

大件车通行桥梁安全评估实用方法研究

姜旭^{1,2},王万峰¹,何振生¹,高雪峰¹

(1.吉林省交通科学研究所,吉林 长春 130012;2.吉林省高速公路集团有限公司,吉林 长春 130022)

摘要:为满足业界对于大件车通行安全评估高效性、安全可靠性的要求,该文提出以实时监测系统和有限元相结合的桥梁大件车通行安全评估方法,并通过实际工程对该方法进行验证。在大件车通行前对桥梁技术状况等级进行评估,确定考虑桥梁技术状况等级的抗力折减系数;建立实桥有限元分析模型,通过实测数据对模型可靠性进行验证,在此基础上采用实际荷载验算法对通行桥梁进行安全评估;并在大件车通行过程中对桥梁进行实时监测。结果表明:桥梁技术状况等级为A类;实桥有限元模型能对桥梁承载力进行可靠的安全评估;大件车通行期间,桥梁处于弹性状态,大件车通行未对桥梁结构造成损伤。

关键词:大件车运输;桥梁状态评估;安全评估方法;实际荷载验算法;实时监测系统

中图分类号:U446.3

文献标志码:A

0 引言

随着中国经济技术的飞速发展,众多国家重点建设项目的投产及科技项目研发试验都需要通过大件车运输来保证一些超重、不可拆解的关键部件,如核机组、变压器等“国宝级”设备安全运达目的地。大件车经过的路线上存在一些已经运营数年的桥梁,在环境、荷载、材料性能退化等多重因素影响下,在役混凝土桥梁均会发生不同程度的劣化和损伤,桥梁的承载能力将有一定程度的下降^[1-3],且运输设备的大件车作用往往会超过桥梁设计建造时的荷载等级,通行前必须对桥梁进行可靠的安全评估才能保障大件车的安全通行。同时大件车通行是否会对桥梁造成损害也是必须要考虑的问题^[4]。

大件车通行安全评估的关键之一是能够准确把握待通过桥梁的实际承载能力,贺拴海等^[5]通过实测车辆通行时的桥梁动力响应,根据响应值是否超过允许值或超出量的大小来判断桥梁的实际承载能力;张宇峰等^[6]以准静态荷载试验为基础,通过校正系数考虑桥梁的损伤情况,从而近似评估桥梁的实际承载能力;张文献等^[7]通过施加集中荷载进行破坏

性试验,通过经验回归公式得出裂缝最大高度、平均高度和裂缝宽度与承载力之间的关系,进行桥梁承载力评估。这几种承载能力评估方法均需要复杂的试验作为基础,无法满足大件车通行快速评估的要求,工程应用性较差。李健等^[1]基于可靠性理论,分析了桥梁技术状况等级对桥梁承载能力的影响,通过外观检测和无损检测确定桥梁技术状况等级,得到桥梁承载能力修正系数,确定桥梁承载能力,该方法较为简单,适用性和操作性较强,在实际工程中应用较广。

除了确定桥梁的实际承载能力,必须同时得到大件车荷载作用下的荷载效应才能对大件车通行的安全性做出准确评估。目前,荷载效应主要通过有限元方法进行计算。为保障大件车安全通行,本文提出一套完整的大件车通行安全评估使用方法。通过搭建实时监测系统,在大件车通行前对桥梁进行全方位检测,进而确定桥梁技术状况等级,计算考虑桥梁技术状况等级的抗力折减系数;建立实桥有限元分析模型,采用实测数据对有限元模型可靠性进行验证,在此基础上采用实际荷载验算法对通行桥梁进行安全评估;并在大件车通行过程中对桥梁进行实时监测,以确定桥梁在大件车通行时的受力状态安全。

收稿日期:2021-11-25

基金项目:青海省科技成果转化专项(编号:211421220091)

