



中国工程建设标准化协会标准
Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路耐候钢混凝土组合桥梁技术规程

Technical Specifications for Highway Weathering Steel-concrete
Composite Bridge
(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布
Issued by China Association for Engineering Construction
Standardization

中国工程建设标准化协会标准
Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路耐候钢混凝土组合桥梁技术规程

Technical Specifications for Highway Weathering Steel-concrete
Composite Bridge

主编单位：北京交通大学 广州市市政工程设计研究总院

发布机构：中国工程建设标准化协会

施行日期：XX 年 XX 月 XX 日

人民交通出版社股份有限公司

XX 北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于开展 2017 年第二批中国工程建设标准化协会标准（CECS G）制修订项目编制工作的通知》（中建标公路[2017]71 号）的要求，北京交通大学等单位承担《公路耐候钢混凝土组合桥梁技术规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

本规程的主要内容是：总则、术语、材料、耐候钢混凝土组合桥梁适用条件、耐候钢混凝土组合桥梁设计及构造、耐候钢混凝土组合桥梁施工、耐候钢混凝土组合桥梁验收、耐候钢混凝土组合桥梁检查、养护及维修等。

本规程是基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本规程相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由北京交通大学负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本规程日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或北京交通大学（地址：北京市海淀区上园村 3 号，邮编：100044，电子邮箱：jshdu@bjtu.edu.cn），以便修订时参考。

主 编 单 位： 北京交通大学 广州市市政工程设计研究总院

参 编 单 位：

主 编：

主 审：

参与审查人员：

目 次

1 总则.....	1
2 术语.....	3
3 材料.....	5
4 耐候钢混凝土组合桥梁适用条件.....	13
5 耐候钢混凝土组合桥梁设计及构造.....	15
5.1 基本规定.....	15
5.2 腐蚀裕量.....	15
5.3 耐候钢疲劳.....	16
5.4 螺栓连接.....	17
5.5 构造细节.....	17
6 耐候钢混凝土组合桥梁施工.....	25
6.1 一般规定.....	25
6.2 耐候钢表面处理.....	26
6.3 耐候钢构件焊接和螺栓连接.....	28
6.4 耐候钢构件储存、运输和安装.....	29
7 耐候钢混凝土组合桥梁验收.....	31
8 耐候钢混凝土组合桥梁检查、养护及维修.....	32
8.1 一般规定.....	32
8.2 检查.....	32
8.3 养护及维修.....	34

1 总则

1.0.1 为规范和指导公路耐候钢混凝土组合桥梁的设计和施工,按照安全、耐久、适用、环保、经济和美观的原则,制定本规程。

条文说明

与普通钢桥使用涂装相比,免涂装耐候钢混凝土组合桥梁的耐腐蚀优势明显,随着我国高性能耐候桥梁钢的成功研发以及对耐候钢结构设计、建造技术的不断深入,使用免涂装耐候钢混凝土组合桥梁已经成为可能。国外已进行了相当规模的耐候钢混凝土组合桥梁的免涂装应用,并颁布了相关设计选材、焊接制造、施工安装和养护维修的系列指南或规范。截止到2013年,美国在9492座桥梁的上部结构中使用了耐候钢,其中9466座即99.72%的桥梁表现合格,仅有26座即0.28%的桥梁出现耐候钢腐蚀严重的情况。

虽然最新颁布的国家标准《桥梁用结构钢》GB/T 714-2015给出了桥梁用耐候钢材的基本性能,但有关耐候钢混凝土组合桥梁的结构构造细节、耐候设计、耐候钢的焊接、栓接、耐候锈层稳定化处理与耐久性养护维修等尚没有相关的标准或规范。本规程是在总结我国耐候钢混凝土组合桥梁设计、施工经验的基础上,广泛征求有关科研、设计、施工、生产管理等单位的意见,并参考了发达国家的相关标准编制而成的。

1.0.2 本规程适用于各等级公路免涂装、锈层稳定化处理后和涂装耐候钢混凝土组合桥梁上部及下部结构的设计、施工、养护及维修。

1.0.3 耐候钢混凝土组合桥梁设计应结合工程实际,合理选用材料、结构方案和构造措施,保证结构在运输、安装和使用过程中满足强度、稳定性和刚度要求,并符合防火与维护等规定。

1.0.4 耐候钢混凝土组合桥梁的设计及施工,除应符合本规程的规定外,尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

条文说明

本规程重点规定了耐候钢混凝土组合桥梁在设计、施工、养护及维修过程中应特别注意的事项及要求，而其它与常规钢混凝土组合桥梁的设计、施工、养护及维修要求相同之处不再具体列出，请按国家和行业现行有关标准的规定执行。

征求意见稿

2 术语

2.1 耐候钢 weathering steel

耐候钢即耐大气腐蚀钢，是介于普通钢和不锈钢之间的低合金钢系列。耐候桥梁钢由普碳钢添加少量铜、镍等耐腐蚀元素而成，具有优异的耐大气腐蚀性能和优质钢的强韧、塑延、成型、焊割、磨蚀、高温、抗疲劳等特性。

2.2 耐候钢混凝土组合桥梁 weathering steel-concrete composite bridge

主要受力部件由耐候钢和混凝土两种材料组合形成的组合构件组成的桥梁。本规程简称耐候钢混凝土组合桥梁。

2.3 耐大气腐蚀性 atmospheric corrosion resistance

钢材在大气中的耐腐蚀性能。

2.4 耐大气腐蚀性指数 atmospheric corrosion resistance index

评估钢材耐大气腐蚀性能的指数，耐大气腐蚀性指数大于6.0的钢材为耐候钢。

2.5 保护性锈层 protective rust patina

耐候钢表面形成的致密和附着性很强的保护膜，能够阻碍锈蚀向内部进一步扩散和发展，保护锈层下的基体，有效减缓腐蚀速度。

2.6 锈层稳定化处理 stabilization treatment of rust patina

耐候钢表面经洒水、喷涂锈层处理液等方法，加快耐候钢表面保护性锈层形成的处理措施。

2.7 耐候钢腐蚀裕量 Weathering steel corrosion allowance

虽然耐候钢的腐蚀速率远低于普通结构钢，但由腐蚀造成的有效厚度损失不容忽视。为弥补由于耐候钢生锈导致的钢材有效厚度的减小，免涂装耐候钢结构在每个暴露表面预留的供腐蚀减薄的多余厚度称为腐蚀裕量。涂装耐候钢结构则不需要预留腐蚀裕量。

2.8 耐候钢计算厚度 Effective thickness of weathering steel

根据相关国家或行业标准中的公式计算或有限元分析所得到的耐候钢钢板厚度。

2.9 耐候钢名义厚度 Nominal thickness of weathering steel

免涂装耐候钢的计算厚度加上耐候钢腐蚀裕量后得到的耐候钢钢板厚度。

2.10 耐候焊接材料 weathering welding material

耐大气腐蚀性指数大于6.0、具有耐候性的焊接材料。

2.11 耐候高强度螺栓 weathering high strength bolts

耐大气腐蚀性指数大于6.0、具有耐候性的高强度螺栓。

2.12 耐候高强度螺母 weathering high strength nuts

耐大气腐蚀性指数大于6.0、具有耐候性的高强度螺母。

2.13 耐候高强度垫圈 weathering high strength washers

耐大气腐蚀性指数大于6.0、具有耐候性的高强度垫圈。

2.14 “隧道效应” “Tunnel Effect”

城市和郊区耐候钢混凝土组合跨线桥下的垂直挡土墙或窄路肩、较小的桥下净空以及紧靠路肩的高桥台等因素导致桥下撒盐融冰道路盐雾难以被气流消散，从而使跨线桥上耐候钢氯化物沉积增多，这种现象一般被称为“隧道效应(Tunnel Effect)”。

3 材料

3.0.1 耐候钢混凝土组合桥梁中的钢筋混凝土构件混凝土强度等级不应低于C30；耐候钢混凝土组合桥梁中的预应力混凝土构件混凝土强度等级不应低于C40。

条文说明

考虑到耐候钢混凝土组合构件一般用于主要受力构件，因此规定钢筋混凝土构件采用的混凝土强度等级不低于C30，而预应力混凝土构件采用的混凝土强度等级不应低于C40。

3.0.2 耐候钢混凝土组合桥梁中混凝土相关设计指标应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG D62）规定取用。

3.0.3 耐候钢混凝土组合桥梁中的普通钢筋及预应力钢筋的相关设计指标应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG D62）规定取用。

