钢筋混凝土组合梁的损伤诊断实验研究

霍兵勇^{①②*}, 易伟建^①, 胡岚^①, 马克俭^①

① 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082;

② 许昌学院土木工程学院, 许昌 461000

* E-mail: huo@hnu.edu.cn

收稿日期: 2014-09-09; 接受日期: 2015-03-02

摘要 为探寻不同状态下 U 形钢板-混凝土组合梁的动力性能及其在结构状态评估中的应用, 本文对 3 根组合梁进行了分级均布静力加卸载试验, 期间卸掉荷载后, 进行脉冲锤击激励条件下的动力测试, 采用模态分析软件 Mescope 对测试中记录的传递函数(TRF)进行计算得到模态参数, 总结了组合梁的动力性能特点, 舍去了振型在支座位置幅度较大的重复模态, 选择相对稳定的模态参数作为评估依据, 组合梁中钢和混凝土的粘结作用较强时, 频率较高而阻尼系数较小, 相反粘结作用较弱时, 频率较低而阻尼系数较大. 结果表明: 模态参数有一定的离散性, 频率和阻尼比随构件状态变化规律比较明显, 可作为结构损伤指标, 相对稳定的模态振型随构件状态的变化极其微小, 对结构损伤指示作用不大, 可用来判断真假模态.

关键词

U 形钢板-混凝土
组合梁
动力性能测试
模态分析
重复模态
损伤诊断

1 引言

由于结构性能 and 设计方面的需要, 在工程结构中, 评估精确的结构动力性能非常必要, 实践中, 频率和振型可以通过分析方法确定, 比如有限元分析或者实验方法. 但是很多实际结构本身较复杂, 用解析的有限元建模分析存在困难, 而且近似结构模型的计算结果与真实情况之间往往存在较大的差异, 在预测结构动力性能的问题上, 经典方法几乎不可行, 也不太可能总是使用精确解析方法^[1-5], 从测量数据中识别的动力性能被公认为接近结构真实性能^[6];

对大跨度楼盖等公共建筑, 行人产生的结构振动可能引起人体的不舒适, 设计中通过控制结构的自振频率来避免类似问题发生, 现场测试是了解和

评估实际结构动力性能的必要工作^[7]. 结构损伤往往表现为刚度的下降, 进而其模态参数会发生一定变化, 模态分析作为一种无损结构且方便实施的检测技术成为学术界和工程领域的热点, 应用范围也越来越广阔. 现有多数检测方法是根据结构动力参数(频率, 振型和阻尼)的改变而提出^[8].

Ren 和 Roeck^[9,10]从理论和实验两方面通过模态数据对钢筋混凝土构件进行损伤识别研究, 结果表明: 随结构损伤增加, 高阶频率下降关系比基频更加稳定, 损伤基本上不影响振型, 对真实结构进行损伤定位和数量上诊断损伤仍是一个挑战. Unger 等人^[11,12]对长度 17.6 m 的工字形截面预应力混凝土梁 4 点静力分级加载后进行动力测试, 并通过改进的有限元模型分析, 得到结论: 预应力混凝土梁的早期损伤诊

引用格式: 霍兵勇, 易伟建, 胡岚, 等. 钢筋混凝土组合梁的损伤诊断实验研究. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 757-765
Huo B Y, Yi W J, Hu L, et al. Experimental study on damage diagnosis of RC composite beam (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 757-765, doi: 10.1360/N092014-00321

断很困难,可以识别损伤状态,但是无法判定损伤位置. Huth 等人^[13]对预应力混凝土高速公路桥进行累进损伤的动力测试,以模型参数的变化判定、定位损伤,发现在出现几处裂缝前后,频率和振型仅有很小的变化,但振型变化大于频率,用另一种以振型变换为基础的振型区域指标方法分析发现:在损伤定位和量化时,结果也有很大的不确定性.

本文采用堆砌砝码的方法对所测构件进行分级均布静力加载,每级静载结束后卸掉所有砝码,对结构进行脉冲锤击激励动力测试,测试包括:固定激励点的多次重复测试和激励不同位置的测试.测试中记录下激励信息、响应信号和传递函数,用模式分析软件 Mescope v5.1 对传递函数进行计算得到模式参数:频率、振型和阻尼比.分析不同状态和不同测试条件下模式参数的变化,总结了结构的动力性能特点,不同测试条件对模式参数的影响,以及模式参数随损伤的变化情况.为合理设计测试方案和动力测试方法评估类似结构提供实验参考.

