过载阶梯谱下 CFRP 加固 RC 构件疲劳实验研究

周昊, 黄培彦*, 郑小红, 郭馨艳, 李政伟

华南理工大学土木与交通学院, 广州 510640

* E-mail: pyhuang@scut.edu.cn

收稿日期: 2014-10-08; 接受日期: 2015-01-14

国家自然科学基金重点项目(批准号: 11132004)和广东省自然科学基金重点项目(编号: 9251064101000016)资助

摘要 为了探明公路桥梁中碳纤维增强复合材料(CFRP)加固钢筋混凝土(RC)结构在车辆过大荷载(简称过载)作用下的疲劳及耐久性能, 以广州某高速公路的典型上部结构“20 m 空心板简支梁”为研究背景, 提出了过载的界定方法, 界定了车辆荷载的过载, 生成了 3 级过载阶梯谱; 提出了在该过载阶梯谱下 CFRP 加固 RC 梁的疲劳实验方法, 并成功地实施了碳纤维薄板(CFL)加固 RC 梁的疲劳实验, 获得了相应的 $S-N$ 曲线, 给出了其疲劳方程.

关键词

过载
阶梯谱
碳纤维薄板
疲劳性能
钢筋混凝土梁

1 引言

在我国的公路运输中, 车辆的超载是普遍现象. 虽然不是所有超载都会引起桥梁结构承受比设计荷载要大的过大荷载(简称“过载”), 但超载往往会导致过载, 而过载又造成桥梁结构过早出现损伤及各种病害, 甚至危及结构及交通安全^[1]. 因此, 包括纤维增强复合材料(FRP)加固钢筋混凝土(RC)构件在内的桥梁结构在过载下的疲劳性能及耐久性, 成为交通领域急需探明的重大课题.

对于在车辆载荷谱作用下 RC 桥梁结构件(随机)疲劳性能的研究甚少, 而在车辆载荷谱作用下 FRP 加固 RC 桥梁结构件疲劳性能的研究, 目前只有本课题组作了一些探讨^[2~5]. 前期的研究表明, 考虑实际车辆载荷(随机载荷)作用的 FRP 加固 RC 构件的疲劳性能, 比同一水平的常幅疲劳载荷下同类构件的疲劳性能要差, 这说明桥梁结构件的抗疲劳设计需要考虑实际车辆载荷的作用效应. 然而, 对超载而引起的过载对 FRP 加固 RC 桥梁结构件疲劳性能影响

的研究, 目前还未见报道. 因此, 本文开展过载下 FRP 加固 RC 构件疲劳性能的实验研究.

2 过载阶梯谱

2.1 过载的界定

针对 RC 桥梁结构在车辆活载及恒载作用下的受力特点以及相关混凝土结构设计规范的规定, 将受弯 RC 构件混凝土下缘(最大拉应力处)出现拉应力时的临界弯矩与考虑结构安全系数后的极限承载力(弯矩)中的较小值, 作为定义过载的临界弯矩, 而将大于等于该弯矩值所对应的车辆荷载定义为过载.

对于安全系数的取值方法, 可根据 2004 年公路桥涵规范^[6]的规定, 取安全系数

$K = \gamma_0 \gamma_s \gamma_{is} = 1.1(1.0) \times 1.326 \times 1.2 = 1.75(1.60)$, 而 $1/K = 1/(1.60 \sim 1.75) = 0.571 \sim 0.625$, 其平均值约为 0.60, 故取 0.60 为过载界定系数.

对于临界弯矩的确定, 以广州某高速公路的典型上部结构“20 m 空心板梁”为例, 采用有限元计算,

引用格式: 周昊, 黄培彦, 郑小红, 等. 过载阶梯谱下 CFRP 加固 RC 构件疲劳实验研究. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 498–502
Zhou H, Huang P Y, Zheng X H, et al. Experimental study on fatigue behavior of RC members strengthened with CFRP under overload ladder spectrum (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 498–502, doi: 10.1360/N092014-00356

可知空心板梁混凝土下缘出现拉应力时的界限弯矩为 1300 kN m, 而其极限承载力(极限弯矩 M_{cu})为 2308 kN m, 考虑安全系数($K=0.60$)后的极限弯矩值为 1385 kN m. 按照上述定义, 取该两弯矩的较小值, 即可界定 20 m 空心板梁的总过载弯矩为 $M_{总过载}=1300$ kN m.

