

文章编号: 1673-9469 (2018) 02-0086-03

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.019

## 裸梁静载试验加载控制弯矩确定方法

郝天之<sup>1</sup>, 刘诗媛<sup>2</sup>, 毛志刚<sup>1</sup>, 谢开仲<sup>2</sup>

(1. 广西交通科学研究院有限公司, 广西南宁 530007; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

**摘要:** 现有方法将加载控制弯矩简单视为未施工前作用裸梁上的恒载(主要为桥面铺装)和设计车辆荷载之和, 未考虑桥面铺装的承载能力, 致使试验结果不准确。提出了一种基于应变确定裸梁静载试验加载控制弯矩的新方法。基于成桥状态下设计车辆荷载及桥面铺装联合作用下的最大应变, 根据其最大应变值通过裸梁截面惯性矩反向计算确定控制弯矩。该方法充分考虑了裸梁至成桥施工及受力过程, 在桥梁施工过程中桥面铺装的恒载完全由裸梁承担, 成桥后营运过程中部分桥面铺装与梁体协调工作、形成受力整体, 共同承担设计车辆荷载。通过工程实例验证, 本方法可实现裸梁静载试验控制弯矩的精准化、试验控制的精细化。

**关键词:** 裸梁; 静载试验; 加载弯矩

**中图分类号:** U441.2

**文献标志码:** A

### Determining the control bending moment of the bare beam in static load test

HAO Tianzhi<sup>1</sup>, LIU Shiyuan<sup>2</sup>, MAO Zhigang<sup>1</sup>, XIE Kaizhong<sup>2</sup>

(1. Guangxi Transportation Research & Consulting Co., Ltd., Nanning City, Guangxi Autonomous Region, 530007; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, 530004)

**Abstract:** Because the existing method considers the loading control moment as a sum of the dead load on the bare beam before construction (mainly for bridge deck pavement) and the design vehicle load, the bearing capacity of the deck pavement is not considered, so the test result is not accurate. In this paper, a new method is proposed to determine the loading dominate moment of the bare beam static test. This method is based on the maximum strain with the combined effect of design vehicle loads and bridge deck pavement in the finished bridge state and the dominate moment is calculated reversely by the maximum strain through the second moment of area. This new approach has fully considered the construction and the process from the bare beam to the finished bridge state. The dead load of bridge deck pavement is borne entirely by the bare beam in the process of bridge construction, and a part of bridge deck pavement work with beam to form a stress whole to bear the design vehicle loads. The test results prove that the new method can achieve the precision of dominate moment and the refinement of test control in the bare beam static test.

**Key words:** bare beam, static load test, bending moment.

桥梁施工过程中为了评估裸梁的设计承载能力, 需进行最不利荷载作用下的裸梁静载试验, 并以此判断其实际承载能力。裸梁静载试验的关键是确定加载控制弯矩, 目前常用的方法是将作用于裸梁上

的恒载(主要为桥面铺装)和设计车辆荷载作为确定加载控制弯矩的依据<sup>[1-2]</sup>。此类方法均未考虑桥面铺装对桥梁承载力的影响。单梁荷载试验应联系成桥桥跨实际, 考虑和分析荷载的实际分布, 桥面

收稿日期: 2017-12-08

基金项目: 广西自然科学基金研究项目(2015GXNSFBA139229); 广西科技攻关项目(桂科攻1598009-1); 广西北部湾经济区科技园区创新创业人才培育项目(桂科计字[2015]245号-2); 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室开放基金(2016ZDK004)

