

香火岩大桥钢管均匀锈蚀厚度限值研究

黄厦¹,周水兴¹,万川龙¹,徐天倚²

(1.重庆交通大学 土木工程学院,重庆市 400074; 2.悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司)

摘要:处在大气环境中的钢管混凝土拱桥,钢管会出现不同程度的锈蚀。根据 JTG/T D65—06—2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》及 GB 50923—2013《钢管混凝土拱桥技术规范》对约束效应系数、持久状态钢管应力限值要求,分析了香火岩大桥主拱弦管均匀锈蚀的最大容许厚度;基于钢管壁厚折减法,建立了弦管均匀锈蚀的有限元模型,分析了拱肋弦管在不同锈蚀厚度下香火岩大桥极限承载力的衰减规律。研究表明:随着弦管锈蚀厚度的增加,截面含钢率降低,弦管应力接近于线性增大。综合考虑约束效应系数、持久状态和极限承载力对应的最大限值,认为香火岩大桥弦管锈蚀厚度应在 6 mm 内。

关键词:钢管混凝土拱桥;均匀锈蚀;锈蚀厚度;约束效应系数;壁厚折减法

处在自然环境中的钢管混凝土拱桥,受到空气中盐分、腐蚀气体影响,尤其是处在环境湿度高的钢管混凝土拱桥,容易引起钢管锈蚀。如果钢管表面的防护涂层质量差,或者使用不适宜的防护涂装,会进一步加速钢管锈蚀。中国已经有几座大跨度钢管混凝土拱桥

出现了严重的钢管锈蚀问题,不得已对全桥防护涂层进行重做,付出了高昂代价。不仅如此,钢管锈蚀使钢管的有效承载截面减小,钢管力学性能退化,钢材屈服台阶缩短直至消失,严重时会出现无征兆的脆性破坏。

围绕钢材锈蚀对钢管混凝土构件力学性能和承载

因此在底节围堰下放前,须对所有钢护筒的垂直度、平面位置及平台的平面位置进行精确测量,计算出钢护筒与平台龙骨之间的间隙,推算出下放到位时平台与钢护筒之间的相对位置,并根据水位波动情况调整测量间隔时间,在施工现场对龙骨翼缘板宽度进行调整和补强,以确保围堰能安全顺利下放。

封底混凝土是施工中的临时过程,它在桥梁施工完成后,将作为无用的永久荷载作用在桥墩上,体量大造价高。它的厚度与施工的当前水位相关,而厚度又与底龙骨的标高相关,水位在施工时又是变化的,这形成了相互制约的因果效应。

根据式(1)计算得到不同水位下封底混凝土的厚度,实现了节省造价和保证施工安全的双重目标。

4[#]墩岸侧没有设置混凝土搅拌站,施工用混凝土需船运输。为避免浇筑大体积封底混凝土时,混凝土供应不连续的风险,对 4[#]墩封底进行了分舱处理。分舱时要综合考虑混凝土陆上运输能力、水上运输能力、混凝土下落时的扩散半径等因素,以及桩位的空间分

布,按体积大致相等的原则共分为 5 个舱。经过这样处理,封底混凝土的浇筑质量得到了充分保证。

4 结语

三峡库区修建大跨桥梁,在施工过程中,水位剧变及地质不良是最大的困难。该工程的施工平台后期又作为围堰底龙骨,在三峡库区水位陡变的情况下,其下沉量高达 42.73 m,施工难度较大。但经过现场控制、调整,较好地解决了施工关键点。

参考文献:

- [1] 于志兵,刘亮.三峡库区桥梁深水基础施工技术[J].中外公路,2017(2).
- [2] 时一波,何少华,刘荣,等.武汉鹦鹉洲长江大桥 1[#]墩塔钢板桩围堰施工关键技术[J].中外公路,2014(1).
- [3] 杨齐海,何加江.公安长江公铁两用特大桥 4 号墩钢围堰施工技术[J].桥梁建设,2015(5).
- [4] 闫志刚.沪通长江大桥天生港专用航道桥 3 号主墩钢围堰封底技术[J].桥梁建设,2015(6).