3.0.4 耐候钢混凝土组合桥梁中的普通钢材设计指标应按现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）规定取用。

3.0.5 耐大气腐蚀性指数I应按如下公式计算：

$$I=26.01(\%Cu)+3.88(\%Ni)+1.20(\%Cr)+1.49(\%Si)+17.28(\%P)-7.29(\%Cu)(\%Ni)-9.10(\%Ni)(\%P)-33.39(\%Cu)^2$$

计算公式适用的化学成分质量分数范围如下：

Cu	0.012% ~ 0.510%
Ni	0.05% ~ 1.10%
Cr	0.10% ~ 1.30%
Si	0.10% ~ 0.64%
P	0.01% ~ 0.12%

条文说明

Larrabee和Coburn通过综合测试270种不同成分钢材(涵盖三种不同质量分数的铬、五种不同质量分数的铜、三种不同质量分数的磷、三种不同质量分数的硅

和两种不同质量分数的镍)的耐大气腐蚀性,研究了各种元素成分之间的相互作用,得出了铬、铜、磷、硅和镍元素对耐大气腐蚀性的影响并拟合了以上耐大气腐蚀性指数公式。钢材具有较好的耐大气腐蚀性能时,耐大气腐蚀性指数应为6.0或6.0以上,耐大气腐蚀性指数越大表明钢材的耐大气腐蚀性能越好。然而这个公式的应用范围仅局限于铬、铜、磷、硅和镍五种元素以及他们在试验中用到的质量分数范围。中国、美国和英国等国规范目前均用此公式进行耐大气腐蚀性指数计算。

3.0.6 耐候钢材耐大气腐蚀性指数应不小于6.0,其质量应符合现行《桥梁用结构钢》(GB/T 714)的规定,其主要化学成分应符合表3.0.6的规定。

表3.0.6 耐候钢化学成分

牌号	质量等级	化学成分 ^{a,b} (质量分数)/%											
		C	Si	Mn ^c	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Cu	Mo	N	Als ^d
Q345qNH	D E F	≤ 0.11	0.15	1.10	0.010	0.010	0.006	~ 0.70	~ 0.40	~ 0.50	0.10	0.008	0.015 ~ 0.050
Q370qNH											0.15		
Q420qNH											~		
Q460qNH											0.20		
Q500qNH											~		
Q550qNH											0.25		
											0.55		

^a 铌、钒、钛、铝可单独或组合加入,组合加入时,应至少保证一种合金元素含量达到表中下限规定: Nb+V+Ti≤0.22%。
^b 为控制硫化物形态要进行Ca处理。
^c 当卷板状态交货时Mn含量下限可到0.50%。
^d 当使用全铝(Alt)含量计算时,全铝含量应为0.020%~0.055%。

3.0.7 耐候钢材力学性能应符合表3.0.7的规定。耐候钢材设计指标应按现行《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64)的规定取用。

表3.0.7 耐候钢力学性能

牌号	质量等级	拉伸试验 ^{a,b}					冲击试验 ^c	
		下屈服强度 R_{eL}/MPa			抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A/\%$	温度 $^{\circ}\text{C}$	冲击吸收能量 KV_2/J
		厚度 $\leq 50 \text{ mm}$	50 mm < 厚度 $\leq 100 \text{ mm}$	100 mm < 厚度 $\leq 150 \text{ mm}$				
		不小于						不小于
Q345qNH	C						0	120
	D	345	335	305	490	20	-20	
	E						-40	
Q370qNH	C						0	120
	D	370	360	-	510	20	-20	
	E						-40	
Q420qNH	D						-20	120
	E	420	410	-	540	19	-40	
	F						-60	
Q460qNH	D						-20	120
	E	460	450	-	570	18	-40	
	F						-60	
Q500qNH	D						-20	120
	E	500	480	-	630	18	-40	
	F						-60	
Q550qNH	D						-20	120
	E	550	530	-	660	16	-40	
	F						-60	

^a 当屈服不明显时，可测量 $R_{p0.2}$ 代替下屈服强度。
^b 拉伸试样取横向试样。
^c 冲击试样取纵向试样。

条文说明

耐候钢材料应根据结构的重要性、荷载特征、结构形式、应力状态、钢材厚度、成型方法、工作环境和表面要求等因素合理选取耐候钢牌号及性能指标，并在设计文件中明确。

3.0.8 免涂装耐候钢混凝土组合桥梁采用的焊接材料应为与耐候钢材力学性能及耐候性能相匹配的耐候焊接材料。焊接材料及焊缝的设计指标应按现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定取用。当两种不同强度级别的耐候钢材相焊接时，宜采用与主体金属强度较低一种钢材相适应的焊条或焊丝。

条文说明

英国规范BS EN 1090-2规定免涂装耐候钢焊接使用的焊接材料应为与主体金属力学性能及耐候性能相匹配的耐候焊接材料。然而在某些情况下使用非耐候性焊接材料也可保证焊缝具有耐候性，例如对接焊缝采用每侧单道焊的情况下，耐候钢中的合金元素在焊接过程中与焊接材料相融合从而使焊缝也具有耐候性；或多道焊角焊缝和多道焊对接焊缝的焊接主体采用非耐候性焊接材料，最后用耐候性焊接材料盖面，也可保证焊缝具有耐候性。

目前国内还未发布耐候焊接材料的相关标准，但已有厂家生产耐候焊接材料，实际工程焊接中使用的焊接材料为与主体金属力学性能及耐候性能相匹配的耐候焊接材料。

3.0.9 涂装耐候钢混凝土组合桥梁可采用非耐候焊接材料。焊接材料及焊缝的设计指标应按现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定取用。

3.0.10 免涂装耐候钢混凝土组合桥梁须使用耐候高强度螺栓，其主要化学成分应符合表3.0.10的规定。

表3.0.10 耐候高强度螺栓化学成分

熔炼分析化学成分 (质量分数) /%	8. 8S			10. 9S
	A	B	基于耐大气腐蚀性指数 ^b	基于耐大气腐蚀性指数 ^b
C	0.33 ~ 0.40	0.38 ~ 0.48	0.30 ~ 0.52	0.30 ~ 0.53
Mn	0.90 ~ 1.20	0.70 ~ 0.90	≥ 0.60	≥ 0.60
P	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.035
S	≤ 0.040	≤ 0.040	≤ 0.040	≤ 0.040
Si	0.15 ~ 0.30	0.30 ~ 0.50	-	-
B	-	-	-	-
Cu	0.25 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.60 ^a	0.20 ~ 0.60 ^b
Ni	0.25 ~ 0.45	0.50 ~ 0.80	≥ 0.20 ^a	≥ 0.20 ^{b,c}
Cr	0.45 ~ 0.65	0.50 ~ 0.75	≥ 0.45	≥ 0.45 ^b
V	-	-	-	-
Mo	-	≤ 0.06	≥ 0.10 ^a	≥ 0.10 ^{b,c}
Ti	-	-	-	-

^a 成分分析结果超出熔炼分析规定的范围10%以内是允许的。例如熔炼分析C 0.30~0.52=成分分析C 0.27~0.57，或熔炼分析P≤0.040=成分分析P≤0.044。

^b 符合表3.0.7.1的螺栓或熔炼分析Cu≥0.20%并且耐大气腐蚀性指数大于6.0的耐候高强度螺栓均可使用。

^c 镍和钼至少有一项应达到含量要求。

条文说明

本条规定参考了美国规范ASTM F3125对耐候高强度螺栓的化学成分的规定。表3.0.10中，8.8S级耐候高强度螺栓的化学成分共有三种类别，A类、B类耐候高强度螺栓的化学成分要求相对比较严格；除此之外也可采用第三类，即基于耐大气腐蚀性指数以及表3.0.10给出的化学成分范围自行设计化学成分，自行设计的耐候钢高强度螺栓耐大气腐蚀性指数大于6.0均可使用；10.9S级耐候高强度螺栓只可基于耐大气腐蚀性指数以及表3.0.10给出的化学成分范围自行设计。

