

# 静载作用下桥梁结构受力分析

陈冠<sup>1,2</sup>, 殷新锋<sup>1</sup>, 刘扬<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410004; 2.湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 通过静载试验测量桥梁结构各控制截面在静荷载工况下的应力应变和变形, 可判断桥梁的受力性能和工作状态。文中以高桥沟大桥为工程背景进行现场静载试验, 分析计算 4 种荷载条件下各控制截面的结构应力和变形, 数值计算结果和理论数据对比分析表明, 施工过程中该桥结构符合规范要求, 具有良好的受力性能。

**关键词:** 桥梁; 静载试验; 应力应变; 变形; 受力性能

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)02-0144-05

结构试验是检验桥梁工作状态的常用手段, 静载试验是其中主要方法之一。通过有效的静载试验, 可评估桥梁指定控制截面在静荷载作用下的工作状态和使用能力, 为桥梁设计和安全使用提供依据。从学术研究的角度, 通过结构试验直接获得设计数据, 可验证桥梁结构设计理论, 解决理论上难以计算和实践的问题。

## 1 工程概况

高桥沟大桥跨径 120 m, 纵向坡度为 0.868%, 横向坡度为 1.5%。上部结构为 4×30 m 装配式部分预应力砼连续梁, 由 3 片单箱单室小箱梁组成(见图 1)。该结构体系采用多箱单独预制, 简支安装, 现浇连续接头先简支后连续的方法。中跨箱梁的顶板宽 2.4 m、底板宽 1 m, 边跨箱梁的顶板宽 2.85 m、底板宽 1 m, 梁高均为 1.6 m。3 根箱梁之间通过 2 片宽 0.5 m、厚 0.18 m 的翼缘板纵向湿接缝实现横向连接, 箱梁采用 C50 砼。桥面铺装采用 9 cm 沥青砼。荷载等级为公路 I 级。

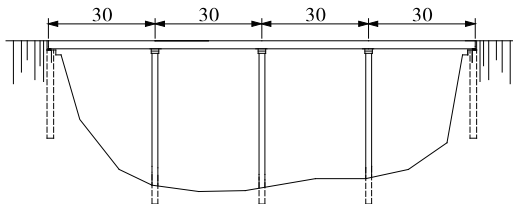


图 1 高桥沟大桥示意图(单位:m)

## 2 静载试验测试方法

### 2.1 外观检查

试验前检查试验桥跨结构的外观质量, 重点检

查各测试截面和支座、伸缩缝、桥面等, 确保荷载试验顺利进行, 也是保证试验结果实时有效的关键。

### 2.2 控制截面测点布置

静载试验测试截面选取试验跨的 1/4L、1/2L 截面, 0# 台、1# 墩和 2# 墩墩顶, 分别标记为 1~7 号截面。应力测试采用外贴式电阻式应变片, 挠度采用精密水准仪观测。各测试截面的应变片布置见图 2, 挠度测点布置见图 3。

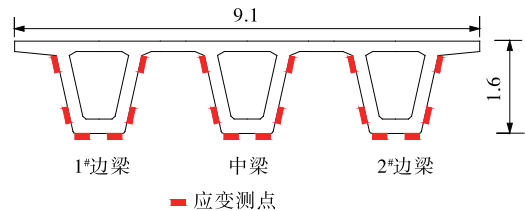
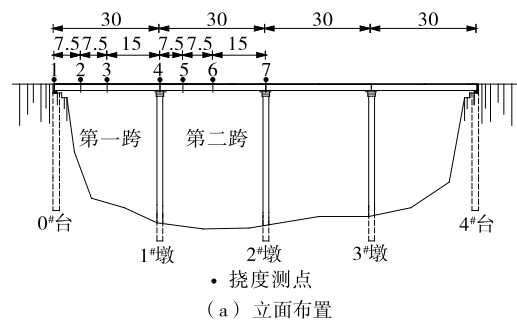
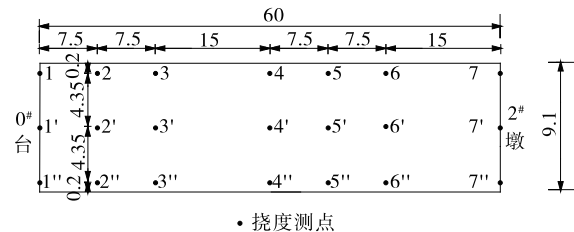


