

中小跨混凝土梁桥和大跨径桥梁健康监测差异初探

吴海军¹, 陈泓玮¹, 屈浩然²

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 重庆市轨道交通集团有限公司)

摘要:随着健康监测系统在大跨径桥梁管养中的实践和经验积累,一些中小跨混凝土梁桥也逐步安装健康监测系统来掌握桥梁的运营状态。现有健康监测相关技术标准和规范主要用于指导大跨径桥梁,与中小跨桥梁结构的受力特点存在一定的差异。该文建立了大量具有代表意义的中小跨混凝土梁桥和典型大跨径连续刚构桥计算模型,对比分析了两者在恒活载比例、超重载荷影响、健康监测方法和监测参数4个方面的差异,得到以下结论:与大跨径桥梁相比,中小跨混凝土梁桥活载比例明显较大,可达到恒活载总和的50%左右;中小跨混凝土梁桥和大跨径连续体系桥梁的影响线长度及方向差异较大,中小跨混凝土梁桥需特别关注超重载荷的影响;中小跨混凝土梁桥活载及温度等变形较小,但应力响应量值显著,是健康监测的重点参数。

关键词:健康监测;恒活载比;监测参数;差异探讨;超重载荷

据不完全统计,在中国公路桥梁中,中小桥的占比达95%以上,在城市道路中中小桥占比更多。中小跨桥梁由于数量众多,其健康状况是影响桥梁管养安全及交通顺畅的关键问题。长期以来,中小跨混凝土梁桥等一般桥梁存在受重视程度较低、检查养护管理工作力度相对较弱和病害隐患发现及处治不及时等问题。例如,2011年7月15日钱塘江三桥引桥,由于未及时发现空心板铰接缝损伤垮塌,造成了无法挽回的损失。陈宇哲等对72起运营阶段桥梁事故调查统计,发现运营阶段事故主要集中在中小跨桥梁中。然而针对运营期桥梁开展健康监测是掌握其健康和状况的手段之一。

目前,国内外桥梁健康监测主要集中于大跨径桥梁领域,通过梳理相关研究现状可知,常规大跨径桥梁的监测系统构建方法和预警指标直接应用于中小跨桥梁存在以下问题:①大跨径桥梁和中小跨桥梁的监测系统成本差别很大;②大跨径桥梁和中小跨桥梁在受力特点及运营期活载作用影响规律方面存在明显差别;③现有桥梁健康监测标准和规范是相关部委和协会针对大跨径桥梁的重要性和结构特点编写的,对于中小跨桥梁并不能完全适用。故探讨中小跨桥梁的监测和安全评估与大跨径桥梁的差异非常必要。

该文通过分析中小跨混凝土梁桥和大跨径混凝土

桥梁在活载效应占比、活载对健康监测参数影响及结构影响线分布规律等方面的差异,讨论中小跨混凝土梁桥的监测指标、数据采集方法和预警指标阈值的选取思路,为建立中小跨混凝土梁桥的监测系统提供建议。

1 作用总响应构成差异分析

桥梁健康监测是通过桥梁运营期间的作用响应,特别是活载作用产生的变形、应力、振动等参数进行监测,通过分析其变化量值及规律进行桥梁健康状况的诊断和评估。因此,认识桥梁的作用响应特点和规律对于健康监测系统的合理构建具有重要意义。

1.1 大跨径桥梁总响应构成

为研究大跨径桥梁恒活载响应的组成规律,该节选取5座连续刚构桥或连续梁桥,根据设计图纸建立有限元模型。设活载响应比例用 η_1 表示,恒载响应组成用 $\eta_2=1-\eta_1$ 表示,定义其计算表达式如下:

$$\eta_1 = \frac{\gamma_2 M_{Q1} (1 + \mu)}{\gamma_2 M_{Q1} + \gamma_1 M_G} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_{Q1} 为汽车荷载响应标准值; M_G 为恒载响应标准值。此处定义荷载标准值组合为组合1,此时 γ_1 和 γ_2 分别为组合1中恒载效应和汽车活载对应的系数,取1.0。

收稿日期:2020-07-21(修改稿)

基金项目:重庆市科委民生项目(编号:cstc2017shmsA3002);重庆市公路局科研项目(编号:0611-BT1600400531A)

