

裂隙岩体固液两相介质的应力 耦合模型研究*

汤连生 周萃英

(中山大学地质学系, 广州 510275)

摘要 分析了渗流场与裂隙岩体形变场耦合关系的研究意义和现状,建立了裂隙岩体固液两相介质的应力耦合模型,模型中裂隙面的产状可直接采用野外实测数据.简单分析了模型的应用性.

关键词 渗流场, 应力场, 压缩刚度, 非连续裂隙网络, 耦合模型

边坡、坝基、围岩等众多工程岩体稳定性问题,基本上都是裂隙岩体形变场与渗流场作用下的岩体变形破坏问题,也是岩体力学与工程地质领域的前沿研究课题.但是,以往对有渗透作用的工程岩体稳定性问题的认识和处理有一定局限性.例如,对下列问题缺乏系统的认识,更没有系统的研究:(1)作为流体的水渗入到具有一定水力联系的岩体裂隙之后,在渗流作用下受力岩体的裂隙扩展机理和形变特征及其与水的渗流特征的关系;(2)水对岩体强度的腐蚀作用;(3)渗流场与岩体介质场、应力场和形变场的相互作用的过程及此作用下的岩体稳定性问题.

裂隙岩体是经过应力与地下水渗透作用而产生变形和破坏的地质体.岩体水力学这有待于开拓和完善的新学科应是以研究(裂隙)岩体中有地下水流现象与力学现象耦合作用时,岩体的再变形和再破坏规律为主要内容.研究裂隙岩体中地下水流现象与力学现象的耦合作用规律,就是建立裂隙岩体的地下水渗流场、应力场及其形变场之间的耦合关系;而研究裂隙岩体固液两相介质的应力耦合关系,应是岩体水力学的第一步工作,也是其核心内容之一.国内外许多学者对此进行了广泛的探讨.但迄今为止,人们还没有建立起令人满意的有关上述问题的关系式.要开拓和完善岩体水力学,必须尽早地解决此核心问题.

收稿日期: 1995-07-03

* 国家自然科学基金资助项目

1 关于渗流场与裂隙岩体形变场耦合问题的思考

实际上, 裂隙岩体工程问题是形变场和渗流场的耦合场问题 (Coupling field problems), 其特征是:

(1) 节理裂隙基本上控制了渗流场, 而裂隙岩体所受的应力变化对渗流过程产生巨大影响;

(2) 裂隙水渗流过程既对介质起着物理作用和化学作用, 使岩体性质恶化, 又对介质具有力学作用, 在岩体中产生附加荷载, 岩体发生变形或破裂, 进而导致应力迁移及地应力调整.

以上两方面的作用都将使形变场和岩体强度及介质场发生变化 (如裂隙被压缩或张开扩展等), 介质场的变化又将反过来改变渗流场. 尽管这种互反馈的改造作用对地下水动力学方面是微不足道的, 但对岩体的不稳定性却是至关重要的. 所以受力岩体变形破坏的中心问题是渗流场和应力场与形变场耦合过程和机制问题. 图 1 显示了渗流场、应力场与形变场或介质场之间的相互作用、耦合过程. 从图 1 知其耦合机理的研究应包括下列两方面内容: 裂隙岩体固液两相介质的应力耦合关系; 有渗流作用下的岩体节理断裂力学机制及强度理论, 此部分主要讨论地下水作用下应力场与形变场的耦合关系, 此外尚包括渗流水体对岩体的软化作用及岩体介质形变场对裂隙水渗流场的作用. 本文着重建立了裂隙岩体固液两相介质的应力耦合模型并讨论了其应用性.

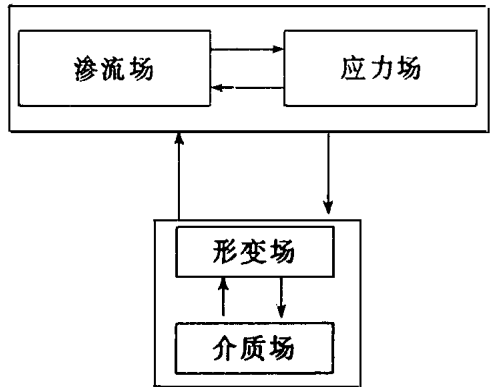


图 1 渗流场、应力场及形变场 (介质场) 的耦合关系

Fig. 1 The relations of vadose field and stress field and deformation field coupling in fractured rock mass

