的实际工作状态、刚度表现、强度表现及承载能力, 并对该桥的服役性能做出合理的科学评价, 目的是为连续刚构桥成桥的特大桥的竣工验收提供直接凭据, 也为同类型桥梁的荷载试验实施与安全评估积累相关经验。

3 有限元分析模型与无线应变测试系统检测技术应用分析

3.1 桥梁工程资料收集

(1) 设计相关的各类文档, 含有设计图稿、变更记录以及计算依据等相关材料; (2) 施工阶段的监理文件, 含有材料检测数据、施工记录材料、隐蔽工程验收资料、分部工程验收报告及质量事故处理记载等内容^[3]。

作者简介: 吴君(1973-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程技术及项目管理。

3.2 桥梁检测试验跨的选择

(1) 根据本桥梁设计文件及相关规范选择有代表性的桥跨进行成桥荷载试验；(2) 筛选受力性能不佳、缺陷明显或病害严重的桥跨结构；(3) 结构独立联被选作试验跨段。

3.3 检测内容

1. 静载试验。(1) 各静载试验加载工况下梁控制断面的挠度；(2) 各静载试验加载工况下梁控制断面的应变；(3) 试验过程中裂缝观察；(4) 测试截面附近结构外观检查。

2. 动载试验。(1) 自振特性测试：实际测量得到该桥梁结构的阻尼比、自振频率和振型数据；(2) 动力响应测试：无干扰行车试验，以测定试验桥跨的正弯矩最大截面为目标，对运行车辆荷载下桥梁结构的动力行为进行仿真。令满载卡车沿桥梁中线以10~30 km/h的梯度速度行驶至对应位置急刹，获取桥跨在运行车辆荷载作用下的冲击系数与动力数据^[4]。

3.4 有限元软件理论分析

1. 有限元理论静载试验。遵照《城市桥梁检测与评定技术规范》(CJJ/T 233-2015)规范对城市桥梁检测评定的要求，依据项目真实数据加以核算：

$$\eta_s = \frac{S_{stat}}{S_k' \times (1 + \mu)} \quad (1)$$

式(1)中： η_s 是静力测试的荷载效率，就验收试验而言，要求数值 ≥ 0.85 ，且1.05为最高值，就鉴定性检测而言，取值需满足 ≥ 0.95 的要求，且1.05为上限值； S_{stat} 是基于静力测试的实际工作载荷状态，指定截面的内力极值或位移量算值； S_k' 是受控荷载条件作用时，关键断面在极端工况中的内力或位移量值； μ 是动力冲击系数取值^[5]。

2. 有限元理论动载试验。遵照《城市桥梁检测与评定技术规范》(CJJ/T 233-2015)，考虑到试验车辆吨位较大，并结合现场实际情况，所有试验工况对左、右幅桥梁均进行试验。

3. 有限元模型理论自振频率、振型分析。利用Midas/civil有限元分析程序对桥梁仿真模拟计算进行动力特性分析，求解其自振频率、振型等。

4 有限元分析模型与无线应变测试系统检测技术应用实践要点

4.1 成桥荷载试验注意事项

(1) 检测前需做好资料收集及研究：对桥梁的结构状况、受力状况、关键部件、易破坏部位、设计荷载等进行全面研究，同时制定切实可行的检测方案；(2)

选出有代表性的试验跨：设计文件有具体规定，按设计文件执行，若设计文件未作出明确要求，按规范执行。边跨和中间跨一定要选，并且选择正弯和负弯最大的跨中、支点以及四分之一跨等位置处；(3) 试验时间和环境的恰当选取：试验时要挑选昼夜温差小的阴天、傍晚或者夜间时段开展，避开中午这类温差大的时间段，同时要杜绝在汛期或雷雨天开展试验，削减温度等外部条件对应变等数据的影响及干扰，保障数据精准度；(4) 感应片安装位置开展清理及打磨工作：感应片跟桥身的接触是否牢固又紧密，直接关系到数据传输的准确性和可靠性，应确保安装面光滑、安装稳固，接触可靠；(5) 数据录入要准确无误：Midas/civil有限元分析建模时数据录入较多，包括混凝土强度、弹性模量、跨度、摩擦系数、设计荷载、冲击系数、张拉控制应力等诸多数据，一旦数据录入有误，理论计算数据就会失去对比意义，因此数据要求专人录入，并至少要有2人对录入数据进行复核和检查；(6) 确保数据传输稳定和可靠：采用无线动态应变测试系统，要确保现场信号稳定，周边避免有振动源和其它无线信号源，最大限度减少外部干扰；(7) 异常情况的处理：试验过程中如果数据异常，要第一时间停止加载和试验，找出并分析原因，确保桥梁安全后再进行试验；试验过程中要按要求留影像资料，以备日后查看，试验后要及时整理、分析数据并出具试验报告^[6]。

4.2 控制截面与测点布置

试验跨横断面为现浇箱梁及钢箱梁。应变测试截面选择试验跨最大正弯矩截面具体布置；挠度测试选择试验跨最大正弯矩截面。

4.3 现场静载试验

静载试验过程：

1. 选择昼夜温差小的阴天或温差小的时段进行试验。
2. 结合现场实际布置适当数量的测温点，未加载时采集结构温度场的梯度数据，并监测温度变化引起的测点应变与位移变化。

