

桥梁结构静荷载实验的物理与虚拟仿真研究

林云, 章伟, 丁勇*

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 桥梁仿真实验是研究桥梁结构性能的重要手段, 其中的对静载实验仿真是评价桥梁质量和评估实际承载力的有效方法. 采用 1:25 的精细化车辆模型与有机玻璃桥梁缩尺模型对实际桥梁的静载实验进行了物理与虚拟仿真, 其中, 虚拟仿真采用 MIDAS 有限元软件分析, 而物理仿真采用缩尺模型实验研究. 将物理仿真与虚拟仿真实验结果进行比较, 发现两者基本一致, 验证了此种方法的精确性与有效性.

关键词: 有机玻璃模型; 物理仿真; 虚拟仿真; 桥梁工程; 实验教学

中图分类号: U446.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 01-0102-05

虚拟仿真是指不用具体的硬件平台或者不具备可供实验的构件, 用一个系统模仿另一个真实系统的技术, 可用于桥梁的前期论证规划或后期效果的演示、桥梁的可视化设计分析以及桥梁的施工管理、培训等方面^[1]. 物理仿真是以物理性质和几何形状相似为基础, 而其他性质不变的仿真. 而桥梁模型实验作为结构研究的一种重要手段, 随着桥梁建设的发展, 特别是近十几年更是方兴未艾^[2-5]. 其中利用有机玻璃作为桥梁实验模型的材料十分简便、经济有效^[6]. 张俊平等^[7]在 2001 年进行了展翅梁有机玻璃全桥模型实验, Vladimir 等^[8]对有机玻璃桥梁模型进行了分子动力模拟. 2000 年, Verbraeck 等^[9]研究了桥梁虚拟模型与物理模型之间的联系. 2001 年, 安群慧和刘自明设计制作了荆州长江大桥(斜拉桥)1:30 的整体模型, 分析了该桥主梁应力水平、应力分布状况以及其整体非线性行为^[10]. 赵信海等^[11]对钢筋混凝土预应力梁桥进行了静载实验, 并运用 MIDAS 进行了虚拟仿真分析. 2006 年, 张在铭对浦上大桥主桥进行了 1:40 几何缩尺的有机玻璃模型实验^[12]. 2007 年, 胡建华等^[13]通过世界首座独塔单跨悬吊钢混结合梁的自锚式悬索桥的 1:20 的整体模型验证这种新型桥梁的设

计理论.

笔者采用精细化的车辆模型对 T 梁桥有机玻璃结构模型进行了物理仿真加载, 并运用 MIDAS 有限元软件对桥梁模型静载实验进行虚拟仿真分析.

1 物理仿真模型设计

按 1:25 的几何缩尺进行设计制作了桥梁有机玻璃模型, 同时购置了 1:25 的精细化载重车辆模型, 实验用桥为等宽度有机玻璃简支 T 型梁桥, 桥全长 80 cm, 跨径为 76 cm. 桥宽 40 cm, 梁高度为 5.5 cm. 桥梁模型构造如图 1 所示.

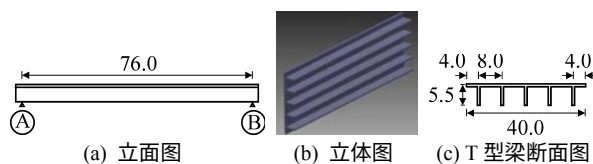


图 1 模型桥的构造(单位: cm)

1.1 模型桥梁设计技术标准

(1) 设计荷载: 考虑到有机玻璃强度较低, 为保证有机玻璃处于弹性变形状态, 取设计荷载为公路-I 级荷载的 9.3%; 再计入 1:25 的模型缩尺比例, 由力学理论及相似理论可得均布荷载缩小到

收稿日期: 2014-06-30.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journallg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y1110548); 上海市工程结构新技术重点实验室开放课题(2013-KF06); 宁波大学教研项目(201032); 宁波大学科研项目(XYL13011).

第一作者: 林云(1966-), 男, 福建莆田人, 实验师, 主要研究方向: 结构工程. E-mail: linyun1@nbu.edu.cn

*通信作者: 丁勇(1975-), 男, 浙江余姚人, 博士/副教授, 主要研究方向: 桥梁工程. E-mail: dingyong@nbu.edu.cn

原来的 $1/625$, 集中荷载缩小到原来的 $1/25$, 则分别得到均布设计荷载为公路-I 级荷载的 0.015% , 集中设计荷载为公路-I 级荷载的 0.372% .

