



HANDONGSHI DUCAO WEIYI
HE WENDU YINGLI FENXI

涵洞式渡槽位移 和温度应力分析

张建华 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

HANDONGSHI DUCAO WEIYI
HE WENDU YINGLI FENXI

涵洞式渡槽位移 和温度应力分析

张建华 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以南水北调工程中的沙河涵洞式渡槽为例,介绍涵洞式渡槽结构在运营期的各种工况下的应力和变形,具体如下:

(1) 考虑渡槽结构承受的各种荷载,包括槽内水重、涵洞过水重、结构自重、风载、河道扬压力、温变荷载、人群、施工检修,计算沙河涵洞式渡槽在单一荷载作用下的变形分析;

(2) 计算混凝土徐变应力松弛系数为 0.3 和 1.0 时,沙河涵洞式渡槽在运营期的各种荷载组合工况下的变形及沉降量,并进行分析;

(3) 计算混凝土徐变应力松弛系数为 0.3 和 1.0 时,沙河涵洞式渡槽在运营期的各种荷载组合工况下的应力,并进行分析。

本书可为涵洞式渡槽的结构设计计算提供理论依据及参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

涵洞式渡槽位移和温度应力分析/张建华著. —北京:中国电力出版社, 2018.3

ISBN 978-7-5198-1496-0

I. ①涵… II. ①张… III. ①渡槽—位移—研究 ②渡槽—应力分析 IV. ①TV672

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 294257 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:王晓蕾 (010-63412610)

责任校对:太兴华

装帧设计:王英磊

责任印制:杨晓东

印 刷:北京九天众诚印刷有限公司

版 次:2018 年 3 月第一版

印 次:2018 年 3 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:7

字 数:200 千字

定 价:48.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前 言

涵洞式渡槽是输水渠道在跨越河流时兴建的双向过水建筑物，上部渡槽承担调水渠道输水功能，下部涵洞起引导河水下泄和上部渡槽结构的基础作用，故涵洞式渡槽又属于箱基渡槽的类别。涵洞式渡槽主要承受水荷载、自重、风载、地震、温度荷载、冻冰荷载和施工荷载等作用。在我国南水北调工程中，各种规模的涵洞式渡槽被广泛地应用在调水渠道与河道的立体交叉工程中。

本书共 5 章。第 1 章为概述，主要阐述了渡槽的发展历史、发展现状、涵洞式渡槽的发展现状以及涵洞式渡槽亟待解决的问题。第 2 章为工程概况及计算模型，主要介绍了沙河涵洞式渡槽的工程概况、计算模型、计算条件、计算中的材料力学参数、各种荷载及其工况组合。第 3 章为涵洞式渡槽位移计算结果与分析，选取涵洞净高 5.7m、6.2m 和 7.7m 三个典型断面，主要针对混凝土徐变和应力松弛系数为 0.3 及 1.0 的位移进行了计算和分析，并将有限元的计算结果与《规范》的计算结果进行了比较分析和讨论。第 4 章为涵洞式渡槽应力计算结果与分析，主要针对混凝土徐变和应力松弛系数为 0.3 及 1.0 的情况下，选取涵洞净高 5.7m、6.2m 和 7.7m 三个典型断面进行了全方位的应力计算和分析。第 5 章结论与建议，主要总结了涵洞式渡槽各种工况组合时应力和位移的计算结果的相关结论，并给出了一些建议和意见。

本书在编写过程中得到了华北水利水电大学白新理教授和马文亮副教授的大力帮助，他们对书稿进行了审阅并提出具体修改建议，在此一并致以衷心感谢。

限于作者水平，书中内容难免有疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

著者

2017 年 10 月

目 录

前言	
第 1 章 概述	1
1.1 涵洞式渡槽的研究现状	1
1.2 涵洞式渡槽研究亟待解决的问题	2
1.3 本书的主要成果	2
第 2 章 工程概况及计算模型	3
2.1 工程概况	3
2.2 计算模型与条件	4
第 3 章 涵洞式渡槽位移计算结果与分析	12
3.1 混凝土徐变和应力松弛系数为 0.3 的位移计算结果	12
3.2 混凝土徐变和应力松弛系数为 0.3 的位移计算结果分析	17
3.3 混凝土徐变和应力松弛系数为 1.0 的位移计算结果	18
3.4 混凝土徐变和应力松弛系数为 1.0 的位移计算结果分析	23
3.5 各典型断面沉降量的《建筑地基基础设计规范》算法	23
3.6 有限元算法解答与《规范》算法解答对比讨论	24
3.7 小结	25
第 4 章 涵洞式渡槽应力计算结果与分析	27
4.1 涵洞式渡槽(典型断面 1)应力计算结果与分析($K_p=0.3$)	29
4.2 涵洞式渡槽(典型断面 3)应力计算结果与分析($K_p=0.3$)	39
4.3 涵洞式渡槽(典型断面 5)应力计算结果与分析($K_p=0.3$)	48
4.4 涵洞式渡槽(典型断面 1)应力计算结果与分析($K_p=0.1$)	57
4.5 涵洞式渡槽(典型断面 3)应力计算结果与分析($K_p=0.1$)	68
4.6 涵洞式渡槽(典型断面 5)应力计算结果与分析($K_p=0.1$)	79
4.7 典型断面 1 涵洞式渡槽总体应力分析	88
4.8 典型断面 3 涵洞式渡槽总体应力分析	93
4.9 典型断面 5 涵洞式渡槽总体应力分析	97
4.10 小结	102
第 5 章 结论与建议	104
5.1 主要结论	104
5.2 建议	105
参考文献	106

