

锚杆自由长度在三峡船闸锚杆设计分析中的应用

张燎军¹, 任继礼²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098; 2. 长江水利委员会, 湖北武汉 430010)

摘要 结合三峡船闸设计研究工作, 通过分析闸墙施工过程中自重荷载、温度荷载以及完建运行时温度应力、渗透压力的作用, 详细研究了锚杆取不同自由长度时锚杆的应力情况. 结果表明, 增加锚杆自由长度可以大幅度减小锚杆由闸墙自重、温度引起的高剪应力, 使各锚杆的受力均匀化, 降低锚杆的最大拉应力.

关键词 三峡船闸; 闸墙; 锚杆; 自由长度

中图分类号: TV332.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2000)02-0064-05

三峡船闸为双线连续五级船闸, 第一闸首既是通航闸首, 又是枢纽的挡水建筑物之一. 闸首和闸室均在山体岩石中深切开挖修建, 结构与岩体间布置有结构锚杆. 结构锚杆的主要功能是维持闸墙与岩体的联系, 使之满足结构的稳定和强度要求. 锚杆的稳定性作用有两个方面: 一是稳定岩体边坡; 二是对衬砌墙的稳定. 第一闸首闸墙高 60 m, 长 70 m, 顶部宽 20 m, 下部宽 14 m. 由于在施工过程中水化热的影响和外界温度的变化将使闸墙发生变形, 从而使锚杆承受很大的剪力和拉力. 随着浇筑高程的增加, 在结构自重的作用下, 结构锚杆亦将承受很大的剪力. 船闸运行中, 在闸室低水位或检修工况下, 闸墙后大面积渗透压力的作用将使闸墙向闸室方向产生位移, 从而使锚杆产生较大的拉力. 如果某些锚杆的拉力超出了其抗拉强度, 将严重影响船闸的稳定和安全, 因而结构锚杆是维护闸墙稳定的根本保证. 解决这一问题的有效方法是对锚杆保留一定长度的自由段(即在结构与岩基接触面附近, 锚杆保留一段未与岩基固结、可以自由伸缩和弯曲的自由段, 称为锚杆自由长度), 使结构与岩基接触面发生开合或剪切变化时, 锚杆能自由伸缩或弯曲变形而不至发生拉伸或剪切破坏, 提高锚杆的承载能力.

本文详细比较分析了在承受闸墙自重应力、温度应力、渗透压力等不同荷载作用时, 锚杆不同的自由长度所产生的杆内应力变化规律, 提出了锚杆设计时增加一定的自由长度以大幅度降低锚杆应力的建议. 研究方法和分析成果可直接应用于大型船闸的锚杆设计分析.

1 闸墙自重对锚杆应力的影响

船闸施工时, 由于闸墙自下而上逐层浇筑的同时锚杆也逐层布置, 已浇筑的闸墙将通过锚杆与岩体连结起来. 不断增加的新浇筑混凝土层将对下层混凝土施加荷载, 使其产生沉降, 从而使锚杆产生剪切变形. 若结构与岩基中的锚杆都采用固结布置, 数十米高的闸墙的自重作用将使锚杆无法承受而在结构与岩体接触面处发生剪切破坏. 当锚杆在闸墙与岩体接触面的岩体中保留能适应一定变形的自由长度时, 锚杆所受剪力将大大减少^[1,2].

由于三峡船闸锚杆为 2 m×2 m 布置, 为细致模拟闸首自重对锚杆的作用, 故我们取出左岸垂直船闸轴线的厚度为 2 m 的一典型闸墙断面进行网格剖分. 图 1 为左岸闸墙典型立面. 剖分时厚度方向划分为两层单元, 高度方向 2 m 一层单元, 锚杆为简单计而取水

平向布置, 闸墙按 2 m 一层连续施工. 锚杆、闸墙混凝土、岩基的计算常数取为: 混凝土的弹性模量 $E_1 =$

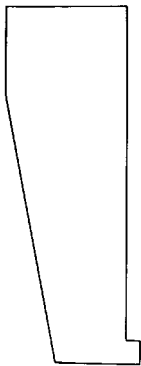


图 1 闸墙典型剖面

Fig.1 Typical section of lock wall

26 GPa ,泊松比 $\mu = 0.167$,容重 $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$,岩基的弹性模量 $E_2 = 35 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.200$,不计岩体自重 ;锚杆的弹性模量 $E_3 = 200 \text{ GPa}$,容重 $\gamma = 78 \text{ kN/m}^3$.

