

HANZHA

HUNNINGTU DE WENDU YINGLI YU
WENDU KONGZHI



涵闸 混凝土的温度应力 与温度控制

主 编 王同生

副主编 于子忠

中国环境科学出版社

涵闸混凝土的温度应力与温度控制

主 编 王同生

副主编 于子忠

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

涵闸混凝土的温度应力与温度控制/王同生主编. —北京:
中国环境科学出版社, 2010.12

ISBN 978-7-5111-0456-4

I. ①涵… II. ①王… III. ①涵闸—混凝土—温度控制—研究 IV. ①TV431

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第264103号

策划编辑 徐于红
责任编辑 俞光旭
责任校对 扣志红
封面设计 玄石至上

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京东城区广渠门内大街16号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2010年12月第1版
印 次 2010年12月第1次印刷
印 数 1—2800册
开 本 787×1092 1/16
印 张 19.25
字 数 400千字
定 价 58.00元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

编辑委员会

主 任： 陈光临

委 员： 陈光临 曹为民 柳锋波

彭德胜 闪 黎 宋心同

主编单位： 淮河水利委员会治淮工程建设管理局

水利部水利建设与管理总站

河南省燕山水库建设管理局

编写人员： 王同生 于子忠 张 勇

李永江 罗隆芒 石红伟

前 言

涵闸是常见的水工建筑物，是各类防洪、发电和引、供水工程的重要组成部分。现代涵闸工程大部分是钢筋混凝土结构。为了保证工程质量，需要防止对结构有危害的裂缝。涵闸混凝土裂缝的原因是多方面的，其中温度收缩应力是主要的原因。因此，涵闸混凝土温度应力分析、温度控制和预防裂缝的措施，是涵闸设计、施工和科研的重要课题。

在我国水利水电工程建设中，关于水工混凝土建筑物的温度应力分析、温度控制和预防裂缝措施的研究，已有长足的进步，在大体积混凝土坝方面进展更大。从 20 世纪 70 年代开始，已逐步开始将有限单元法用于徐变温度应力仿真计算。在涵闸混凝土方面虽也有所进展，但进展相对缓慢。在 20 世纪“98”大水以后，国家增加了对水利建设的投资，兴建了一大批大中型涵闸，其中一部分发生了裂缝，个别还发生了较多的有危害性的温度裂缝，事后进行了艰难的修补。在总结经验的基础上，在涵闸工程建设中加强了对温度控制和预防裂缝的研究，包括改善混凝土的性能、选择适宜的浇筑分缝分层方案，并将有限单元法用于涵闸混凝土的徐变温度应力仿真计算，取得了可喜的成绩。在涵闸混凝土工程中防止了有危害性的裂缝，少数工程甚至避免了裂缝的发生，在理论和工程实践两方面都积累了宝贵的经验。

混凝土内的温度收缩应力具有复杂的变化过程。混凝土是一种弹性徐变体，浇筑以后随着龄期的增长，不但弹性模量逐步增长，而且在应力作用下还会发生徐变。混凝土的温度收缩应力不仅与浇筑温度和水泥水化热温升有关，而且还与外界温度和湿度变化以及混凝土的自生体积变形有关。在不利条件下，如某一部位混凝土因温度收缩产生的拉应力超过了其抗裂能力，就会发生裂缝。

通过运用有限单元法，也可对涵闸混凝土的温度收缩应力进行较精细的计算，并可以考虑多种因素的影响。计算结果基本上可反映实际情况，并成为温度控制设计和施工的指南或重要依据。但另一方面，计算理论和计算方法中还有一些不够完善的地方，还采用了一些简化的假定，一些计算参数仅根据经验和参照有关资料采用。因此，计算结果和采取的防裂措施还需要通过实践来检验，也需要从理论和实践的结合上进一步总结经验，这也是撰写本书的立足点。

本书共分两篇。第 1 篇是基本原理与计算方法,包括第 1 章到第 8 章,介绍了涵闸混凝土温度应力的特点,有关的混凝土性能,温度和温度应力的计算方法,包括解析解法、简化算法以及有限单元法。希望通过这 8 章,能在重视和建立基本概念的基础上,对计算方法和温度收缩应力的变化规律有所了解。第 2 篇是工程经验,包括第 9 章到第 14 章。其中第 9 章到第 13 章,从理论与实践的结合上,分别介绍了淮河入海水道淮安立交地涵、二河闸、刘家道口节制闸、姜唐湖退水闸以及燕山水库溢洪闸的经验。对每一工程均介绍了其混凝土性能及采用的有关计算参数、有限单元法仿真计算的有关结果以及所采用的温控防裂措施与实施效果。此外,还对有关工程的实测温差进行了分析,对预防裂缝的允许温差进行了讨论。第 14 章是对这些工程经验的归纳和小结,并结合提出了部分需要进一步研究的问题。