第 1 章 概 述

涵洞式渡槽是输水渠道在跨越河流时兴建的双向过水建筑物，上部渡槽承担调水渠道输水功能，下部涵洞起引导河水下泄和上部渡槽结构的基础作用，故涵洞式渡槽又属于箱基渡槽的类别。涵洞式渡槽主要起承受水荷载、自重、风载、地震、温度荷载、冻冰荷载和施工荷载等作用。随着我国水利事业的迅速发展，各种规模的涵洞式渡槽被广泛地应用到调水渠道与河道的立体交叉工程中。因此开展涵洞式渡槽结构的力学分析，有着重要的理论意义和实用价值。

1.1 涵洞式渡槽的研究现状

1.1.1 涵洞式渡槽的试验研究

2001 年，华北水利水电学院解伟、张世宝等学者，以南水北调中线工程安阳河段的大型钢筋混凝土涵洞式渡槽为试验对象，采用 1:10 的仿真模型进行了试验研究，以期研究涵洞式渡槽各部位受力情况和规律，并与有限元计算结果做了比较，为优化工程设计提供了依据。2002 年，长江科学院学者张晖、张述琴等以南水北调漳河涵洞式渡槽为试验对象，对钢筋混凝土渡槽结构仿真模型试验中的材料性能、模型的设计制作、结构自重的模拟及水荷载施加方法等关键技术进行了分析讨论。重点阐述了试验过程中结构和加载方式的模拟。给出不同工况下渡槽关键部位的应变和变形，并做了比较，为渡槽提供了需要改进的结构设计建议。

1.1.2 大型钢筋混凝土涵洞式渡槽静动力分析

2002 年，华北水利水电学院解伟、赵平、白新理、刘祚秋、陈爱玖等学者，利用三维有限元法对涵洞式渡槽进行了静动力分析。根据结构特征、地质条件和结构材料的力学参数，对结构进行了分析，得到了应力、弯矩和变形的变化规律，为渡槽设计提供了可靠依据。

1.1.3 涵洞式渡槽结构可靠性研究

2006 年，华北水利水电学院解伟等学者，针对涵洞式渡槽的主要结构的失效模式进行了分析，建立了相应的功能函数，并得出了相应的可靠性指标，在考虑各结构相互性的基础上，计算了涵洞式渡槽结构的系统可靠度。

1.2 涵洞式渡槽研究亟待解决的问题

对涵洞式渡槽在温变荷载、地震作用下的力学性能、运营过程中耐久性等问题，现在还没有进行过系统的研究和论述。由于涵洞式渡槽的安全性会直接影响跨流域调水的安全性，随着工程技术的发展和跨流域调水工程的实施，这方面的研究将会引起国内外学者的重视。

1.3 本书的主要成果

本书的主要成果有以下几点。

(1) 考虑的渡槽结构承受的各种荷载，包括槽内水重、涵洞过水重、结构自重、风载、河道扬压力、温变荷载、人群、施工检修，计算沙河涵洞式渡槽在单一荷载作用下的变形分析。

(2) 计算混凝土徐变应力松弛系数为 0.3 和 1.0 时，沙河涵洞式渡槽在运营期的各种荷载组合工况下的变形及沉降量，并进行分析。

(3) 计算混凝土徐变应力松弛系数为 0.3 和 1.0 时，沙河涵洞式渡槽在运营期的各种荷载组合工况下的应力，并进行分析。

本书可为涵洞式渡槽的结构设计计算提供理论依据及参考。

第2章 工程概况及计算模型

2.1 工程概况

根据南水北调沙河涵洞式渡槽沿线的不同地质条件,共取5个典型断面(图2-1)进行结构分析,每个典型断面的涵洞高度不等,地基处理方式也不同。经与甲方协商,5个典型断面涵洞的结构尺寸及地基参数如下:

