

基于抗弯刚度和柔度曲率的小比例 U形梁模型损伤识别

周奎, 刘义, 缪润翰, 陶野

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 依据模型试验的相似理论设计出合理的 U 形梁试验模型, 分别以抗弯刚度和柔度曲率为识别参数, 进行短期荷载下的静力试验和环境激励下的动力特性试验, 对试验结果进行了对比分析, 完成对该模型实例梁的结构性能评价, 为今后 U 形梁质量的检测和健康监测提供了参考和借鉴。

关键词: 抗弯刚度; 柔度曲率; U 形梁模型; 损伤识别

中图分类号: TV332.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0189-04

Damage identification of small-scale U-beam model based on flexural rigidity and flexibility curvature

ZHOU Kui, LIU Yi, MIAO Runhan, TAO Ye

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: According to the similar theory of model test, the paper designed a reasonable U-beam test model and took flexural rigidity and flexibility curvature as identification parameters. Through the static test under short-term loads and the dynamic characteristics test under environmental incentive, it comprehensively comparatively analyzed the test result and completed the evaluation of structural performance of the model beam. The result can provide a reference for the test and health monitor of U-beam quality in the future.

Key words: flexural rigidity; flexibility curvature; U-beam model; damage identification

城市轨道交通 U 形梁是槽形梁在城市轨道交通中演化的一种新产物。国内 U 形梁概念的首次引入是在 2007 年, 上海轨道交通 8 号线引进了法国 Systra 公司的后张法单线槽形梁, 因外形酷似英文字母“U”而被称为 U 形梁。U 形梁虽然具有建筑高度低、降噪效果好、断面利用率高等优点^[1-2], 但 U 形梁属于开口薄壁构件, 其抗扭性能比较弱, 再加上采用比较薄的底板结构, 跨中截面极易产生裂缝损伤, 其损伤会给整个结构的安全性、可靠性以及承载能力带来很大影响, 损伤积累甚至会导致整个结构的倒塌。

目前 U 形梁在国内轨道交通工程中应用较少, 尚无成熟、系统的损伤识别经验。本文对 U 形梁进行了小比例模型试验, 分别采用基于抗弯刚度的静

力实测数据和基于柔度曲率的动力实测响应, 完成了对该小比例 U 形梁模型的结构性能评价, 通过分析总结形成 U 形梁的损伤识别理论, 为今后 U 形梁质量的检测和健康监测提供参考和借鉴。

1 研究方法

鉴于静力测试和动力测试各自的优点与不足之处, 本文结合静力和动力测试的数据, 运用相应的识别方法来识别结构损伤再综合对比分析, 探讨了 U 形梁是否损伤、损伤位置、损伤程度等 3 个问题。

基于结构静力试验数据的损伤识别主要采用系统识别(SI)方法, 选取梁截面抗弯刚度作为结构待识别参数, 已知荷载作用下载面位移作为已知响应, 进行梁分段截面抗弯刚度的系统识别, 得到梁分段

截面抗弯刚度识别值,通过与结构在完好状态下截面抗弯刚度的计算值比较来反映结构的损伤状况^[3-5]。

对基于 U 形梁模型的动力试验激励结果,采用柔度曲率法^[6-8]进行损伤识别。利用模态数据,得到损伤结构的柔度矩阵为:

$$f_{i,j} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{m_k \omega_k^2} \varphi_k(i) \varphi_k(j)$$

柔度 $f_{i,j}$ 表明在自由度 j 点处作用单位力时 i 点的柔度。对每个自由度 j ,令 f_i 代表柔度矩阵第 j 列中所有元素的最大绝对值,即:

$$f_i = \max_i |f_{i,j}|$$

在结构损伤点附近的柔度相对来说有较大的改变,变化的程度可以通过坐标位置的一阶导数(斜率)、二阶导数(曲率)求得柔度差值 F_{Δ} 的曲率来确定。损伤结构柔度的斜率和曲率可以分别表示为:

$$\delta F_j' = \frac{f_j - f_{j-1}}{h}$$
$$\delta F_j'' = \frac{f_{j+1} - 2f_j + f_{j-1}}{h^2}$$

