

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0091-05

基于 DDA 的裂隙岩体非饱和渗流应力耦合模型研究

刘先珊

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 岩体饱和-非饱和渗流、应力耦合作用对工程岩体的强度和稳定性有十分重要的影响。目前对于裂隙岩体饱和渗流应力耦合的研究取得了一些进展,但在很多工程领域不能简单地采用饱和渗流分析。根据 DDA 力学计算和非饱和渗流计算原理,提出了新的基于 DDA 方法的非饱和渗流应力耦合模型。并给出了在库水位骤降工况下的边坡水力耦合算例,其计算结果显示在库水位骤降情况下:考虑水力耦合且库水位下降较快时的安全系数要小于库水位下降慢时的安全系数;考虑水力耦合的边坡稳定安全系数要小于不考虑耦合时的安全系数。仿真实验和工程应用表明其计算成果是符合实践规律的。

关 键 词: 裂隙岩体; 非饱和; 渗流应力耦合; DDA 模型

中图分类号: TU 452 **文献标识码:** A

Study on unsaturated hydro-mechanical coupling model of fractured rock mass based on DDA

LIU Xian-shan

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044, china)

Abstract: Unsaturated hydro-mechanical coupling of fractured rock mass has important influence on the strength and stability of rock mass. In recent years, the research of saturated hydro-mechanical coupling has achieved some advances, but saturated flow can't be adopted simply in many practical projects. Based on the mechanical theory of DDA and fluid flow analysis of fractured network, unsaturated hydro-mechanical coupling analysis model is put forward naturally. And then taking a reservoir rock slope for example, the stability of rock slope is discussed when water level of reservoir falls. And it is shown that the safety factor is lower when the water level falls quickly and when considering coupling; it is consistent with the fact.

Key words: fractured rock mass; unsaturated; hydro-mechanical coupling; DDA model

1 引 言

目前对于裂隙岩体饱和渗流应力耦合的研究取得了一些进展,但在很多工程领域不能简单地采用饱和渗流分析,如埋于岩体深部非饱和带中的核废料处理、库水位骤升或骤降以及强暴雨和泄洪雨雾条件下边坡的稳定性研究均是以裂隙岩体非饱和渗流为基础的。因此,在某些工程应用中要正确考虑区域的非饱和渗流状态,从物理上考虑非饱和渗流是一个多因素互相耦合的复杂过程,这样能为准

确分析非饱和状态下的水力耦合分析奠定基础。对于非饱和渗流应力耦合研究有:陈卫忠等^[1]基于黏土岩实验室非饱和渗流试验的结果,考虑塑性应变硬化的非饱和渗流应力耦合模型、并将该模型应用于模拟某粘土岩竖井的开挖、衬砌支护及长期运营期围岩状态;张玉军^[2,3]开发了一个用于分析非饱和和孔隙介质中渗流应力耦合弹塑性问题的有限元程序;韦立德^[4]在探索多场耦合理论基础上,研制出了一个考虑非饱和渗流场和温度场对应力场作用的三维弹塑性有限元程序。本文将以 DDA^[5-8]为分析手段,研究非饱和渗流应力耦合的非连续数学模型。

收稿日期: 2006-09-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“裂隙岩体的渗流与力学特性研究[59579020]”

作者简介: 刘先珊,女,1978 生,博士,主要从事岩土工程数值计算方面的研究。liuxianshan@163.com

2 裂隙岩体非饱和渗流应力耦合的 DDA 模型

裂隙岩体由于裂隙网络十分复杂、岩体裂隙非饱和和水力参数较难确定,而且裂隙岩体非饱和和渗流的各种分析模型均有其局限性。故目前裂隙岩体非饱和和渗流多借鉴多孔介质非饱和和渗流和裂隙岩体饱和和渗流的研究方法。本文采用等效连续介质模型来计算裂隙岩体非饱和和渗流场,用 DDA 方法计算裂隙的变形和岩体应力,渗流与应力计算过程交替迭代直到渗流场和应力场均达到给定的收敛精度。其具体的耦合理论分析如下。

2.1 裂隙岩体非饱和和渗流数学模型

多孔介质非饱和和渗流控制方程为

$$-\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) + S = \frac{\partial}{\partial t}(\rho n S_w) \quad (1)$$