2 有水作用的结构面的变形性质

关于结构面变形性质的研究, 有人进行过探讨^[1,2]. 据此, 有水作用的结构面法向闭合变形曲线可用指数函数表示为:

$$u = u_0(1 - e^{-(e-P)K_n}) \quad (1)$$

由此可以得到结构面开度 b 为:

$$b = u_0 e^{-(e-P)K_n} \quad (2)$$

式中, u 为结构面闭合变形, u_0 为结构面最大压缩变形量, e 为结构面上的法向应力, P 为水压强, K_n 为结构面法向压缩刚度, Bandis 等^[3] 给出了 K_n 的确定方法:

$$K_n = K_{ni} \left(1 - \frac{\Delta u}{u_0} \right)^2 \quad (3)$$

K_{ni} 为结构面初始法向刚度, Δu 为结构面的闭合量, u_0 为结构面最大压缩变形量.

本文暂不考虑结构面的剪切变形.

3 裂隙岩体固液两相介质的应力耦合模型

3.1 建模

在具有有限长度任意组合的实际的非连续裂隙网络中, 将裂隙之间的汇交点或裂隙端点视为裂隙网络的节点, 与节点相衔接的裂隙条数为该节点的度数. 因而对任一节点 i , 取包含 i 节点并通过各衔接裂隙段的中部作一闭合曲线, 从而构成 i 节点的控制单元体^[4], 如图 2 所示. 假定该控制单元体处于三维应力场 ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}$) 中, 如图 3 所示. 设某时刻通过与 i 节点相衔接的第 j 裂隙段流进流出控制单元体的流量为 q_j , 控制单元体内各裂隙段上的垂向补排量为 w_j , 在 i 节点上作用的源汇量为 Q .

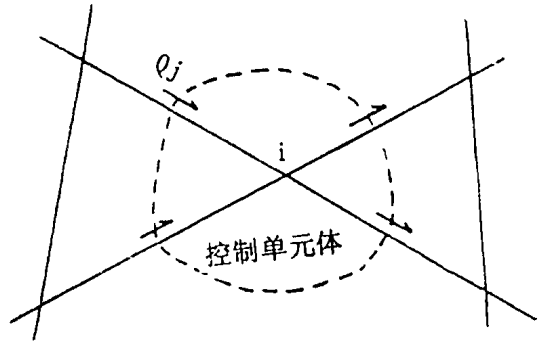


图 2 i 节点控制单元体示意图

Fig. 2 Diagram of control element for i node

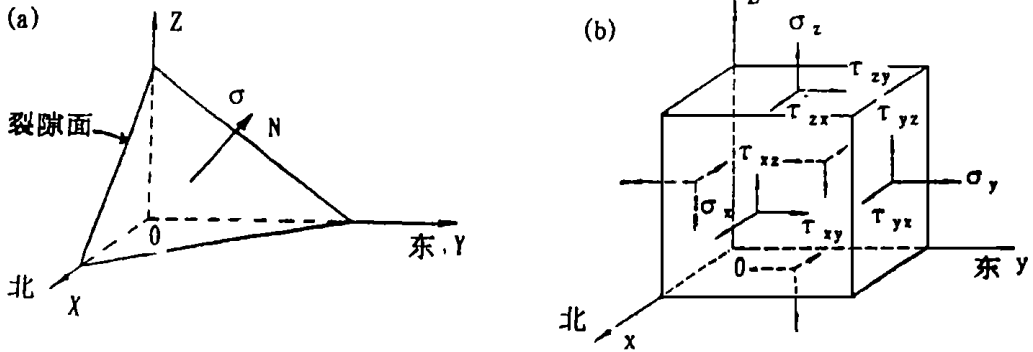


图 3 裂隙面法向应力 ϵ 计算图示

Fig. 3 Diagram of calculation for normal stress of fractured surface

根据水量守恒原理, 单位时间内, 流进流出控制单元体的水质量代数和与控制单元体内各裂隙段的水质量改变量之和相等, 则有:

$$\sum_{j=1}^m \rho_j q_j - \sum_{j=1}^m \rho_j w_j + \rho_i Q = - \sum_{j=1}^m \frac{d(\rho_j V_j)}{dt} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中, m 为 i 节点的度数, n 为模型中控制单元体总数, ρ_j 为与 i 节点衔接的第 j 裂隙段中水的密度, ρ_i 为控制单元体内水的平均密度, V_j 为控制单元体内第 j 裂隙段中的水体积 ($V_j = (1/2) b_l l h_j$, b_l 为隙宽, l 为裂隙段长度, h_j 为第 j 裂隙段中水层厚度).

