

三峡永久船闸衬砌墙结构及结构锚杆受力仿真分析

苏 超 姜弘道 钱向东

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

钮新强

戴会超

(长江水利委员会设计院 武汉 430010)

(中国长江三峡工程开发总公司 宜昌 443002)

摘 要 考虑三维接触非线性的结构采用温度徐变仿真计算方法,针对三峡永久船闸闸室墙(全衬式和混合式)的整体和分水平缝两种结构形式,就设计人员关心的温度、外水压力产生的锚杆应力,结构是否分缝,钢筋是否过缝,缝面不同接触条件,锚杆优化等实际问题进行分析比较.结果表明分水平缝可以降低混凝土内应力水平,但部分锚杆应力出现集中现象,钢筋过缝对锚杆应力略有改善,可以在原设计基础上进一步减少锚杆布置.

关键词 三峡船闸 接触非线性 温度 徐变 锚杆

中图号 TV66

三峡永久船闸为 5 级双线船闸,总水头差为 113 m,平均每级船闸水头差 23 m,船闸系由左岸山体开挖而成,闸室墙分为全衬砌式和混合式结构,全衬砌式闸室墙每浇筑段设计尺寸为 $12\text{m} \times (40 \sim 60)\text{m}$ (宽 $\times$ 高),墙厚 1.5 ~ 2.4 m. 混合式结构的衬砌墙尺寸为 $12\text{m} \times (10 \sim 50)\text{m}$ (宽 $\times$ 高),墙厚 1.5 ~ 1.8 m,墙与岩体间的联系主要依靠锚杆作用,它关系到衬砌墙的稳定,设计采用直径 32 mm 的 V 级钢锚杆,排距 1.3 ~ 2.0 m,锚杆伸出岩面 1.45 ~ 2.0 m. 前期的分析研究发现,在温度、渗压、自重等荷载中,温度对结构和结构锚杆的影响较大,为降低结构内混凝土应力,设计部门提出了增设水平缝方案. 增设水平缝是否可以改善结构锚杆的受力条件,从而进行锚杆优化设计,减少工程投资等需要进一步的分析论证. 对此我们考虑衬砌墙结构锚杆和岩体联合受力,综合考虑各种荷载因素影响,利用现代仿真计算技术,精细地模拟衬砌墙的混凝土施工浇筑过程,模拟混凝土水平缝和混凝土与岩石之间的接触非线性机理,模拟结构锚杆和过缝钢筋的工作状态,以确定衬砌结构和锚杆的内力分布,在此基础上提出合理的优化布置方案,为设计部门提供充分的设计数据.

1 分析计算理论方法和计算模型简介

计算涉及到瞬变温度场理论、混凝土温度徐变理论和三维接触非线性理论. 将闸室墙和周围岩体离散成三维有限单元,锚杆和钢筋采用有自由段的梁单元^[1~2],假设锚杆与混凝土和岩石理想连接,网格剖分时考虑了锚杆和钢筋的位置及混凝土浇筑过程. 另外,在计算时域内把时间离散成 n 个时段. 根据热传导理论和能量守恒定律,通过差分算法,计算由于混凝土水化热和环境温度变化产生的节点温度. 采用增量初应变方法计算结构由于变温、外荷载引起的混凝土徐变应力和结构锚杆应力. 混凝土水平缝和混凝土与岩石之间的接触缝的模拟是根据接触条件通过有效的迭代来实现.

选取第二闸室一个标准结构块(全衬砌式闸墙,图 1),闸室底板从 112.75 ~ 118.25 m 高程,墙顶高程为 160.0 m,分缝方案是在 127.75 m 和 142.75 m 高程分两条水平缝,结构锚杆共布置 168 根.

选取第五闸室一个典型结构块(混合式闸墙,图 2),闸室底板从 50.7 ~ 56.0 m 高程,墙顶高程为 80.0 m,墙上有一高 18.75 m 的重力墩,在 80.0 m 高程墙与重力墩之间有一水平结构缝,分缝方案是在 65.0 m 高程分一条水平缝,结构锚杆布置 132 根.