(2) 横断面布置: 40 cm 宽车道.

1.2 荷载实验的目的

(1) 检验桥梁结构受力性能是否达到设计及规范要求; (2) 通过荷载实验建立桥梁初始技术档案.

1.3 实验内容

根据该桥实验的主要目的, 进行模型桥静载实验(图 2), 检验结构承载能力和刚度性能.



图 2 实验现场

2 桥梁静载物理仿真实验

静载实验主要通过测量桥梁结构在静力实验荷载作用下的变形和应力, 确定结构的实际工作状态与设计期望值是否相符, 以及结构强度、刚度是否满足规范要求.

2.1 静力实验荷载确定原则

静力实验荷载采用三轴载重汽车充当, 实验车的轴距尺寸如图 3 所示, 车辆各参数见表 1, 其中两车轮距都为 8.8 cm. 就加载实验项目而言, 所需加载车辆的数量将根据设计标准活荷载产生该加载实验项目对应的控制截面应力或变位的最不利效应值, 并参照有关规范规定, 按下式所确定的原则进行等效换算:

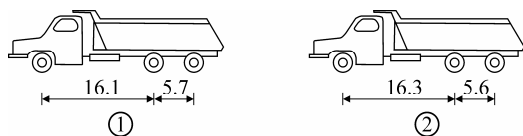


图 3 实验重车轴距布置示意图(单位: cm)

$$0.95 \leq \eta = \frac{S_{\text{state}}}{(1 + \mu) \cdot s} \leq 1.05,$$

式中: η 为静力实验荷载效率, 一般情况下尽量接近 1.0; S_{state} 为实验荷载作用下, 某加载实验项目对应的控制截面内力或变位的最大计算效应值; s

为设计标准活载不计冲击荷载作用时, 产生的该加载实验项目对应的控制截面内力或变位的最不利计算效应值; $1 + \mu$ 为设计计算取用的冲击系数. 通过理论计算, 桥梁模型一阶自振频率为 15.6 Hz, 由于一阶自振频率 > 14 Hz, 根据设计荷载规范, 取冲击系数 $\mu = 0.45$.

表 1 实际实验车辆参数

车辆名称	轴重/N	
	前轴	中轴+后轴
①号车(欧曼昆仑)	13.6	26+24
②号车(重汽青专)	15.3	25+23

2.2 加载工况和实验内容

根据《公路工程质量检验评定标准, 第一册(土建工程)》(JTG F80/1-2004), 拟选取模型桥梁的以下工况作为静载实验的内容: (1) I 截面 1 号梁支点剪力; (2) II 截面 1 号梁正弯矩. 截面位置与实验工况如图 4 所示, 各工况测试内容见表 2.

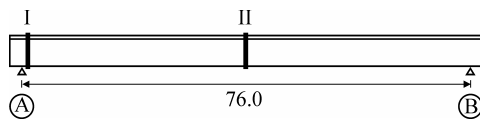


图 4 桥梁静载实验测试截面(单位: cm)

表 2 静载实验工况及测试内容

工况及描述	测试内容	
	应变	变形
I: 1 号梁支座最大剪力	截面剪应力	跨中截面挠度
II: 1 号梁最大正弯矩	跨中截面正应力	跨中截面挠度

2.3 观测方法与所用仪器

(1) 应变测试: 应变采用应变片进行测量, 测量精度为 $1 \mu\epsilon$. (2) 变形测试: 对于跨中截面的下挠及支座沉降, 均采用机电百分表进行测量, 测量精度为 0.01 mm.

2.4 测点布置

(1) 应变测量. 各控制截面的主要应变测点布置如图 5 所示, 底板粘贴混凝土电阻应变片, 支点位置腹板粘贴混凝土应变花. 电阻应变片的应变读数采用电阻应变仪, 混凝土应变片规格为 BX 120-2AA 胶基片, 电阻值为 120Ω , 实验时配静态应变测量系统.

