

某运营期悬索桥索夹滑移承载能力评估及 处治对策研究

付俊俊^{1,2}, 谷上海^{1,2}

(1. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 200032; 2. 上海市工程结构安全重点实验室, 上海市 200032)

摘要: 为研究悬索桥索夹滑移对桥梁承载力的影响, 以某运营期出现索夹滑移的悬索桥为案例, 通过对全桥开展姿态测量、索力测试、主缆开窗检测、吊索锈蚀及开锚检测等专项检测, 并结合检测结果进行有限元软件模拟, 计算受损桥梁的整体受力状况。结果表明: 索夹滑移对桥梁的安全影响整体可控, 结构处于稳定状态; 对索夹滑移进行常规治理, 并加强耐久性防护措施即可, 不必进行索夹复位。

关键词: 悬索桥; 索夹滑移; 承载能力; 维修加固

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0216-05

Study on Evaluation and Treatment Countermeasures for Bearing Capacity of Cable Clamp Slippage of Suspension Bridge in Operating Period

FU Junjun^{1,2}, GU Shanghai^{1,2}

(1. Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai 200032, China)

Abstract: In order to study the impact of cable clamp slippage on the bearing capacity of bridge, taking a suspension bridge with cable clamp slippage in operating period as an example, the special tests such as attitude measurement, cable force test, main cable window opening test, suspension corrosion and anchor opening test are carried out on the whole bridge. And combined with the test results, the finite element software simulation is carried out to calculate the whole stress state of the damaged bridge. The results indicate that the impact of cable clamp slippage on the bridge safety is generally controllable, and the structures are at the stable state. It is necessary to treat the slippage of cable clamp by routine and strengthen the durability protection measures, and it is not necessary to reset the cable clamp.

Keywords: suspension bridge; cable clamp slippage; bearing capacity; maintenance and reinforcement

0 引言

进入运营期后的悬索桥, 随着主缆内镀锌钢丝受压蠕变或重新排列, 以及车辆、温度等荷载引起缆索体系受力和线形变化, 会导致索夹螺栓紧固力逐渐下降^[1]。若主缆与索夹的摩擦阻力下降, 抗滑移性能降低, 则将使吊索索夹出现径向滑移, 从而导致吊索索力重新分配, 影响桥面平整度, 并且主缆容易遭受雨水侵蚀, 致使主缆鼓包、滴水、直至钢丝锈

蚀^[2]。这种情况将显著降低桥梁的使用寿命, 增加日常养护成本。

本文以某服役悬索桥为例, 重点介绍了索夹滑移后对全桥进行的各项检测措施和承载能力验算, 并且在综合各项检测结果的基础上, 研究了索夹滑移对桥梁承载能力的影响。所作研究可为同类桥梁的检测、维修和管理提供参考。

1 项目背景

1.1 桥梁概况

该桥于2018年建成通车, 为单塔双索面自锚式悬索桥, 半漂浮体系, 跨径布置为81 m + 81 m, 桥梁全长177.5 m, 桥梁宽度34.5 m, 桥面以上主塔高35.5 m。

悬索桥立面和横断面示意图见图1。该桥主梁

收稿日期: 2024-03-27

基金项目: 上海市交通委员会课题(JT2023-KY-019); 上海建科集团数字化转型项目(SZ10000038.20220003)

作者简介: 付俊俊(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事检测评估工作。

为单箱4室截面,桥梁中心线处梁高1.8 m;主梁和锚碇采用C60混凝土,主塔采用C50混凝土。全桥共设2根主缆,主缆采用预制平行钢丝索股(PPWS),由31股 $\phi 5-127$ 的镀锌高强平行钢丝组成,主缆垂跨比为7.6/76。全桥共设56根吊索,纵桥向间距5.0 m,

采用高强度镀锌钢丝平行集束,由 $\phi 7-91$ 镀锌高强钢丝组成。所有吊索均外包PE层防护套,吊索上端由锚杯与叉形耳板销轴连接,通过索夹固定于主缆,下锚头通过锚垫板直接锚固于主梁。吊索索夹采用上下分开的形式,用高强螺栓相连夹紧。