本书由王同生、于子忠、张勇、李永江、罗隆芒和石红伟共同编写,王同生负责统稿。这本书既是作者们的工作和研究成果,同时也引用了本专业的学者和同行们的许多研究成果。在本书撰写过程中,得到了淮河水利委员会治淮工程建设管理局、水利部水利建设与管理总站和河南省燕山水库建设管理局等单位的大力支持,闪黎、宋心同为本书提供了有关工程资料,谨此一并表示衷心的感谢。

由于水平和时间所限,书中难免存在不妥之处,请予以批评指正。

编 者
2010 年 11 月

目 录

第 1 篇 基本理论与计算方法

第 1 章 绪论	3
1.1 涵闸混凝土的温度应力及其特点	3
1.1.1 涵闸混凝土结构的特点	3
1.1.2 涵闸混凝土温度和温度应力的变化过程	4
1.1.3 涵闸混凝土温度应力的特点	5
1.2 涵闸混凝土的温度裂缝	6
1.2.1 裂缝类型	6
1.2.2 软基上水闸闸墩的裂缝	7
1.2.3 软基上立交地涵墩墙的裂缝	8
1.2.4 岩基上泄洪闸闸墩的裂缝	8
1.2.5 岩基上溢洪道底板的裂缝	9
1.2.6 立交工程上部人工河槽侧壁裂缝	9
1.2.7 防洪墙加固外浇薄壁混凝土的裂缝	10
1.3 涵闸混凝土裂缝的危害性	11
1.3.1 裂缝的危害性	11
1.3.2 裂缝的允许宽度	11
1.3.3 加筋对混凝土温度应力的影响	12
参考文献	13
第 2 章 涵闸混凝土的热学性能和力学性能	14
2.1 混凝土的热学性能	14
2.2 水泥水化热和混凝土绝热温升	17
2.2.1 水泥水化热	17
2.2.2 混凝土的绝热温升	21

2.3	混凝土的强度和极限拉伸	24
2.3.1	混凝土的强度	24
2.3.2	混凝土极限拉伸变形	28
2.4	混凝土的自生体积变形	30
2.5	混凝土的弹性模量	32
2.5.1	弹性模量的影响因素	32
2.5.2	弹性模量与龄期的关系表达式	34
2.6	混凝土的徐变与应力松弛	34
2.6.1	基本原理	34
2.6.2	徐变的影响因素	40
2.6.3	徐变数学表达式	41
2.6.4	应力松弛计算和松弛系数的数学表达式	44
	参考文献	46
第3章	涵闸混凝土的温度计算	47
3.1	概述	47
3.2	热传导方程、初始条件和边界条件	47
3.3	边界条件的近似处理	52
3.4	混凝土的浇筑温度	55
3.4.1	出机温度	56
3.4.2	入仓温度	56
3.4.3	浇筑温度	57
3.5	热传导方程的差分解法	58
3.6	底板的温度计算	64
3.6.1	底板的水化热温升	64
3.6.2	外界温度变化引起的底板温度的变化	65
3.7	闸墩的温度计算	69
3.7.1	墩墙的水化热温升	69
3.7.2	外界温度变化引起的闸墩温度的变化	76
3.8	太阳辐射的影响	97
	参考文献	100
第4章	涵闸混凝土的温度应力分析	101
4.1	概述	101
4.2	约束应力	102
4.2.1	嵌固板的温度应力	102
4.2.2	自由板的温度应力	106
4.3	底板的温度应力	110
4.3.1	约束系数法	110
4.3.2	刚性地基的约束系数	111
4.3.3	弹性地基上底板的温度应力和弹性地基的约束系数	111

