

# Load Test and Analysis of Long-Span Prestressed Concrete Continuous Rigid Frame Bridge with High Pier

Litao He

Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an, Shaanxi, 710075, China

## Abstract

Load test is an important means to determine the bearing capacity of the bridge and evaluate the current situation of the bridge. Based on the continuous rigid frame of Dongjiagou super large bridge in the capacity expansion project of Huangling-Yan'an Expressway, this paper introduces the relevant content of the load test. Through the comparative analysis of the test results of the strain and deflection of the loaded bridge and the theoretical calculation values, it is concluded that the Dongjiagou bridge meets the requirements of the bearing capacity. At the same time, the actual working state of the bridge is mastered through the load test, which can provide a reliable basis for the scientific comprehensive analysis and judgment of the bearing capacity and service performance of this kind of bridge structure. The test conditions and the layout plan of measuring points have reference significance in similar projects.

## Keywords

high-pier and long-span; prestressed; concrete continuous rigid frame bridge; load test

# 高墩大跨预应力混凝土连续刚构桥荷载试验分析研究

何利涛

陕西省交通建设集团公司, 中国·陕西 西安 710075

## 摘要

桥梁荷载试验是判定桥梁承载能力、评价桥梁现状的重要手段。论文以黄延高速公路扩能工程董家沟特大桥连续刚构为背景介绍荷载试验相关内容,通过对受荷桥梁应变、挠度测试结果与理论计算值的对比分析,得出董家沟大桥满足承载力要求。同时通过荷载试验掌握了该桥的实际工作状态,为科学地综合分析判断该类桥梁结构的承载能力和使用性能提供可靠依据,试验工况及测点布置方案在类似工程中具有借鉴参考意义。

## 关键词

高墩大跨; 预应力; 连续刚构桥; 荷载试验

## 1 引言

目前,中国尤其是西部地区已建设了大量的高墩大跨径预应力混凝土连续刚构桥,而且同类桥梁的建设数量愈来愈多,此类桥梁在试验荷载作用下的实际工作状态、对桥梁结构的实际承载能力进行评定等问题引起了广大桥梁工作者的高度重视。开展此类桥梁的荷载试验评定技术研究,对于同类桥梁结构的安全使用、完善桥梁的荷载试验理论都具有重要的现实意义<sup>[1-2]</sup>。

桥梁荷载试验一般分为静载试验和动载试验。静载试验是将静止的荷载作用在桥梁上的指定位置而测试桥梁的静应变、静位移及其他测试项目,分析判断桥梁结构在荷载作用下的工作状态及使用性能;动载试验是通过车辆移动荷载引

起桥梁结构振动,测定桥梁固有频率、阻尼比、振型、动力冲击系数等参量的试验项目,宏观判断桥梁结构的整体刚度、运营性能。

## 2 工程概况

中国黄延高速公路扩能工程董家沟特大桥桥梁全长 1097 米,主桥最大墩高 124 米。上部结构为(4×30+4×30+5×30)米预应力混凝土连续箱梁+(65+2×120+65)米预应力混凝土连续刚构+(5×30+3×30+3×30)米预应力混凝土连续箱梁;桥面净宽为 0.5 米(防护栏)+15.25 米(行车道)+2.0 米(中央分隔带)+15.25 米(行车道)+0.5 米(防护栏),主桥为单箱单室三向预应力钢筋混凝土现浇箱梁结构,混凝土标号为 C55,桥梁下部结构为单薄壁空心墩,桩基础。设计荷载

等级为公路—I级。

### 3 荷载试验目的与内容

#### 3.1 试验目的

荷载试验的目的是为了了解桥梁结构在荷载作用下的实际工作状态,综合分析判断桥梁结构的承载能力和使用性能;检验桥梁施工质量,为竣(交)工验收提供依据;完善桥梁技术档案,为桥梁今后正常运营和养护提供技术依据<sup>[1]</sup>。

#### 3.2 试验内容

荷载试验一般分为静载试验和动载试验,静载试验主要是实测桥梁控制截面在静载作用下的应变、挠度,检查主梁控制断面是否出现裂缝,若出现裂缝,在试验过程中跟踪观测裂缝开展情况;动载试验主要是实测桥梁在动载作用下的自振频率及阻尼比;最终根据静动载外业实测数据结合理论计算,综合分析评价桥梁的承载能力和使用性能状况<sup>[4-5]</sup>。

