

中美钢桥养护技术规范对比研究

杨羿^{1,2},李程焕³,刘朵^{1,3},张建东^{1,4}

(1.苏交科集团股份有限公司,江苏 南京 211112;2.在役长大桥梁安全与健康国家重点实验室,江苏 南京 211112;
3.河海大学,江苏 南京 210098;4.南京工业大学,江苏 南京 211816)

摘要:该文通过系统调研中国和美国桥梁养护相关规范,从钢桥检查、损伤评定、维修与加固3方面对比分析钢桥养护相关规定,总结现有桥梁养护规范中钢桥部分的可借鉴之处,对于完善钢桥养护技术标准、提高养护技术水平具有重要参考价值。

关键词:钢桥;养护规范;检测技术;病害评定;维修加固

中图分类号:U445

文献标志码:A

0 引言

钢结构桥梁具有自重轻、工厂化制造、装配化施工、便于回收利用等优点,是中国桥梁工业化的发展趋势。但由于钢桥自身特点,在自然环境、车辆荷载等外部作用影响下,钢桥容易发生涂层劣化、钢材腐蚀、螺栓松动或断裂、疲劳裂纹等病害。从公路桥梁的发展进程中可以看出,工程技术人员往往更注重桥梁建设,然而,随着钢桥数量持续攀升和服役年限的不断增长,桥梁养护中的诸多问题日益凸显。

合理的桥梁养护规范对于指导一线技术人员的检查与维修工作、准确地评定桥梁技术状况等级、制定有效的管理养护策略具有重要作用。美国大规模基础设施建设较早,经过长期实践,已经形成完备的钢桥检查、评估、维修加固规范体系^[1-5]。本文通过系统调研中美桥梁养护相关规范,从钢桥检测技术、病害评定标度、维修与加固3方面对比分析钢桥养护相关规定,借鉴国外钢桥养护的成功经验,完善中国桥梁养护规范体系,推动钢结构桥梁发展。

1 中美钢桥养护规范体系

中国桥梁养护规范按照行业不同主要分为公路桥梁、城市桥梁和铁路桥梁养护规范。除桥梁行业

标准外,钢桥养护还可参考通用于钢结构建筑物检测、评定或维修的国家标准,例如《钢结构现场检测技术标准》(GB/T 50621—2010)、《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》(GB/T 1766—2008)、《钢结构加固设计标准》(GB 51367—2019)等。

美国桥梁养护规范主要由联邦公路管理局(FHWA)与美国公路与运输管理协会(AASHTO)制定。其中FHWA负责发布涉及交通安全的通用性标准,AASHTO负责编制针对性较强的标准、规范和手册,该协会的出版物具有权威性,是美国工程界共同执行的技术文件,中美钢桥养护可参考的规范体系如表1所示。

2 钢桥检查

2.1 检查类型与检查频率

中国公路桥梁与城市桥梁检查类型主要分为经常检查、定期检查、特殊检查,铁路桥梁检查类型分为水文观测、经常检测、定期检查、临时检查、专项检查、检定试验。美国桥梁检查类型分为初始检查、常规检查、损害检查、深入检查、断裂危险构件检查、水下检查和特殊检查,中美桥梁检查频率对比如表2所示。总体而言,中国桥梁检查频率与美国相近,并且城市桥梁与铁路桥梁针对桥梁重要性程度不同制定

收稿日期:2022-09-20(修改稿)

基金项目:江苏省交通运输科技项目(编号:2018Y11)

作者简介:杨羿,男,硕士,工程师.E-mail:774991168@qq.com

表 1 中美钢桥养护可参考的规范体系

中国		美国	
类型	规范名称	类型	规范名称
公路	公路桥涵养护规范(JTG H11—2017)	FHWA	国家桥梁检测标准(NBIS) ^[6]
	公路桥梁技术状况评定标准 (JTG/T H21—2011)		国家桥梁调查与评价记录编码指南
	公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件(JT/T 722—2018)		桥梁检测工作者参考手册 ^[7]
	公路桥梁加固设计规范 (JTG/T J22—2008)		钢桥疲劳裂纹维修与加固指南 ^[8]
城市	城市桥梁养护技术标准(CJJ 99—2017)	AASHTO	桥梁评估指南(Manual for Bridge Evaluation, MBE) ^[9]
	城市桥梁检测与评定技术规范 (CJJ/T 233—2015)		桥梁构件检查手册(Manual for Bridge Element Inspection, MBEI) ^[10]
铁路	铁路钢梁涂膜劣化评定(TB/T 2486—1994)		道路与桥梁维护指南
	铁路桥梁检定规范 (铁运函[2014]120号)		
	铁路桥隧建筑物修理规则 (铁运[2010]38号)		
其他	钢结构现场检测技术标准 (GB/T 50621—2010)		
	色漆和清漆 涂层老化的评级方法 (GB/T 1766—2008)		
	钢结构加固设计标准 (GB 51367—2019)		
		