图 2 横桥向应变片布置示意图(单位:m)



• 挠度测点

(a) 立面布置



• 挠度测点

(b) 平面布置

图 3 纵桥向挠度测点布置示意图(单位:m)

### 2.3 加载方法

对控制截面荷载分级加载和卸载,每种工况均进行不少于2次测试,随时观测各级荷载下控制参数的变化,得到构件试验荷载与变位的关系曲线。

加载最后一级荷载前,将现场实测值(应变和变形)与理论计算值进行比较,预测下一级加载可能产生的应变和变形。如果估计最后一级荷载加载可能对结构造成损伤,则停止荷载试验。如果预应力结构已出现裂缝,也应停止荷载试验,分析原因并采取相关措施。

经过计算,该桥静载试验采用4辆加载试验车(三轴车)。每种工况的试验荷载分3次加载和1次卸载,3次加载逐级递增,最后全部卸载。荷载分级见表1。

表1 静载试验荷载分级

| 加载    |     |     | 卸载              |
|-------|-----|-----|-----------------|
| 第一级   | 第二级 | 第三级 |                 |
| 第1、2辆 | 第3辆 | 第4辆 | 第1、2、3、4辆一次全部卸载 |

### 2.4 试验工况

共设置4种工况,每种工况分别对各测试截面的挠度和应变进行观测。试验荷载布置:工况一为第一跨控制截面横桥向对称布载,纵桥向按最大正弯矩布置荷载(见图4);工况二为第二跨控制截面横桥向对称布载,纵桥向按最大正弯矩布置荷载(见图5);工况三为第一跨控制截面横桥向偏心布载,纵桥向按最大正弯矩布置荷载(见图6);工况四为第二跨控制截面横桥向偏心布载,纵桥向按最大正弯矩布置荷载(见图7)。

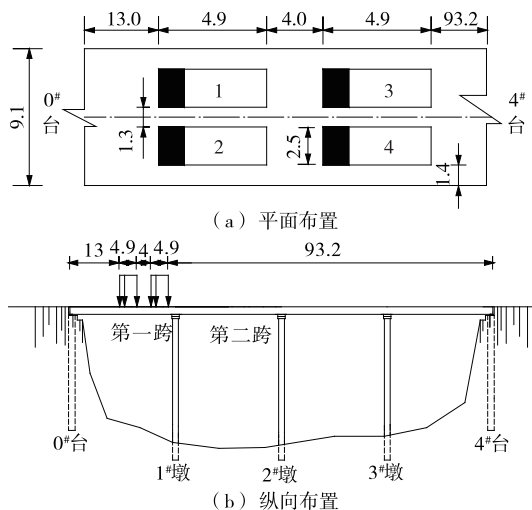


图4 工况一下试验荷载布置(单位:m)

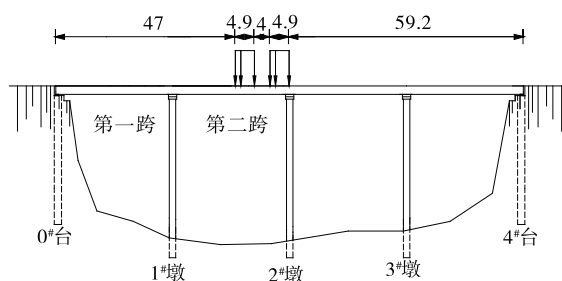


图5 工况二下试验荷载纵向布置(单位:m)

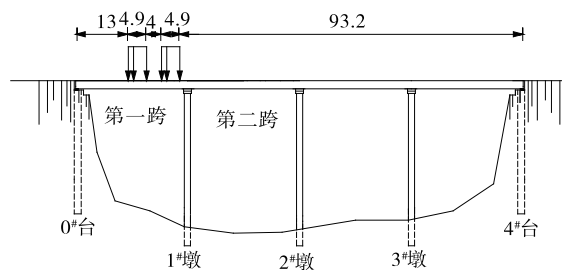


图6 工况三下试验荷载纵向布置(单位:m)