作者简介:吴海军,男,博士,教授. E-mail:583921237@qq.com

计算 5 座实桥最大负弯矩截面(墩顶截面)总响应 组成及恒活载比,结果如表 1 所示。

表 1 大跨径桥梁恒活载比例

跨径组合/ m	桥型	截面类型	主梁 材料	桥宽/ m	设计荷载	恒载响应/ (kN·m)	活载响应/ (kN·m)	η_1 / %	η_2 / %
58+100+58	连续梁桥	单箱双室	C50	11.5	公路 I 级	5.43×10^5	3.92×10^4	6.7	93.3
55+145+55	连续刚构	单箱单室	C50	15.0	公路 I 级	3.44×10^5	2.55×10^4	6.9	93.1
88.1+146+88.1	连续刚构	单箱单室	C50	8.5	公路 I 级	1.19×10^6	1.17×10^5	8.9	91.1
95+180+95	连续刚构	单箱单室	C50	9.0	公路 I 级	1.37×10^6	1.10×10^5	7.4	92.6
130+3×230+130	连续刚构	单箱单室	C50	11.5	公路 I 级	2.88×10^6	2.19×10^5	7.1	92.9

1.2 中小跨混凝土梁桥总响应构成

中小跨混凝土梁式桥主要以静定结构为主,其中简支形式主梁占很大比例。简支梁桥的结构响应主要由恒载、汽车活载构成,计算活载效应内力应考虑汽车冲击系数,冲击系数按照文献[6,7]规定计算:

$$f = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0.05, & f < 1.5 \end{array} \right.$$

$$\mu = \left\{ \begin{array}{ll} 0.1767 \ln f - 0.0157, & 1.5 \leq f \leq 14 \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0.45, & f > 14 \end{array} \right.$$

式中: I_c 为截面抗弯惯矩; E 为弹性模量; m_c 为结构跨中单位长度质量; f 为频率(Hz); μ 为冲击系数。

选取 2008 交通部桥梁上部结构通用图桥面宽度为 11.25 m,跨径分别为 20、25、30、35 和 40 m 的 T 梁,其跨中横断面构造见图 1~5,空心板梁桥的通用版图此处不示出。其冲击系数计算结果见表 2。

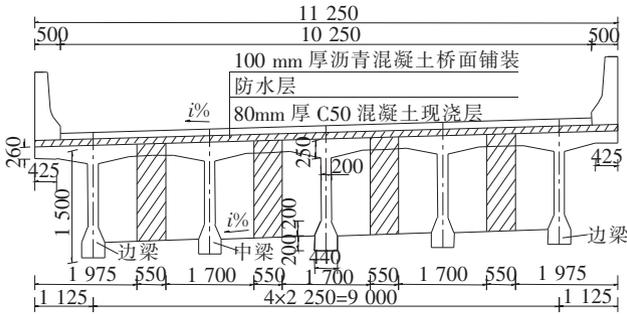


图 1 20 m 跨径、11.25 m 宽 T 梁跨中断面图(单位: mm)

该节计算上述跨径的 T 梁和空心板梁(10、13、16 及 20 m)响应组成及恒活载比。通过横向分布系数计算中梁荷载,旨在与 1.1 节中大跨径桥梁的恒活载比例进行对比分析。依据文献[7]选择荷载组合中的标准值组合、频遇值组合和准永久值组合,依次命名为组合 1、2 和 3,并将对应的系数取值列于表 3。利用式(1)分别计算 3 个组合下的活载占比,绘于图 6、7。

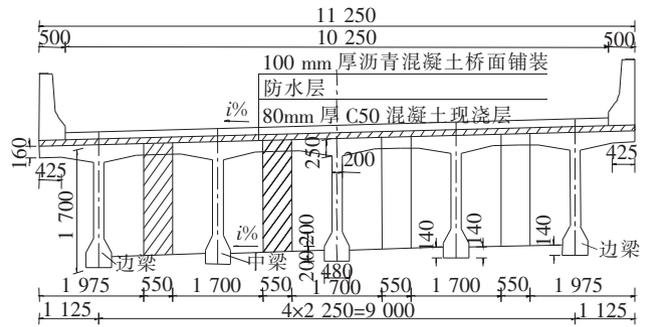


图 2 25 m 跨径、11.25 m 宽 T 梁跨中断面图(单位: mm)