作者简介:姜旭,男,硕士,工程师.E-mail:963139972@qq.com

1 大件车通行安全评估方法

大件车通行安全评估方法详细流程如图 1 所示。

2 项目概况

2.1 桥梁概况

大件车经过的硅谷大街桥梁全长 200 m,由两联

4×25 m 现浇预应力混凝土连续箱梁组成,主梁为单箱双室箱梁,梁高 1.5 m,梁宽 10 m,主梁横断面及其详细尺寸见图 2。主梁采用 C50 混凝土浇筑,桥面采用 9 cm 沥青混凝土铺装。

2.2 荷载概况

某物流公司大件车运输设备共计 4 件,大件车运输设备情况见表 1。各运输车型具体轴载分布见图 3。

2.3 实时监测系统

为在大件车通行前对桥梁承载力评估模型结果

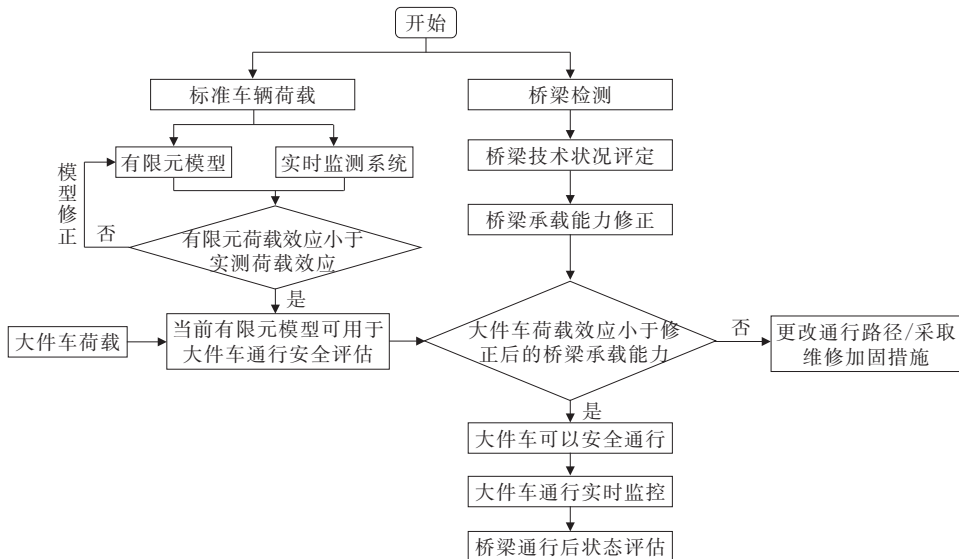


图 1 大件车通行安全评估方法流程图

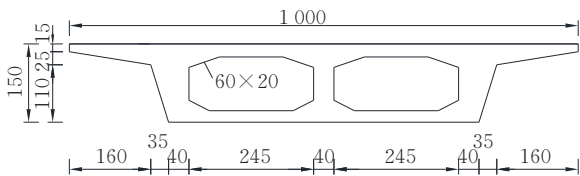


图 2 主梁横断面图(单位:cm)

表 1 大件车运输设备

名称	运输车型	车货总重/t	单轴最大荷载/t
方形容器部件(1)	牵引车+液压挂车 11 轴线 2 纵列	99.0	12.0
方形容器部件(2)	牵引车+液压挂车 10 轴线 2 纵列	99.6	12.0
方形容器部件(3)	牵引车+液压挂车 15 轴线 3 纵列	204.0	14.9
方形容器部件(4)	牵引车+液压挂车 16 轴线 3 纵列	244.0	17.4

进行验证,并对大件车通行过程中的桥梁状况进行实时监控,对预应力混凝土箱梁桥第 7 跨和第 8 跨跨中位置进行挠度和应变监测(图 4),测点布置及编号如图 5 所示,在单箱双室箱梁腹板下部各布置一个应变测点和挠度测点,全桥共计 6 个挠度测点和 6 个应变测点。采用挠度反光贴配合非接触视频测量系统对挠度数据进行实时采集,应变则通过动态应变计和动态测试信号分析系统进行采集。

