



基于温度场及应力场仿真分析的 船闸混凝土配合比设计

孔繁龙¹, 钱文勋², 王承强²

(1. 扬州市航道管理处, 江苏扬州 225003; 2. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029)

摘要: 针对施桥三线船闸工程中船闸钢筋混凝土结构设计, 基于混凝土抗裂性能优化, 采用ANSYS分析软件对廊道和闸室不同混凝土配合比进行仿真分析, 通过比较廊道和闸室混凝土温度场、温度应力分布及其随时间变化的规律, 提出较优的混凝土配合比。

关键词: 配合比设计; 温度场; 应力场; 船闸混凝土

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)02-0123-05

Mixture ratio design of ship lock concrete based on simulation analysis of temperature field and stress field

KONG Fan-long¹, QIAN Wen-xun², WANG Cheng-qiang²

(1. Yangzhou Waterway Management Department, Yangzhou 225003, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The paper focuses on the structure design of reinforced concrete in Shiqiao third-line ship lock engineering. Based on the concrete anti-cracking performance optimization, this paper uses the ANSYS analysis software to make a simulation analysis, which is about the corridor and lock chamber design using different mixture ratios. By comparing corridor and lock chamber concrete temperature fields, temperature stress distribution and the law of the change with time, the paper puts forward the better design proportioning.

Key words: mixture ratio design; temperature field; stress field; lock concrete

目前裂缝超限已成为船闸混凝土主要的质量通病顽症之一。混凝土结构裂缝一般可分为荷载裂缝和非荷载裂缝。有研究表明, 80%以上的混凝土结构裂缝与非荷载变形有关, 是以变形变化为主所引起的裂缝^[1]。船闸工程混凝土结构, 如船闸廊道和闸室等, 在施工过程中易出现裂缝^[2-3], 这些裂缝会降低结构的耐久性, 影响结构的正常使用。作为大体积混凝土结构, 防止热应变导致混凝土开裂^[4]、保证结构耐久性和使用寿命对于船闸工程水工结构至关重要。

施桥船闸地处京杭大运河扬州市施桥镇, 施桥三线船闸位于现有一线船闸西侧, 两闸中心距

为100 m, 为Ⅱ级通航建筑物, 设计最大船舶吨位为2 000 t。本研究针对施桥三线船闸工程中船闸钢筋混凝土结构设计, 基于混凝土抗裂性能优化, 采用大型有限元分析软件ANSYS对廊道和闸室不同混凝土配合比进行仿真分析, 给出廊道和闸室混凝土温度场、温度应力分布及其随时间变化的规律, 提出针对性的施工建议, 以达未雨绸缪之目的。

1 计算条件

1.1 混凝土原材料

水泥: 泰州扬湾海螺水泥有限责任公司海螺牌PO 42.5水泥; 粉煤灰: 扬州华维振扬新型材料

收稿日期: 2012-06-07

作者简介: 孔繁龙(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事水运、公路、桥梁建设管理及施工技术研究。

有限公司Ⅱ级粉煤灰；外加剂：江苏特密斯混凝土外加剂有限公司TMS减水剂；骨料：长江砂，细度模数2.61；人工碎石：5~25 mm连续级配。

1.2 混凝土配合比

闸首和闸室混凝土强度等级为C25，混凝土配合比优化设计中，粉煤灰掺量分别为胶凝材料总量的8%，15%，25%，混凝土配合比见表1。

1.3 计算参数选择

1) 热学性能参数。

表1 混凝土试验配合比

编号	水胶比	粉煤灰掺量/%	单位体积混凝土原材料用量/(kg·m ⁻³)						
			水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	水	TMS
YF08	0.48	8	324	28	724	458	687	170	6.34
YF15	0.46	15	315	56	714	452	678	170	6.66
YF25	0.42	25	306	102	660	454	682	170	7.74