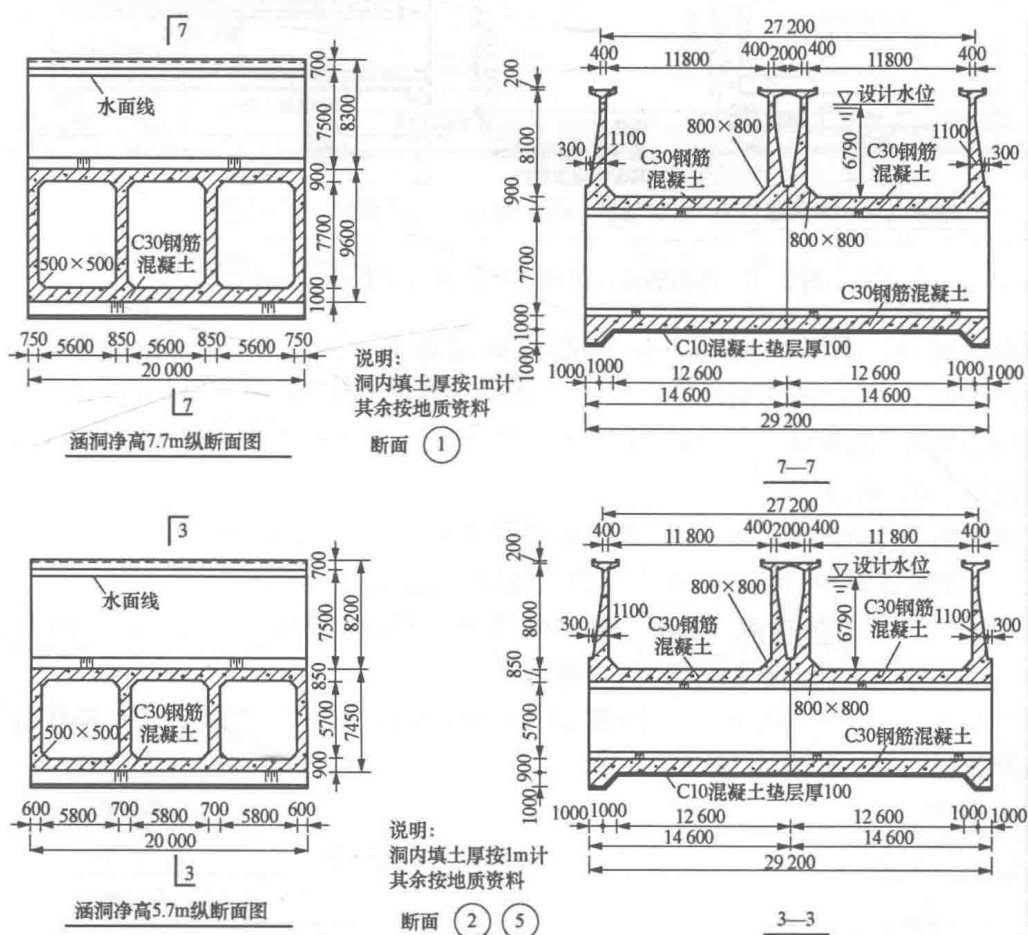


图 2-1 沙河涵洞式渡槽典型断面图 (单位: mm) (一)

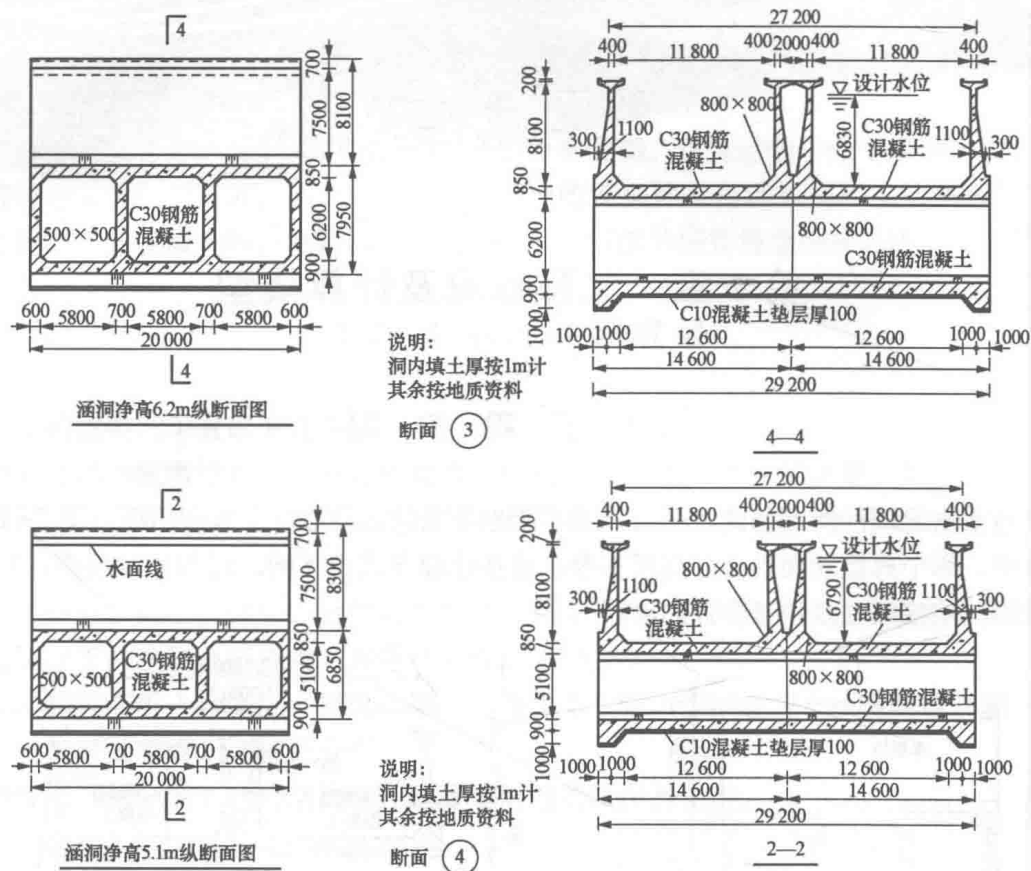


图 2-1 沙河涵洞式渡槽典型断面图 (单位: mm) (二)