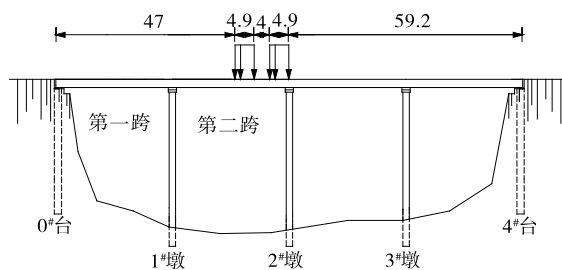


图7 工况四下试验荷载纵向布置(单位:m)

## 3 静载试验

### 3.1 静载试验荷载效率

桥梁静载试验按荷载效率确定试验最大荷载,荷载效率系数 $\eta$ 按下式计算:

$$\eta = \frac{S_{stat}}{S \times \delta} \quad (1)$$

式中: $S_{stat}$ 为试验荷载作用下控制截面变形或内力计算值; $S$ 为设计标准荷载作用下控制截面变形或内力计算值; $\delta$ 为设计取用的动力系数。

实际荷载试验时,按规范要求,试验效率系数控制在0.95~1.05。表2为各最不利工况下的试验荷载效率。

### 3.2 静载试验理论

(1) 各测点变位(挠度、位移、沉降)与应变的计算。总变位(或总应变) $S_i$ 为:

$$S_i = S_1 - S_i \quad (2)$$

弹性变位(或弹性应变) $S_e$ 为:

表2 试验荷载效率系数

| 加载工况 | 试验荷载<br>效应值/(kN·m) | 设计荷载<br>计算值/(kN·m) | 效率系数/% |
|------|--------------------|--------------------|--------|
| 工况一  | 5 130.7            | 5 042.9            | 1.02   |
| 工况二  | 4 180.9            | 4 061.2            | 1.03   |
| 工况三  | 4 991.2            | 4 893.3            | 1.02   |
| 工况四  | 4 014.3            | 3 897.4            | 1.03   |

$$S_e = S_1 - S_u \quad (3)$$

残余变位(或残余应变) $S_p$ 为:

$$S_p = S_t - S_e = S_u - S_i \quad (4)$$

式中: $S_1$ 为加载过程中达到稳定时的测值; $S_i$ 为加载前测值; $S_u$ 为全部卸载后达到稳定时的测值。

(2)各测点的应力计算(单向应力状态下)。测点应力值 $\sigma$ 为:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (5)$$

式中: $E$ 为构件所用材料的弹性模量; $\epsilon$ 为测点的实测应变。

(3)主要测点(即控制测点或加载试验效率的最大部位)的计算。相对残余变位(或应变) $S'_p$ 为:

$$S'_p = S_p / S_i \times 100\% \quad (6)$$

校验系数为:

$$\eta = S_e / S_s \quad (7)$$

式中: $S_e$ 为试验荷载作用下量测的弹性变位(或应变); $S_s$ 为试验荷载作用下的理论计算变位(或应变)。

### 3.3 有限元模型

应用MIDAS/Civil模拟荷载工况,建立三维空间模型(见图8),计算分析该桥在试验荷载作用下的应力应变和变形。



图8 桥梁有限元计算模型

### 3.4 静载试验结果分析

#### 3.4.1 工况一试验结果分析

工况一第1、3级荷载作用下的弹性变位曲线见图9~11,各测点挠度测试结果见表3,应变测试结果见表4。其中,墩顶测点1、1'、1''和4、4'、4''的挠度理论值和实测值均为零。

根据试验实测数据,工况一下该桥相对残余变位最大值为0.038,相对残余应变最大值为0.095,均

小于容许值0.2,符合规范要求;挠度校验系数最大值为0.837、平均值为0.792,应变校验系数最大值为0.697、平均值为0.672,在合理范围内,符合相关规范要求。