力的影响,陈梦成分析了钢管锈蚀度对套箍力、钢管混凝土柱组合模量及轴向压力的影响;花幼星等采用“生死单元”模拟外钢管锈蚀,建立了长期轴拉荷载—氯离子腐蚀下的圆钢管混凝土柱的有限元模型,探讨了组合截面材料内力重分布的变化规律;Han 等对方形截面、圆形截面的钢管混凝土在轴压、纯弯长期荷载和氯离子腐蚀共同作用下的力学性能进行了试验研究;Hou 等建立了与之相对应的有限元模型,通过参数分析,给出了考虑钢管锈蚀的承载力简化计算方法。但上述研究都集中在钢管混凝土构件上,对大跨度钢管混凝土拱桥钢管锈蚀方面的研究不多。

该文针对贵州香火岩大桥,根据现行 JTG/T D65—06—2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》及 GB 50923—2013《钢管混凝土拱桥技术规范》对钢管混凝土约束效应系数、持久状态下钢管应力限值要求,计算钢管均匀锈蚀的最大容许厚度;其次,建立香火岩大桥 Ansys 全桥模型,采用“生死单元”技术模拟管内混凝土灌注顺序和拱上建筑施工过程,以计入钢管初应力历史;采用钢管壁厚折减法模拟钢管锈蚀,该方法能够模拟钢管随时间变化的连续锈蚀,并且可以应用 Ansys 的生死单元来模拟钢管锈蚀。在此基础上分析钢管在不同锈蚀厚度下香火岩大桥极限承载力的衰减规律。

1 香火岩大桥概况

香火岩特大桥是一座净跨为 300 m 的上承式钢管混凝土变截面桁架拱桥(图 1),净矢高为 54.545 m,矢跨比为 1/5.5,拱轴系数 $m=1.543$ 。拱肋采用等宽变高的空间桁架结构,断面高度由拱顶的 5 m 渐变至拱脚的 9 m(图 2),肋间设置横联和米撑。上、下弦拱肋均采用外径为 $\phi 1\ 200$ mm 钢管,壁厚为 26~35 mm,依不同部位选用不同厚度 Q345 钢材。管内灌注 C55 自密实微膨胀混凝土。拱上建筑采用 20 m 跨预应力混凝土 T 梁,桥面铺装为 10 cm C50 混凝土和 10

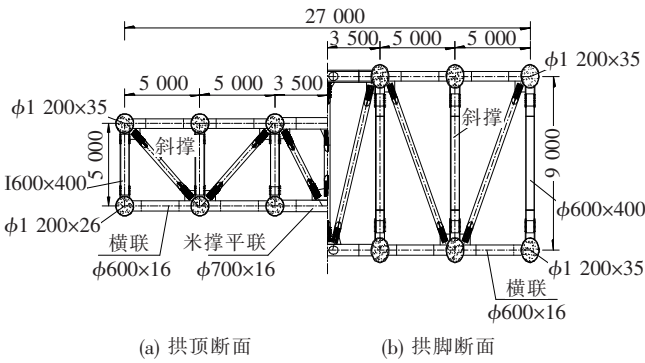


图 2 香火岩大桥拱肋断面图(单位:mm)

cm 厚沥青混凝土。

2 基于约束效应系数的弦管最大锈蚀厚度

根据 JTG/T D65—06—2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》对约束效应系数标准值 ξ 的定义:

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \tag{1}$$

式中: f_y 为钢材的屈服强度; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; A_s 为钢管截面面积; A_c 为混凝土截面面积。

根据香火岩大桥拱肋弦管外径、壁厚和管内混凝土强度等级,按式(1)计算在不同均匀锈蚀厚度下的约束效应系数标准值,结果如表 1 所示。

表 1 锈蚀厚度与约束效应系数标准值对应关系

锈蚀厚度/ mm	约束效应 系数	锈蚀厚度/ mm	约束效应 系数
0	0.90	9	0.59
0.39	0.80	12	0.486

从表 1 可以看出:当锈蚀厚度达到 9 mm 时,钢管混凝土约束效应系数为 0.59,已经不满足 JTG/T D65—06—2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》中约束效应系数标准值不得小于 0.6 的规定。因此以约束效应系数确定锈蚀厚度时,香火岩大桥最大锈蚀厚度为 9 mm。

3 以持久状态钢管应力限值确定锈蚀厚度

使用阶段发生的钢管锈蚀和管内混凝土徐变收缩

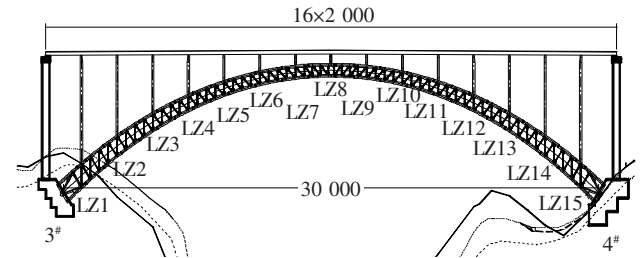


图 1 香火岩大桥总体布置图(单位:cm)

