

# 基于运营安全性能评价的城市轨道交通大跨度梁式桥变形控制标准研究<sup>\*</sup>

李国龙 高芒芒<sup>\*\*</sup> 杨静静 赵文博 尤明熙 张煜

(中国铁道科学研究院集团有限公司基础设施检测研究所,100081,北京//第一作者,助理研究员)

**摘要** 借鉴圆曲线离心加速度的理念,参考轨道动态质量容许偏差管理限值,以典型的刚构桥和连续梁桥为实际案例,针对大跨度梁式桥进行车-线-桥动力响应分析。首先,分析无初始变形条件下的车辆动力响应,进而确定其与管理标准中车体加速度的差值,以此初步确定桥梁的允许变形限值;然后,综合考虑多种荷载工况和轨道随机不平顺,进行车-桥动力响应分析,以验证和修正最终结论。对于大跨度梁式桥,研究结果表明:满足竖向变形要求的总挠跨比行车安全限值取1/750,预警值取1/1 050;满足横向变形要求的总挠跨比安全限值取1/1 500,预警值取1/2 500;梁端折角的安全限值取5‰,预警值取3.5‰;梁体扭转竖向变形差的安全限值取10 mm,预警值取8 mm。

**关键词** 城市轨道交通;大跨度连续梁桥;变形控制;运营性能评价

**中图分类号** TU446;U448.21

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2020.11.011

## Deformation Control Standards of Urban Rail Transit Long-span Beam Bridge Based on Operation Safety Performance Evaluation

LI Guolong, GAO Mangmang, YANG Jingjing, ZHAO Wenbo, YOU Mingxi, ZHANG Yu

**Abstract** Drawing on the concept of circular curve centrifugal acceleration and referring to the track dynamic quality tolerance management limits, taking the rigid frame bridge and the continuous beam bridge as the practical cases, vehicle-track-bridge coupling dynamic analysis is conducted. Firstly, the vehicle dynamic response under no initial deformation condition is analyzed, the difference between which and the car body acceleration in the management standard is found, and the allowable deformation limit of the bridge is primarily determined. Then, considering various load conditions and track geometry irregu-

larity, the vehicle-bridge dynamic response analysis is carried out in order to verify and correct the final conclusion. For long-span beam bridge, research results show that: to satisfy the vertical deformation requirement, the driving safety limit of the total torsion span ratio is 1/750, the warning limit is 1/1 050; to satisfy lateral deformation requirement, the safety limit of total torsion span ratio is 1/1 500, and the warning limit is 1/2 500. The safety limit of rotation angle at bridge end is 5‰, and the warning limit is 3.5‰; the safety limit of beam torsion vertical deformation difference is 10 mm, and the warning limit is 8 mm.

**Key words** urban rail transit; long-span continuous beam bridge; deformation control; operation performance evaluation

**Author's address** Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 100081, Beijing, China

大跨度桥梁在长期使用过程中,受到列车、温度、风、沉降及徐变等多种因素的共同作用<sup>[1]</sup>。国内外现有的设计规范<sup>[2-3]</sup>对各荷载组合作用下的桥梁强度提出了明确规定,但并未对荷载组合作用下的刚度提出统一限值。因此,当对大跨度梁式桥进行运营安全评价时,设计规范的各项变形限值并不能直接应用。本文借鉴圆曲线离心加速度的概念,基于运营安全分级评价,从行车性能的角度提出相应的桥梁变形控制指标,可供大跨度桥梁运营维护工作参考。

## 1 研究思路

大跨度桥梁受环境因素影响较大。由预设拱度、温度、收缩徐变、风等外部因素引起的桥梁变形

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2017YFC1500803;推荐性国家标准课题(运营-运营-综合-咨询-2017-403-51);中国铁道科学研究院集团有限公司基础设施检测研究所基金课题(2019JJXM26)