因为过载时桥梁的总弯矩由两部分组成: (1) 由车辆荷载引起的过载弯矩乘以横向分布系数; (2) 恒载弯矩. 因此, 车辆荷载引起的过载弯矩 $M_{车辆过载}$ 为

$$M_{车辆过载} = (M_{总过载} - M_{恒载}) / \eta_{最不利}, \quad (1)$$

式中, 按照 2004 年公路桥涵规范^[6], 可计算得到恒载弯矩 $M_{恒载}$ 和横向分布系数 $\eta_{最不利}$ 分别为 860 kN m 和 0.549. 将其代入(1)式, 可求得 $M_{车辆过载}=800$ kN m.

2.2 过载阶梯谱的生成

采用本课题组^[2,3,7]提出的车辆荷载谱的统计、分析和模拟方法, 对上述高速公路在采取限制超载措施后连续一个月的车流量数据进行统计、分析和模拟^[7,8], 并将在车辆荷载作用下 20 m 空心板梁的大于 800 kN m 的弯矩值划分为 3 个区间(3阶): 第 1 阶[800, 1200 kN m(单位下同)], 第 2 阶[1200, 1400], 第 3 阶[1400, 2000], 得到了以上 3 阶荷载区间的实际作用频次分布, 如图 1 所示. 将 3 个区间的弯矩值按照线性累积损伤准则进行等效处理, 即将每一个区间的弯矩值等效为一个常数, 可分别得到其等效弯矩 $M_{等效}$, 如表 1 所示. 再将 $M_{等效}$ 值乘以边梁横向分布系数 $\eta_{最不利}$, 可得到外侧重车道、即最不利单片梁体(边梁)的弯矩最大值 $M_{max(单片)}$.

在确定了最不利梁体(边梁)的过载弯矩 $M_{max(单片)}$ 后, 由恒载弯矩可求得边梁设计弯矩 M_S 为

$$M_S = M_{恒载} + M_{max(单片)}. \quad (2)$$

图 1 第 1-3 阶车辆过载弯矩及其频次分布

由(2)式计算出设计弯矩 M_S 后, 可求得该梁的设计弯矩与极限弯矩之比 M_S/M_{cu} , 并以此代表阶梯谱中各阶(区间)的过载水平, 分别为 0.623, 0.682, 0.732.

2.3 实验谱的编制

将过载阶梯谱编制成实验谱, 需要考虑试件形状、尺寸及力学性能、实验设备尤其是疲劳试验机的性能等(详见第 3 章). 对于本文的 3 点弯曲碳纤维薄板(CFL)^[9]加固 RC 梁试件, 通过理论计算和静载实验, 确定其极限承载力为 $P_u=45$ kN. 参照各区间阶梯谱的过载水平 M_S/M_{cu} , 设定应力比为 $R=0.1$, 按照弯矩等效方法, 可确定实验谱中各阶的荷载值. 另外, 将图 1 中一个月的荷载循环次数转换为每天的加载频次, 就可完成实验谱的编制, 如图 2 和表 2 所示.

3 过载阶梯谱下 CFL 加固 RC 梁疲劳实验

3.1 实验材料及试件

本文所采用的试件是三点弯曲 CFL 加固 RC 梁. 其中, RC 梁的尺寸为 1850 mm(长)×100 mm(宽)×200 mm(高), 跨度 $L=1600$ mm, 如图 3 所示. 试件由混凝土、钢筋、CFL 三部分组成.

1) 混凝土. 水泥采用广州市嘉华水泥厂生产的普通硅酸盐 P.O.42.5R 水泥, 按照《道路建筑材料》规范进行 C30 混凝土的配合比设计: $m(\text{水泥}):m(\text{水}):m(\text{砂}):m(\text{碎石})=1:0.5:2.06:3.66$. 经测试可知混凝土立方体抗压强度为 45.6 MPa, 抗折强度为 4.25 MPa.

2) 钢筋. 试件中的钢筋(图 3)为广钢生产的 II 级光圆钢筋, $\phi 8$ 钢筋作为架立筋和箍筋, $\phi 10$ 作为主筋, 测得其屈服强度为 307 MPa, 极限强度为 452 MPa.