按微分原理:

$$\frac{\Delta(dV)}{\Delta t} = \frac{V \Delta \rho}{\Delta t} \frac{dV}{V} \quad (5)$$

$$\Delta \rho = d\rho \Delta P \quad (6)$$

$$V = hbl \quad (7)$$

式中, U 为水的压缩系数 (m^2/N), W 为裂隙段的空隙度 (无量纲), 当裂隙段为通风裂隙时, 即无充填物, $W=1$; 当有充填物时, W 等于充填物的孔隙度; ΔP 为裂隙段中水的压强增量.

$$\Delta V = \frac{1}{2} (\Delta h b + h \Delta b) \quad (8)$$

取 $\Delta h = T \Delta P$, 且将 (2) 式代入上式并经整理后可得

$$\Delta V = \frac{1}{2} u_0 l h (T P e^{-(e_0 - P)/K_n} + h \Delta e^{-(e_0 - P)/K_n}) \quad (9)$$

式中, T 为裂隙段的压缩系数 (m^2/N). 将 (9), (6) 式和 (7) 式代入 (5) 式, 并考虑到 $P = VH$ (V 为水的容重), 然后取 $\Delta t \rightarrow 0$, 则得

$$\frac{d(dV)}{dt} = \frac{1}{2} d u_0 e^{-(e_0 - VH)/K_n} V_h (T + W) \frac{dH}{dt} + \frac{1}{2} d h l \frac{d(u_0 e^{-(e_0 - H)/K_n})}{dt} \quad (10)$$

取 $\alpha = V_h (T + W)$, α 为裂隙段的释水系数, 并将上式右边第二项展开整理后得

$$\frac{d(dV)}{dt} = \frac{1}{2} d l u_0 e^{-(e_0 - H)/K_n} + \frac{1}{2K_n} d h l u_0 e^{-(e_0 - H)/K_n} \frac{d(H - e)}{dt} \quad (11)$$

用 i 节点上水头改变量来代替各裂隙段的平均水头改变量, 则由 (11) 式可将 (4) 式右端项表示成

$$\sum_{j=1}^m \frac{d(d_j V_j)}{dt} = \sum_{j=1}^m \left[d l_{j-1} u_{0j} e^{-(e_j - V H_j)/K_n} \frac{dH_i}{dt} + \frac{1}{2K_n} d h_j l_j u_{0j} e^{-(e_j - V H_j)/K_n} \frac{d(H_i - e_j)}{dt} \right] \quad (12)$$

考虑到各裂隙段水中的密度相差甚小, 其改变量也很小, 因而可近似地取为控制单元体中水密度的平均值, 即: $d_j = d$

将上式及 (12) 式代入 (4) 式并经整理后得

$$\sum_{j=1}^m q_j - \sum_{j=1}^m W_j + Q = (C_i + d_i) \frac{dH_i}{dt} - d \sum_{j=1}^m \frac{d e_j}{dt} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (13)$$

式中, $C_i = \sum_{j=1}^m \frac{1}{2} l_{j-1} u_{0j} e^{-(e_j - V H_j)/K_n}$, $d_i = \sum_{j=1}^m \frac{1}{2K_n} l_j h_j u_{0j} e^{-(e_j - V H_j)/K_n}$; 其中 e_j 为第 j 段裂隙面上的法向应力, 为 e_x, e_y, e_z 和裂隙面倾向及倾角的函数; q_j 按以下条件确定:

当水流为层流时, $q_j = K_j I_j$; 当水流为紊流时, $q_j = K_j I_j^{1/2}$, 式中, $I_j = \Delta H_j / \Delta l_j$ 为裂隙段的平均水力梯度, K_j 为表征第 j 裂隙段导水性的一个综合系数, 相当于单裂隙渗透系数, 视裂隙几何参数 (如隙壁粗糙度、隙宽、填充特征等) 及水动力特征的不同, 将有不同的表达式, 同时也随着地应力和水压力变化而变化. 当隙壁光滑、等隙宽时有

$$K_j = \frac{V h_j}{12Y} u_{0j}^3 e^{-3(e_j - H_j)/K_n} \quad (14)$$

式中 Y 为水的粘滞系数, 其它符号同上.

