

# 基于检测结果的斜拉桥承载力评定

李文超

(长沙理工大公路工程试验检测中心, 湖南 长沙 410076)

**摘要:** 以某大跨度双塔双索面斜拉桥为工程背景, 对运营期间斜拉桥开展外观检查、桥面线形测量、索力检测、桥梁基频采集等多项试验检测, 基于试验检测结果对其承载力进行评定和分析。结果表明, 该桥主要构件性能良好, 承载力满足设计及规范要求。

**关键词:** 桥梁; 斜拉桥; 承载力; 检测结果

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0123-04

随着使用年限的增长, 斜拉桥的承载力逐年降低, 甚至出现因承载力不足导致安全事故的现象, 对现役斜拉桥承载力进行检测与评定非常必要。胡剑等采用先分层后综合整体的方法对三塔倒 Y 形单索面斜拉桥进行评估, 分析其运营期安全技术状态; 刘金平采用无损检测、静载和动载试验方法对独塔钢-砼混合梁斜拉桥进行外观检查、恒载索力及桥梁变形测量等, 评定其承载能力和工作性能; 姚蓓等探讨了大跨度钢斜拉桥的相关检测技术。该文以某大跨度双塔双索面斜拉桥为工程背景进行性能检测, 根据检测结果, 通过桥梁检算分析评定其承载能力, 为该类现役桥梁承载力评定提供参考与借鉴。

## 1 工程概况

该桥主桥为  $(133+270+133)$  m 双塔双索面 PC 斜拉桥, 主梁采用双 T 梁截面形式, 近桥塔处加宽至 2.5 m, 近桥墩节段采用箱形截面, 内填充砼作为压重。桥梁立面见图 1。

## 2 桥梁检测结果

### 2.1 外观检查结果

桥梁外观检查结果显示: 主梁裂缝等病害已封



图 1 桥梁立面图

闭, 桥面板底板和横隔板因局部浇筑不密实而导致露筋; 拉索表面均有细微老化裂缝, PE 护套出现开裂、刮擦、挤压和污垢等现象; 索塔塔柱内出现锈胀露筋和砼破损, 塔柱外产生竖向裂缝; 伸缩缝出现纵向裂缝、泥沙堵塞现象。

### 2.2 桥梁材质状况

抽检 16 个构件进行无损检测, 计算得: 砼  $K_{bt}$ 、 $K_{bm}$  值均不小于 1.0; 钢筋锈蚀电位最低值均不小于  $-200$  mV; 砼  $D_{ne}$  与  $D_{nd}$  比值都在 0.95 以上; 砼碳化深度情况良好。

### 2.3 桥梁线形测量结果

如图 2 所示, 在桥面左、右两侧设置测点, 主桥边跨方向设 8 个等分测点, 主桥中跨设 16 个等分测点, 伸缩缝两侧各布置 1 个测点, 全桥共设置 75 个测点(包括基准点和伸缩缝位置测点)。由河西向河东沿桥纵向各边墩、索塔及主跨跨中的位置分别为 0(西岸桥墩)、133(西岸索塔)、268(主跨跨中)、403

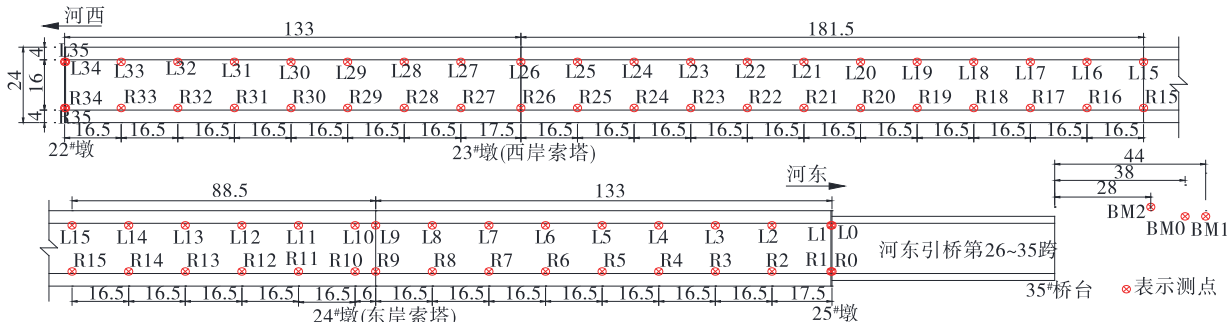


图 2 桥梁线形测点布置(单位: m)