3.0.11 免涂装耐候钢混凝土组合桥梁须使用耐候高强度螺母，其主要化学成分应符合表3.0.11的规定。

表3.0.11 耐候高强度螺母化学成分

化学成分		质量分数 /%							
		A ^a	B ^a	C ^a	D ^a	E ^a	F ^a	G ^a	H ^a
C	熔炼分析	-	0.33 ~ 0.40	0.38 ~ 0.48	0.15~ 0.25	0.15~ 0.25	0.20~ 0.25	0.20~ 0.25	0.20~ 0.53
	成分分析	-	0.31 ~ 0.42	0.36 ~ 0.50	0.14~ 0.26	0.14~ 0.26	0.18~ 0.27	0.19~ 0.26	0.19~ 0.55
Mn	熔炼分析	-	0.90 ~ 1.20	0.70 ~ 0.90	0.80 ~ 1.35	0.40 ~ 1.20	0.60 ~ 1.00	0.90 ~ 1.20	≥ 0.40
	成分分析	-	0.86 ~ 1.24	0.67 ~ 0.93	0.76 ~ 1.39	0.36 ~ 1.24	0.56 ~ 1.04	0.86 ~ 1.24	≥ 0.37
P	熔炼分析	0.07 ~ 0.15	≤0.040	0.06 ~ 0.12	≤0.035	≤0.040	≤0.040	≤0.040	≤0.046
	成分分析	0.07 ~ 0.155	≤0.045	0.06 ~ 0.125	≤0.040	≤0.045	≤0.045	≤0.045	≤0.052
S	熔炼分析	≤0.050	≤0.050	≤0.050	≤0.040	≤0.050	≤0.040	≤0.040	≤0.050
	成分分析	≤0.055	≤0.055	≤0.055	≤0.045	≤0.055	≤0.045	≤0.045	≤0.055
Si	熔炼分析	0.20 ~ 0.90	0.15 ~ 0.35	0.30 ~ 0.50	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.50	0.15 ~ 0.35	0.15 ~ 0.35	-
	成分分析	0.15 ~ 0.95	0.13 ~ 0.37	0.25 ~ 0.55	0.13 ~ 0.37	0.20 ~ 0.55	0.13 ~ 0.37	0.13 ~ 0.37	-
Cu	熔炼分析	0.25 ~ 0.55	0.25 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.50	0.30 ~ 0.50	0.30 ~ 0.60	0.20 ~ 0.40	≥ 0.20
	成分分析	0.22 ~ 0.58	0.22 ~ 0.48	0.17 ~ 0.43	0.17 ~ 0.53	0.27 ~ 0.53	0.27 ~ 0.63	0.17 ~ 0.43	≥ 0.17
Ni	熔炼分析	≤ 1.00	0.25 ~ 0.45	0.50 ~ 0.80	0.25 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	0.30 ~ 0.60	0.20 ~ 0.40	≥ 0.20 ^b
	成分分析	≤ 1.03	0.22 ~	0.47 ~	0.22 ~	0.47 ~	0.27 ~	0.17 ~	≥ 0.17 ^b

			0.48	0.83	0.53	0.83	0.63	0.43	
Cr	熔炼分析	0.30 ~ 1.25	0.45 ~ 0.65	0.50 ~ 0.75	0.30 ~ 0.50	0.50 ~ 1.00	0.60 ~ 0.90	0.45 ~ 0.65	≥ 0.45
	成分分析	0.25 ~ 1.30	0.45 ~ 0.68	0.47 ~ 0.83	0.27 ~ 0.53	0.45 ~ 1.05	0.55 ~ 0.95	0.42 ~ 0.68	≥ 0.42
V	熔炼分析	-	-	-	≥ 0.020	-	-	-	-
	成分分析	-	-	-	≥ 0.010	-	-	-	-
Mo	熔炼分析	-	-	≤ 0.06	-	≤ 0.10	-	-	≥ 0.15 ^b
	成分分析	-	-	≤ 0.07	-	≤ 0.11	-	-	≥ 0.14 ^b
Ti	熔炼分析	-	-	-	-	≤ 0.05	-	-	-
	成分分析	-	-	-	-	-	-	-	-
适用的螺栓等级		8. 8S	8. 8S 10. 9S						
^a 螺母应在高于转变温度的情况下在液体介质中淬火,并在不低于425°C的温度下回火进行热处理。 ^b 镍和钼两种金属元素应至少使用一种。									

条文说明

本条规定参考了美国规范ASTM A563对耐候高强度螺母的化学成分的规定。表3.0.11中所有类别的螺母均适用于8. 8S级耐候高强度螺栓,但只有H类螺母适用于10. 9S级耐候高强度螺栓。

3.0.12 免涂装耐候钢混凝土组合桥梁须使用耐候高强度垫圈,其主要化学成分应符合表3.0.12的规定。

表3.0.12 耐候高强度垫圈化学成分

熔炼分析化学成分 (质量分数) /%	A	B	C	D
C ^a	-	≤ 0.19	≤ 0.20	≤ 0.17
Mn ^a	-	0.80 ~ 1.25	0.75 ~ 1.35	0.50 ~ 1.20
P	≤ 0.040	≤ 0.030	≤ 0.030	≤ 0.030
S	≤ 0.050	≤ 0.030	≤ 0.030	≤ 0.030
Si	0.15 ~ 0.35	0.30 ~ 0.65	0.15 ~ 0.50	0.25 ~ 0.50
Ni	0.25 ~ 0.45	≤ 0.40	≤ 0.50	≤ 0.40
Cr	0.45 ~ 0.65	0.40 ~ 0.65	0.40 ~ 0.70	0.40 ~ 0.70
Mo	-	-	-	≤ 0.10
Cu	0.25 ~ 0.45	0.25 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	0.30 ~ 0.50
V	-	0.02 ~ 0.10	0.01 ~ 0.10	-
Nb	-	-	-	0.005 ~ 0.05 ^b
^a 碳的规定最大值每减小0.01个百分点,锰的规定最大值可增加0.06个百分点,但锰的含量不得超过1.50%。 ^b 对于厚度小于13毫米的垫圈,可以免除最小铌含量的要求。				

条文说明

本条规定参考了美国规范ASTM F436对耐候高强度垫圈的化学成分的规定。表3.0.12中所有类别的垫圈均适用于8.8S和10.9S级耐候高强度螺栓。

3.0.13 免涂装耐候钢混凝土组合桥梁使用的耐候高强度螺栓、螺母和垫圈的设计指标应按现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTGD64）的规定取用，耐候高强度螺栓、螺母和垫圈除化学成分外的技术条件应符合现行《钢结构用高强度大六角头螺栓》（GB/T 1228）、《钢结构用高强度大六角头螺母》（GB/T 1229）、《钢结构用高强度垫圈》（GB/T 1230）、《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》（GB/T 1231）的规定。

条文说明

耐候高强度螺栓、螺母和垫圈耐大气腐蚀性及其化学成分与非耐候高强度螺栓、螺母和垫圈不同，其它的技术条件和设计指标均与非耐候高强度螺栓、螺母和垫圈相同。

3.0.14 涂装耐候钢混凝土组合桥梁可采用非耐候高强度螺栓、螺母和垫圈，非耐候高强度螺栓、螺母和垫圈的设计指标应按现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTGD64）的规定取用，非耐候高强度螺栓、螺母和垫圈的技术条件应符合现行《钢结构用高强度大六角头螺栓》（GB/T 1228）、《钢结构用高强度大六角头螺母》（GB/T 1229）、《钢结构用高强度垫圈》（GB/T 1230）、《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》（GB/T 1231）、《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》（GB/T 3632）的规定。

3.0.15 耐候钢混凝土组合桥梁中的圆柱头焊钉连接件的设计指标应按现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTGD64）的规定取用。

条文说明

由于剪力钉被完全包裹在混凝土中，所以传统的普通钢材剪力钉可用于公路耐候钢混凝土组合桥梁，并且可使用与普通钢混组合桥梁相同的拉弧焊接工艺。但耐候钢通常具有较高的碳当量（CEV），因此可能导致剪力钉与耐候钢焊接的

时候需要对耐候钢进行预热，预热温度应通过钢材可焊性试验确定。

征求意见稿

4 耐候钢混凝土组合桥梁适用条件

4.0.1 耐候钢混凝土组合桥梁应根据大气腐蚀性等级、建设条件、结构受力性能、耐久性、施工、工期、经济性、景观、运营管理、养护等因素，合理确定结构形式、跨径布置、截面构造、混合梁钢混部位置及结构形式。

条文说明

钢混凝土组合桥梁能充分发挥钢材与混凝土材料的特性。钢混凝土组合桥梁一般用于跨径30~100m的梁桥、700m以内的斜拉桥以及中小跨径的悬索桥。如果适合常规钢混凝土组合桥梁应用的地方大气污染水平较低且能够提供干湿交替的环境从而让耐候钢形成稳定的保护性锈层，理论上耐候钢混凝土组合桥梁亦可用。耐候钢混凝土结构既可用于桥梁的上部结构，亦可用于桥梁的下部结构。