作者简介: 郝天之(1980-), 男, 山东梁山人, 博士, 高级工程师, 主要从事桥梁试验检测与评估、健康监控及维修加固设计研究。

铺装不同程度参与结构受力使单梁荷载试验更具有针对性和准确性<sup>[3-4]</sup>。钱寅泉研究表明一般情况下约70%铺装层参与小箱梁共同受力<sup>[5]</sup>。王亚军等考虑混凝土现浇层的影响对截面对应的承载力进行换算,采用使结构产生相同应力的换算原则<sup>[6]</sup>。许国平研究表明,考虑桥面铺装参与主梁受力更加接近荷载试验的实测结果<sup>[7]</sup>;周勇军等的研究发现,约2/3的桥面铺装层参与了结构的整体受力<sup>[8]</sup>。针对上述问题,本文考虑了裸梁至成桥施工及受力过程,提出了一种基于应变确定加载控制弯矩的裸梁静载试验新方法。

## 1 裸梁静载试验控制弯矩计算方法

### 1.1 设计思路

以达到一定的荷载效率系数为目的,采用梁底应变等效的原则,确定在单梁(简称试验梁)上所需的试验荷载。据此得到公式:

$$M_{\text{等效}} = \frac{M_{\text{控}} y_1 I_2}{y_2 I_1} \quad (1)$$

式中  $I_1$ 、 $y_1$ 、 $M_{\text{控}}$  及  $I_2$ 、 $y_2$ 、 $M_{\text{等效}}$  分别为成桥梁及试验梁的惯性矩、中性轴距梁底距离及控制弯矩<sup>[9]</sup>。

按照应力等效原则和内力等效原则分别换算得到预制梁的试验跨中弯矩理论值,如下式:

$$\sigma_{\text{小}} + \sigma_{\text{大}} = \sigma_{\text{等效}} = \frac{M_y}{I} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{\text{小}}$  为第一阶段小梁的跨中底板应力;  $\sigma_{\text{大}}$  为第二阶段大梁的跨中底板应力;  $\sigma_{\text{等效}}$  为应力等效的跨中底板应力;  $M$  为应力等效换算的弯矩;  $y$  为预制梁中性轴距底板高度;  $I$  为预制梁跨中惯性矩<sup>[10]</sup>。

现行规范中,当混凝土桥面铺装与梁体结合较好,且桥面铺装的缺损标度小于3时,在检算中可以考虑混凝土桥面铺装扣除2 cm 磨损层后参与梁体的共同受力<sup>[11]</sup>。因此,二期铺装参与受力致使裸梁的结构抗力小于桥面铺装之后的结构抗力,当取设计活载作用下的弯矩  $M_h$  与二期恒载(二期桥面铺装重量)作用下的弯矩  $M_{eq}$  之和作为控制弯矩时,裸梁梁底的应变值大于成桥状态的下设计活载作用下的弯矩  $M_h$  与二期恒载作用下的弯矩  $M_{eq}$  之和引起的应变值,因此,以设计活载作用下的弯矩  $M_h$  与二期恒载作用下的弯矩  $M_{eq}$  之和作为裸梁荷载试验的控制弯矩是偏于不安全的,易造成加载资源的浪费及引起梁的破坏;为此,本文提出基于应变值确定

的裸梁荷载试验加载等效弯矩  $M_{dx}$  的控制方法。本方法基于成桥状态下设计车辆荷载及桥面铺装联合作用下的最大应变,根据其最大应变值通过裸梁截面惯性矩反向计算确定控制弯矩。其中,桥面铺装指钢筋混凝土桥面铺装或纤维钢筋混凝土桥面铺装,裸梁为钢裸梁或混凝土裸梁。

### 1.2 应变等效的裸梁静载试验控制弯矩推导

二期恒载(桥面铺装重量)全部由裸梁承担,桥面铺装引起的裸梁梁底应变为  $\varepsilon_{er}$ :

$$\varepsilon_{er} = \frac{M_{eq}}{E'I} y' \quad (3)$$

成桥后营运过程中在设计车辆荷载作用下,部分面铺装与梁体协调工作、形成受力整体,共同承担设计车辆荷载,成桥状态下,设计车辆荷载作用下梁底的应变为  $\varepsilon_h$ :

$$\varepsilon_h = \frac{M_h}{EI} \quad (4)$$

裸梁静载试验的控制荷载作用下的最大应变  $\varepsilon_l$ ,  $\varepsilon_l$  应为(3)和(4)两项应变之和,即:

$$\varepsilon_l = \varepsilon_{er} + \varepsilon_h \quad (5)$$

当裸梁梁底产生的应变为  $\varepsilon_l$  时,可求得所需施加的控制弯矩为  $M_{dx}$ :

$$\varepsilon_l = \frac{M_{dx}}{E'I} y' \quad (6)$$

将式(3)~(5)代入式(6),求解并化简后可得:

$$M_{dx} = \frac{E'I'}{EI} \frac{y}{y'} M_h + M_{eq} \quad (7)$$

式中:  $M_{dx}$ —等效弯矩,即裸梁梁底产生与桥梁铺装恒载、成桥设计荷载作用下产生数值相等应变的弯矩值;  $I$ —铺装完成后成桥状态下梁的惯性矩;  $E$ —铺装完成后成桥状态下梁的整体弹性模量;  $y$ —铺装完成后成桥状态下梁底距离中性轴的距离;  $M_h$ —设计活载作用下的弯矩;  $M_{eq}$ —二期恒载作用下的弯矩;  $I'$ —桥面铺装前裸梁的惯性矩;  $y'$ —桥面铺装前裸梁的弹性模量;  $E'$ —桥面铺装前梁底距离中性轴的距离。

## 2 新方法优点

考虑了桥梁铺装完成形成强度后与裸梁一起协调同受力、形成新的截面共同承担设计车辆荷载,更加科学、符合裸梁至成桥过程的实际受力情况。

裸梁上的恒载(主要为桥面铺装)及设计车辆

荷载内力效应之和作为静载控制弯矩，易造成试验加载弯矩大于裸梁梁体的应承担的弯矩值，即加载效率系数大于规范允许值，易引起裸梁的过大应变、位移甚至出现裂缝，造成静载试验失败、不安全。

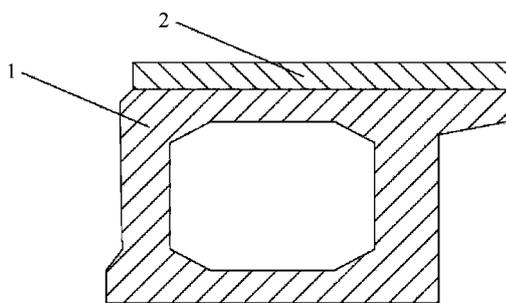
一定程度上降低了加载控制弯矩，在加载设备或配重上要求有所降低，因此节约加载物质、降低加载能源消耗。

实现了裸梁静载试验的精细化，尤其处于合格临界状态的裸梁结构，减少了对试验结果的误判。

### 3 工程实例

#### 3.1 工程概况

某上部结构采用宽 3 m，长 16 m 的预应力混凝土 C50 空心板，先简支后桥面连续，横向由 10 片空心板组成，梁高 0.80 m；下部结构采用柱式桥墩，桩基础；设计荷载等级：公路 -I 级（《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2004）；桥面总宽（半幅）：13.00 m=0.75 m（边防撞墙）+11.25 m（桥面净宽）+0.75 m（内侧防撞墙）+0.25 m（中央分隔带）。空心板截面受力见图 1 所示。拟对其边梁（裸梁）进行静载试验以确定其承载能力，需确定跨中静载加载控制弯矩值。



1 为裸梁 2 为桥面铺装

图 1 空心板截面受力图

Fig.1 Principle of force in hollow plate section

桥面铺装为 10 cm 厚 C50 现浇混凝土 +10 cm 厚沥青混凝土，现浇混凝土和沥青混凝土铺装层容重取值分别为 26 kN/m<sup>3</sup> 和 24 kN/m<sup>3</sup>。计入 C50 混凝土铺装对上构抗弯刚度的影响，但考虑施工质量、尺寸偏差等因素，10 cm 厚 C50 混凝土层对上构的抗弯刚度按 8 cm 计算。未计入上构刚度的 2.0 cm 厚 C50 混凝土铺装和 10 cm 厚沥青混凝土在计算时仅考虑其质量对结构的影响，计算时按每延米计入。有限元模型见图 2。