4.4 闸墩的温度应力	115
4.4.1 岩基上闸墩由均匀温差引起的应力	115
4.4.2 岩基上闸墩由不均匀温差引起的应力	118
4.4.3 土基上闸墩的温度应力(长底板)	119
4.4.4 土基上闸墩的温度应力(短底板)	121
4.4.5 土基上闸墩温度应力的简化计算	122
4.4.6 气温骤降在闸墩内引起的温度应力	125
参考文献	127
第5章 计算温度和温度应力的有限单元法	129
5.1 概述	129
5.2 用有限单元法计算温度场	130
5.2.1 变分原理	130
5.2.2 不稳定温度场计算中变分原理的应用	131
5.2.3 求解不稳定温度场的有限单元法	133
5.3 用有限单元法计算弹性温度应力	137
5.3.1 求解域的单元划分	137
5.3.2 单元位移	138
5.3.3 单元应变	138
5.3.4 单元应力	139
5.3.5 单元的结点力与刚度矩阵	140
5.3.6 结点荷载	142
5.3.7 结点平衡方程和整体刚度矩阵	143
5.4 用有限单元法计算徐变温度应力	144
5.4.1 弹性和徐变的应变增量	144
5.4.2 应力增量——应变增量关系	146
5.5 岩基上底板的徐变温度应力	150
5.5.1 底板的基本资料	150
5.5.2 计算结果	150
5.5.3 推论	153
5.6 软基上底板的徐变温度应力	154
5.6.1 底板的基本资料	154
5.6.2 计算结果	155
5.7 软基上闸墩的徐变温度应力	156
5.7.1 闸墩混凝土的基本资料	157
5.7.2 计算结果	158
5.7.3 闸墩长度、闸墩和底板之间施工缝间歇与位置的影响	159
5.8 软基上地涵墩墙徐变温度应力沿厚度的变化	161
5.8.1 地涵墩墙混凝土的基本资料	162
5.8.2 计算结果	162

5.9 软基上闸墩徐变温度应力沿厚度的变化	164
5.9.1 闸墩混凝土的基本资料	165
5.9.2 计算结果	165
参考文献	167
第6章 水管冷却的降温计算	168
6.1 概述	168
6.2 二期冷却计算	169
6.2.1 水管布置方式	169
6.2.2 二期冷却的平面问题	170
6.2.3 二期冷却的空间问题	174
6.3 一期冷却计算	177
6.3.1 一期冷却的平面问题	177
6.3.2 一期冷却的空间问题	178
6.4 冷却水管降温计算有限单元法	180
6.4.1 迭代法	180
6.4.2 等效热传导方程法	181
6.5 影响冷却效果的因素及涵闸混凝土水管冷却的特点	184
6.5.1 影响冷却效果的因素	184
6.5.2 涵闸混凝土水管冷却的特点	186
参考文献	187
第7章 混凝土的湿度变化和干缩应力	188
7.1 湿度变化	188
7.1.1 湿度扩散方程	188
7.1.2 与热传导问题的不同点	189
7.2 干缩变形	191
7.2.1 干缩变形与湿度变化	191
7.2.2 干缩变形的影响因素	192
7.3 干缩应力	194
7.3.1 混凝土自由板的干缩应力	194
7.3.2 钢筋混凝土板的干缩应力	196
7.4 关于干缩应力和干缩试验的几个问题	198
7.4.1 关于水分扩散系数	198
7.4.2 关于干缩试验的讨论	199
7.4.3 关于干缩变形的实用算法	201
7.5 钢筋混凝土板的温度应力	202
7.6 钢筋混凝土板的自生体积变形应力	203
参考文献	204
第8章 温度控制和预防裂缝的措施	205
8.1 合理进行结构分缝和分层浇筑	205

8.2 适当选择混凝土原材料、配合比和配制强度	206
8.3 分析温度应力, 拟定温度控制标准	208
8.3.1 混凝土的抗裂能力	208
8.3.2 温度应力与允许温差	209
8.4 各类温度控制措施的制订	212
8.4.1 表面保温	212
8.4.2 水管冷却	213
8.4.3 降低混凝土浇筑温度	213
参考文献	214

第2篇 工程经验

第9章 淮安枢纽立交地涵的温度控制	217
9.1 工程概况	217
9.1.1 枢纽简况	217
9.1.2 涵闸的结构	217
9.1.3 闸址的气候及地质条件	218
9.1.4 地涵的施工	219
9.2 混凝土的性能和徐变温度应力仿真计算	221
9.2.1 混凝土的性能	221
9.2.2 徐变温度应力仿真计算	223
9.3 温度控制的要求和措施以及实施效果	225
9.3.1 温度控制要求	225
9.3.2 温度控制措施	225
9.3.3 温度控制效果	225
参考文献	227
第10章 二河闸的温度控制	228
10.1 工程概况	228
10.1.1 水闸的结构	228
10.1.2 闸址的地质和气候条件	228
10.1.3 水闸的施工	229
10.2 混凝土的性能和徐变温度应力仿真计算	230
10.2.1 混凝土的性能	230
10.2.2 徐变温度应力仿真计算	232
10.3 温度控制措施及其实施效果	234
10.3.1 温度控制措施	234
10.3.2 实施效果	235
参考文献	235

