摘要

岩体的应力场导致裂隙的几何特性发生变化,从而影响岩体的渗透性,引起渗 流场的改变。反过来,渗流场的存在将改变渗透体积力的分布,必将对应力场产生 影响。因此,对于水工结构,考虑岩体渗流场与应力场的耦合作用是十分必要的。 本文在总结国内外学者研究成果的基础上,结合拉西瓦工程,分析了坝基渗流应 力耦合特性,主要内容和研究成果归纳如下:

(1)从试验研究、理论模型研究和耦合模型计算方法研究等方面较为深入地 总结了岩体渗流应力耦合问题的研究进展。

(2)介绍了应力场与渗流场耦合分析的基本原理和方程。

(3) 编制了 Matlab 与 COMSOL Multiphysics 的链接程序,通过导入控制坐标,建立了拉西瓦拱坝和坝基的三维有限元数值模型。

(4)计算分析了不考虑耦合情况下拉西瓦工程在水库正常运行期的渗流场与 应力场;确定渗流应力耦合模型的相关参数和边界条件,计算分析了考虑耦合情 况下坝体和坝基在水库正常运行期的耦合渗流场和应力场,总结了其变化规律。 结果表明上游面渗透水由河道往两岸的逐渐减小,下游面渗透水头由河道往两岸 的逐渐增大,总体上由上游到下游呈减小趋势;坝体顺河向位移量值随高程增加, 同一高程从拱冠至左、右拱端逐渐减小,坝体左、右半拱顺河向位移具有良好的 对称性。

(5)分别对比分析了考虑耦合和不考虑耦合情况下渗流场和应力场的计算成 果,结果表明在考虑耦合情况下,渗流场等势线偏向下游,下游的渗透坡降明显 增大;各位移分量都有不同程度的增加;坝体上游岩体的拉应力增加,坝肩和坝 基下游岩体的压应力增加,对坝体的稳定不利。

关键词:拉西瓦拱坝;渗流;应力;耦合;COMSOL Multiphysics

Abstract

The change of the rock stress field will lead to the crack geometry characteristic changing, which affects the permeability and causes the seepage field change. In turn, will change the distribution of permeability volume force and influence the stress field. Therefore, It is imperative for Hydraulic Structure to be designed based on the coupling of seepage field and stress field. On the basis of research achievements of domestic and foreign scholars, this paper mainly combines with the Lashiwa engineering to analyze the coupling characteristics further. The main content and research is summarized as follows:

(1) Research progresses of the coupling of seepage field and stress field in rocks are comprehensively summarized from several aspects, such as the experimental research, the theoretical model research and the calculation method research of coupling model.

(2) The basic principles and equations to analysis coupled seepage and stress fields are obtained.

(3) Work out a program which connects the Matlab software with the COMSOL Multiphysics software, through importing coordinate control point, to establish the 3-D finite element numerical model of the Laxiwa arch dam and its foundation.

(4) Considering uncoupled cases, calculate and analyze the seepage field and stress field of the Laxiwa engineering in the reservoir normal operation periods to determine the related parameters and boundary conditions of the coupling model of seepage and stress. Then, analyze the seepage field and stress field in the reservoir normal operation periods under the coupled situations, with which the distributive regularity of seepage fields and stress fields are summarized. The results show that in upstream faces hydraulic pressure head reduces from the river to both sides gradually, but in downstream faces that the distribution is the contrary. In general, the hydraulic pressure head reduces from upstream to downstream. The displacement of dam along river direction increases with elevation and decreases gradually from the crown to arch abutment at the same elevation, and it has a good symmetry perpendicular to river direction.

(5) The calculation results of seepage field and stress field between uncoupled and coupled situations are compared and analyzed respectively. It shows that the isopotential lines of seepage field are to downstream, the seepage slope of downstream increases obviously, each displacement component increases at different rates, the tensile stress of the upstream rock increases and the compressive stress of the downstream rock also increases in the coupling cases, which is bad for the stability of the dam.

Keywords: Laxiwa arch dam; seepage; stress; coupling; COMSOL Multiphysics

目 录

第-	一章	绪论	1
1.	.1 问	习题的提出	1
	1.1.1	工程破坏实例	1
	1.1.2	2 讨论	2
1.	.2 国	国内外研究进展	4
	1.2.1	试验研究成果	4
	1.2.2	2 理论模型研究成果	8
	1.2.3	3 耦合模型计算方法研究	9
	1.2.4	4 工程应用前景展望	10
1.	.3 研	开究内容和方法	11
1.	.4 技	支术路线	
第二	二章	渗流应力耦合分析数学模型	13
2.	.1 基	基本假设	
2.	.2 渗	参流场与应力场耦合分析数学模型	
	2.2.1	应力场的基本方程	13
	2.2.2	2 渗流场的基本方程	16
	2.2.3	3 耦合场的基本方程	17
	2.3	COMSOL Multiphysics 软件	
	2.3.1	l COMSOL Multiphysics 软件简介	
	2.3.2	2 算例验证	
2.	.4 本	太章小结	
第三	三章	拉西瓦拱坝坝基渗流应力耦合分析	24
3.	.1 拉	立西瓦基本资料	
	3.1.1	工程概况	
	3.1.2	2 地形地貌	
	3.1.3	3 地层岩性	
	3.1.4	4 坝址区水文地质条件	
	3.1.5	5 岩体渗透性	
3.	.2 러	十算模型及计算参数	
	3.2.1	计算模型	

46
48
51

第一章 绪论

问题的提出 1.1

随着国民经济建设事业的快速发展,越来越多的水利水电工程、交通、能源、 工民建和防护工程等被建筑在岩石地区。天然岩体中存在大量的不连续的地质结 构面,如节理、断层、裂隙、岩层层面、片理面等,这些结构面不但大大改变了 岩体的力学性质,也严重影响了岩体的渗透特性^[1]。

国内外发生的岩土工程事故中,90%以上的岩体边坡破坏和地下水渗透力有 关,60%的矿井事故与地下水作用有关,30%~40%的水电工程大坝失事是由渗透 作用引起的^[2]。此外,隧道开挖、地下核废料存储、油气开发等都涉及到岩体应 力、工程干扰力和地下水渗透力的相互作用及其耦合问题。因此,对裂隙岩体的 渗流应力耦合分析事关工程建设的成败与安全,对整个工程的可行性、安全性和 经济性起到重要的制约作用,并在很大程度上影响着工程的投资及使用效益。目 前,我国坝工建设正在向高坝发展,对裂隙岩体的渗流应力耦合特性的研究极其 重要。

工程破坏实例 1.1.1

(1) 法国 Malpasset 拱坝溃坝

Malpasset 双曲薄拱坝位于法国南部 Rayran 河上, 坝高 66m, 于 1954 年末建 成并蓄水。12月2日,一场大雨加快了水位的上升速度,21点20分,大坝突然 溃决,当时库水位为100.12m。根据坝下游1.5km 对这一灾难少数幸存者描述,

他们首先感到一阵剧烈颤动,随之听到 类似动物吼叫的突发巨响,然后感到强 烈的空气波。最终他们看到巨大的水墙 顺河谷奔腾,洪水出峡谷后流速仍高达 20km/h 左右,同一时间电力供应中断。 次日清晨发现大坝已被冲走,仅右岸靠 基础部分有残留拱坝,一些坝块被冲到 下游 1.5km 处, 左岸坝基岩体被冲出深 槽(如图 1.1 所示)。下游 12km 处 Frejus 城镇部分被毁, 死亡 421 人, 财产损失 图 1.1 左岸坝肩, 坝基岩体被冲出深槽



达300亿法郎^[3]。

Malpasset 拱坝溃坝引起了工程界的广泛重视,因为事故发生在坝工建设方面,尤其是在拱坝建设方面为世界最先进的国家,并且是由最负盛名的设计大师 Andce Coyne 设计的;它是当时溃坝记录中最高的坝,而在此之前尚没有拱坝溃 坝的先例;溃坝几乎毁灭了 Frejus 市,使最富的地中海地区遭受了重大损失。

(2) 意大利 Vajont 拱坝近坝库岸岩体大滑坡

Vajont 双曲拱坝位于意大利 Piave 河支流 Vajont 河上,坝高 265m,水库设计 正常高水位为 722.5m,于 1959 年建成,是当时世界上最高的拱坝。1963 年 10 月 9 日夜,Vajont 水库水位达 700m 高程,大坝上游近坝库左岸约 2.5 亿 m³巨大 岩体突然发生高速滑坡,以 25m/s 的速度冲入水库,使 5500 万 m³的库水产生巨

大涌浪,约有 3000 万 m³ 的水翻越 坝顶泄入底宽仅 20m 的狭窄河谷。 翻坝的水流在右岸超出坝顶高程 达 250m,左岸达 150m。水流以巨 大的流速滚向下游,经 Vajont 河冲 入 Piave 河时,经接近直角的弯转 后席卷了 Longarone 小镇及几个附 近村庄,造成生命财产的巨大损 失,约有 2500 人死亡,大滑坡的 石渣掩埋了水库,使大坝和水库完 全报废,如图 1.2 所示。



图 1.2 Vajont 拱坝右岸滑坡

1.1.2 讨论

Malpasset 拱坝失事至今已 50 多年,对其失事的原因至今尚未取得完全一致的认识,比较权威的有以下两种认识: Bellier(1976)认为,Malpasset 大坝坝肩岩体的结构面走向与拱坝推力方向平行,在坝肩岩体中形成高的压应力区,引起坝肩岩体结构面闭合,岩体的渗透系数减小到约为初始值的 1/100 甚至更小,导致岩体渗流受阻,而产生了等于水库全水头的压力作用于该岩体之上,使坝肩岩块沿下游断层滑移而失稳;Wikkte 和 Leonards(1985)认为,拱坝弧部受拉力,使大坝坝踵附近岩体受拉,倾向下游的岩体结构面张开,裂缝使帷幕短路。库区蓄水后,库水沿张开裂缝渗透,由于下游断层封堵了渗透通道,致使张开裂缝中产生等于水库全水头的静水压力,使坝肩岩块失稳^[4]。尽管这两种分析出发点不同,但却得出同一结论,即岩体的渗透压力作用引起的岩体变形导致了大坝的破坏。

意大利瓦依昂大坝上游库区大滑坡,主要是由于库水位上升,引起岩体中地 下水位抬升,增加了岩体的浮托力而引起的一种渗透变形和破坏。由于该水库两 岸岩体渗透性良好,库水位上升迅速引起地下水位上升,滞后时间短。因而,当 库水位上升到 700m 时,在库岸边坡坡脚处产生极大的扬压力,正应力减小,抵 抗滑坡的摩擦阻力减小而引起滑坡。