2 实验概况

2.1 试件设计

测试构件叫做 U 形钢板-混凝土组合梁,是从 U

形钢板-混凝土高强螺栓连接组合空腹夹层板楼盖^[14]结构中分离出来的一条板带,构件的施工图见图 1,混凝土强度等级 C30,钢筋采用 Q235 光圆钢筋.组合梁构件静力和动力实验共测试了 3 根构件,分别编号 Z1, Z2, Z3. Z1 和 Z2 的 U 形钢板上的剪力栓钉尺寸和布置分别为直径 3, 间距 100, 直径 4 和间距 150 mm, Z3 无剪力栓钉.

2.2 实验现场布置

测试构件就位过程如下:构件两端的钢支墩坐于砂浆层上,用水平尺找平顶面,然后在钢支墩顶面安放钢支座,最后将构件吊装到支座上,按支撑长度 7800 mm 调整好位置.构件就位后,在梁顶面用墨线横纵划分,动力测试激励点在纵向中心线上,响应点距离中心线两侧 10 cm 处,纵向按支撑长度 10 等分共 11 个响应测试位置,测试位置混凝土表面用砂纸打磨清洗后粘贴铁片,11 只加速度传感器依靠底部磁性底座依次固定于各测点铁片上,测试构件实物照片见图 2.激励位置和响应位置平面布置图见图 3.

2.3 测试系统

组合梁动力测试中信号采集设备选择迪飞(Data Physics)公司的动态信号分析仪 SignalCalc DP730,

图 1 U 形钢板-混凝土组合梁施工图

图 2 U 形钢板-混凝土组合梁测试现场布置图

图 3 激励位置和响应位置平面布置图

力锤为 PCB 公司制造的模态力锤, 型号: 086D20; 加速度传感器为东华 IEPE 压电式加速度传感器, 型号: DH105E. 在梁上从一端到另一端按顺序均匀布置 11 只加速度传感器, 动力测试平面布置见图 3, 通过脉冲锤击激励其中一点, 依次得到加速度响应信号 $a_1 \sim a_{11}$ (包括两端支座在内共 11 个响应信号), 测试中采集信号长度和数据点数分别为: 4 s 和 65536 点. 动力实验信号采集系统用简图表示, 见图 4.

2.4 测试方案

U 形钢板-混凝土组合梁在经历不同等级的静力荷载后, 构件状态会发生变化, 损伤不断累积, 各损伤状态下的动力测试概况以 Z2 为例详细说明, 首先

图 4 动力实验信号采集系统简图

在构件未受力的状态下 (即完整状态) 进行第一阶段的动力测试, 用力锤分别激励点 3, 5, 7, 9, 记录冲击力信号和 11 个响应点加速度响应信号, 动力测试结束后, 在梁上放置砝码模拟均布静力荷载, 静力加载中的情况见图 5, 按均布荷载的总重量作为分级加卸载的区分代表值, 分别在静力荷载代表值为 1.5, 3.2 和 4.8 t 时, 卸载所有砝码, 进行第 2, 3, 4 阶段的动力测试, 测试方法和第一阶段完全相同, 试件破坏形态见图 6, 静力测试得到跨中荷载-位移曲线如图 7. 另外 2 根构件的静力测试情况类似, 不再列出.

3 动力测试数据模态参数识别

3.1 结构不同状态下测试频率的离散性

各等级静力荷载作用结束后, 结构的模态参数

图 5 静力加载

图 6 试件破坏形态

图 7 静力分级加卸载跨中荷载-位移曲线

会发生什么样的变化, 是动力方法进行结构损伤诊断和健康监控所关注的重要信息. 对各损伤状态下的动力测试数据, 用模式分析软件 Mescope 对 DP730 记录的传递函数(TRF)数据进行计算得到模式参数,

该软件是对振动和声学测试实验进行数据处理的工具软件, 在相关学术研究中有广泛应用^[15-19].

分别单独冲击激励点 3, 5, 7, 9 各三次, 动力测试 4 个阶段代表了结构 4 个不同状态, 把不同状态下对应模式的频率放在一起, 前 4 阶模式的频率用曲线表示如图 8.

