

长联多跨PC连续宽幅箱梁桥荷载试验研究

毛德均¹, 吴维彬², 郭俊³, 兰树伟¹, 徐佰顺⁴, 王涛¹

(1.昆明学院 建筑工程学院,云南昆明 650214;2.广西交通工程检测有限公司,广西南宁 530200;3.云南云路工程检测有限公司,云南昆明 650032;4.内蒙古大学 交通学院,内蒙古呼和浩特 010070)

摘要:为研究某市长联多跨PC连续宽幅箱梁桥的实际承载性能,该文对其开展现场静动载试验。静载试验主要测试桥梁支点沉降、控制截面的挠度和应变。动载试验包括模态试验和跑车试验,主要测试桥梁的自振频率、阻尼比和冲击系数。静动载试验结果综合表明:在正常使用状态下,该桥的承载能力满足城-A荷载等级要求,动力工作性能满足使用要求。应进一步加强规范挠度校验系数和应变校验系数正常取值范围下限值的研究。建议规范给出桥梁阻尼比正常工作取值范围。

关键词:桥梁工程;长联多跨;PC连续梁桥;宽幅箱梁;静载试验;动载试验

中图分类号:U448

文献标志码:A

0 引言

桥梁是交通运输线路的“咽喉”,重要性不言而喻。中国作为世界第一桥梁大国,已建成全球材料和结构形式最多样、区域人口最密集且交通任务最繁重、带病服役桥梁数量最多的最大规模在役桥梁群^[1]。为保障交通运输线路的正常运转,桥梁的受力性能和技术状况应及时进行评定掌握。荷载试验是通过测试桥梁结构在外部荷载作用下的静动力响应,对桥梁结构的承载能力及力学特性进行评定和分析判断的活动,包括静载试验和动载试验^[2-4]。荷载试验能够全面掌握桥梁结构的强度和刚度分布规律,是了解桥梁结构的实际受力性能、评定桥梁运营状态最直接有效的方法,被广泛应用于悬索桥、斜拉桥、拱桥等各类在役桥梁的实际工作性能评估^[5-11]。

目前,市政桥梁荷载试验主要依据《城市桥梁检测与评定技术规范》(CJJ/T 233—2015)(本文简称规范)^[2],公路桥梁荷载试验主要依据《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015)^[12],这两个规范都

是基于常见桥梁的试验经验总结而来^[13]。规范编制具有很强的阶段性,对材料和结构形式复杂多样的桥梁而言,在一定时期完成的荷载试验代表性是有限的。研究表明:现行荷载试验规范应用于大跨度桥梁承载能力评定时存在一定的局限性^[13]。因此,桥梁荷载试验规范应在相关试验经验和资料不断积累的基础上进行完善,进一步开展各类桥梁的荷载试验研究具有重要价值。

长联多跨PC连续宽幅箱梁桥具有造型简洁、行车舒适、造价低廉及施工工艺成熟等优点,当前是交通量需求大的城镇市政桥梁主要桥型^[14-15]。宽幅箱梁桥具有宽跨比较大、空间效应较强的特点,准确了解其在服役荷载作用下的力学性能与工作状态,并基于此来评价其整体安全性能,对桥梁后期运营、养护有重要价值。目前关于此类桥梁的荷载试验研究报道较少。本文依据文献[2]拟定试验方案,对位于城市主干路的某5联18跨PC连续宽幅箱梁桥进行现场静动载试验,研究该桥在设计使用荷载作用下的实际工作性能,以期为深入研究此类桥梁的荷载试验与承载性能评估方法提供参考。

收稿日期:2023-08-13(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51868034);云南省教育厅科学研究项目(编号:2021J0702,2021J0703);昆明学院引进人才科研项目(编号:XJ20220031);2023年云南省“三区”科技人才项目(编号:ZX20230237);2023年云南省科技特派员项目(编号:ZX20230180)