这两次重大工程事故均发生在 20 世纪六七十年代,当时是水利水电工程建设 的高潮时期,但是工程经验相对不足,特别是对岩石的水力特性了解很少,对岩 体中的渗流问题还是完全照搬土体渗流学,即孔隙介质渗流学的方法及经验来解 决^[3]。然而岩体与作为孔隙介质的土体有很大差别:土体是相对较均一的多孔介 质,土颗粒及孔隙尺寸都很小,其样本体积与所研究渗流域相比甚小,因此可以 把土体抽象为连续渗流介质;而岩体则是裂隙一块体离散体介质,其中存在着各 种各样的裂隙结构面及断层,这些结构面不仅把完整的岩石分割开,而且它们既 是岩体中的软弱面,又是岩体中的主要透水通道,而岩块本身的透水性在工程上 往往可以忽略不计。

根据国内外大坝失事实例的报道,在比较多的情况下大坝破坏是由于岩土介 质中的渗流场和应力场的相互作用引起的;而通常在坝设计时没有考虑渗流与应 力的相互作用。由此可见,进行大坝工程设计时,必须动态地考虑大坝及其周围 岩土中渗流与应力的相互作用,而对渗流场与应力场进行耦合分析则是对其相互 作用进行定量研究的必由之路。



图 1.3 岩体渗流应力耦合作用示意图

目前,对大坝进行渗流场的分析与应力场的分析大多是分开各自进行的,即 在进行渗流场的分析时不考虑坝体以及坝基岩土体的应力-应变关系和应力状态 及其改变对渗流场的影响;在进行渗流场的计算时,根据渗流计算结果,赋予不 同区域岩土体不同容重来进行稳定及应力分析。尽管这种方法简单易行且已积累 了一定的工程实践经验,但是没有真实客观地反映渗流场与应力场之间的相互作 用、相互影响。事实上,渗流场与应力场是相互影响、不可分离的,如图1.3所示: 一方面,渗流场的改变会导致渗流体积力和渗透压力的改变,使作用在坝体上的 外荷载发生变化,从而引起坝体应力场的重新分布;另一方面,应力场的改变, 会引起坝体体积应变的改变,使坝体内各部分的孔隙率发生改变,渗透系数也随 之变化,从而改变坝体渗流场的分布;两者的这种相互作用结果,会使坝体达到 一种双场的耦合平衡状态,形成渗流场影响下的稳定应力场和应力场影响下的稳 定渗流场。研究岩体渗流应力耦合问题不仅有重要的理论意义,而且在工程中有 广泛的实际应用价值。

1.2 国内外研究进展

随着近年来技术水平和标准要求的不断提高该,国内外的学者在渗流、应力 及两者之间耦合关系做了大量的研究工作,主要包括试验研究、理论模型研究和 耦合模型计算方法研究三大类。

1.2.1 试验研究成果

1.2.1.1 单裂隙岩体试验研究

立方定律是描述平行板裂隙面水流运动规律的一个著名定律,它将裂隙抽象 为两片光滑、平直、无限长的平行板,粘性不可压缩流体在平板内做定常运动,

根据流体力学原理推导出平行板裂隙面水流公式: $q = \frac{ge^3}{12\nu}J$ (其中, q为单宽流

量; *e*为裂隙宽度; *g*为重力加速度; *v* 为水流运动粘滞系数; *J* 为水力梯度), 此式表明裂隙面的单宽流量与隙宽的 3 次方成正比。

Lomize、Louis 等进行了单裂隙的水流试验研究,证明了在层流时立方定理的有效性。Romm 通过对微裂隙和极微裂隙的研究,提出只要隙宽大于 0.2µm,立方定理总是成立的^[5]。

但在天然情况下的裂隙面大多是粗糙不平的,很难满足平行板裂隙的假定, 许多学者进行了仿天然裂隙的试验研究,对立方定理提出了各种各样的修正,具 体如表 1.1 所示:

学者	公式	符号含义	说明
Lomize	$q = \frac{ge^3}{12v}J\frac{1}{C}$	$C = 1 + 6(\frac{\Delta}{e})^{1.5}$	仿天然裂隙的试验得出,
Louis		$C = 1 + 8.8(\frac{\Delta}{2\overline{e}})^{1.5}$	其中: \overline{e} 为平均隙宽, $\frac{1}{C}$ 为立方定理的修正系数,
速宝玉		$C = 1 + 1.2\left(\frac{\Delta}{e}\right)^{-0.75}$	与裂隙面的粗糙度及隙 宽情况有关, Δ为裂隙粗
Amadei		$C = 1 + 0.6 \left(\frac{\sigma_e}{e}\right)^{1.2}$	糙度; σ_e 为隙宽均方差
Barton	$q = \frac{1}{JRC^{7.5}} \frac{ge_m^6}{12\nu} J$	 <i>e_h</i> 为等效水力隙宽; <i>e_m</i> 为力学隙宽 	通过大量试验,提出 JRC(节理粗糙度系数)修 正法
耿克勤	$Q = Ae_m^n$	对于小开度裂隙层流,1.7 ≤ <i>n</i> ≤3.0;对于中开度, 0.8≤ <i>n</i> ≤1.4;对于大开 度,0.3≤ <i>n</i> ≤0.48	人工、天然光滑和粗糙裂 隙的试验
Nolte	$Q = Q_0 + Ce_m^n$	n随隙宽的变化范围为 7.6~9.8	经验公式
Iwai	$\frac{Q}{Q_0} = \frac{1-\omega}{1+\eta\omega}$	Q为相应于接触面积率 ω 的流量, Q_0 为 $\omega = 0$ 时 的流量, η 为经验系数	Walsh 和周创兵分别通过 模拟热传导理论和数学 推导得出相似的结论。

表 1.1 各学者对立方定理提出的修正[6~11]

1.2.1.2 应力对裂隙渗流影响的试验研究

立方定律和修正的立方定律都没有考虑应力对裂隙渗流的影响,而建立渗流 与应力的关系是分析裂隙岩体渗流场与应力场耦合的基础和关键环节。因此,许 多学者在此方面做了很大的努力,具体见表 1.2 所示:

学者	公式	符号意义	说明	
	$K_{\rm f} = K_{\rm f0} + \frac{K_{\rm N}(2b)^2}{\sigma} (\sigma - \sigma_0)$	$K_{\rm f}$ 为水平裂隙的渗透系数; $K_{\rm f0}$		
Snow		为初始渗透系数; $K_{\rm N}$ 为裂隙的	多组平行裂隙	
(1968)	5	法向刚度; S 为裂隙的隙间距;	<i>添远示 </i>	
		σ_0 为初始应力		
			根据均质裂隙	
		k_{α} 为初始渗透系数; σ 为有效正	岩体不同深度	
		0	的钻孔压水试	
Louis	1 1 -00	应力 $\sigma = \gamma H - P$, γH 为研究点	验成果建立的	
(1974)	$k_f = k_0 e^{-\alpha t}$	上的上覆岩层的重量, P 为孔隙	岩体渗透系数	
		水压力; α 为经验系数, 取决于	k_f 与法向应力	
		岩石中的裂隙状态	σ 的经验关系	
			式	
Long	$K = K_0 (\lg \frac{p_k}{p})^3$	n 为右动应力, n 为 V 时命合	碳酸钙岩石裂	
(1075)		рундал; p_k / K_f пан	隙渗透系数的	
(1973)	P	有效应力	经验方程	
Kranz		<i>A</i> 为过水面积・ <i>P</i> 为总压力・ <i>P</i>	Barre 花岗岩的	
车	$K \cdot A = Q_0 (P_c - P)^{-n}$		裂隙渗透系数	
-1- -1-		为内部孔隙水压力; n 为常数	的经验公式	
Nelson	$k = A + Bn^{-n}$	P 为有效压力; A, B, n 均为常	砂岩裂隙渗透	
	$\mathbf{x}_{\mathrm{f}} = \mathbf{n} + \mathbf{p}_{\mathrm{f}}$	数	系数经验公式	
	$T_f = \beta \sigma^{-\alpha}$		由花岗岩、大理	
Galet		$T_f = \mathrm{gb}_{\mathrm{h}}^3 / 12 \mu$; α 、 β 为参数;	岩、玄武岩三种	
Gulet		σ 为法向应力	岩体裂隙的室	
			内试验得出	
	$Q = A \left[1 - B \left(\sigma_x + \sigma_y \right) \right]^4$		裂隙渗流与应	
张玉卓		σ_x 、 σ_y 为双向主应力; A, B	力耦合双向等	
等		均为常数	压和双向不等	
			压试验	

表 1.2 应力对裂隙渗流影响的研究成果[12~17]

水利水电工程专业毕业论	文
-------------	---

			通过大量天然		
			裂隙渗流实验,		
		k_f 为大然单裂隙渗透系数; σ_1 、	揭示了三维应		
		σ_2 、 σ_3 为三向主应力,其中 σ_2	力裂隙渗流规		
郑少河	$k_{f} = k_{0} [\sigma_{2} - \nu(\sigma_{1} + \sigma_{3}) - p]^{-a}$		律,提出了裂隙		
等		垂直裂隙面, σ_1 、 平行于 f 裂	闭合量与岩体		
		隙面; v 为泊松比; p 为裂隙水	三维应力, 岩体		
		压力; a为系数,取决于裂隙面	渗透系数与裂		
		的粗糙度	隙闭合量的关		
			系式		
		R_m 为岩体分类指数; Φ_f^0 为初始	单裂隙和两正		
	$k_{i} = k_{0} \left(1 + \frac{1 - R_{m}}{\Phi_{f}^{0}} \Delta \varepsilon_{i} \right)^{3}$ $(i = x, y, z)$		交裂隙受正应		
刘继山		扎隙度; $k_i, \Delta \varepsilon_i$ 分别为对应万问	力时的渗流公		
		的渗透系数及应变; k ₀ 为常数	式		
			当り一の时		
	$K = K_0 \sigma^{-D_{\rm f}}$	K 为应力等于 s 时的渗透系数;	$\exists D_{\rm f} = 0 \ddagger ;$		
		$K_{_0}$ 为应力等于 $\sigma_{_0}$ 时的渗透系	用 Louise 负指		
忤彦卿			数关系式;当		
(1995)			$1 \le D_{\rm f} \le 2$ 时,		
		$(0 < D_{\rm f} \le 2)$	说明岩体中裂		
			隙比较发育		
	$k_f = A \exp(-\alpha \sigma_3 - \beta T)$		通过单、正交裂		
		σ_3 为法向压应力; T 为温度; A,	隙花岗岩的试		
刘亚晨		0 4 4 万 4 一7 3 4 4 4	验,研究了高		
等		$ \alpha, \beta$ 均为系数,可进过试验获	温、高压下的裂		
		得	隙岩体渗透特		
			性		