## 4 静载试验

#### 4.1 理论计算

该桥结构内力计算采用通用有限元分析程序 ANSYS 建立空间仿真模型进行各工况荷载作用下位移、应力计算及结构动力计算,采用板壳单元 shell63 分别模拟箱梁顶板、腹板、底板、横隔板及墩身等构造,厚度采用实常数 R 加以区分,二期恒载作为节点荷载分布到桥面各节点上,试验荷载采用平面荷载加载方式,考虑车轮实际着地面积的影响<sup>[6-7]</sup>。shell63 该单元为弹性壳单元,具有弯矩和薄膜特性,可承受与平面同方向及法线方向的荷载,有应力强化和大变形能力,可以实现加载效应的精确模拟,全桥共划分为 42108 个节点,7212 个单元,节点划分及结构离散图如图 1 所示。

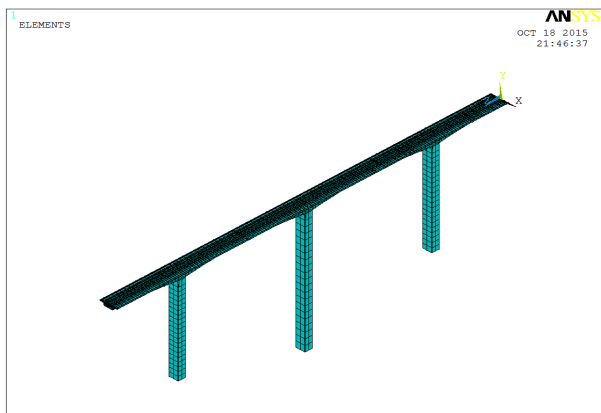


图 1 结构计算简图

#### 4.2 测试断面及测点布置

根据连续刚构桥的受力特点及有限元计算,选择结构主要控制截面进行静载试验。了解测试截面在试验荷载作用下的应变和挠度<sup>[8]</sup>。

结构应变测试截面如图 2 所示,共 5 个截面,其中 A1 截面为 17 跨最大正弯矩截面;A2 为 16 号墩墩顶负弯矩截面;A3 为 16 跨 1/4L 正弯矩最不利截面;A4 为 16 跨跨中正弯矩最不利截面;A5 为 17 跨剪力最不利截面。本次试验在主桥右幅第 17 跨 0.38L 截面、第 16 跨 1/4L 截面、第 16 跨跨中截面各布置 6 个挠度测点及 19 个应变测点,在 16 号墩支点截面梁底及腹板布置 18 个应变测点。应变片和挠度观测点的具体位置和编号如图 3 所示,受篇幅所限仅给出部分截面示意图。

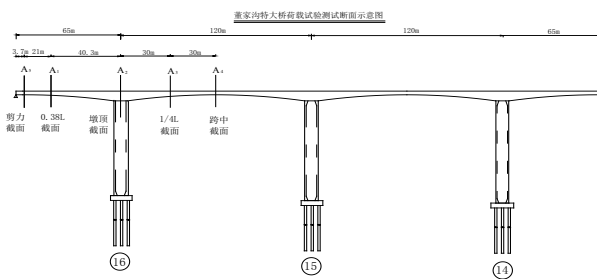
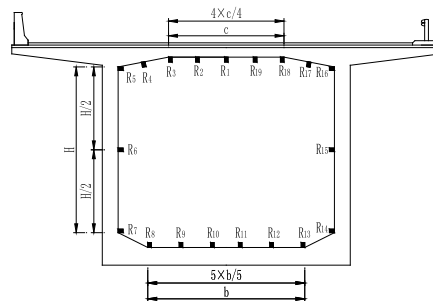
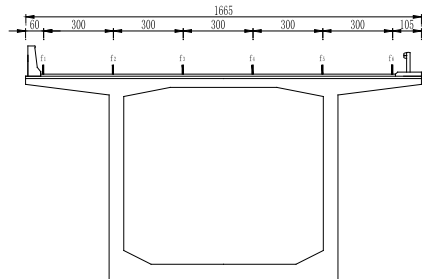


图 2 测试断面示意图



(a) 工况 1、2、5、6、7、8 应变测点布置图



(b) 主梁挠度测点布置图

图 3 各工况主梁应变、挠度测点布置示意图

#### 4.3 荷载试验工况

为保证试验加载的有效性和合理性,应使桥跨结构在最

不利的荷载情况下加载检测。加载分为中载和偏载，加载汽车采用三轴重车，中载时，横向车间距为1.3米；偏载时加载车辆车轮距防护栏0.5米，横向车间距1.3米。按以下工况进行。受篇幅所限仅给出横向加载示意图如图4所示。