式中: S 为源汇项; ρ 为密度; v_i 为达西流速; n 为孔隙率; S_w 为饱和度; $0 \leq S_w \leq 1$, $n S_w = \theta$ 为含水量。

根据达西定律:

$$v_i = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial x_j} = -k_r(\theta) k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: k_r 为相对渗透率,是相对于饱和渗透系数得比值,在饱和区 $0 \leq k_r \leq 1$, 饱和区 $k_r = 1$, k_{ij} 为饱和渗透张量($i, j = 1, 2, 3$), $h = z + h_c$ 为测压管水头, h_c 为压力水头。

将式(2)代入式(1)得:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho k_r(\theta) k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + S = \frac{\partial}{\partial t} (\rho n S_w) \quad (3)$$

考虑到 θ 与 h_c 之间得函数关系 $\theta = \theta(h_c)$ 及

$k(\theta) = k(\theta(h_c))$, 则有

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h_c} \frac{\partial h_c}{\partial t} = C(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (4)$$

则饱和和非饱和渗流的微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_r(h_c) k_{ij} \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h_c) \right) + S = (C(h_c) + \beta S_s) \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (5)$$

式中: $C(h_c)$ 为比容水度,在饱和区 $C = 0$, β 在非饱和区为 0, 饱和区为 1; S_s 为单位贮存系数,对非饱和体 $S_s = 0$, 饱和体为一常数。

其定解条件为:

$$(1) \text{ 初始条件: } h_c(x_i, t) = h_{c0}(x_i, t_0) \quad (6)$$

$$(2) \text{ 边界条件: } h_c(x_i, t)|_{\Gamma_1} = h_{c1}(x_i, t) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & - \left[k_r(h_c) k_{ij} \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_2} = q_n \\ & - \left[k_r(h_c) k_{ij} \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_3} \geq 0 \text{ 且 } h_c|_{\Gamma_3} = 0 \\ & - \left[k_r(h_c) k_{ij} \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_4} = q_\theta \text{ 且 } h_c|_{\Gamma_4} < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式中: q_n 和 q_θ 为法向流量,以外法向为正; n_i 为外法线方向余弦; t_0 为初始时刻; Γ_1 为水头边界; Γ_2 为流量边界; Γ_3 为饱和逸出面边界; Γ_4 为非饱和和逸出面边界。

上述非饱和和渗流问题的微分方程可根 Galerkin 加权余量法求解以获得数值解。

2.2 裂隙岩体非饱和和渗流应力耦合的 DDA 模型

基于 DDA 方法的裂隙岩体非饱和和渗流应力耦合研究的研究过程如下:非饱和和渗流状态下的渗流应力耦合过程是通过应力场的变化改变裂隙岩体的渗流性质,从而导致渗透压力的变化,渗透压力的变化又将改造原先的应力场。本文采用 DDA 法计算裂隙变形,根据公式得出外力作用下总的裂隙变形量并计算裂隙渗透系数的变化,进而完成裂隙岩体非饱和和渗流的计算,将计算的水头压力荷载作用于裂隙上,这样对于每一时刻反复迭代直到收敛到给定的精度为止。具体计算过程如图 1 所示。

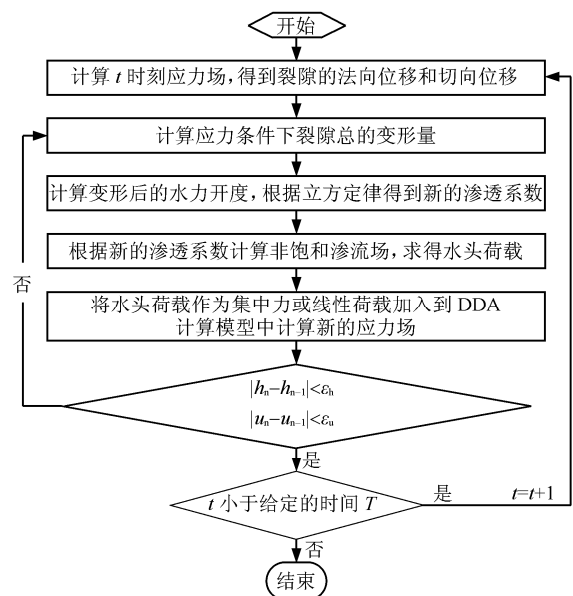


图 1 非饱和和渗流应力耦合的 DDA 分析框图
Fig.1 Flowchart for unsaturated hydro-mechanical coupling analysis based on DDA