<sup>\*\*</sup> 通信作者

与施工累积变形共同作用,形成了实际的轨面状态。

常用大跨度梁式桥主要有刚构桥和连续梁桥两种形式。上海轨道交通 11 号线跨沪宁高速大桥(以下称为“上海连续梁桥”)为混凝土连续梁桥。重庆轨道交通 9 号线的嘉华轨道专用桥(以下简为“嘉华轨道桥”)为刚构桥。本文以这 2 座大跨度桥为工程案例,综合考虑《地铁设计规范》<sup>[4]</sup>的相关规定、城市轨道交通大跨度桥梁的运营特点和车辆的动力性能,研究运营性能的评价标准。由于部分涉及运营性能的指标难以通过健康监测系统测量,因此,需要把评价指标转化成桥梁的变形或振动限值。评定原则如下:

1) 对于城市轨道交通大跨度梁桥,忽略施工误差对桥面变形的影响,只考虑温度、风和徐变的作用。先分析无初始变形条件下的车辆动力响应,进而确定其与管理标准中车体加速度的差值,再以此初步确定桥梁的允许变形限值。

2) 由于大跨度桥梁的跨度已显著超出车辆的敏感波长,故引入《铁路设计规范》中离心加速度的概念,根据车体加速度限值来确定相应的曲率半径限值<sup>[5-6]</sup>。当桥面初始变形曲线的最小曲率半径达到限值时,即初步确定了桥面变形限值。

3) 对初步确定的桥面变形限值,结合轨道随机不平顺进行车-桥动力响应分析,以验证和修正最终结论。

4) 从乘坐舒适度性的角度出发,按双侧折角形式和单侧折角形式研究竖向折角限值。

5) 从乘坐舒适性角度出发,根据未被平衡的离心加速度来确定梁体扭转的竖向变形差限值。

6) 根据列车能以规定速度舒适安全运行的要求,来确定桥梁变形的安全限值。为保证结构安全,应在安全限值的基础上考虑一定的安全系数,以确定预警限值。

### 1.1 垂向变形限制研究思路

依据文献[7]规定的轨道动态质量容许偏差管理值车体加速度的控制标准,对大跨度梁式桥采用Ⅱ级舒适度标准,作为长期运营状态下车体加速度的控制标准( $1.5\text{ m/s}^2$ )。首先,计算不考虑桥梁初始变形的车体加速度,其与  $1.5\text{ m/s}^2$  之差即为桥面初始变形对应的车体垂向加速度限值  $a_y$ ; 然后,引入离心加速度  $a_r$  的概念,并按  $R=v^2/a_r$  来确定竖曲线半径最小值  $R$ , 其中车速  $v$  取  $100\text{ km/h}$ 。具体的  $a_y$  和  $R$  值见表 1。

表 1 不同桥桥面初始变形对应的  $a_y$  限值及  $R$  值

桥的结构形式	跨径分布/ m	$a_y/(m/s^2)$		$R/m$
		无初始变形	有初始变形	
连续刚构桥	38+39+48+138+252+110	1.089	0.400	1 929
连续梁桥	75.5+129.0+75.5	0.869	0.600	1 286

### 1.2 横向变形限值研究思路

特大跨度桥梁的横向变形主要受到横向轮轨力、风力、不均匀温度场及基础偏心沉降的影响。与垂向变形限值类似,横向变形限值也将列车作用和初始变形叠加后的总位移作为控制指标。风荷载作用于车辆上会直接产生车体加速度,在采用离心加速度概念确定车体横向加速度限值  $a_x$  时,需要扣除风荷载作用于车辆时的影响。

通过调研,选择桥面平均风速为  $25\text{ m/s}$  作为确定安全限值时的极限风速。根据风洞试验结果<sup>[8]</sup>,地铁车辆的风载阻力系数  $C_D=0.85$ 。风荷载  $F_D$  为:

$$F_D = \frac{1}{2}C_D\rho U^2H_cL_c \tag{1}$$

式中:

$\rho$ ——空气密度;

$U$ ——风速;

$H_c$ ——车体高度;