参考SL 191—2008《水工混凝土结构设计规范》^[5]和以往工程经验，配合比优化设计采用的混凝土材料和地基土的热学参数如表2所示。

表2 混凝土和地基土热力学参数

编号	导热系数 $a/$ (m ² ·h ⁻¹)	导热系数 $\lambda/$ [kJ·(m·h·°C) ⁻¹]	线膨胀系数 $a_v/$ (10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹)	放热系数 $\beta/$ [kJ·(m ² ·h·°C) ⁻¹]	比热 $c/$ [kJ·(kg·°C) ⁻¹]	泊松比 μ	密度 $\rho/$ (kg·m ⁻³)
YF08	0.004 8	11.1	8.0	40(有模板), 70(无模板)	0.97	0.167	2 397
YF15	0.004 8	11.1	7.5	40(有模板), 70(无模板)	0.97	0.167	2 392
YF25	0.004 8	11.1	7.2	40(有模板), 70(无模板)	0.98	0.167	2 382
地基土	0.005 6	9.0	5.0	70	0.80	0.250	2 000

混凝土水化热按下式计算：

$$Q_t = Q_0 [1 - \exp(-mt^n)] \quad (1)$$

式中： Q_t 为龄期 t 时的累积水化热(kJ/kg)； Q_0 为最终水化热(kJ/kg)； t 为龄期(d)； m, n 为常数。

最终水化热由最终温升计算得到，最终温升试验测试结果见表3。

表3 混凝土的绝热温升

试件编号	入模温 度/°C	绝热温升/°C					最终温升/°C
		1 d	3 d	7 d	14 d	28 d	
YF08	18.96	25.14	41.28	45.09	46.47	48.02	48.02
YF15	21.30	22.63	40.59	44.71	46.40	47.34	47.34
YF25	23.16	21.55	40.30	44.55	46.37	47.05	47.05

2) 力学性能参数。

龄期为7 d, 28 d, 60 d的混凝土抗压强度和28 d弹性模量实测结果见表4；混凝土弹性模量按照式(2)计算：

$$E_c(\tau) = 1.44 [1 - \exp(-0.41\tau^{0.32})] E_c(28) \quad (2)$$

式中： $E_c(\tau)$ 为混凝土龄期 τ 时的弹性模量； $E_c(28)$ 为

表4 不同龄期混凝土力学性能

编号	抗压强度/MPa			28 d弹性模量/ GPa
	7 d	28 d	60 d	
YF08	25.9	35.7	41.4	36.5
YF15	30.7	36.0	44.0	36.5
YF25	27.9	38.3	44.1	37.4

混凝土28 d龄期的弹性模量。

混凝土具有徐变效应，即应力会随时间而松弛。考虑徐变影响的混凝土温度应力按(3)式计算：

$$\sigma^* = \sigma(t) \cdot K_p(t) \quad (3)$$

式中： $\sigma(t)$ 为 t 时刻的弹性应力； $K_p(t)$ 为应力松弛总效应系数。

3) 气温。

根据船闸所在地扬州市气象站多年的统计资料分析，扬州的主要气象特征为：多年平均气温14.9°C，最高月平均气温31.8°C，最低月平均气温-3.2°C。气温取值参照《大体积混凝土温度应力与温度控制》^[6]的气温年变化公式(4)计算。

$$T_a = T_{am} + A_a \cos\left[\frac{\pi}{6}(\tau - \tau_0)\right] \quad (4)$$

4) 初始条件。

廊道底板于10月浇筑，浇筑温度取21.1°C；廊道除底板以外的其余部分计划于12月浇筑，浇筑温度取11.5°C。

闸室底板计划于4月份浇筑，闸室倒角在底板浇筑半个月后浇筑，浇筑温度均取19.2°C；闸室墙计划于7月份浇筑，浇筑温度取28°C。

5) 边界条件。

在温度场计算中，选取边界条件时，廊道表

面为与空气热对流边界,属于第3类边界条件;底板表面为与空气热对流边界,属于第3类边界条件;廊道底板对称面为绝热边界,属于第2类边界条件;地基土底面为恒温(取 14.9°C)边界条件;地基表面为与空气热对流边界,属于第3类边界条件;底板与地基界面为第4类边界条件。

