软硬互层状岩体的裂隙网络模拟

卢　刚，周志芳

（河海大学土木工程学院，江苏 南京 210098）

摘　要：区别于一般岩体裂隙发育规律，软硬互层状岩体中裂隙有其特有的规律。本文在阐述软硬互层状岩体的裂隙发育规律的基础上，综合考虑裂隙发育规律的形成机理，给出了互层状岩体中的离散裂隙网络的建模方法。通过一个实例证明了本文方法的可行性。实例表明：软硬互层状岩体中的地下水运动受到层面和切层裂隙组合的控制，故研究层状岩体中的裂隙生成方法是有必要的。

关键词：互层岩体；层内裂隙；切层裂隙

作者简介：卢　刚(1977－　)，男，博士研究生，从事地下水运移模拟方向的研究。

0　前　　言

对于裂隙岩体，其中的流体运动主要依赖于裂隙网络的几何特性及裂隙的渗透性。模拟裂隙岩体水力特性有两种基本模型：①连续介质模型，借用比较成熟的多孔介质中的渗透张量理论，其应用取决于裂隙岩体是否存在典型单元体，当裂隙岩体不存在典型单元体时，连续介质模型难以适用；②离散裂隙网络模型，计算机技术的高速发展使得建立离散裂隙网络模型成为可能，其根据岩体中裂隙发育的统计特征或分行特征，运用统计学方法，如 Monte—Carlo 法和分行学方法来建立离散裂隙网络模型。近年来，离散网络建立的得到较大的发展，它们一般都用于描述结晶岩石和变质岩中的裂隙网络，但是不适用于层状岩体中裂隙网络的建立。由于仅张开裂隙对地下流体的运移作出贡献，本文研究的主要对象为层状岩体中的张开裂隙。

对于层状岩体中的裂隙网络的生成，国内外研究为数不多[1-2]，他们一般都是基于某一具体露头的研究，其裂隙生成方法存在着较大的局限性；对于层状岩体中一般离散裂隙网络的生成的研究国内外尚不多见而对于软硬互层状岩体中离散裂隙网络的研究也很少。本文在前人研究的基础上出发，从软硬互层状岩体中的裂隙发育规律出发，考虑裂隙发育的机理，对其中的二维剖面离散裂隙网络的生成做了一部分研究工作。

1　互层状岩体中的裂隙发育规律

互层状岩体根据软硬岩性组合特征一般可以分为四类：层状薄层软、硬岩组合体；互层状中厚层、厚层软、硬岩组合体，即几层硬岩与几层软岩呈相间互层；层、中厚层硬岩夹薄层软岩组合体；厚层、中厚层软岩夹薄层硬岩组合体。不同类型层状岩体中的裂隙发育规律不同，以下所述的裂隙发育规律主要是仅针对第二种层状而言。

层状岩体中的裂隙的发育往往具有较强的规律性。一般来说，层状岩体中的裂隙分为层面裂隙和构造裂隙两种。

1.1　层面裂隙

有明显可辨的层面是层状地层的最突出特征。层状岩体有延伸较长的层面结构面，按力学强度，层面是相对薄弱面。层状岩石具有较大的各向异性，在自重作用下，若层面倾角很缓，顺层面的应力较大，层面会出现张性或剪切破坏。对于互层结构，常有相对不透水岩层，相对透水层中发育的裂隙也会形成顺层向渗透。严格地说，层面都是透水的，但其透水性由于层面起伏等原因，使层面裂隙宽度有较大差别，具透水性也就有大有小了。因此，对层状岩体，在一般情况下，层面可视为无限延伸的裂隙[3]。