表 1 区间等效弯矩

区间	[800, 1200)	[1200, 1400)	[1400, 2000)
$N(\text{cycles/month})$	16586	2511	465
$M_{\text{等效}}(\text{kN m})$	1052	1302	1506
$M_{\text{max}}(\text{单片})(\text{kN m})$	577	715	828

图 2 过载阶梯实验谱

表 2 实验谱的主要参数

荷载	$P_{\text{max}}(\text{kN})$	$P_{\text{min}}(\text{kN})$	加载频数(次)
第 1 阶	28.1	2.81	535
第 2 阶	30.3	3.03	81
第 3 阶	32.5	3.25	15

3) CFL. 加固材料为 CFL,是本课题组发明的新型碳纤维增强复合材料(CFRP)(专利号: ZL200410026742.8)^[9]. CFL 兼具了碳纤维布和碳纤维板的优点, 并克服了它们的不足, 具有单层结构、尺寸不受限制、柔软、施工性好、性价比高等优点. 本次实验采用的是 TB25 型 CFL, 其抗拉强度为 4750 MPa, 其尺寸为 1600 mm(长)×100 mm(宽)×0.23 mm(厚). CFL 通过黏结剂粘贴于 RC 梁底, 本次使用的黏

图 3 试件的配筋情况

结剂为神力铃牌环氧树脂 A, B 胶, 其剪切强度为 14 MPa.

本次实验共制作了 15 根 CFL 加固 RC 梁.

3.2 实验方法及装置

将试件分为三组(A1, A2, A3), 每组 5 根梁. 其中, A1 组试件的荷载水平是按照第 2 章所示过载阶梯谱取值(表 2), 而 A2 组和 A3 组试件的荷载水平则比 A1 组分别增加 10%和 15%, 如表 3 所示. 对于载荷谱中 3 个阶梯的加载频次、加载顺序, 分别如表 2 和图 2 所示. 在疲劳实验前, 在微机上编程生成上述过载阶梯谱, 并输入到疲劳试验机的控制器中. 在所有疲劳实验中, 加载方式均采用力控制模式, 波形为正弦波, 应力比 $R=0.1$, 加载频率为 8 Hz.

疲劳试验机为 MTS810, 但试件承台为课题组自制^[10]. 本实验中试件所受最大、最小载荷, 跨中位移, 钢筋、CFL 和混凝土的应变等数据需要测试和记录. 其中, MTS 系统自动记录荷载与跨中位移, 每个循环记录 8~10 组数据. 钢筋的应变借助预先埋入的应变片、CFL 和混凝土的应变借助粘贴于其表面的应变片(图 4), 由动态应变仪(Wavebook516E)采集和记录,

表 3 过载阶梯谱下疲劳实验条件及实验结果

试件组别	试件编号	载荷阶梯(3 阶)	最大载荷(kN)	最小载荷(kN)	疲劳寿命(cycles)	平均疲劳寿命(cycles)
A1	A1-1	第 1 阶	28.1	2.81	1633260	1125407
	A1-2				1950810	
	A1-3	第 2 阶	30.3	3.03	816502	
	A1-4				307110	
	A1-5	第 3 阶	32.5	3.25	919355	
A2	A2-1	第 1 阶	30.9	3.09	392417	341861
	A2-2				181003	
	A2-3	第 2 阶	33.3	3.33	374291	
	A2-4				343815	
	A2-5	第 3 阶	35.7	3.57	417781	
A3	A3-1	第 1 阶	32.3	3.23	287064	274563
	A3-2				281428	
	A3-3	第 2 阶	34.8	3.48	386159	
	A3-4				208084	
	A3-5	第 3 阶	37.3	3.73	210078

图 4 应变片布置示意图

采集频率为 100 Hz.

4 实验结果及分析

按照上述实验方法, 对所有试件实施了过载阶梯谱作用下的疲劳实验, 实验结果如表 3 所示. 由表 3 可知, 各组试件的疲劳寿命有一定的分散性, 这被认为是本文试件的组成成分及其力学性能所致. 也就是说, CFL 加固 RC 梁主要由 CFL、钢筋、混凝土等三部分组成, 而且 CFL 和混凝土都是非均质材料, 由此导致同一组试件的疲劳寿命具有较大的分散性, 因此, 实验结果是合理的.

对表 3 所示疲劳实验数据进行曲线拟合, 可得到图 5 所示过载阶梯谱下 CFL 加固 RC 梁的 S_R - N 实验曲线以及图 6 所示的 ΔS_e - N 实验曲线, 其曲线方程分别为

$$S_R = 1.29 - 0.1071 \lg N, \quad (3)$$

$$\Delta S_e = 50.8 - 4.06 \lg N, \quad (4)$$

式中, $S_R = \Delta P_{\max} / P_u$ 为载荷水平, ΔS_e 为等效载荷幅值.

