

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.10.001

# 城市桥梁典型病害与运营风险管控

李君强<sup>1</sup>, 张保山<sup>2</sup>, 王森森<sup>2</sup>

(1.济南市道路和桥隧服务中心, 山东 济南 250000; 2.山东金朝工程检测有限公司, 山东 济南 250000)

**摘要:** 针对城市桥梁运营安全风险问题,开展运营风险点分析和管养决策研究。研究梳理了城市桥梁结构特点,明确了典型城市桥梁结构运营风险和外因风险。通过风险矩阵,明确了不同运营风险的危险等级;结合管理决策矩阵,明确了不同管养策略的实施阶段。建立了城市桥梁运营期针对典型风险的中长期处置制度。结论一,典型的城市桥梁结构风险包括空心板铰缝失效、索结构失效、独柱墩倾覆等;结论二,典型的城市桥梁外因风险包括超载重车、火灾、车船撞、洪涝等;结论三,可通过风险分析和科学决策,建立系统科学的中长期处置措施,改善结构专项性能,提高桥梁风险管控能力。

**关键词:** 城市桥梁;运营管理;病害;风险

**中图分类号:** U447

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2022)10-0001-05

## 0 引言

我国经过数十年的集中城市发展建设,大中型城市普遍建设了包括高架、快速路、大型立交等在内的城市桥梁群<sup>[1]</sup>。当前,城市从大规模基础设施建设逐渐转入存量养护运维时代,城市桥梁的运营管理成为保障城市安全平稳运行的重要工作之一。不少地区的城市桥梁在运营过程中暴露出各种结构病害,更有甚者出现严重安全事故,造成人员伤亡和交通瘫痪,带来恶劣的社会影响。为此,城市桥梁管理者需要厘清城市桥梁运营过程中的主要风险,采用科学的决策方法,建立有序、系统、完善的养护管理方案,科学管控风险,提升桥梁运营性能,保障结构长期运营安全。

## 1 城市桥梁结构形式

城市桥梁,特别是道路高架,20世纪和21世纪初的典型结构形式包括:15~20m跨径的混凝土空心板梁、25m左右跨径的小T梁、30m左右跨径的混凝土箱梁,以及超过30m的少量钢箱梁和高架上下匝道的混凝土曲线箱梁。代表性工程包括上海内环、上海中环、广州内环路、武汉二环、成都二环、绍兴二环等。近年来,城市快速路也有采用全线节段预

制拼装混凝土连续梁方案的,如郑州四环。

除上述结构形式外,在一些重要的跨江、跨河节点,各地还采用了形式各异的桥梁。其中以三类桥梁为主要形式,包括经济性良好的预应力混凝土连续梁桥、景观性良好的系杆拱桥以及斜拉桥。这些桥梁都有一个共性的受力构件——钢索(包括钢绞线、吊杆、斜拉索等)。

由于我国城市建设时间集中,城市桥梁在日常运营检测过程中,往往发现某座桥有病害后,相似桥梁也会陆续出现同类型病害,病害呈现集中爆发的特点,给桥梁管养带来潜在风险和管理难度。

## 2 典型结构病害和事故

### 2.1 空心板梁铰缝失效

空心板梁桥在我国城市高架中应用广泛,部分地区占比甚至超过95%。早期建设的空心板梁桥,其空心板间横向小铰缝在运营过程中容易由于往复车辆荷载作用而出现破损,失去有效的横向联系,无法分担桥面车辆荷载作用。单片空心板梁在重车作用下,其荷载效应可能增大到设计最不利状态的2~3倍,若进一步考虑超载,空心板极可能在重车作用下被破坏,引发重大事故<sup>[2]</sup>。

典型事故包括:2009年4月12日河南澧河桥在重车作用下多片空心板失效坍塌;2011年7月15日钱江三桥引桥在满载钢板的货车作用下发生外侧空心板梁破坏的事故;2021年3月16日武汉长丰桥在填满砂料重车作用下发生单片空心板梁破坏落梁事故。

收稿日期:2022-06-19

基金项目:山东省住房和城乡建设厅软科学研究项目(2021-R4-1)