工况1、2：右幅第17跨0.38L正弯矩最不利截面，加中、偏载。

工况3、4：右幅17号墩墩顶处负弯矩最不利截面，加中、偏载。

工况5、6：右幅第16跨1/4L正弯矩最不利截面，加中、偏载。

工况7、8：右幅第16跨跨中正弯矩最不利截面，加中、偏载。

工况9、10：右幅第17跨剪力最不利截面，加中、偏载。

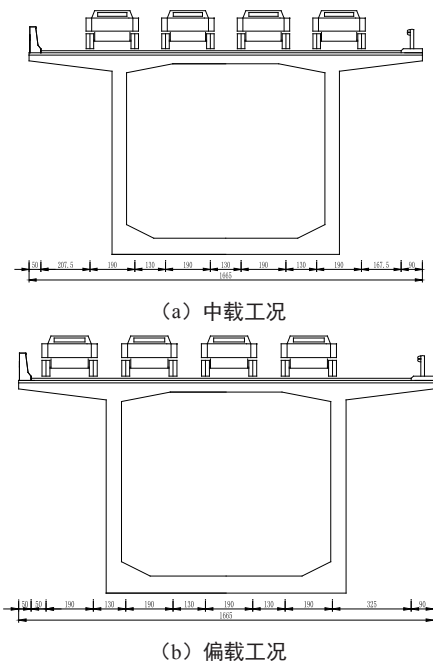


图4 横向加载布置示意图

#### 4.4 加载效率

根据设计荷载（公路—I级）和试验荷载（采用12辆重车加载）在主梁弯矩影响线的纵向布置，分别计算设计荷载和试验荷载在测试截面产生的弯矩值，两者的比值即为加载效率。静载试验的加载效率应在某一范围内试验才能有效，根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》（JTG/T J21-2011）的规定，静力荷载试验效率 $\eta_q$ 宜介于0.95和1.05之间。

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

式中： $S_s$ —静力试验荷载作用下，某一加载试验项目对应的加载控制截面内力、应力或变位的最大计算效应值；

$S'$ —检算荷载产生的同一加载控制截面内力、应力或变位的最不利效应计算值；

$\mu$ —按规范取用的冲击系数值。

本次试验采用总重34t三轴重车12辆进行加载，标准轴重和轴距符合规范要求。本次试验的加载效率具体数值见表1，满足规范中关于加载效率的规定，试验加载有效。

表1 加载效率表

工况	设计弯矩或剪力 (kN.m 或 kN)	试验弯矩或剪力 (kN.m 或 kN)	加载效率	备注
1、2	24300.0	24008.1	0.99	右幅第17跨正弯矩最不利工况
3、4	-80000.0	-82721.5	1.03	右幅16号墩顶负弯矩最不利工况
5、6	16000.0	15419.9	0.96	右幅第16跨L/4最不利工况
7、8	24400.0	24336.1	1.00	右幅第16跨正弯矩最不利工况
9、10	2130.0	2173.7	1.02	右幅剪应力最不利工况

#### 4.5 测试结果及分析比较

在各荷载工况下，测量所得各测试截面最大应变值与理论计算值比较结果如表3-2，受篇幅所限，仅给出工况7、8荷载作用下各测点应变比较图4、5。

表2 各工况弹性应变值对比表

截面	工况	实测值 $\mu\epsilon$	理论值 $\mu\epsilon$	残余应变 $\mu\epsilon$	校验系数	各测点校验系数平均值
截面 A1	1	27	52	-1	0.51	0.57
	2	31	55	0	0.76	0.56
截面 A2	3	-22	-38	1	0.57	0.58
	4	-20	-39	1	0.50	0.59
截面 A3	5	17	20	-2	0.83	0.59
	6	15	22	-1	0.66	0.61
截面 A4	7	30	76	2	0.39	0.60
	8	31	79	2	0.39	0.63
截面 A5	9	11	12	0	0.93	0.76
	10	11	14	0	0.80	0.74