$L_c$ ——车体长度。

由式(1)确定  $F_D$ ,进而可求得风荷载作用于车辆时产生的车体横向加速度为  $0.486\text{ m/s}^2$ 。由于桥面平均风速为  $25\text{ m/s}$  的工况较为极端,同时考虑到桥面扭转对车辆横向响应的影响,本文最终采用《轨道动态质量容许偏差管理值》中介于临时补修标准  $1.5\text{ m/s}^2$  和限速标准  $2.0\text{ m/s}^2$  之间的车体横向加速度( $a_x=1.8\text{ m/s}^2$ )作为安全限值标准。扣除因风荷载产生的车体加速度,得到由列车通行和桥面初始变形共同作用的  $a_x$  允许限值取为  $1.3\text{ m/s}^2$ 。

忽略不均匀温度场和基础偏心沉降的影响,桥面横向初始位移主要由风荷载产生。考虑风荷载分布对桥面横向变形的影响,将两种风荷载分别等效于中跨均布荷载和全桥均布荷载,并将对应的初始变形曲线处理为附加不平顺曲线。调整附加不平顺幅值,进行车-线-桥动力仿真分析,则车体加速度达到  $1.3\text{ m/s}^2$  时对应的总横向挠跨比,即为行车安全性挠跨比限值。

## 2 变形限值的仿真计算

### 2.1 建立车辆模型

车辆模型为车体、转向架和轮对组成的多刚体系统,各部分之间通过两系弹簧阻尼连接。车体和转向架具有沉浮、横移、点头、摇头及侧滚等 5 个自由度,每个轮对具有横移和摇头 2 个独立自由度。不考虑车轮转速不均匀产生的回转,整列列车共有 23 个自由度。

钢轨处理为弹性点支承等截面 Euler 梁。采用轮轨密贴理论计算轮轨垂向接触力,采用 Kalker 线性蠕滑理论计算横向接触力。选取美国五级谱样本作为轨道随机不平顺激励。

### 2.2 垂向变形限值研究

#### 2.2.1 连续刚构桥

嘉华轨道桥为双线刚构-连续组合梁桥,跨径为 38.0 m+39.0 m+48.0 m+138.0 m+252.0 m+110.0 m,桥宽 12.5 m,线间距 5.2 m。图 1 为嘉华轨道桥有限元模型示意图。



图 1 嘉华轨道桥有限元模型示意图

分别对刚构桥施加全桥均布荷载、中跨均布荷载、边跨均布荷载,并设置整体升温 25℃ 及整体降温 20℃ 的条件<sup>[9]</sup>,从而得到不同工况条件下的桥面变形曲线(见图 2)。图 2 中,A 点为中跨加载下桥面变形曲线的曲率半径最小之处。同样可得其他工况下桥面变形的最小曲率半径,如表 2 所示。

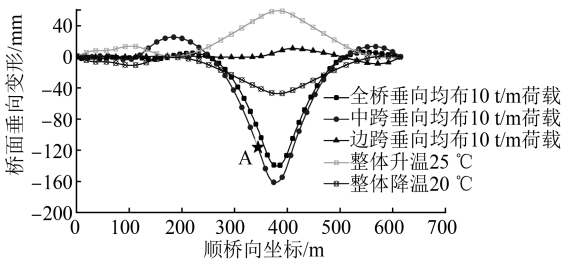


图 2 不同工况下的连续刚构桥桥面垂向变形曲线

对比分析图 2 及表 2 可知:边跨加载工况下的桥面变形较小;其他工况下,桥面变形的最小曲率半径均发生在钢结构与混凝土结合处;其中中跨均布荷载工况最为不利。

表 2 不同工况下的桥梁最小曲率半径

工况	最小曲率半径/m
全桥均布	4 691.7
中跨均布	2 145.6
边跨均布	11 434.9
整体升温 25℃	4 145.7
整体降温 20℃	2 724.3

大跨度桥梁健康监测系统的监测对象为总位移。因此,建议采用列车作用和初始变形叠加后的总位移作为控制指标。

根据表 1,由除施工累积变形之外的桥面变形而产生的车体加速度限值为 0.4 m/s<sup>2</sup>,由此可确定曲率半径限值为 2 000 m。

由表 2 可见,温度作用下的桥面变形曲率半径明显较大,故本文仅考虑全桥均布荷载和中跨均布荷载两种工况。经计算,当中跨挠跨比为 1/780 和 1/1 454 时,两种工况的曲率半径达到 2 000 m。因实际单线列车作用下的中跨跨中挠度为 43.379 mm。综合考率后计算可得,两种工况下,中跨总挠跨比分别为 1/688 和 1/1 163。故初步设定在实际列车和桥面初始变形共同作用下的中跨挠跨比为 1/1 200。