作者简介:毛德均,男,博士,副教授.E-mail:541089451@qq.com

1 工程概况

某跨径组合为 $(4 \times 20) \text{ m} + (26 + 40 + 26) \text{ m} + (4 \times 16) \text{ m} + (20 + 30 + 20) \text{ m} + (4 \times 20) \text{ m}$ 的现浇 PC 连续箱梁桥,为城市主干路桥梁,桥梁总长 393.8 m,宽 23.5 m。主跨采用单幅箱梁,单箱 5 室构造。箱梁顶板宽 23.5 m,底板宽 18.5 m,宽跨比 0.59~1.47。第 1、3、4、5 联为 PC 等截面箱梁,其中第 1、3、5 联梁高 1.2 m,第 4 联梁高 1.6 m。第 2 联为 PC 变截面箱梁,墩顶梁高 2.2 m,跨中梁高 1.2 m,墩顶至跨中的梁高和底板厚均按 2 次抛物线变化,箱梁典型横断面见图 1。桥墩为 RC 方形双柱墩,桥台为 U 形台,支点中心间距 11.0 m,基础为钻孔灌注桩。桥面铺装为 10 cm 厚改性沥青混凝土。设计荷载等级为城-A 级。为研究该桥在设计荷载作用下的工作性能是否满足要求,对其开展现场静动载试验。根据荷载试验代表性原则和该桥结构特点选取第 2~5 联为试验对象。

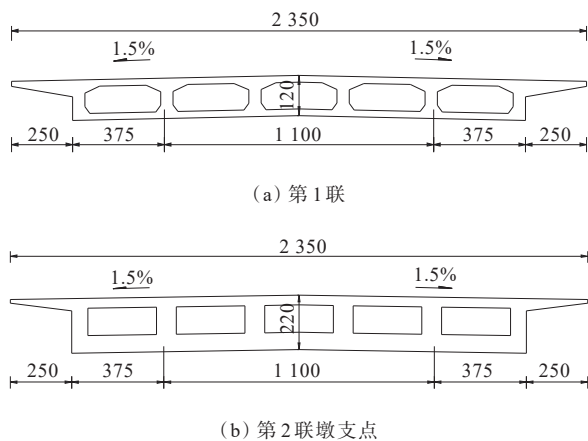


图 1 桥梁典型横断面图(单位:cm)

2 试验方法

2.1 数值模拟

采用通用桥梁分析软件 Midas/Civil 建立有限元模型,对本次荷载试验进行数值模拟。模型建立考虑了桥梁实际荷载状况,对荷载试验技术要求的各项指标进行了核算,主要包括试验荷载作用下的试验效率系数,并按影响线确定试验荷载的大小和位置,为试验方案设计提供参考。主要测试截面的应力、应变、挠度、自振频率等计算结果同时也可

为试验结果分析提供对比参照。所建立的有限元模型示例见图 2。

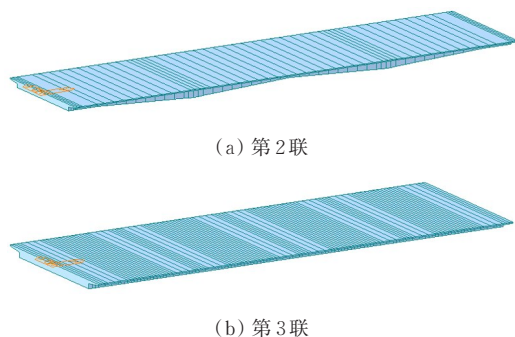


图 2 有限元模型

2.2 静载试验

静载试验主要用于研究桥梁的承载能力。根据最不利原则,本次试验主要研究该桥在最不利偏心加载作用下,主梁跨中截面的最大正弯矩、竖向挠度和支点截面的最大负弯矩是否满足使用要求。根据规范提供的方法共设计了 12 个加载工况(表 1),表 1 中的试验控制截面 A~T 和桥墩编号位置见图 3。本次试验的试验效率 η_s 为 0.85~1.05,满足规范要求。试验采用双后轴载重车加载,每辆车总轴重 30 t。工况 9 的加载车辆布置见图 4,其余工况在此不一列出。为保证安全,正式加载前先进行预载,正式加载采用分级加载。