锚杆取 200 # 高强度钢 ,直径 36 mm ,锚杆自由长度取 1 cm ,5 cm ,10 cm ,20 cm ,100 cm 六种情况 ,结构与岩体的接触面为斜坡接触面 ,偏于安全考虑 ,取光滑接触 ,接触面单元参考文献 [2] .表 1 列出了不同高程锚杆在自由段处的锚杆剪力 .

表 1 自重作用下锚杆自由段的剪力

Table 1 Shear forces of the bolts free part under dead load

kN

高程 /m	l_0/cm						高程 /m	l_0/cm					
	1	5	10	20	50	100		1	5	10	20	50	100
169	73	4.9	1.2	0.3	0.03	0.0	145	629	60.1	16.2	4.1	0.6	0.1
165	397	30.7	8.1	2.0	0.3	0.1	141	611	59.4	16.1	4.0	0.6	0.1
161	521	43.1	11.4	2.8	0.4	0.1	137	582	57.1	15.5	3.9	0.6	0.1
157	587	51.0	13.6	3.4	0.5	0.1	133	544	53.3	14.5	3.6	0.5	0.1
153	621	56.1	15.1	3.8	0.6	0.1	129	499	48.1	13.1	3.3	0.5	0.1
149	634	59.1	15.9	4.0	0.6	0.1	125	458	41.7	11.3	2.8	0.4	0.1

从表 1 看出 ,锚杆的最大剪力发生在闸墙的中部高度范围内 ,锚杆的自由长度对剪力的影响十分显著 .锚杆自由长度增大至 10 cm 左右时 ,锚杆最大剪力降至 16 kN 左右 ,为自由长度为 1 cm 时锚杆剪力的 2.5% 左右 ,而自由长度增大至 50 cm 时 ,锚杆最大剪力降至 0.6 kN ,仅为自由长度为 1 cm 时锚杆剪力的 10% ,此时锚杆设计可以忽略闸墙自重对锚杆剪力的影响 .若接触面考虑摩擦接触 ,则锚杆剪力将更小 .

闸墙自重对锚杆轴力的影响相对很小 ,此处不作讨论 .

2 闸墙温度对锚杆应力的影响

闸墙在施工和运行过程中由于水化热和外界气温、水温的变化 ,将发生显著的伸缩变形 ,从而将使闸墙与岩基间的锚杆产生很大的剪力和轴力 .同样 ,若在锚杆中布置自由段以适应闸墙与岩基间的相对变位 ,则 will 有效降低锚杆应力 .我们采用前述网格 ,考虑混凝土的徐变性能和龄期对弹模的影响 ,并考虑结构与岩基接触面可分离情况 ,用有限元法仿真计算了施工期到运行期长达 4 年时间的闸墙与锚杆的最大温度应力 .计算所取闸墙混凝土、锚杆、岩基弹性常数同前 ,混凝土导温系数取为 $0.096 \text{ m}^2/\text{d}$,线膨胀系数取为 $0.9 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,岩石导温系数取为 $0.103 \text{ m}^2/\text{d}$,线膨胀系数取为 $0.8 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

计算结果表明 ,闸墙温度应力对锚杆剪力的影响十分显著 ,因为温度变化时沿闸墙高度方向的伸缩是更为主要的变形 ,因而自由长度对锚杆剪力的影响更大 ,计算所得最大锚杆剪力发生在闸墙顶部高程范围内 .与自重作用时类似 ,当自由长度增至 50 cm 时 ,最大锚杆剪力可降至自由长度为 1 cm 时锚杆剪力的 1% 以内 ,从而当自由长度取至 50 cm 时 ,锚杆设计时可不计温度荷载引起的锚杆剪力的影响 .这里略去了有关计算成果 .

