

大坝及其周围地质体中渗流场与应力场耦合分析研究综述

柴军瑞

(四川大学水利水电工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:论述了大坝及其周围地质体中渗流场与应力场耦合分析研究的意义,对不同类型坝体和不同结构岩(土)体渗流与应力的相互作用关系进行了系统的分类与总结,介绍了渗流场与应力场耦合分析及其在大坝工程中应用的研究进展,并对大坝及其周围地质体渗流场与应力场耦合分析研究进行了小结与展望。

关键词:大坝;岩体;渗流场;应力场;耦合分析;综述

中图分类号:TV139.11;TV64

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2002)02-0053-03

大坝是挡水建筑物,其渗透性是大坝设计、施工及运行的最主要问题。若大坝存在严重的坝基和坝肩渗漏,水库不能蓄到预定水位,则该大坝工程就是失败的。另一方面,渗透所引起的大坝稳定及安全问题则更为重要:根据对国内外大坝失事实例的分析,有很大一部分大坝的失事都是由于坝基和坝肩中的渗流引起的。如法国 Malpasset 拱坝(坝高66.5m),在1959年初次蓄水时溃决,有许多学者对该坝的失事原因进行了分析,得出的结果不完全相同。其中一种观点认为,该坝破坏是由于左岸坝基存在一个潜在的滑动体,渗透压力引起滑动体岩体压缩变形,而岩体压缩变形又使其渗透系数大大降低,起阻水作用,从而孕育了滑动体上很高的静水扬压力,破坏了局部岩体的稳定,并逐渐引起大坝的溃决。由此可见,在大坝及其周围地质体中,渗流通过施加渗流作用力而影响应力场或变形场,而变形和应力又反过来通过改变介质渗透参数来影响渗流场,此即渗流场与应力场的耦合作用。渗流场与应力场耦合分析是对此耦合作用进行定量研究的必由之路,本文对大坝及其周围地质体中渗流场与应力场耦合分析的研究成果进行系统的评述与总结。

1 渗流与应力相互作用关系研究综述

以渗流作用力来表示水荷载,是计算大坝水荷载的精确方法,特别是在大坝及坝基、坝肩中形成稳定渗流场的情况下,因此,对大坝坝体来说,坝体所受的水荷载是坝体渗流场水头分布的函数^[1,2],即坝体渗

流场通过影响大坝水荷载而影响应力场,这就是大坝坝体渗流对应力的作用关系。对土石坝来说,土石坝料的渗透系数是其孔隙率的函数,而孔隙率又与应力作用下的体积应变密切相关^[3],即土石坝的渗透系数及渗流场分布又与坝体应力有关。对碾压混凝土坝来说,层面往往是碾压混凝土坝中的薄弱环节,也是坝体渗透的主要通道,且其渗透性与坝体应力状态紧密相关,碾压混凝土坝体应力对层面渗流的影响,是通过坝体应力改变层面的(等效)隙宽来作用的^[4],以上即为大坝坝体应力对渗流的作用关系。

单一裂隙(组)渗流与应力关系的建立,是裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析研究的基础和关键环节^[5]。建立单一裂隙(组)渗流与应力耦合关系一般有以下三种方法:第一,直接通过试验总结出渗透特性与应力的经验公式;第二,根据裂隙面的法向、切向变形公式间接地导出渗透特性与应力的关系;第三,提出某理论概念模型来解释渗流与应力的耦合规律。

在直接试验法方面,Louis^[6]首次建立了岩体渗透系数与正应力的经验关系式,指出渗透系数随正应力的增大而变小,两者之间呈负指数关系。其后,国外许多学者^[5]分别对不同岩性的岩石进行了试验,得出渗透系数与正应力的关系。刘继山^[7]用实验方法研究了单裂隙和两正交裂隙受正应力作用时的渗流公式。件彦卿等^[8]通过实际岩样的室内试验得出了裂隙岩体渗透系数与岩体裂隙分维数之间的分形几何关系。速宝玉等^[9]分别对贯通裂隙和充填砂浆裂隙进行了实验。张玉卓等^[10]对裂隙岩体渗流与

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2001年第29批);陕西省自然科学基金资助项目(99C22)

作者简介:柴军瑞(1968—),男,陕西眉县人,副教授,博士,主要从事岩体力学研究。

应力耦合进行了试验研究,得出渗流量与应力成四次方关系或非整数幂关系的结论.郑少河等^[11]进行了三维应力作用下天然裂隙岩体渗流规律的试验研究.以上通过试验得出的各种经验关系式都是在一定的实验条件下得到的,还需要进一步的验证.