表 1 加载工况

工况	试验对象	试验研究项目	试验效率 η_s
1	第 5 联	17 [#] 跨跨中 S 截面最大正弯矩	1.02
2		17 [#] 墩支点 T 截面最大负弯矩	1.02
3		18 [#] 跨跨中 K 截面最大正弯矩	0.98
4	第 2 联	5 [#] 跨跨中 A 截面最大正弯矩	0.89
5		5 [#] 墩支点 B 截面最大负弯矩	0.95
6		6 [#] 跨跨中 C 截面最大正弯矩	0.88
7	第 3 联	9 [#] 跨跨中 M 截面最大正弯矩	0.89
8		8 [#] 墩支点 N 截面最大负弯矩	0.92
9		8 [#] 跨跨中 P 截面最大正弯矩	0.91
10	第 4 联	14 [#] 跨跨中 D 截面最大正弯矩	0.94
11		13 [#] 墩支点 E 截面最大负弯矩	0.96
12		13 [#] 跨跨中 F 截面最大正弯矩	0.94

在 4[#]~6[#]、7[#]~9[#]、12[#]~14[#]、16[#]~18[#]墩(台)支点各布置 2 个 HY-65050F 型数码位移传感器观测支点沉降。在试验控制截面 A、C、D、F、S、K、M、P 各布置 5

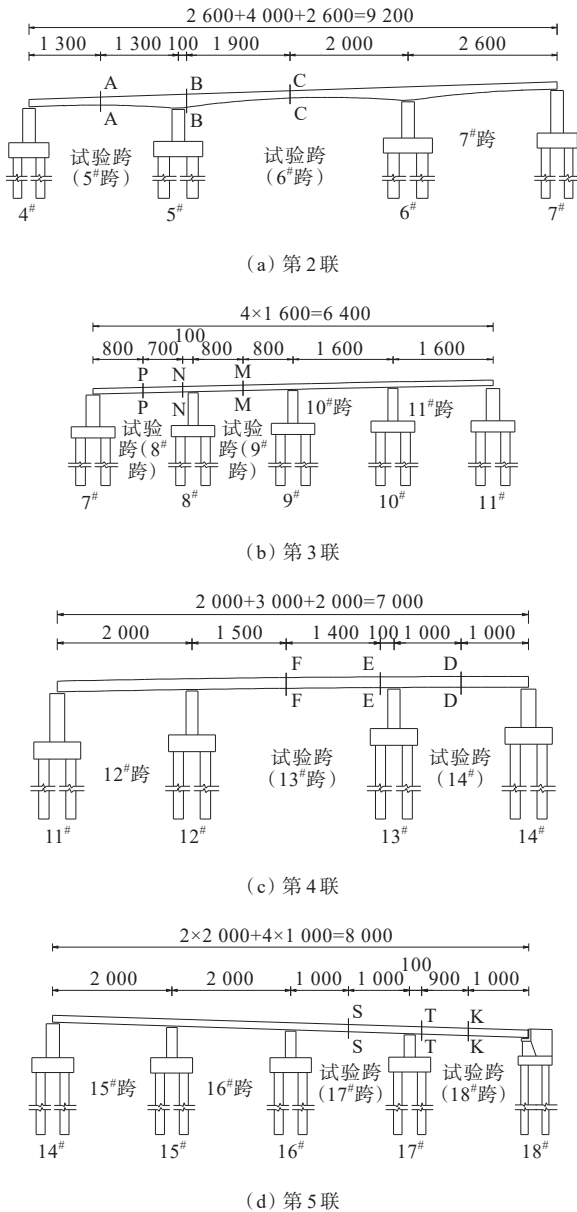


图3 试验控制截面(单位:cm)