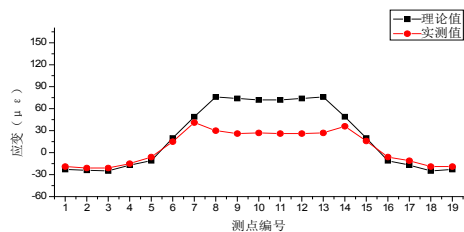


图5 工况7应变比较图

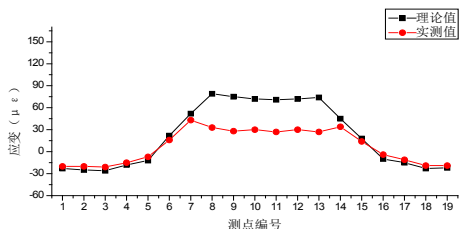


图6 工况8应变比较图

从表2、图5、6可以看出：各测点的应变实测值均小于计算值，相对残余应变在20%之内；各工况截面应变的校验系数均值在0.56至0.76之间，应变校验系数满足规范要求，说明结构处于弹性工作范围，且有一定的安全储备。

在各荷载工况下，测量所得各测试截面最大挠度值与理论计算值比较结果如表3，受篇幅所限，仅给出工况7、8荷载作用下各测点挠度比较图7、8。

表3 挠度值对比表

截面	工况	实测值 mm	理论值 mm	残余值 mm	校验系数	各测点校验 系数平均值
截面A1	工况1	7.34	4.86	0.04	0.66	0.72
	工况2	7.92	5.67	0.05	0.72	0.70
截面A3	工况5	7.35	3.82	0.05	0.52	0.50
	工况6	7.88	3.38	0.05	0.43	0.49
截面A4	工况7	24.74	14.39	0.08	0.58	0.56
	工况8	25.98	13.51	0.08	0.52	0.56

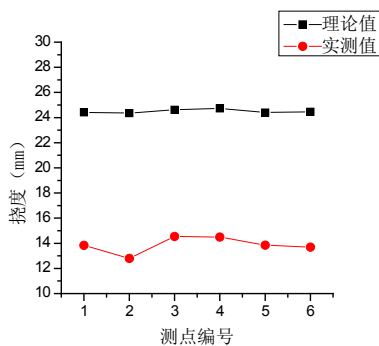


图7 工况7挠度比较图

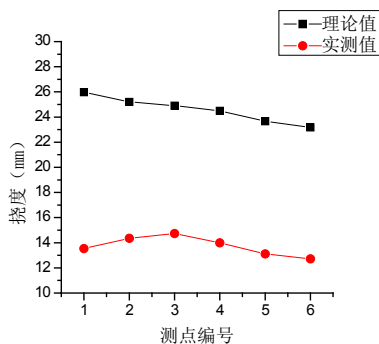


图8 工况8挠度比较图

从表3，图7、8可以看出：主梁在荷载作用下，各点的挠度实测值均小于计算值，远小于规范限值，1、2、5、6、7、8工况作用下截面挠度校验系数均值在0.49至0.72之间；相对残余变位在20%之内。表明桥梁结构整体刚度较大，受力状况良好。

## 5 动载试验

### 5.1 理论计算

动力分析计算采用结构静、动载分析通用程序ANSYS软件，理论一阶频域振型见图9。

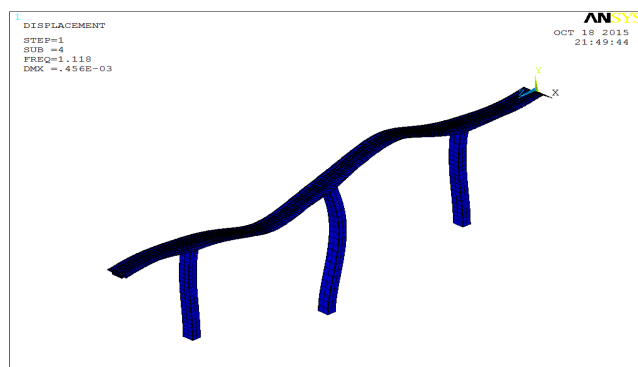


图9 竖向理论一阶频率振型图

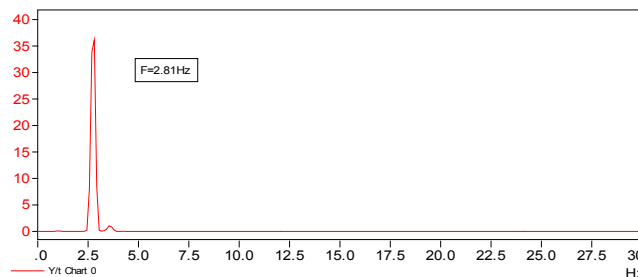
### 5.2 测试结果及分析比较

本次试验用两种不同的方式对桥梁进行激振，第一种是汽车在桥面上刹车，第二种是汽车在桥面上直接跑过，这两种方式有频带宽、激励强的特点。以安装在桥梁上的加速度传感器响应，测得的桥梁振动时域、自功率谱曲线及阻尼比，受篇幅所限仅给出16跨所测得桥梁振动自功率谱信号和阻尼比结果见图10。