式中: h 为相邻节点间距离。将损伤结构柔度的曲率随单元(节点 j)的变化曲线绘出,当结构出现损伤时,对应位置的柔度曲率会产生突变,从而识别出损伤位置。

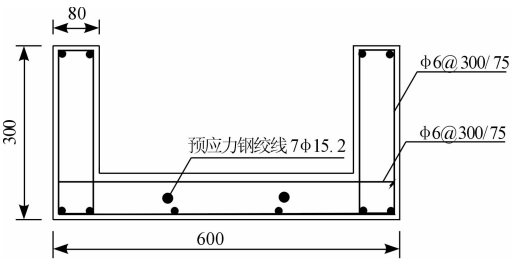


图1 试验构件截面尺寸及配筋

2 试验设计

2.1 模型设计

试验原型结构是标准跨径 30 m 的单线单槽的预应力 U 形梁结构,单根梁宽度 5.224 m,梁高 1.80 m,弧形腹板。本文研究的预应力 U 形简支梁模型根据相似原理^[9-10]进行设计,采用强度等级 C40 的混凝土,模型跨径 $L = 3$ m,腹板、底板厚度均取 80 mm,纵向非预应力钢筋采用 HPB300 级钢,直径为 6 mm,预应力钢绞线采用 7 Φ 15.2。梁的截面几何尺寸以及截面配筋如图 1 所示,U 形梁模型如图 2 所示。

2.2 试验方法设计

静力加载方案采用反力架千斤顶分级加载,动力特性试验采用环境激励。简支梁支座通过小型圆钢和等边角钢模拟实现。

本次静力试验主要是测试抗弯试验下的竖向变形,挠度测点分别为跨中和各等分点,同时,为了分析试验误差以及对支座属性的验算,在左右支座附近各布置一个位移计测点,荷载采用三等分点等效集中力加载方式,该 U 形梁静载试验布置图 3。实测动力试验在 U 形梁跨长方向等间距布置 6 个加速度传感器,通过环境激励得到相应的动力响应值。



图2 U形梁模型



图3 梁静载试验布置图

3 试验结果与分析

3.1 静力试验结果和分析

其荷载分级(工况)及挠度测试的计算结果列于表 1 中。

根据刚度系统识别理论,整片梁分为 5 个截面抗弯刚度识别段,每段长度均为 0.6 m,识别模型见图 4。通过刚度识别原理计算得出各荷载工况下的梁分段抗弯刚度识别结果,见表 2。其计算识别抗弯刚度-荷载关系如图 5 所示,识别刚度-截面位置曲线如图 6 所示。

表1 各测点挠度测试修正后的结果

荷载 /kN		位移/mm				
		左支 座 0	四分跨 L/4	跨中 L/2	右三分跨 2L/3	右支 座 L
5	测试计算结果	0.013	0.253	0.364	0.312	0.008
	扣除支点沉降	0	0.241	0.353	0.302	0
10	测试计算结果	0.027	0.474	0.696	0.633	0.018
	扣除支点沉降	0	0.454	0.674	0.614	0
15	测试计算结果	0.042	0.720	1.076	0.941	0.031
	扣除支点沉降	0	0.698	1.038	0.907	0
20	测试计算结果	0.063	1.049	1.853	1.289	0.060
	扣除支点沉降	0	0.988	1.797	1.228	0

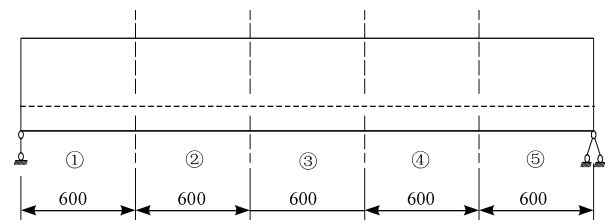


图 4 识别模型

运用《公路钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土桥涵设计规范 JTG D62 - 2004》算得该 U 形梁的理论计算刚度为 $5.87 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ 。

表 2 U 形梁分段刚度识别结果					
荷载等级/ kN	识别刚度 / $10^{12} (\text{N} \cdot \text{mm}^2)$				
	梁段①	梁段②	梁段③	梁段④	梁段⑤
5	5.78	5.64	5.71	5.73	5.81
10	5.73	5.58	5.69	5.70	5.80
15	5.74	5.60	5.63	5.69	5.77
20	5.64	5.36	5.42	5.68	5.78