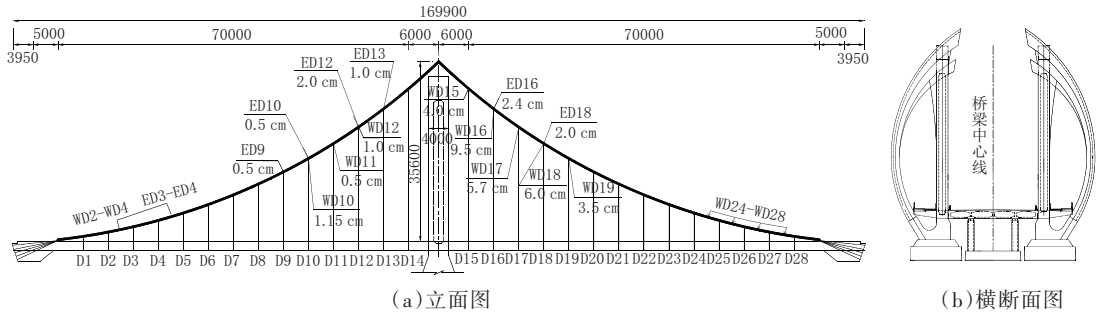


图1 某悬索桥立面和横断面示意图(单位:mm)

1.2 桥梁表观缺陷检查结果

对该桥进行常规日常巡查时发现,该桥主要部件存在多种类型的病害,主要包括:

(1)索夹滑移。全桥共有14根吊索索夹存在沿主缆的径向滑移,出现滑移的索夹数量占全桥索夹的25%,滑移量介于0.5~9.5 cm,索夹滑移后主缆钢丝均有外露,具体位置如图1所示,滑移实景照如图2所示。



图2 吊索索夹径向滑移

(2)主缆鼓包。两侧主缆底部共有7处鼓包(见图3),主要位置为WD2-WD4、ED3-ED4、WD24-WD28,鼓包处戳穿后有积水流出。



图3 主缆底部局部鼓包

(3)吊索锈蚀。全桥共56根吊索防水罩密封胶脱落,抽检时发现有1处预埋管锈蚀。

2 桥梁专项检测结果

发现上述病害后,养护单位结合交管部门调取路口摄像发现,该桥少有重型车辆驶入。在专家会议上,专家组一致认为,索夹滑移应是主缆钢丝蠕变、螺栓紧固力不足所致。应立即开展全桥专项检测,结合检测结果进行承载能力验算,以此研判索夹滑移对全桥承载能力的影响。在检测结果出来之前,应对桥梁开展24 h限流,防止索夹滑移进一步扩展。

2.1 全桥姿态测量

为验证索夹滑移对全桥姿态的影响,对桥梁进行主缆线形、桥面标高、索塔和吊索等的偏位测量。因该桥竣工后桥梁关键构件未设置永久性观测点,竣工资料也已遗失,本次姿态测量依据《城市桥梁检测与评定技术规范》(CJJ/T 233—2015)要求的方法进行,将测量结果进行对称性分析以及和规范限值进行比较分析。

2.1.1 桥面线形测量

桥面线形实测对比图见图4。

由图4可知,小量程索夹滑移的区域桥面两侧高差均较小,桥面线形吻合度较好。全桥大量程索夹滑移的区域主要集中在WD15~WD19吊索处,该区域西侧桥面高程均要低于东侧桥面高程,最大高差为20.3 mm,表明该区域索夹滑移对桥面线形产生了一定的影响。