(2) 挠度测量. 挠度测点所在断面如图 6 所示, 测点布置在 D1、D2、D3 断面上, 其中, D1 和 D3

测量支座处的沉降,而挠度测试采用百分表。

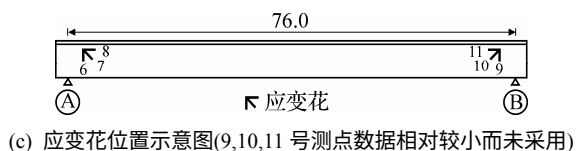
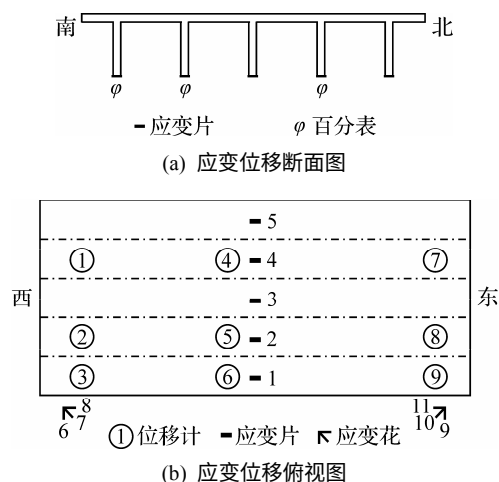


图5 应变位移测点布置图(单位: cm)

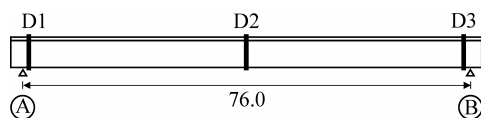


图6 控制截面挠度测点布置示意(单位: cm)

2.5 加载原则

(1)尽可能用最少的加载车辆达到最大的实验荷载效率。(2)在满足实验荷载效率以及能够达到实验目的的前提下,加载工况应进行简化、合并,尽量减少布置次数。(3)每个加载工况以某个测试项目为主,兼顾其他实验目的。(4)为了解桥梁结构应变和变位随加载内力增加的变化规律,并防止意外损坏,实验荷载采用分级加载方式,每个工况原则上分三级加载,通过车辆数量及车辆位置来控制等级。在每个测试工况加载实验中,为单次逐级递加到最大荷载,然后卸载到零荷载。

3 桥梁虚拟仿真实验

3.1 各控制截面的内力影响线

通过 MIDAS 有限元分析软件计算,得到各控制截面的内力、位移影响线。结构计算模型采用梁格法模型(图 7),车道荷载冲击系数依据有限元理论算得的一阶自振频率(64 Hz)来确定,控制截面的内力影响线如图 8 所示。

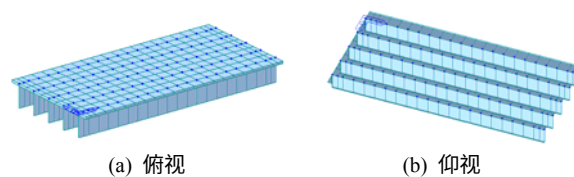


图7 模拟桥梁计算模型

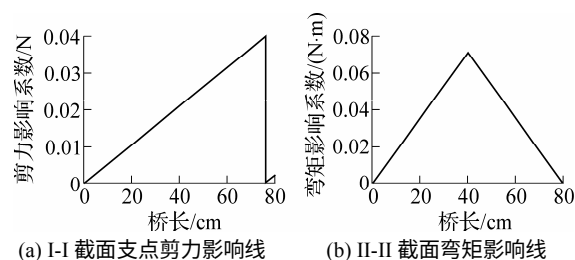


图8 控制截面的内力影响线

在影响线计算基础上进行设计控制内力的计算,活载采用按实际模型极限抗拉强度对应的设计荷载。在控制内力(位移)计算时按规范规定计入汽车的冲击系数,模拟桥梁考虑冲击系数 $\mu = 0.45$ 。将上述各控制截面的控制内力、控制位移计算的结果数据见表 3。

表3 设计活载、分级加载内力控制值

实验截面	工况	设计荷载	理论分级加载内力值		
		公路 I 级	一级	二级	三级
I-I 截面 剪力/N	I	57.2	32.1	45.2	55.1
II-II 截面 弯矩/(N·mm)	II	6 861	4 758	5 626	6 967

3.2 实验加载图式

I 截面和 I 截面的分级加载效率见表 4,而 I 截面 1 号梁支点剪力与 II 截面 1 号梁跨中正弯矩的实验加载情况如图 9 所示。

表4 I、II 工况分级加载效率

项目	I 截面(工况 I)			II 截面(工况 II)		
	一级	二级	三级	一级	二级	三级
加载效率	0.56	0.79	0.96	0.68	0.82	1.02