作者简介:李君强(1983—),男,工学硕士,高级工程师,从事城市基础设施管理和科学研究工作。

除空心板梁桥外,类似采用多片梁分担桥面荷载的中小跨径桥梁形式还包括混凝土T梁和小箱梁,横向联系失效也可能导致结构坍塌。例如2011年5月29日长春荣光大桥就曾出现单片混凝土小箱梁被重车压垮的事故。

## 2.2 索结构桥梁拉索失效

索结构桥梁包括索体作为主要传力构件的拱桥、斜拉桥和悬索桥。这类桥梁一般用于城市中跨越距离较大的道路上,例如跨江、跨河、跨铁轨等,属于结构形式特殊、结构重要性高的桥梁。

考虑桥梁50~100a的设计使用年限,索结构当前设计理念为可更换构件,设计使用年限一般为20a。索结构在桥梁运营期内会经历多次损伤老化到更换的过程。目前索结构检查方法尚不成熟,索体状态往往难以准确获知,这是目前索结构管理的痛点。

国内索结构桥梁病害数据表明,索结构病害类型较多,包括索体护套损伤、减振机构损伤、索体亮化工程损伤、索内渗水锈蚀、锚头漏油锈蚀、索体吊环构造损伤等<sup>[3]</sup>。其中,索体渗水锈蚀断裂和短吊杆剪切破坏是两类典型高危的病害。如:2001年11月7日,宜宾小南门大桥发生吊杆断裂事故;2012年7月14日,福建武夷山公馆大桥吊杆断裂,导致全桥垮塌,同年新疆孔雀河大桥也出现类似事故;2019年10月1日,中国台湾的南方澳跨港大桥拉索断裂,全桥垮塌。

## 2.3 独柱墩桥梁倾覆

独柱墩桥梁是过去城市立交曲线匝道的主要结构形式。采用单柱形式桥墩支撑上部桥梁,在有限的城市空间中节约了占地面积,具有良好的经济性。但是,自2007年以来,国内陆续发生多起由于超载车辆行驶导致的独柱墩桥梁倾覆事故,引起社会广泛关注和讨论。代表性的事故包括2012年8月24日哈尔滨群力高架桥倾覆事故、2016年5月23日上海中环钢箱梁侧倾覆事故、2019年10月10日无锡桥梁倾覆事故等。

多起倾覆事故集中发生在一类结构形式上,暴露出这种结构形式在极端超载情况下的易损性<sup>[4-5]</sup>。近年来,我国各省陆续开展了独柱墩桥梁的全面排查、验算复核及加固工作。但2021年12月18日,经过加固的某高速公路鄂州段独柱墩桥梁仍然在超载车辆行驶下发生了整体倾覆,再次敲响了该类桥梁运营安全风险的警钟。因此,独柱墩加固方法、超载

车监管方案等系列问题,需要管理部门进一步思考。

## 2.4 双曲拱桥坍塌

双曲拱桥是我国人民提出的一种拱桥形式,通过小型化的多个构件搭接形成较大跨度的创新桥型。由于“化整为零”的构造设计,使得桥梁的预制建造难度大大降低。20世纪六七十年代,这种桥型在全国各地推广应用,有力支撑了当时国家经济建设。但是,一方面这种结构形式整体性较弱,抗震性不足,且随着车辆荷载等级的提升,这种结构形式较难满足当前交通的需求。另一方面,由于材料老化和构件损伤,经过几十年运营的双曲拱桥自身状态已经较差,很多城市已经对双曲拱桥进行了限行等措施。

2006年11月25日,始建于1985年、全长122m的双曲拱桥——陕西冷水河大桥,在没有外部车辆荷载的情况下突然垮塌。同年,桥长200m的甘肃洮河大桥双曲拱桥也发生整体坍塌。此外,其他一些在历史条件下建设的旧桥也值得管理单位关注,如大跨度圬工拱桥、刚架拱桥等。例如,2012年8月8日,江西广昌八孔圬工拱桥河东桥发生整体倒塌事故。