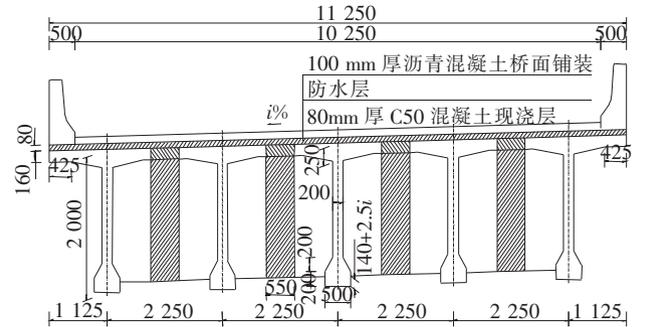


图 3 30 m 跨径、11.25 m 宽 T 梁跨中断面图(单位: mm)

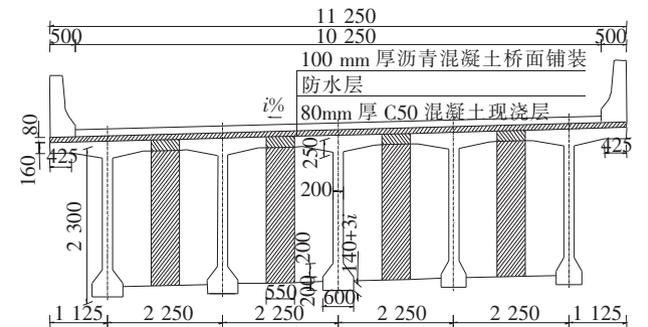


图 4 35 m 跨径、11.25 m 宽 T 梁跨中断面图(单位: mm)

1.3 恒活载比例分析

分别对具有代表性的大跨径混凝土桥梁和通用图中的混凝土简支 T 梁(空心板)桥的恒活载比例进行分析,得到如下结论:

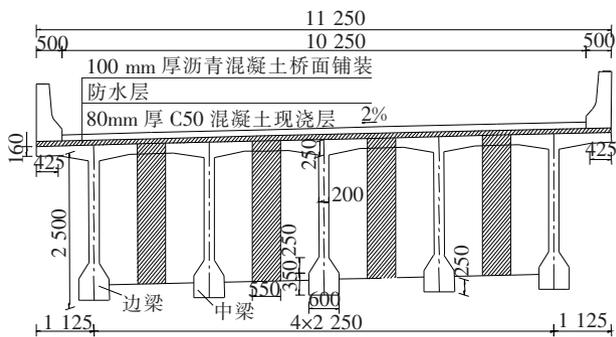


图5 40 m跨径、11.25 m宽 T梁跨中断面图(单位: mm)

表2 桥宽 11.25、12.75 m 的简支 T梁汽车活载冲击系数

跨径/m	不同桥宽(m)时的冲击系数	
	11.25	12.75
20	0.349	0.350
25	0.294	0.293
30	0.260	0.260
35	0.234	0.235
40	0.205	0.205