2.1.2 主缆线形测量

主缆线形实测对比图见图5。

由图5可知,小量程索夹滑移的区域两侧主缆线形基本一致,竖向高差较小;大量程索夹滑移区域

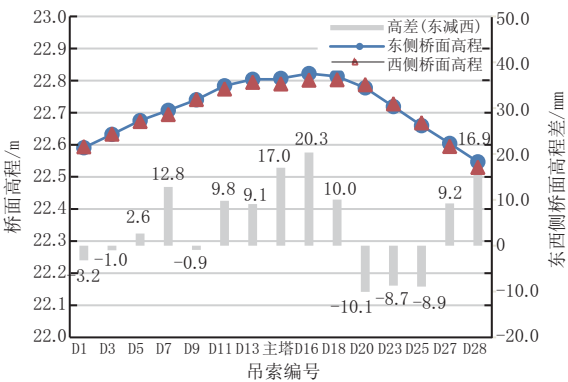


图4 桥面线形实测对比图

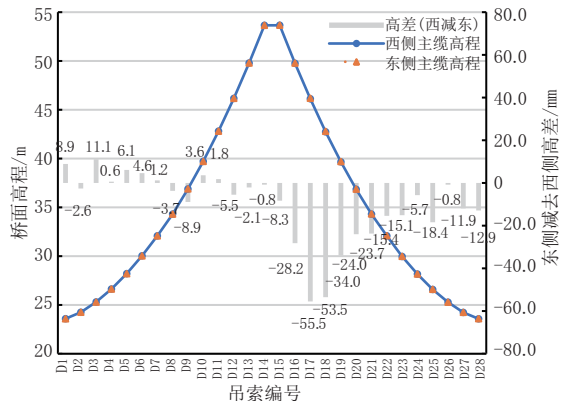


图5 主缆线形实测对比图

WD16~WD22主缆高程均要比ED16~ED22低,最大高差为55.5 mm,呈现出明显的差异性,原因是西侧索夹出现了大面积、大量程的滑移。

2.1.3 索塔偏位测量

索塔偏位测量结果表明:索塔偏位测点顺桥向和横桥向的偏差值均未超过《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1—2017)规定的允许偏差不大于H/1 000且小于20 mm的要求,垂直度较好。

2.1.4 吊索垂直度

对14处索夹出现明显滑移的吊索进行纵桥向和横桥向的竖直度检测。测量结果表明:WD6~WD23、ED6~ED23吊索测点顺桥向和横桥向的偏差值最大为0.41°,均未超过《公路工程质量检验评定标准》规定的允许偏差不大于0.5°的要求。

2.2 索力测试

对于拉索两端边界条件可以简化成铰支的吊索,一般采用公式法推算索力 $T^{[3]}$ 。计算频率 f_1 以实测基频为宜,对于超长索($f_1 < f_2/2$ 时),宜将实测2阶频率的一半作为基频用于计算索力 T ,表达式为:

$$T = 4mL^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{n^2 EI \pi^2}{L^2} \tag{1}$$

式中: f_n 为第 n 阶振动频率; n 为吊索自振频率的阶数; E 为吊索钢丝弹性模量,Pa; I 为吊索截面抗弯惯

矩, m^4 。
参照上述索力计算公式,对全桥进行索力测试。测量时天气为阴天,气温24℃。全桥吊索索力测试结果见表1。

表1 全桥吊索索力测试结果

吊索 编号	索力/t		差值/ %	吊索 编号	索力/t		差值/ %
	本年度	上年度			本年度	上年度	
WD4	369.0	436.4	-15.4	ED4	281.5	469.5	-40.1
WD5	334.1	406.2	-17.8	ED5	307.7	409.0	-24.8
WD6	266.6	287.0	-7.1	ED6	250.0	317.6	-21.3
WD7	240.5	248.7	-3.3	ED7	245.6	275.6	-10.9
WD8	214.3	229.7	-6.7	ED8	240.4	245.6	-2.1
WD9	245.6	257.6	-4.6	ED9	245.6	265.6	-7.5
WD10	246.4	224.9	9.6	ED10	242.0	297.6	-18.7
WD11	225.0	238.4	-5.6	ED11	240.4	223.7	7.5
WD12	225.2	228.0	-1.2	ED12	211.7	241.1	-12.2
WD13	191.6	181.8	5.4	ED13	175.3	180.1	-2.7
WD14	115.5	129.0	-10.4	ED14	119.2	113.6	5.0
WD15	110.1	128.9	-14.6	ED15	110.1	121.1	-9.1
WD16	175.2	202.9	-13.6	ED16	177.2	187.5	-5.5
WD17	213.3	227.6	-6.3	ED17	228.7	229.2	-0.2
WD18	245.2	230.2	6.5	ED18	206.4	237.2	-13.0
WD19	239.9	248.5	-3.4	ED19	261.1	218.6	19.5
WD20	255.2	257.0	-0.7	ED20	260.4	250.4	4.0
WD21	244.1	209.5	16.5	ED21	232.8	204.4	13.9
WD22	241.9	250.1	-3.3	ED22	241.9	255.0	-5.2
WD23	276.4	317.5	-12.9	ED23	305.8	257.7	18.6
WD24	376.4	325.7	15.6	ED24	377.7	320.8	17.7
WD25	373.0	385.0	-3.1	ED25	444.9	391.1	13.7
合计 索力	5 424.6	5 650.5	-4.0	合计 索力	5 406.2	5 712.2	-5.4