4.0.2 桥址处大气腐蚀性等级的评估应按照现行《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性分类》(GB/T 19292.1)、《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 腐蚀等级的指导值》(GB/T 19292.2)、《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 污染物的测量》(GB/T 19292.3)、《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 用于评估腐蚀性的标准试样的腐蚀速率的测定》(GB/T 19292.4)的有关规定评估耐候钢混凝土组合桥梁的适用性。

条文说明

评估大气腐蚀性等级的方法分为大气污染物测量法和标准试样腐蚀速率试验法。

大气污染物测量法：《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 分类》(GB/T 19292.1)结合了潮湿时间、大气二氧化硫污染物(P0~P3)和空气盐分(S0~S3)三个测量值对环境的整体腐蚀性进行分类(C1~C5)。大气腐蚀性等级与腐蚀性和典型环境之间的关系如下。

大气腐蚀性等级	腐蚀性	典型环境
C1	很低	仅限室内环境
C2	低	污染程度低的大气：主要是农村地区
C3	中等	二氧化硫污染物浓度适中的城市和工业环境以及氯化物浓度低的沿海地区

C4	高	工业区和氯化物浓度适中的沿海地区
C5	很高	湿度和腐蚀性高的工业区以及氯化物浓度高的沿海地区

空气中盐分和大气二氧化硫污染物的测量应符合《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 污染物的测量》（GB/T 19292.3）的有关规定。

《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 腐蚀等级的指导值》（GB/T 19292.2）提供了耐候钢在不同大气腐蚀性等级（C1 ~ C5）中的腐蚀速率的指导值。

标准试样腐蚀速率试验法：标准试样腐蚀速率的测量应符合《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 用于评估腐蚀性的标准试样的腐蚀速率的测定》（GB/T 19292.4）的有关规定。

4.0.3 免涂装耐候钢不应用于以下情况：

- 1 空气中的氯化物含量超过 $300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的环境中。
- 2 空气中 SO_2 沉积率超过 $200 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的环境中。
- 3 使用除冰盐可能导致大量氯化物沉积的结构或结构部件，以及桥下产生“隧道效应（Tunnel Effect）”的桥梁。
- 4 处于持续潮湿环境中的结构或结构部件，例如淹没在水中、埋在土壤中、被植被覆盖或位于净空小于2.5m的水面上的结构或结构部件。

4.0.4 如果第4.0.3条的有关规定仅适用于耐候钢混凝土组合桥梁耐候钢结构的某些部分，则结构仍可使用耐候钢，但这些部分须涂装。涂装应符合现行《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT/T 722）的有关规定，涂装的颜色应与免涂装耐候钢预期的最终颜色相协调。

条文说明

涂装损坏后耐候钢的腐蚀速率低于普通钢材的腐蚀速率，因此一般认为耐候钢的涂装寿命会更长、耐候钢涂装时间间隔长，即使涂装也比普通钢材更有利使用。

5 耐候钢混凝土组合桥梁设计及构造

5.1 基本规定

5.1.1 耐候钢混凝土组合桥梁的设计原则和作用及作用组合应符合现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）的规定。

5.1.2 耐候钢混凝土组合桥梁的安全等级和设计使用年限应符合现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）的规定。

5.1.3 耐候钢混凝土组合桥梁应按现行《公路桥梁抗震设计细则》（JTG/T B02-01）规定的抗震设计原则进行构件及节点的抗震设计。

5.2 腐蚀裕量

5.2.1 免涂装耐候钢在设计时须在每个暴露表面上预留腐蚀裕量。涂装耐候钢不需要预留腐蚀裕量。

条文说明

虽然耐候钢的腐蚀速率远低于普通结构钢，但由腐蚀造成的有效厚度损失不容忽视。为弥补由耐候钢锈蚀导致的钢材有效厚度的减小，需要在每个暴露表面预留腐蚀裕量。

5.2.2 腐蚀裕量取值应符合表5.2.2的规定，表中的环境类别与4.0.2一致。

表5.2.2 腐蚀裕量取值

环境类别	大气腐蚀性等级	腐蚀裕量 mm
箱梁内部	-	0.5
温和腐蚀	C1、C2、C3	1.0
严重腐蚀	C4、C5	1.5

条文说明

腐蚀裕量的取值取决于结构所处环境类别。环境类别分为“箱梁内部”、“温和腐蚀”和“严重腐蚀”，其中“温和腐蚀”环境对应《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 分类》（GB/T 19292.1）中的大气腐蚀性等级C1、C2和C3，“严重腐蚀”环境对应大气腐蚀性等级C4、C5。本条规定参考了英国道路与桥梁设计手册BD 7/01对大气腐蚀性等级所对应的腐蚀裕量取值的要求。除以上规定外，还应注意以下几点：

- 1 撒盐融冰的桥梁处于“严重腐蚀”环境。
- 2 密闭箱梁的内表面不需要预留腐蚀裕量。
- 3 本条规定适用于全部类型的角焊缝和部分熔透对接焊缝。
- 4 因为已在耐候钢母材中预留腐蚀裕量，所以全熔透对接焊缝不需预留腐蚀裕量。

5.2.3 对结构进行应力分析时，耐候钢材的计算厚度应为名义厚度减去预留腐蚀裕量。

条文说明

因预留的腐蚀裕量会随着钢材的腐蚀在结构生命周期内被消耗，所以保守的认为在免涂装耐候钢混凝土组合桥梁整个生命周期中预留的腐蚀裕量不参与受力。

5.3 耐候钢疲劳

5.3.1 耐候钢混凝土组合桥梁的抗疲劳设计应符合现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）和《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）的有关规定。

5.3.2 免涂装耐候钢母材疲劳细节的疲劳强度须降低一个等级使用，而免涂装耐候钢焊缝及涂装的耐候钢疲劳细节疲劳强度无须降低。

条文说明

我国《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64附录C疲劳细节规定：构造细节

①-⑤如果采用耐候钢制造，其细节类别应降低一个等级；其它构造细节如果采用耐候钢制造则无需降级使用。《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64附录C疲劳细节①-⑤对应的为免涂装耐候钢母材疲劳细节。

美国、英国的实践表明，不需担心耐候钢疲劳裂纹不易观察到从而增加了在检查过程中错过这些裂纹的可能性。事实上，光照充足时耐候钢的疲劳裂纹往往会流出容易观察到的橙色锈液。

5.4 螺栓连接

5.4.1 相邻螺栓的间距不应超过14倍耐候钢板厚和180mm的较小值，螺栓中心到边缘的距离不应超过8倍耐候钢板厚和130mm的较小值。

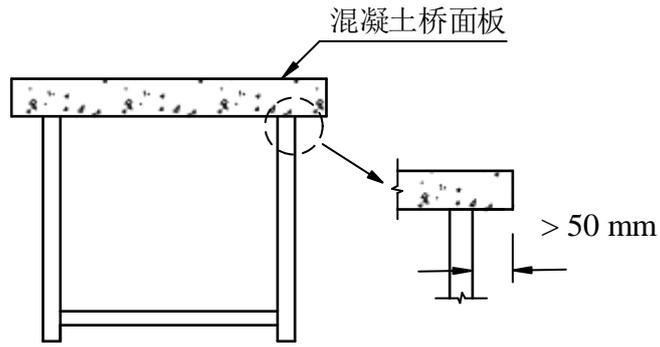
条文说明

本条规定参考了英国道路与桥梁设计手册BD 7/01对相邻螺栓的间距和螺栓中心到边缘距离的要求。耐候高强度螺栓对相邻螺栓的间距和螺栓中心到边缘距离的要求与普通高强度螺栓稍有不同。由于水分可能进入高强度螺栓连接接头处的缝隙之间从而发生腐蚀反应，腐蚀反应形成的腐蚀产物的体积比原始钢材大，从而可能导致连接处螺栓连接在一起的钢板受挤压变形。因此，需对相邻螺栓的间距和螺栓中心到边缘距离做出规定，以使高强度螺栓连接接头具有足够的紧密性和刚度。