## 2.5 预应力体系失效

预应力混凝土桥梁在中小跨度桥梁中应用广泛。预应力体系加入混凝土桥梁后,使结构抗裂性能大幅提升,同时预应力钢筋作为结构抗力的一部分,也起到保障结构承载力的作用。近年来,在多年运营的预应力桥梁上也发现了代表性结构病害模式<sup>[6]</sup>。病害包括预应力锚下混凝土损伤、预应力管道空洞渗水、预应力钢筋锈蚀、预应力松弛导致预应力不足等。病害程度较轻的出现混凝土梁体开裂,病害较重的出现梁体长期下挠直至垮塌。

典型的案例包括:虎门大桥辅航道270m连续刚构桥梁持续下挠超过26cm;湖北黄石长江大桥运营十年跨中下挠超过30cm,并出现大面积开裂;2019年2月15日,深圳湾大桥在检查中发现体外预应力锈蚀断裂事故。

## 2.6 附属设施连接失效

城市高架桥附属设施包括护栏、声屏障、龙门架、交通指示牌、绿化带等。上述设施在运营过程中由于锈蚀、老化等因素,或者设计施工存在一定的缺陷,再加上车辆撞击或恶劣天气等异常作用,导致设施设备的连接失效,掉落桥面、路面,引发行车、行人安全事故。

典型案例包括济南市高架滴水檐脱落事故,上海、佛山、宁波等城市均出现过声屏障掉落引发次生事故的事件。

### 3 典型外因风险和事故

#### 3.1 超载

车辆荷载是桥梁结构在运营过程中的主要荷载,特别是对中小跨径桥梁而言。我国桥梁设计规范经过几次修订,对车辆荷载的模式和等级进行了更新,反映出我国经济发展后城市和公路车辆特性的变化,特别是车重的变化。虽然设计荷载不断提升,但车辆超载仍然是普遍现象。超载重物对桥梁结构运营安全造成严重威胁,是桥梁运营期管理监控的主要风险源<sup>[7]</sup>。

上文提到的很多结构性风险事故,除了结构自身病害外,车辆荷载也是触发结构最后失效的外因。此外,我国不少地区出现过重物直接压塌桥梁的事故。例如:2011年7月19日,重达160t的货车将北京宝山寺白河桥压塌;2013年2月10日,宁夏吴忠市一辆超过100t的货车将桥梁压塌;2019年10月13日,山东滨州一辆大货车将限载仅4t的危桥压垮。

#### 3.2 船撞

对于跨越水上航道的桥梁而言,一类典型的运营风险是遭受来自往来船只的撞击。通过对国内多个桥梁管理部门的走访发现,航道上跨桥梁遭受船只撞击的事故时有发生,一般情况下为轻微擦碰,且由于桥下没有相关的影像记录,管理单位难以及时发现事故并进行处置,普遍情况是在桥梁养护单位或检测单位定期巡检时发现桥侧擦碰被动获知可能的船撞事故<sup>[9]</sup>。

但是,并非所有事故都是轻微损伤,不少桥梁在船撞后出现整体损坏。例如:2007年6月15日,九江大桥在船只撞击下,整孔桥梁掉落水面;2020年7月7日,江西上饶市一辆采砂船撞击桥墩,导致桥梁上跨梁体塌落;2021年1月5日,江苏南通一艘船只撞击英雄大桥桥墩,导致中跨桥面垮塌。

#### 3.3 车撞

和船撞相类似,车辆撞击桥梁的事故也是运营过程中桥梁的主要安全风险之一。车辆在桥面上异常行驶,可能导致车辆撞击桥梁护栏、吊杆、拉索等。对于跨越道路或高架的城市桥梁,车辆异常行驶可能导致车辆撞击桥墩或者超高车辆撞击上跨主梁,

引发事故。

2003年3月24日,武汉军山大桥上车辆暴胎失速后撞向护栏,导致桥梁3根拉索严重损伤;2013年9月29日,两车相撞事故导致天兴洲大桥拉索严重受损;2019年5月18日,杭州市内某人行天桥被一辆超高平板运输车撞击,整个天桥被撞落。