3 算例分析

水库运行过程中库水位不断变化,当水库水位骤降时,如果岩体中的地下水不能及时排出,在非饱和和地下水渗流的作用下,渗流压力对岩体裂隙的作用增强,其边坡失稳的可能性就较大,因此分析库水位骤降作用下岩质边坡的水力耦合可以更正确地评价边坡的稳定性。由于 DDA 方法能够考虑块体系统中岩块的变形,不需要假设块体间法向作用力和切向作用力的位置和方向,并且可以得到裂隙在应力作用下的法向和切向变形,由此可以得到裂隙新的水力开度,继而进行下一次的水力耦合计算,也得到新时刻的边坡稳定安全系数。本文将基于 DDA 方法分析某边坡在库水位骤降时的水力耦合,并计算沿可能滑动面的稳定安全系数。

3.1 工程概况

某边坡主要由微新岩体组成,地质结构较为均一,且岩体边坡中存在明显断层,该边坡的概化模型如图 2 所示。假设断层的粗糙度系数为 5,断层的力学宽度为 1 mm,岩体的饱和渗透系数为 2.60×10^{-5} m/s,垂直面为地下水位 70 m 并保持不变,岩体材料的渗流特性是表 1 所示,岩体力学参数是表 2。

3.2 非饱和渗流应力耦合成果分析

在水力耦合过程中,根据 DDA 计算得到的裂隙变形计算新的渗透系数,进而获得新的渗流场及

表 2 岩体力学参数表

Table 2 Mechanical parameters of rock

材料参数	岩体	断层
密度/Kg/m ³	2650	
弹性模量/GPa	12.0	
凝聚力/MPa	2.0	1.0
摩擦角/°	45.0	35.0
泊松比	0.24	

隙变形计算新的渗透系数,进而获得新的渗流场及作用在结构面上的水压力荷载,将水压力荷载作为一外部荷载加到结构面上进行不同时刻下的渗流应力交替迭代计算。本文假设库水位以 0.5 m/d 的速度下降,在 70.0 m 降到 20.0 m 的水力耦合过程中,每 20d 边坡等压力水头线分布如图 2, 3, 和图 3-7。由图可知,水位下降时,其自由面与水库水面之间的高差较大。水库水位开始下降时自由面变化较大。

水库水位骤降的过程中,其裂隙内水的排出与库水位并不是同步的,这种情况下的边坡稳定性将逐渐减小。特别是库水位的降速较大时,浸润线的变幅越大,其边坡更容易发生失稳破坏。同时本文还比较了库水位降速 $v=0.5$ m/d 和 $v=2.0$ m/d 在不同时刻不考虑水力耦合和考虑水力耦合情况下的稳

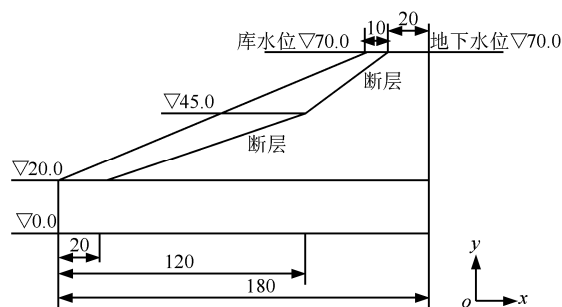


图 2 某边坡概化模型图(单位: m)

Fig.2 Generalized model of a slope(unit: m)

表 1 岩体材料的渗流特性

Table 1 Seepage characteristic of rock materials

h_c (m)	-1 000	-20.0	-3.0	-1.0	-0.5	-0.1
k_r	0.0	0.05	0.108	0.112	0.115	0.118
k_r	0.0	0.03	0.11	0.14	0.18	0.23
h_c (m)	-0.02	-0.005	-0.0032	-0.0013	0.0	
k_r	0.122	0.126	0.13	0.136	0.14	
k_r	0.32	0.40	0.88	0.96	1.00	