表 2 中美桥梁检查频率对比

规范		检查频率
中国 规范	公路桥梁技术状况评定标准 (JTG/T H21—2011)	经常检查每月 1 次;定期检查最长不超过 3 年;满足规范规定的 4 种情况之一进行特殊检查
	城市桥梁养护技术标准 (CJJ 99—2017)	经常检查频率由养护单位制定;常规定期检查每年 1 次,结构定期检查 I 类桥梁 1~2 年 1 次, II~V 类桥梁 6~10 年 1 次;满足规范规定的 6 种情况之一进行特殊检查
	铁路桥隧建筑物修理规则 (铁运[2010]38 号)	经常检查每季度 1 次;定期检查每年 1 次;专项重要线路每 5 年 1 次,其他线路每 10 年 1 次
美国 规范	桥梁评估指南(MBE)	常规检查每 2 年 1 次;断裂危险构件检查每 2 年 1 次;水下检查每 5 年 1 次;深入检查根据桥梁状 况制定检查计划

了不同的检查频率,合理分配社会资源,但美国桥梁检查类型更多,对影响桥梁结构安全的隐蔽部位关注度更高。

2.2 检查重点

钢桥缺陷类型主要有:① 构件变形或开裂;② 铆钉或螺栓的松动、脱落或断裂;③ 焊缝缺陷或开裂;④ 涂层劣化;⑤ 钢材锈蚀。

针对钢桥检查重点,《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2017)仅指出了钢桥的缺陷类型;《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99—2017)提出了 5 种应重点关注的典型裂缝形式,并提出钢梁杆件伤损、不良

铆钉、锚栓失效率、截面削弱容许限度等指标;《铁路桥梁检定规范》(铁运函[2014]120 号)不仅指出了应重点关注的裂纹易发生部位,而且针对栓焊梁、全焊梁提出了专门的检查要点;美国 MBE 规范提出在设计阶段应评估构件是否为断裂危险构件,或是否包含易疲劳的细节,桥梁记录表应包含这些细节的完整清单(表 3)。

针对钢桥检查重点,目前公路桥梁规范相关规定最为笼统,城市桥梁规范、铁路桥梁规范及美国桥梁养护规范均指出了应重点关注的部位或缺陷限值。针对钢桥裂缝检测方面,美国钢桥养护从设计

表 3 裂缝检测重点关注部位

规范		部位
中国规范	公路桥梁技术状况评定标准(JTG/T H21—2011)	未指明
	城市桥梁养护技术标准(CJJ 99—2017)	①腹杆铆接接头处;②下承式横梁与纵梁连接处下端;③受拉翼缘及焊缝;④纵梁上翼缘角钢焊缝;⑤箱梁焊缝
	铁路桥隧建筑物修理规则(铁运〔2010〕38号)	①主桁斜杆、吊杆与节点板连接的第1、2排铆钉处;②由于损伤造成杆件断面削弱处;③杆件或连接应力集中处;④板梁(纵梁)上翼缘严重锈蚀处;⑤无盖板的纵梁上翼缘角钢水平肢;⑥纵梁腹板的斜裂纹;⑦纵梁与横梁的连接角钢;⑧主梁间纵向联结系的连接处
美国规范	桥梁评估指南(MBE)	①断裂危险构件;②易疲劳细节处;③因腐蚀造成截面损失处;④现场焊接处;⑤杆件或连接板发生面外变形处