表 2 列出了自由长度分别取 1 cm ,10 cm ,20 cm ,50 cm 时 ,不同高程锚杆内的最大拉力值 .从表 2 可以看出 ,当自由长度增至 50 cm 时 ,锚杆最大拉力仅为自由长度为 1 cm 时的 1/7 ~ 1/8 左右 .因而锚杆的自由长度不仅能克服温度引起的巨大剪力的影响 ,而且还可大幅降低锚杆的最大拉应力 .

表 2 温度荷载作用下锚杆自由段的最大拉力

Table 2 The largest tensile forces of the bolt free part under temperature

kN

高程 /m	l_0/cm				高程 /m	l_0/cm			
	1	10	20	50		1	10	20	50
169	981	558	321	128	145	562	323	216	88
165	432	282	192	84	141	556	321	208	81
161	406	264	184	82	137	821	543	284	110
157	421	281	191	81	133	1 480	952	502	201
153	415	264	182	71	129	1 321	811	341	118
149	422	272	184	75	125	314	191	92	32

3 渗透压力对锚杆应力的影响

渗透压力对锚杆应力的影响主要体现在船闸完建期和检修期,或低水位运行工况.此时,由于闸室内无水,闸墙在墙后渗透压力作用下,将主要发生向闸室方向的变形,闸墙与岩基的接触面可能会张开,故渗透压力引起的锚杆剪力值很小,可以忽略,而接触面上锚杆段则将承受相当大的拉力,因而检修期锚杆的受力分析是锚杆设计计算的重要内容.

我们对闸墙-锚杆-岩基的联合作用用三有限元进行分析,选取人字门支持体段闸墙进行锚杆自由长度的比较分析,支持体顶底面尺寸分别为18 m×20 m和18 m×14 m(长×厚).图2列出了人字门支持体段闸墙的有限元网格,图3为支持体与岩坡接触的两个接触面的锚杆布置.