典型断面 1: 涵洞净高 7.7m。下部为换填卵石, 深 2.5m (SH4+773.1), $E_s=35\text{MPa}$; 再向下为 3.2m 深的砾砂, $E_s=20\text{MPa}$, 最下部为天然卵石层, $E_s=40\text{MPa}$ 。

典型断面 2: 涵洞净高 5.7m。换填卵石深 4m (SH5+653.1), $E_s=35\text{MPa}$; 再向下为天然卵石层, $E_s=40\text{MPa}$ 。

典型断面 3: 涵洞净高 6.2m。振冲碎石桩 (SH6+953.1), 4m 深的壤土 $E_s=11\text{MPa}$; 下部 2.5m 天然砂 $E_s=25\text{MPa}$, 最下部为天然卵石层, $E_s=40\text{MPa}$ 。

典型断面 4: 涵洞净高 5.1m。振冲碎石桩 (SH6+953.1), 4.5m 深的壤土 $E_s=11\text{MPa}$; 最下部为天然卵石层, $E_s=40\text{MPa}$ 。

典型断面 5: 涵洞净高 5.7m。强夯 (SH8+883.1), 8m 深的壤土 $E_s=8\text{MPa}$; 最下部为天然卵石层, $E_s=40\text{MPa}$ 。

2.2 计算模型与条件

根据约定, 在计算分析中, 选取典型断面 1、3 和 5 作为研究对象进行计算分析。

2.2.1 计算条件

1. 地基土的计算深度

根据《建筑物地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中关于地基沉降计算深度的确定方法,参考工程地质实际情况,各断面地基沉降计算深度见表 2-1~表 2-3。

2. 材料性质及物理参数

沙河涵洞式渡槽槽身采用 C40 混凝土,涵洞底垫层为 C10 混凝土,钢筋采用Ⅱ级热轧钢筋,其力学参数见表 2-4 和表 2-5。

3. 计算假设

整个计算过程中,采用混凝土和钢材的弹性本构关系,并假定整个槽体的变形都是小变形。

表 2-1 沙河涵洞式渡槽断面上地基沉降计算深度表(典型断面 1)

典型断面 1:涵洞净高 7.7m,下部换填卵石 2.5m(SH4+773.1)。计算深度 22.2m		
土层性质	$Z_n(\text{m})$	$E_s(\text{MPa})$
卵石层	2.5	35
砾砂层	5.7	20
天然卵石层 1	9.2	40
天然卵石层 2	14.2	40
天然卵石层 3	18.2	40
天然卵石层 4	22.2	40

表 2-2 沙河涵洞式渡槽断面上地基沉降计算深度表(典型断面 3)

典型断面 3:涵洞净高 6.2m,振冲碎石桩(SH6+953.1)。计算深度 18.5m		
土层性质	$Z_n(\text{m})$	$E_s(\text{MPa})$
基础底部	0	11
壤土	4	11
天然砂	6.5	25
天然卵石层 1	9.5	40
天然卵石层 2	12.5	40
天然卵石层 3	15.5	40
天然卵石层 4	18.5	40

表 2-3 沙河涵洞式渡槽断面上地基沉降计算深度表(典型断面 5)

典型断面 5:涵洞净高 5.7m,强夯(SH8+883.1)。计算深度 20m		
土层性质	$Z_n(\text{m})$	$E_s(\text{MPa})$
壤土	5	9
壤土	8	7.3
天然卵石层 1	11	40
天然卵石层 2	14	40
天然卵石层 3	17	40
天然卵石层 4	20	40

表 2-4 混凝土和钢筋的强度指标

材料	抗拉强度(MPa)		抗压强度(MPa)		弹性模量 (GPa)	泊松比
	标准值	设计值	标准值	设计值		
C40 混凝土	2.39	1.71	26.8	19.1	32.5	0.167
Ⅱ级钢筋	335	310	335	310	200.0	0.3

表 2-5 混凝土材料热力学特性参数

参数类型	容重 (kg/m³)	导热系数 [kJ/(m·h·℃)]	比热 [kJ/(kg·c)]	放热系数 [kJ/(m²·h·℃)]	导温系数 (m²/h)	线膨胀系数 (/℃)
数值	2450	10.6	0.96	84	0.0044	1.25E-5