由表1可知,全桥存在索夹滑移的14根吊索,本次对比上一年度的索力基本呈减小趋势,最大变化量为-18.7%,索夹滑移的相邻吊索未出现索力明显增加的情况,东西侧对称的吊索索力增减无明显规律。针对一侧吊索索力总和,本次对比上一年度测试结果呈减小趋势,东西两侧变化量分别为-5.4%和-4.0%。

2.3 主缆开窗检测

为检测鼓包处主缆钢丝积水和锈蚀情况,对WD2~WD4、WD24~WD28吊索间主缆鼓包处进行开窗检测。主缆开窗后钢丝现状见图6。

由图6可知,主缆鼓包处防护层与缠绕钢丝存在明显分层现象,内部有明显积水,且缠绕钢丝与防护层之间存在不干性密封膏,缠绕钢丝、主缆钢丝可见



图6 主缆开窗后钢丝现状

明显潮湿状,目前均未见明显锈蚀。

2.4 吊索锈蚀及锚头积水检测

针对吊索防水罩密封胶脱落及存在索夹滑移的吊索,抽取ED16、WD13、WD16、WD17和WD19共5根吊索进行锈蚀性检测,并对下锚头进行开锚检测。检测结果表明,5根吊索的内部钢丝评定标度为I类,吊索内部平行钢丝状况良好。抽检的4处吊索下锚头均有大量积水,锚杯内均存在下锚头防腐油脂不足或失效部位,下锚头锚垫板均存在明显锈蚀。

3 全桥技术状况评定

根据以上检测结果,依据《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011),对该悬索桥进行技术状况评定。评定结果为:总体技术状况评分为83.70分,总体技术状况等级为2类(有轻微缺损、对桥梁使用功能无影响),其中主缆和索夹技术状况等级为3类(有中等缺损,尚能维持正常使用功能)。

4 承载能力验算

4.1 材料及荷载

采用有限元软件MIDAS Civil进行建模分析,混凝土强度依据现场实测,其余材料特性及恒载、活载参照竣工图纸。

4.2 模型建立

在MIDAS Civil软件中建立该桥的有限元模型,全桥共206个单元、215个节点。主梁按照单侧横向约束,梁端提供竖向支撑。主塔位置处提供纵横向约束;主塔塔底固结,主缆与主塔塔顶刚接;主缆与主梁端部刚接,同时在散索套位置处,主梁与主缆竖向位移耦合。

4.3 模型修正

根据现场实测数据,对有限元模型分别进行主缆线形修正、索夹滑移修正。其中:主缆线形修正通过修改主缆垂跨比的方式进行;索夹滑移修正通过

修改吊索顶部坐标来模拟索夹滑移,吊索顶部与主缆节点采用刚性连接约束^[3]。修正后的有限元模型见图7。

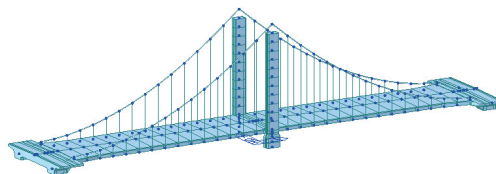


图7 修正后的有限元模型

对经过主缆线形、索夹滑移修正后的有限元模型计算恒载作用下的吊索索力。鉴于短索采用2.2节计算索力的公式会存在一定的偏差^[4],本次不纳入验证性对比范围。索力计算结果表明,除掉两端的短索外,其余吊索索力计算值与实测值最大偏差为7.7%(WD15),且索力分布趋势与实测值一致。由此说明,经过修正后的有限元模型与真实桥梁结构受力状态一致。模型验证一致后,将实测索力输入修正后的有限元模型,据此建立全桥有限元模型,并进行承载能力验算。