(东岸索塔)、536 m(东岸桥墩)。桥面线形观测结果见表 1 和图 3。

表 1 桥面高程检测结果

测点 编号	桥面相对 高程/m	测点 编号	桥面相对 高程/m	测点 编号	桥面相对 高程	测点 编号	桥面相对 高程/m
BM0	100.000 00	R16	95.592 03	R35	94.849 41	L18	95.644 16
BM1	99.681 05	R17	95.605 41	L0	94.800 43	L19	95.615 12
BM2	99.492 26	R18	95.628 73	L1	94.805 27	L20	95.582 76
R0	94.800 63	R19	95.599 26	L2	94.883 32	L21	95.519 70
R1	94.804 99	R20	95.559 44	L3	94.984 43	L22	95.470 15
R2	94.864 75	R21	95.508 31	L4	95.081 30	L23	95.450 46
R3	94.972 04	R22	95.449 87	L5	95.170 65	L24	95.406 27
R4	95.070 81	R23	95.428 88	L6	95.203 08	L25	95.371 99
R5	95.155 39	R24	95.389 42	L7	95.251 61	L26	95.357 58
R6	95.191 78	R25	95.359 97	L8	95.294 94	L27	95.310 02
R7	95.241 52	R26	95.344 93	L9	95.353 63	L28	95.252 48
R8	95.289 51	R27	95.299 87	L10	95.387 62	L29	95.212 48
R9	95.344 27	R28	95.233 64	L11	95.398 29	L30	95.184 47
R10	95.374 55	R29	95.196 92	L12	95.471 17	L31	95.135 86
R11	95.401 37	R30	95.164 94	L13	95.501 03	L32	95.032 31
R12	95.450 56	R31	95.141 72	L14	95.534 86	L33	94.946 29
R13	95.475 40	R32	95.044 23	L15	95.554 39	L34	94.840 72
R14	95.519 13	R33	94.935 96	L16	95.618 53	L35	94.847 81
R15	95.559 29	R34	94.848 68	L17	95.622 75		

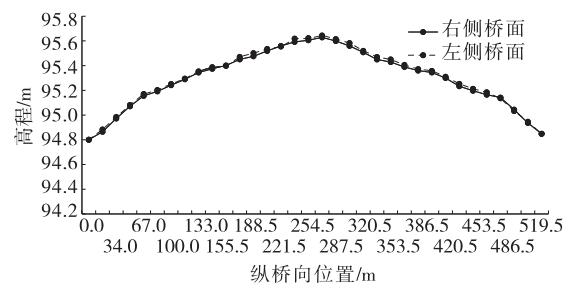


图 3 主桥桥面高程线形

由表 1 和图 3 可知:左右侧桥面高程差值基本在 0.01 m 左右,最大差值不超过 0.03 m,且桥面线形顺畅,左右两侧桥面线形基本一致,说明结构未发生较明显变形。