假定在涵洞式渡槽施工前，天然地基已完全固结，沉降仅由水重和槽重引起，故不考虑地基土的自重。

槽内钢筋的加强作用，采用均化的钢筋混凝土折算模量来考虑，折算模量按式（2-1）计算。

$$\bar{E}_R = E_c \left(1 + \mu \frac{E_s - E_c}{E_c} \right)$$

(2-1)

式中 $\bar{E}_R$ ——钢筋混凝土折算弹性模量；
 E_c ——混凝土弹性模量；
 E_s ——钢筋弹性模量；
 μ ——配筋率。

4. 计算荷载及工况组合

（1）荷载。在计算分析过程中，考虑的荷载有槽内水重、涵洞过水重、结构自重、风荷载、河道扬压力、温变荷载、人群、施工检修等荷载。荷载设计值根据《水工建筑物荷载设计规范》（SL 744—2016）和《南水北调渡槽建筑物技术规程》的有关条款来计算。

自重：考虑混凝土的密度，重力加速度 $g=10\text{m/s}^2$ ，按体力考虑。

水压力：水的密度取 $\rho_w=1000\text{kg/m}^3$ ，水的容重取 $\gamma_w=10\,000\text{N/m}^3$ 。按三角形荷载，按面力来考虑。

风荷载：风荷载的标准值按式（2-2）计算。

$$W_k = \beta_z \mu_s \mu_z W_0$$

(2-2)

式中 W_0 ——基本风压，按该地区 50 年一遇基本风压，取 $W_0=0.45\text{kN/m}^2$ ；
 μ_z ——风压随高度变化系数，取 $\mu_z=1.25$ ；
 μ_s ——风荷载体型系数，对于渡槽正面取 $\mu_{s\text{正}}=1.3$ ，渡槽侧面取 $\mu_{s\text{侧}}=-0.6$ ；
 β_z ——风振系数， $\beta_z=1+\frac{H_i \xi v}{H \mu_z}=1.664$ 。

代入式（2-2）可得渡槽正面和侧面风压的标准值分别为：

$$W_{k\text{正}} = 1.22\text{kPa}$$
$$W_{k\text{侧}} = -0.56\text{kPa}$$

河道扬压力：按河道水位的大小，在涵洞底板上施加竖直向上的面压力。

温变荷载：夏天考虑温升 4℃，冬季考虑温降 4℃。

人群荷载：在结构分析过程中，人群荷载取为面荷载，均布压力为 2.5kN/m²，作用在渡槽上部 2.0m 宽的翼缘上。

施工检修等荷载：渡槽底板上的车荷载取汽挂—10 级计算。

(2) 工况组合。工况组合情况列于表 2-6 及表 2-7 中。对沙河涵洞式渡槽计算工况说明如下。

工况 1：渡槽设计水深，河道设计洪水，温升。

荷载组合：自重+渡槽设计水深+涵洞设计水深（洞内水深 2m）+河道设计水深扬压力+风荷载+温度应力+人群荷载。

工况 2：渡槽设计水深，河道校核洪水，温升。

荷载组合：自重+渡槽设计水深+涵洞校核水深（洞内水深 2.5m）+河道校核水深扬压力+风荷载+温度应力+人群荷载。

工况 3：渡槽设计水深，河道无水，温升。

荷载组合：自重+渡槽设计水深 +风荷载+温度应力+人群荷载。

工况 4：渡槽设计水深，河道设计洪水，温降。

荷载组合：自重+渡槽设计水深+涵洞设计水深+河道设计水深扬压力+风荷载+温度应力+人群荷载。

工况 5：渡槽设计水深，河道无水，温降。

荷载组合：自重+渡槽设计水深+风荷载+温度应力+人群荷载。

工况 6：渡槽满槽水深，河道设计洪水，温升。

荷载组合：自重+满槽水深+涵洞设计水深（洞内水深 2m）+河道设计水深扬压力+风荷载+温度应力+人群荷载。

工况 7：渡槽满槽水深，河道无水，温降。

荷载组合：自重+满槽水深+风荷载+温度应力+人群荷载。

工况 8：渡槽检修，河道无水，温升。

荷载组合：自重+风荷载+温度应力+检修。

工况 9：渡槽检修，河道无水，温降。

荷载组合：自重+风荷载+温度应力+检修。

另外，对于工况组合中的河道设计洪水位为 119.27~120.36m，校核洪水位为 119.39~120.75m，地面高程 118m 左右，按涵洞内填土厚 1m 考虑，设计及校核洪水时洞内水深应为 2~2.5m。因此，设计洪水时涵洞内水深按 2m 考虑，校核洪水时按 2.5m 考虑。

表 2-6 涵洞式渡槽计算工况（典型断面 1 和 3）

工况	自重	渡槽水深			涵洞水深			河道 扬压力	风荷 载	温变荷载		人群 荷载	施工 检修
		设计	满槽	空槽	设计	校核	无水			温升	温降		
1	1.0	1.0			1.0			1.0	1.0	1.0		1.0	
2	1.0	1.0				1.0		1.0	1.0	1.0		1.0	
3	1.0	1.0					1.0		1.0	1.0		1.0	