3 桥梁技术状况评定

根据《城市桥梁养护技术规范》(CJJ 99—2017)^[8]评定方法,将影响桥梁状态的指标分层次建立计算模型。参与评定的指标以百分制评分,输入计算模型,进而得到桥梁的综合评定结果^[9-10]。

通过外观检测和无损检测方法分别对桥梁上部结构、下部结构及桥面系进行评估,无损检测内容包

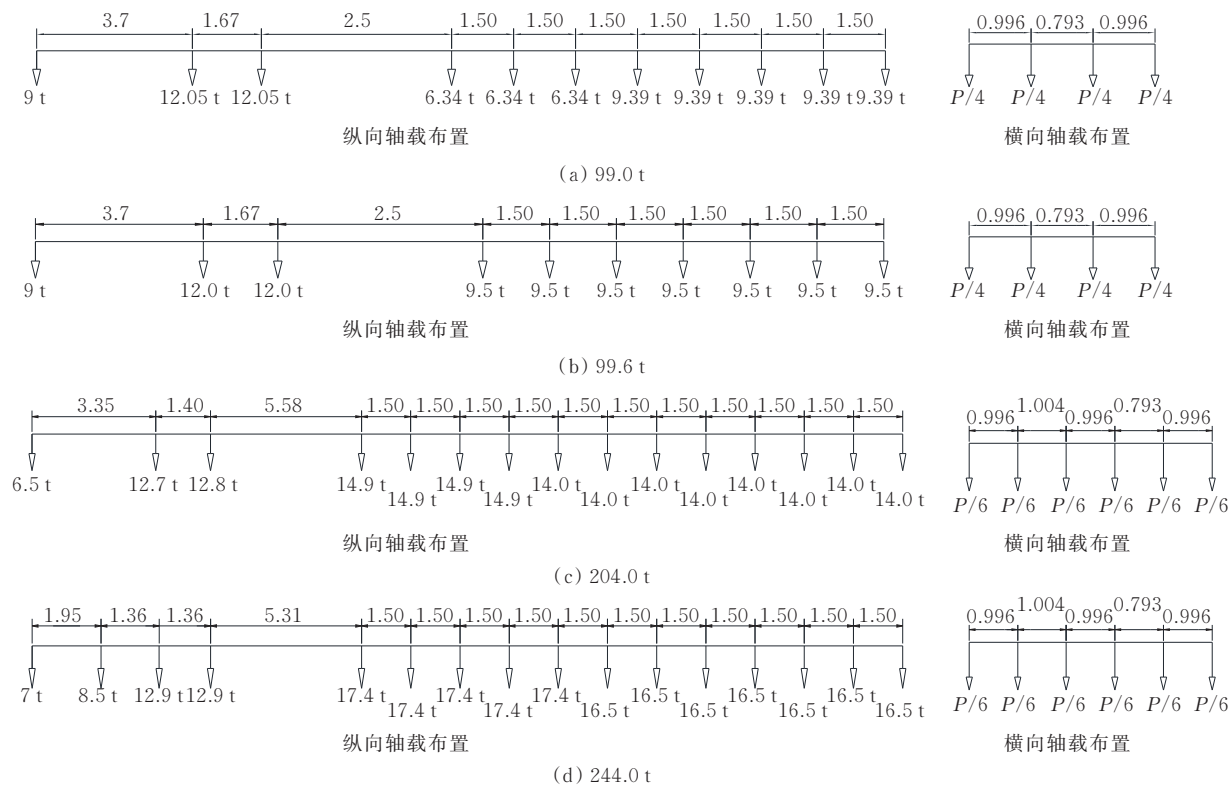


图3 轴载立面及横断面(尺寸单位:m)