表3 不同组合下系数取值

组合	γ_1	γ_2
组合 1(标准值组合)	1.0	1.0
组合 2(频遇值组合)	1.0	0.7
组合 3(准永久值组合)	1.0	0.4

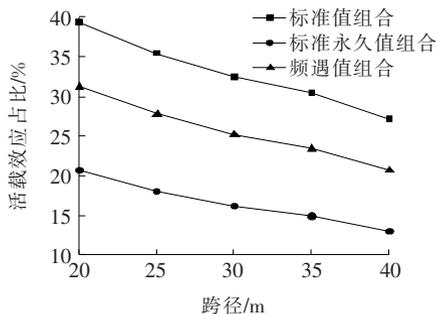


图6 11.25 m宽 T梁桥中梁不同跨径恒活载比例

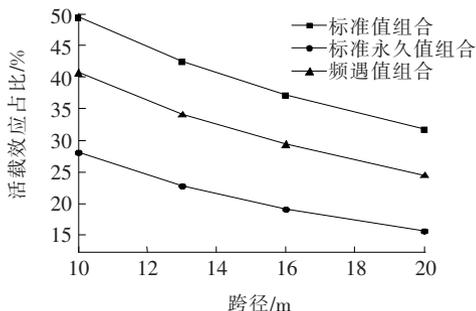


图7 11.25 m宽空心板梁桥中梁不同跨径恒活载比例

(1) 从跨径角度分析,桥梁结构的恒活载比例大体呈现随跨径增大,活载效应占比减小的趋势。

(2) 大跨径桥梁在标准组合下活载占比一般低于10%,而规范图中的10 m空心板梁恒活载比例可达49.44%。

(3) 当实际通行的活载出现一定比例的超载时,实际活载占比会显著增大。

2 超重载荷的影响差异

基于前文的结构响应组成及恒活载比例关系,超载可能对中小跨桥非常不利。梁玉坤研究了超载车辆在疲劳损伤度方面对简支梁桥的影响,得到在跨径25 m的工况下,车重增大2.2倍时,损伤度增大到18.9倍,可见超重车辆荷载对中小跨径梁桥的局部效应影响很大。同时,此差异也可从结构的影响线角度剖析。

2.1 两种体系的影响线差异

大跨径连续体系桥梁以(88.1+146+88.1) m三跨连续双肢薄壁刚构桥为代表,其截面为单箱单室,材料选用C50混凝土。利用有限元软件Midas/Civil建立该连续刚构桥平面杆系模型,其中左薄壁墩高22.5 m,右薄壁墩高17 m,壁厚1.8 m。通过软件自带的影响线求解,提取左墩右薄壁截面和跨中截面沿纵桥向弯矩影响线,结果如图8、9所示。

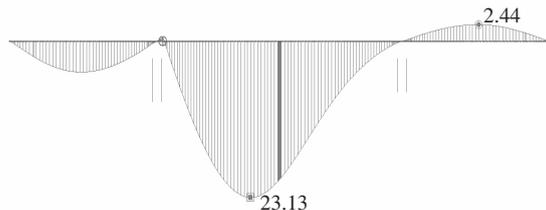


图8 主跨146 m连续刚构墩顶截面弯矩影响线(单位:m)

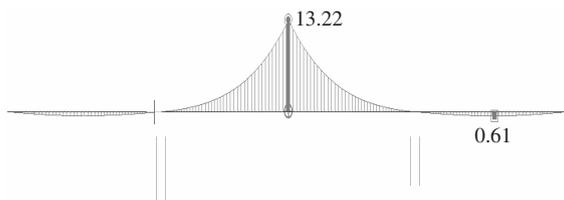


图9 主跨146 m连续刚构跨中截面弯矩影响线(单位:m)

中小跨混凝土梁桥以跨径为20 m,桥宽为12 m的简支T梁桥为代表,利用机动法求得简支梁跨中截面(关心截面)的弯矩影响线如图10所示。

从图8~10可得:属于静定体系的简支梁弯矩影响线单侧分布,有别于属于超静定体系的连续刚构,可

见连续刚构较之简支梁对重载更有“包容性”；连续刚构的跨中弯矩影响线相对墩顶截面弯矩影响线分布更集中于单侧，与静定体系分布形式接近。

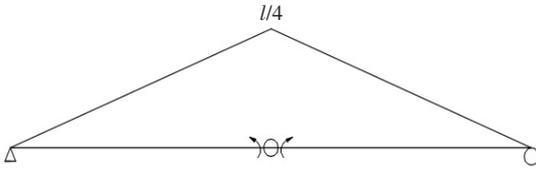


图 10 20 m 长 12 m 宽简支梁桥截面弯矩影响线

2.2 超重载荷对两种体系的影响分析

分别采用 55 t 的标准车和 110、220 t 的超重车，沿纵桥向按最不利情况布置，计算可得单辆标准车或超重车作用下连续刚构墩顶、跨中截面以及简支梁跨中截面的重载弯矩占比(图 11)。针对中小跨梁桥，重载车辆沿桥面具有鲜明的分布规律，使局部响应集中于某片梁，故可认为横向分配系数 $m \geq 0.5$ 。