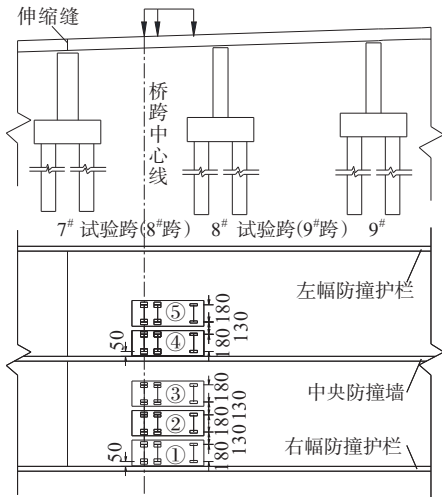


图4 工况9加载车辆布置(单位:cm)

个HY-65050F型数码位移传感器观测挠度。在试验控制截面A、B、C、M、N、P、D、E、F、S、T、K各布置5个HY-65B3000B型应变传感器观测应变。支点沉降、控制截面挠度和应变的测点横向布置见图5。

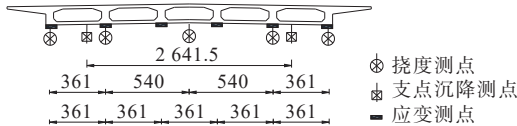


图5 测点横向布置示意图(单位:cm)

2.3 动载试验

动载试验主要用于研究桥梁自振特性和桥梁在车辆动力荷载作用下的响应规律。本次动载试验包括模态试验与跑车试验。

模态试验是在桥面指定位置布置DH610V型磁电式竖向振动传感器,测量外界各种因素所引起的桥梁微小且不规则的振动,通过谱分析可得到桥梁结构的自振频率和阻尼比。振动传感器布置于边跨 $L/2$ 、主跨 $L/4$ 、 $L/2$ 和 $3L/4$ 的桥面中央分隔带防撞墙附近,第2、4联均布置了5个振动传感器,第3、5联均布置了8个振动传感器。

跑车试验是采用1台加载车分别以20 km/h、30 km/h和40 km/h的速度沿指定车道匀速往返桥面,在试验控制截面C、P、F和K(C、P、F、K位置见图3)位置各布置1个HY-65B3000B型动态应变传感器,测定动荷载作用下桥梁主跨跨中截面的纵向动应变,通过动应变时程曲线振荡峰值和谷值可得到冲击系数。

3 主要试验结果及分析

3.1 静载试验

3.1.1 沉降

试验加载工况下各支点沉降测点的相对残余沉降 S'_Δ 见表2。

由表2可知:

(1) 各支点沉降测点在试验加载工况下的相对残余沉降 S'_Δ 均小于规范限值20%,说明该桥地基与基础在设计荷载作用下的工作性能正常,满足要求。

(2) 第3联未观测到支点沉降,说明在第3联中不存在由于支点不均匀沉降而产生的结构次内力;第2、4、5联存在支点残余沉降,说明在三者中不同程度地存在由于支点沉降而产生的结构次内力。

表 2 相对残余沉降

位置	工况	$S'_\Delta/\%$
第 2 联	4#墩	4~6
	5#墩	4~6
	6#墩	4~6
第 3 联	7#墩	7~9
	8#墩	7~9
	9#墩	7~9
第 4 联	12#墩	10~12
	13#墩	10~12
	14#墩	10~12
第 5 联	16#墩	1~3
	17#墩	1~3
	18#墩	1~3