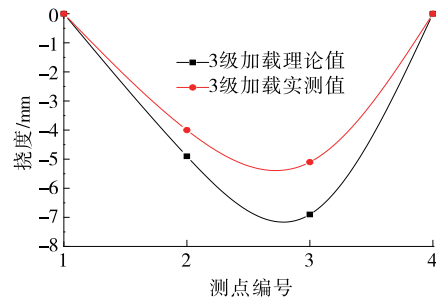


图9 第一跨1#边梁对称加载荷载-弹性变位曲线

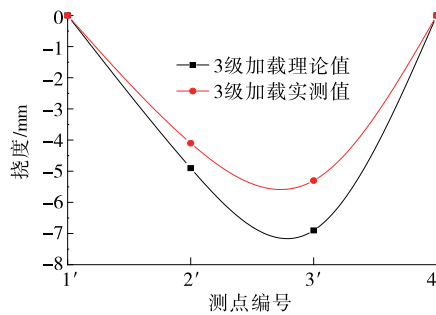


图10 第一跨中梁对称加载荷载-弹性变位曲线

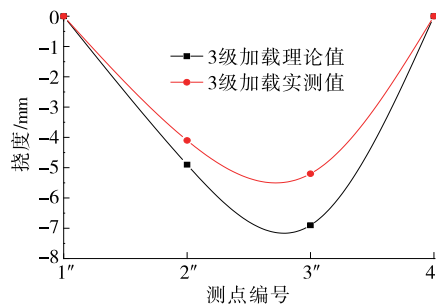


图11 第一跨2#边梁对称加载荷载-弹性变位曲线

表3 工况一下挠度测试结果

| 测点  | 弹性变形   |        |        |        |       | 残余变形(卸载) |       |
|-----|--------|--------|--------|--------|-------|----------|-------|
|     | 第1级加载  |        | 第3级加载  |        | 校验系数  | 实测值/残余比  |       |
|     | 实测值/mm | 理论值/mm | 实测值/mm | 理论值/mm |       | 实测值/mm   | 残余比   |
| 2   | -2.7   | -3.8   | -4.0   | -4.9   | 0.816 | -0.1     | 0.026 |
| 2'  | -2.8   | -3.8   | -4.1   | -4.9   | 0.837 | -0.1     | 0.024 |
| 2'' | -2.7   | -3.8   | -4.1   | -4.9   | 0.837 | -0.1     | 0.024 |
| 3   | -3.4   | -5.2   | -5.1   | -6.9   | 0.739 | -0.1     | 0.020 |
| 3'  | -3.6   | -5.2   | -5.3   | -6.9   | 0.768 | -0.2     | 0.038 |
| 3'' | -3.4   | -5.2   | -5.2   | -6.9   | 0.754 | -0.2     | 0.038 |

表4 工况一下应变测试结果

| 测点  | 弹性应变  |     |       |     |       | 残余应变(卸载) |       |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|----------|-------|
|     | 第1级加载 |     | 第3级加载 |     |       | 实测值      | 残余比   |
|     | 实测值   | 理论值 | 实测值   | 理论值 | 校验系数  |          |       |
| 2   | 21    | 35  | 28    | 42  | 0.667 | 2        | 0.071 |
| 2'  | 21    | 35  | 28    | 42  | 0.667 | 2        | 0.071 |
| 2'' | 23    | 36  | 30    | 43  | 0.697 | 3        | 0.100 |
| 3   | 60    | 89  | 75    | 111 | 0.675 | 6        | 0.080 |
| 3'  | 58    | 89  | 73    | 111 | 0.658 | 5        | 0.069 |
| 3'' | 61    | 89  | 74    | 111 | 0.667 | 7        | 0.095 |