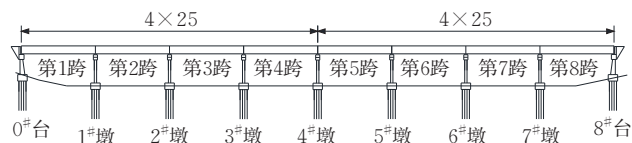
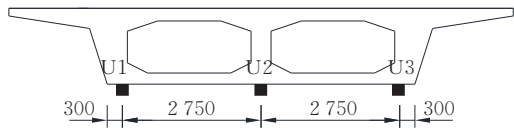
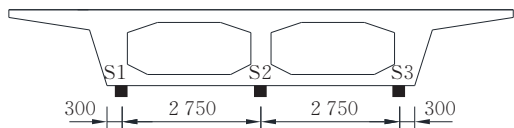


图4 主跨编号(单位:m)



(a) 挠度测点



(b) 应变测点

图5 测点位置及编号(单位:mm)

括混凝土强度检测、混凝土钢筋锈蚀电位检测、混凝土碳化深度检测和混凝土保护层厚度检测^[11-12]。根据检测结果确定不同部位构件桥梁状况指数(I_{BCI}),进而通过加权平均法计算全桥 I_{BCI} ,不同部位 I_{BCI} 得分及技术状况评定结果见表2。

由表2可知:最终该桥 I_{BCI} 得分为96.80,总体技术状况等级为A类。根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)^[13]确定的结构承载能

表2 硅谷大街匝道桥技术状况评估结果

桥梁部位	部件 I_{BCI}	部件评 估等级	权重	全桥 I_{BCI}	桥梁技术 状况等级
桥面系	92.78	A	0.15		
上部结构	95.63	A	0.40	96.80	A
下部结构	99.17	A	0.45		

力检算系数 Z_1 为1.0,承载能力恶化系数 ξ_e 为0.050,截面折减系数 ξ_c 、钢筋截面折减系数 ξ_s 均为1.0。

4 有限元模拟

4.1 有限元模型的建立

采用Midas/Civil建立有限元模型进行分析。主梁采用梁单元模拟,支座采用节点弹性支撑和弹性连接进行模拟。全桥模型共划分99个单元、100个节点。混凝土箱梁材料为C50混凝土,重度 $\gamma_1=26$ kN/m³,二期恒载 $\gamma_2=10$ kN/m,预应力钢绞线采用符合《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—2003)标准中低松弛高强度钢绞线,公称直径15.2 mm,标准强度 $f_{pk}=1\ 860$ MPa,弹性模量 $E_p=1.95\times10^5$ MPa,松弛率3.5%,普通钢筋采用R235、HRB335两

种。大件车通过车道荷载的方式施加到结构上,模拟大件车居中通行,根据《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)^[14]的规定,通行特载车的桥梁不计冲击系数的影响。

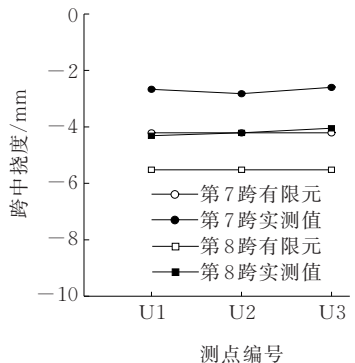
4.2 模型验证

在大件车通行前,采用标准车辆(公路-I级车辆荷载)进行通行试验,通过实时监测系统采集的挠度和应变值与有限元计算结果进行了对比,结果见图6。

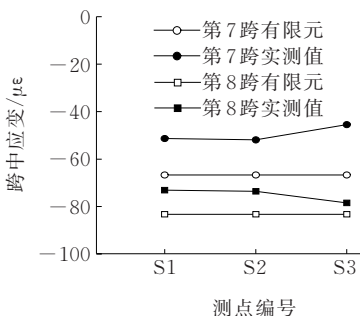
从图6可以看出:有限元计算的挠度和应变与实测结果沿横向的分布基本相同,挠度计算值与实测值最大绝对误差仅1.61 mm,应变最大绝对误差为19 $\mu\epsilon$ 。同时,有限元计算挠度值和应变值均大于实测值,有限元模型计算结果偏保守,说明采用本文建立的有限元模型进行承载力安全评估较为可靠。