在应力场计算中,选取边界条件时,廊道底板对称面给予垂直该表面的位移约束;地基土对称面和底面给予垂直该表面的位移约束。

1.4 计算模型

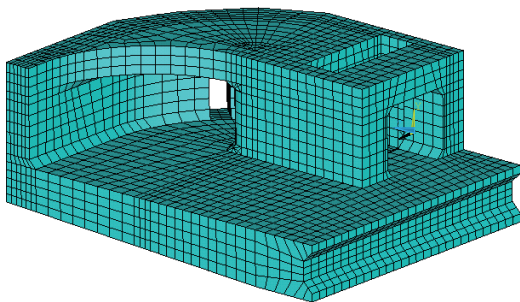
1) 廊道。

廊道的有限元计算模型见图1a)。建模时以廊道进水口中心为坐标原点,船闸轴线方向为 X 方向;铅直方向为 Y 方向;船闸宽度方向为 Z 方向。

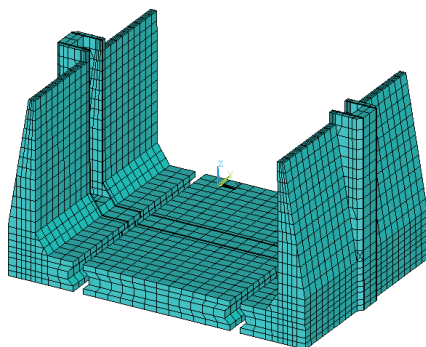
计算模型中廊道取一个结构段长度,底板根据对称性取 $1/4$ 进行计算,地基的计算范围为 $50\text{ m} \times 60\text{ m} \times 7\text{ m}$,整个结构热分析采用90单元,结构分析采用95单元。

2) 闸室。

闸室的有限元计算模型见图1b)。建模时以闸室宽度方向为 X 方向,轴线方向为 Y 方向,铅直方向为 Z 方向。



a) 廊道



b) 闸室

图1 有限元计算模型

计算模型中廊道取一个结构段长度(以第2节为计算对象),地基的计算范围为 $60\text{ m} \times 40\text{ m} \times 7\text{ m}$,整个结构热分析采用90单元,结构分析采用95单元。

2 廊道计算结果

2.1 温度特征值

廊道温度特征值见表5。结果显示,廊道和门库侧墙混凝土最高温度在 $23.0\sim 25.0^{\circ}\text{C}$,最高温升在 $12.3\sim 14.3^{\circ}\text{C}$,发生的龄期分别为2.25 d和2.5 d,内表温差在 $13.4\sim 15.4^{\circ}\text{C}$,发生的龄期分别为3.5 d。采用优化配比,即提高粉煤灰掺量后,混凝土的廊道和门库侧墙最高温度、最高温升和内表温差皆小于粉煤灰掺量较小的试验组(YF08)的相应温度特征值,温度特征值发生龄期相同。

表5 廊道的温度特征值

材料编号	部位	浇筑温度/ $^{\circ}\text{C}$	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	最高温升/ $^{\circ}\text{C}$	发生龄期/d	内表温差/ $^{\circ}\text{C}$	发生龄期/d
YF08	廊道侧墙	10.7	25.0	14.3	2.5	15.4	3.5
	门库侧墙	10.7	23.3	12.6	2.25	13.6	3.5
YF15	廊道侧墙	10.7	25.0	14.3	2.5	15.3	3.5
	门库侧墙	10.7	23.2	12.5	2.25	13.4	3.5
YF25	廊道侧墙	10.7	24.7	14.0	2.5	15.2	3.5
	门库侧墙	10.7	23.0	12.3	2.25	13.4	3.5

2.2 应力特征值

廊道应力特征值见表6。结果显示,在不同龄期,廊道侧墙和门库侧墙表面出现了较大的拉应力,不同程度地接近相应龄期轴心抗拉强度,而混凝土内部拉应力则较小。就最大应力与相应龄期轴心抗拉强度的比值而言,YF15和YF25的计算结果优于粉煤灰掺量较小的试验组(YF08),应力特征值发生龄期基本相同。