3.1.2 挠度

试验加载工况下各挠度测点的结果见表 3。

表 3 挠度结果

位置	工况	ζ_f	$S'_f/\%$
第 2 联	4	0.55~0.62	2.10~4.38
	5	0.61~0.69	0.00~3.00
	6	0.63~0.69	0.00~6.56
第 3 联	7	0.29~0.37	0.00~6.27
	8	0.25~0.71	0.00~3.24
	9	0.19~0.36	0.00~4.28
第 4 联	10	0.11~0.32	12.81~18.71
	11	0.14~0.49	12.46~19.76
	12	0.22~0.28	2.80~4.26
第 5 联	1	0.18~0.49	2.72~12.01
	2	0.30~0.98	0.00~18.55
	3	0.37~0.48	7.73~18.93

注： ζ_f 为挠度校验系数； S'_f 为相对残余挠度。

由表 3 可知：

(1) 各测点的挠度校验系数 ζ_f 为 0.11~0.98, 小于规范限值 1.0, 说明该桥静力刚度满足正常使用要求； ζ_f 除在第 5 联工况 2 对应的个别测点值偏大外, 其余测点值都偏小, 说明该桥静力刚度在总体上有较好的富余度。

(2) 第 5 联工况 2 对应测点的 ζ_f 分布范围较离散, 该桥箱梁宽度较大, 不排除由于施工原因, 导致箱梁在 17#墩位置的横桥向结构性能存在一定离散性；全桥许多测点的 ζ_f 小于规范提供的 ζ_f 正常取值范

围 0.60~1.00 的下限值 0.60, 规范给出的 ζ_f 正常取值范围是基于一定的试验经验总结而得, 理论上 ζ_f 越小越好, 但这种小于规范正常取值范围下限值的表现属于“超规”现象, 不免带来一定困扰, 应进一步加强 ζ_f 正常取值范围下限值的研究, 以便更好地通过其实测结果来评定桥梁的工作性能。

(3) 各测点的相对残余挠度 S'_f 均小于规范限值 20%, 说明该桥在荷载作用下的挠曲变形恢复能力满足正常使用要求。

(4) 第 5 联在工况 2 下存在 ζ_f 和 S'_f 值都偏大的情况, ζ_f 和 S'_f 分别为 0.98 和 18.55%, 均较接近于规范限值, 说明第 2 联的挠曲变形弹性工作状态相对欠佳。

3.1.3 应变

试验加载工况下各应变测点的结果见表 4。

表 4 应变结果

位置	工况	ζ_ϵ	$S'_\epsilon/\%$
第 2 联	4	0.46~0.98	3.90~16.04
	5	0.56~0.75	0.00~10.71
	6	0.46~0.66	0.00~5.56
第 3 联	7	0.19~0.55	1.98~19.35
	8	0.46~0.95	1.03~7.75
	9	0.26~0.44	2.90~4.79
第 4 联	10	0.26~0.58	1.49~9.35
	11	0.15~0.42	2.59~10.00
	12	0.32~0.43	0.00~5.66
第 5 联	1	0.35~0.43	2.30~8.29
	2	0.30~0.96	1.96~10.23
	3	0.24~0.72	0.90~4.55

注： ζ_ϵ 为应变校验系数； S'_ϵ 为相对残余应变。

由表 4 可知：

(1) 各测点的应变校验系数 ζ_ϵ 为 0.15~0.98, 小于规范限值 1.0, 说明该桥强度性能满足使用要求； ζ_ϵ 值总体偏小, 说明该桥强度有一定富余。

(2) 第 5 联工况 2 对应测点的 ζ_ϵ 分布范围较离散, 原因与 3.1.2 小节 ζ_f 分布范围较离散相同；全桥许多测点的 ζ_ϵ 小于规范提供的 ζ_ϵ 正常取值范围 0.50~0.90 的下限值 0.50, 同样, 理论上 ζ_ϵ 越小越好, 但这种小于规范正常取值范围下限值的表现属于“超规”现象, 应进一步加强 ζ_ϵ 正常取值范围下限值的研究, 以便更好地通过其实测结果来评定桥梁的工作性能。