4 物理仿真与虚拟仿真实验结果比较

表 5 是工况 I 荷载作用下的实测结果与理论结果对比,表 6 和表 7 为工况 II (II 截面 1 号梁跨中正弯矩实验工况)荷载作用下的实测与理论结果对比。根据结构实测结果,可得到如下几点结论: (1)跨中梁底挠度和应变效应系数都小于 1.0,即板梁

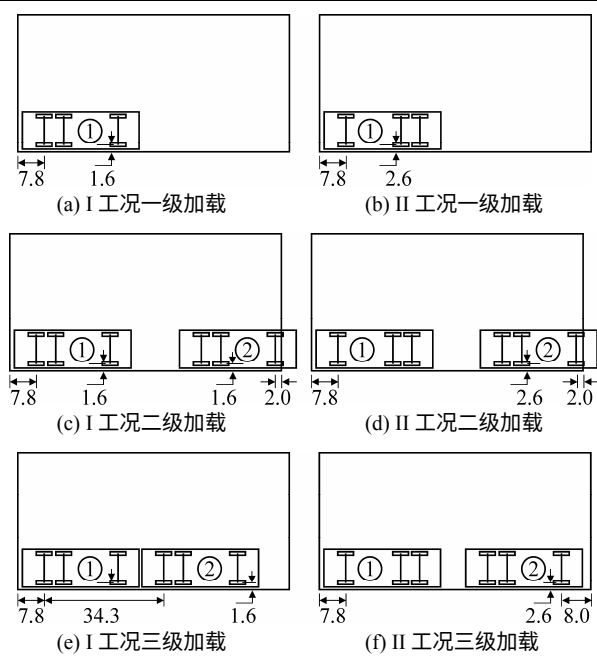


图 9 I、II 加载示意图(单位: cm)

理论挠度大于实测挠度; (2)板梁的挠度和应变残余变形都小于 20%, 卸载后能恢复原状; (3)支点剪应力检验系数小于 1.0, 即板梁的理论应变大于实测应变值; (4)支点相对残余剪应力小于 20%, 即板梁卸载后能立即恢复原状, 塑性变形小. 板梁抗剪满足设计要求, 并有较大的安全储备. (5)板梁结构最大挠度小于桥跨的 1/600 (1.33 mm).

表 5 中的剪应力由 45° 直角应变花计算最大剪应力公式得到:

$$B = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{90}}{2}, C = \frac{2\epsilon_{45} - \epsilon_0 - \epsilon_{90}}{2},$$

表 5 1 号梁支座处实测应变、残余应变与理论应变(应变测点)

实验 工况	测点 号	第一级荷载 实测应变/ $\mu\epsilon$	第二级荷载 实测应变/ $\mu\epsilon$	第三级荷载 实测应变/ $\mu\epsilon$	残余应 变/ $\mu\epsilon$	最大弹性 应变	最大剪应 力/MPa	最大剪应力 理论值/MPa	校验 系数	相对残 余应变/%
I	6#	0	65	62	1	61				1.6
	7#	124	233	268	5	263	0.311	0.407	0.76	1.9
	8#	23	102	111	2	109				1.8

表 6 1 号梁跨中实测挠度、残余挠度与理论挠度(挠度测点)

实验 工况	测点号	第一级 荷载/mm	第二级 荷载/mm	第三级 荷载/mm	卸载/mm	弹性挠度/ mm	相对残余 挠度/%	理论挠度/ mm	校验 系数
工况 II	6#	0.56	0.68	0.84	0.01	0.83	1.2	1.36	0.61

表 7 1 号梁跨中实测应变、残余应变与理论应变(应变测点)

实验 工况	测点 号	第一级荷载 实测应变/ $\mu\epsilon$	第二级荷载 实测应变/ $\mu\epsilon$	第三级荷载 实测应变/ $\mu\epsilon$	残余应 变/ $\mu\epsilon$	弹性 应变/ $\mu\epsilon$	相对残余 应变/%	理论应 变/ $\mu\epsilon$	校验 系数
工况 II	1#	471	568	706	10	696	1.4	931	0.75

$$\tau_{\max} = \frac{E}{1 + \nu} \sqrt{B^2 + C^2},$$

其中, $\nu = 0.2, E = 2.04 \text{ GPa}$.