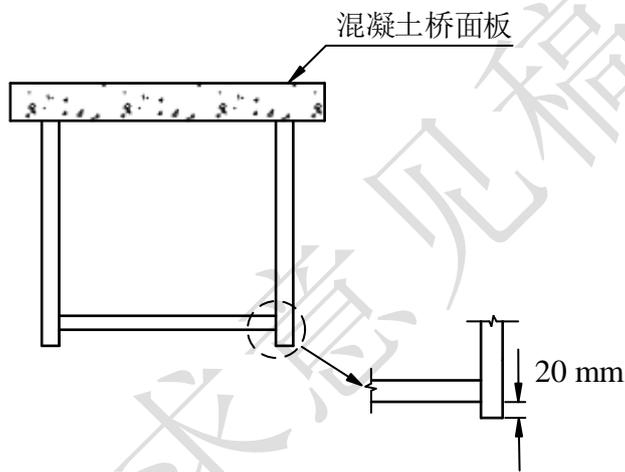
5.4.2 如果不能满足以上两条规定，应使用密封胶密封螺栓与钢材接合处。

5.5 构造细节

5.5.1 耐候钢混凝土组合箱梁的混凝土桥面板伸出腹板外缘的距离须大于50mm，腹板须伸出底板下缘20mm，以保证水路通畅。



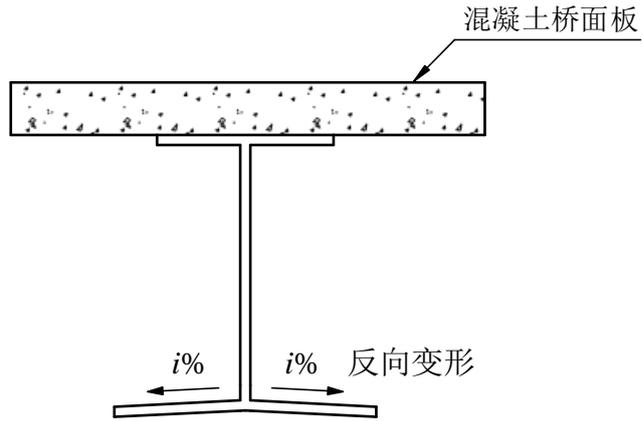
a) 闭口耐候钢混凝土组合箱梁混凝土桥面板构造细节



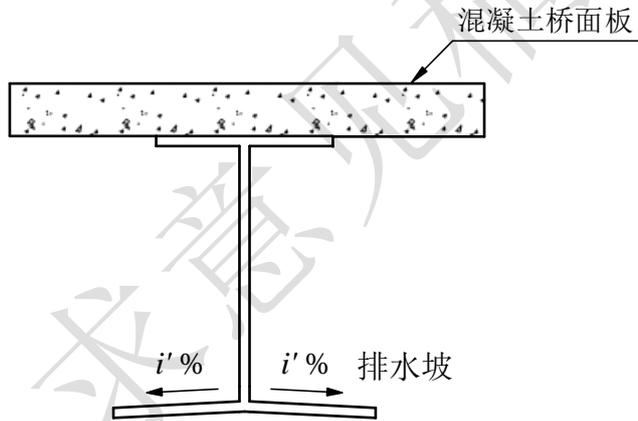
b) 闭口耐候钢混凝土组合箱梁腹板构造细节

图5.5.1 闭口耐候钢混凝土组合箱梁构造细节

5.5.2 耐候钢混凝土组合工字梁下翼缘须先制作出比常规工字钢梁稍大的反向变形再焊接，以利于形成排水坡。



a) 稍大的反变形组装时



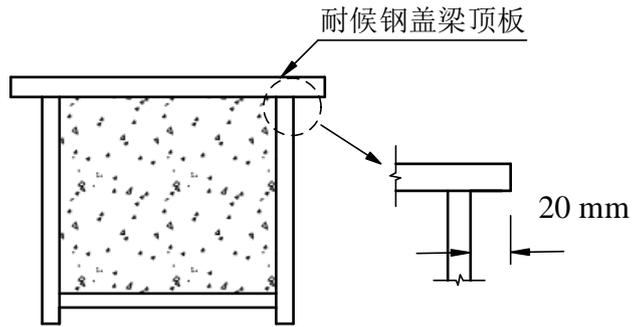
b) 焊接后

图5.5.2 工字梁下翼缘构造细节

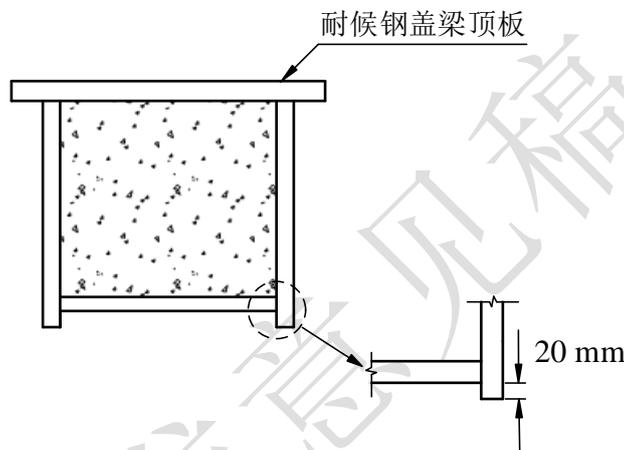
条文说明

工字钢梁下翼缘与腹板焊接时会产生变形，工字钢梁下翼缘制作出比常规工字钢梁稍大的反向变形再焊接，以利于形成排水坡，防止积水积污。

5.5.3 桥梁下部结构耐候钢混凝土盖梁顶板须伸出腹板外缘20mm，腹板须伸出底板下缘20mm，以保证水路通畅。



a) 耐候钢混凝土盖梁顶板构造细节



b) 耐候钢混凝土盖梁腹板构造细节

图5.5.3 耐候钢混凝土盖梁构造细节

5.5.4 应避免使用有填板的连接，不得已时填板的材料需使用耐候性钢材。

条文说明

填板为双肢型钢（角钢、槽钢）与节点板连接组成钢结构构件时的中间连接板。水分可能进入填板与双肢型钢缝隙内从而发生腐蚀反应，腐蚀反应形成的腐蚀产物的体积比原始钢材大，从而可能导致填板受挤压变形，因此宜避免使用有填板的连接。

5.5.5 腹板的竖向加劲肋与顶底板连接处应提供半径为 50mm 的排水孔；如果加劲肋不与底板连接，加劲肋与底板上缘之间须留有 30mm 间隙。

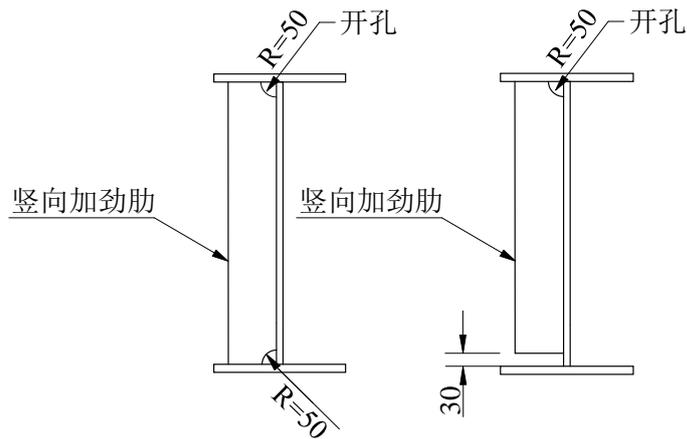


图5.5.5 腹板加劲肋与顶底板连接排水孔构造细节

条文说明

腹板的竖向加劲肋与顶底板和腹板焊接时应在竖向加劲肋与顶底板交界处留出排水孔，如果竖向加劲肋与底板不采用焊接连接，竖向加劲肋与下翼缘板之间应留有间隙以保证水路畅通，从而防止在竖向加劲肋处积水积污。

5.5.6 宜使用连续和整体结构来减少和避免伸缩缝。如果使用伸缩缝，应确保伸缩缝通风和排水良好，以免积水积污。伸缩缝处梁端部1.5倍梁高范围内的耐候钢材应涂装，涂装应符合现行《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT/T 722）的有关规定，涂装的颜色应与免涂装耐候钢预期的最终颜色相协调。

条文说明

美国及英国等的实践表明，伸缩缝处的水分泄露是耐候钢桥梁发生严重腐蚀的主要原因之一。理想情况下，应使用连续梁或连续刚构以减少或尽量避免伸缩缝。当设置伸缩缝时，应确保伸缩缝的密封性以避免泄露，并将伸缩缝处梁端1.5倍梁高范围内的耐候钢材进行涂装。