续表													
工况	自重	渡槽水深			涵洞水深			河道 扬压力	风荷 载	温变荷载		人群 荷载	施工 检修
		设计	满槽	空槽	设计	校核	无水			温升	温降		
4	1.0	1.0			1.0			1.0	1.0		1.0	1.0	
5	1.0	1.0					1.0		1.0		1.0	1.0	
6	1.0		1.0		1.0			1.0	1.0	1.0		1.0	
7	1.0		1.0						1.0		1.0	1.0	
8	1.0			1.0					1.0	1.0			1.0
9	1.0			1.0					1.0		1.0		1.0

注：涵洞内无水时考虑 1m 的填土压力。

表 2-7 涵洞式渡槽计算工况（典型断面 5）

工况	自重	渡槽水深			涵洞水深			河道 扬压力	风荷 载	温变荷载		人群 荷载	施工 检修	土压力
		设计	满槽	空槽	设计	校核	无水			温升	温降			
1	1.0	1.0			1.0			1.0	1.0	1.0		1.0		1.0
2	1.0	1.0				1.0		1.0	1.0	1.0		1.0		1.0
3	1.0	1.0					1.0		1.0	1.0		1.0		1.0
4	1.0	1.0			1.0			1.0	1.0		1.0	1.0		1.0
5	1.0	1.0					1.0		1.0		1.0	1.0		1.0
6	1.0		1.0		1.0			1.0	1.0	1.0		1.0		1.0
7	1.0		1.0						1.0		1.0	1.0		1.0
8	1.0			1.0					1.0	1.0			1.0	1.0
9	1.0			1.0					1.0		1.0		1.0	1.0

注：1. 涵洞内无水时考虑 1m 的填土压力。
2. 表中最右一列为提岸土对箱基一侧墙的土压力。

2.2.2 计算模型

1. 单元技术

沙河涵洞式渡槽是双向输水的空间结构，为了能全面准确分析涵洞式渡槽结构的工作性能，宜建立三维有限元模型进行分析计算。计算选取一跨渡槽建立力学模型，渡槽槽身、涵洞洞身，地基岩体采用三维 8 节点的块体单元进行离散，该单元（图 2-2）由 8 个节点组成，每个节点上有 x 、 y 和 z 三个平动自由度，这种单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变的特性，特别适合用于做空间结构的静动力分析。

在计算温度应力时需要分两步进行：第一步要求出温度分布，第二步在已知温度分布的条件下再求解温度应力。

温度分析时选用了具有三个方向热传导能力的块体单元，如图 2-3 所示。该单元有 8 个节点且每个节点上只有一个温度自由度，可以用于三维稳态或瞬态的热分析。该单元能够实现匀速热流的传递。假如模型包括实体传递结构单元，那么也可以进行结构分析，此单元能够用等效的结构单元代替。该单元允许完成实现流体流经多孔介质的非线性稳态分析，这样单元的热参数将被转换成相类似的流体流动参数，如温度自由度将变为等效的压力自由度。