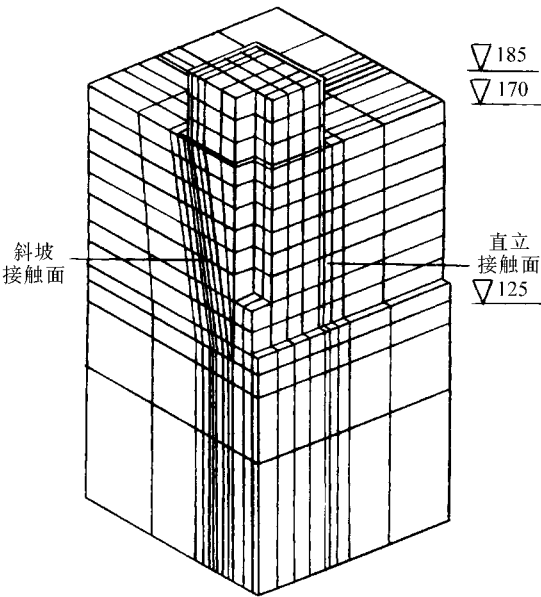


图2 人字门支持体空间有限元网格

Fig.2 Finite element mesh of the support structure of the miter gates

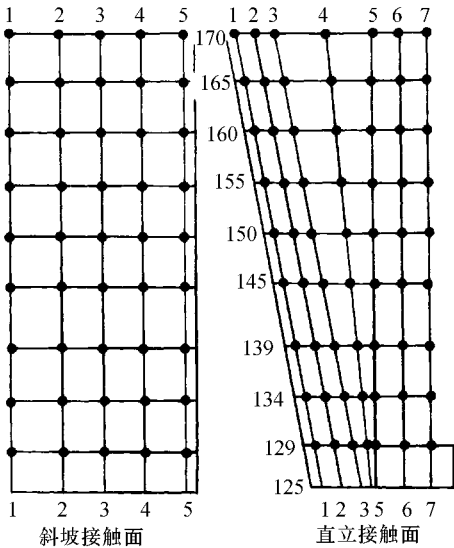


图3 人字门支持体锚杆布置

Fig.3 Bolt arrangement of the support structure of the miter gates

由于锚杆设计时采用2 m×2 m间距布置,且为梅花形布置,空间有限元网格划分时较难达到如此稠密程度,因此锚杆计算时采用了刚度等效原则.即设锚杆直径为 d ,某计算所负担的该结点周围的结构(或岩体)面积为 A ,则该点处的锚杆等效面积取为 $S = \frac{A}{2 \times 2} \cdot \pi d^2 / 4$,等效刚度为 ES ,求出应力后锚杆实际应力为 $\sigma \pi d^2 / 4$.闸墙、岩基、锚杆的弹性常数同前.计算荷载为闸墙自重、填土压力(取折减系数为 $\alpha = 0.67$)、墙后渗透压力(取折减系数 $\beta = 0.5$)和基底扬压力等.

表3列出了锚杆自由长度分别取1 cm,10 cm,20 cm,100 cm时两个接触面在不同高程锚杆自由段的拉力值.从表中结果可以得到(a)在同一高程,锚杆在两接触面交界处的凹角点处内力最大,随着锚杆自由长度的增加,整个接触面上锚杆内力趋于均匀,从而有效地降低了锚杆最大内力.(b)同一竖向剖面,锚杆自由长度较小时(≤ 10 cm),锚杆内力呈中间大、上下两头小的规律,当自由长度较大(≥ 20 cm),锚杆内力呈上大下小的V字形分布规律,当自由长度从1 cm增加至10 cm,100 cm时,斜坡接触面锚杆最大内力从667 kN分别降为372 kN和245 kN,直立接触面锚杆最大内力从648 kN分别降至312 kN和171 kN.由此可见,当锚杆的自由长度达到一定程度后,锚杆内最大应力将大大下降,仅为原应力的1/2或1/3左右.

表 3 渗透压力作用下锚杆自由段的拉力值

Table 3 Tensile forces of the bolt free part under seepage

kN

高程 /m	锚杆自由长度 /cm	直立接触面			斜坡接触面		
		1—1 剖面	4—4 剖面	7—7 剖面	1—1 剖面	3—3 剖面	5—5 剖面
170	1	424.2	104.7	59.0	35.6	186.0	443.3
	10	215.5	174.2	185.3	131.6	215.7	314.8
	20	185.5	186.6	215.7	178.0	246.2	319.7
	100	108.3	136.1	171.2	235.5	274.9	312.0
165	1	403.0	133.2	102.1	− 45.4	130.5	364.6
	10	225.0	185.4	196.9	108.3	208.6	303.0
	20	188.0	187.7	215.3	156.0	235.7	305.5
	100	100.6	126.1	158.9	205.2	248.9	284.3
160	1	457.8	184.7	154.0	− 23.0	156.3	417.8
	10	248.2	208.7	219.0	36.6	225.0	324.6
	20	197.0	195.4	220.7	97.8	237.6	309.1
	100	93.2	116.0	145.7	157.0	222.7	257.9
155	1	507.6	229.6	192.7	82.3	218.8	474.9
	10	269.9	229.2	236.4	182.6	259.1	345.8
	20	205.3	201.1	222.5	190.7	251.5	311.5
	100	86.3	105.5	131.1	165.6	201.1	230.6
150	1	563.0	279.4	240.4	255.5	268.1	543.7
	10	288.2	246.3	251.1	262.6	280.4	364.3
	20	210.6	203.4	220.8	235.5	254.5	309.9
	100	79.1	94.3	115.1	155.8	175.3	201.4
145	1	628.2	333.1	300.7	381.4	313.4	630.9
	10	295.3	254.0	258.6	313.0	290.0	372.3
	20	207.5	198.1	212.1	257.4	247.2	298.3
	100	70.5	81.4	97.1	138.4	146.5	169.2
139	1	648.5	376.5	372.0	473.6	372.2	667.5
	10	279.3	240.7	248.9	320.9	280.6	345.9
	20	188.3	176.5	188.1	244.3	221.6	259.5
	100	57.9	63.8	73.9	106.9	109.3	125.1
134	1	490.7	276.2	253.4	476.1	333.2	531.0
	10	214.9	178.5	172.7	273.4	223.9	264.8
	20	143.6	128.8	128.2	196.3	169.3	191.8
	100	42.8	44.1	46.9	73.6	73.8	82.9
129	1	244.7	170.9	192.1	253.1	111.2	200.3
	10	115.1	100.5	94.7	143.0	98.2	114.0
	20	77.7	70.6	65.7	100.1	76.1	83.9
	100	23.6	22.9	21.2	33.7	32.4	35.3