在间接公式法方面,Oda^[12]由裂隙几何张量来统一表达岩体渗流与变形之间的关系.其他学者^[8]分别从岩体渗透的立方定律、岩体裂隙压缩变形(量)、剪切变形(量)分析出发,导出了应力与裂隙隙宽、裂隙渗透系数之间的关系式.仵彦卿等^[8]从理论上分析了剪应力作用下岩体中单裂隙渗流公式,并导出了单裂隙中渗透压力与岩体变形量的定量关系式.周创兵等^[13]提出了考虑岩体应力的裂隙渗流的广义立方定律.Bai等^[14]研究了非正交渗流情况下变形岩体渗透性随应力的变化规律.柴军瑞等^[15]推导了单裂隙水流对裂隙壁施加的切向拖曳力公式.这些研究都推动了单一裂隙水力学模型的发展.

在概念模型方面^[5],早期主要有钉床模型(即将裂隙面看成具有一定概率密度分布形式的钉状物,从钉状物受压力后的压缩量来讨论裂隙渗流与应力的关系)、洞穴模型(即从洞穴的变形来考虑裂隙渗流与应力的耦合关系)和洞穴-凸起模型(即综合考虑了洞穴与凸起物的变形)三种.周创兵等^[13]还提出了裂隙的半圆形凸起模型,讨论了裂隙渗流与应力的耦合规律.Reichard等^[16]从理论上分析了变形多孔介质渗透系数的表达式.这些理论模型都从理论上分析了裂隙渗流与应力的耦合机理,尚需经过实践的检验.

总结以上研究成果,可将渗流与应力的相互作用及关系式归纳如表1所示^[17],表中各关系式代表的意义参见文献[17].

2 渗流场与应力场耦合分析综述

鉴于问题的复杂性,仵彦卿等^[8,18,19]将岩体渗流场与应力场耦合分析数学模型的建模方法分为机

理分析法、混合分析法及系统辨识法,并分别形成岩体渗流场与应力场耦合分析的理论模型、经验-理论模型及集中参数模型等三种主要模型.由于对岩体介质不同的处理方法,每种模型又可分为(等效)连续介质模型及非连续介质模型两种.以机理分析法建立起来的岩体渗流场与应力场耦合分析的理论模型就包括(等效)连续介质模型、裂隙网络模型、(狭义与广义)双重介质模型以及多重裂隙网络模型.

在双场耦合模型的具体求解方面,早期主要有基于Biot固结理论的裂隙渗流与应力耦合分析的模型^[8].Oda^[20]以岩体节理统计为基础,运用渗透率张量法,建立了岩体渗流场与应力场耦合的等效连续介质模型.Ohnishi^[21]研究了非连续节理岩体的渗流与应力耦合方法,提出了以节理元为基础的有限元模型;并提出了地下工程围岩的应力-渗流-温度耦合的本构关系模型.王媛等^[22]提出了裂隙岩体渗流与应力耦合的“四自由度全耦合分析方法”,其基本思路是:将裂隙岩体渗流场和应力场作为同一场,联立裂隙岩体满足的渗流方程和应力方程,建立起同时以节点位移和节点渗流水压力为未知量的耦合有限元方程组.黄涛等^[23]进行了隧洞裂隙岩体温度-渗流耦合数学模型研究.赖远明等^[24]进行了寒区隧洞温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析.朱珍德等^[25]进行了裂隙岩体的渗流场与损伤场耦合分析模型及其工程应用研究.以上模型都属于(等效)连续法中的机理分析模型.由于实际工程岩体的不连续性,采用离散法进行裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析具有广阔的发展前景.