1.2　构造裂隙

构造裂隙多为与层面近似正交的裂隙。构造裂隙根据其与层面的相交方式，又可以分为层内裂隙和切层裂隙。

(1) 层内裂隙

构造裂隙从岩层中不连续点或微小裂纹，应力集中扩展。它们从开展点近似放射形，在垂直层面方向上扩展。在理想的均质介质中，裂隙的扩展不会受到不连续面的阻止，裂隙的形状一般为圆形或椭圆形，其长轴方向平行与岩体层面。然而在层状岩体中，裂隙的垂直方向的扩展受沉积不连续面，作为岩体内部力学边界，阻断，水平方向的生长可能由于与其他裂隙的力学相互作用而受限制；作为剖面问题对待时，在水平方向的延伸可以不考虑。因此在层状沉积岩，裂隙形状可以近似为矩形形状。层内裂隙主要发育在脆性岩层中，受软弱岩层和层性层面控制，它们切割和延伸小，但密度大，构成完整的层状裂隙网络，大大提高了脆性岩层的渗透性。对于给定岩层厚度，室内试验和野外观测表明：随着裂隙密度的增大，裂隙间距的分布从负指数分布，经对数正态分布，变化到正态分布。观测中的最大密度的裂隙间距的正态分布可能是每组裂隙潜在的发展趋势。这种情状，岩层中的裂隙发育达到饱和状态。国内外研究还表明：层内裂隙的分布还存在近似为等距分布的情况。孙广忠[4]对层状岩体等级序的节理裂隙

基金项目：国家自然科学重点基金资助项目（50239007）；国家自然科学基金资助项目（50579012）

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

作了大量的统计研究，指出层状岩体的节理裂隙等间距性的广泛存在，并且节理间距与其所切穿的岩层厚度有关，节理间距大体上等于切割岩体厚度的 1/2，多数为 1/1。吴占寿[5]也对节理裂隙的等间距分布做了研究，节理裂隙的等间距确实存在，并指出影响节理裂隙间距大小的因素很多，且对于具体的地方所得到的定量关系也不尽一致。裂隙间距与岩层的厚度之间存在近似线性关系且因地而异。国外研究表明裂隙间距跟岩层厚度的比值从 0.1～10[6]。

(2) 切层裂隙

众多层内裂隙中，有的裂隙发育、切割深度不受层面和岩性控制，其切层贯通性好，切割（或追踪贯通）深度较大，平面延伸长度也较长，但裂隙面两侧岩体没有明显错动，称为切层裂隙。切层裂隙在同组裂隙中所占的比例随地点变化而异，但一般为 5%～25%[6-7]。切层裂隙可能中止与岩体的内部，对于研究岩体中的水运动来说这段裂隙是死端裂隙，对裂隙水的运动没有贡献，可以不予考虑，因此在文中对切层裂隙作如下假设：切层裂隙与层内裂隙相比，同样终止于层面；不同的只是切层裂隙切穿岩体超过一层。切层裂隙在岩体中的空间分布以及其长度分布的研究还很少，一般认为切层裂隙的分布具有较大的随机性。

2　裂隙发育的形成机理

张开裂隙的形成最常见的机制是平行于层面的拉伸。下面的裂隙发育机理也基于平行层面方向的拉伸考虑。

2.1　层内裂隙

自 19 世纪 40 年代，前苏联地质学家发现了层状岩体中裂隙间距与岩层厚度的近似线性关系以后，陆续有不少模型被提出来用以描述这种近似线性关系的力学成因。其中主要包括应力传递模型和应力阴影模型。

(1) 应力传递模型

基于应力传递模型，Hobbs[7]（1967）推导了裂隙间距与岩层厚度的线性关系，其与裂隙岩层的杨氏模量，相邻岩层的剪切模量有关。特别，当给定相邻层的平均应变时，裂隙间距与岩层厚度的比值可以用下式表示：

$$\frac{S}{T_f}=\left(\frac{1}{2}\right)^n\left(\frac{E_f}{G_n}\right)^{1/2}\cosh^{-1}\left(\frac{\varepsilon_{ave}}{\varepsilon_{ave}-\varepsilon_T}\right)\quad,\qquad(1)$$

其中：S 为裂隙间距，T_f 为岩性层厚度，G_n 为相邻层的剪切模量，ε_T 为由 σ_T/E_f 确定的岩层的最大张应变，σ_T 为岩层的抗拉强度；当已有的两个裂隙中的应力达到岩层的抗拉强度之前，n 为 0；应力达到抗拉强度后，新的裂隙形成，$n=1$，应力降低。顺序增加总的平均应变 ε_{ave}，裂隙继续充填，n 增加，S/T_f 减小。即随着总的应变增加，裂隙逐步充填，裂隙间距减小。这个模型不能很好解释裂隙饱和现象以及与一些野外观测和试验结果不符。