4 结 论

- a. 增大锚杆自由长度可大幅降低闸墙自重荷载、温度荷载引起的剪应力,减小锚杆的拉应力.当自由长度达到 50 cm 时,锚杆中的最大剪应力降至自由长度为 1 cm 时锚杆应力的 1% 以内,从而解决了船闸锚杆设计中的高剪应力问题.
- b. 锚杆自由长度对渗压的作用主要是调整锚杆群各锚杆的拉应力分布,使各锚杆受力均匀化,降低锚杆最大拉应力.当自由长度从 1 cm 增大至 20 cm 时,锚杆最大拉力从 667 kN 降至 320 kN,减少了 50% 以上.而自由长度对温度荷载引起的锚杆拉力影响更显著,锚杆最大拉应力从自由长度为 1 cm 时的 1 480 kN 降至自由长度为 50 cm 时的 201 kN.因而自由长度对于降低闸墙锚杆的拉应力亦有明显的效果.
- c. 综合考虑各种荷载影响,当取自由长度为 50 cm,温度应力最大值发生于锚固区的下部区域,渗压和

地震荷载引起的锚杆最大拉力则在闸墙上部(地震荷载用拟静力法取 1/4 影响系数算得最大拉力约为 200 kN),组合后锚杆最大拉力位于 500 ~ 600 kN 之间,可以满足锚杆的强度设计要求.因而为保证船闸的安全和稳定,锚杆自由长度应保持不小于 50 cm,可选择在 50 ~ 100 cm 范围内.

d. 锚杆最终设计时由于船闸上闸首段、人字门支持体段及闸室墙段工作方式不同,断面尺寸不同,所选择的钢筋直径有所不同,可以通过上述分析方法分别进行计算,选择合理的自由长度.本文的研究方法和研究成果可直接应用于三峡船闸和其余大型高边坡船闸的锚杆设计分析.

参考文献：

[1] 傅作新.大型船闸闸墙锚杆的分析与设计[J].土木工程学报,1999 (1) 50 ~ 65.
[2] 张燎军.三峡永久船闸闸墩-锚杆-岩基的非线性耦合分析[J].岩石力学与工程学报,1998 (3) 230 ~ 238.
[3] 钮新强.三峡工程永久船闸水工建筑物设计研究[J].人民长江,1997 (10) 7 ~ 9.

Application on Free Anchorage Length to Rod Design of Three Gorges Ship Lock

ZHANG Liao-jun¹, REN Ji-li²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098 ,China ;
2. Changjiang Water Resources Commission ,Wuhan 430010 ,China)

Abstract :The free anchorage length means the one of a special part of the anchor rod which can freely deform between the structure and rock mass .Based on the research and design of the lock wall of the Three Gorges Project ,the action of the dead load and temperature load during construction of the temperature and seepage pressure during operation is analyzd ,and the stress of the anchor rod of different free lengths is studied in detail .Useful results are obtained ,such as , increasing the free anchorage length can decrease greatly the high shear stress caused by the dead load and temperature of the lock wall ,so that the largest tensile stress of the rod is decreased .

Key words :Three Gorges ship lock ;lock wall ;anchor rod ;free length