以上试验均没有考虑剪应力的影响,裂隙岩体渗流与剪应力耦合作用所做的 研究较少。剪应力作用下裂隙面几何特征的变化比较复杂,而且试验难度也大。

Esaki T. 等采用一种新的实验技术对花岗岩人工的裂隙试样进行了渗流与剪 应力耦合研究。Chen Z 也同样得出渗透系数随剪切位移增加的曲线。刘才华等^[18] 通过对规则、均匀、粗糙裂隙的渗流剪切实验,研究了岩体裂隙在剪切荷载作用 下的渗流特性。刘才华等^[19]通过室内模拟实验,探讨了低应力、低水头条件下裂

隙岩体受剪应力作用的渗流特性,建立了剪应力作用下岩石裂隙的渗流模型。 Takahashi 在砂岩和花岗岩的剪切和渗流耦合分析方面进行了较深入的研究。耿克 勤^[20]对剪切变形与渗流耦合进行试验,结果显示在不同压应力作用下裂隙面由于 剪切变形会使渗流量发生先减少(相应于剪缩)、后来又增大(相应于剪胀)的变 化。裂隙面剪切变形对渗流系数的影响取决于裂隙面的几何形态、剪切位移和法 向应力的大小。

1.2.2 理论模型研究成果

从 20 世纪六七十年代开始,国内外很多学者对裂隙岩体的渗流模型作了许多 研究,建立了等效连续介质、裂隙网络介质、双重介质等模型。

1.2.2.1 等效连续介质模型

等效连续介质模型把孔隙—裂隙系统等效成连续介质,用连续介质理论描述 渗流方程。模型将裂隙水流等效平均到整个岩体,把裂隙岩体模拟为具有对称渗 透张量的各向异性连续体,利用经典的连续介质理论进行分析^[21]。其优点是可以

直接应用较成熟的孔隙介质饱和 渗流分析方法,可以沿用各向异性 连续介质理论来描述,可操作性 好、理论基础雄厚。不足之处主要 在于把裂隙网络等效为连续介质, 不能很好地刻画裂隙的特殊导水 作用,由于不是所有岩体均可等效 为连续介质;另外,典型单元体(定 义如图1.4所示)的大小和等效水力 参数也较难确定,模型的适用范围 经常受限制。



肖裕行^[22]等从力的运动效果和对应应力状态两方面探讨了渗透作用力,证明 了水力等效连续介质中渗透作用力运动效果等效的必然性和对应应力状态性质的 一致性,继而建立裂隙岩体水力等效连续介质是否存在的二维判别方法。Long, 仵彦卿(1996)^[23],王媛等^[24-25](1998,2000)均在这方面做了大量的研究。

1.2.2.2 裂隙网络介质模型

裂隙网络介质模型把裂隙介质视为由不同大小和方向的裂隙在空间交叉构成 的网络状系统,水只能在其中运动。该模型是在查清每条裂隙的空间方位、隙宽

— 8 —

等几何参数的前提下,以单个裂隙水流基本公式为前提,根据流入和流出各裂隙 交叉点的流量相等来求其水头值,进而将水压力作用在每条裂隙上进行受力分析。 它较好地描述了裂隙岩体的非均匀各向异性,故当岩体中岩块的渗透性和裂隙的 渗透性相比非常小时,可以认为水流只在裂隙网络中定向流动。该模型拟真性好、 精度高,但当裂隙较多时,其工作量相当大,特别是三维问题,甚至是不可能实 现。另外,由于裂隙分布具有随机性,要建立离散的真实裂隙系统也是十分困难。

Wilson 和 Witherspoon 分别以三角形单元或线单元模拟岩体中的裂隙,提出 模拟二维裂隙网络水流的两种有限元技术,并以算例表明裂隙交叉点的水流干扰 是可以忽略的,从而阐明了采用线单元的优越性和可行性^[26]。Long 在假定岩体中 裂隙发育呈圆盘状的基础上提出三维圆盘裂隙网络模型,并采用混合解析一数值 方法对此进行求解。Dershowitz 假定裂隙在岩体中互相切割成多边形,建立多边 形裂隙网络模型。国内毛昶熙^[27],王恩志^[28],仵彦卿^[29],高海鹰^[30]等对裂隙网络 介质模型的研究做了大量的贡献。

1.2.2.3 双重介质模型

双重介质模型把岩体看作由孔隙和裂隙组成的双重介质空隙结构,孔隙介质 和裂隙介质均布在渗流区域内,形成连续介质系统。在该系统内,孔隙介质储水, 裂隙介质导水,每一点处存在两种液体压力,研究两者之间的水交换过程及由此 带来的两种介质的变形,可细分为双孔隙度模型、双渗透性模型以及双孔隙度— 双渗透性模型。

双重介质模型在一定程度上刻画了优先流的现象,而且考虑了岩块与裂隙间 客观存在的能量交换,具有较好的拟真性;但数值分析工作量更大。王恩志^[31]等 把控制渗流总体分布且起主导渗透作用的大裂隙定义为裂隙岩体的主干裂隙网 络,将主干裂隙网络间的岩块定义为裂隙岩块,再建立各自的渗流方程,并通过 两类系统间的水量交换方程构建双重裂隙系统渗流模型。

1.2.3 耦合模型计算方法研究

国内外许多学者通过对渗流应力耦合分析的广泛研究,提出了不同的耦合计 算方法,主要包括迭代耦合法、直接耦合法、等效连续法和离散法。

1.2.3.1 迭代耦合法

迭代法通常包含两个或多个分析模块,不同的模块模拟不同物理环境中的变 量演化过程,各个模块的计算结果互为外加荷载或边界条件^[32]。这种方法通过两 场分开计算,然后进行两场间交叉迭代计算,最后达到求解的目的。陈平、张有天 ^[33]以裂隙渗流理论和变形本构关系为基础进行了渗流耦合分析,裂隙的渗透系数 采用经验公式。此法在计算方法上容易实现,可以利用已成熟的固体变形场和流体 渗流场的求解程序,但未能将渗流场和应力场作为同一场考虑,从方法上说不能称 为严格的耦合算法。

1.2.3.2 直接耦合法

直接耦合法,也称为多自由度法,是根据耦合模型涉及的所有物理变量,建 立与各变量相应的刚度矩阵、影响矩阵并形成总耦合矩阵,以及相应的耦合荷载 向量^[34]。直接法的物理意义更为清晰直观,计算过程中的参数易于控制和调整。 耦合模型的物理环境及相应的偏微分控制方程一般不少于两个,而且对于同一个 单元结果,不同的物理变量往往具有不同的属性和自由度数,由此给相关的数值计 算尤其是组刚过程中的编码带来一定的难度。此外在处理多相流和非线性介质时, 很难把握方程的收敛性。对于这种方法的研究和运用,王媛^[35]提出一种考虑岩体 渗透性随应力变化的、且适用于裂隙岩体渗流场和应力场耦合分析的四自由度全 耦合法,杨志锡^[36]等进行了各向异性饱和土体的渗流耦合分析和数值模拟。

1.2.3.3 等效连续法

Noorishad 等将土体固结分析方法用于建立岩体渗流与应力耦合关系,进而用 有限元方法研究了非连续介质中的固液两相介质的耦合问题。这一方法忽略了渗 透性随应力的变化,同时用节理单元处理如同断层一样的几个主要不连续面,确 实是一种有效手段,但是用节理单元解决所有不连续面是不切实际的。小的节理 不能单独在渗流中起重要作用,而它们连通后却也成为主要渗流路径,不考虑这 样一些裂隙将导致渗流分析中的错误的结果,因此目前这一方法在实际工程中还 难以应用。

1.2.3.4 离散法

采用离散单元法时,由热平衡方程、块体和不连续体的力学动力方程以及不 连续体的水力方程组成控制方程。离散法在进行裂隙岩体渗流应力耦合分析时, 大多采用将渗流场和应力场分开计算再交叉迭代求解来达到耦合分析的目的。其 求解较为繁琐,而且随着裂隙数量的增加,该方法甚至不可行。

1.2.4 工程应用前景展望

裂隙岩体渗流应力耦合研究在处理实际工程中,尤其是在大坝坝基稳定性方 面发挥了重要作用。它的应用前景相当广泛,主要体现在以下几个方面: (1)水利水电工程方面:南水北调、长江三峡等大型水利工程、拉西瓦拱坝 等地质条件复杂地区都必须考虑裂隙岩体渗流与应力的相互影响;

(2) 石油开采方面: 对裂缝性砂岩油藏的开采具有重要意义;

(3)边坡工程方面:对于高陡边坡,为了避免出现滑坡现象,必须考虑地表水入侵和岩体裂隙渗流作用下的边坡稳定性问题;

(4) 城市地下水的抽取方面:可以解决抽水量和地面沉降等相关环境问题;

(5) 隧道及地下工程方面:由于基岩中存在裂隙水,需要考虑地下水作用下 工程的稳定性问题,例如近年来西部大开发中一些铁路、公路受地下水影响非常明 显,隧道工程中的渗流应力耦合问题也越来越突出;

(6)采矿工程方面:工作面和巷道突水问题发生频繁且后果严重,随着采矿 工程向深部开展,需要考虑深部采动裂隙岩体的应力场、温度场、渗流场三场耦合 问题。

1.3 研究内容和方法

本文结合拉西瓦工程,在总结国内外学者研究成果的基础上,进一步分析了 渗流应力耦合特性。建立渗流场与应力场耦合的等效连续介质模型,进行计算分 析,同时与不耦合情况分别进行对比,总结得到了岩体中渗流场与应力场的相互 作用关系。具体研究内容和方法如下:

(1)从试验、理论模型和耦合模型计算方法三方面简要阐述国内外学者对渗 流、应力及两者之间的耦合关系的研究成果。

(2)介绍渗流场与应力场耦合分析的基本原理和方程。

(3) 编制 Matlab 与 COMSOL Multiphysics 的链接程序,通过导入控制坐标, 建立拉西瓦拱坝和坝基的三维有限元数值模型。

(4)利用多物理场全耦合分析软件 COMSOL Multiphysics 对拉西瓦拱坝在 不考虑渗流应力耦合的情况下的渗流场和应力场进行计算分析。

(5)确定渗流应力耦合模型的相关参数和边界条件,并对正常蓄水情况下坝体和坝基的耦合渗流场和应力场进行计算分析,研究耦合条件下渗流场和应力场的变化规律。

(6)比较考虑渗流应力耦合和不考虑渗流应力耦合的计算分析成果,得出渗 流场与应力场的相互作用关系。

1.4 技术路线



图 1.5 技术路线

第二章 渗流应力耦合分析数学模型

坝基岩体是被水饱和的。一方面,大坝基坑抽水、坝基开挖、水库蓄水等必 然在岩体中产生非稳定渗流场,该渗流场的作用将影响岩体的受力和变形;另一 方面,岩体应力场的变化将引起节理裂隙宽度的变化,从而引起岩体渗透系数的 变化,并影响渗流场。因此本章根据拉西瓦工程的实际情况和地质构造的特点, 介绍渗流场分析和渗流场与应力场耦合分析的数学模型。