(3) 各测点的相对残余应变 S'_e 均小于规范限值20%,说明该桥在荷载作用下的应变变形恢复能力满足正常使用要求。

(4) 第2联在工况4下存在 ζ_e 和 S'_e 值都偏大的情况, ζ_e 和 S'_e 值分别为0.98和16.04%,均较接近于规范限值,说明第2联的应变变形弹性工作状态相对欠佳。

3.2 动载试验

3.2.1 自振特性

模态试验得到的该桥自振特性参数结果见表5,表5中 f_m 和 f_i 分别为竖向振动前3阶自振频率实测值和有限元理论计算值; ξ 为阻尼比实测值。

表5 自振特性参数

结构分类	振型特征	自振频率			ξ
		f_m/Hz	f_i/Hz	f_m/f_i	
第2联	竖向1阶	3.32	2.53	1.31	0.015
	竖向2阶	6.05	4.78	1.27	0.037
	竖向3阶	7.22	5.85	1.23	0.035
第3联	竖向1阶	11.23	7.66	1.46	0.033
	竖向2阶	13.08	9.05	1.45	0.027
	竖向3阶	16.21	11.33	1.43	0.024
第4联	竖向1阶	5.76	3.89	1.48	0.030
	竖向2阶	9.57	7.31	1.31	0.036
	竖向3阶	12.59	8.49	1.48	0.023
第5联	竖向1阶	7.71	4.99	1.55	0.021
	竖向2阶	8.88	5.89	1.51	0.051
	竖向3阶	11.42	7.55	1.51	0.047

由表5可知:

(1) 该桥竖向前3阶的自振频率 f_m 均大于 f_i , f_m/f_i 大于1.20;自振频率反映了结构的整体受力性能和缺损情况; f_m 与 f_i 的结果对比表明该桥实际刚度大于理论刚度,结构整体受力性能良好,无明显缺损。

(2) 该桥阻尼比实测值 ξ 为0.015~0.051,桥梁阻尼比设计取值为0.05,如阻尼比实测值明显异常地大于设计值,则桥梁可能存在异常缺损或劣化^[12],但明显异常大于的界定主观性较强,而规范并未给出正常工作桥梁的阻尼比取值范围建议。相关研究表明:对于正常工作的桥梁,其阻尼比实测值多小于设计值0.05^[5-11],但也有稍大于设计值的情况存在^[16]。显然,该桥 ξ 实测值在正常水平,说明该桥整体技术

状况不存在异常缺损或劣化。为更好地通过阻尼比实测结果来评定桥梁的工作性能,建议规范给出桥梁阻尼比正常工作取值范围。

3.2.2 冲击系数

跑车试验得到的冲击系数 μ 实测结果见图6。

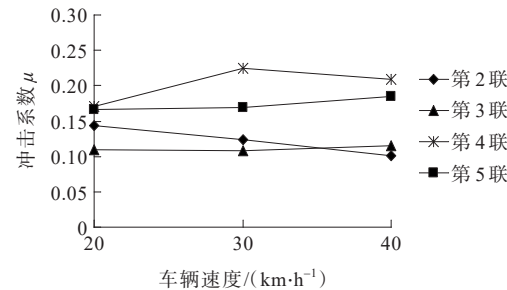


图6 冲击系数 μ

由图6可知:

(1) PC连续箱梁桥的冲击系数 μ 与车速之间无明显的正、负相关关系,原因是桥梁在行车荷载作用下的动力响应是一个复杂的过程,冲击系数由车速、桥梁结构基频、桥梁截面类型、桥面平整度等因素综合决定^[17]。

(2) 第2联的 μ 为0.101~0.143,小于《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)^[18](本文简称设计规范)理论值0.149;第3联的 μ 为0.108~0.115,小于设计规范的理论值0.344;第4联的 μ 为0.171~0.221,小于设计规范理论值0.225;第5联的 μ 为0.166~0.185,小于设计规范理论值0.268,说明桥面无病害、平顺性较好时,车辆正常行驶对该桥的冲击效应满足设计使用要求。