第 11 章 刘家道口节制闸的温度控制	236
11.1 工程概况	236
11.1.1 枢纽简况	236
11.1.2 涵闸的结构	237
11.1.3 节制闸的施工	241
11.1.4 闸址的气候及工程地质	244
11.2 混凝土的性能和徐变温度应力仿真计算	245
11.2.1 混凝土的性能	245
11.2.2 徐变温度应力仿真计算	247
11.3 温度控制要求和措施	250
11.3.1 温度控制要求	250
11.3.2 温度控制措施	250
11.4 温度控制效果及允许温差分析	253
11.4.1 温度控制效果	253
11.4.2 允许温差分析	253
参考文献	255
第 12 章 姜唐湖退水闸的温度控制	256
12.1 工程概况	256
12.1.1 退水闸的结构	256
12.1.2 退水闸施工	257
12.1.3 闸址的气候条件	260
12.2 底板、闸墩混凝土性能和徐变温度应力仿真计算	261
12.2.1 混凝土的性能	261
12.2.2 底板及闸墩徐变温度应力仿真计算和成果分析	263
12.3 温度控制的措施以及实施效果	266
12.3.1 温度控制措施	266
12.3.2 温度控制的效果	267
参考文献	269
第 13 章 燕山水库溢洪闸的温度控制	270
13.1 工程概况	270
13.1.1 枢纽简况	270
13.1.2 溢洪道控制段的结构	270
13.1.3 溢洪道地质条件	272
13.1.4 工程地区气候条件	272
13.1.5 溢洪闸闸墩的施工过程	273
13.2 预防裂缝的综合措施	273
13.2.1 配合比设计及优化	273
13.2.2 严格控制原材料和施工配合比	274
13.2.3 闸墩与底板连浇, 减少底板对闸墩的约束	274

13.2.4 严格控制浇筑过程, 确保规范、有序施工.....	275
13.2.5 合理振捣.....	275
13.3 混凝土的性能和徐变温度应力仿真计算.....	275
13.3.1 混凝土的性能.....	275
13.3.2 徐变温度应力仿真计算.....	277
13.4 温度控制的要求和措施.....	279
13.4.1 温度控制要求.....	279
13.4.2 温度控制措施.....	279
13.5 温度控制的实施效果.....	281
参考文献.....	282
第 14 章 涵闸混凝土温度控制和预防裂缝的工程经验.....	283
14.1 优化混凝土配合比, 改善混凝土性能.....	283
14.1.1 优化混凝土配合比.....	283
14.1.2 配制强度和胶凝材料用量.....	283
14.1.3 温控设计中混凝土性能的采用.....	284
14.1.4 需要进一步研究的问题.....	285
14.2 适当分缝分层, 选择合理的浇筑方法.....	285
14.2.1 适当分缝分层.....	285
14.2.2 泵送混凝土对温控和防裂的影响.....	286
14.3 进行温度应力仿真计算, 做好温度控制设计.....	287
14.3.1 开展仿真计算, 阐明涵闸混凝土徐变温度应力变化规律.....	287
14.3.2 温度控制设计.....	288
14.3.3 温度控制措施.....	289
14.3.4 允许温差.....	291
参考文献.....	292

第 1 篇

基本理论与计算方法

第1章 绪论

1.1 涵闸混凝土的温度应力及其特点

1.1.1 涵闸混凝土结构的特点

(1) 混凝土是脆性材料，抗拉强度和极限拉伸变形值都比较低。抗拉强度只有抗压强度的 $1/9 \sim 1/18$ 。混凝土短期加载时的极限拉伸值只有 $(0.6 \sim 1.0) \times 10^{-4}$ ，涵闸混凝土由于灰浆率较高，极限拉伸值也较高，可以达到 $(0.8 \sim 0.9) \times 10^{-4}$ ，但也只相当于温度降低 $8 \sim 9^{\circ}\text{C}$ 的变形，温度应力超过了抗拉强度就要发生裂缝。