2.4 恒载索力检测结果

全桥斜拉索共 64 对,拉索编号原则为由桥的主塔位置向主跨跨中(或边跨)依次递增。采用频率法采集索力,结果见表 2,上下游索力值对比见图 4。

表 2 全桥拉索索力检测结果

斜拉索编号	索力/kN	斜拉索编号	索力/kN	斜拉索编号	索力/kN	斜拉索编号	索力/kN
23# 塔 XA1	4 144.221	23# 塔 SA1	4 201.359	24# 塔 XA1	4 248.980	24# 塔 SA1	4 303.493
23# 塔 XA2	2 343.547	23# 塔 SA2	2 295.700	24# 塔 XA2	2 336.234	24# 塔 SA2	2 368.707
23# 塔 XA3	2 511.270	23# 塔 SA3	2 526.375	24# 塔 XA3	2 514.144	24# 塔 SA3	2 554.548
23# 塔 XA4	2 794.411	23# 塔 SA4	2 852.805	24# 塔 XA4	2 778.628	24# 塔 SA4	2 840.733
23# 塔 XA5	2 977.593	23# 塔 SA5	2 969.707	24# 塔 XA5	2 945.549	24# 塔 SA5	3 009.237
23# 塔 XA6	3 000.359	23# 塔 SA6	3 065.305	24# 塔 XA6	2 984.956	24# 塔 SA6	3 037.135
23# 塔 XA7	3 088.546	23# 塔 SA7	3 106.787	24# 塔 XA7	3 062.581	24# 塔 SA7	3 121.156
23# 塔 XA8	3 311.922	23# 塔 SA8	3 289.908	24# 塔 XA8	3 225.759	24# 塔 SA8	3 282.466
23# 塔 XA9	3 432.497	23# 塔 SA9	3 461.792	24# 塔 XA9	3 395.244	24# 塔 SA9	3 428.122
23# 塔 XA10	3 536.350	23# 塔 SA10	3 598.026	24# 塔 XA10	3 574.723	24# 塔 SA10	3 591.107
23# 塔 XA11	3 814.720	23# 塔 SA11	3 755.654	24# 塔 XA11	3 703.538	24# 塔 SA11	3 716.533

续表 2

斜拉索编号	索力/kN	斜拉索编号	索力/kN	斜拉索编号	索力/kN	斜拉索编号	索力/kN
23# 塔 XA12	4 047.869	23# 塔 SA12	3 993.572	24# 塔 XA12	3 969.558	24# 塔 SA12	4 036.980
23# 塔 XA13	4 249.597	23# 塔 SA13	4 317.318	24# 塔 XA13	4 186.348	24# 塔 SA13	4 170.609
23# 塔 XA14	4 292.285	23# 塔 SA14	4 361.728	24# 塔 XA14	4 292.285	24# 塔 SA14	4 343.282
23# 塔 XA15	4 599.226	23# 塔 SA15	4 589.255	24# 塔 XA15	4 700.923	24# 塔 SA15	4 709.624
23# 塔 XA16	5 641.618	23# 塔 SA16	5 670.661	24# 塔 XA16	5 608.517	24# 塔 SA16	5 676.894
23# 塔 XJ1	4 131.604	23# 塔 SJ1	4 189.352	24# 塔 XJ1	4 216.369	24# 塔 SJ1	4 245.589
23# 塔 XJ2	2 408.572	23# 塔 SJ2	2 363.979	24# 塔 XJ2	2 293.143	24# 塔 SJ2	2 300.371
23# 塔 XJ3	2 545.709	23# 塔 SJ3	2 558.707	24# 塔 XJ3	2 519.814	24# 塔 SJ3	2 546.441
23# 塔 XJ4	2 983.929	23# 塔 SJ4	2 975.133	24# 塔 XJ4	2 955.940	24# 塔 SJ4	2 972.497
23# 塔 XJ5	3 130.746	23# 塔 SJ5	3 147.910	24# 塔 XJ5	3 094.552	24# 塔 SJ5	3 107.598
23# 塔 XJ6	3 160.142	23# 塔 SJ6	3 180.237	24# 塔 XJ6	3 151.967	24# 塔 SJ6	3 135.381
23# 塔 XJ7	3 240.384	23# 塔 SJ7	3 237.728	24# 塔 XJ7	203.291	24# 塔 SJ7	3 260.344
23# 塔 XJ8	3 387.946	23# 塔 SJ8	3 377.577	24# 塔 XJ8	3 393.878	24# 塔 SJ8	3 325.972
23# 塔 XJ9	3 510.084	23# 塔 SJ9	3 567.632	24# 塔 XJ9	3 521.405	24# 塔 SJ9	3 513.360
23# 塔 XJ10	3 629.633	23# 塔 SJ10	3 583.031	24# 塔 XJ10	3 626.087	24# 塔 SJ10	3 615.262
23# 塔 XJ11	3 866.478	23# 塔 SJ11	3 849.409	24# 塔 XJ11	3 836.854	24# 塔 SJ11	3 820.069
23# 塔 XJ12	3 969.480	23# 塔 SJ12	3 943.220	24# 塔 XJ12	3 974.699	24# 塔 SJ12	4 000.627
23# 塔 XJ13	4 093.990	23# 塔 SJ13	4 117.329	24# 塔 XJ13	4 213.973	24# 塔 SJ13	4 266.680
23# 塔 XJ14	4 256.069	23# 塔 SJ14	4 303.897	24# 塔 XJ14	4 272.619	24# 塔 SJ14	4 284.854
23# 塔 XJ15	4 460.874	23# 塔 SJ15	4 526.450	24# 塔 XJ15	4 536.327	24# 塔 SJ15	4 511.653
23# 塔 XJ16	5 318.431	23# 塔 SJ16	5 384.207	24# 塔 XJ16	5 325.819	24# 塔 SJ16	5 324.819