5.5.7 耐候钢混凝土组合箱梁内部应确保密封；如果不能密封，须在钢箱梁内部最低点设置排水管以便水及时排出。

5.5.8 排水管开口应足够大以避免堵塞，排水管内应使用格栅以防止鸟类和啮齿动物进入箱梁内部。

条文说明

鸟类和啮齿动物产生的粪便会使耐候钢处于长时间湿润的环境中，其中的无机盐还会为形成原电池提供便利条件，从而促进耐候钢材的腐蚀并且抑制耐候钢表面生成保护性锈层。

5.5.9 耐候钢梁和混凝土相交的交界处应视情况使用适当的密封胶密封以防止水分进入。

条文说明

耐候钢梁与混凝土相交的交界处容易出现密封不严实的情况，从而为污染物在缝隙处积累提供便利，并可能导致交界处耐候钢发生腐蚀。在施工导致耐候钢梁与混凝土相交的交界处出现密封不严实的情况下，应使用适当的密封胶密封以防止水分进入。

5.5.10 埋置在土壤中或处于水中的耐候钢须使用涂装。

条文说明

埋置在土壤中的采用耐候钢的下部结构和处于水中的采用耐候钢的钢管桩等结构可能长期处于潮湿的环境从而不利于保护性锈层的形成，因此需使用涂装。

5.5.11 对于包裹在混凝土中的耐候钢构件，如果混凝土保护层厚度符合表5.5.11的规定则不需采用涂装，否则需涂装。

表5.5.11 耐候钢混凝土组合桥梁混凝土所处环境类别划分及混凝土保护层最小厚度

环境类别	条件	混凝土保护层最小厚度 mm
I类-一般环境	混凝土仅受碳化影响的环境	25
II类-冻融环境	混凝土受反复冻融影响的环境	35
III类-近海洋或海洋氯化物环境	混凝土受海洋环境下氯盐影响的环境	45
IV类-除冰盐等其它氯化物环境	混凝土受除冰盐等氯盐影响的环境	35
V类-盐结晶环境	混凝土受混凝土孔隙中硫酸盐结晶膨胀影响的环境	40
VI类-化学腐蚀环境	混凝土受酸碱性较强的化学物质侵蚀的环境	40
VII类-腐蚀环境	混凝土受风、水流或水中夹杂物的摩擦、切削、冲击等作用的环境	45

条文说明

本条规定参考了现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62)中不同环境类别所对应的混凝土保护层最小厚度的规定。对于包裹在混凝土中的耐候钢构件,如果混凝土保护层厚度不能满足本条规定,一旦腐蚀修复将非常困难,因此应涂装。

5.5.12 混凝土桥面板的边缘应设有排水装置以防止水流向钢梁。

5.5.13 须避免耐候钢与电镀异种金属部件的连接。

条文说明

耐候钢与异种金属接触时会形成电势差,从而为形成原电池提供了便利条件。例如耐候钢与镀锌高强螺栓接触时镀锌高强螺栓更为活泼,此时在有水和氧气的条件下会发生原电池反应从而导致镀锌螺栓发生腐蚀。

5.5.14 桥面排水系统的排水管口应伸至钢梁下翼缘以下,以确保排出的水在任何条件下都不会溅到相邻的钢结构上,排水管道不应漏水。宜使用非金属排水管道。

5.5.15 在墩柱上方应设置导水盘以防止锈液流到墩柱上。

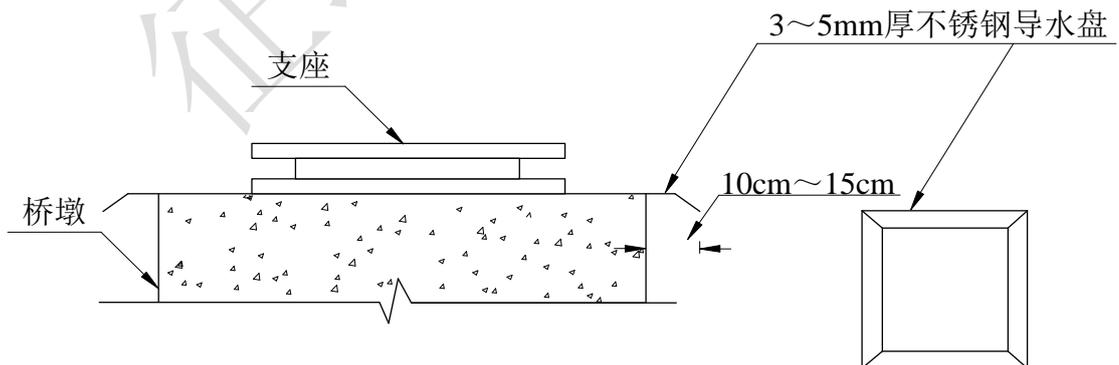


图5.5.15 导水盘构造细节

5.5.16 如使用不锈钢支座,支座宜涂装;如支座不涂装,应使用适当的密封胶密封不锈钢支座和耐候钢支座调平钢板之间的界面。支座处应保证充足的空间以便通风。

条文说明

耐候钢与不锈钢接触时会形成电势差，从而为形成原电池提供了便利条件。与不锈钢相比耐候钢更为活泼，但由于耐候钢表面远远大于不锈钢，所以形成原电池后腐蚀水平可能不太显著，但保险起见仍建议将不锈钢支座涂装或用密封胶将不锈钢支座和耐候钢支座调平钢板之间的界面密封。

5.5.17 扶手和护栏不应使用耐候钢。

条文说明

因为公众与耐候钢接触会干扰保护性锈层的生成，所以需仔细设计扶手和护栏等构造细节以避免公众与耐候钢接触。扶手和护栏可采用木材、涂装普通碳钢或镀锌普通碳钢，但须与耐候钢混凝土组合桥梁中的耐候钢隔离。

征求意见稿

6 耐候钢混凝土组合桥梁施工

6.1 一般规定

6.1.1 耐候钢混凝土组合桥梁制作前，施工单位应根据已经批准的设计文件编制加工制作详图，并编制制作工艺书。制作工艺书应作为技术文件经监理审核。

6.1.2 对大型复杂的耐候钢混凝土组合桥梁结构，应根据业主或设计的要求，进行制作工艺、安装方法和节点性能的试验，试验项目及内容应在设计文件中说明。对施工单位提出的新加工工艺和安装方法，经相应部门组织鉴定并备案后方可采用。

6.1.3 耐候钢混凝土组合桥梁采用的钢材、焊接材料和连接材料的性能，应具有质量合格证明书，并应符合本规程第3章的规定和设计文件的要求。

6.1.4 耐候钢混凝土组合桥梁连接件的施工应符合现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）的规定。

6.1.5 耐候钢混凝土组合桥梁混凝土桥面板的施工应符合现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）的规定。

6.1.6 耐候钢混凝土组合桥梁构件应根据批准的加工制作详图进行放样。放样和号料应预留焊接收缩量及切割、端铣等加工裕量。

6.1.7 耐候钢混凝土组合桥梁构件加工应有专用的加工场地，应使用专用设备。加工制作的允许偏差应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50）的规定。

6.1.8 耐候钢的切割加工宜采用水切割、激光切割、剪板机和等离子弧切割，不应采用火焰切割。耐候钢切割面应无裂纹、夹渣和分层。切割后应清除毛刺、熔渣和飞溅物。需边缘加工的构件，应采用精密切割。

6.1.9 耐候钢构件加工时，应分析耐候钢加工和焊接引起变形的影响因素，采用

相应的措施控制变形；对耐候钢原材料变形、加工和焊接引起的变形需要矫正时、应采用机械矫正，不宜采用热矫正。矫正质量和允许偏差应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50）的规定。

6.1.10 耐候钢成孔应采用钻孔，不应采用圆头冲床成孔。

条文说明

圆头冲床成孔仅适用于薄板（厚度不大于4mm），用于中厚板的时候会出现冲不透或孔边缘出现裂痕的情况。因为耐候钢混凝土组合桥梁用到的耐候钢板均为中厚板，所以圆头冲床成孔不可用于耐候钢成孔。

6.2 耐候钢表面处理

6.2.1 制造和安装过程中须避免使用油漆和蜡笔在耐候钢材上进行标注。须使用水基涂料进行标注。

条文说明

油漆和蜡笔等难以清除，并会干扰锈层形成。水基涂料可用于标记，喷砂清理期间易于除去。

6.2.2 耐候钢构件制造完成后，所有免涂装耐候钢材表面应按照《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂装后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级》（GB/T 8923.1）的有关规定喷砂清理至Sa2级。