#### 3.4 暴雨洪涝

桥梁运营期遭遇极端暴雨洪涝是结构重大安全风险。水流冲刷桥梁基础、水面漂浮物撞击桥梁下部结构及上部结构,可能直接导致桥梁的整体破坏<sup>[10]</sup>。

典型案例包括:2013年强台风“尤特”给广东地区带来持续强降雨,全省83座桥梁损毁;2020年8月,陕西省商洛市洛南县在持续暴雨洪涝下,26座桥梁被水冲毁。

#### 3.5 火灾

一般而言,钢结构对火灾的敏感性和易损性比混凝土结构高。高温下,钢材的强度和弹性模量将迅速降低。强度降低引发局部承载能力不足,弹性模量降低导致结构局部变形过大,进而导致桥梁构件和体系的失效。因此,火灾对钢桥、索结构桥梁、体外预应力混凝土桥梁的威胁相对较高<sup>[8]</sup>。

桥梁火灾来源一般是两类:一是桥面车辆自燃、车辆碰撞事故引发火灾,或者是危险物品运输车在桥面发生事故燃烧等;二是桥下空间停放的车辆自燃、堆积的异物燃烧等。

典型的案例包括:2007年美国旧金山奥克兰海湾桥引桥因为一辆油罐车起火而发生整体垮塌事故;2020年7月29日,美国亚利桑那州坦佩市一座钢桥由于桥上列车起火导致桥梁部分垮塌;2021年10月2日,意大利罗马市一座钢拱桥起火,导致桥梁部分结构坍塌。

#### 3.6 风雨

大跨度桥梁在风荷载作用下可能产生振动,导致结构损伤。发现这一风险问题的首座桥梁是美国塔科马大桥,其于1904年11月在微风作用下发生持续振动,从而导致桥梁整体垮塌。2020年5月5日,虎门大桥发生多次涡振,引发社会高度关注。此外,斜拉桥的拉索也可能在特定的风雨条件下发生振动,从而导致索体结构损伤。

一般情况下,抗风设计是大跨度桥梁设计的专项之一,在现有技术条件下结构抗风安全风险相对较小,可能在一些特定条件下会发生偶然的小幅振动,影响行车舒适性。

### 4 风险与对策分析

#### 4.1 风险等级划分

采用风险矩阵法对上述典型城市桥梁运营风险事态进行评估,按照风险事态发生的概率(低、中、高)以及发生的影响程度(低、中、高)进行风险等级划分。典型结构自身特性风险和主要外因风险的等级划分结果分别如图1、图2所示。

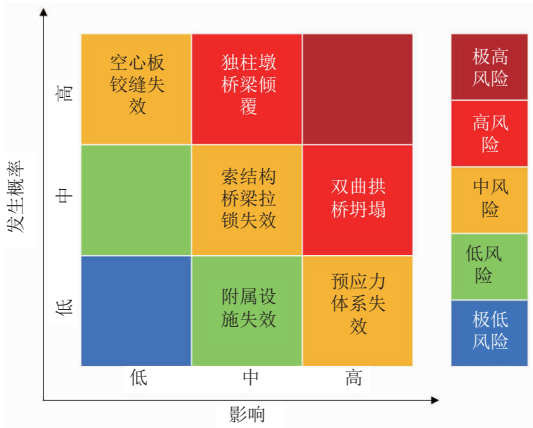


图1 典型结构自身特性风险等级

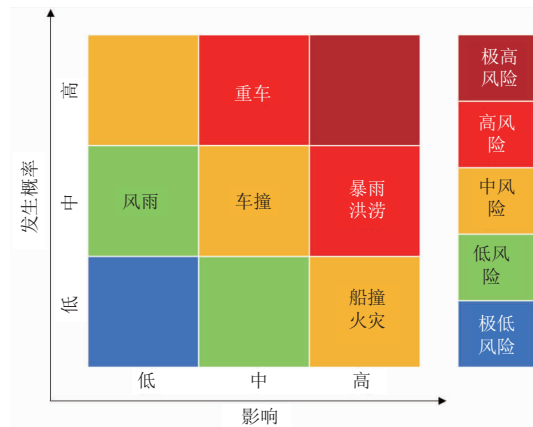


图2 主要外因风险等级

需要说明的是,上述风险等级划分仅根据作者所在城市的情况进行,其他地区应根据自身情况进行调整。

#### 4.2 对策分析

针对上述桥梁运营的典型安全风险,城市桥梁管理单位可进行针对性的管控处置。受到经费和现实条件的制约,需要根据难易程度和轻重缓急进行分阶段、分层级的风险管控和能力提升。