阶段出发,明确了运营期钢桥检测的重点。随着钢桥设计理念的转变,在设计阶段指明钢桥疲劳检测重点,由设计指导养护将成为未来发展的趋势。

2.3 钢桥检测技术

对于钢结构桥梁的检查,中美规范均以人工目视检查为主,无损检测为辅。目前,常用的无损检测技术主要有射线检测、磁粉检测、涡流检测、渗透检

测、超声波检测等,中国规范虽然有专门针对各种无损检测的技术标准,但是桥梁养护规范中无损检测的相关规定较少。美国规范MBE对无损检测技术的相关规定十分详细与全面,包括各种检测技术的优缺点,对表面裂纹、内部裂纹等10种典型缺陷进行了适用性分析(表4),对于桥梁养护人员的指导性和可操作性更强。

表 4 钢桥无损检测技术优缺点分析

检测方法	微小表面裂纹	深表面裂纹	内部裂纹	疲劳裂纹	初始气孔	焊缝熔渣	厚度	应力腐蚀	起泡	腐蚀坑
射线检测	N	F	F	P	G	G	F	F	P	G
磁粉检测	湿	G	G	N	G	N	N	G	N	N
	干	F	G	N	G	N	N	F	N	P
涡流检测	F	G	N	N	N	P	P	N	N	N
渗透检测	F	G	N	G	N	N	N	G	N	F
超声波检测	P	G	G	G	G	F	G	F	F	P

注:G为效果好;P为效果较差;F为无法检出;N为不适用。

3 钢桥病害评定

中国公路桥梁、城市桥梁、铁路桥梁以及美国桥梁养护规范的技术状况评定方法各不相同,但是其基础都是病害的评定标度。本文将各规范病害评定标度进行对比,分析其特色和优缺点。

3.1 涂层劣化评定

中国针对涂层劣化评定的相关规范很多,《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》(GB/T 1766—2008)将涂层劣化等级分为6级;《铁路钢梁涂膜劣化评定》

(TB/T 2486—1994)与《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)标准略粗,分为4级;《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99—2017)规定了变色起皮与油漆剥落的等级,将其分为3级。评定方法方面,《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)、《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99—2017)和《铁路钢梁涂膜劣化评定》(TB/T 2486—1994)通过病害面积占整个钢结构物表面积百分比评定涂层劣化病害,《铁路钢梁涂膜劣化评定》(TB/T 2486—1994)和《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》(GB/T 1766—2008)进一步给出了病害面积比的参考图。美国

MBEI规范根据涂层变色、剥落、锈蚀颜色和涂层有效性综合评定钢桥涂层病害等级,并提出相应处置措施,如表5所示。

3.2 锈蚀评定

《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》(GB/T 1766—2008)将锈蚀按锈蚀点数分为6级,等级分类最细;《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—

2011)按构件锈蚀面积和锈蚀孔洞数量进行划分;《铁路钢梁涂膜劣化评定》(TB/T 2486—1994)只规定了构件锈蚀的面积;《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99—2017)评定等级分类较粗,但规定了锈蚀脱落、点蚀、锈斑3种病害形式;美国MBEI规范评定仅对病害做定性描述,对养护人员提出较高要求。各规范对于钢材锈蚀病害的评定标准见表6。

表5 美国MBEI规范涂层劣化评定

评定等级	评定方法				处置措施
	变色	剥落	锈蚀颜色	有效性	
1	无	无	淡褐色	状态良好	不处置
2	变暗	无	橘黄色	大部分有效	不处置或维修涂装
3	失去颜料颜色	少量	深褐色	作用有限	维修涂装或重新涂装
4	—	暴露基材	黑色	完全失效	重新涂装

表6 各规范关于锈蚀病害的划分等级规定

锈蚀等级	色漆和清漆 涂层老化的评级方法(GB/T 1766—2008)		铁路钢梁涂膜劣化评定(TB/T 2486—1994)	公路桥梁技术状况评定标准(JTG/T H21—2011)	城市桥梁养护技术标准(CJJ 99—2017)		桥梁构件检查手册(MBEI)	
	锈蚀点数/个	锈蚀大小(最大尺寸)	锈蚀面积比/%	定量描述	锈蚀脱落面积比/%	锈蚀个数	锈斑面积比/%	定性描述
0	0	10倍放大镜下无可见的锈点	—	—	—	—	—	—
1	≤5	10倍放大镜下才可见的锈点	0	无	5	无	0	无锈蚀
2	6~10	正常视力下刚可见的锈点	0.3	≤2%	5~10	局部	0~10	锈斑均匀分布在构件表面
3	11~15	<0.5 mm的锈点	3	2%~5%,或锈蚀孔洞≤2个,孔洞直径≤30 mm;板梁≤50 mm,桁梁孔洞直径≤30 mm	>10	大量	>10	构件截面出现削弱
4	16~20	0.5~5 mm的锈点	5	>5%,或锈蚀孔洞>2个,孔洞直径>30 mm;板梁>50 mm,桁梁孔洞直径>30 mm	—	—	—	构件损失已经对整桥结构造成影响,需要进行结构检查
5	>20	>5 mm的锈点	—	—	—	—	—	—