3.2 结构不同状态下测试阻尼的离散性

把不同状态下对应模式的阻尼指数衰减系数放在一起, 前 4 阶模式阻尼指数衰减系数用曲线表示如图 9.

从频率和阻尼系数的变化曲线中容易发现如下规律.

1) 结构各状态下, 激励位置不同, 频率识别值

图 8 结构不同状态下频率的变化

(a) 一阶模式; (b) 二阶模式; (c) 三阶模式; (d) 四阶模式

图 9 结构不同状态的指数衰减系数变化

(a) 一阶模态; (b) 二阶模态; (c) 三阶模态; (d) 四阶模态

的离散性较小, 指数衰减系数的离散性稍大, 尤其是密集频率附近;

2) 随损伤增加, 各阶模态的频率单调减小, 识别可靠性较高的模态指数衰减系数在结构初始损伤的一定范围内有更加明显的增加趋势。

3.3 不同测试条件下的振型

第一阶段的动力测试中, 激励点 3 和 5 各 3 次得到的四阶模态的振型按各自最大幅值归一, 归一后的振型见图 10, 把各次测试得到的四阶模态振型的归一化因子除以对应测试中一阶模态振型的归一化因子, 得到四阶模态振型归一因子的对比关系曲线, 见图 11, 共 6 次测试, 识别得到的对应各阶模态的形状几乎完全相同, 激励不同位置个别振型的相位有变化。归一化因子的对比关系曲线表明: 激励同一点的各次测试基本上符合线性系统的特征, 但激励点不同的测试得到的系统响应中各对应谐波振幅的比例关系不一致, 即不符合线性系统的输入与输出按比例变化的规律。

其他阶段以及激励其他位置的测试和另外 2 根构件的识别测试中, 振型分析结果情况大致相同不再重复列出。

图 10 结构完整状态下不同测试中归一化振型

(a) 一阶模态; (b) 二阶模态; (c) 三阶模态; (d) 四阶模态

图 11 四阶模态振型归一因子的对比关系曲线

3.4 模态取舍

上面分析中的频率和模态都是经过人为判断取舍后确定的, 对于模态判断取舍, 要依据测试响应信号的频谱或者传递函数的具体分析情况来确定. 3 根梁测试结果重复模态最多的是 Z1, 把对其完好状态下一次测试的 11 点响应信号的频谱叠加起来如图 12, 在传递函数曲线中的情况类似, 频率 100 Hz 以内, 选择所有 6 个峰值频率, 得到对应的六阶模态振型如图 13.

结构在同一种状态下两次独立测试, 即使是重复模态也比较吻合, 判断取舍后, 按频率大小顺序选择 1, 3, 4, 5 个谱峰频率作为前 4 阶真实模态的频率, 不稳定重复模态的判定依据是: 支座处的振幅较大, 通过振型形状判断重复模态. 重复模态可能是由于构件与支座之间的相互作用而产生, 测试结果也表明, 其作用大小与某些高阶频率有关. Z2 和 Z3 的一次测试的频谱见图 14. 不同构件, 频谱上的区别就是重复模态的多少和明显程度不同. Z2 的重复模态在第二阶, Z3 重复模态很不明显.

图 12 11 点响应信号的频谱叠加(Z1)

图 13 六阶振型(Z1)

图 14 11 点响应信号的频谱叠加
(a) Z2; (b) Z3

4 损伤诊断依据的讨论

4.1 结构不同状态下振型的变化

结构损伤诊断和健康监控, 是要依据能反映结构损伤的特征因子, 从其数量变化上对结构进行评估. 由于各次测试中振型的变化都不大, 把结构几个测试阶段的对应振型进行比较, 归一化且统一相位, 仅比较形状, 见图 15.

从上述振型曲线可以发现: 只要是稳定振型, 各损伤状态下形状极其相近, 难以从振型的变化上判断结构的损伤情况, 而频率附近有重复模态的振型有明显差异, 均布荷载作用下构件最终破坏部位都是跨中附近, 破坏照片如图 6, 但是从这些振型差异中去判断损伤位置也较困难. 结构损伤状态下, 重复模态有可能发生较大改变, 这说明系统的状态改变使得系统与周围约束的相互作用发生了变化.