由表 3, 图 5 和 6 可知, A1 组试件($S_R=0.63$)的平

图 5 过载阶梯谱下的 S_R - N 实验曲线 图 6 过载阶梯谱下的 ΔS_e - N 实验曲线

均寿命为 112.5 万次, 但载荷幅值增加 10% ($S_R=0.70$) 后 A2 组试件的平均寿命减少 69.6%; 载荷幅值增加 15% ($S_R=0.73$) 后 A3 组试件的平均寿命减少 75.6%. 这说明, 过载的幅度会对 CFL 加固 RC 梁的疲劳寿命产生显著的影响.

将图 5 和 6 所示的 S - N 实验曲线与本课题组的前期研究成果—常幅循环载荷下 CFL 加固 RC 梁的疲劳寿命曲线(文献[4]和[10])相比可知, 常幅载荷下试件的相对疲劳极限 $S_{Rf}=0.658$, 而在过载阶梯谱作用下试件的 S_{Rf} 则为 0.616, 即后者降低了 6.4%. 这表明在过载阶梯谱作用下 CFL 加固 RC 梁的疲劳寿命会显著降低, 在对桥梁加固构件进行抗疲劳设计时应充分考虑过载的影响, 即参照图 5 和 6 的 S - N 曲线, 通过弯矩等效的方法进行设计.

5 结论

本文以广州某高速公路 20 m 空心板简支梁为研究背景, 对采取限制超载措施后该高速公路的车辆荷载谱进行了研究. 在此基础上, 给出了车辆过载的定义, 界定了车辆荷载的过载, 生成了 3 级过载阶梯谱, 提出了在该过载阶梯谱作用下 CFL 加固 RC 梁的疲劳实验方法, 并成功地实施了疲劳实验, 获得了相应的 S - N 曲线, 给出了其疲劳方程. 研究结果表明, 过载会显著降低 CFL 加固 RC 梁的疲劳寿命. 在今后的桥梁加固构件抗疲劳及耐久性设计中应考虑过载的负面影响.

参考文献

- 1 孙晓燕, 黄承奎, 赵国藩, 等. 超载对桥梁构件受弯性能影响的试验研究. 土木工程学报, 2005, 38: 35-40

- 2 赵琛. 随机载荷下 CFL 增强 RC 梁抗弯疲劳性能研究. 博士学位论文. 广州: 华南理工大学, 2007
- 3 Lin R W, Huang P Y, Zhou C, et al. Prediction of fatigue lives of RC beams strengthened with CFL under random loading. *Acta Mech Solida Sin*, 2008, 21: 359–363
- 4 黄培彦, 赵琛, 郭馨艳. FRP 加固钢筋混凝土构件的疲劳性能. 北京: 科学出版社, 2009
- 5 王海洋. 温度对随机载荷下 CFL 增强 RC 梁疲劳性能的影响. 博士学位论文. 广州: 华南理工大学, 2014
- 6 中华人民共和国行业标准. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁设计规范. 北京: 中国交通出版社, 2004
- 7 王海洋, 黄培彦, 李政伟, 等. 基于车辆动态测重系统监测数据的公路桥梁随机载荷谱. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 42: 70–76
- 8 李政伟. 过载阶梯谱下 CFL 增强 RC 梁疲劳性能研究. 博士学位论文. 广州: 华南理工大学, 2014
- 9 黄培彦, 曾竞成. 纤维薄板及其应用. 中国发明专利, ZL200410026742.8
- 10 Huang P Y, Zhou H, Wang H Y, et al. Fatigue lives of RC beams strengthened with CFRP at different temperatures under cyclic bending loads. *Fatigue Fract Eng M*, 2011, 34: 708–716

Experimental study on fatigue behavior of RC members strengthened with CFRP under overload ladder spectrum

ZHOU Hao, HUANG PeiYan, ZHENGXiaoHong, GUO XinYan & LI ZhengWei

School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

In order to prove the fatigue property and reliability of reinforced concrete (RC) members strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) in highway bridge under the vehicle overload, this paper focuses on a typical superstructure such as 20 m hollow slab simply supported beam bridge in highway of Guangzhou, define method of overload for vehicle loading was proposed, and the highway overload for vehicle loading was defined, a three steps ladder spectrum of the overload was generated. And then, the fatigue testing method of the RC members strengthened with CFRP using the ladder spectrum of the overload was proposed, and the fatigue tests of RC beams strengthened with carbon fiber laminate (CFL) were carried out successfully. The *S-N* curves and the fatigue equations were obtained.

overload, ladder spectrum, carbon fiber laminate, fatigue property, reinforced concrete beam

doi: 10.1360/N092014-00356