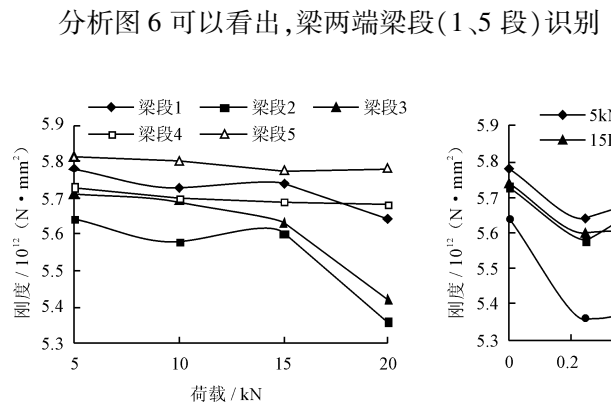


图 5 识别抗弯刚度 - 荷载关系

分析图 6 可以看出,梁两端梁段(1、5 段)识别

分析图 7 前四阶柔度曲率曲线,可以看出:①U 形梁结构前四阶柔度曲率曲线的整体趋势是接近的,对于四阶柔度曲率值,其总体上比前三阶的柔度曲率值要略低一点;②靠近左边三等分跨位置,其负峰值是梁跨长方向最大的,因此判定其具有明显的损伤,这与静力实测结果一致。另外,柔度曲率曲线除了在损伤处有明显突变外,在其它地方也有小的突变,因此,在小损伤的情况下会造成识别误差。

柔度曲率曲线上非损伤处产生小突变的原因有以下几点:①梁在制作过程中混凝土浇筑振捣不均匀,或其他试验误差所造成;②动力响应值受到噪声等环境因素的影响,从而影响了其测量精度;③根据文献[8],对简支梁而言,2 阶以上模态数据可能会引起柔度曲率产生小的突变,从而造成识别误差。

的刚度值大于中间梁段(2、3、4 段)的识别刚度值,这与跨中部位受较大的弯矩(梁段均值)、支座梁段受较小的弯矩一致。另外,结合图 5 和图 6 可以看出,当荷载值达到 20 kN 时,位于左边三等分跨位置的刚度识别值有明显的下降段,且远低于理论计算刚度值,可以认为该处存在损伤,从而降低了截面刚度;未损伤部位的刚度识别值略低于理论计算刚度值,可能是因为试验误差,但不影响对损伤结果的判断。

实际上,该试验梁的预埋吊钩就位于三等分跨,在浇筑混凝土初期,该吊钩处混凝土就因为难于搅拌而出现大面积裂缝和蜂窝现象;而在拆模板后的首次起吊时,该三等分跨处吊钩结合部混凝土有大量碎块溢出,出现主梁的局部大面积损伤。为了验证刚度实测法对于此处的损伤识别的正确与否,需要进一步结合动力损伤分析。

3.2 动力实测响应结果和分析

实测动力试验在 U 形梁跨长方向等间距布置 6 个传感器,通过环境激励得到相应的动力响应值,并将采集得到的数据进行处理并拟合,得到相应的前四阶比例柔度曲率曲线如图 7 所示。

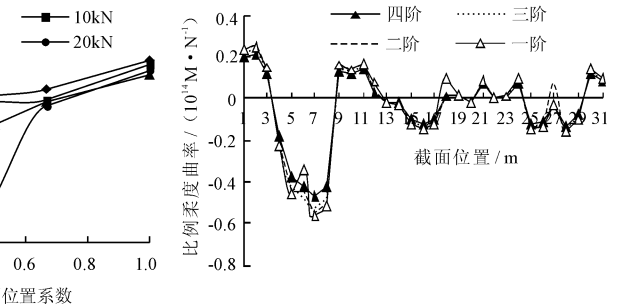


图 6 识别刚度 - 截面位置曲线

3.3 识别结果对比分析

结合静力实测的识别结果(图 6)和动力实测的识别结果(图 7),可以看出,基于刚度系统识别法的静力试验和基于柔度曲率识别法的动力试验,其测试识别位置是近似的,均为左三分跨部位。而实际上,该 U 形梁由于制作和起吊等原因,在左三分跨部位存在明显的损伤。因此,根据本文的结构损伤识别理论,均可以准确地识别出损伤位置,而对于损伤程度,则可以采用抗弯刚度下降的比值作为度量。

另外,虽然柔度曲率法可以避免使用结构无损条件下的模态参数,且需要低阶模态信息即可识别出结构损伤的位置,并能定性的反映损伤程度,但从本文试验结果来看,基于柔度曲率法的动力试验容易受到多种因素影响从而造成识别误差,而基于抗