由于车辆有二系悬挂减振系统,故实际车体加速度与按刚体计算的离心加速度存在差异。为确定合理的挠跨比限值,在上述分析基础上,以中跨均布荷载作用下的桥面变形曲线为基准,调整振动幅值,进行车桥动力分析。当车体加速度接近 1.5 m/s<sup>2</sup> 时,分析得到总位移,进而得到此时对应的挠跨比为 1/750。该数据为实际采用的限值标准。对其他工况条件下桥面变形曲线也进行了计算,总挠跨比也均达到 1/750。计算结果见表 3。

由表 3 可知,当车速在 60~100 km/h 范围内时,如考虑不同形式的桥面初始变形,且总挠跨比达到 1/750,则车体加速度最大值为 1.366 m/s<sup>2</sup>,乘坐舒适度指数最大值为 2.625(相应评价位于“良”的区域),减载率最大值为 0.332,脱轨系数最大值为 0.378。综合考虑后建议:连续刚构桥的总挠跨比行车安全限值按 1/750 控制;考虑一定安全系数后,相应总挠跨比预警值按 1/1 050 控制。

#### 2.2.2 连续梁桥

连续梁桥以上海市轨道交通 11 号线跨沪宁高速大桥为工程实例进行分析。该桥为双线连续梁桥,跨径分布为 75.5 m+129.0 m+75.5 m,主梁为变截面箱形,中支点梁高 8.0 m,边支点和跨中梁高

4.0 m,桥宽 9.5 m,线间距为 4.6 m。

表 3 连续刚构桥不同工况、不同车速、总挠跨比 1/750 条件下的车辆动力响应

工况	车速/(km/h)	脱轨系数	减载率	横向轮轨力/kN	车体加速度/(m/s <sup>2</sup> )		乘坐舒适度指数	
					垂向	横向	垂向	横向
无初始变形	60	0.182	0.246	24.43	0.743	0.701	2.161	2.058
	80	0.202	0.269	26.97	0.936	0.925	2.283	2.254
	100	0.227	0.291	28.77	1.089	1.159	2.423	2.519
中跨均布荷载	60	0.306	0.278	24.42	1.058	0.700	2.591	1.939
	80	0.283	0.296	26.98	1.235	0.923	2.435	2.369
	100	0.347	0.329	28.73	1.357	1.158	2.422	2.552
全桥均布荷载	60	0.325	0.272	24.42	1.072	0.700	2.625	1.939
	80	0.308	0.291	26.98	1.248	0.923	2.449	2.371
	100	0.378	0.321	28.73	1.366	1.158	2.453	2.552
整体升温	60	0.267	0.235	24.42	0.833	0.701	2.341	1.938
	80	0.278	0.262	26.97	0.913	0.923	2.280	2.371
	100	0.345	0.294	28.73	1.096	1.158	2.369	2.551
整体降温	60	0.252	0.282	24.42	0.969	0.701	2.440	1.939
	80	0.237	0.299	26.98	1.145	0.923	2.317	2.371
	100	0.287	0.332	28.73	1.299	1.158	2.379	2.552

连续梁桥的研究思路类似于连续刚构桥。图 3 为不同工况下的桥面变形曲线,点 B 为中跨加载工况下桥面变形曲线的曲率半径最小之处。计算可得不同工况下的桥梁最小曲率半径,如表 4 所示。

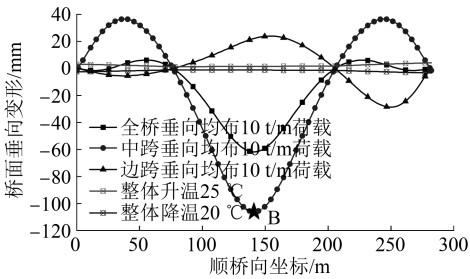


图 3 不同工况下的连续梁桥桥面垂向变形曲线

表 4 多种工况下桥梁最小曲率半径

工况	最小曲率半径/m
全桥均布	13 173
中跨均布	12 562
边跨均布	14 961
整体升温 25 °C	20 686
整体降温 20 °C	24 391