条文说明

耐候钢构件制造完成后已经表面喷砂清理至Sa2级以清除加工过程中形成的不均匀锈层，以保证耐候钢构件使用过程中形成均匀美观的锈层。

6.2.3 免涂装耐候钢表面可采用洒水或喷涂预处理液进行锈层稳定化处理，加速保护性锈层的形成。处理液处理后的耐候钢锈层厚度应不小于10 μ m，锈层颜色应为均匀的土黄色或锈红色，整体颜色应一致。

条文说明

将已加工成型的耐候钢通过喷丸去除表面氧化皮后,喷淋耐候钢锈层稳定化处理液。处理液中的化学物质与钢基体发生反应,形成一层均匀、致密的保护性锈层,缩短施工周期,使耐候钢在服役过程中颜色更加均匀,同时也可防止锈液污染环境。如喷淋后锈层有竖条状浅色锈层,属于耐候钢在服役过程中的正常现象,在随后的使用过程中锈层颜色会逐渐一致。

6.2.4 耐候钢处理液中不应含有强酸性物质,其溶液的pH范围应在2.5~8.0之间,且不能添加具有刺激性气味的化学物质。

条文说明

耐候钢处理液中不应含有强酸性物质,以免对钢结构造成较为严重的腐蚀并对周围环境造成污染。

6.2.5 处理液处理耐候钢得到的锈层应不影响耐候钢自身的耐蚀性,厂家应尽可能提供至少1年的自然大气曝晒实验数据来证明。

6.2.6 对于耐候钢构件现场焊接处,焊后需对焊缝处喷涂锈层稳定化处理液,焊缝处锈层颜色会略浅,但随着时间的延长,颜色会逐渐均匀。

条文说明

耐候钢构件现场焊接会破坏制作加工时钢材表面生成的锈层从而出现锈层不均匀现象。焊后对焊缝处喷涂锈层稳定化处理液有利于形成一层均匀、致密的保护性锈层,并与周围钢材表面的锈层颜色更为协调,同时也可防止锈液污染环境。

6.2.7 耐候钢表面处理最好在白天进行,严禁在雨天、雪天、五级风及其以上时和环境温度低于0℃时施工。

条文说明

雨天和雪天天气施工会稀释锈层稳定化处理液、大风天气会吹散锈层稳定化处理液并污染周围环境、环境温度低于0℃时稳定化处理液可能会出现结冰现象

从而不利于保护性锈层的形成，因此严禁在雨天、雪天、五级风及其以上和环境温度低于0℃时施工

6.3 耐候钢构件焊接和螺栓连接

6.3.1 施焊前，应由焊接技术责任人根据焊接工艺评定结果编制工艺文件，向操作人员进行技术交底，并及时处理施工过程中的焊接技术问题。

6.3.2 焊工应严格按照批准的焊接工艺文件中规定的焊接方法、工艺参数和施焊顺序等进行焊接。

6.3.3 焊接材料与母材的匹配应符合设计要求及本规程第3章的规定。焊接材料在使用前，应按其产品说明书及焊接工艺文件的规定进行存放和烘焙。

6.3.4 耐候钢构件焊接后，应对焊缝处进行打磨。

条文说明

焊缝在没打磨的情况下表面会存在凹陷处，为积聚污染物提供了便利从而导致焊缝处更容易发生腐蚀；同时焊缝表面的凹凸不平会导致应力集中，从而降低焊缝的疲劳寿命，因此耐候钢构件焊接后，应对焊缝处进行打磨。

6.3.5 耐候钢与普通碳素钢焊接后，应对焊缝打磨并对暴露在大气中的焊缝两侧10cm范围内进行涂装。

条文说明

耐候钢与普通碳素钢接触时会形成电势差，从而为形成原电池提供了便利条件。将焊缝两侧10cm范围内采用涂装从而使耐候钢与普通碳素钢接头处与空气和水分隔离，从而避免形成原电池。

6.3.6 施焊时应采取工艺措施控制焊接变形，减小焊接残余应力。

6.3.7 螺栓应使用螺母转角法拧紧，不应使用控制扭矩法拧紧。

条文说明

与控制扭矩法不同，螺母转角法是一种位移控制方法，操作和检查都比较简单。螺母转角法包括以下五个步骤：

1 确定终拧转角角度。不同的表面处理方式、高强螺栓等级和规格对螺母转角值均有影响，需试验确定螺母转角值。将螺栓螺杆靠近螺帽处用砂纸磨光，贴上应变片并连接到应变测试仪上，将螺栓初拧至与板贴紧状态并对高强螺栓连接副画线，然后将高强螺栓拧到施工所需的预拉力。记录下线与线的错位角度作为终拧转角角度。

2 初拧。高强螺栓在实际上紧的过程中，需要轴力增加到一定的大小才开始和螺母的转角值成比例。这是因为在开始阶段由于被连接板的平整度不同、贴合不充分造成的，所以选择转角测量的起点非常重要。在美国是以板贴紧状态作为初拧的终点和终拧的起点，也就是计算螺母转角的起点。密贴状态对于螺母转角法的有效性有着很大的影响，当螺母先被拧到密贴状态的时候，达到要求预应力所规定的螺母转角才适用。

3 画线标记。初拧完成后，取下套筒并在螺栓上做好初拧完成后的记号（记为A，钢板、垫圈和螺母三者一线），以此作为终拧起始线，并在此记号往螺母旋紧方向再做一记号作为终拧终止线（记为B）。

4 终拧。继续拧紧高强螺栓，使得螺母上的记号A与钢板上终止记号线B基本重合，确保记号A在螺杆上的画线与在螺母上的画线的相对角度达到要求，完成终拧。

5 终拧后检查螺母旋转量、有无共转、对旋转不足的螺栓补拧到规定旋转量，对发生共转、余长不足、超拧的螺栓重新更换。

6 移除设备，完成高强螺栓转角法施工，带上半个螺母，使用短柄扳手将其即可。

6.4 耐候钢构件储存、运输和安装

6.4.1 耐候钢构件应避免在含盐分的潮湿空气中储存。存放区的垫轨不应有普通碳素钢磨损表面，应使用橡胶、塑料板条或护套进行保护。

条文说明

若存放区的垫轨有普通碳素钢磨损表面，耐候钢与普通碳素钢接触会形成电势差，从而为形成原电池提供了便利条件。因此存放区的垫轨不应有普通碳素钢磨损表面，应使用橡胶、塑料板条或护套进行保护。

6.4.2 耐候钢构件在储存、运输及安装过程中应避免与腐蚀性化学物质接触。

6.4.3 耐候钢构件在运输和安装过程中应注意不要破坏形成的保护性锈层。

条文说明

现场应小心存放和处理耐候钢构件，以确保不会损坏发展中的锈层。虽然锈层会重新形成，但会显得与周围不均匀从而影响美观。

6.4.4 耐候钢构件的吊装过程应进行施工验算，必要时应采取加固措施。

6.4.5 耐候钢闭口截面构件在运输、吊装之前，应将管口包封，防止雨水和异物落入管内。暴露于室外的闭口截面构件应在吊装完毕后封闭杆件端部。

6.4.6 耐候钢构件吊装就位后应立即进行校正，并采取可靠措施保证其稳定性。

6.4.7 耐候钢构件制造和安装过程中须防止混凝土、砂浆、沥青和油脂污染耐候钢表面。

条文说明

混凝土、砂浆、沥青和油脂等会干扰锈层形成，从而影响耐候钢生成保护性锈层。

6.4.8 完成安装后，施工期间耐候钢表面的标记和其它污染物应喷砂清洁至Sa2级。

7 耐候钢混凝土组合桥梁验收

7.0.1 耐候钢混凝土组合桥梁工程完工后，应按现行《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1）要求进行自检、评定，符合要求后方可申请交工验收。

7.0.2 交工验收应按照交通部《公路工程竣（交）工验收办法》的有关规定执行。

条文说明

耐候钢混凝土组合桥梁验收的相关规定除锈层部分外，其他与普通钢材混凝土钢桥验收标准相同。

7.0.3 对于交工验收过程中提出的工程质量缺陷等遗留问题，应根据有关要求，采取有效措施，在规定的期限内完成。

7.0.4 如对免涂装耐候钢进行表面预处理，处理液处理后的耐候钢锈层厚度应不小于 $10\mu\text{m}$ ，锈层颜色应为均匀的土黄色或锈红色，整体颜色应一致。