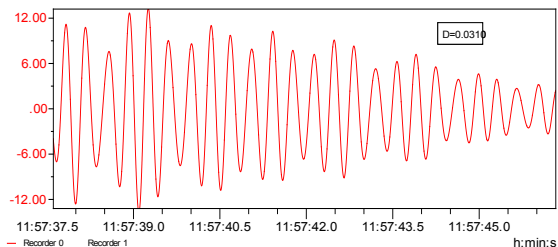
频率的实测值与理论值的比较结果及阻尼比见表4。

表4 频率与阻尼比一览表

传感器位置	频率阶次	理论值 (Hz)	实测值 (Hz)	阻尼比
右幅第16跨	竖向一阶	1.12	2.81	0.0310
右幅第17跨	竖向一阶	1.12	2.81	0.0327



(a) 桥梁振动自功率谱信号



(b) 阻尼比结果

图 10 桥梁振动自功率谱及阻尼比结果 (右幅第 16 跨)

从实测桥梁振动时域曲线、自功率谱曲线及阻尼比结果图可以得出:

(1) 振动曲线符合连续刚构的振动规律, 激振主要激起的是一阶的振动, 竖向振动基频实测值比理论分析值大, 桥梁上部结构自振特性较好, 结构整体动刚度较高;

(2) 通常桥梁结构的阻尼比在 0.01 ~ 0.08 之间, 实测阻尼比为 0.0310 和 0.0327, 桥梁结构具有一定的耗散外部能量的能力, 阻尼比合理。

## 6 结语

本次荷载试验, 加载效率在 0.96 ~ 1.03 之间, 符合相关要求, 能够充分反映设计荷载的作用; 各工况下, 所测得的结构各控制截面的测点弹性应变、挠度校验系数均小于 1.05, 说明该桥的强度和刚度均满足设计和使用承载力要求; 全部荷载卸除后, 残余变形与总变形的比值小于 20%, 说明桥梁处于弹性工作状态, 受力良好。

动载试验中, 实测的振动时域曲线符合预应力混凝土连续刚构桥的振动规律, 振动时域、频域曲线及阻尼比合理。实测的一阶频率均大于理论值, 阻尼比实测值在 0.01 ~ 0.08 之间, 说明目前该桥的整体刚度大于理论刚度, 满足设计要求。

静载试验和动载试验相互验证, 本次试验结果可靠, 桥梁整体性能良好, 能在后期运营中充分发挥作用。同时, 该桥的试验分析方法可为同类桥梁承载力评定提供借鉴。

## 参考文献

- [1] 袁卓亚, 马毓泉, 冯威. 高墩大跨径预应力混凝土连续刚构空间仿真方法研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 69(6): 34-37.
- [2] 贺栓海. 公路桥梁承载能力检测评定规程 [M]. 北京: 人民交通出版社, JTG/TJ21-2011.
- [3] 肖毅. 谈连续刚构桥梁荷载试验 [J]. 山西建筑, 2014, 40(8): 225-226.
- [4] 刘亮, 伍金华, 张保俊. 连续刚构桥梁荷载试验分析 [J]. 湖南交通科技, 2010, 36(3): 59-62.
- [5] 宋一凡. 公路桥梁荷载试验与结构评定 [M]. 人民交通出版社, 2002.
- [6] 张喜刚. 公路桥涵设计通用规范 [M]. 人民交通出版社, JTGD60-2015.
- [7] 肖金军, 司徒毅等. 预应力连续刚构桥荷载试验下的应力状态分析 [J]. 中外公路, 2011, 31(5): 86-89.
- [8] 潘钻峰, 吕志涛, 刘钊. 苏通大桥连续刚构收缩、徐变效应的不确定性分析 [J]. 工程力学, 2009, 26(9): 67-73.