3 闸室计算结果

3.1 温度特征值

闸室温度特征值见表7。结果显示,闸室倒角段、闸室墙和浮式系船柱墙体的混凝土最高温度在 $33.2\sim 50.5^{\circ}\text{C}$,最高温升在 $14.0\sim 22.5^{\circ}\text{C}$,发生的龄期在2.75~4.5 d;内表温差在 $7.1\sim 14.0^{\circ}\text{C}$,发生的龄期在3.5~4.75 d。采用优化配比混凝土的闸室最高温度、最高温升和内表温差皆小于粉煤灰掺

表6 廊道的应力特征值

材料编号	部位	拉应力/MPa	产生龄期/d	徐变应力/MPa	相应龄期轴心抗拉强度/MPa
YF08	廊道侧墙表面	1.69	3.75	1.45	1.83
	廊道侧墙内部	0.52	57	0.27	2.77
	门库侧墙表面	1.91	3.5	1.66	1.81
	门库侧墙内部	1.16	57	0.59	2.77
YF15	廊道侧墙表面	1.57	3.75	1.35	2.12
	廊道侧墙内部	0.49	57	0.25	2.85
	门库侧墙表面	1.76	3.5	1.53	2.10
	门库侧墙内部	1.09	57	0.56	2.85
YF25	廊道侧墙表面	1.54	3.75	1.32	1.95
	廊道侧墙内部	0.48	57	0.24	2.88
	门库侧墙表面	1.73	3.5	1.51	1.93
	门库侧墙内部	1.07	57	0.55	2.88

表7 闸室的温度特征值

材料编号	部位	浇筑温度/℃	最高温度/℃	最高温升/℃	发生龄期/d	内表温差/℃	发生龄期/d
YF08	倒角段	19.2	33.5	14.3	2.75	13.8	3.5
	闸室墙	28.0	50.5	22.5	4.5	14.0	4.75
	浮式系船柱墙体	28.0	43.7	15.7	3	7.3	3.5
YF15	倒角段	19.2	33.3	14.1	2.75	13.7	3.5
	闸室墙	28.0	50.3	22.3	4.5	13.8	4.75
	浮式系船柱墙体	28.0	43.6	15.6	3	7.2	3.5
YF25	倒角段	19.2	33.2	14.0	2.75	13.6	3.5
	闸室墙	28.0	50.1	22.1	4.5	13.7	4.75
	浮式系船柱墙体	28.0	43.5	15.5	3	7.1	3.5

量较小的试验组（YF08）相应温度特征值，温度特征值发生龄期基本相同。

3.2 应力特征值

闸室应力特征值见表8。结果显示，浇筑早期

（浇筑后3.5~5 d），闸室混凝土表面出现了较大的拉应力，接近相应龄期轴心抗拉强度，而闸室混凝土内部拉应力较小。就最大应力与相应龄期轴心抗拉强度的比值而言，YF15和YF25的计算结

表8 闸室的应力特征值

材料编号	部位	拉应力/MPa	产生龄期/d	徐变应力/MPa	相应龄期轴心抗拉强度/MPa
YF08	倒角表面	0.84	3.5	0.73	1.81
	倒角内部	1.70	78	0.83	2.86
	闸室墙表面	1.93	5	1.60	1.92
	闸室墙内部	0.10	5	0.08	1.92
	浮式系船柱墙体表面	2.46	4.25	2.09	1.87
	浮式系船柱墙体内部	0.22	10	0.16	2.17
YF15	倒角表面	0.77	3.5	0.67	2.10
	倒角内部	1.58	78	0.77	2.90
	闸室墙表面	1.78	5	1.48	2.18
	闸室墙内部	0.09	5	0.07	2.18
	浮式系船柱墙体表面	2.27	4.25	1.93	2.15
	浮式系船柱墙体内部	0.19	10	0.13	2.36
YF25	倒角表面	0.76	3.5	0.66	1.93
	倒角内部	1.54	78	0.75	2.96
	闸室墙表面	1.73	5	1.44	2.03
	闸室墙内部	0.09	5	0.07	2.03
	浮式系船柱墙体表面	2.22	4.25	1.89	1.99
	浮式系船柱墙体内部	0.18	10	0.13	2.26