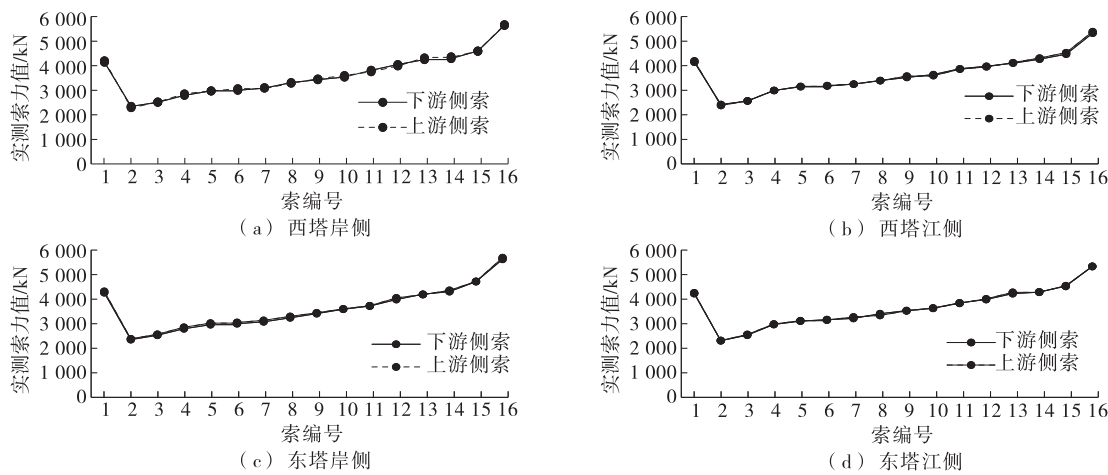


图 4 上下游索力值对比

由表 2 和图 4 可知:上、下游各对斜拉索索力差值稳定在 70 kN 以内,差值不超过 2.3%。上、下游斜拉索索力变化不大,受力较均匀。

2.5 桥梁基频采集结果

采用环境自然激励法进行桥梁基频测试,中跨实测频率为 0.781 Hz,理论计算频率为 0.5 Hz,实测基频与理论计算基频的比值为 1.562,满足规范中该值不小于 1.1 的要求。

3 桥梁承载力评定

3.1 分项检算系数确定

该桥处于城市主干道,交通量较大,重载车辆较多,采用式(1)计算活载影响修正系数  $\xi_q$ ,计算得  $\xi_q = 1.082$ 。

$$\xi_q = \sqrt[3]{\xi_{q1} \xi_{q2} \xi_{q3}} \tag{1}$$

式中: $\xi_{q1}$  为典型代表交通量影响修正系数, $\xi_{q1} =$

1.05;  $\xi_{q2}$  为大吨位车辆混入影响修正系数,  $\xi_{q2} = 1.05$ ;  $\xi_{q3}$  为轴荷分布影响修正系数,  $\xi_{q3} = 1.15$ 。

结合前文检测结果确定其余各分项检算系数, 结果见表 3~5。

表 3 检算系数  $Z_1$  计算结果

构件	检测指标	权重值 $\alpha_j$	评定标 度值 $D_j$	综合评定 标度 $D$	构件检算 系数 $Z_1$
主梁及 索塔	缺损状况	0.4	2		
	材质强度	0.3	1	1.4	1.13
	自振频率	0.3	1		
斜拉索	表面防护基本完好, 有细微裂缝, 锚头无锈蚀, 锚固区无裂缝				0.96

表 4 截面折减系数  $\xi_c$ 、 $\xi_s$  计算结果

项目	检测指标	权重值 $\alpha_j$	评定标 度值 $D_j$	综合评定 标度 $R$	折减 系数
结构截	材料风化	0.10	1		
面折减	砵碳化	0.35	1	1.55	0.99
系数 $\xi_c$	物理及化学损伤	0.55	2		
钢筋截	钢筋锈蚀电位结果表明, 主梁				
面折减	内部钢筋无锈蚀活动性			2.00	0.99
系数 $\xi_s$					