与连续刚构桥相同,连续梁桥也采用列车作用和初始变形叠加后的总位移作为控制指标。参考连续刚构桥的分析结果,在不同工况下,连续梁桥按列车作用和初始变形叠加后的总挠跨比均为 1/750,对 4 个速度等级下的车桥动力响应进行分析。其中车速为 100 km/h 时的计算结果如表 5 所示。

表 5 连续梁桥不同工况、车速 100 km/h、总挠跨比 1/750 条件下车辆动力响应

工况	脱轨系数	减载率	横向轮轨力/kN	车体加速度/(m/s <sup>2</sup> )		乘坐舒适度指数	
				垂向	横向	垂向	横向
无初始变形	0.289	0.198	29.67	0.869	1.193	2.528	2.735
边跨均布荷载	0.355	0.296	29.49	1.061	1.186	2.604	2.734
中跨均布荷载	0.350	0.345	29.54	1.146	1.185	2.563	2.735
全桥均布荷载	0.322	0.285	29.52	1.094	1.186	2.586	2.736
整体升温	0.290	0.357	29.55	1.088	1.186	2.435	2.732
整体降温	0.319	0.292	29.51	1.070	1.186	2.487	2.733

考虑不同工况下的桥面初始变形,在总挠跨比达到 1/750 后,速度为 100 km/h 时的车体最大加速度为 1.146 m/s<sup>2</sup>,竖向乘坐舒适度指数最大值为 2.890(评价位于“合格”的区域,并已接近 3.0 的合格上限),减载率最大值为 0.357,脱轨系数最大值为 0.355。综合考虑后,建议连续梁桥的总挠跨比行

车安全限值也按 1/750 控制。

2.2.3 垂向刚度限值

当总挠跨比达到 1/750 时,刚构桥对应的车体垂向加速度已接近 1.5 m/s<sup>2</sup> 的限值,连续梁桥虽然其车体垂向加速度距 1.5 m/s<sup>2</sup> 限值较远,但其乘客乘坐舒适度评价已处于合格范围,且已接近限值。

这说明设计刚度差异会引起车辆响应的不同。

从梁式桥的角度,综合考虑 2 座桥的分析结果,最终建议大跨度梁式桥的总挠跨比行车安全限值取 1/750,预警值在行车安全性限值的基础上考虑一定的安全系数,取 1/1 050。

### 2.3 横向变形限值研究

#### 2.3.1 连续刚构桥

不同工况下的连续刚构桥初始横向变形曲线如图 4 所示。调整桥面横向变形幅值,进行车-线-桥耦合动力仿真分析。当车体加速度达到或接近 1.3 m/s<sup>2</sup> 的限值时,桥面挠跨比为 1/1 500,车辆

响应见表 6。

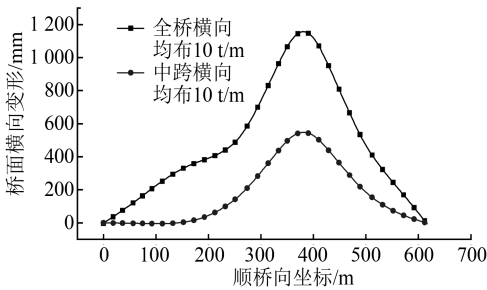


图 4 不同工况下的桥面横向变形曲线

表 6 连续刚构桥不同工况、不同车速、总横向挠跨比 1/1 500 条件下的车辆动力响应

工况	车速/(km/h)	脱轨系数	减载率	横向轮轨力/kN	车体加速度/(m/s <sup>2</sup> )		乘坐舒适度指数	
					垂向	横向	垂向	横向
无初始变形	60	0.182	0.246	24.43	0.743	0.701	2.161	2.058
	80	0.202	0.269	26.97	0.936	0.925	2.283	2.254
	100	0.227	0.291	28.77	1.089	1.159	2.423	2.519
中跨横向均布	60	0.185	0.310	32.57	0.769	0.768	2.171	1.954
	80	0.207	0.340	35.69	0.941	1.061	2.325	2.223
	100	0.227	0.339	35.86	1.121	1.309	2.550	2.523
全桥横向均布	60	0.185	0.290	30.51	0.771	0.744	2.170	1.995
	80	0.206	0.320	33.53	0.945	1.058	2.325	2.231
	100	0.227	0.322	34.05	1.120	1.309	2.550	2.492