在裂隙岩体渗流场与应力场耦合模型在大坝工程中的应用方面,陈平和张有天^[26]等对重力坝坝基进行了裂隙岩体渗流应力二维耦合分析;耿克勤等^[27]对龙羊峡水电站重力拱坝坝基和坝肩岩体进行了三维有限元耦合分析.顾冲时等^[28]研究了渗流影响下坝体和坝基应力场.王媛等^[29]对裂隙岩体边坡和重力坝坝基进行了渗流应力全耦合分析.柴军瑞等^[4,30]进行了龙滩碾压混凝土坝及小湾水电站坝

表1 渗流与应力的相互作用及关系式

介质类别	项 目	相互作用	经验关系式	理论关系式
(等效)连续介质	渗流对应力的影响	渗流通过施加于某作用面上的渗透压力(面力)和在渗流区域内分布的渗流体积力而影响应力分布	有效应力原理 静水压力公式 扬压力公式	$p = \gamma(H - z)$ $f = \gamma J_f$
	应力对渗流的影响	应力通过改变介质体积应变及空(孔)隙率而影响介质的渗透系数,从而影响渗流场	$K_f = K_f^0 e^{-\sigma' / \sigma'_c}$ $K_f = K_f^0 (\sigma' / \sigma'_0)^{-D_f}$ $K_f = a e^{-b \sigma'}$	$K = K(n)$ $n = n(\epsilon_v)$ $\epsilon_v = \epsilon_v(\sigma_v)$
裂隙网络介质 (包括层面)	渗流对应力的影响	渗流通过施加于裂隙壁面上的法向渗透压力(面力)和切向拖曳力(面力)而影响应力分布	有效应力原理 静水压力公式 扬压力公式	$p = n\gamma(H - z)$ $\tau_w = \frac{b}{2} n\gamma J_f$
	应力对渗流的影响	应力通过改变裂隙隙宽而影响裂隙渗透系数,从而影响介质的渗透性及渗流场分布	$b = \frac{b_0}{A(\sigma/\xi)^n + 1}$ $K_f = \frac{\gamma}{12\mu} \frac{\mu_0}{e^{-\lambda_n \sigma' / \sigma'_0}} \frac{n_0}{\sigma'_0} \frac{\sigma'_0}{K_0}$	$\Delta \bar{b} \approx \frac{3.28 \gamma H r (1 - \nu^2)}{F}$

区三维渗流场与应力场耦合分析,从以上研究工作中得出以下初步认识:耦合作用对渗流场的影响远大于对应力场的影响;考虑耦合作用的影响,坝底扬压力将增加,不利于大坝等建筑物的稳定;若不考虑耦合作用的影响,则计算结果可能会夸大排水孔的作用;耦合作用使碾压混凝土坝踵区应力集中现象加剧;进行岩基上水工建筑物设计时,应当进行耦合分析以确保工程安全.可以看出,有必要对大坝工程进行渗流场与应力场耦合分析的进一步研究.

3 结 语

经过以上分析与综述,可以得出以下结论:

a. 渗流与应力的相互作用关系是渗流场与应力场耦合的“桥梁”和“纽带”,也是渗流场与应力场耦合分析的前提和基础.

b. 研究渗流与应力的相互作用关系,要以介质结构为基础,不同结构介质渗流与应力相互作用机理不同.

c. 应进一步进行大坝及其周围地质体中动态的渗流场与应力场耦合分析研究.

d. 由于裂隙岩体结构的复杂性,仍需研究和开展更符合客观实际的裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析的数学模型.

e. 由于温度和应力、渗流的相互作用,今后尚需开展大坝及其周围地质体中渗流场、应力场、温度场三场耦合分析的研究工作.