5 结论

用精细化的车辆模型对 T 梁桥有机玻璃结构模型进行物理仿真加载, 并运用 MIDAS 有限元软件对桥梁模型静载实验进行虚拟仿真分析, 将物理仿真实验结果与虚拟仿真实验结果进行比较, 得出以下结论:

- (1) 物理仿真实验前对桥跨进行了桥梁外观检查, 支座、梁板等结构正常; 实验中支座处剪力和跨中正弯矩工况的加载效率为 $\eta = 0.96 \sim 1.05$, 满足规范规定的加载要求; 实验数据表明有机玻璃桥梁模型结构强度与刚度也满足规范要求.
- (2) 物理仿真实验与实际桥梁实验相比较, 具有如下优点: 经济性好, 模型制作简单、装拆方便, 节省材料、降低劳力、模型可重复使用; 针对性强, 物理仿真实验能够根据实验目的简化次要因素, 突出主要的因素; 结果准确及开展方便, 由于实验模型小而精细, 可以在室内进行, 受外界环境干扰小, 从而保证了实验结果的准确度.
- (3) 从物理仿真与虚拟仿真实验结果对比可以看出, 这种基本一致的结果表明物理仿真与虚拟仿真都能准确地模拟出实际桥梁的受力与变形情况, 有着较高的精确性与有效性. 通过这种仿真实验能满足桥梁工程科研与实验教学要求, 有效

提高实验教学水平,且物理仿真与虚拟仿真互为补充,将两者紧密结合才能有效推动桥梁工程科研与实验教学的不断发展.

参考文献:

- [1] 刘蕾, 鲍小龙, 牛超然. 虚拟现实技术在桥梁工程中的应用[J]. 市政技术, 2010, 28(3):79-81.
- [2] 湖南大学, 太原工业大学. 建筑结构实验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004:105-188.
- [3] 余山雾, 蔡敏. 结构模型实验的工程检测应用研究[J]. 安徽建筑工业学院学报, 2009, 17(5):17-21.
- [4] 刘自明. 桥梁结构模型实验研究[J]. 桥梁建设, 1999 (4):1-7.
- [5] 安新正, 孟闻远, 李秋英. 试析实验教学在高校土木工程专业中的重要作用[J]. 河北建筑科技学院学报, 2004, 21(2):85-86.
- [6] 周义武. 桥梁有机玻璃模型实验的几个技术问题[J]. 中南公路工程, 1985(1):57-64.
- [7] 张俊平, 梅力彪, 蔡卡宏. 展翅梁结构有机玻璃模型实验研究[J]. 广州大学学报, 2001, 15(2):65-70.
- [8] Vladimir A, Klüppel M F, Raos G. Molecular dynamics simulation of rupture in glassy polymer bridges within filler aggregates[J]. Physical Review E, 2012, 86(4): 41801-41810.
- [9] Verbraeck A, Versteegt C. A bridge between the design and implementation of complex transportation systems: Linking simulation models and physical models[A]. European Simulation Symposium, 2000:238-243.
- [10] 安群慧, 刘自明. 荆州长江公路桥整体模型实验的研究[J]. 桥梁建设, 2002(2):15-18.
- [11] 赵信海, 杨善武. 钢筋混凝土预应力梁桥静载实验及仿真分析[J]. 工程与建设, 2006, 20(5):428-432.
- [12] 张在铭. 部分斜拉桥有机玻璃模型实验综述[J]. 福建建设科技, 2006(3):28-29.
- [13] 胡建华, 沈锐利, 张贵明. 佛山平胜大桥全桥模型实验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(5):17-25.

Physical Simulation and Virtual Reality of Static Loading Experiment of Bridge Structures

LIN Yun, ZHANG Wei, DING Yong^{*}

(Faculty of Architectural Engineering, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Simulated experiment of bridge is an important means to study the performance of bridge structures, in which simulation of static loading experiment is an effective method to evaluate quality of bridge and assess bearing capacity of bridge. The study utilizes fine vehicle model and plexiglass model of bridge with the same geometric reduced scale of 1:25 to conduct physical simulation and virtual reality of the actual bridge static loading experiment. In the process, the virtual reality utilizes finite element software, MIDAS, for analysis and the scale model experiment is used to study the physical simulation. The results of physical simulation and virtual reality are compared and found that the both are significantly similar. It is concluded that the physical simulation and virtual reality complement each other and play an important role in research and teaching of bridge engineering.

Key words: plexiglass model; physical simulation; virtual reality; bridge engineering; experiment teaching

(责任编辑 章践立)