表 5 承载力恶化系数  $\xi_e$  计算结果

检测指标	权重值 $\alpha_j$	评定标 度值 $E_j$	综合评定 标度 $E$	恶化系 数 $\xi_e$
缺损状况	0.32	2		
钢筋锈蚀电位	0.11	1		
砵电阻率	0.05	1		
砵碳化状况	0.20	1		
钢筋保护层厚度	0.12	1	1.32	0.01
氯离子含量	0.15	1		
砵强度	0.05	1		
环境条件		干燥、不冻 无侵蚀性质		

注: 电阻率、氯离子含量按规程规定根据实桥情况无需检测评定, 其评定标度值取 1。

### 3.2 承载力评定与分析

采用 MIDAS/Civil 2019 建立结构有限元模型 (见图 5), 按原桥设计荷载进行加载, 按相关规范进行组合计算, 并对模型中拉索索力按实际检测索力逐一进行调整, 核算桥梁承载力及受力状况。

#### 3.2.1 承载力极限状态验算

按式(2)进行索力验算, 得索力为 610.4 MPa <

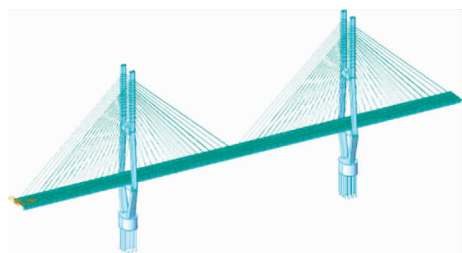


图 5 桥梁计算模型

$0.4f_{pk}Z_1 = 641.3 \text{ MPa}$  ( $f_{pk}$  为镀锌钢丝标准抗拉强度, 为 1 670 MPa), 满足规范要求。

$$\frac{T_j}{A} \leq Z_1 [\sigma] \quad (2)$$

式中:  $T_j$  为计入活载影响修正系数的计算索力;  $A$  为拉索计算面积;  $[\sigma]$  为应力容许限值。

按式(3)进行主梁和主塔验算。由前文可知,  $\xi_e$ 、 $\xi_c$ 、 $\xi_s$ 、 $\xi_q$  分别为 0.01、0.99、0.99 和 1.08, 相当于不改变车道荷载的数值, 但抗力需按照  $\xi_e$ 、 $\xi_c$  和  $\xi_s$  进行折减。根据规范分析得主梁和索塔的承载力检算系数  $Z_1$  为 1.13, 因其值大于 1.00 所带来的抗力提高程度会高于结构抗力折减程度, 故结构抗力会高于作用效应, 能满足规范要求。

$$\gamma_0 S \leq R(f_d, \xi_c a_{dc}, \xi_s a_{ds}) Z_1 (1 - \xi_e) \quad (3)$$

式中:  $\gamma_0$  为结构的重要性系数;  $S$  为荷载效应函数;  $R(\cdot)$  为抗力效应函数;  $f_d$  为材料强度设计值;  $a_{dc}$  为构件砵几何参数值;  $a_{ds}$  为构件钢筋几何参数值。

#### 3.2.2 正常使用极限状态变形验算

按式(4)进行正常使用极限状态变形验算, 得主梁中跨跨中位置的总挠度之和为 337 mm, 挠跨比为 1/801。主梁及索塔的承载力检算系数  $Z_1$  为 1.13, 而规范要求的挠跨比限值为 1/500, 挠跨比限值经过修正后的数值为 1/442, 实际挠跨比 1/801 低于挠跨比限值 1/442, 主梁刚度能满足规范要求。

$$f_{dl} < Z_1 f_L \quad (4)$$

式中:  $f_{dl}$  为计入活载影响修正系数的荷载变形计算值;  $f_L$  为变形限值。

## 4 结论与建议

该双塔双索面斜拉桥结构性能较好, 桥面线形、斜拉索索力等均满足规范要求, 桥梁承载力满足规范要求。

建议修补主梁局部破损部位, 修复伸缩缝处裂缝, 保证梁体正常变形; 封闭主桥索塔裂缝, 修补主

(下转第 132 页)