2.1 基本假设

在进行渗流应力耦合分析时,需要对岩体作如下简化假设:

- (1) 岩体是分区均质的,各向同性的连续体;
- (2) 岩体是饱和的, 其中水的渗流运动符合达西定律;
- (3) 岩体骨架变形是微小的;
- (4) 岩体矿物不可压缩, 即岩体变形主要来源于隙变形;
- (5) 惯性力影响忽略不计。

2.2 渗流场与应力场耦合分析数学模型

2.2.1 应力场的基本方程

在岩体中截取一微分单元,其受力如图 2.1 所示。



图 2.1 微分单元体受力平衡

假如体积力仅考虑重力,并规定应力符号以拉应力为正,则由微元体的平衡 可得平衡方程如下:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0$$
 (2-1a)

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0$$
 (2-1b)

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} - \gamma_r = 0$$
 (2-1c)

式中: σ_{ij} 为总应力的张量, $i \in j$ 表示 $x \in y \in z$;

 γ_r 为岩体的饱和容重。

根据太沙基 (Terzaghi) 有效应力原理,有
$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} + \{p\}$$
 (2-2)

式中: {
$$\sigma$$
}为总应力, { σ }=[$\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}$]^T;
{ σ' }为有效应力, { σ' }=[$\sigma'_x \ \sigma'_y \ \sigma'_z \ \tau'_{xy} \ \tau'_{yz} \ \tau'_{zx}$]^T;
{ p }为空隙水压力, { p }=[$p \ p \ p \ 0 \ 0 \ 0$]^T。
岩体的压力~应变关系表示为
{ σ' }=[D]{{ ε }-{ ε_0 }} (2-3)
式中: { ε }为应变, { ε }=[$\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}$]^T;

 β 为考虑非线性时岩体的初应变;

[D]为弹性矩阵或弹塑性矩阵。

由几何方程,应变与位移的关系为

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\} \tag{2-4}$$

式中: $\{u\}$ 为位移, $\{u\}=\begin{bmatrix}u_x & u_y & u_z\end{bmatrix}^T$;

[B]为几何矩阵,且

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}^{T}$$
(2-5)

为便于推导,下面暂取弹性本够关系。将式(2-2)、(2-3)、(2-4)代入式(2-1), 便可得以位移分量和空隙水应力表示的平衡微分方程,即

$$G\nabla^2 u_x + \frac{G}{1-2\upsilon}\frac{\partial\varepsilon_v}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + X^0 = 0$$
 (2-6a)

$$G\nabla^2 u_y + \frac{G}{1 - 2\upsilon} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} + Y^0 = 0$$
 (2-6b)

$$G\nabla^2 u_z + \frac{G}{1 - 2\upsilon} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} + Z^0 = \gamma_r$$
(2-6c)

式中: G为剪切模量, $G = \frac{E}{2(1+\mu)};$

$$abla^2$$
为拉普拉斯算子, $abla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2};$

$$\varepsilon_v$$
为体积应变, $\varepsilon_v = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z};$

 X^0, Y^0, Z^0 为由初应变 $\{\varepsilon_0\}$ 引起的等价体积应力。

一般情况下,用总水头(即水力势)表示空隙水应力比用空隙水应力表示更 具普遍意义,因此,将式(2-6)中的孔隙水应力改用总水头表示。总水头*h*与空 隙水应力*p*之间的关系为

$$-p = \gamma_w(h-z) \tag{2-7}$$

式中: γ_w为水的容重;

z为位置高程。

总水头h用 $\gamma_{w}h$ 表示,并仍记为h,则

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{\partial h}{\partial y}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\partial h}{\partial z} + \gamma_w$$
(2-8)

将式 (2-8) 代入式 (2-6),便可得用位移分量和总水头表示的平衡方程,即 $G\nabla^2 u_x + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon_{\nu}}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} + X^0 = 0$ (2-9a)

$$G\nabla^2 u_y + \frac{G}{1 - 2\upsilon} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial y} - \frac{\partial h}{\partial y} + Y^0 = 0$$
 (2-9b)

$$G\nabla^2 u_z + \frac{G}{1-2\upsilon} \frac{\partial \varepsilon_{\nu}}{\partial z} - \frac{\partial h}{\partial z} + Z^0 = \gamma_r - \gamma_w \qquad (2-9c)$$

2.2.2 渗流场的基本方程

根据质量守衡定律,水在饱和微元体中的增减速率等于水进出该微元体流量 速率之差,如图 2.2 所示,即

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho_{w}v_{x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_{w}v_{y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{w}v_{z})\right]dxdydz = \frac{\partial}{\partial t}(n\rho_{w}V) \qquad (2-10)$$

式中: ρ_w 为水的密度;

 v_x 、 v_y 、 v_z 为渗流速度;

n为岩体的孔隙率;

V为微元体的体积, V = dxdydz。

考虑水的压缩性。设水的压缩系数为β,它是水的弹性模量*E*_w的倒数,则式 (2-10) 右端可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} (n\rho_w V) = \left(\rho_w \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} + \rho_w n\beta \frac{\partial h}{\partial t} \right) dx dy dz$$
(2-11)

由假设(2),水的的渗流运动服从达西(Darcy)定律,即

$$\vec{v} = -[k] \cdot grad(h/\gamma_w) \tag{2-12}$$

式中: [k]为渗透张量,其主值为 k_x , k_y , k_z 。

— 16 —



图 2.2 微分单元体流量平衡

将式(2-11)和(2-12)代入(2-10),即可得流体的连续性方程。为简便计, 渗透主向量坐标系表示,仍记为*x*,*y*,*z*,则得

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{x}\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{y}\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{z}\frac{\partial h}{\partial z}\right) = \gamma_{w}\frac{\partial\varepsilon_{v}}{\partial t} + \gamma_{w}n\beta\frac{\partial h}{\partial t}$$
(2-13)

其中, 总水头h的因次是帕(Pa), 即与应力的因次相同。

2.2.3 耦合场的基本方程

岩体内的应力状态 σ_{ij} 决定了岩体的渗透张量 k_{ij} ,即 $k_{ij} = f(\sigma_{ij})$;反过来,渗透张量 k_{ij} 又通过渗透动水压力 F_d 影响着岩体的应力状态,也即 $\sigma_{ij} = g(k_{ij})$ 。因此,岩体应力场与渗流场是相互影响的,或两者是耦合的,需要反复迭代才能使耦合应力场达到稳定。

式(2-9)和式(2-13)联立,即组成应力场和渗流场耦合分析的基本方程,即著名的比奥方程。其边界条件包括:

(1) 位移边界条件

$$\{u\} = \{u_0\} \tag{2-14a}$$

(2) 应力边界条件

$$\sigma_{kl}m_l = \sigma_{k0}$$
 $k, l = 1, 2, 3$ (2-14b)

(3) 水头势边界条件

— 17 —

$$h = h_0 \tag{2-14c}$$

(4) 流量边界条件

$$-\frac{1}{\gamma_w}k_n\frac{\partial h}{\partial n} = q_0 \tag{2-14d}$$

式中: m,为边界外法线的方向余弦。

在适当的边界条件下求解方程,便可得到渗流场和应力场。

关于渗透系数的变化,一般假设为应力状态的指数函数。假设渗流主向与应 力主向重合,则主渗透系数取以下形式

$$[k] = k_0 \begin{bmatrix} \exp(\lambda \sigma'_1) & 0 & 0 \\ 0 & \exp(\lambda \sigma'_2) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(\lambda \sigma'_3) \end{bmatrix}$$
(2-15)

式中: k₀为岩体表面渗透系数;

λ为影响系数,由实验确定;

 σ'_i 为有效主应力, i=1,2,3。

设主应力与整体坐标之间的转换矩阵为[T],则在整体坐标下的渗透张量为

$$[k] = [T]^{T} [k'] [T]$$
(2-16)

对于渗流对介质应力的影响,考虑渗流体积力F作用于介质上,即

$$F = -\operatorname{grad}(-p) \tag{2-17}$$

由式(2-7),并注意到总水头h的因次,可得

$$F = -\operatorname{grad}(h) + \gamma_{w}\operatorname{grad}(z) \tag{2-18}$$

其中, $F_s = \gamma_w \operatorname{grad}(z)$ 是静水压力,其作用效果可用有效应力考虑,而 $F_d = -\operatorname{grad}(h)$ 是动水压力,计算时作为外荷载考虑。

2.3 COMSOL Multiphysics 软件

2.3.1 COMSOL Multiphysics 软件简介

COMSOL Multiphysics 是一款基于有限元计算方法的大型的高级数值仿真软件,由瑞典的 COMSOL 公司开发,被当今世界科学家称为"最专业的多物理场

-18 -

全耦合分析软件"^[37]。COMSOL Multiphysics 专注于解决多物理场耦合问题,以高度的开放性、杰出的易用性和优秀的计算性能实现了任意多物理场高精确的数值仿真,广泛应用于各个领域的科学研究以及工程计算,适用于模拟科学和工程领域的各种物理过程,被公认为数值仿真领域的引领者。

COMSOL Multiphysics 是以 有限元法为基础,通过求解偏微 分方程(单场)或偏微分方程组 (多场)来实现真实物理现象的 仿真。它用数学方法求解真实世 界的物理现象,目前已经在声学、 生物科学、化学反应、弥散、电 磁学、流体动力学、燃料电池、 地球科学、热传导、微系统、微 波工程、光学、光子学、多孔介 质、量子力学、射频、半导体、 结构力学、传动现象、波的传播 等领域得到了广泛的应用^[38](如 图 2.4)。



图 2.4 COMSOL 的应用领域

COMSOL Multiphysics 集前处理器、求解器和后处理器于一体,在同一个图 形化操作界面中可以完成几何建模、网格剖分、方程和边界参数设定、求解以及 后处理。

绘制几何模型的方法有多种^[39],主要包括:

(1)直接绘制几何对象,COMSOL Multiphysics 提供丰富的工具,供用户在 图形化界面中构建自己的几何模型,例如 1D 中通过点、线,2D 中可以通过点、 线、矩形、圆/椭圆、贝塞尔曲线等,3D 中通过球/椭球、立方体、台、点、线等 构建几何结构,另外,通过镜像、复制、移动、比例缩放等工具对几何对象进行 高级操作,还可以通过布尔运算方式进行几何结构之间的切割、粘合等操作(工 具快捷方式如图 2.5 所示)。