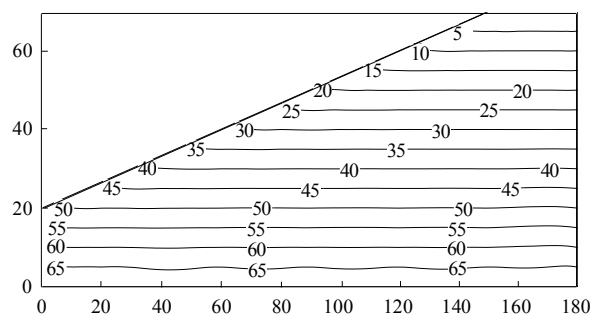


图 3 库水位 70.0 m 时刻边坡的等压力水头

Fig.3 Water head contours when water level is 70.0m

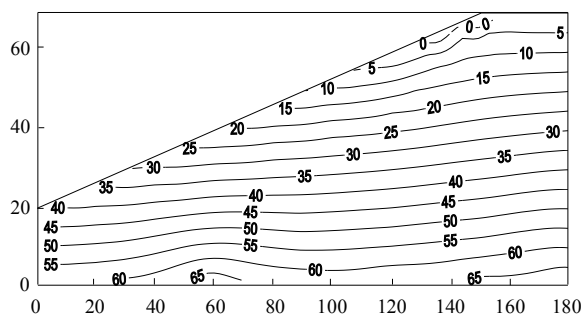


图 4 库水位 60.0 m 时刻边坡的等压力水头

Fig.4 Water head contour when water level is 60.0 m

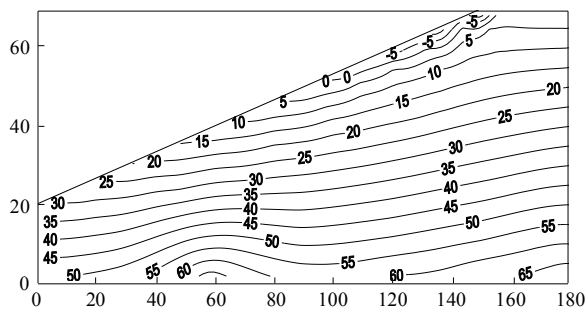


图 5 库水位 50.0 m 时刻边坡的等压力水头

Fig.5 Water head contour when water level is 50.0 m

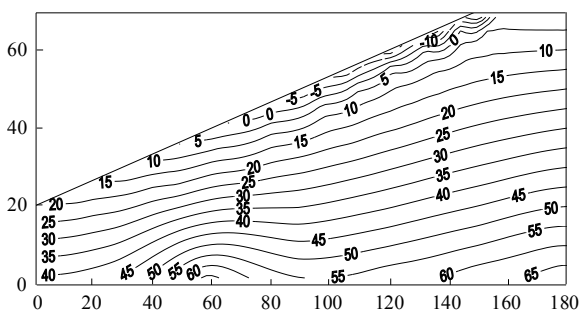


图 6 库水位 40.0 m 时刻边坡的等压力水头

Fig.6 Water head contour when water level is 40.0 m

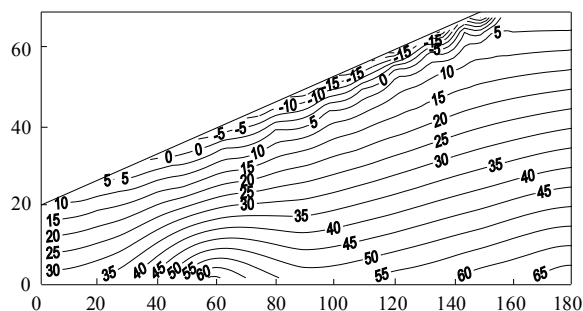


图 7 库水位 30.0 m 时刻边坡的等压力水头

Fig.7 Water head contour when water level is 30.0 m

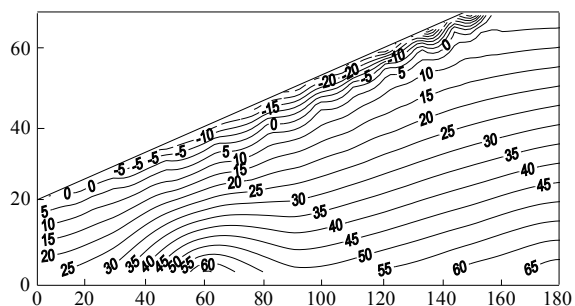


图 8 库水位 20.0 m 时刻边坡的等压力水头

Fig.8 Water head contour when water level is 20.0 m

系数越小；在同一时刻，不考虑非饱和渗流应力耦合状况下的边坡稳定系数要大于考虑水力耦合时的边坡稳定系数，这是由于在耦合状况下，结构面上端由于荷载的释放而使得裂隙的开启度有增加的趋势，但范围较小，而结构面大部分依然处于压缩状态，结构面上的水压力在同一时刻会有增加的趋势，那么边坡的稳定性就会减小。同一时刻耦合情况下库水位降速 $v=0.5\text{m/d}$ 时的边坡稳定性要大于 $v=2.0\text{m/d}$ 的稳定性。可以看出上述计算成果是符合实践规律的。

表 3 库水位降速为 0.5 m/d 时稳定安全系数比较表

Table 3 Comparison of stability factors when speed of water level falling is 0.5m/d

时间/ d	工况	
	不考虑耦合	考虑耦合
10	2.805	2.803
20	2.805	2.802
30	2.743	2.739
40	2.604	2.598
50	2.526	2.521
60	2.411	2.405
80	2.290	2.282
100	2.243	2.232

表 4 库水位降速为 2.0 m/d 时稳定安全系数比较

Table 4 Comparison of stability factors when speed of water level falling is 2.0m/d

工况	5	10	15	20	25
	时间/d				
不考虑耦合	2.765	2.214	2.110	2.041	1.945
考虑耦合	2.760	2.207	2.101	2.029	1.930

4 结 语

由于裂隙岩体非饱和渗流计算模型的复杂性，本文采用了等效连续介质的非饱和渗流计算模型，在 DDA 力学计算原理的基础上，提出了基于 DDA 方法的非饱和渗流应力耦合模型。并给出了在库水位骤降工况下的边坡水力耦合算例，其计算结果显示在库水位骤降情况下：考虑水力耦合的边坡稳定安全系数要小于不考虑耦合时的安全系数；而考虑水力耦合且库水位下降较快时的安全系数要小于库水位下降慢时的安全系数。上述计算成果是符合实践规律的。

参 考 文 献

- [1] 陈卫忠, 邵建富, G.Duveau 等. 粘土岩饱和一非饱和

定性，具体的计算成果如表 3、表 4 所示。其不同工况下的计算结果显示，随着库水位的降低，边坡的安全系数逐渐下降，库水位的降速越大，其安全

- 渗流应力耦合模型及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 24(17): 3 011—3 016