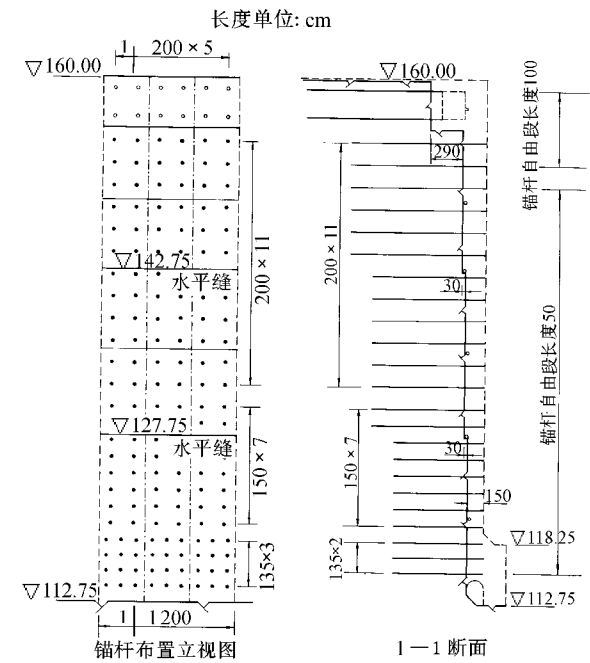


图 1 全衬式衬砌墙结构形式和锚杆布置图

Fig.1 Structure type of whole lined wall and arranging map of anchored bars

2 主要计算边界条件和计算参数

a. 年气温变化曲线

$$T_c = 17.3 + 15.3 \sin(2\pi \frac{\tau - 108.75}{365}) \quad (^\circ\text{C})$$

式中： τ ——时间，d.

b. 混凝土绝热温升

$$Q(t) = 29.466t / (1.129 + t) \quad (^\circ\text{C})$$

式中： t ——混凝土龄期，d.

c. 混凝土徐变度

$$C(t, \tau) = (11 + \frac{280}{\tau})(1 - e^{-0.25(t-\tau)}) + (8 + \frac{28}{\tau})(1 - e^{-0.008(t-\tau)}) \quad (10^{-6}/\text{MPa})$$

d. 混凝土弹模公式

$$E(t) = 32.0(1.0 - e^{-0.1t}) \quad (\text{GPa})$$

e. 混凝土、岩基热学和力学参数见表 1.

f. 锚杆物理力学参数见表 2.

g. 混凝土入仓温度.

1,2,12 月份入仓温度为 10℃,4,10 月份入仓温度为 17℃,其余月份为 16℃.

h. 衬砌墙开始浇筑时间及分层厚度.

全衬式衬砌墙：10 月 1 日开浇,112.75 ~ 118.25 m 高程每层厚 1.5 m 左右,118.25 m 高程以上每层厚 3 m 左右.浇筑按 7 d 一层连续上升.混合式衬砌墙：元月 1 日浇筑到 80 m 高程,50.7 ~ 56.0 m 高程每层厚 1.5 m 左右,56.0 ~ 80.0 m 高程每层厚 3 m 左右,80.0 ~