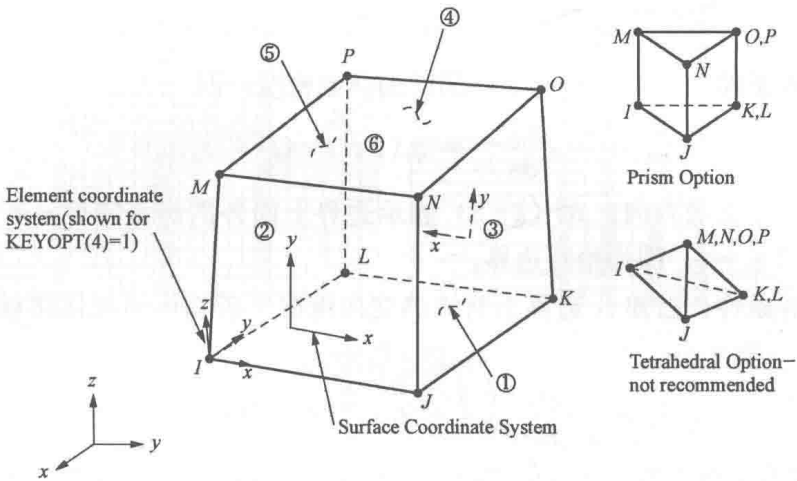


图 2-2 三维块体单元及相关坐标系

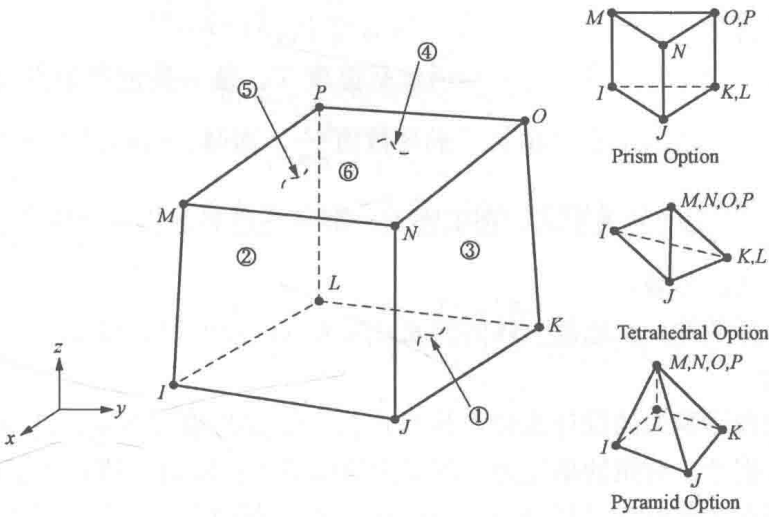


图 2-3 热分析单元及相关坐标图

2. 坐标系

整体控制坐标系的原点建立的在涵洞顶板的中心处， z 方向竖直向上， x 方向指向河流流向（涵洞过水方向）， y 方向指向渡槽过水方向，即渡槽的纵向，采用右手坐标系。

3. 边界条件及计算范围

(1) 温度场的边值条件。热传导微分方程包含时间坐标变量和空间坐标变量。为了定解温度场函数 T ，必须考虑两类边值条件，即时间边值条件（又称初始条件）和空间边值条件（又称边界条件）。

1) 初始条件：已知初瞬时整个物体上温度的分布，即

$$T|_{t=t_0} = T_0(P), \quad [P \in (V, s)] \tag{2-3}$$

其中 $P=P(x, y, z)$ ，表示空间点或空间坐标变量。

2) 边界条件：一般分为三类，即

第一类边界条件，已知 s_1 边界上各瞬时的温度分布，即

$$T|_s = T_b(P, t) \quad (P \in s_1, t > t_0) \quad (2-4)$$

第二类边界条件, 已知 s_2 边界上各瞬时的热流密度, 即

$$q_n|_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_s = q_b(P, t) \quad (P \in s_2, t > t_0) \quad (2-5)$$

其中 n 表示外法线方向, 式 (2-5) 表示边界上向外的热流密度。若某面为热流对称面, 则此面上的 $q_n=0$, 即为绝热边界。

第三类边界条件, 已知 s_3 边界上对流热交换情况。若物体与流体接触, 按照热的对流定律

$$q_n|_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_s = \beta(T - T_a) \quad (P \in s_3, t > t_0) \quad (2-6)$$

式中, β 为对流热交换系数, 其量纲是 $\text{MT}^{-3}\Theta^{-1}$, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 工程上常用的单位是 $\text{cal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; T_a 是流体介质的温度。 β 与流体的流速、流态 (层流或紊流)、黏滞性等有关。当 β 很小时, $q_n \rightarrow 0$, 接近绝热边界条件; 当 β 很大时, 由于 q_n 是有限值, 则 $(T - T_a) \rightarrow 0$, 所以物体的边界温度 T 接近于流体温度 T_a 。

热传导微分方程中所要求解的未知函数是温度 T 。第一类边界条件直接给出 T 的边界值, 第二类边界条件给出了在边界上 T 的导数值 $\frac{\partial T}{\partial n}$, 而第三类边界条件中, T 和 $\frac{\partial T}{\partial n}$ 均为未知, 只给出 $\frac{\partial T}{\partial n}$ 与 T 之间的关系式。在工程上, 第三类边界条件是常常遇到的, 如混凝土结构表面与水、空气的接触。

(2) 结构边界条件。在地基土体的侧面及底面取法向的位移约束。

4. 模型概述

考虑渡槽内和涵洞内的设计水位, 校核水位、温变荷载等因素, 建立如图 2-4 所示的三维有限元计算模型, 所用的单元为三维等参块体单元, 断面 1 仿真模型共有 21 256 单元, 25 785 节点; 断面 3 共有 25 316 单元, 30 914 节点; 断面 5 共有 26 872 单元, 32 443 节点。

2.2.3 混凝土徐变和应力松弛

在持续荷载作用下, 混凝土不仅发生弹性变形, 而且还将产生随时间增长的徐变变形。徐变变形和弹性变形不同, 弹性变形在加载后立刻发生, 而徐变变形是在加载后随荷载历时的推延逐渐发生的。徐变变形和塑性变形不同, 当结构承受的应力超过材料的屈服强度以后才发生塑性变形; 徐变则在较小的应力状态下也能发生。

在计算温度应力时, 常假设徐变应变和应力成正比, 在时间 t 的总应变为

$$\varepsilon(t, \tau) = \frac{\sigma(\tau)}{E} + \sigma(\tau)c(t, \tau) = \sigma(\tau)\delta(t, \tau) \quad (2-7)$$

式中 τ ——加载龄期。

$$\delta(t, \tau) = \frac{1}{E} + c(t, \tau) \quad (2-8)$$

$c(t, \tau)$ 是单位应力作用下的徐变, 称为徐变度。徐变度需要通过材料徐变实验确定。徐变应力用松弛系数 $K_p(t, \tau)$ 表示, 设在 τ_0 时刻施加应变 $\varepsilon(\tau_0)$ 并且保持应变不变, 则 τ_0 时刻的应力即为瞬时弹性应力