- Chen Wei-zhong, Shao Jian-fu, G. Duveau, et al. Constitutive model of saturated-unsaturated clay and its numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 24(17): 3 011—3 016
- [2] 张玉军. 饱和—非饱和介质热—水—应力耦合二维有限元分析[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(5): 50—55.
- Zhang Yu-jun. 2D finite element analysis for coupled thermo hydro-mechanical processes in saturated-unsaturated media[J]. **Journal of Safety and Environment**, 2005, 5(5): 50—55.
- [3] 张玉军. 饱和—非饱和介质水—应力耦合弹塑性二维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 045—3 051
- ZHANG Yu-jun. 2D finite element analysis for coupled thermo hydro-mechanical processes in saturated-unsaturated media[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3 045—3 051.
- [4] 韦立德, 杨春和. 考虑饱和—非饱和渗流、温度和应力耦合的三维有限元程序研制[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 1 000—1 004.
- WEI Li-de, YANG Chun-he. Program development for 3D FEM of coupling saturated-unsaturated seepage, temperature and stress[J]. **Rock and soil Mechanics**, 2005, 26(6): 1 000—1 004.
- [5] (美) 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 裴觉民译. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [6] Jian-Hong Wu, Y. Ohnishi, S. Nishiyama. Simulation of the mechanical behavior of inclined jointed rock masses during tunnel construction using discontinuous deformation analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2004, (41): 731—743.
- [7] Y H Hatzora, A A Arzib, Y Zaslavskyc, A Shapira. Dynamic stability analysis of jointed rock slopes using the DDA method: King Herod's Palace, Masada, Israel[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2004, (41): 813—832.
- [8] Yang, M, Fukawa T, Ohnishi Y. The application of 3-dimensional DDA with a spherical rigid block for rock fall simulation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004: (41): 611—616.