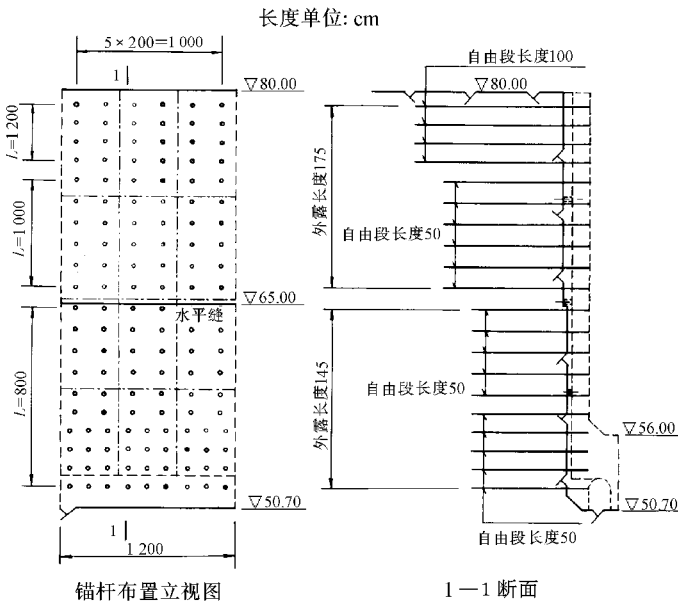


图 2 混合式衬砌墙结构形式和锚杆布置图

Fig.2 Structure type of mixed lined wall and arranging map of anchored bars

表 1 混凝土、岩基的热学和力学参数

Table 1 Thermal & mechanical parameters of concrete and rock foundation

参 数	混凝土	基岩
导热系数/(kJ·(m·d·℃) ⁻¹)	216.919	216.919
导温系数/(m ² ·d ⁻¹)	0.083	0.083
放热系数/(kJ·(m ² ·d·℃) ⁻¹)	1304.66	1304.66
线膨胀系数/10 ⁻⁴ (℃) ⁻¹	0.085	0.1
比热	0.9576	
泊松比	0.167	0.2
重度/(kN·m ⁻³)	24.01	26.46
弹模/GPa		35.0

85.0m 高程每层厚 1.5m 左右,85.0m 高程以上每层为 2m 左右,浇筑按 7d 一层连续上升.

i. 衬砌墙内设水平缝的接触条件.

缝面传压、不传拉, $f = 0.6$, $C = 0$;钢筋过缝条件 不过缝,双面钢筋半过缝,背水面钢筋全过缝.

j. 衬砌墙与岩体接触条件.

墙与岩体水平接触面 传压、传剪、不传拉, $f = 1.0$, $C = 1.2\text{ MPa}$;

墙与岩体竖向接触面,接触面具有 0.3 MPa 的法向抗拉强度,当法向应力 $\leq 0.3\text{ MPa}$ 时,竖向接触面闭合,传压、传剪、传拉, $f = 0.7$, $C = 0$ 当法向应力 $> 0.3\text{ MPa}$ 时,竖向接触面张开,不传压、不传剪、不传拉.

k. 外水压力.

外水压力直接作用在墙与岩石的接触面上,按自然地下水位,水重度取 0.25.

3 主要计算成果*

表 3 列出了 12 种工况的锚杆拉应力计算结果,表 4 列出了前 4 种工况结构混凝土铅直向应力最大值计算结果.

表 3 各计算工况锚杆拉应力值分布情况

Table 3 Tension stress value distribution of anchorage bars under all types of computing conditions

计算工况、锚杆直径及 锚杆应力分布		应力范围/MPa						平均锚 杆应力 /MPa	最大锚 杆应力 /MPa
		小于 100	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500	大于 500		
工况 1	锚杆根数	24	86	46	12			181.9	385.8
32 mm	所占比例/%	14.3	51.2	27.4	7.1				
工况 2	锚杆根数	48	64	46	10			164.6	386.4
32 mm	所占比例/%	28.6	38.0	27.4	6.0				
工况 3	锚杆根数	26	62	40	2	2		178.3	413.8
32 mm	所占比例/%	19.7	47.0	30.3	1.5	1.5			
工况 4	锚杆根数	42	66	24				145.0	277.7
32 mm	所占比例/%	31.8	50.0	18.2					
工况 5	锚杆根数	28	95	35	10			164.3	370.8
40 mm	所占比例/%	16.7	56.5	20.8	6.0				
工况 6	锚杆根数	42	101	21	4			146.3	333.9
40 mm	所占比例/%	25.0	60.1	12.5	2.4				
工况 7	锚杆根数	32	95	33	6	2		156.5	408.5
40 mm	所占比例/%	19.1	56.5	19.6	3.6	1.2			
工况 8	锚杆根数	16	105	45	2			166.9	322.1
40 mm	所占比例/%	9.5	62.5	26.8	1.2				
工况 9	锚杆根数	39	85	32	2			142.7	301.2
40 mm	所占比例/%	24.7	53.8	20.3	1.2				
工况 10	锚杆根数		20	24	47	73	4	357.5	504.1
32 mm	所占比例/%		11.9	14.2	28.0	43.5	2.4		
工况 11	锚杆根数	4	44	30	8	46		289.0	463.8
32 mm	所占比例/%	3.1	33.3	22.7	6.1	34.8			
工况 12	锚杆根数		10	24	45	73	4	345.8	505.7
32 mm	所占比例/%		6.0	14.3	26.8	43.5	2.4		