均会导致钢管与管内混凝土的应力重分布。钢管混凝土拱是在空钢管拱基础上逐根灌注管内混凝土而形成的,在形成钢管混凝土组合截面前,钢管中会存在初始应力。拱上建筑会进一步增大钢管应力,因此,在以持久状态钢管应力限值来确定钢管最大锈蚀厚度时,上述应力均需考虑。为此,该文采用“生死单元”方法模

拟香火岩大桥的施工过程,计算施工阶段和钢管不同锈蚀厚度下拱肋钢管的应力。钢管锈蚀厚度取 0(未锈蚀状态)、3、6、9、12 mm 共 5 种情况,钢管编号规则为下游→上游,依次为 1[#]~6[#]。提取不同锈蚀厚度下每根弦管的最大应力,结果如表 2 所示,表中“—”号表示压应力。

表 2 钢管应力

锈蚀厚度/mm	不同钢管编号的应力/MPa											
	1 [#]		2 [#]		3 [#]		4 [#]		5 [#]		6 [#]	
	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦
0(未锈蚀)	-202	-142	-202	-143	-213	-151	-212	-151	-201	-143	-201	-142
3	-212	-148	-212	-149	-223	-157	-222	-157	-211	-149	-211	-148
6	-222	-154	-222	-156	-234	-164	-233	-163	-221	-155	-221	-154
9	-234	-160	-234	-162	-246	-171	-245	-170	-233	-162	-233	-160
12	-246	-167	-246	-169	-258	-178	-257	-178	-245	-169	-245	-167

GB 50923—2013《钢管混凝土拱桥技术规范》规定:持久状况下拱肋钢管应力不宜大于 $0.8f_y$ 。文献[6]认为,钢管锈蚀对钢材屈服强度有一定折减,但对弹性模量的影响不明显,因此考虑外钢管锈蚀损伤后的屈服强度按式(2)计算:

$$f_y' = \frac{(1-1.049\eta_s)}{1-\eta_s} f_y$$

(2)

式中: f_y 为钢管屈服强度; f_y' 为锈蚀钢管的屈服强度; η_s 为平均截面锈蚀率。

香火岩大桥弦管采用 Q345 钢材,屈服强度标准值 f_y 为 325 MPa,在持久状况下钢管应力限值为 $0.8f_y'$ 。据此可得到持久状态下弦管不同均匀锈蚀厚度对应的应力限值,结果如表 3 所示。

表 3 锈蚀厚度与弦管应力限值对应关系

锈蚀厚度/mm	$0.8f_y'/\text{MPa}$	锈蚀厚度/mm	$0.8f_y'/\text{MPa}$
0	260	9	254
3	259	12	251
6	257		

从表 2 可以看出:3[#] 上弦管应力最大。为此,将 3[#] 上弦管应力与表 3 结果绘制成弦管应力随锈蚀厚度的变化曲线,在锈蚀厚度为 10.6 mm 时相交于一点,如图 3 所示。由图 3 可知:考虑持久状态钢管应力限值要求,弦管锈蚀厚度不能大于 10.6 mm。

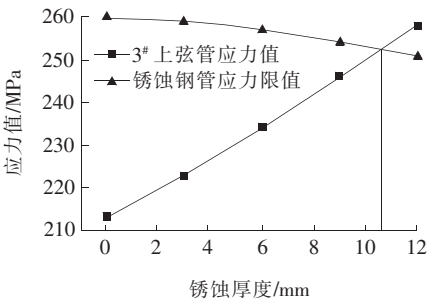


图 3 3[#] 上弦管应力与应力限值变化曲线

4 以拱桥极限承载力确定钢管锈蚀厚度

4.1 基本假定

在开展香火岩大桥钢管均匀锈蚀对其极限承载力影响分析时,引入以下基本假定:

- (1) 钢管和混凝土之间黏结良好,没有滑移。
- (2) 不考虑管内混凝土局部脱空(黏),视管内混凝土完全填满钢管。

4.2 钢管与混凝土本构关系

钢管采用理想弹塑性模型,认为钢管在进入屈服强度后应力不再增大,锈蚀钢材的屈服强度(σ)采用式(3)计算:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \cdot \epsilon & (|\epsilon| \leq \epsilon_y) \\ f_y' & (\epsilon_y < \epsilon < \epsilon_u) \end{cases}$$

(3)