5 安全评估

采用实际荷载检算法对桥梁的承载力进行安全评估^[15-17],根据大件车的实际荷载分别对结构承



(a) 跨中挠度



(b) 跨中应变

图6 有限元计算值与实测结果对比

载能力极限状态下的承载力及正常使用极限状态下的抗裂性进行检算,不同工作状态下的荷载组合见表3。

表3 结构作用效应分项系数

工作状态	荷载组合	结构重要性系数	组合系数					
			永久作用				可变作用	
			混凝土自重	预应力	混凝土收缩徐变	基础变位	汽车荷载	温度荷载
承载能力极限状态	基本组合	1.0	1.2	1.0	1.0	0.5	1.1	1.05
正常使用极限状态	标准组合	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00

5.1 承载能力极限状态承载力验算

在桥梁结构承载能力极限状态检算时,根据前述的技术状况评定结果,利用承载能力检算系数 Z_1 、承载能力恶化系数 ξ_e 、截面修正系数 ξ_s 和钢筋截面折减系数 ξ_s 对截面抗力进行修正计算,可得折减抗力 R_d 为:

$$R_d = R(f_d, \xi_e \alpha_{dc}, \xi_s \alpha_{ds}) Z_1 (1 - \xi_e) \quad (1)$$

式中: R 为抗力效应函数; f_d 为材料强度设计值; α_{dc} 、 α_{ds} 分别为构件混凝土和钢筋几何参数值。

若实际荷载产生的效应与折减抗力的比值满足式(2),即认为结构承载力满足大件车通行要求:

$$\frac{\gamma_0 S}{R_d} \leq 1 \quad (2)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; S 为荷载效应,进行结构抗弯承载能力和抗剪承载能力验算时,分别为荷载产生的弯矩 M_j 和剪力 Q_j 。

混凝土箱梁承载能力极限状态抗弯、抗剪验算结果分别见表4、5。由表4、5可以看出:大件车作用下的弯曲效应与折减抗弯承载力之比最大值为0.862,荷载效应与折减抗力之比最大值为0.697,均小于1,说明承载能力极限状态荷载组合下,桥梁正截面抗弯承载能力、斜截面抗剪承载能力均满足大件车沿桥梁中心线通行的要求。

表 4 承载能力极限状态抗弯验算

荷载等级/ t	项目	$\gamma_0 \cdot M_j /$ (kN·m)	$\gamma_0 \cdot M_j / R_d$	结果
99.0	最大正弯矩	24 093	0.779	通过
	最大负弯矩	−21 386	0.637	通过
99.6	最大正弯矩	24 681	0.798	通过
	最大负弯矩	−21 685	0.646	通过
204.0	最大正弯矩	25 222	0.815	通过
	最大负弯矩	−22 873	0.681	通过
244.0	最大正弯矩	26 644	0.862	通过
	最大负弯矩	−24 105	0.718	通过

表 5 承载能力极限状态抗剪验算

荷载等级/t	$\gamma_0 \cdot Q_j / \text{kN}$	$\gamma_0 \cdot Q_j / R_d$	结果
99.0	5 926	0.630	通过
99.6	5 927	0.630	通过
204.0	6 185	0.657	通过
244.0	6 556	0.697	通过

5.2 正常使用极限状态抗裂验算

对于 A 类预应力混凝土构件,正常使用极限状态下正截面最大拉应力应小于 0.7 倍的混凝土抗拉强度,桥梁正常使用极限状态正应力验算结果见表 6。

表 6 控制截面正常使用极限状态正截面拉应力

荷载等级/t	应力值/MPa	限值/MPa	结果
99.0	−0.90	−1.85	通过
99.6	−1.00	−1.85	通过
204.0	−1.41	−1.85	通过
244.0	−1.65	−1.85	通过