#### 2.3.2 连续梁桥

不同工况下的连续梁桥初始横向变形曲线如图 5 所示。当总横向挠跨比为 1/1 500、车速为 100 km/h 时,车辆动力响应结果见表 7。

#### 2.3.3 横向刚度限值

当桥面整体横向总挠跨比达 1/1 500 时,车体最大横向加速度为 1.309 m/s<sup>2</sup>,横向乘坐舒适度评价为“合格”。经综合考虑,梁式桥的总挠跨比横向变形安全限值取 1/1 500,考虑一定安全系数后,

总挠跨比预警值取 1/2 500。

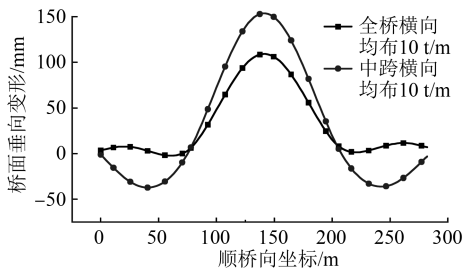


图 5 不同工况下的桥面横向变形曲线

表 7 连续梁桥不同工况、车速 100 km/h、总横向挠跨比 1/1 500 条件下的车辆动力响应

工况	脱轨系数	减载率	横向轮轨力/kN	车体加速度/(m/s <sup>2</sup> )		乘坐舒适度指数	
				垂向	横向	垂向	横向
无初始变形	0.289	0.198	29.67	0.869	1.193	2.528	2.735
中跨横向均布荷载	0.228	0.366	36.13	0.934	1.211	2.463	2.842
全桥横向均布荷载	0.232	0.357	35.25	0.934	1.208	2.455	2.850

### 2.4 竖向梁端转角限值研究

梁端竖向折角研究需考虑边跨变形的影响。根据车体自振频率特征和计算车速,确定各车速下的最不利边跨跨度,最终选取 30~40 m 作为竖向折角限值分析的波长范围。按照《城市轨道交通桥梁设计规范》的梁体竖向挠度允许值来确定振动幅值,并以余弦波不平顺作为轨道几何不平

顺,进行车-线动力响应分析。车辆的动力响应结果见表 8。

由表 8 可知,最不利波长为 36 m,根据规范中挠跨比限值 1/1 500 的标准,确定最不利振动幅值为 24 mm。分别考虑双侧折角和单侧折角等 2 种形式,将最不利振动幅值处理为轨面附加不平顺,并进行车辆动力计算。计算得到的不同梁端折角车

辆动力响应结果见表 9。

表 8 不同波长余弦波不平顺对应的车辆动力响应

余弦波长/m	车体加速度 ( $\text{m/s}^2$ )	减载率
30	0.978	0.280
32	1.346	0.309
34	1.380	0.375
36	1.390	0.406
38	1.372	0.396
40	1.329	0.371

表 9 不同梁端折角对应的车辆动力响应

折角形式	折角/ $^\circ$	车体加速度 ( $\text{m/s}^2$ )	减载率
双侧	3	1.430 736	0.406
	4	1.452 521	0.423
	5	1.475 082	0.448
	6	1.497 586	0.513
	7	1.520 146	0.579
	8	1.543 227	0.643
	9	1.566 361	0.709
	3	1.423 596	0.405
	4	1.434 925	0.421
单侧	5	1.451 223	0.437
	6	1.470 669	0.498
	7	1.490 162	0.558
	8	1.509 603	0.620
	9	1.529 090	0.680