(2) CAD 导入: COMSOL 支持多种主流 CAD 软件的数据格式,并且提供 与 SolidWorks 和 Inventor 的双向接口,用户可直接导入事先设计好的几何模型。 COMSOL 还进一步提供了对 CAD 几何模型的修改功能,用户可在导入之后根据 需要进行修改。 (3)从网格文件直接生成几何结构: COMSOL 支持 NASTRAN 格式的网格 文件,可直接导入此网格文件并进一步生成几何结构。对于采用移动网格技术计 算的结果,可以从变形后的网格生成新的几何对象。

(4)利用脚本编程建模: COMSOL 与 MATLAB 完全兼容,可以在脚本环境中构建几何对象,然后直接从脚本环境导入几何体,实现利用脚本建模。



图 2.5 工具快捷方式 左: 3D 右: 2D

COMSOL Multiphysics 和其它软件相比,有以下显著特点:

(1)求解多场问题=求解方程组,用户只需选择或者自定义不同专业的偏微 分方程进行任意组合便可轻松实现多物理场的直接耦合分析。

(2)完全开放的架构,用户可在图形界面中轻松自由定义所需的专业偏微分 方程。

(3)任意独立函数控制的求解参数,材料属性、边界条件、载荷均支持参数 控制。

(4)专业的计算模型库,内置各种常用的物理模型,用户可轻松选择并进行 必要的修改。

(5)内嵌丰富的 CAD 建模工具,用户可直接在软件中进行二维和三维建模。

(6) 全面的第三方 CAD 导入功能,支持当前主流 CAD 软件格式文件的导入。

(7)强大的网格剖分能力,支持多种网格剖份,支持移动网格功能。

(8) 大规模计算能力,具备 Linux、Unix 和 Windows 系统下 64 位处理能力 和并行计算功能。

(10)丰富的后处理功能,可根据用户的需要进行各种数据、曲线、图片及 动画的输出与分析。

(11)专业的在线帮助文档,用户可通过软件自带的操作手册轻松掌握软件的操作与应用。

(12)多国语言操作界面,易学易用,方便快捷的载荷条件,边界条件、求 解参数设置界面。

本文中, 拱冠梁剖面是通过 AUTO CAD 导入的, 拱坝是直接在 COMSOL Multiphysics 中通过拉伸、旋转等功能绘制的, 山坡和坝基模型是通过在 Matlab 中用 meshgrid 脚本函数建模, 然后导入的方法建立的, 其中数据点坐标在 AUTO CAD 图中确定。

本文利用 COMSOL 软件中的地球科学模块和结构力学模块解决渗流应力耦 合问题。

地球科学模块不但适合用来研究诸如多孔介质中油和气体的流动、地下水流 动模拟以及土壤中的污染扩散问题,而且对于模拟地球物理和环境科学的多物理 场问题具有强大功能。现成的接口使得模拟跟地下流动相关的单一或耦合过程变 得十分容易。模块中设置的专门的界面,以实现 Richards 方程、N-S 方程、达西 定律及布林克曼方程延伸的简单应用。同时,此模块还可以用于模拟多空介质中 的传递、溶质反应、热传导等问题。

结构力学模块提供了各种计算力学应用模式以及大量的耦合应用模式,主要 用来计算结构的受力及变形情况。例如,计算部件或子系统在载荷下的变形情况, 对壳结构和桁架结构的分析功能等。另外,它还提供了粘弹性材料模型和超弹性 材料模型的接口,能轻而易举地模拟非线性弹性问题^[40]。并且针对具体对象,结 构力学模块可以和 COMSOL Multiphysics 模块或者其他分析模块任意组合,来分 析实际问题中的多物理场现象。

2.3.2 算例验证

为证明 COMSOL Multiphysics 软件的有效性,本文结合最基本的均质土坝算例,分别用 COMSOL Multiphysics 和 GMS 中的 Seep 2D 软件包对坝体进行渗流场的计算分析,验证 COMSOL Multiphysics 软件在计算坝体渗流场中的可行性及正确性。

均质土坝的几何模型如图 2.6 所示,上游水位为 0.7m,下游水位为 0.1m,坝体渗透系数为 1×10⁻⁵m/s。用 COMSOL Multiphysics 软件计算得到通过坝体的单宽

流量 q=3.31×10⁶m/s²,用 GMS 软件计算得到 q=3.29×10⁻⁶m/s²,两者相差约 0.6%,可能与模型的剖分精度有关。由 COMSOL Multiphysics 和 GMS 计算得到的坝体 水头分布如图 2.7 所示,压力分布如图 2.8 所示,由图可以看出,两种软件的计算 结果相差亦不大。由此得出结论,COMSOL Multiphysics 软件在渗流场的计算中 是可行的、正确的。



(b)COMSOL 计算成果图 2.7 水头分布图(单位: m)



(b)COMSOL 计算成果图 2.8 压力分布图(单位: 10⁴Pa)

2.4 本章小结

本章在对岩体进行简化假设的基础上,介绍了应力场与渗流场耦合分析的基本原理和方程。然后对本文所应用的软件 COMSOL Multiphysics 做了简单介绍,并结合最基本的均质土坝算例,验证了其可行性与正确性。

第三章 拉西瓦拱坝坝基渗流应力耦合分析

3.1 拉西瓦基本资料

3.1.1 工程概况



图 3.1 枢纽布置平面图

拉西瓦水电站是黄河上游龙青段的第二个梯级电站,位于青海省贵德县与贵南县交界的龙羊峡谷出口段,上距已建龙羊峡水电站 32.8km,下距已建李家峡水电站 73km,距西宁市公路里程 134km,距下游贵德县城 25km。地理位置适中, 交通便利。

拉西瓦水电站设计正常蓄水位 2452.00m, 总库容 10.56×108m3,总装机容量 4200MW, 保证出力 958.8MW, 多年平均年发电量 102.33×108kW・h, 为黄河 上规模最大的水电站。坝址区为花岗岩组成的"V"型河谷, 枢纽建筑物推荐双 曲拱坝、坝身泄洪、全地下厂房方案,设计最大坝高 250m, 主厂房洞室长 342 m, 宽 31.5 m, 高 74.16m, 安装 6 台单机为 700MW 的机组。主体工程所需混凝土为 414×104m3。

电站坝址区范围上自扎卡沟上游 200m,下至巧干沟,河段总长 1.2km,包括 了全部枢纽建筑物和部分施工临时建筑物。枢纽平面布置见图 3-1。

3.1.2 地形地貌

电站坝址区位于龙羊峡谷出口段。河流自 NE45°方向流入,至坝址处呈近 EW 向,经下游 2.5km 曲折河段后出峡谷进入贵德盆地。

坝址区为高山峡谷地貌,河谷狭窄、岸坡陡峻。上游稍开阔,坝基部位为峡谷收缩段,横剖面呈"V"字型。谷底至岸顶相对高差达 680m~700m。坝址河道顺直,平水期河水位 2234m 时,水面宽 45m~55m,水深 7m~10m,水流湍急、主流线偏左岸。2400m 高程处谷宽 245m~255m,正常蓄水位 2452m 处谷宽 350m~365m,坝顶高程 2460m 处谷宽 365m~385m。

河谷两岸基本对称,2400m 高程以下谷坡陡立,平均坡度 60°~65°,2400m 以上岸坡略缓,平均坡度 40°~45°。左岸岸坡从谷底至岸顶呈陡缓相间的台阶 状,陡壁处坡度 70°~85°,高度 50m~80m;缓坡段 45°~55°。右岸坡度比 较均匀。河道坡降约 0.9%~1%,覆盖层下基岩面无大起伏,向下游有 5m~10m 的浅坑。河床内覆盖层厚度一般 5m~12m,最大 15m。坝基部位平均厚 8m,最 大 13m;冲坑部位平均 12m,最大 15m 左右。

坝址区无大的深切冲沟,发育的中小型冲沟有石门沟、扎卡沟、青草沟、巧 干沟及 F3 沟。冲沟多沿断层发育,沟底宽一般 5m~15m,最宽约 20m。切割深 度一般 30m~60m,最大 100m。冲沟大都垂直河流延伸不长,平常无水,植被稀 少。

峡谷内阶地不发育,仅在岸坡 2280m、2360m、2400m 高程处见有残留的冲积砂卵砾石零星分布。

3.1.3 地层岩性

坝址区出露地层主要为三迭系下统龙羊峡群下亚群浅变质岩系(T1ln1)中生 代印支期花岗岩(Y5)及第四系全新统(Q4)崩坡积、滑坡堆积及冲洪积层。

(1) 龙羊峡群下亚群:主要为变质长英砂岩夹板岩及少量灰岩,分布在 1# 吊桥下游至泥鳅山一带,出露厚 900m~1000m。

(2)印支期花岗岩(x5):分布在 1#吊桥以上至差其卡沟地段,顺河出露 长 2.1km,呈岩基状产出。花岗岩呈灰~灰白色,中粗粒结构,块状构造。矿物 成份为:石英(25%~30%)、斜长石(25%~30%)、微斜~微条纹长石(20%~ 25%)、黑云母(5%±)、角闪石(0~5%)。岩体中偶夹石英二长岩细晶岩脉。岩 块致密坚硬、抗风化强。侵入体与围岩(T1)呈波状侵入接触,结合紧密。接触 带见有少量黑云母石英角岩、石榴子石大理岩和花岗斑岩等,蚀变轻微。 (3)第四系全新统(Q4):崩坡积及洪积物为块石、碎石夹壤土类,一般厚 5m~10m,最厚达47m,零星分布在峡谷岸坡及冲沟内。滑坡堆积主要为左岸扎 卡滑坡残体。河床冲积层主要为漂砾、卵石类,最大厚度15m,一般5m~12m, 且向下游逐渐增厚。

3.1.4 坝址区水文地质条件

坝址区地下水类型主要有裂隙潜水和脉状承压水。

(1)花岗岩裂隙潜水:主要接受大气降水的补给,排泄于黄河。地下水埋藏 较深,左岸自河边陡壁到坝顶高程处埋深 115m~175m,右岸相应部位为 40m~ 187m,坝址区实测最大埋深 235m。两岸水力坡降在上述区间内坡度 25°~30°, 向岸里变缓,坡度 5°~10°。地下水位在 7 月份~10 月份较高,略滞后于降雨 季节。水位年变化幅度一般 1m~5m,左岸变化较大,在 11#、29#孔观测值可达 20m。

(2)砂板岩裂隙潜水:补、排条件与花岗岩裂隙潜水相同,地下水埋藏也较深,左岸104m~112m,右岸100m~162m。

(3) 脉状承压水:分布在坝址下游三角体坝址河床一带,多赋存于砂板岩层间和断层破碎带中。钻探共发现6处,埋深一般在120m~170m之间,水头高度可达100m~248m, 涌水量0.9L/min~2.94L/min,最大24L/min。

因本区气候干燥、降雨量小,无充足的补给来源,故裂隙潜水或脉状承压水 涌水量均较小。钻探资料表明坝址区岩体的透水性,有以下几个特征:

(1)花岗岩体和砂板岩体的透水性均以极微透水为主,分别占总试段的71% 和72%。其中坝基(肩)部位极微透水段占该部位花岗岩体中总试段的85%,表 明坝址岩体透水性微弱。

(2)严重透水段(ω>0.1L/min.m.m)所占比例很小,花岗岩体中10%,变 质岩6%,坝基(肩)部位也仅占6%。严重透水段多分布在地表强~弱风化岩体 或卸荷带中,孔深0m~50m范围内。

(3)河床和两岸岩体的透水性差别不大,随深度增加透水性减小。坝址花岗 岩体相对隔水层(ω<0.1L/min.m.m)顶板埋深:河床 44m~66m,左岸 50m~90m,右岸 60m~100m。

(4)岩体深处的局部微透水试段,均与构造破碎带相关,透水性亦随深度增 大而减小。据钻孔压水试验成果,花岗岩体破碎带极微透水段可占破碎带总试段的50%。

3.1.5 岩体渗透性

在对地质勘察资料整理分析并进行模型概化对比分析的基础上,得到如下综 合结论:

(1)水库区不存在永久渗漏问题;淹没浸没损失甚微,基本上不影响库区两岸已探明的三个小型铜矿点;固体径流量小。库岸稳定问题经进一步调查认为, 大部分库段斜坡是稳定的,仅局部斜坡(赛卡、塔买、斜拉等)稳定条件较差, 但不会产生深层整体失稳现象。水库蓄水后可能产生浅层小规模坍滑,对工程无 大的危害。

(2)坝址河谷狭窄,两岸陡峭,河水面宽 50m~60m,覆盖层厚平均 8m~ 10m。花岗岩坚硬完整,平均湿抗压强度 110MPa,完整岩体纵波速 4000m/s 以上, 变形模量(II类岩)15GPa 以上。断裂构造的规模不大,主要是一组 NWW 向的 缓倾角结构面。河谷底及坡脚部位是应力集中区,实测最大主应力为 σ 1=54.6MPa,右岸地下厂房地段 σ 1=20.5MPa~29.7MPa,主应力方向 SN 向。

两岸卸荷带一般深 10m~20m, 弱风化带深 20m~30m。岩体透水性微~极 微, 水文地质条件简单。斜坡除左岸存在 II #变形岩体外, 右岸无大的不稳定滑移体, 由于两岸陡坡高达 500m~700m, 危石及局部松动体需清除。总体看, 本坝 址为一优良的高拱坝坝址。

3.2 计算模型及计算参数

3.2.1 计算模型

为了使计算模型从规模、结构和内涵上,能够符合实际情况,满足设计提出 的各种计算要求,在对计算模型涉及到的水文地质和工程地质等基础资料进行深 入而细致的分析、理解、消化和总结的基础上,建立三维有限元整体模型(如图 3.2 所示)。该模型考虑了坝体的形状、材料的分区以及多种荷载的施加区域等, 同时,拱坝与基岩近似假定为各同向同性、均质、连续的线弹性体。

(1) 模型范围

X 方向,以大地坐标 3992600.00 为起点,自右岸指向左岸截取约 1500m; Y 方向,以大地坐标 34425800.00 为起点,自下游指向上游取约 1000m; Z 方向,以高程为坐标,底高程截至 1950.00m,顶高程截至 2460.00m,低于 2460.00m 的地形按实际高程考虑。该范围在上游方向截取约 2H,下游方向截取约 2H,坝基截取约 1H (H 为坝高)。



图 3.2 三维有限元整体模型

(2) 岩体分区

根据地质勘测资料和已有研究成果,将坝址区岩体按浅部(L<80m)和深部(L>80m)分区。

(3) 利用控制坐标值建模

本文通过编制 Matlab 与 COMSOL Multiphysics 的链接程序,利用岩层的控制 坐标点数据建立了不同岩层的几何模型,然后通过布尔运算建立出拉西瓦拱坝和 坝基的三维有限元整体模型。主要程序如下:

load(['D:\data.txt']);

n1=floor(max(data(:,1))+abs(min(data(:,1))));

n2=floor(max(data(:,2))+abs(min(data(:,2))));

n3=max(data(:,3));

space=20;

[x,y]=meshgrid(min(data(:,1)):space:max(data(:,1)),min(data(:,2)):space:max(data
(:,2)));

•••••

```
f=geomsurf(x,y,z);
```

%Create a solid block whose top surface lies above the generated surface.

b=block3(1000,1600,2460);

%Coerce the face and the solid block to a composite solid object.

```
g=geomcoerce('solid', {f,b});
```

%Split the object into its subdomains.

ss=split(g);

%Visualize the solid object with the interpolated surface as top surface.

figure

geomplot(ss{1})

%Use use the Headlight or Scene Light toolbar buttons to turn on lighting in COMSOL Script.

 $s1=ss{1};$

 $s2=ss{2};$

其中 meshgrid 脚本函数用来生成关于 x,y 坐标的阵列,z 表示海拔高度,通 过 geomsurf 生成起伏的岩层表面,将该表面与方块强制复合成一个对象,然后 分割开,最后可以得到五个几何实体对象 b、f、g、s1 和 s2,其中 s1 就是需要的 实体对象。

(4) 模型边界条件

计算模型中水头边界类型主要有已知水头边界、出渗边界、不透水边界三种:

①已知水头边界包括坝区上下游水位淹没线以下的给定水头边界,以及给定 地下水位的截取边界;

②出渗边界为坝区下游侧左、右岸山坡的迎水面;

③不透水边界包括模型底面以及模型上下游截取边界。

位移边界条件为:底面为全约束,其他面仅约束侧向位移。

应力边界条件为:荷载考虑自重和渗流作用力。渗流作用力包括渗透静水压力(扬压力)和渗透动水压力两个部分,可以通过渗流场计算出的渗透压力转化为 渗透体力,再施加到对应节点和单元上。

(5) 模型说明

①不耦合情况是指渗流场与应力场的叠加运算;耦合情况是指考虑应力对渗透系数的影响和渗透动水压力的影响。

②应力结果以拉为正,压为负;位移结果以与坐标一致方向为正。

3.2.2 计算参数

计算模型中涉及的计算参数,均参考"基础资料"选定。

(1) 裂隙岩体渗透参数,见表 3.1。

表 3.1 岩体渗透系数

分区	渗透系数 k(m/s)
浅部(L<80m)	2.3×10 ⁻⁷
深部(L>80m)	2.5×10 ⁻⁹

(2) 拱坝坝体按不透水介质处理,即建基面为不透水边界。

(3) 岩体力学参数, 见表 3.2。

表 3.2 岩体力学参数表

分区	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比
弱风化	2680	30	0.22
新鲜	2700	50	0.20
坝体	2400	20	0.167

(4)由于缺乏岩体渗透性随应力变化的试验资料,不能进行严格分析应力场 对渗流场的影响,这里只能假定一个经验的指数关系k = k₀e^{λσ}进行定性分析,渗 透系数随应力的变化关系如图 3.3 所示。



图 3.3 渗透系数随应力变化曲线图

3.3 计算模型有限元网格

利用有限元方法进行数值模拟计算,首先需要根据计算对象和计算内容,进行有限元网格剖分,生成计算信息(结点信息、单元信息、边界信息等),又称有限元计算前处理。这项工作的难度和强度,会随着计算对象规模尺寸的增大,以及结构形状复杂性和不均匀性的增强,而急剧提高。Comsol Multiphysics 具有强

大的网格剖分能力,支持多种网格剖分方法,主要包括自由网格生成器(最通用的网格生成器,对几何形状无限制)、映射网格生成器、扫描网格生成器、边界层网格生成器和网格拆分工具等,此外,还可进行交互式网格剖分。经剖分得到6733 个节点,31832个单元。

3.4 计算工况

本文仅对水库正常运行期考虑耦合与不考虑耦合两种情况进行计算分析,上 游水位取正常蓄水位 2452.0 m,下游水垫塘水位 2243.50m。

3.5 计算成果及成果分析

3.5.1 渗流场计算成果及成果分析

图 3.4 (a) 和 (b) 分别为不考虑耦合和考虑耦合两种情况下三维有限元整体 模型的渗流场水头分布图,由图可知:耦合和非耦合渗流场均符合渗流规律:最 大水头均为 242m,集中在大坝上游河道处,与计算工况对应的正常蓄水位相吻 合;最小水头均为 33.5m,集中在下游河道处,与下游尾水位相吻合;在上游面, 由河道往两岸的水头逐渐减小,在下游面,由河道往两岸的水头逐渐减小增大, 总体上由上游到下游的水头呈减小趋势。耦合和非耦合渗流场等势线分布有较显 著的差别,耦合分析计算得出的渗流场等势线偏向下游。为详细研究坝体、坝基 上水头分布规律,方便对耦合和不耦合两种情况下的渗流情况进行对比分析,本 文沿顺河向、横河向和铅直向分别截取一些典型截面,绘制其在耦合和不耦合情 况下的水头分布图,如图 3.5~3.12 所示。

图 3.5 (a) 和 (b) 分别为不考虑耦合和考虑耦合两种情况下 x=350m 剖面处的水头分布情况,该剖面位于坝体上游,因此两种情况下的水头最大值相同,均为 242m,而最小值相差较大。在不考虑耦合的情况下,最小水头仅为 160m,考虑耦合使得最小水头变为 185m,增加了 15.6%左右;另外,由河道向模型边界方向水头的变化程度并不是恒定不变的,在距河道较近的岩层内水头变化较大,而离河道较远的地方基本不变,经计算得:在弱风化岩层内的水头变化量可达该剖面总变化量的一半左右;从总体上来说,该剖面上的水头梯度在耦合情况较不耦合情况小。

图 3.6 (a) 和 (b) 分别为不考虑耦合和考虑耦合两种情况下 x=450m 剖面处 的水头分布情况,该剖面正好与坝体相交,坝体(图中两凸起部分)两侧为上游 区,而坝体之间为下游区,因此该剖面上的最大、最小水头分别与上游的正常蓄

水位和下游尾水位相对应;在不耦合情况下,该剖面上的水头大部分处于150m 左右,而考虑耦合后,该值增长至175m左右,增大了16.7%。

图 3.7 (a) 和 (b) 分别为不考虑耦合和考虑耦合两种情况下 x=850m 剖面处 的水头分布情况,该剖面位于坝体下游,因此两种情况下的水头最小值相同,均 为 33.5m,而最大值相差较大,在不考虑耦合的情况下最小水头仅为 122.5m,而 考虑耦合使得最小水头变为 152.5m,增加了 24.5%;两种情况的变化趋势相同,但是变化量不同,在不考虑耦合的情况,水头由最大值 122.5m 降低到 33.5m,降低了 89m,而考虑耦合的情况下降低了 119m,因此耦合使下游的渗透坡降明显 增大,对稳定不利,特别是在渗流逸出处,容易发生流土、管涌等渗透破坏。