4.4 检算结果

4.4.1 索夹滑移对缆索系统的影响

索夹滑移后,主缆的最大应力变化较小,主缆的安全系数满足《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65—2015)要求。考虑实测恒载索力和索夹滑移的影响,在荷载基本组合作用下,吊索的安全系数介于2.00~4.48之间,安全系数小于2.20的吊索有11根,占总数的27.5%。在标准组合作用下,吊索的安全系数介于2.32~4.99之间。由此可以看出,索夹滑移对吊索受力产生的影响相对较大,但仍然处于安全、可控的状态^[5]。

4.4.2 索夹滑移对塔梁的影响

在荷载基本组合作用下,索夹滑移后主梁的最大正弯矩增大8.2%、最大负弯矩增大3.5%。索夹滑移后西侧桥塔偏移最大值为3.3 mm;恒载下桥塔的最大压应力增加7.2%。由此可以看出,索夹滑移对塔梁内力的影响较小。

5 处治对策

经专家组反复商讨,一致认为鉴于全桥的专项检测和承载能力验算结果,虽然索夹滑移对全桥结构受力状况产生了一定的影响,但影响可控,桥梁暂无失稳风险。仅需按以下思路处治。

(1)索夹。索夹不用进行复位维修,维持现状位置并对全桥索夹螺栓进行复拧,复拧轴力应达到设

计强度。

(2)主缆。对主缆鼓包积水处进行开窗、放水,对两侧主缆进行除湿、干燥处理。鼓包开窗和索夹滑移处主缆均按原设计要求恢复主缆防护体系,如图8所示。



图8 主缆防护钢丝缠绕

(3)索力。以现场桥面线形和主缆线形为控制指标,对全桥吊索索力进行调整,确保桥面线形和主缆线形对称、平顺。

(4)锚头。清理吊索下锚头积水,对吊索下锚头重新补充防腐油脂,做好吊索与主梁交接处的防水处理,防止雨水进入。

6 结 语

(1)悬索桥索夹滑移后对全桥影响较大的有2点:一是吊索索力,表现为滑移的吊索索力减小,相

邻吊索索力增加,进而影响桥面平整度和主缆线形,而吊索索力的变化幅度受索夹形式、螺杆参数、主缆直径和线形的多重因素影响,暂无研究表明存在索夹开始滑移的索力变化临界值;二是影响主缆耐久性防护,雨水会沿着索夹滑移处渗入主缆,导致主缆整体防护体系失效、内部钢丝锈蚀。

(2)建议运营期悬索桥定期开展螺栓紧固力检测,掌握螺栓张拉力的变化趋势;对于张拉力不足的应及时安排补张拉工作,防止出现索夹滑移后的不可逆维修或高代价复位工作。

(3)本文从特定参数的专项检测、基于检测结果的有限元模型修正和验证等方面,提出了悬索桥索夹滑移对承载能力影响的分析方法,可以为同类桥梁检测、评定工作提供借鉴。

参考文献:

- [1] 付春晓,雷俊卿.既有悬索桥主缆现状的检测与研究[J].世界桥梁,2002(4):70-74.
- [2] 陈小雨,沈锐利,唐茂林.悬索桥主缆检测及承载力评估现状与发展[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(增刊1):760-763,831.
- [3] 郭强.大跨度悬索桥索夹设计与安装关键技术研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [4] JTG/T J21-01—2015,公路桥梁荷载试验规程[S].
- [5] 彭建新,柴莹,张建仁.桥梁结构服役状态可靠度评估综述[J].中外公路,2023,43(4):1-7.

(上接第215页)

- [14] 杨立,肖兵,范少峰.基桩钻芯法检测中完整性和强度关系的探讨[J].四川建筑科学研究,2015,41(1):165-167.
- [15] 唐正浩,马秋柱,贺迎喜.提高深层水泥搅拌桩取芯质量的技术方法[J].中国港湾建设,2022,42(2):143-47.
- [16] 张向文.搅拌桩取芯影响因素[C]//中国计量测试学会.企业计量

测试与质量管理——中国科协2005年学术年会论文集.北京:中国计量测试学会,2005.

- [17] 白福春,钱超英.露天煤矿边坡勘探提高岩芯采取率的施工工艺探讨[J].露天采矿技术,2008(2):15-16,18.