3.4.2 工况二试验结果分析

工况二第1、3级荷载作用下的弹性变位曲线见图12~14,其中墩顶测点4、4'、4''和7、7'、7''挠度理论值和实测值均为零。

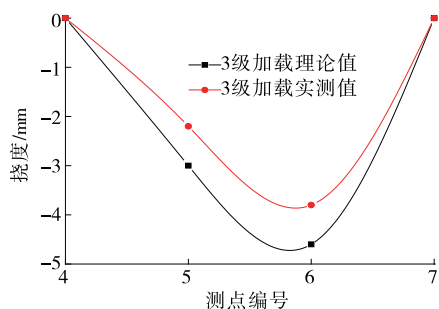


图12 第二跨1#边梁对称加载荷载-弹性变位曲线

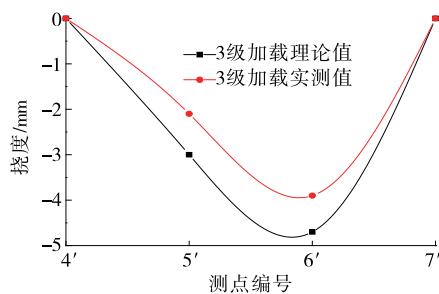


图13 第二跨中梁对称加载荷载-弹性变位曲线

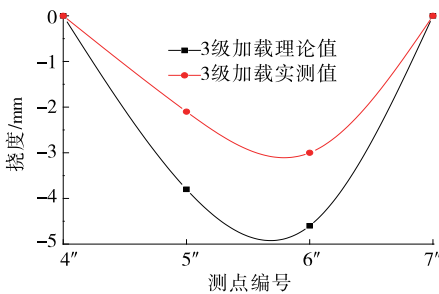


图14 第二跨2#边梁对称加载荷载-弹性变位曲线

根据试验实测数据,工况二下该桥相对残余变

位最大值为0.048,相对残余应变最大值为0.098,均小于容许值0.2,符合规范要求;挠度校验系数最大值为0.830、平均值为0.769,应变校验系数最大值为0.750、平均值为0.659,均在合理范围内,符合相关规范要求。

3.4.3 工况三试验结果分析

工况三第1、2、3级荷载作用下的弹性变位曲线见图15~17。

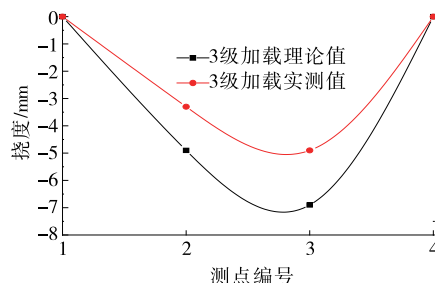


图15 第一跨1#边梁偏载荷载-弹性变位曲线

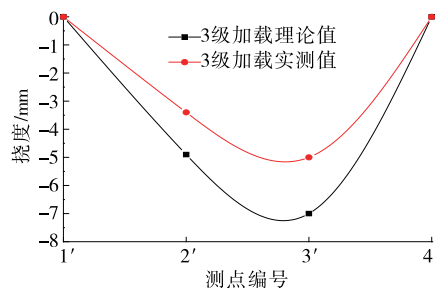


图16 第一跨中梁偏载荷载-弹性变位曲线

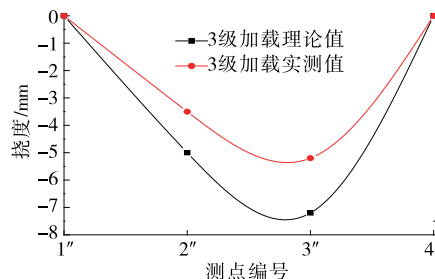


图17 第一跨2#边梁偏载荷载-弹性变位曲线

根据试验实测数据,工况三下该桥相对残余变位最大值为0.041,相对残余应变最大值为0.100,均小于容许值0.2,符合规范要求;挠度校验系数最大值为0.722、平均值为0.702,应变校验系数最大值为0.675、平均值为0.666,均在合理范围内,符合相关规范要求。