* 文中的锚杆应力值这里是指在计算的 5 年时间里每根锚杆曾出现的最大值.最大锚杆拉应力值是指每个工况锚杆应力值中最大的一个.平均锚杆应力值是指所有锚杆应力值的平均值.

表 4 分缝和整体方案结构混凝土铅直向应力最大值(锚杆直径 32 mm)

Table 4 Maximum vertical stress value of concrete of jointed and whole structures (anchorage bar diameter 32mm)

最大应力和发生高程	全衬式结构分缝方案 (工况 1)	全衬式结构整体方案 (工况 2)	混合式结构分缝方案 (工况 3)	混合式结构整体方案 (工况 4)
最大铅直向拉应力/MPa	0.59	0.79	0.49	0.89
发生高程/m	155.00	119.75	57.00	58.15
最大铅直向压应力/MPa	-1.84	-1.25	-1.80	-1.31
发生高程/m	119.75	119.75	58.15	58.15

工况 1 和工况 2 分别给出了在温度和自重荷载作用下,全衬式结构分缝和整体方案锚杆拉应力值分布情况,工况 3 和工况 4 分别给出了在温度和自重荷载作用下,混合式结构分缝和整体方案锚杆拉应力值分布情况,可见分缝可以有效地降低混凝土内部由温度引起的铅直向拉应力,平均锚杆拉应力值同时有较大幅度的增加,两种结构分缝均破坏了锚杆最大拉应力分布的均匀性,在缝边附近锚杆出现应力集中现象。

工况 5、工况 6 和工况 7 分别给出了全衬式结构,锚杆直径为 40 mm 时,钢筋不过缝、钢筋双面半过缝、背水面钢筋过缝三种情况,在温度和自重荷载作用下锚杆拉应力值分布,钢筋双面半过缝和背水面钢筋全部过缝对锚杆拉应力分布有一定的影响,钢筋全部半过缝方案优于背水面钢筋全部过缝方案。

为模拟岩石开挖面的凸凹不平,假设在岩石与混凝土接触竖直缝之间存在 0.5 MPa 的切向凝聚力. 工况 8 给出了全衬式结构,锚杆直径为 40 mm 时,结构在温度和自重荷载作用下锚杆拉应力值分布. 与工况 5 相比,锚杆应力值变化不大,但混凝土内的拉应力有较大幅度的增加,其铅直向拉应力最大值从 0.59 MPa 增至 1.43 MPa.

无论是全衬式还是混合式结构,从锚杆拉应力分布规律看,较高水平应力锚杆的根数相对较少,假设这些锚杆被拉断后不再起作用,此时结构中其它锚杆的受力情况有何变化? 将工况 5 中锚杆拉应力值超过 300 MPa 的 5 根锚杆去掉重新计算,得到工况 9 的锚杆拉应力值分布,只有 1 根拉应力值为 301.15 MPa,其余锚杆应力均小于 300 MPa. 可见去掉少数高应力锚杆,并没有产生周围相邻锚杆的进一步应力集中现象。

工况 10 和工况 11 是在工况 1 和工况 3 基础上增加外水压力以后的计算结果,可见平均锚杆拉应力值和锚杆最大拉应力值同时有较大幅度的增加,外水压力的作用与温度和自重荷载作用的量级差不多。