弯刚度的静力识别试验具有较高的稳定性和精度,但试验条件要求较高。结合静力和动力识别数据可以增加识别结果的可信度。

4 结 语

本文结合静力试验识别结果和动力试验识别结果,对比分析各自的优缺点,完成了对该小比例 U 模型的结构性能评价,可得出以下结论:

(1)基于抗弯刚度和柔度曲率的损伤识别方法均能实现对 U 形梁的损伤识别,且识别结果基本一致。

(2)从动力实测结果来看,柔度曲率曲线除了在损伤处有明显突变外,在其它地方也有小的突变,说明基于柔度曲率的动力试验识别结果容易受到多种因素影响从而影响识别精度,在小损伤的情况下可能会造成识别误差。

(3)运用动静力测试数据对损伤识别精度的提高不很明显,结合动静力测试数据可增加对该 U 形梁识别结果的可信度。

参考文献:

- [1] 苏建华. 地铁 U 型梁的静载破坏试验分析[J]. 特种结构, 2008, 25(3): 84-86.
- [2] 庄严. 城市轨道交通 U 型梁静载试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [3] 邓苗毅. 基于静载试验的梁桥结构损伤系统识别研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2003.
- [4] 崔飞, 袁万城, 史家钧. 基于静态应变及位移测量的结构损伤识别法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2000, 28(1): 5-8.
- [5] 蒋华. 基于静力测试数据的桥梁结构损伤识别与评定理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [6] 王玉珏. 基于柔度法的损伤识别研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [7] 陈立. 基于柔度曲率矩阵的结构损伤识别研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [8] 唐小兵, 沈成武, 陈定方. 结构损伤识别的柔度曲率法[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(8): 18-20.
- [9] 马永欣, 郑山锁. 结构实验[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] 胡锡勇, 卢文胜, 沈伟明. 预应力混凝土简支梁小比例结构模型相似关系[J]. 结构工程师, 2011, 27(1): 110-117.

(上接第 188 页)

约,该系统的水下探测精度还有待提高,如在探测宽度比较小的裂缝(厘米以下级别)方面存在不足;同时该系统只能探测工程表面情况而对工程内部结构和隐患(如坝内渗流、混凝土内部质量缺陷等)的探测存在不足。

参考文献:

- [1] 叶舟. 水库安全管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [2] 戴林军, 郝晓伟, 吴静, 等. 基于三维成像声纳技术的水下结构探测新方法[J]. 浙江水利科技, 2013, 41(3): 62-65.
- [3] 赵建虎, 王爱学, 郭军. 多波束与侧扫声呐图像区块信息融合方法研究[J]. 武汉大学学报, 2013, 38(3): 287-290.
- [4] 王朋, 任宇飞, 黄勇, 等. 基于 TMS320C6678 三维成像声纳信号处理算法的设计与实现[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(2): 85-90+112.
- [5] 卢亮. 三维成像声纳成像算法仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [6] 易媛媛, 袁晓宇. 一种多波束声纳在水下安检中的应用[J]. 机械管理开发, 2013(2): 73-74.
- [7] 洪一帆, 宋坤坡, 夏顺仁, 等. 三维成像声呐图像后处理与可视化[J]. 计算机工程, 2011, 37(22): 196-197.
- [8] 柳俊峰, 章新华, 许林周. 动态规划算法在被动声呐目标检测中的应用[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(3): 95-98.
- [9] 苏程, 俞伟斌, 倪广翼, 等. 深水多波束测深侧扫声呐显控系统研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(6): 934-943.
- [10] 梁民赞, 孟华, 陈迎春, 等. 水声环境复杂性对声呐探测距离的影响[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(4): 45-48.
- [11] 万华, 周凡, 胡银丰. 水下三维场景实时成像系统[J]. 计算机工程, 2013, 39(12): 280-284.
- [12] Rolf K H, EehoseoPe1600 - Realtime acoustical 3 - Deam- era[J]. Underwater Systems Design, 1995, 5: 32-34.
- [13] 唐利娜. 水下三维声成像及声呐图像处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [14] 戴林军, 姜宇强, 朱振华. 三维成像声纳技术及其在水利工程中的应用[J]. 浙江水利科技, 2013, 41(5): 54-56.