3.3 螺栓病害评定

各规范主要按螺栓病害比例评定病害等级,各规范对于螺栓病害的评定标准见表7。《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2017)与《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99—2017)最高标度螺栓病害比例相同,《公

路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)标度4和标度5允许出现螺栓病害的比例更高,要求略低于前两本规范。美国MBEI规范没有依据螺栓病害比例进行评定,而是由养护人员主观判断螺栓失效是否影响桥梁结构安全。

表 7 各规范关于螺栓松动脱落的划分等级规定

螺栓病害等级	公路桥涵养护规范 (JTG H11—2017)	公路桥梁技术状况评定标准 (JTG/T H21—2011)	城市桥梁养护技术标准 (CJJ 99—2017)	桥梁构件检查手册 (MBEI)
	螺栓损坏占总数量百分比(定性描述)	螺栓失效占总量的百分比/%	螺栓松动占总量百分比	定性描述
1	无松动	无	未出现螺栓松动	无松动
2	少数节点有螺栓松动变形	≤1	≤20% 螺栓出现松动	无松动
3	螺栓损坏在 10% 以内	(1,10]	>20% 螺栓出现松动	连接节点螺栓部分失效
4	螺栓损坏为 10%~20%	(10,30]	—	螺栓失效影响整桥的结构功能安全,需要进行全桥检查
5	螺栓损坏>20%	>30	—	—

3.4 焊缝病害评定

《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)按裂纹长度和裂纹位置评定裂纹开裂等级;《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99—2017)评定等级

分类较粗,但规定了焊缝开裂和焊缝裂纹两种病害;美国 MBEI 规范考虑了裂纹增长趋势,但操作难度较大。各规范对于焊缝开裂病害的评定标准见表 8。

表 8 各规范关于焊缝开裂的划分等级规定

焊缝病害等级	公路桥梁技术状况评定标准 (JTG/T H21—2011)	城市桥梁养护技术标准 (CJJ 99—2017)		桥梁构件检查手册 (MBEI)
	开裂长度(定量描述)	焊缝开裂定量描述	焊缝裂纹定量描述	定性描述
1	无	焊缝未出现开裂	没有裂纹	无疲劳裂纹
2	出现极少量细小裂纹	焊缝≤10% 的开裂	焊缝有≤10% 的裂纹	有裂纹但无增长趋势
3	主梁、纵横梁受拉翼缘边焊缝开裂长度≤5 mm	焊缝>10% 的开裂	焊缝有>10% 的裂纹	裂纹成网状
4	主梁、纵横梁受拉翼缘边焊缝开裂长度>5 mm 且≤10 mm,其他位置焊缝开裂长度≤5 mm	—	—	裂纹已经对整桥造成影响,需要进行结构检查
5	主梁、纵横梁受拉翼缘边焊缝开裂长度>10 mm,其他位置焊缝开裂长度≤5 mm	—	—	—

总体而言,目前中国桥梁养护规范钢桥病害评定方法基本以定量为主,而美国 MBEI 规范中对于钢桥病害的评定以定性描述为主,需要养护人员判断病害是否对桥梁的结构安全造成影响,对养护人员的要求较高。中国公路桥梁技术状况评定采用 4 标度或 5 标度的评定方法,而城市桥梁技术状况评定病害分类更加细致,同时采用了 3 标度评定方法,各有优势。

4 钢桥维修与加固

钢桥维修与加固内容主要包括:涂层的维修涂

装与重新涂装,高强螺栓的更换、钢桥杆件的加固以及疲劳裂纹的处置等。中国公路桥梁养护规范中针对钢桥维修的相关条文较少,可参考性不强。目前钢桥涂装的维修主要依据《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T 722—2018),高强螺栓的更换主要依据《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T F50—2011),杆件加固及疲劳裂纹的处置主要依据《钢结构加固设计标准》(GB 51367—2019)及《公路桥梁加固设计标准》(JTG/T J22—2008)。但是《钢结构加固设计标准》(GB 51367—2019)及《公路桥梁加固设计标准》(JTG/T J22—2008)均以加固设计为主,对