式中： ϵ_y 为锈蚀钢管的屈服应变； ϵ_u 为锈蚀钢管的极限应变； f_y' 为锈蚀钢管的屈服强度； E_s 为钢管初始弹性模量。

管内混凝土本构关系采用韩林海提出的核心混凝土本构模型：

$$\sigma_c = \sigma_u [A (\epsilon / \epsilon_0) - B (\epsilon / \epsilon_0)^2] \quad (\epsilon \leq \epsilon_0) \tag{4a}$$

$$\sigma_c = \sigma_u [(1-q) + q (\epsilon / \epsilon_0)^{0.1\xi}] , \xi \geq 1.12 \quad (\epsilon > \epsilon_0) \tag{4b}$$

$$\sigma_c = \sigma_u (\epsilon / \epsilon_0) / \{ \beta [(\epsilon / \epsilon_0) - 1]^2 + (\epsilon / \epsilon_0) \} , \xi < 1.12 \quad (\epsilon > \epsilon_0) \tag{4c}$$

式中： $\sigma_u = f_{ck} [1.194 + (13/f_{ck})^{0.45} (-0.074\ 85\xi^2 + 0.578\ 9\xi)]$ ； $\epsilon_0 = \epsilon_c + [1\ 400 + 800 (f_{ck} - 20)/20]\xi^{0.2}$ ； $\epsilon_c = 1\ 300 + 14.93f_{ck}$ ； $A = 2 - K$ ， $B = 1 - K$ ； $K = 0.1\xi^{0.745}$ ； ξ 为钢管混凝土套箍系数； $q = \frac{K}{0.2 + 0.1\xi}$ ； $\beta = (2.36 \times 10^{-5}) [0.25 + (\xi - 0.5)^7] f_{ck}^2 \times 5 \times 10^{-4}$ ； f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值。

4.3 极限承载力计算

钢管初始应力使钢管混凝土屈服提前、极限承载力降低，管内混凝土徐变又会引起应力重分布，因此在计算极限承载力时必须同时考虑其影响。由于大跨度拱桥自重所占效应较大，因此在计算香火岩大桥极限承载力时，以结构自重×荷载系数作为承载力计算时的外荷载，弦管均匀锈蚀厚度仍按 0(未锈蚀状态)、3、6、9 和 12 mm 取值，相应的极限承载力计算结果如表 4 所示。

表 4 不同锈蚀厚度极限承载力系数对比

锈蚀厚度/mm	荷载系数	承载力折减系数/%
0	4.3	
3	4.1	4.7
6	3.8	11.6
9	3.5	18.6
12	3.1	27.9

表 4 表明：随着钢管锈蚀厚度不断增大，极限承载力不断降低。目前中国还没有钢管锈蚀对承载力限值的统一标准，参照钢管初应力对钢管混凝土拱桥承载力降低不大于 10% 为限值，则香火岩大桥的最大锈蚀厚度应不超过 6 mm。

5 结论

依据 JTG/T D65—06—2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》及 GB 50923—2013《钢管混凝土拱桥技术规范》，从约束效应系数、持久状态弦管应力限值和锈蚀对钢管混凝土拱桥极限承载力影响 3 个方面，开展了香火岩大桥弦管壁厚均匀锈蚀限值研究，得到以下结论：

(1) 综合 3 个方面所得到的最大容许锈蚀厚度，以三者中的最小值作为香火岩大桥弦管均匀锈蚀最大厚度限值，应在 6 mm 以内。

(2) 由于钢管锈蚀对钢材屈服强度有一定影响，因此持久状态弦管应力限值应按 $0.8f_y'$ 计算。

(3) 弦管锈蚀会导致弦管有效承载面积减小，截面含钢率降低，并且随弦管有效壁厚减小、应力近似呈线性增大。

需要指出的是，文中均匀锈蚀厚度限值分析中未考虑拱肋腹杆锈蚀对承载力的影响，也未考虑弦管和腹杆同时锈蚀后主支管壁厚比的限值要求，需要在今后的研究中加以考虑。

参考文献：

[1] 陈梦成,李骐,谢力. 锈蚀对钢管混凝土柱协同工作机理的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版),2017(1).

[2] 花幼星,侯超,韩林海. 氯离子腐蚀环境下钢管混凝土轴拉构件受力性能研究[J]. 工程力学,2015(S1).

[3] Han L H , Hou C , Wang Q L. Square Concrete Filled Steel Tubular (CFST) Members under Loading and Chloride Corrosion; Experiments[J]. Steel Construction, 2012, 71:11-25.

[4] Han L H, Hou C, Wang Q L. Behavior of Circular CFST Stub Columns under Sustained Load and Chloride Corrosion[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103:23-36.

[5] Hou C, Han L H, Zhao X L. Full-Range Analysis on Square CFST Stub Columns and Beams under Loading and Chloride Corrosion[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 68(10):50-64.

[6] JTG/T D65—06—2015 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].

[7] GB 50923—2013 钢管混凝土拱桥技术规范[S].

[8] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2000.