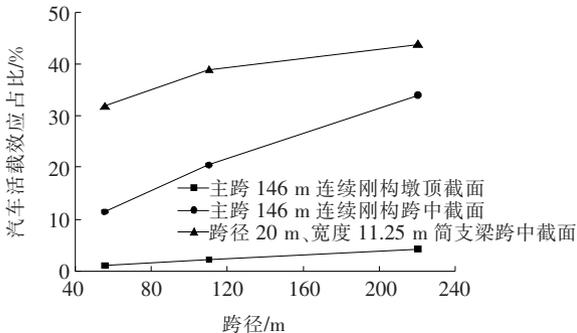


图 11 大跨径桥梁与中小跨混凝土梁桥不同车重下车辆荷载最大占比对比

中小跨桥和大跨径桥梁对超重载荷的响应不同，可得到以下结论：

(1) 对于同一超重车辆来说，中小跨梁桥和大跨径桥梁存在明显差异，在健康监测中应予以充分区别，在健康监测中排除中小跨桥梁的“假安全”状态。

(2) 中小跨简支梁桥的内力影响线是同号的，车轮荷载是叠加的，而大跨径连续体系桥梁由于结构超静定，在多车辆的作用下，可能出现关心截面内力抵消现象，对结构有利。

(3) 中小跨混凝土梁桥往往是静定结构，一旦出现塑性铰，结构即破坏，应避免其在超重载荷下，出现承载力明显不足的意外破坏。

3 监测系统与方法选取差异分析

现有的监测设备能够采集到的响应组成可用下式

表示：

$$r_z = r_d + r_t + r_v + r_s \quad (5)$$

式中： r_z 、 r_d 、 r_t 、 r_v 、 r_s 分别为总响应值、恒载响应值、温度响应值、车辆荷载响应值、随机荷载响应值。

前文内容相互印证可得到一个核心结论：中小跨混凝土梁桥对于汽车活载或偶然超载必须重视。这就对中小桥的健康监测方法提出了要求。常规的健康监测方法可分为两种：基于恒载状态变化和着重考虑活载效应的监测方法。

3.1 基于恒载状态变化的监测方法分析

基于恒载状态变化的监测分析方法，以恒载状态为监控指标，关注长期存在的恒载量值变化。其中恒载状态参数比较法，比较恒载结构响应和基准状态响应，分析两者的参数差异，据此判断监测位置的构件和结构整体的性能演变情况。例如：武汉阳逻长江公路大桥选用恒载状态参数比较法，以 0.1 Hz 的测点频率长期监测了该桥的线形。

经研究发现，基于恒载状态变化的监测方法应注意以下问题：

(1) 获取运营期间无活载及复杂温度影响的恒载条件下监测参数是关键问题。

(2) 同时恒载、活载量值及比例的大小影响该方法应用的有效性，有些结构即使存在开裂等损伤，但在活载卸除后、恒载作用下结构仍能够处于良好状态。

(3) 此方法对监测设备安装时间有所区分。对于施工阶段即预先安装的监测系统，基准状态信息包含了恒载的直接影响，初始监测数据绝对量值较大；成桥后安装监测系统的桥梁，其基准状态信息主要是“没有不均匀温度及活载影响的初始监测数据”，以此为基准比较分析。

3.2 考虑活载响应的监测方法分析

考虑活载响应的监测方法往往通过比较活载条件下的结构状态与设计合理状态之间参数的变化或者偏差来评价结构性能状态。温度场、风场等荷载的实时监测已被广泛应用于大跨径桥梁的健康监测。包络控制是检验承载能力是否包含实际效应的方法，不涉及主观权重假设，较为客观。王波等采用活载效应统计最值包络法，通过比较结构活载效应最大值与理论阈值，计算结构受力富余系数，据此判断结构强度和刚度变化情况。钢结构桥梁健康监测中，亦有利用监测数据计算承载能力利用率来反映构件承载能力的富余程度。在中小跨径桥梁领域，动应变监测和动应变相关系数 ρ_{ij} 已被用于判别装配式桥梁铰缝间的联系性。

基于活载响应可以有不同的监测和评价方法,但是其整体的特点是鲜明的:

(1) 能否获取活载对结构的完整影响,特别是不漏掉较大的活载响应是重要的。

(2) 采样频率、数据的完整性及预警阈值之间密切相关,数据完整性不同,采取的预警阈值应该有所差异,不能使用一种标准。

3.3 中小跨混凝土梁桥和大跨径桥梁监测系统选取差异分析

中小跨混凝土梁桥和大跨径桥梁的监测系统选取应考虑前文差异分析内容。由于中小跨梁桥和大跨径桥梁在恒活载比例及超重载荷影响两个方面存在差异,故两者的健康监测预警方法也应以予以甄别,同时在监测系统的选取上也应分开考虑,具体如下:

表4 一般大跨径桥梁和中小跨梁桥监测系统选取差异

桥型	监测方法	监测设备频率	关键问题	预警阈值
无特殊要求大跨径桥梁	基于恒载效应	可选低频率	剔除活载和复杂温度影响	不依赖于数据完整性
中小跨混凝土梁桥	必须考虑活载响应和超重载荷	宜选合理高频率	去除温度影响	依赖于数据完整性

4 基于汽车活载效应混凝土梁桥健康监测参数分析

据安全监测规范可知,桥梁的监测内容包括荷载与环境、结构整体响应和局部响应。而混凝土梁桥应侧重于结构响应的监测,该节针对主梁挠度和截面应力这两类参数分析。选择第2节中的大跨度梁桥和简支T梁桥的汽车荷载下的挠度和应力,对比分析中小跨混凝土梁桥和大跨径桥梁的主要监测参数差异。

4.1 主梁变形

选取桥宽11.25 m,跨径20、30和40 m的简支T

(1) 从结构响应上分析,中小跨梁桥具备活载响应值占总响应值的比例远大于大跨径桥梁的特点,同时超重车辆对于中小跨梁桥的效应显著。原则上,中小跨桥梁应着重对活荷载的监测,不能套用恒载状态参数比较法。

(2) 从监测效力上分析,由于大跨径桥梁车辆荷载受到监测的时程很长,采用低频率监测设备仍能得到数量可观的测点数据,对于后期分离和提取活载信号起到一定的保障作用;对于中小跨梁桥,跨度小,车辆驶过时,低频率监测设备难以保证关心截面的活载响应的峰值得以监测,监测数据对中小跨桥梁的健康监测没有实际意义。

一般大跨径桥梁和中小跨混凝土梁桥监测系统选取差异见表4。

梁,建立单梁模型并考虑其最不利状况。计算活载变形并考虑汽车冲击系数(表2)。

分别计算出JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》和JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》的20、30、40 m简支梁在汽车活载不同工况作用下的竖向变形,取活载响应的准永久值($0.4q_l$)、频遇值($0.7q_l$)、标准值($1.0q_l$)以及冲击效应值($1+\mu$)。20 m T梁变形计算结果列于表5,同时将20、30和40 m的活载变形标准值绘于图12。从2.1节中建立的连续刚构模型中提取汽车荷载作用下大跨径桥梁的主跨跨中竖向变形,并将结果列于表6。大跨径桥梁和中小跨混凝土梁桥跨中挠度 s 以及挠跨比 s/l 计算结果

表5 两种规范不同活载系数下20 m T梁的竖向变形

截面位置	JTG D60—2004/mm				JTG D60—2015/mm			
	$0.4q_l$	$0.7q_l$	$1.0q_l$	$1.35q_l$	$0.4q_l$	$0.7q_l$	$1.0q_l$	$1.35q_l$
L/8	0.71	1.25	1.78	2.40	0.84	1.47	2.10	2.83
L/4	1.50	2.62	3.74	5.04	1.76	3.08	4.39	5.93
L/2	2.22	3.88	5.55	7.48	2.61	4.57	6.53	8.80

表6 某实际连续刚构桥汽车活载竖向变形

跨径布置/ m	桥型	截面	材料	竖向变形/mm		
				左边跨中点	主跨中点	右边跨中点
88.1+146+88.1	连续刚构	单箱单室	C50	14.14	36.72	13.02
88.8+160+88.8	连续刚构	单箱单室	C50	9.61	36.22	9.61
125+220+125	连续刚构	单箱单室	C50	15.43	45.48	10.86

对比如表 7 所示。

表 7 大跨径桥梁和中小跨梁桥活载挠度对比

大跨桥主跨 s/m	跨中挠度 l/mm	s/l	中小桥跨径 s/m	跨中挠度 l/mm	s/l
146	36.72	0.000 3	20	6.53	0.000 3
160	36.22	0.000 2	35	11.53	0.000 3
220	45.48	0.000 2	40	15.01	0.000 4