为在宏观上给予理论决策支持,采用类似风险矩阵分析方法,构建管理决策矩阵,按照管控措施的经济成本和社会影响进行对策的实施阶段分级,如图3所示。

图3评估结果结合当地城市桥梁典型运营风险

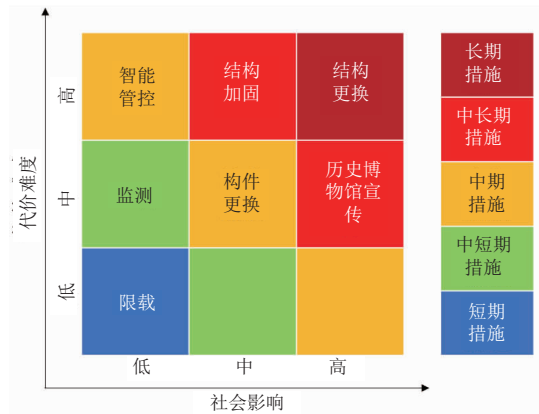


图3 典型处置措施的实施阶段分级

等级表可组合制定桥梁中长期管理策略(短期1a左右,中期2~3a,长期3~5a)。对于风险等级为高风险或者极高风险的,可将图3中评估的策略提前一个阶段实施;同理,对于风险等级为低风险或者极低风险的,可将图3中评估的处置策略退后一个阶段实施。

#### 4.3 中长期管养对策

根据上述对策分析结果,对城市桥梁典型运营风险的中期处置策略进行细化,形成可执行的城市桥梁管理中长期对策。

##### 4.3.1 双曲拱桥等历史危旧桥管理

20世纪60~80年代建设的双曲拱桥、圯工拱桥、刚架桥等老旧桥梁,随着荷载等级提升和结构损伤老化,这些桥梁已难以满足当前实际运营荷载的需求,存在一定的运营安全风险。这批桥梁结构应进行专项管理。

短期对策:摸排评估,危桥控制。对城市内所有类似桥梁结构进行摸排,对结构状况不明确的桥梁进行技术状况检测评价。将技术状况等级较差的桥梁进行限载或者停运管控。

中期对策:旧桥更新。开展危旧桥整治规划,结合城市道路交通发展规划,更新和替换历史危旧桥梁;结合桥梁结构的历史重要性,明确历史保护桥梁的范围,对历史保护桥梁暂不拆除。

长期对策:历史桥梁保护。开展历史桥梁数字建模工作,建立数字化桥梁档案;有条件的情况下建立历史桥梁博物馆,对历史保护桥梁进行文化宣传。

##### 4.3.2 风险桥型专项加固

针对第2节中所述的典型结构性风险,开展桥梁的专项加固补强,根据桥梁建设年代和建设规模,确定典型桥梁事故爆发的可能时间、范围和影响,并据此制定中长期管养处置策略。

短期对策:重点排查,重点管控。双曲拱桥、独柱墩桥梁排查,承载能力鉴定;开展重点索结构桥梁的拉索专项检测,开展技术状况等级3类以上空心板梁桥的风险排查;结合上述检查结果,设置必要的限行限载标识。

中期对策:监测监控,专项补强。根据管养预算,按照病害的严重等级对上述检查桥梁进行专项加固补强;对技术状况较差但尚未进行加固的桥梁开展应急监测;对重要加固桥梁开展长期健康监测,对比加固前后的结构状态。

长期对策:全面提升,动态管养。对研究明确的几类典型风险桥梁全面进行专项加固补强;对较难加固的桥梁建立健康监测系统,进行实时监控和风险预警<sup>[11]</sup>;采取弹性动态的养护管理措施,依照结构检测和健康监测结果,对养护加固计划进行弹性调整和预防性养护。

#### 4.3.3 重车管控

超载一直是桥梁结构运营安全的威胁,但长期以来车辆超载屡禁不止。在目前的权责体系下,桥梁管理单位的重点工作除了对桥上行车限载吨位提出要求,还可以从监测、监控的角度开展重车管控。