从舒适度和行车安全性考虑,双侧式和单侧式梁端折角分别应该选取 6.0‰和 7.5‰。考虑到扣件压力的作用<sup>[10-11]</sup>,建议梁端折角的安全限值取 5.0‰;考虑一定安全系数后,建议梁端折角的预警值取 3.5‰。

2.5 梁体扭转竖向变形差限值研究

根据《地铁设计规范》,未被平衡的离心加速度限值取“乘客无感觉”与“乘客有些感觉”的临界值 ( $0.40 \text{ m/s}^2$ )。桥面的扭转可能会加剧欠超高的影响。如果不考虑列车转向架弹簧的影响,每 15 mm 的欠(过)超高就会引起  $0.1 \text{ m/s}^2$  的车体加速度<sup>[12]</sup>。由此计算可知:当梁体扭转竖向变形差达 8 mm 及 10 mm 时,未被平衡的离心加速度可分别达到  $0.450 \text{ m/s}^2$  及  $0.465 \text{ m/s}^2$ ,分别超出限值 ( $0.4 \text{ m/s}^2$ ) 约 10%及 15%;总水平不平顺分别达 19 mm 和 21 mm,均位于临时补修限值与限速限值之间。由于最大扭转角与最不利水平随机不平顺不一定位于同一位置,故梁体扭转竖向变形差为 8 mm 和 10 mm 仍具有一定的安全裕量。经综合考虑:建议梁体扭转竖向变形差的安全限值取 10 mm;考虑一定的安全裕量后,梁体扭转竖向变形差的预警值取 8 mm。

3 结论

- 1) 为保证列车运行安全和结构服役性能,需确定城市轨道交通大跨度梁式桥结构变形的安全限值和预警值。
- 2) 根据竖向变形要求,城市轨道交通大跨度梁式桥总挠跨比的行车安全限值取 1/750,预警值取 1/1 050。
- 3) 根据横向变形要求,城市轨道交通大跨度梁式桥总挠跨比的行车安全限值取 1/1 500,考虑一定安全系数后的预警值取 1/2 500。
- 4) 城市轨道交通大跨度梁式桥的竖向梁端折角安全限值取 5.0‰,考虑一定安全系数后的预警值取 3.5‰。
- 5) 城市轨道大跨度梁式桥的梁体扭转竖向变形差安全限值取 10 mm,考虑一定安全系数后的预警值取 8 mm。

参考文献

[ 1 ] CEN. Eurocode 1: Actions on Structures Part 1-6: General Actions; Annex E[ S ]. Brussels: CEN, 1999.

[ 2 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市轨道交通桥梁设计规范: GB/T 51234—2017[ S ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[ 3 ] 日本鉄道総合技術研究所. 鉄道構造物等設計標準. 同解説(変位制限)[ S ]. 东京: 丸善株式会社, 2006.

[ 4 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范: GB 50157—2013[ S ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[ 5 ] 国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB 10621—2014[ S ]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.

[ 6 ] 高芒芒,赵会东,许兆军. 高速铁路大跨度桥梁基于服役状态的健康监测指标研究[ J ]. 中国铁路, 2019( 1 ): 21.

[ 7 ] 国家铁路局. 轨道几何状态动态检测及评定: TB/T 3355—2014[ S ]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.

[ 8 ] 西南交通大学. 蔡家嘉陵江大桥车桥系统气动特性模型风洞试验[ R ]. 成都: 西南交通大学, 2017.

[ 9 ] 林同棣国家工程咨询(中国)有限公司. 重庆轨道交通九号线一期工程嘉华嘉陵江轨道专用桥初步设计说明[ R ]. 重庆: 重庆市轨道交通(集团)有限公司, 2017.

[ 10 ] 国家铁路局. 高速铁路扣件 第 4 部分 WJ-7 型扣件: TB/T 3395.4—2015[ S ]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.

[ 11 ] 魏亚辉,徐鹤寿,牛斌. 梁端无砟轨道扣件力学行为室内试验研究和数值仿真分析[ J ]. 中国铁道科学, 2010( 6 ): 43.

[ 12 ] 涂文靖. 曲线超高计算的优化方法及应用[ J ]. 铁道建筑, 2019( 2 ): 125.

(收稿日期:2019-09-16)