参考文献:

- [1] 柴军瑞. 混凝土坝荷载讨论[J]. 水电能源科学, 2000, 18(2): 18~20.
- [2] 柴军瑞, 仵彦卿. 碾压混凝土坝层(缝)面渗流及其对坝体应力的影响[J]. 水电能源科学, 2001, 19(1): 55~58.
- [3] 柴军瑞, 仵彦卿. 均质土坝渗流场与应力场耦合分析的数学模型[J]. 陕西水力发电, 1997, 13(3): 4~7.
- [4] 柴军瑞, 仵彦卿. 碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合分析的数学模型[J]. 水利学报, 2000, (9): 33~36.
- [5] 盛金昌, 速宝玉. 裂隙岩体渗流应力耦合研究综述[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 92~98.
- [6] Louis C. Rock hydraulics in rock mechanics[M]. New York: Wiley, 1974.
- [7] 刘继山. 结构面力学参数与水力参数耦合关系及其应用[J]. 水文地质工程地质, 1988, (2): 33~36.
- [8] 仵彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995.
- [9] 速宝玉, 詹美礼, 王媛. 裂隙渗流与应力耦合特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 73~77.
- [10] 张玉卓, 张金才. 裂隙岩体渗流与应力耦合的试验研究[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 59~62.
- [11] 郑少河, 赵阳升, 段康康. 三维应力作用下天然裂隙渗流规律实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18

- (2): 133~136
- [12] Oda M, Yamabe T. Elastic stress and strain in jointed rock masses by means of crack tensor analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, 26(2): 89~112.
- [13] 周创兵, 熊文林. 不连续面渗流与变形耦合的机理研究[J]. 水文地质工程地质, 1996, 23(3): 14~17.
- [14] Bai M, Meng F, Elsworth D, et al. Analysis of stress-dependent permeability in nonorthogonal flow and deformation fields[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, 32(3): 195~219.
- [15] 柴军瑞, 仵彦卿. 单裂隙水流对裂隙壁施加的拖曳力分析[J]. 工程地质学报, 2001, 9(1): 29~31.
- [16] Reichard J S, Leap D I. The effects of pore pressure on the conductivity of fractured aquifers[J]. Groundwater, 1998, 36(3): 450~456.
- [17] 柴军瑞, 仵彦卿. 岩体渗流与应力相互作用关系综述[A]. 中国岩石力学与工程学会主编. 新世纪岩石力学与工程的开拓和发展——中国岩石力学与工程学会第六次学术大会论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000. 366~368.
- [18] 仵彦卿, 柴军瑞. 裂隙网络岩体三维渗流场与应力场耦合分析[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(1): 1~5.
- [19] 柴军瑞, 仵彦卿. 岩体渗流场与应力场耦合分析的多重裂隙网络模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 712~717.
- [20] Oda M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses[J]. Water Resources Research, 1986(13): 1854~1865.
- [21] Ohnishi Y, Bayashi A, Nishigaki M. 地下工程围岩的热力-水力-力学特性[A]. 朱敬民, 鲜学福, 黄荣樽, 译. 岩石力学的进展——第六届国际岩石力学会议论文集[C]. 重庆: 重庆大学出版社, 1990. 72~77.
- [22] 王媛, 徐志英, 速宝玉. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析的四自由度全耦合法[J]. 水利学报, 1998(7): 55~59.
- [23] 黄涛, 杨立中. 隧洞裂隙岩体温度-渗流耦合数学模型研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 554~558.
- [24] 赖远明, 吴紫江, 朱元林, 等. 寒区隧洞温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 529~553.
- [25] 朱珍德, 孙钧. 裂隙岩体的渗流场与损伤场耦合分析模型及其工程应用[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(5): 22~27.
- [26] 陈平, 张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(4): 299~308.
- [27] 耿克勤, 吴永平. 拱坝和坝肩岩体的力学和渗流的耦合分析实例[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 125~131.
- [28] 顾冲时, 吴中如. 渗流影响下坝体和坝基应力场的分析模型研究[J]. 水电能源科学, 1999, 17(1): 1~4.
- [29] 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.
- [30] 柴军瑞, 仵彦卿. 小湾水电站坝区渗流场与应力场耦合分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2001, 33(2): 9~11.

(收稿日期: 2001-02-27 编辑: 熊水斌)