图 3.8 (a) 和 (b) 分别为不考虑耦合和考虑耦合两种情况下 y=1100m 剖面 处的水头分布情况,该剖面位于大坝左岸坝肩位置。由图可知:在不考虑耦合的 情况下,水头由最大值 227.9m 减小到 58.0m,而考虑耦合后,水头由最大值 233.0m 减小到 75.1m,两种情况下该剖面上的变化量基本相同,但耦合情况相对于不耦 合情况各点对应的水头值均有所提高。

图 3.9 (a) 和 (b) 分别为不考虑耦合和考虑耦合两种情况下 y=770m 剖面处的水头分布情况,该剖面为坝体的拱冠梁剖面,由图可知:两种情况下的最大、最小水头值均相同,分别与上游水位和下游尾水位相对应;考虑耦合后,坝体和基岩局部范围内的水头均有明显的增加。

图 3.10~3.12 分别为 z=2000m、2250、2440m 剖面处不考虑耦合和考虑耦合 两种情况下的水头分布情况,其中 z=2000m 位于河床最底高程以下,其余剖面则 位于下游尾水位和正常蓄水位之间,三幅图均反映了水头在水平面内的变化情况。

不考虑耦合和考虑耦合两种情况下,坝基与拱冠梁交线处的水头分布情况如 图 3.13 所示,具体数据见表 3.3, y=1100m 处的坝基水头分布情况如图 3.14 所示。 由于本文所建模型未考虑防身帷幕的影响,扬压力水头在入渗和出渗处变化速度 较大,而在坝基底部变化较均匀,耦合情况相对于非耦合情况坝基各点的水头均 有一定程度地增长,最大增量达 10.4m,造成扬压力明显增大,对坝体的稳定产 生不利影响。



图 3.4 整体模型水头分布图



图 3.5 x=350m 剖面水头分布图



- 图 3.6 x=450m 剖面水头分布图

水利水电工程专业毕业论文



图 3.8 y=1100m 剖面水头分布图

— 35 —



(b)考虑耦合情况 图 3.9 拱冠梁(y=770m)剖面水头分布图



合情况 (b)考虑耦合情况 图 3.10 z=2000m 剖面水头分布图



合情况 (b)考虑耦合情况
图 3.11 z=2250m 剖面水头分布图



(a)不考虑耦合情况(b)考虑耦合情况图 3.12 z=2440m 剖面水头分布图



图 3.14 y=1100m 处坝基水头分布图

表 3.3 坝基与拱冠梁交线的各点水头值(单位: m)

Х	400	405	410	415	420	425	430	435	440	448
非耦合情况	239.1	204.5	183.5	166.6	151.3	136.9	121.4	105.5	86.8	34.4
耦合情况	239.7	210.6	191.9	176.2	161.6	147.3	131.5	114.9	94.7	34.5

3.5.2 应力场计算成果及成果分析

图 3.17 (a) 和 (b) 分别为不考虑耦合情况和耦合情况下拱坝上游面顺河向 位移分布图,图 3.18 (a) 和 (b) 分别为不考虑耦合情况和耦合情况下拱坝下游 面顺河向位移分布图,由图可知:坝体顺河向位移量值随高程增加,同一高程从 拱冠至左、右拱端逐渐减小。由于河谷两岸地形近于对称,岩性分布相同,坝体 左、右半拱顺河向位移具有良好的对称性。对比两图,可以看出,考虑耦合情况 拱坝上游面顺河向最大位移为191mm,下游面为192mm,而不考虑耦合情况上 游面顺河向最大位移为152mm,下游面为153mm,考虑耦合比不考虑耦合时位 移值增加26%左右。为详细研究坝体应力场的变化规律,方便对耦合和不耦合两 种情况下的位移和应力情况进行对比分析,本文绘制了拱冠梁剖面顺河向、横河 向、铅直向的位移和应力分布图,如图3.16~3.20所示。

图 3.19(a)和(b)分别为不考虑耦合情况和耦合情况下坝体拱冠梁剖面顺河向位移分布图。由该图可以得出与上面相似的结论: 拱坝上下游面顺河向位移基本相同,位移大小均随高程的增加而增大,但耦合的结果较不耦合情况明显增大。

图 3.20~3.21 分别为坝体拱冠梁剖面沿 y 方向和铅直向的位移分布图。由图可知: 拱冠梁铅直向位移总体上呈现出下沉状态,下沉变形量较大的部位主要分布于中上部高程拱冠附近,考虑耦合情况拱冠梁沿 y 方向最大位移为 10.3mm,铅直向为 67.9mm,而不考虑耦合情况拱冠梁沿 y 方向最大位移为 8mm,铅直向为 53.7mm,尽管位移值与顺河向相比甚小,但考虑耦合仍比不考虑耦合位移值 增加 26%左右。

图 3.15 和图 3.16 分别表示坝体拱冠梁剖面上 x=424m 处顺河向和铅直向位移 分布情况,由图可知:考虑耦合情况比不考虑耦合情况的位移值有不同程度增加。

图 3.22 (a) 和 (b) 分别为不考虑耦合情况和耦合情况下坝体拱冠梁剖面坝 体拱冠梁剖面沿 x 方向的应力分布图。由图可知:考虑耦合作用和不考虑耦合情 况下,x 方向应力分量的分布规律大致相同。但是,考虑耦合情况拱冠梁沿 x 方向 最大拉应力为 3.11MPa,最大压应力为 8.64MPa,而不考虑耦合情况拱冠梁沿 x 方向最大拉应力为 2.58MPa,最大压应力为 6.42MPa,考虑耦合比不考虑耦合情 况 x 方向应力值变化较大,其最大值增加 30%左右。

图 3.23 (a) 和 (b) 分别为不考虑耦合情况和耦合情况下坝体拱冠梁剖面坝 体拱冠梁剖面沿 z 方向的应力分布图。由图可知:考虑耦合情况拱冠梁沿 z 方向 最大拉应力为 3.39MPa,最大压应力为 10.7MPa,而不考虑耦合情况拱冠梁沿 x 方向最大拉应力为 2.79MPa,最大压应力为 8.83MPa,考虑耦合比不考虑耦合情 况应力值增加 21%左右。考虑耦合情况下,由于坝体上游面承受巨大的水压力, 坝体上游的岩体拉应力增加,裂隙隙宽较蓄水前增大,渗透性增大,而在坝肩和坝基 下游的岩体的压应力增加,裂隙面上承受的亦压应力增加,裂隙面闭合,渗透性减小, 从而形成上游裂隙张开下游裂隙闭合的情况,在这种情况下,就会造成坝肩及坝基 的扬压力增大,对坝体的稳定产生不利影响,设计中务必予以考虑。

计算结果拉应力值偏大,主要有以下几点原因:

(1)本文建立的模型在拱坝与地基接触处出现尖角,易产生较大的应力集中现象,而实际工程中一般会有较好的处理。

(2) 计算中坝体按线弹性计算,所以坝体上游面附近拉应力分布范围很小, 坝体大部分处于压应力状态,因此受拉开裂后一般不会向下游方向开展。

(3)本文用三维有限元法计算拉西瓦拱坝应力时没有考虑施工过程,按整体 计算自重应力。而实际工程中,拱坝接缝是自下而上分区进行灌浆的,因此拱坝 是自下而上逐步形成整体的,这一施工过程对自重应力有相当大的影响^[41]。李雪 春、朱伯芳等对小湾拱坝进行了计算,一种是不考虑施工过程,最大主拉应力为 3.8MPa(有限元等效应力);另一种是考虑施工过程,接缝分9步灌浆,最大主 拉应力减小到1.54MPa。可见,考虑施工过程计算自重后,最大主应力明显减小, 且坝踵受拉范围也明显减小^[42]。

(4)本文未考虑湿胀应力的影响。水库蓄水后,上游坝面与水接触,底部基岩裂隙内也是充水的,坝踵混凝土将因潮湿而膨胀。混凝土浸水中两年的膨胀量约为100×10⁻⁶,20年的膨胀量约为180×10⁻⁶,大体积混凝土因水泥用量较低,估计其膨胀量约为(50~100)×10⁻⁶,如果取约束系数*R*=0.60,松弛系数*K_P*=0.65,

弹性模量 *E*=30GPa,则(50~100)×10⁻⁶膨胀量引起的压应力约为 $\frac{RK_{P}E\varepsilon}{1-\mu}$ =0.7~1.4

MPa^[43]。由此可见,湿胀应力对于减小坝踵应力有相当大的影响。



图 3.15 拱冠梁上 x=424m 处顺河向位移分布图



图 3.16 拱冠梁上 x=424m 处铅直向位移分布图



图 3.17 坝体上游面顺河向位移分布图







图 3.21 拱冠梁剖面铅直向位移分布图



图 3.22 拱冠梁剖面 x 方向应力分布图



不考虑耦合情况 (b)考虑耦合情况 图 3.23 拱冠梁剖面 z 方向应力分布图

3.6 本章小结

本章根据拉西瓦工程的基本资料,找出不同岩层的控制坐标,通过编制 Matlab 与 COMSOL Multiphysics 的链接程序,建立了拉西瓦拱坝和坝基的三维有限元数 值模型。然后利用 COMSOL 软件计算分析了在不考虑耦合情况和考虑耦合情况 下渗流场与应力场的分布规律,并对比分析了计算成果,总结了拉应力偏大的原 因。得出的主要结论如下:

(1)在不考虑耦合情况和考虑耦合情况下,渗流场分布规律基本相同:在上 游面,水头由河道往两岸的逐渐减小,在下游面,水头由河道往两岸的逐渐减小 增大,总体上由上游到下游呈减小趋势;位移场的分布规律均为:坝体顺河向位 移量值随高程增加,同一高程从拱冠至左、右拱端逐渐减小,坝体左、右半拱顺 河向位移具有良好的对称性。

(2)耦合和非耦合渗流场等势线分布有较显著的差别,耦合分析计算得出的 渗流场等势线偏向下游,下游的渗透坡降明显增大,对稳定不利,特别是在渗流 逸出处,容易发生流土、管涌等渗透破坏。

(3)考虑耦合比不考虑耦合时的各位移分量都有不同程度的增加。

(4)考虑耦合情况下,坝体上游的岩体拉应力增加,坝肩和坝基下游的岩体 的压应力增加,造成坝肩及坝基的扬压力增大,对坝体的稳定产生不利影响。

第四章 总结与展望

4.1 总结

本文首先从试验、理论模型和耦合模型计算方法三方面总结了国内外学者对 渗流、应力及两者之间耦合关系的研究成果。然后介绍了应力场与渗流场耦合分 析的基本原理和方程。主要结合拉西瓦的工程实际,编制了 Matlab 与 COMSOL Multiphysics 的链接程序,建立了三维数值计算模型,完成了在不考虑耦合情况 和考虑耦合情况下对渗流场与应力场的求解计算,并对比分析了计算成果,得到 了岩体中渗流场与应力场的相互作用关系。得出的主要结论如下:

(1)在不考虑耦合情况和考虑耦合情况下,渗流场分布规律基本相同:在上游面,水头由河道往两岸的逐渐减小,在下游面,水头由河道往两岸的逐渐减小 增大,总体上由上游到下游呈减小趋势。

(2)在不考虑耦合情况和考虑耦合情况下,位移场分布规律基本相同:坝体 顺河向位移量值随高程增加,同一高程从拱冠至左、右拱端逐渐减小,坝体左、 右半拱顺河向位移具有良好的对称性。

(3)耦合和非耦合渗流场等势线分布有较显著的差别,耦合分析计算得出的 渗流场等势线偏向下游,下游的渗透坡降明显增大,对稳定不利,特别是在渗流 逸出处,容易发生流土、管涌等渗透破坏。

(4)考虑耦合比不考虑耦合时的各位移分量都有不同程度的增加。

(5)考虑耦合情况下,坝体上游的岩体拉应力增加,坝肩和坝基下游的岩体 的压应力增加,从而使坝体上游裂隙隙宽较蓄水前增大,渗透性增大,坝肩和坝基 下游裂隙面上承受的压应力增加,裂隙面闭合,渗透性减小,导致上游裂隙张开下 游裂隙闭合,造成坝肩及坝基的扬压力增大,对坝体的稳定产生不利影响。

因此,在进行基岩上水工建筑物设计时,应当进行渗流应力耦合分析以确保 建筑物安全。

4.2 研究展望

由于时间和条件的限制,没有对一些相关的问题进行深入的研究和探讨,就 本文来讲,还有许多方面的研究工作有待进一步地继续和开展。

(1)本文在用 COMSOL Multiphysics 软件建立几何模型的过程中仅设定了弱风化层、新鲜基岩和拱坝三个求解域,有必要考虑防渗帷幕、排水孔幕以及裂隙

等对渗流场和应力场的影响。

(2)本文在计算过程中仅考虑了基本工况组合:"正常蓄水位+相应下游水 位+坝体自重",有必要考虑温度的影响,并在多种工况条件下,进行拱坝坝基渗 流应力耦合分析。

(3)本文对拉西瓦拱坝进行渗流应力耦合分析时,假设岩层为均质的各向同 性体,而实际工程中的岩体大都是各向异性且为多覆盖层,应考虑工程地质情况 的复杂及多变性进行进一步的计算分析。

参考文献

- [1] 盛金昌, 速宝玉. 裂隙岩体渗流应力耦合研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 1998.
- [2] 庄宁. 裂隙岩体渗流应力耦合状态下裂纹扩展机制及其模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [3] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 8~25.
- [4] 忤彦卿. 岩土水力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 11.
- [5] 张文杰,周创兵,李向阳等.裂隙岩体渗流特性物模试验研究进展[J]. 岩土力学. 2005, 26(9): 1517~1524.
- [6] Louis C. Rock Hydraulics in Rock Mechanics[M]. York: Springer-New Verlag, 1974.
- [7] 速宝玉, 詹美礼, 赵坚. 仿天然岩体裂隙渗流的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1995,17(9): 19~24.
- [8] 耿克勤,陈凤翔,刘光廷等. 岩体裂隙渗流水力特性的实验研究[J]. 清华大学学报, 1966, 36(1):102~106.
- [9] Iwai K. Fundamental Studies of Fluid Flow Through a Single fracture[D]. Berkely: Uniwersity of California, 1976.
- [10] 周创兵, 熊文林. 岩石节理的渗流广义立方定律[J]. 岩土力学, 1996, 17(4): 1~7.
- [11] Catherine T Wang, Roland N Home. Boiling flow in a horizontal fracture[J]. Geothermics, 2000, 29: 759~772.
- [12] 李地元, 李夕兵, 张伟. 裂隙岩体的流固耦合研究现状与应用展望[J]. 水利与建筑工程 学报, 2007, 5(1): 1~4.
- [13] 王艳丽. 裂隙岩体渗流场与应力场耦合的研究进展[J]. 国外建材科技, 2007, 28(3): 112~115.
- [14] 郑少河, 赵阳升等. 三维应力作用下天然裂隙渗流规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程 学报, 1999, 18(2): 133~136.
- [15] 张玉卓, 张金才. 裂隙岩体渗流与应力耦合的试验研究[J]. 岩体力学, 1997, 18(4): 59-62.
- [16] 刘亚晨, 蔡永庆, 刘泉声等. 岩体裂隙结构面的温度-应力-水力耦合本构关系[J]. 岩土 工程学报, 2001, 23(2): 196~200.
- [17] 周远田. 岩石应力与渗透率的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4):393~399.
- [18] 刘才华,陈从新,付少兰.剪应力作用下岩体裂隙渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(10):1651~1655.
- [19] 刘才华,陈从新,付少兰.二维应力作用下岩石单裂隙渗流规律的实验研究[J]. 岩石力 学与工程学报,2002,21(8):1194~1198.

- [20] 耿克勤, 陈凤翔, 岩体裂隙渗流水力特性的实验研究[J]. 清华大学学报, 1996, 36(1): 102~106.
- [21] 李燕, 杨林德. 岩土介质渗流场与应力场耦合理论的研究进展[J]. 河南科学, 2005.
- [22] 肖裕行, 王泳嘉. 裂隙岩体水力等效连续介质存在性的评价[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 75~80.
- [23] 忤彦卿. 岩体裂隙系统渗流场与应力场耦合模型[J]. 地质灾害与环境保护, 1996,7(1): 31-34.
- [24] 王媛, 速宝玉, 徐志英. 等效连续裂隙岩体渗流与应力全耦合分析[J]. 河海大学学报, 1998, 26(2): 26~30.
- [25] 盛金昌, 速宝玉, 王媛等. 裂隙岩体渗流-弹塑性应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000,19(3): 304~309.
- [26] 刘仲秋, 章青. 岩体中饱和渗流应力耦合模型研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(5), 585~602.
- [27] 陈平等. 裂隙岩体计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(6):1~10.
- [28] 王恩志. 剖面二维裂隙网络渗流计算方法[J]. 水文地质工程地质, 1993, 20(4): 27~29.
- [29] 忤彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995, 40~41.
- [30] 高海鹰, 夏颂佑. 三维裂隙岩体渗流场与应力场耦合模型研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2):102~105.
- [31] 王恩志, 王洪涛, 孙役. 双重裂隙系统渗流模型研究[J]. 岩石力学与与工程学报, 1998, 7(4):400~406.
- [32] 王凯,杨立中,贺玉龙.裂隙含水介质渗流应力耦合的研究现状及展望[J]. 路基工程, 2009.
- [33] 陈平, 张有天. 裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 12(4): 299-308.
- [34] 伍美华, 柴军瑞, 李亚盟. 岩体水—岩耦合作用研究简述[J]. 工程勘察, 2007.
- [35] 王媛. 多孔介质渗流与应力的耦合计算方法[J]. 工程勘察, 1995(2): 33~37.
- [36] 杨林德, 杨志锡. 各向异性饱和土体的渗流耦合分析和数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1447-1451.
- [37] 中仿科技. COMSOL Multiphysics 有限元法多物理场建模分析[M]. 北京: 人民交通出版 社, 2007.
- [38] 中仿科技. COMSOL Multiphysics 中文使用手册[M]. 北京: 中仿科技公司, 2008.
- [39] 中仿科技. COMSOL Multiphysics 操作手册丛书几何建模用户指南[M]. 北京: 中仿科 技公司, 2009.
- [40] 马慧, 王刚. COMSOL Multiphysics 基本操作指南和常见问题解答[M]. 北京: 人民交通

出版社,2009.

- [41] 沈长松, 王世夏, 林益才, 刘晓青. 水工建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [42] 李雪春,朱伯芳,高永梅等.施工过程、岩面水压及横缝对拱坝应力的影响[J].中国水利水电科学院,2000,5.
- [43] 李国泮等. 混凝土性能[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.

致 谢

写到这里,我的论文即将划上圆满的句号,为期四年的大学本科生活也接近 尾声。此时此刻,我的心情是复杂而凝重的,有论文即将完成的喜悦,有面临答 辩的忐忑,有为即将开始的研究生阶段生活的那份憧憬,更有离开相伴四年的师 生的那份伤感!

首先,我要把最真挚的感恩之心和感激之情献给沈振中教授。从论文的选题 到最终定稿,沈老师对每个环节都倾注了大量的心血,并提出了很多指导性建议。 对于想在水工方向做深入研究的我,十分庆幸能拜在工程经验丰富的沈老师门 下。在论文写作的这两个多月时间里,不仅使我拓宽了在这方面的知识面、初步 掌握了 AutoCAD、Matlab、Comsol等软件的应用,更让我学到了沈老师那严谨 求实的态度以及孜孜不倦的探索精神,这对于我今后的学习和生活都是一笔财 富。在此,我谨祝愿沈老师同家人身体健康、工作愉快。

由于前面从未接触过 Comsol,在得知本文需要用到该软件进行求解时,我 感到很茫然,衷心感谢陈孝兵师兄能在此时伸出援助之手,耐心地帮我入门,并 在我论文写作过程中遇到疑点时认真帮我分析;感谢任华春师姐、甘磊师兄、赵 忠伟师兄、董坤明师兄以及办公室的各位师兄师姐,在我为如何由平切层绘制地 形图而纠结时,及时提出了合理的解决方案,和你们讨论启发了我的很多思路, 和你们相识是一种缘分、是一种幸福,祝你们学业有成、万事如意。

感谢 108 课题组,在论文写作过程中,借阅了课题组的很多文献资料;在模型建立后,由于数据量太大,一般电脑无法成功求解,课题组工作站的有效利用 为模型的求解以及优化提供了可能。

在论文的写作过程中,参考了多位专家、学者的文献资料等,在此一并谢过。

感谢以班导师唐立模为代表的河海大学的各位老师,也感谢与我相伴四年的 07级同学,正是因为你们,使我知道成功的路上不仅有鲜花和掌声,更有坎坷 和荆棘,使我走得更快、更稳。

特别感谢我的父母,感谢您们多年含辛茹苦的养育之恩,您们的爱是我无法 用语言来表达的,但都铭记在我的心中,激励着我不断进步。感谢所有关心我、 帮助我的亲戚朋友,祝您们幸福、平安!

最后, 衷心感谢能在百忙之中抽出时间对我论文进行进行检阅和答辩的各位 老师, 祝您们工作顺利、健康长寿!