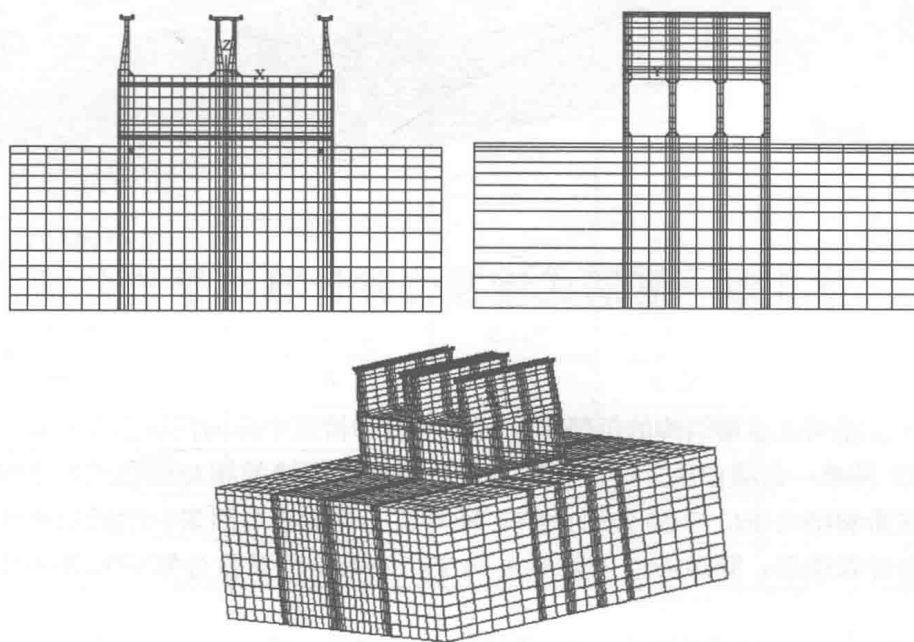


图 2-4 三维有限元计算模型

$$\sigma(\tau_0) = E(\tau_0)\epsilon(\tau_0) \quad (2-9)$$

令 t 时刻应力为 $\sigma(t, \tau_0)$ ，则松弛系数 K_p 定义为：在应变保持不变的情况下， t 时刻的应力与加载时刻 τ_0 的应力之比，即

$$K_p(t, \tau) = \sigma(t, \tau) / \sigma(\tau_0) \quad (2-10)$$

在施工工况温度应力计算时，松弛系数的确定要参考《水工混凝土施工规范》(SL 677—2014)。

第 3 章 涵洞式渡槽位移计算结果与分析

为了考查涵洞式渡槽结构的沉降量、沉降量差和槽顶中部两侧墙的相对位移,在计算过程中先对 20 种单一荷载作用下的沉降量和槽顶中部两侧墙的相对位移进行了计算,目的是为了考查在影响结构变位的 20 种因素中,哪些属于“敏感”因素;然后给出了组合工况作用下的位移计算结果;同时考虑了混凝土徐变和应力松弛系数分别为 0.3 和 1.0 时的两种情况。

3.1 混凝土徐变和应力松弛系数为 0.3 的位移计算结果

考虑混凝土徐变和应力松弛系数为 0.3 的情况,表 3-1、表 3-4 和表 3-7 分别给出了三种典型断面结构在单一荷载作用下的沉降量和槽顶横向相对位移,表 3-2、表 3-5 和表 3-8 给出了三种典型断面结构在 9 种工况组合下的沉降量和横向相对位移,表 3-3、表 3-6 和表 3-9 分别给出了三种典型断面结构在 9 种工况下的沉降量差。

表 3-1 各种单荷载作用下典型断面 1 的沉降量和槽顶横向相对位移表 ($K_p=0.3$)

荷载	竖向位移 U_z (cm)	横向位移 U_x (cm)		横向相对位移 (cm)	备注
		控制点 1 (25 324)	控制点 2 (2549)		
		(→)	(←)	(1)-(2)	
1 自重	-4.089	0.936	-0.936(←)	1.872	合
2 槽内设计水压	-1.807	0.681	-0.681(←)	1.362	合
3 槽内满槽水压	-2.055	0.900	-0.900(←)	1.800	合
4 人群荷载	-0.024	0.011	-0.011(←)	0.022	合
5 涵洞设计扬压力	-0.001	-0.367(←)	0.367	-0.734	开
6 涵洞校核扬压力	-0.001	-0.428(←)	0.428	-0.856	开
7 涵洞设计水压	-0.529	0.126	-0.126(←)	0.252	合
8 涵洞校核水压	-0.664	0.158	-0.158(←)	0.316	合
9 风荷载(迎风面)	-0.013	0.068	0.016	0.052	合
10 风荷载(背风面)	-0.018	0.007	0.032	-0.025	开
11 施工检修	-0.030	0.007	-0.007(←)	0.014	合