表 6 表明:即使在 244.0 t 大件车荷载作用下,最大拉应力值仍小于混凝土抗拉应力限值,抗裂验算满足 A 类预应力混凝土构件的抗裂要求。

桥梁正常使用极限状态主应力验算结果见表 7。

表 7 控制截面正常使用极限状态斜截面主拉应力

荷载等级/t	应力值/MPa	限值/MPa	结果
99.0	−0.86	−1.32	通过
99.6	−0.87	−1.32	通过
204.0	−1.04	−1.32	通过
244.0	−1.26	−1.32	通过

由表 7 可知:在标准荷载效应组合下,主拉应力最大值出现在支点位置,最大主拉应力为 1.26 MPa,小于 0.5 倍的混凝土抗拉强度,主梁斜截面抗裂验算满足 A 类预应力构件的抗裂要求。

通过对上部结构承载能力极限状态及正常使用极限状态验算,桥梁上部结构承载能力能够满足大件运输车辆沿桥梁中心线安全通行的需求。

6 大件车通行安全监控

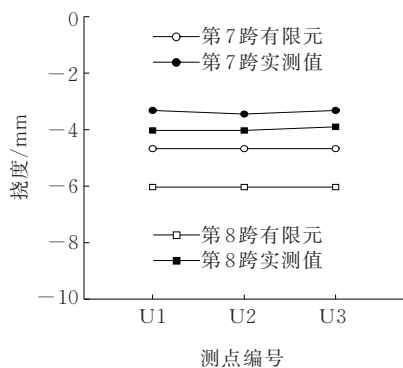
为进一步确保大件车通行过程中的安全性,减小运输车辆对桥梁结构产生的动力效应,车辆以不大于 5 km/h 的速度匀速通行,避免大件车在桥梁上制动、变速、停留,运输车辆过桥期间,进行临时交通管制。大件车吨位存在较大差异,为了进一步确保大件车通行过程的行车安全,大件车以吨位从小到大的顺序通过桥梁,并在通行过程中对桥梁跨中挠度和应变实施监测,当小吨位大件车通行过程中出现实测挠度及应变值超出有限元计算结果时,立即停止后续大吨位大件车的通行,避免对桥梁结构造成损伤。

不同吨位大件车通行过程中跨中最大挠度及应变的横向分布如图 7、8 所示。由图 7、8 可以看出:大件车通行过程中,主梁跨中挠度与应变实测值均未超出有限元计算值,表明通过有限元分析得出的桥梁安全评估结果是可靠的。

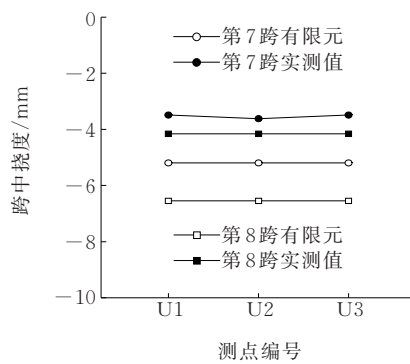
图 9 为 244.0 t 大件车通行过程中第 7 跨和第 8 跨跨中挠度随时间的变化曲线。由图 9 可以看出:与大件车通行过程相对应,各片梁的跨中挠度随时间增加先逐渐增大然后减小,且大件车通行后各片梁跨中挠度为 0,不存在不可恢复的变形,表明各片梁在大件车通行过程中处于弹性状态,且大件车通行未对桥梁结构造成损伤。