(3) 第3、5联的 μ 小于设计规范的理论值较多,但随着车速的增大,二者的 μ 有明显的增大趋势,原因是二者的行车道桥面铺装存在局部浅坑槽病害;第2、4联的 μ 较接近于设计规范理论值;由于桥面平顺性不佳时车辆对桥跨结构的冲击作用增加十分明显^[19],故日常养护应注意保持桥面平顺性。

4 结论

(1) 静载试验结果表明:该桥支点相对残余沉降(0~15.4%)小于规范限值,控制截面的挠度校验系数(0.15~0.98)、相对残余挠度(0~19.76%)、应变校验系数(0.15~0.98)和相对残余应变(0~19.35%)也

均小于规范限值。

(2) 动载试验结果表明:该桥自振频率实测值大于有限元理论值,阻尼比在桥梁结构正常工作阻尼比范围内,冲击系数实测值小于设计规范理论值。

(3) 静动载试验结果综合表明:在正常使用状态下,该桥的承载能力满足城-A 荷载等级要求,动力工作性能满足使用要求。

(4) 应进一步加强规范挠度校验系数和应变校验系数正常取值范围下限值的研究,以便更好地通过二者实测结果来评定桥梁的工作性能。

(5) 为更好地通过阻尼比实测结果来评定桥梁的工作性能,建议规范给出桥梁阻尼比正常工作取值范围。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(2):1-97.
- [2] 中国建筑科学研究院,广东省建筑科学研究院.城市桥梁检测与评定技术规范:CJJ/T 233—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [3] 许广利,李绍勇,唐军,等.三维重建模型在桥梁表观缺陷检查中的应用[J].中外公路,2023,43(3):171-176.
- [4] 宋泽冈,杨敏.空腹式箱形拱桥承载能力检测评定[J].中外公路,2023,43(2):121-125.
- [5] 魏曙安,刘国坤,徐朔,等.特大跨径悬索桥承载能力评定研究[J].桥梁建设,2020,50(6):73-78.
- [6] 王伟.宽幅矮塔斜拉桥成桥荷载试验研究[J].公路,2015,60(10):72-78.
- [7] 陈卫霞,石红磊.高速公路改扩建中既有空心板桥检测评估方法研究[J].中外公路,2022,42(2):164-168.
- [8] 白雨.大跨度系杆拱桥荷载试验研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [9] 朱坤宁,万水.GFRP-钢组合梁桥的荷载试验[J].公路交通科技,2011,28(11):48-54.
- [10] 田志勇,唐茂林,蒲黔辉.宁波庆丰桥静、动载试验研究[J].桥梁建设,2012,42(5):31-36.
- [11] 何佳,冉舵兵,梁波,等.某连续刚构桥荷载试验[J].中外公路,2020,40(5):149-152.
- [12] 长安大学.公路桥梁荷载试验规程:JTG/T J21-01—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
- [13] 曾德礼.大跨度桥梁承载能力鉴定研究[J].桥梁建设,2018,48(5):43-47.
- [14] 贾毅,赵人达,廖平,等.高烈度地区多跨长联连续梁桥抗震体系研究[J].桥梁建设,2017,47(5):41-46.
- [15] 李娜,周小勇,李阳,等.小跨宽幅连续梁桥支座负反力分析[J].中外公路,2022,42(1):90-94.
- [16] 廖平,赵人达,贾毅,等.某刚架拱桥荷载试验研究[J].防灾减灾工程学报,2017,37(6):958-964.
- [17] 邓露,何维,王芳.不同截面类型简支梁桥动力冲击系数研究[J].振动与冲击,2015,34(14):70-75.
- [18] 上海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.
- [19] 端茂军,李国芬,李建慧,等.南京小龙湾自锚式悬索桥荷载试验[J].林业工程学报,2016,1(6):137-141.