4 锚杆优化方案的初步探讨

对全衬式结构从工况 10 的计算结果来看,在下块的 72 根锚杆中,53 根超过 400 MPa,19 根低于并接近 400 MPa. 因此,下块的锚杆布置是合理的,没有必要进行调整. 中块的 48 根锚杆中 26 根应力超过 400 MPa,14 根在 300 ~ 400 MPa 之间,10 根在 200 ~ 300 MPa 之间,10 根相对低应力锚杆分布在两水平缝(127.25 m 高程和 142.75 m 高程)边缘. 从结构上看不适合减少锚杆,调整可能会使中间锚杆应力进一步加大,因此中块的调整余地不大. 上块的 48 根锚杆中 14 根应力在 300 ~ 400 MPa 之间,14 根在 200 ~ 300 MPa 之间,20 根在 100 ~ 200 MPa 之间,可见上块可以进行减锚. 对全衬式结构我们分别进行了多种减锚方案计算、比较,工况 12 给出了推荐的上块减锚 2 排(12 根)方案的计算结果,进一步的计算表明上块还可进一步减锚 4 排(24 根)。

对混合式结构从工况 11 的计算结果来看,锚杆应力的富裕度较大. 但由于混合式结构情况复杂,实际岩石物理力学特性是否理想,有无裂隙等天然缺陷,上部又有近 20 m 的重力墩,加上回填土的压力,锚杆的存在有助于提高岩石边坡的整体性,对稳定有利,建议可以从稳定的角度进一步论证,以便降低上部锚杆钢材的级别。

5 结 论

假设锚杆和混凝土理想连接,通过多种工况的计算,提出以下结论：

闸室墙分水平缝可以有效地降低全衬式和混合式结构混凝土铅直向拉应力,但对结构锚杆应力分布有一定影响,它使最大锚杆拉应力值和平均锚杆拉应力值增加,分布的离散性增大,在横缝和纵缝交点附近出现锚杆拉应力集中现象. 因此,在混凝土应力允许的情况下尽量少分水平缝。

钢筋全部半过缝和背水面钢筋全部过缝对锚杆拉应力有一定的影响,钢筋全部半过缝方案优于背水面

钢筋全部过缝方案. 由于改善程度有限,建议结合施工难度通盘考虑钢筋是否过缝方案.

当考虑岩石和混凝土间竖直缝有 0.5 MPa 的凝聚力时,闸室墙内混凝土的拉应力水平有较大提高,配筋设计应引起注意.

去掉少数几根高应力锚杆,不会产生周围锚杆的进一步应力集中,可以降低平均锚杆拉应力水平,建议少数几根高应力锚杆可以不作为设计的控制锚杆.

全衬式结构下块和中块的锚杆富裕度不大,建议按原设计布置,适当考虑调整距水平缝的距离(最好在 1 m 以上). 上块可以进行减锚设计,从计算结果来看减 2 ~ 4 排均可,建议按结构需要布置锚杆. 混合式结构可以从稳定角度考虑减少锚杆或降低钢材等级.

参 考 文 献

1 傅作新,梅明荣.大型船闸闸墙锚杆的分析与设计.土木工程学报.1999,2(1):60~65

2 姜弘道,陈和群.有限单元法的程序设计.北京:水利电力出版社,1989.49~79

Simulating Analysis for Forcing of Lined Wall and Anchorage Bars of Permanent Shipping Lock at the Three Gorges Project

Su Chao Jiang Hongdao Qian Xiangdong
(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Niu Xinqiang
(Designing Institute of Yangtze Water Conservancy Committee, Wuhan 430010)

Dai Huichao
(China Yangtze Three Gorges Project Development Corporation, Yichang 443002)

Abstract Aiming at two types of lock bay wall of unjointed structure and horizontally jointed structure of the Three Gorges permanent shipping lock (whole lined and mixed), some problems concerned by the designers are analyzed and compared with the temperature creep simulating computing method. These problems include anchorage bar stress produced by temperature and outer water pressure, the use of joints reinforcing bars crossing or not crossing joints different contact conditions of crack interface and anchorage bar optimization. The results show that horizontal joints can reduce concrete stresses, but stress concentration may appear in some anchorage bars. Reinforcing bars crossing joints can improve the anchorage bar stress to some extent, so the number of anchorage bars can be reduced.

Key words Three Gorges shipping lock ; contact nonlinearity ; temperature ; creep ; anchor bars