7 结论

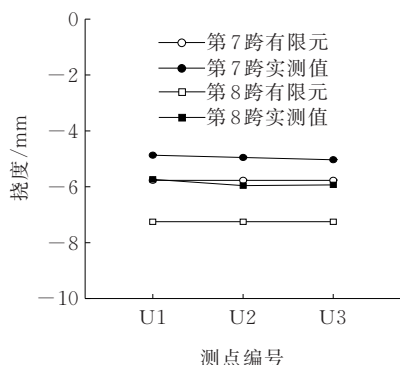
(1) 根据桥梁外观检测和无损检测确定的桥梁技术状况等级为 A 类,结构承载能力分项检算系数 Z 为 1.0,承载能力恶化系数 ξ_s 为 0.050,截面折减系数 ξ_c 、钢筋截面折减系数 ξ_s 均为 1.0。



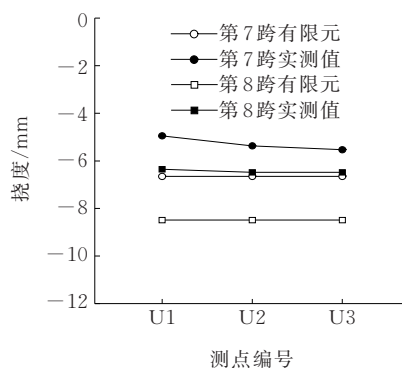
(a) 99.0 t



(b) 99.6 t

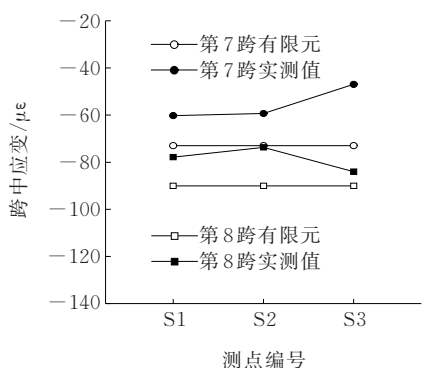


(c) 204.0 t

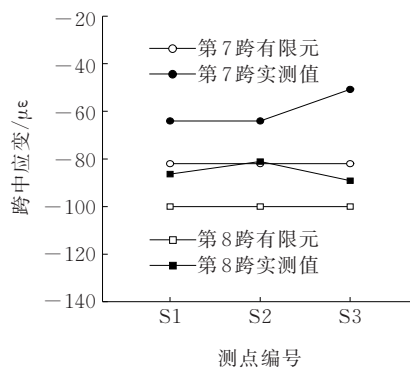


(d) 244.0 t

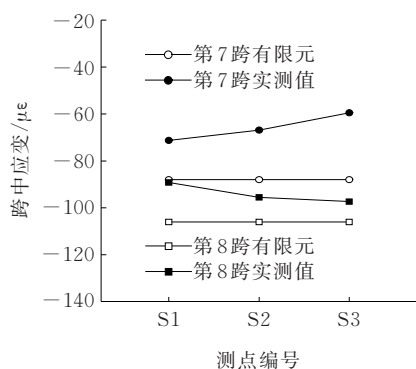
图7 跨中挠度实测最大值与有限元计算值对比图



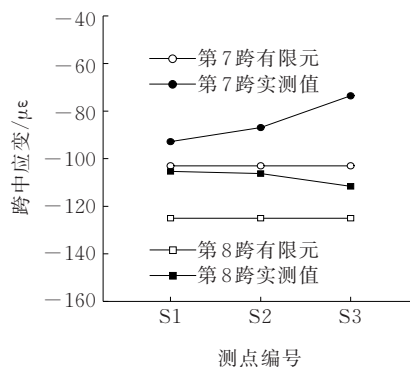
(a) 99.0 t



(b) 99.6 t



(c) 204.0 t



(d) 244.0 t

图8 跨中应变实测最大值与有限元计算值对比图

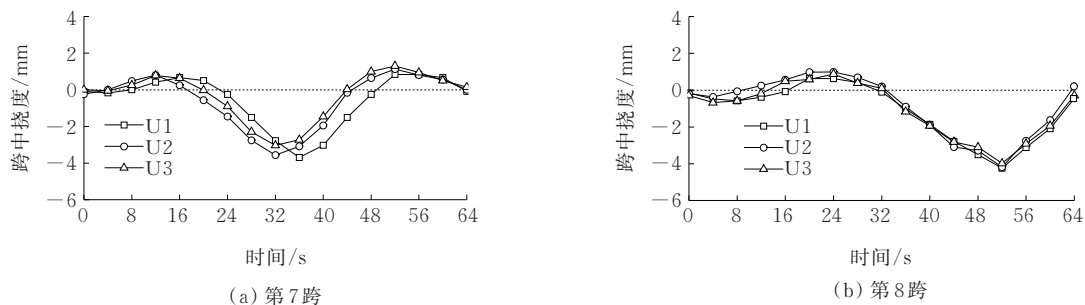


图9 跨中挠度随时间变化图

(2) 通过实测数据对实桥有限元模型进行了验证,在此基础上,对依托工程进行了承载力安全评估,结果表明:桥梁上部结构承载能力能够满足大件运输车辆沿桥梁中心线安全通行的需求。

(3) 通过实时监测系统对大件车通行期间的技术状况进行监控,结果表明:大件车通行期间,桥梁处于弹性状态,大件车通行未对桥梁结构造成损伤。

参考文献:

- [1] 李键,钟明全,吴海军,等.桥梁技术状况对公路大件运输承载力的影响[J].公路,2016,61(11):84-89.
- [2] 杨超斌.桥梁通行大件运输车辆安全监测及评估方法研究[D].天津:天津大学,2016.
- [3] 李巧艺,单奇,叶运广.公路大件运输货物安全仿真分析[J].公路,2017,62(3):183-188.
- [4] 刘林,郎凯.大件运输过程中桥梁技术状况检测与评估[J].城市道桥与防洪,2020(6):169-171,180,22.