3.4.4 工况四试验结果分析

工况四第1、2、3级荷载作用下的弹性变位曲线见图18~20。

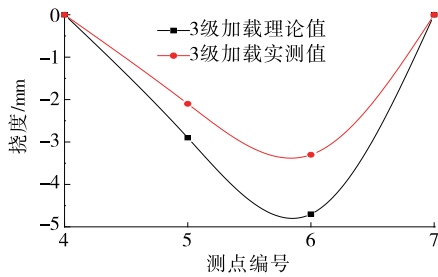


图 18 第二跨 1# 边梁偏载荷载—弹性变位曲线

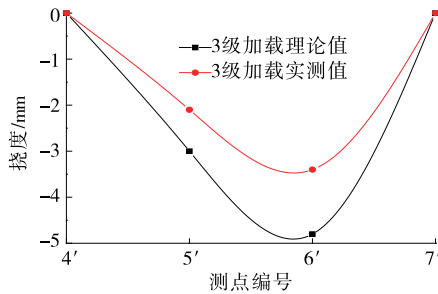


图 19 第二跨中梁偏载荷载—弹性变位曲线

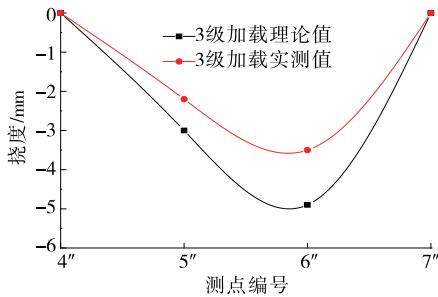


图 20 第二跨 2# 边梁偏载荷载—弹性变位曲线

根据试验实测数据,工况四下该桥相对残余变位最大值为 0.061,相对残余应变最大值为 0.091,均小于容许值 0.2,符合规范要求;挠度校验系数最大值为 0.724、平均值为 0.714,应变校验系数最大值为 0.739、平均值为 0.671,均在合理范围内,符合相关规范要求。

### 4 结论

(1) 该桥各静载试验工况下的荷载效率系数均在 0.95~1.05 范围内,符合《公路桥梁承载能力检测评定规程》的规定,试验加载有效。

(2) 每级静载试验荷载下的主梁挠度平均校验系数均在 0.6~0.8 内,主梁的实际刚度比理论值大,结构满足安全要求;相对残余变位都不大于 0.2,主梁在各静载试验工况下均处于弹性工作阶段。

(3) 静载试验各工况下关键截面的实测挠度具有较好的线弹性关系,基本符合平截面假定。

(4) 静载试验各工况下桥梁变形均满足规范要求,桥跨结构刚度满足设计及正常使用要求;偏载工况实测值的变化规律与理论计算值基本吻合,结构整体横向联系与理论状态基本一致,符合结构设计要求。

### 参考文献:

[1] 郭东升,贾艳敏.静载作用下的预应力空心板单梁受力试验分析[J].山西建筑,2014,40(26).  
 [2] 赵维涛.静载作用在静载和疲劳荷载作用下结构系统失效机理与可靠性分析[J].哈尔滨工程大学学报,2006,27(2).  
 [3] 王世杰.大型桥梁静载试验中的测量技术及应用[J].兰州交通大学学报,2004,23(3).  
 [4] 邵旭东.桥梁工程[M].第二版.北京:人民交通出版社,2007.  
 [5] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].  
 [6] 何鑫.基于梁格法的双曲拱桥损伤状态受力分析[J].公路与汽运,2016(4).  
 [7] 黄利,曾志威.某三跨变截面连续箱梁桥荷载试验分析[J].公路与汽运,2015(4).

收稿日期:2017-03-20

(上接第 143 页)

[3] 何宗成,王柏生.大跨度人行天桥的振动影响测试与分析[J].振动与冲击,2006,25(4).  
 [4] 张冠华,葛耀君.砼连续箱梁人行天桥振动特性测试与分析[J].振动与冲击,2009,28(2).  
 [5] 李强,单美弟,黄铭枫,等.钢桁架人行天桥的振动实测分析与舒适度评价[J].深圳大学学报:理工版,2015,32(1).  
 [6] 尹越,黄逸群,王秀泉.车辆撞击钢结构人行天桥有限

元分析[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2016,49(增刊).  
 [7] CJJ 99—2003,城市桥梁养护技术规范[S].  
 [8] JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力检测评定规程[S].  
 [9] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].  
 [10] GB 50017—2003,钢结构设计规范[S].

收稿日期:2017-06-16