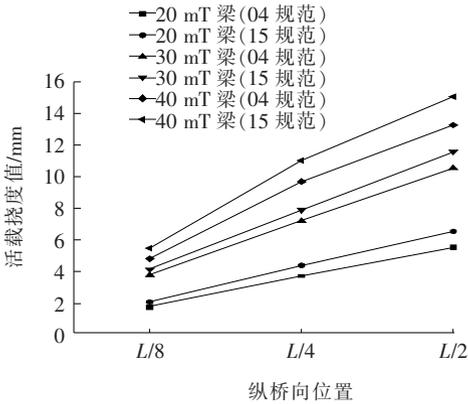


图 12 汽车活载作用下不同跨径简支 T 梁竖向位移

表 8 15 规范下 20 m 简支 T 梁桥汽车活载应力

截面位置	活载作用上缘压应力/MPa				活载作用下缘拉应力/MPa			
	$0.4q_l$	$0.7q_l$	$1.0q_l$	$1.35q_l$	$0.4q_l$	$0.7q_l$	$1.0q_l$	$1.35q_l$
L/8	0.49	0.86	1.23	1.66	0.97	1.69	2.42	3.26
L/4	0.88	1.54	2.20	2.97	1.81	3.17	4.53	6.11
L/2	1.20	2.11	3.01	4.06	2.46	4.31	6.16	8.31

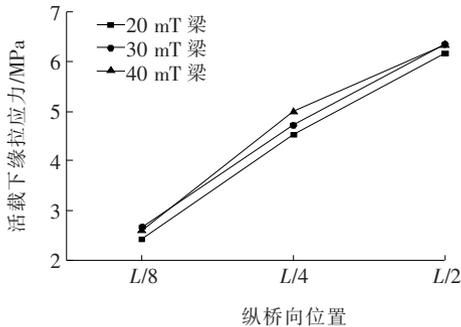


图 13 汽车活载作用下不同跨径简支 T 梁桥下缘应力

对于同一截面,大跨径桥梁的活载响应量值变化很小,当跨径达到 160 m 时,量值在 2 MPa 左右。对比可以发现,对中小跨梁桥的健康监测,应力监测必须配备高频率的监测设备,避免汽车活载使结构响应的数据丢失,导致结构损伤未能及时发现而酿成事故。这个结论与前文的结论可以相互印证。

由表 5~7、图 12 可知:

(1) 汽车活载作用下,中小跨混凝土桥的跨中挠曲小于大跨径桥梁,两者处于同一数量级,且其挠跨比相近,符合结构变形计算理论中外载和结构尺度共同控制变形量值的实际情况。

(2) 中小跨梁桥的跨径较小,挠度量值小,在保证精度的时候难以保证其经济性。

4.2 截面应力

变形属于结构整体响应,应力、应变属于结构局部响应。大跨径混凝土梁桥截面大,其局部响应可能代表性欠佳;然而中小跨混凝土梁桥具有截面小、跨径小且活载占比大的特点,重车经过时,局部响应显著,故其活载截面应力表现与大跨径桥梁截然不同。依据 15 规范,提取 4.1 节中模型上下缘应力数据,将 20 m 简支 T 梁数据列于表 8,同时将 20、30 及 40 m 梁桥下缘拉应力数据绘制于图 13。

从表 8 可见:汽车活载往往会引起中小跨径混凝土梁桥的关心截面例如 $L/8$ 、 $L/4$ 和 $L/2$ 截面的应力量值发生明显变化,且变化幅度很大。而通过计算发现:

5 结论

(1) 中小跨混凝土梁桥的活载所占比例远高于大跨径桥梁,故健康监测中不应忽略结构活载响应。

(2) 基于过滤活载效应后的长期恒载效应变化实施健康监测的方法不适宜于中小跨混凝土梁桥,但对恒载占比极高的大跨径桥梁可选用此法。

(3) 中小跨混凝土梁桥的活载占比高,加之影响线范围小、量值大,故局部超重车辆荷载对结构的影响显著;而大跨径桥梁活载占比小,加上影响线长、量值小,再叠加上反号影响线范围其他活载的影响,局部重车的影响相对较小。

(4) 中小跨混凝土梁桥的健康监测宜选用高频率的监测设备和建立基于活载效应的评价系统。

(5) 中小跨混凝土梁桥在活载效应下,应力量值