短期对策:被动监管。补充完善桥梁限载标识,主要针对重要桥梁、风险桥梁和技术等级低的桥梁进行,并做好社会宣贯;同时可在重点桥梁桥面补充视频监控系统,记录桥面可能发生的重车事件。

中期对策:主动监测。对重要城市快速路和环线的匝道、重点桥梁的主要断面建立动态称重系统和视频抓拍系统,形成重点桥梁和城市重要道路的荷载动态掌控,并及时将超载车辆信息推送给交通执法部门;对重车敏感的桥梁,架设限高装置,严格禁止货车通行。

长期对策:精细管控。建立车辆荷载的智能动态管理系统,建设与道路信息指示牌、指示灯和报警器等现场电器设施相联动的超载车辆预警管控系统,并与其他部门联动,形成完善的“监测—反馈—控制—处罚”流程。

#### 4.3.4 车船撞和火灾风险管理

结合智能监控和主动防护措施,对桥梁车船撞击风险和火灾风险进行分阶段管控能力提升。

短期对策:针对车船撞,建立重点风险桥梁的视频监控,做好异常事件的及时识别和信息留档,为事故处置和追责提供资料;针对桥面和桥下火灾,建立

巡查机制,对桥下违规搭建和堆放易燃易爆物进行处置。

中期对策:针对车船撞,设置主、被动防撞设施(包括限高龙门架、水中防撞墩柱等);针对桥面和桥下火灾,建立智能化视频监控识别系统<sup>[12]</sup>,对桥下异常堆载、桥下桥面风险事态进行识别和预警。

## 5 研究结论

研究针对城市桥梁的结构特点和运营风险进行分析,并通过风险矩阵和管理决策矩阵,建立了城市桥梁运营期针对典型风险的中长期处置制度,得出如下结论:

(1)典型的的城市桥梁结构风险包括空心板铰缝失效、索结构失效、独柱墩倾覆、双曲拱等老旧桥梁垮塌、预应力体系失效等。

(2)典型的的城市桥梁外因风险包括超载重车、火灾、车船撞、洪涝等。

(3)可通过风险分析和科学决策,建立针对性的中长期处置制度,改善结构专项性能,提高桥梁风险管控能力。

#### 参考文献:

- [1] 项海帆. 中国桥梁史纲: Conspectus of bridge history in China[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.
- [2] 刘旭政, 郭维, 吴刚, 等. 铰缝损伤对装配式空心板桥受力性能影响研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(3): 23-30.
- [3] 陈亚亮, 许华聪, 余印根. 中下承式吊杆拱桥事故分析及对桥梁检测启示[J]. 福建工程学院学报, 2013, 11(3): 213-217.
- [4] 汪芳芳, 徐祖恩, 严伟飞. 独柱墩桥梁抗倾覆安全分析及加固设计技术研究[J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2014, 15(4): 13-18.
- [5] 韩鹏, 李攀, 王大海. 独柱墩桥梁抗倾覆加固与智慧化运维技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2018(10): 121-124.
- [6] 闫燕红, 邓鸣, 何立忠, 等. 先张预应力混凝土板梁端横裂病害原因分析及处治对策研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 15-23.
- [7] 黄锦源. 对桥梁超载引发坍塌事件的思考[J]. 中国市政工程, 2019(6): 61-63.
- [8] 宋超杰, 张岗, 王富强, 等. 火灾后柱式桥墩剩余承载性能安全评价[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(2): 55-65.
- [9] 徐关松, 李运喜. 船舶撞击桥梁研究现状及桥梁跨塌原因分析[J]. 交通世界, 2007(11S): 124-125.
- [10] 刘亢, 刘均利, 余文成. 2007—2015年洪水导致垮塌桥梁的统计分析[J]. 城市道桥与防洪, 2017(1): 90-92.
- [11] 周欣弘. 桥梁集群智能化运维技术探讨[J]. 中国公路, 2020(11): 154-155.
- [12] 盛勇, 韩鹏, 唐术熙. 内河航道桥梁安全运维区域化管控研究[J]. 交通与运输, 2018, 34(A01): 189-192.