- [5] 贺拴海,郭琪,宋一凡,等.RC桥梁健康状况及承载能力的动力评估试验[J].长安大学学报(自然科学版),2003,23(6):36-39.
- [6] 张宇峰,段鸿杰,马志国.基于准静态荷载试验的梁式桥梁状态快速评定[J].现代交通技术,2009,6(5):21-24.
- [7] 张文献,刘心亮,罗冰,等.通过裂缝特征快速评估桥梁承载能力的试验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2008,29(9):1346-1349.
- [8] 北京市政路桥管理养护集团有限公司,振华集团(昆山)建设工程有限公司.城市桥梁养护技术规范:CJJ 99—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [9] 陈树礼,刘永前.城市与公路桥梁技术状况评定方法对比分析[J].建筑科学与工程学报,2018,35(3):95-103.
- [10] 刘松柏.在役桥梁技术状况评定方法对比分析[J].冶金丛刊,2016,1(11):51-52.
- [11] 朱星虎.在役桥涵状况检测及量化评估研究[D].西安:长安大学,2010.
- [12] 王玉昌,武彦池,何能,等.在役混凝土桥梁大件车过桥安全评价[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(7):146-149.
- [13] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [14] 上海市市政工程设计研究总院.城市桥梁设计规范:CJJ 11—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [15] 任晓辉,张宏.公路大件运输中桥梁通行安全性评估及临时加固[C]//交通部公路科学研究院,东南大学.全国既有桥梁加固、改造与评价学术会议论文集.北京:人民交通出版社,2008.
- [16] 王练柱,邵永军,张士兵,等.大件运输车辆通行桥梁安全快速评估的算法实现[J].公路交通科技(应用技术版),2015,11(12):21-22.
- [17] 李文杰,侯天宇,赵君黎,等.基于可靠度理论的混凝土桥梁安全性评估方法研究[J].公路交通科技,2017,34(4):87-92.