方程 (13) 式即为裂隙岩体固液两相介质的应力耦合模型的基本微分方程. 它是与控制单元体离散非连续裂隙网络模型而形成的离散型方程. 模型方程中 $\sum_{j=1}^m q_j$ 和右边项反映了裂隙岩体渗流特征或渗流过程 (如裂隙段水流量和水压力分布) 随着岩体地应力的变化而变化, 同时裂隙面所受的有效应力 ($e - HV$) 随着渗流过程而变化. 此耦合方程既能适合

有压渗流又能适合无压渗流。

对于浅层地下水,可以忽略地下水的压缩性,即可近似地认为 $\psi > 0$,因此方程中的 β 应为裂隙段重力释水系数;而对于深层水,由于裂隙水压力很高,水的压缩就不能忽略,此时方程中的 β 应为裂隙段的弹性释水系数,而裂隙面的变形性质对渗流的影响也在模型方程中右边第 2 项中反映出来了。

3.2 模型方程矩阵形式

按裂隙网络的矩阵表示可将 (13) 式写成矩阵方程。下面先定义裂隙网络的两个矩阵^[4]。

对于有 n 个节点, m 条线元(节点间的裂隙段)的有向裂隙网络 F , 定义矩阵:

$$A = [a_{ij}]_{n \times m} \quad (15)$$

其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{线元 } j \text{ 不衔接于节点 } i; \\ +1, & \text{线元 } j \text{ 衔接于节点 } i, \text{ 且方向离开节点 } i; \\ -1, & \text{线元 } j \text{ 衔接于节点 } i, \text{ 且方向指向节点 } i. \end{cases}$$

则称 A 为 F 的衔接矩阵,它描述了 F 中线元与节点的衔接关系。若将 A 中的 -1 取成 $+1$, 则得到 A 的关联矩阵 A_d 。

设任一有向连通裂隙网络(其中各线元均为导水的裂隙段)的节点数为 n , 线元总数为 m , 其衔接矩阵为 A , 关联矩阵为 A_d , 则模型方程 (13) 式可写成矩阵方程:

$$Qq - A\Delta W + Q = (C + D) \frac{dH}{dt} - D \frac{de}{dt} \quad (16)$$

式中, $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$, $\Delta W = (\Delta w_1, \Delta w_2, \dots, \Delta w_m)^T$, $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n)^T$, $H = (H_1, H_2, \dots, H_n)^T$, $e = (e_1, e_2, \dots, e_m)^T$,

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & c_n \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & d_n \end{bmatrix}$$

4 裂隙面法向应力 e 的计算

控制单元体受力情况如图 3(b) 所示。设控制单元体中某一裂隙面的法线方向 N 与 x, y, z 轴的夹角分别为 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ (如图 3(a) 所示), 则有:

$$e = e_x \cos^2 \theta_x + e_y \cos^2 \theta_y + e_z \cos^2 \theta_z + 2(f_{xy} \cos \theta_x \cos \theta_y + f_{yz} \cos \theta_y \cos \theta_z + f_{xz} \cos \theta_x \cos \theta_z) \quad (17)$$

若此裂隙面在野外测量的倾向和倾角分别为 h 和 j , 且取空间坐标系的 x 轴方向为正北方向, xoy 平面方向为水平方向, 则据图 3 的几何关系可得

$$\cos \theta_x = \cos j \cos h, \quad \cos \theta_y = \cos j \sin h, \quad \cos \theta_z = \cos j \quad (18)$$

根据 (17) 式和 (18) 式即可直接从野外测量获得的岩体各点的地应力和各条裂隙的产状计算出各条裂隙面法向应力 e 。由此可知, 当空间坐标系取定后, e 为 $e_x, e_y, e_z, f_{xy}, f_{yz}, f_{xz}$ 以及 h 和 j 的函数。因而非连续裂隙岩体固液两相介质的应力耦合模型方程加其边界条件和初始条件的求解可直接采用裂隙产状的实测值, 这大大方便了耦合模型

的应用.

5 耦合模型的应用

本文据文献〔5〕的计算方法对剖面(二维)无压渗流问题,以一理想的斜交裂隙网络为例,对地应力发生变化情况的岩体裂隙水稳定流进行计算.