4.2 结构不同状态下频率和阻尼的变化

结构同一种状态下, 取多次测试识别的对应阶数模态参数的平均值, 比较结构各损伤状态下各阶频率值的下降量见图 16, 指数衰减系数的变化量见

图 15 不同损伤状态下对应模式振型比较
(a) Z1; (b) Z2; (c) Z3

图 17. 阻尼比 ζ , 指数衰减系数 δ 和频率 ω 之间有如下关系

$$\zeta_i = \frac{\delta}{\omega_i}. \quad (1)$$

各阶频率随损伤增加而减小, 即使指数衰减系数不变, 阻尼比也会增大, 为避免混淆数量关系, 本文分析阻尼因素是采用指数衰减系数, 客观反映构

图 16 随结构损伤增加的各阶模式的频率的下降量
(a) Z1; (b) Z2; (c) Z3

件衰减所用时间的长短。

随损伤增加, 频率有比较稳定的变化趋势, 高阶频率的下降量较大, 阻尼只有在稳定模式所对应的值有增大的趋势, 对照图 12 和 14 中相对独立且峰值较大的谱峰频率即为稳定模式。

测试 3 根构件完整状态下得到的阻尼比见表 1, 结果显示各阶模式的阻尼比有较大差异, 基频模式对构件位移的贡献较大, 因此基频阻尼比对结构变形衰减更有代表性。构件 Z3 底部 U 形钢板内无剪力栓钉, 相比有剪力栓钉的构件, 无剪力栓钉构件 Z3 的各阶频率明显较低(图 16), 阻尼比较大, 换算为指数衰减系数, 规律同样成立, 一定程度上反映了结构各自的动力性能特点, 有剪力栓钉, 钢板和混凝土协

图 17 随结构损伤增加的各阶模态的指数衰减系数的变化量 (a) Z1; (b) Z2; (c) Z3

表 1 识别得到的阻尼比

组合梁编号	一阶模态	二阶模态	三阶模态	四阶模态
Z1	0.0033	0.0051	0.0343	0.0106
Z2	0.0035	0.0061	0.0148	0.0108
Z3	0.0048	0.0071	0.0354	0.0151

同受力性能好, 刚度较大, 阻尼较小; 相反, 无剪力栓钉, 刚度较小, 钢板和混凝土之间相对滑动阻力作用增强, 阻尼较大.

5 结论

依据对结构进行的测试和结构分析, 得到结构动力测试技术和结构动力性能特点两方面的规律. 结构完整和各损伤状态下, 激励位置不同, 频率识别值的离散性较小, 指数衰减系数的离散性稍大; 激励同一点的各次测试基本上符合线性系统的特征, 但激励点不同的测试得到的系统响应中各对应谐波振幅的比例关系不一致, 即不符合线性系统的输入与输出按比例变化的规律.

随损伤增加, 各阶模态的频率单调减小, 识别可靠性较高的模态指数衰减系数在结构初始损伤的一定范围内有更加明显的增加趋势, 而振型形状变化不明显.

从实验结果的直接总结中进一步得到以下结论.

- 1) 对结构进行动力测试时, 相对于多测试点轮流激励响应点固定的测试方案, 采用所有测试点同时响应的数据进行分析, 得到的振型更加可靠;
- 2) 通过动力测试可以为复合结构内摩擦对结构刚度和阻尼的影响找到数据证据;
- 3) 因较高的荷载作用下, 或者结构损伤较重时, 构件已产生较明显的可观察变形, 通过频率变化确定损伤时可供依据的基频下降百分比大致在 10% 以内;
- 4) 得到的阻尼比大致范围: 0.003~0.015, 其中基频阻尼比在 0.003~0.005, 是结构在小幅振动条件下测得, 大幅振动时结构阻尼比会增加, 此范围可作为阻尼比的下限值作为参考.

致谢 实验研究过程中, 湖南大学土木工程学院李正农教授、许斌教授等在实验仪器设备方面提供了帮助, 在实验过程和结果分析中提出了建设性意见和建议, 在此特别指出表示衷心感谢!