于现场施工指导性不强。

鉴于钢桥疲劳裂纹的频繁出现以及对桥梁结构安全影响极大,美国联邦公路局制定了《钢桥疲劳裂纹维修与加固指南》^[8],其主要内容包括了疲劳裂纹的检查与评估、维修加固设计以及维修加固施工方法。规范中要求当养护人员发现疲劳裂纹时,应首先调查引发疲劳裂纹的原因,对于由变形引起的疲

劳裂纹应采取适当措施消除残余应力并进行检查,对于荷载引起的疲劳裂纹应采取钻孔止裂、气动冲击等措施,对于导致截面承载能力降低的疲劳裂纹同时还应采取钢板补强措施。具体维修流程如图1所示。此外该规范针对每种维修加固方法制定了详细的操作流程,具有很强的可操作性。

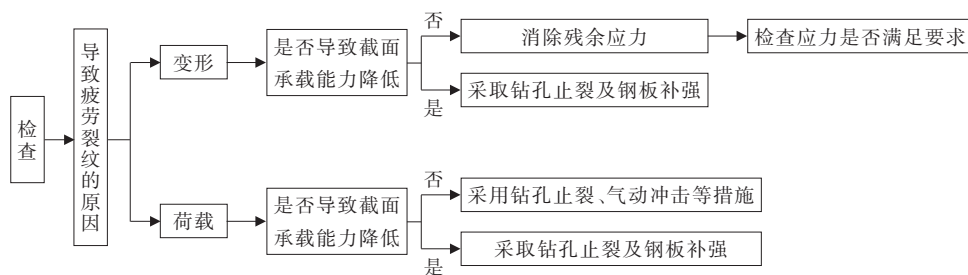


图1 钢桥疲劳维修与加固通用流程图

5 结论

通过对比中美钢桥养护相关规范,从钢桥检查、病害评定标度、维修与加固3方面对比分析钢结构桥梁相关规定,得出以下结论:

(1) 钢桥检查方面,目前中国公路规范针对钢桥检查重点相关规定比较笼统,美国规范从设计阶段出发,依据钢桥断裂危险构件与疲劳敏感细节制定钢桥关注重点。同时,美国规范对于各种无损检测技术的优缺点及针对检测不同类型缺陷的适用性进行了分析,具有较强的可操作性。

(2) 钢桥病害评定方面,中国钢桥病害评定采用量化指标,而美国钢桥评定基本采用定性判断,操作难度较大。

(3) 美国制定了专门的钢桥疲劳裂纹维修与加固指南,针对多种维修加固技术,制定了具体的操作流程。中国目前桥梁养护规范体系无法有效指导养护人员完成钢桥疲劳裂纹的维修与加固,有许多方法还处于研究性应用阶段,有待进一步完善。

参考文献:

- [1] 曹明旭,张宇峰,朱从明.中美桥梁养护规范的对比研究[J].黑龙江交通科技,2009,32(10):146-148.
- [2] 于晓光.国内、外桥梁养护检测规范对比[J].世界桥梁,2012,40(2):59-62.
- [3] 杨朝辉,张丽芳,艾军,等.国内外大跨度钢箱梁桥养护规范对比研究[J].交通运输研究,2013(13):8-11.
- [4] 张凤德,张建东,李雪红,等.中日桥梁养护管理体系比较[J].中外公路,2016,36(1):182-186.
- [5] 张立奎,孙莉.中美桥梁总体技术状况评价指标计算方法对比[J].中外公路,2022,42(2):169-172.
- [6] FHWA. National bridge inspection standards[S]. Washington D.C.,2004.
- [7] FHWA. Bridge inspector's reference manual[S]. Washington D.C.,2006.
- [8] FHWA. Manual for repair and retrofit of fatigue cracks in steel bridges[S]. Washington D.C.,2013.
- [9] AASHTO. Manual for bridge evaluation[S]. Washington D.C.,2011.
- [10] AASHTO. Manual for bridge element inspection[S]. Washington D.C.,2015.