3. 设计控制内力按照《城市桥梁设计规范》(CJJ 11-2011)中的相关要求，以城-A级荷载作为桥梁控制荷载，其中汽车荷载按照规范计入冲击效应。

4. 结合设计荷载等级安排试验荷载，采用等效荷载原则实施加载，采用载重汽车实施荷载试验。

5. 试验工况及荷载效率控制截面弯矩影响线并考虑横向分布进行等效布置。

6. 静载试验结果评定：

第一，结构变位、应变校验系数需按下列公式进行计算：

$$\xi = \frac{S_{e,m}}{S_{e,e}} \quad (2)$$

式(2)中： ξ 是变形及应变检验系数； $S_{e,m}$ 是在试验工况中荷载的作用下，控制测点的应变实测值或是弹性变位； $S_{e,e}$ 是在试验工况中荷载的作用下，控制测点的应变计算值或是弹性变位。当应变校验系数或结构变位 > 1 ，且结果准确无误时，该桥梁结构的承载能力即为不满足要求。

第二，测点的相对残余变位或相对残余应变应按下式计算：

$$S'_p = \frac{S_p}{S_t} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中： S'_p 是测点的相对残余应变或是相对残余变位(%)； S_p 是试验荷载作用下监测点的弹性变形或应变实测数值； S_t 是测试荷载下关键位置的弹性变形或应变分析值。若测点记录的相对残余变形或应变逾20%，需分析原因；若分析结果无误，应判定该桥梁结构承载力不足。

4.4 现场动载试验

(1) 清理桥面，按照试验方案要求标记测点布设位置，设置相应测试仪器与传感器，连接导线，联机调试仪器，检查各个动应变测点及拾振器测点的电路是否畅通；(2) 核心测量数据为临界阻尼比及桥跨结构固有模态频率的自振特性试验，采用脉动法测定结构的自振特性参数，桥面未受交通荷载且邻近区域无固定振源时，测量桥跨结构在风载、地脉动或水流等随机激励作用下产生的微小振幅振动响应；(3) 若桥面未设置任何障碍物，采用载重汽车沿车道中央行进，采用10 km/h/20 km/h/30 km/h三级速度(最高值参照设计行车速度，结合场地条件优化调整)的速度往返通行主桥，量化移动车辆荷载对桥跨结构的动力作用及冲击指标；(4) 桥面未布置任何障碍设施时，采用单辆重载车辆沿道路中线行驶，采用10~30 km/h速度梯度(含突发制动，测试截面随车辆后轴锁死通过桥跨结构)，获取车辆行驶过程中桥梁结构的动力响应及冲击系数。

5 有限元分析模型与无线应变测试系统检测技术结果分析

5.1 动力放大系数

应根据跑车试验中不同速度下所记录的动应变或动变位曲线进行分析，并按下列公式计算：

$$\mu_{dyn} = \frac{S_{max}}{S_{ds}} - 1 \text{ 或 } \mu_{dyn} = \frac{S_{max}}{S_{mean}} - 1; S_{mean} = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} \quad (4)$$

式(4)中： μ_{dyn} 是荷载动力放大系数； S_{ds} 是车辆停止运行期间，停驶车辆荷载引发的测点最大变位或应变读数； S_{max} 是在车辆行进阶段，动态行车荷载作用下测点位移/应变的极值； S_{min} 是车辆行进期间，动态行车荷载引起的测点最小位移或应变。

5.2 冲击系数

当计算可变作用所引起的结构效应时，需要考虑冲击系数。依照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015)中的相关规定，冲击系数确定方法如下：当结构基频 $f < 1.5$ Hz时， $\mu < 0.05$ ；当结构基频 $1.5 \text{ Hz} \leq f \leq 14$ Hz时， $\mu = 0.1767 \ln f - 0.0157$ ；当结构基频 $f > 14$ Hz时， $\mu = 0.45$ ；计算得到本桥理论冲击系数 $1 + \mu = 1.127$ 。

6 结束语

本研究试验中加载工况的荷载效应理论值利用Midas/Civil进行计算，用现场等效车辆荷载实施静力加载，测试计算出静载工况下各控制截面的应变、挠度以及动载工况下实测值。有限元理论分析得到的结果与现场实测数据进行辅证，得出桥梁成桥试验合格，为桥梁的运营使用提供有效的技术安全支撑，值得在桥梁工程中推广应用。无线动态应变测试系统在人力成本与时间效率、监测精度与实时性、全面性与整体性、适应性与灵活性以及长期监测与数据积累等方面均展现出显著优势。同时，传统成桥检测方法虽然具有一定的操作性和实用性，但在精度、效率、全面性和长期监测等方面存在局限性。因此，在桥梁结构健康监测领域，无线动态应变测试系统具有更广泛的应用前景。

参考文献：

- [1] 朱江华,张晨,万正华,等.基于成桥荷载试验的武汉青山长江公路大桥主桥有限元模型修正[J].世界桥梁,2021,49(06):85-89.
- [2] 何少阳.基于成桥荷载试验的连续刚构桥梁状态评估[J].工程技术研究,2022,07(04):5-7.
- [3] 陈强,刘前瑞,刘胜强.基于有限元分析方法的连续刚构桥施工监控[J].城市道桥与防洪,2020(03):150-152,21.
- [4] 姜震宇,解会兵.基于建筑信息模型技术的刚构桥检测分析一体化研究[J].工业建筑,2022,52(02):180-185.
- [5] 鹿俊杰,赵青.某连续刚构桥荷载试验分析[J].兰州工业学院学报,2021,28(03):47-50.
- [6] 夏靖.连续刚构桥荷载试验研究[J].四川建筑,2023,43(04):180-182.