果优于粉煤灰掺量较小的试验组(YF08),应力特征值发生龄期基本相同。

4 现场观测结果

为验证仿真计算结果,闸室墙混凝土施工时,在其中心部位和表面布置了温度传感器,对混凝土浇筑后闸室墙内表面温度进行了监测,闸室墙混凝土内部和表面温度实测数据见图2;受现场施工条件限制,未对混凝土内部应力进行监测。

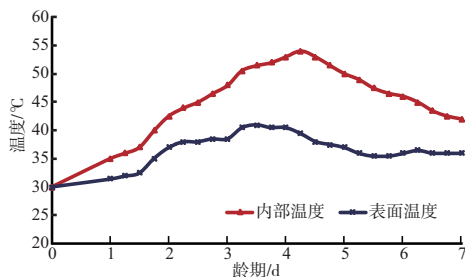


图2 闸室墙混凝土内表实测温度

施工采用的混凝土配合比与YF08组相同,浇筑温度为30℃。实测结果表明,闸室墙最高内部温升为24.0℃(计算值22.5℃),发生龄期在4.25 d(计算值4.50 d),内表温差为15℃(计算值14.0℃),产生龄期4.50 d(计算值4.75 d)。与表7中的计算值相比,这些温度特征值误差较小,仿真计算结果可供施工参考。

5 结论

1) 采用优化配比混凝土的廊道和闸室最高温度、最高温升和内表温差皆小于初步设计材料的相应温度特征值,温度特征值发生龄期基本相同。就有利于混凝土抗裂而言,YF25配合比组最优。闸室墙混凝土内表实测温度与计算结果相比误差较小,仿真计算结果可供施工参考。

2) 就最大应力与相应龄期轴心抗拉强度的比值而言,粉煤灰掺量较多的配合比YF15和YF25的计算结果优于YF08组,以YF25的计算结果最优,以上所有材料应力特征值发生龄期基本相同。

参考文献:

- [1] 张雄. 混凝土结构裂缝防治技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 苏宁. 船闸大体积混凝土裂缝的控制与预防[J]. 中国水运, 2008, 8(1): 128-129.
- [3] 朱平, 王海滨, 刘宏新. 船闸工程闸室侧墙裂缝分析与处理[J]. 水运工程, 2006(8): 116-119.
- [4] 刘秉京. 混凝土结构耐久性设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [5] SL 191—2008 水工混凝土结构设计规范[S].
- [6] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

我国离岸深水港建设技术国际领先

日前,由中国交通建设股份有限公司主持承担的“离岸深水港建设关键技术研究与应用”项目获中国水运建设行业协会科学技术奖特等奖,标志着我国离岸深水港建设技术总体达到国际领先水平。

该项目为交通运输部“十一五”重大科技攻关专项,也是部水运科技领域最大的技术开发项目,被列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》。针对我国离岸深水港建设中的关键技术难题,交通运输部组织行业内28家科研、设计、施工、建设单位的247名科技人员,开展产、学、研、用联合技术攻关。

该项目创新成果已在国内大连港、天津港、青岛港、上海洋山港区、宁波-舟山港、广州港等大型深水港口建设中得到应用,支撑了我国“十一五”以来的离岸深水港建设,并在海外港口建设市场竞争中发挥了关键作用。成果已延伸推广到港珠澳大桥、厦门翔安海底隧道、青岛海军某工程、南中国海岛礁开发等基础设施建设中,为构建综合交通运输体系、提高国防能力、海洋资源开发水平等作出了重大贡献。

摘编自《中国交通报》