(2) 涵闸的底板和墩墙是工程中混凝土量最大，也是其主要的组成部分。底板的长、宽和墩墙的长、高两个方向尺寸比较大，其厚度相对都较小，底板的顶面和底面以及墩墙的两侧面散热条件都比较好，水泥水化热较易散发，但由于断面尺寸或钢筋间距的限制，混凝土所用的石子粒径较小，坍落度大，水泥用量高，混凝土中仍然会形成很高的水化热温升，散热后温降（即前后期温差）也很大。底板和墩墙将是本书研究温度和温度应力的主要对象。

(3) 与混凝土的温度传导相比，其湿度传导极慢，由失水引起的干缩在很长时间内仅限于浅表。但干缩对涵闸混凝土的影响比大体积混凝土要大，原因来自两方面，一方面涵闸混凝土水泥用量大，灰浆量高，干缩值高于大体积混凝土；另一方面涵闸结构断面尺寸与大体积混凝土坝相比相对较小，干缩裂缝的深度和影响相对要大。

(4) 涵闸混凝土配有钢筋，是钢筋混凝土结构，在外荷载作用下是允许裂缝的，一般要做裂缝控制验算，规范也有裂缝最大宽度允许值的规定。但目前温度控制和预防裂缝的技术水平难以对裂缝宽度进行控制，温度控制和预防裂缝如有较严格的要求仍以不允许裂缝为出发点。

(5) 涵闸混凝土的体积介于大体积混凝土与工业民用建筑结构之间，应属于较大体积混凝土。

1.1.2 涵闸混凝土温度和温度应力的变化过程

涵闸底板和墩墙的平面尺寸都很大，而厚度很小，与外界的热交换都沿垂直于平面的方向进行，即底板沿垂直于顶面，墩墙沿垂直于侧表面方向。沿其他两个方向的热交换很少，在简化计算中，可忽略不计。

底板和墩墙中心的温度变化可概略地表示于图 1.1。混凝土浇筑时的温度为浇筑温度 T_p ，由于水泥水化热的作用，温度上升了 T_r ，达到最高温度 $T_p + T_r$ 。如混凝土处于绝热状态，温度将沿着虚线所示的绝热温升线上升，其绝热温升为 θ_0 。现由于向外界散热，混凝土的实际温升为水化热温升 T_r ，其散热所降低的温度就是 $\theta_0 - T_r$ 。

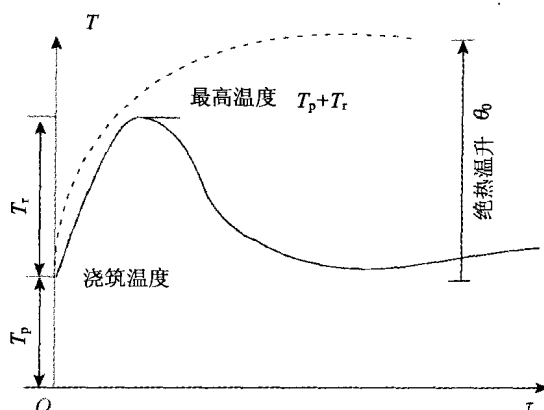


图 1.1 混凝土的温度变化过程

再经过一段时间的散热，混凝土温度将降低到接近于外界的气温，由于底板和墩墙的厚度相对较小，散热所需的时间不长，从浇筑时起算这段时间对于闸墩将在 28 天之内，对于底板在 60 天左右，随厚度而变。此后，混凝土内的温度将随着外界介质温度气温或水温的变化而变化。

混凝土内发生温度变化后，如不受到约束，则只有温度变形而没有温度应力。如受到约束则产生应力，约束可分为自身约束和外界约束两类，应力相应也可分为两类，即自身应力和约束应力，如图 1.2^[1]。

(1) 自身应力

假设边界上不存在约束或者是完全静定的结构，而且结构内部温度分布是线性的，则从弹性力学可以证明，结构内部不产生应力。如结构内部温度分布是非线性的，则将因自身内部互相约束而产生应力，称为自身应力。

如墩墙两侧表面由于天然散热，表面温度较低而内部温度较高，内部的膨胀变形受到外部的约束，内部产生压应力，而表面出现拉应力。因断面上没有其他应力，拉压必须平衡，这也是自身应力的特点。