条文说明

耐候钢混凝土组合桥梁验收的相关规定除锈层部分外，其他与普通钢材混凝土钢桥验收标准相同。

8 耐候钢混凝土组合桥梁检查、养护及维修

8.1 一般规定

8.1.1 耐候钢混凝土组合桥梁的检查、养护及维修应符合现行《公路桥涵养护规范》（JTG H11）的规定。

条文说明

耐候钢混凝土组合桥梁检查、养护及维修的相关规定除伸缩缝、支座、锈层、和厚度检测点部分外，其他与普通钢混凝土组合桥梁验收标准相同。

8.2 检查

8.2.1 应每两年对耐候钢混凝土组合桥梁的耐候钢结构进行目视检查。需要目视检查的范围包括：

- 1 伸缩缝是否泄露；
- 2 耐候钢结构、伸缩缝和支座处是否有积水积污；
- 3 排水系统是否堵塞；
- 4 耐候钢混交界处密封胶是否老化；
- 5 螺栓连接处是否有腐蚀产物；
- 6 耐候钢结构是否被植被覆盖从而导致积水。

8.2.2 应按照表8.1.2的规定根据耐候钢表面锈蚀外观确定锈层等级指数。锈层等级指数为5、4或3表示锈层为腐蚀速率稳定的保护性锈层，则说明腐蚀情况良好；锈层等级指数2或1表示锈层为非保护性锈层则说明钢材腐蚀严重，应立即查明原因并采取补救措施。

表8.1.2 耐候钢锈蚀等级

锈层等级指数	锈层厚度	外观特征	锈片尺寸
1	>800 μm	大块疏松、片状锈层	>25mm
2	>400 μm	小块疏松、片状锈层	5-25mm

3	<400 μm	不均匀锈层	1-5mm
4	<400 μm	质密、附着性好且均匀的深褐色锈层	细密, <1mm
5	<200 μm	质密、附着性好且均匀浅棕色锈层	细密

条文说明

本条规定参考了美国爱荷华州于2011年对爱荷华州内采用耐候钢的桥梁进行评估并发表的调查报告《爱荷华州耐候钢桥性能评估以及检查和维护技术的发展》。报告中对锈层的状态进行了分类,锈层的状态根据锈片尺寸和外观分为1~5五个等级。

8.2.3 耐候钢混凝土组合桥梁应设置耐候钢板厚度监测点,施工完成后应测量原始厚度;运营后,监测点的厚度应每6年监测一次,并计算耐候钢的腐蚀速率。如果在18年之后结构的减薄量超过预留腐蚀裕量,则应采取补救措施。

条文说明

传统的超声波测厚仪测量的是放置在钢材的一个表面上的探头发出的超声波传播到另一侧的钢与空气交界面后反射回探头的传播时间。钢材表面上的锈层或涂装会增加传播时间从而会增加测得的钢材的厚度以导致误差。由于超声波通过锈层和涂装的速度与通过钢材的信号速度不同,为了获得钢材的厚度,必须在测量之前去除表面的锈层和涂装。在耐候钢构件上使用传统的超声波测厚仪监测耐候钢厚度变化具有以下缺点:

- 1 必须除去锈层和涂装同时又不去除任何下面的钢材。
- 2 监测点除去锈层和涂装后腐蚀速率将与其余部位不同,无法继续用于估计下一阶段的腐蚀速率。
- 3 该方法将导致钢材表面锈层不均匀,影响美观。

上述问题可以通过使用特殊类型的超声波测厚仪来解决。这种仪器不是测量超声波从探头回到探头的传输时间,而是测量钢材内部超声波回波之间的时间间隔,因此无需去除锈层和涂装。这种仪器具有体积小、重量轻、电池供电并具有数字显示等特点。这种仪器需要耦合剂将探头的信号通过锈层或涂装传递到钢材中,常用的耦合剂包括水和能够轻易去除的甘油等。这种仪器的精确度可以达到

+/- 0.1毫米。

8.2.4 耐候钢保护性锈层形成以后仍须持续监测耐候钢腐蚀速率。如果预计在结构设计寿命内总减薄量将超过预留腐蚀裕量，则应考虑采取补救措施。

8.3 养护及维修

8.3.1 可行的情况下应用低压水定期清洁积有鸟粪和污垢的耐候钢表面。清洗过程中应避免破坏保护性锈层。如果观察到鸟粪持续累积，则应采取措施阻止鸟类栖息在结构上。

条文说明

耐候钢表面的鸟粪和污垢中的水分和污染物会使耐候钢表面局部处于不利于稳定性锈层形成的环境中，因此可行的情况下应采用低压水定期清洁耐候钢表面。

8.3.2 如果发现除冰盐中氯化物会对耐候钢结构稳定性锈层产生不利影响并导致过度腐蚀，每年除冰期结束时须用低压水对耐候钢表面进行清洗。

条文说明

氯化物会导致耐候钢的表面出现点蚀坑从而对结构的力学性能及抗疲劳性能造成不利影响，因此每年除冰期结束时应采用低压水对耐候钢表面进行清洗。

8.3.3 如果耐候钢结构腐蚀严重，则须对腐蚀严重的局部或整个结构进行修复。修复过程须先对钢结构进行喷砂去除锈层，然后使用与普通钢桥相同的涂装系统进行涂装。

8.3.4 氯化物会导致耐候钢的表面出现点蚀坑。为了从点蚀坑中除去所有可溶性盐，需使用湿喷砂清理。

本规程用词说明

1 本规范执行严格程度的用词，采用下列写法：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”或“须”，反面词采用“严禁”；
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”；
- 2) 在规程条文及其它规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》（×××）的有关规定”；
- 3) 当引用本规程中的其它规定时，表述为“应符合本规程第x章的有关规定”、“应符合本规程第x.x节的有关规定”、“应符合本规程第x. x. x条的有关规定”或“应按本规范第x. x. x条的有关规定执行”。

引用标准名录

- 《工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50153
- 《钢结构工程施工质量验收规范》 GB 50205
- 《钢结构设计规范》 GB 50017
- 《钢结构焊接规范》 GB 50661
- 《组合结构设计规范》 JGJ 138
- 《桥梁用结构钢》 GB/T 714
- 《公路工程结构可靠度设计统一标准》 GB/T 50283
- 《公路桥涵设计通用规范》 JTG D60
- 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 JTG D62
- 《公路钢结构桥梁设计规范》 JTG D64
- 《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》 JTG/T D64-01
- 《公路桥涵施工技术规范》 JTG/T F50
- 《公路工程质量检验评定标准》 JTG F80/1
- 《公路桥涵钢结构防腐涂装技术条件》 JT/T 722
- 《公路桥梁抗震设计细则》 JTG/T B02-01
- 《建筑施工安全检查标准》 JGJ 59
- 《公路桥涵养护规范》 JTG H11
- 《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 分类》 GB/T 19292.1
- 《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 腐蚀等级的指导值》 GB/T 19292.2
- 《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 污染物的测量》 GB/T 19292.3
- 《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 用于评估腐蚀性的标准试样的腐蚀速率的测定》 GB/T 19292.4
- 《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂装后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级》 GB/T 8923.1
- 《钢结构用高强度大六角头螺栓》 GB/T 1228
- 《钢结构用高强度大六角头螺母》 GB/T 1229
- 《钢结构用高强度垫圈》 GB/T 1230

《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》 GB/T 1231

《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》 GB/T 3632

《Eurocode 3: Design of Steel Structures》 BS EN 1993-1-1

《Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures》 BS EN 1994-1-1

《Execution and Steel Structures and Aluminium Structures》 BS EN 1090-2

《Weathering Steel for Highway Structures》 BD 7/01

《Maintenance Painting of Steelwork》 BD 87/05

《Standard Specification for High Strength Structural Bolts, Steel and Alloy Steel, Heat Treated, 120 ksi (830 MPa) and 150 ksi (1040 MPa) Minimum Tensile Strength, Inch and Metric Dimensions》 ASTM F3125

《Standard Specification for Carbon and Alloy Steel Nuts》 ASTM A563

《Standard Specification for Hardened Steel Washers Inch and Metric Dimensions》 ASTM F436

《Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel, up to 50 ksi (345 MPa) Minimum Yield Point, with Atmospheric Corrosion Resistance》 ASTM A588