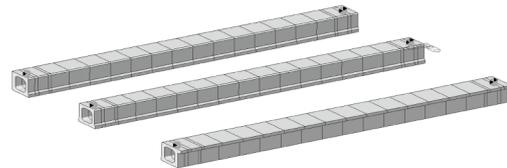


图 2 裸梁有限元 MIDAS 模型

Fig.2 Finite element MIDAS model of bare beam

根据式 (7)，本例各项取值为： $I=0.139 \text{ m}^4$ 、 $E=34.5 \text{ GPa}$ 、 $y=0.500 \text{ m}$ 、 $M_h=432.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $M_{eq}=183.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $I'=0.133 \text{ m}^4$ 、 $E'=34.5 \text{ GPa}$ 、 $y'=0.415 \text{ m}$ 。

#### 3.2 新方法与常规方法对比

根据本文提出的方法，依据式 (7) 计算确定静载试验加载控制弯矩与常规方法确定静载试验加载控制弯矩的试验结果，其对比见表 1。

由表 1 可知，由于常规方法确定裸梁加载控制弯矩的不科学，导致实际荷载加载不足，荷载加少了，实际的加载效率系数只有 0.903，得出的实验结论不具有说服力，缺乏可靠的依据。

### 4 结论

1) 本文提出在桥梁施工过程中桥面铺装的恒载完全由裸梁承担，成桥后营运过程中部分桥面铺装

表 1 本文介绍方法与常规方法计算确定静载试验加载控制弯矩结果比较

Tab.1 Compared with conventional method to determine the moment of load control of static load test

参数	本文提出方法	常规方法
静载试验加载控制弯矩理论值 $S/(\text{kN}\cdot\text{m})$	682.3	682.3
静载试验加载控制弯矩实测值 $S_o/(\text{kN}\cdot\text{m})$	682.3	616.2
实际加载效率系数 $\eta_q = S_o / S(1 + \mu)$	1.000	0.903
加载图式	加载方法：在跨中两侧 6 m 的范围内均匀加载重物 292.2 kN，堆载线密度为 48.7 kN/m，分四级加载；加载效率计算：冲击系数 $\mu$ 取为 0	加载方法：在跨中两侧 6 m 范围内均匀加载重物 263.8 kN，分四级加载；加载效率计算：冲击系数 $\mu$ 取为 0

- [4] 周政旭, 卢玉洁, 罗亚文. 贵州白水河地区布依聚落的“垵”及防御体系 [J]. 装饰, 2016(8): 98-100.
- [5] 甄新生. 水圩民居建筑攻防设计元素探究——以皖西杨小圩为例 [J]. 装饰, 2016(4): 132-133.
- [6] 袁君焯. 客家围屋军事防御艺术管窥 [J]. 西安建筑科技大学学报: 社会科学版, 2015, 34(4): 44-48.
- [7] 白天宜. 豫南山地传统民居中的防御性设计 [J]. 山西建筑, 2015, 41(19): 8-10.
- [8] 柳司航. 论湘西凤凰老洞苗寨的防御体系 [C]// 中国建筑学会建筑史学分会, 中国科学技术史学会建筑史专业委员会. 2014年中国建筑史学会年会暨学术研讨会论文集. 2014: 419-425.
- [9] 甄新生. 刘大圩古民居建筑防御性特征探究 [J]. 装饰, 2014(10): 129-130.
- [10] 林祖锐, 刘钊. 太行山区传统聚落“英谈古寨”防御体系探析 [J]. 中外建筑, 2014(3): 70-75.
- [11] 黄莉, 杨灿, 杨定海, 等. 海口美孝村古村落防御系统解读 [J]. 广东园林, 2017, 39(1): 16-21.
- [12] 李建华, 杨健, 李建柱. 西南碉寨的空间立体防御体系及其聚落形态试析 [J]. 建筑学报, 2011(11): 21-24.
- [13] 陈渊. 巴渝地区合院民居及其防御特色研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [14] 刘新德, 杨紫嘉, 伍国正. 湖南古村落的物质安全防御研究 [J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(2): 5-9.
- [15] 杨永红. 西藏民居建筑的军事防御风格 [J]. 西藏研究, 2006(1): 79-82.
- [16] 李军环, 夏勇, 张燕. 防御性聚落民居·色尔古藏寨 [J]. 建筑与文化, 2016(11): 214-216.
- [17] 袁彦廷. 冀南武安清末民初大院民居研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [18] 申玲. 文化产业化建设背景下文化遗产传承的空间策略 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2016.
- [19] 杨红. 基于旅游开发理念的伯延古镇保护与传承研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2010.
- [20] 熊红彦, 杨红, 张志芳. 古镇的保护与旅游开发——以河北省武安市伯延古镇为例 [J]. 河北工程大学学报: 社会科学版, 2009, 26(3): 9-11.
- [21] 魏柳郁. 冀南伯延民居建筑与民俗文化探究 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2009.
- [22] 谢空, 谷健辉. 冀南伯延镇传统民居特色及发展保护研究 [J]. 小城镇建设, 2006(4): 85-89.
- [23] 张午时, 张茂生, 李栓庆. 武安县志校注(民国卷) [M]. 邯郸: 武安历史文化研究会, 2009.