有差别,其中美国规范理论值略大于中国规范理论值。当路面平整度较差时,冲击系数计算值大于中国和美国规范理论值。

#### 参考文献:

- [1] Yin X F, Cai C S, Fang Z, et al. Bridge vibration under vehicular loads-tire patch contact versus point contact [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2010, 10(3).
- [2] Chen S R, Cai C S. Accident assessment of vehicles on long-span bridges in windy environments [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92.
- [3] Christoph Czaderski, Masoud Motavalli. 40-year-old full-scale CFRP plates anchored using gradient method [J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38.

- [4] 殷新锋, 刘扬, 彭晖, 等. 路面破损的桥梁在车辆作用下冲击系数分析 [J]. 振动工程学报, 2013, 26(4).
- [5] Yin Xinfeng, Fang Zhi, Cai C S. Lateral vibration of high-pier bridges under moving vehicular loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(3).
- [6] 殷新锋, 丰锦铭, 刘扬. 考虑桥面等级退化影响的风—车流—桥梁耦合振动分析 [J]. 工程力学, 2016, 33(3).
- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). LRFD bridge design specifications [S].
- [8] Association of State Highway and Transportation of Officials (AASHTO). Standard specifications for highway bridges [S].
- [9] CSA International. Canadian highway bridge design code [S].

收稿日期: 2019-02-25

\*\*\*\*\*

(上接第 91 页)

张拉切割法,使旧吊杆轴力呈线性减小的同时,也使吊杆位置处的桥梁标高变化呈规律性上下波动,虽然张拉比例的控制精度不够精确,但基本符合工程要求,可应用于系杆拱桥的换索工程。

#### 参考文献:

- [1] 赵洋. 系杆拱桥吊杆更换研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [2] 王欣, 虞根森, 俞峰. 拱桥吊杆更换的二次索力等效置

换 [J]. 中国建材科技, 2011, 20(5).

- [3] 任新伟, 陈刚. 由基频计算拉索拉力的实用公式 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(11).
- [4] 李新平. 空间系杆拱桥吊杆张拉控制分析 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2004, 32(7).
- [5] 聂磊. 危旧吊杆拱桥加固改造关键技术研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2010.
- [6] 王春龙, 饶瑞. 系杆拱桥吊杆更换的索力优化分析 [J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2015(6).

收稿日期: 2019-03-07

\*\*\*\*\*

(上接第 126 页)

桥破损、开裂、刮伤的斜拉索 PE 套管; 加强运营期观测, 定期进行健康检测与评定。

#### 参考文献:

- [1] 胡剑, 张少勇. 大跨度三塔斜拉桥技术状态检测与评估 [J]. 公路, 2018(7).
- [2] 刘金平. 独塔混合梁斜拉桥承载力的检测与评定 [J]. 世界桥梁, 2011(4).
- [3] 姚蓓, 张启伟. 钢斜拉桥运营期耐久性与易损性监测 [J]. 中外公路, 2016, 36(1).
- [4] 梅霄云. 在役带协作跨预应力混凝土斜拉桥承载力分析及寿命预测 [D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [5] 李鸥, 侍刚, 王波, 等. 运营期桥梁斜拉索的技术状况检测 [J]. 世界桥梁, 2017(4).
- [6] 刘瑞军. 营运斜拉桥检测与安全评价 [D]. 石家庄: 石家

庄铁道大学, 2015.

- [7] 张泽民. 大型城市桥梁检测评估方法及应用分析 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [8] 何宇. 既有斜拉桥结构的检测及承载能力评定 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [9] JTG/T J21-2011, 公路桥梁承载力检测评定规程 [S].
- [10] JTG 3362-2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
- [11] JTG/T D65-01-2007, 公路斜拉桥设计细则 [S].
- [12] 伍静, 单积明, 向勇. 重庆东水门公轨两用斜拉桥荷载试验研究 [J]. 公路与汽运, 2016(1).
- [13] 孙璇, 刘玉擎, 江祥林. 斜拉桥混合梁结合段受力性能研究 [A]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2013 年年会暨全国桥梁学术会议 [C]. 2013.

收稿日期: 2019-07-10