参考文献

- 1 Gimena F N, Gonzaga P, Gimena L. 3D-curved beam element with varying cross-sectional area under generalized loads. Eng Struct, 2008, 30: 404-411
- 2 Tang Y. Numerical evaluation of uniform beam modes. J Eng Mech ASCE, 2003, 129: 1475-1477
- 3 Zheng T X, Ji T J. Equivalent representations of beams with periodically variable cross-sections. Eng Struct, 2011, 33: 706-719

- 4 Carneiro J O, Demelo F J Q, JalaLli S, et al. The use of pseudo-dynamic method in the evaluation of damping characteristics in reinforced concrete beams having variable bending stemless. *Mech Res Commun*, 2006, 33: 601–613
- 5 Katsikadelis J T, Tsiatas G C. Non-linear dynamic analysis of beams with variable stiffness. *Jo Sound Vib*, 2004, 270: 847–863
- 6 Lin R M, Lim M K. Modal analysis of close modes using perturbative sensitivity approach. *Eng Struct*, 1997, 19: 397–406
- 7 胡岚, 马克俭, 易伟建, 等. U 形钢板-混凝土高强螺栓连接组合空腹夹层板楼盖舒适度实测与研究. *建筑结构学报*, 2012, 33: 70–75
- 8 周奎, 王琦, 刘卫东, 等. 土木工程结构健康监测的研究进展综述. *工业建筑*, 2009, 39: 96–102
- 9 Ren W X, Roeck G D. Structural damage identification using modal data. I: Simulation verification. *J Struct Eng ASCE*, 2002, 128: 87–95
- 10 Ren W X, Roeck G D. Structural damage identification using modal data. II: Test verification. *J Struct Eng ASCE*, 2002, 128: 96–104
- 11 Unger J F, Teughels A, Roeck G D. Damage detection of a prestressed concrete beam using modal strains. *J Struct Eng ASCE*, 2005, 131: 1456–1463
- 12 Unger J F, Teughels A, Roeck G D. System identification and damage detection of a prestressed concrete beam. *J Struct Eng ASCE*, 2006, 132: 1691–1698
- 13 Huth O, Feltrin G, Maeck J. Damage identification using modal data: Experiences on a prestressed concrete bridge. *J Struct Eng ASCE*, 2005, 131: 1898–1910
- 14 胡岚, 马克俭. U 形钢板-混凝土高强螺栓连接组合空腹夹层板楼盖结构研究与应用. *建筑结构学报*, 2012, 33: 61–69
- 15 Huang Q, Gardoni P, Hurlbaas S. Probabilistic capacity models and fragility estimates for reinforced concrete columns incorporating NDT data. *J Eng Mech*, 2009, 135: 1384–1392
- 16 Chen K T, Chang S H, Chou C H, et al. Active control by using optical sensors on the acoustic radiation from square plates. *Appl Acoust*, 2008, 69: 367–377
- 17 Fan W, Qiao P. A 2-D continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures. *Int J Solid Struct*, 2009, 46: 4379–4395
- 18 Kusculuoglu Z K, Royston T J. Nonlinear modeling of composite plates with piezoceramic layers using finite element analysis. *J Sound Vib*, 2008, 315: 911–926
- 19 Mojtahedi A, Lotfollahi Yaghin M A, Hassanzadeh Y, et al. Developing a robust SHM method for offshore jacket platform using model updating and fuzzy logic system. *Appl Ocean Res*, 2011, 33: 398–411

Experimental study on damage diagnosis of RC composite beam

HUO BingYong^{1,2}, YI WeiJian¹, HU Lan¹ & MA KeJian¹

¹ College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

² College of Civil Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China

For finding out dynamic characteristics of U-shaped steel plate-concrete composite beam in difference state and application in structural condition assessment, the experience of static multi-stage loaded and unloaded were performed on three composite beams by uniformly distributed weights. After unloading dynamic test were carried out with pulse excitation. Then the recorded transfer function was calculated by modal software Mescop to obtain the modal parameters. Dynamic characteristics of the composite beam had been summed up. Repeated modal were given up of which the magnitude is bigger at the supports, meanwhile the steady modal parameters were taken on an evaluation basis. While the bond action of steel bar/plate and concrete in composite structures were stronger, the frequencies were higher and the values of damp ratio were smaller. Whereas: if the bond action was weak, the frequencies will become smaller and the values of damp ratio higher. The results indicated that modal parameters were dispersed at some level, but the changes of frequency and damp ratio with damage may serve as a structural damage indicators, the stable modal shapes was influenced slightly by damage, which can be used to determine true and false mode and would not be used to indicate structural damage.

U-shaped steel plate-concrete composite beam, test technical for dynamic characteristics, modal analysis, repeated modal, damage diagnosis

doi: 10.1360/N092014-00321