(责任编辑 王利君)

(上接第88页)与梁体协调工作、形成受力整体, 共同承担设计车辆荷载。

2) 根据裸梁至成桥阶段受力截面特性的变化, 考虑成桥阶段最大的应变反应, 结合最大应变等效的原则, 推导、建立了控制弯矩的计算公式

$$M_{dx} = \frac{EI'}{EI} \frac{y}{y'} M_h + M_{eq},$$

可以用来指导确定今后裸

梁荷载试验的加载控制弯矩。

3) 基于实例, 验证了本文受力分析的过程和确定加载弯的正确性。因此, 基于桥梁静载试验的重要观测应变指标确定静载试验加载控制弯矩, 使结果更具科学性; 同时可防止裸梁产生过大应变、甚至出现裂缝, 使加载方式更加经济和安全。或因控制弯矩加载不足, 致使裸梁静载试验结果不具说服力。

#### 参考文献:

- [1] 张彦斌, 张宏祥. 预应力混凝土空心板单梁静载试验分析 [J]. 低温建筑技术, 2012, 3(165): 72-74.
- [2] 李海冬. 预制空心板体系梁桥受力性能试验研究 [D].

哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

- [3] 陈毅. 单梁荷载试验中值得商榷的几个问题 [J]. 建筑监督检测与造价, 2014, 7(4): 53-56.
- [4] 吕大伟, 袁卓亚, 石雄伟, 等. 中小跨径梁桥试验荷载效率 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(6): 59-67.
- [5] 钱寅泉, 周正茂, 袁桂芳, 等. 桥面铺装与小箱梁的共同作用试验 [J]. 公路交通科技, 2012, 29(2): 82-86.
- [6] 王亚军, 于坤, 蔡仕强. 公路预应力空心板梁桥单梁试验及评定 [J]. 桥梁建设, 2011(5): 36-39.
- [7] 许国平. 空心板桥桥面铺装对主梁受力性能影响分析 [J]. 公路工程, 2012, 37(3): 111-115.
- [8] 周勇军, 田俊, 蒋姣, 等. 铺装层工作机理的模型试验分析 [J]. 公路交通科技, 2012, 8(92): 294-297.
- [9] 马云锋, 陈军生. 桥梁单梁静载试验 [J]. 中外公路, 2006, 26(3): 184-187.
- [10] 周叶飞, 曾明杰. 预制小箱梁单梁静载试验及承载能力评定分析 [J]. 中外公路, 2015, 35(2): 142-146.
- [11] JTG/T J21-2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程 [S].

(责任编辑 王利君)