图 4 为由两组裂隙斜交所构成的裂隙网络,其中有一条较宽大裂隙(隙宽为其它裂隙隙宽的 3 倍,而其它裂隙面法向压缩刚度为宽大裂隙面法向压缩刚度的 1/3 倍),其它裂隙段的隙宽相同,所有裂隙无充填;取底部为隔水边界,地表为二类边界,当有降水时,其补给量等于降水入渗量;左侧水位 80m,右侧水位 30m;取网络模型所受到的应力 $\epsilon_x = \epsilon_y = 0$ (即无应力作用)进行计算.从图中可知,宽大裂隙上游侧的自由坡降小于下游侧的坡降,而且下游侧的等水头线较密,穿越宽大裂隙的等水头线发生弯曲,这些反映了宽大裂隙的强导水作用.

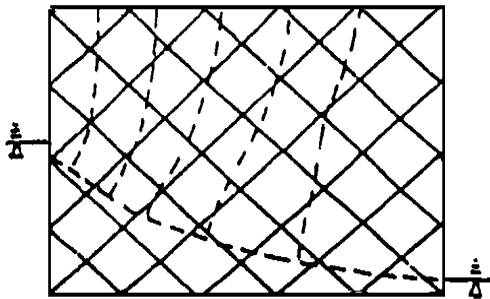


图 4 无地应力时的剖面渗流场

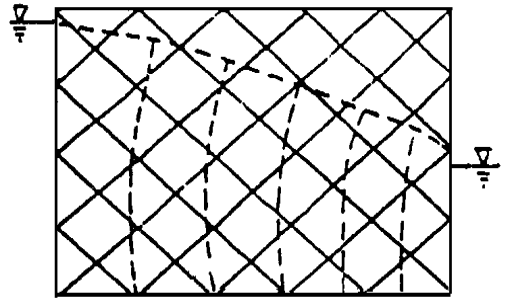


图 5 有地应力时的剖面渗流场

fig. 4 Vadose field of section without ground stress

Fig. 5 Vadose field of section with ground stress

当上述裂隙网络所受应力为 $\epsilon_x = \epsilon_y = 1.0 \text{ MPa}$ 时,其渗流场如图 5 所示.从图中可看出,原宽大裂隙的强导水作用性已不大了,自由面的坡降变化不大,等水头线分布比图 4 更均匀.由此可知,岩体应力的变化对裂隙水渗流的影响是巨大的.

6 结 语

裂隙岩体固液两相介质耦合关系的研究是岩体变形破坏的中心问题,它包括固液两相介质应力耦合关系及渗流场与形变场之间的耦合关系两个方面的内容.本文建立了固液两相介质的应力耦合模型,此其首要的也是重要的一步.文中还给出了野外实测裂隙的产状(倾向、倾角)与模型中裂隙面外法线方向和坐标轴之间夹角的相互转换关系,使得模型的建立可直接采用野外实测产状,大大方便了耦合模型的应用.

应力耦合模型的建立是初步的,有待进一步研究及推广应用.而渗流场与形变场之间的耦合关系则涵盖了更为广泛的研究内容,也是今后应当加强的重点研究方面.

关于固液两相介质的耦合理论研究,目前还只是处于刚刚起步的阶段.要在理论上从本构关系着手建立渗流场、应力场与形变场之间的耦合关系还很困难,有待今后进一

步研究.

参 考 文 献

- 1 Goodman R E. The mechanical properties of joints. Proc. 3rd Congr. ISRM, Denva. 1974. Vol. 1a, 127~ 140
- 2 孙广忠. 岩体结构力学. 北京: 科学出版社, 1988. 198
- 3 Bandis B C etc. Fundamentals of rock joint deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sei. 1983, 20(6): 249~ 268
- 4 王思志. 岩体裂隙的网络分析及渗流模型. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(3)
- 5 王恩志. 剖面二维裂隙网络渗流计算方法. 水文地质工程地质, 1993, 20(4)

The Research on Stress Coupling Model of Solid-Liquid Media of Fractured Rock Mass

*Tang Liansheng** *Zhou Cuiying*

Abstract In the paper, the significance and the present states of the research on the coupled relationship between the vadose field and the deformation field in fractured rock mass is analysed. The stress coupling model of the two-phase media (Solid-liquid) of fractured rock mass is built. Besides, the attitude of the fractures in the model may use the surveyed data directly by a certain transformation relationship which we gave in the paper. And then, the applicability of the coupling model is preliminary analysed. At last, the key problem in the future is pointed out.

Keywords vadose field, stress field, noncontinuous fracture networks, compression stiffness, coupling model.

* Department of Geology, Zhongshan University, Guangzhou 510275