(2) 应力阴影模型

应力阴影模型认为在张开裂隙表面上，当裂隙中不存在水压力时，垂直于裂隙表面的应力为零。随着与裂隙表面距离的增加，垂直裂隙表面的应力逐渐增大，最终达到远端应力值。在这个垂直于裂隙表面方向应力逐渐增大而未达到远端应力水平的范围，不能形成新的裂隙，因为这个区域内的应力水平较低，低于岩体的断裂应力，由此可以定义给定荷载下的岩体中的最小间距。

Pollard, Segall[8]基于二维平面应变问题给出了均质各向同性介质中张开裂隙的应力阴影模型。两个裂隙之间的最小距离依赖于垂直与裂隙方向应力恢复与远端应力的百分比值。这个距离于裂隙的高度，即岩性层的厚度成比例。具体表达如下式：

$$\frac{S}{T_f}=\frac{1}{2}\frac{C^{1/3}}{\sqrt{1-C^{2/3}}}\quad,\qquad(2)$$

式中　C 为裂隙外部某点应力与未衰减时应力的百分比值。给定岩性层厚度时，根据 C 的不同取值，可以确定裂隙间的最小间距。本文中的裂隙最小间距即由此模型确定。

2.2　切层裂隙

对于切层裂隙的形成主要有两种认识：①认为其与层内裂隙在同期应力场中形成，是在层内裂隙形成的后期，层内裂隙的发展到一定的阶段，当裂隙发育达到饱和阶段，不再有新的裂隙产生，此时原有的裂隙张开应容纳岩体所受的应变而形成贯穿整个岩体的裂隙，见图 1[9]；②认为切层裂隙的形成与层内裂隙的形成属不同期构造场产物，切层裂隙是后期构造或风化卸荷追踪层内裂隙而形成的。

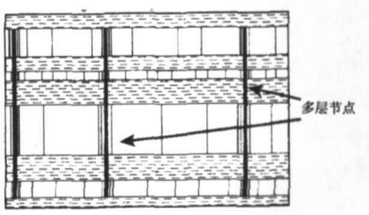

图 1 切层裂隙示意图

3　裂隙网络建模

3.1　层面裂隙的生成

在定义了岩体的大小，假设岩层是水平的，及每个岩层代表一个岩性力学层。这些沉积不连续面被当作力学接触面来处理，即不连续面的两侧岩层可有不同的力学性质。岩层的厚度分布认为服从对数正态分布，给定岩层厚度的均值和方差随机产生各层厚度。随机确定其中的软岩层。

3.2　构造裂隙的生成

(1) 层内裂隙的生成

对于给定岩层厚度，按照裂隙的发育程度，裂隙间距可以是负指数分布，对数正态分布或者正态分布以及近似的平均分布。给定裂隙的间距均值和方差，按照某一方向逐渐生成裂隙。相邻裂隙间的间距还要满足应力折减阴影这一规律，即在某一裂隙的折减阴影内不能存在其他的裂

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

隙；两条裂隙的应力折减阴影可以重叠。

由于层内裂隙都限制在岩性层内，所以其高度为岩性层的厚度；这里仅考虑剖面问题，所以水平方向的裂隙长度暂不考虑。由于软岩层内的裂隙多为闭合，所以不考虑软岩层中的层内裂隙。软岩层中仅存在切层裂隙。

(2) 切层裂隙的生成

根据切层裂隙的发育机理，切层裂隙的形成有两种形式：一种是层内裂隙同期形成的切穿所有层的贯穿裂隙；一种后期形成的追踪裂隙，其可能切穿比较少的岩层，也可能切穿所有岩层。由于上述对两种切层的裂隙的发育规律尚没有研究，本文这里假设其随机分布，且都由层内裂隙扩展形成。根据切层裂隙的所占总数的比例，给定两个表征由层内裂隙发展形成切层裂隙个概率的参数 $P1, P2$。在层内裂隙产生以后，随机给定一个随机数 p，如果 $p > P2$ 则裂隙扩展形成贯穿整个研究岩层的裂隙，如果 $P1 > p > P2$，则裂隙扩展切穿下一岩层；其扩展到下一岩层的部分根据其在下一岩层中的次序再重复上述赋随机值、进行比较的过程，即可确定其是否继续扩展。

4 应 用

根据上述互层状岩体中的裂隙产生方法，在 5 m×10 m 的研究区域内生成如下的裂隙网络。如图 2 所示，图中虚线填充部分为软岩。分别取上、下方边界为定水头边界，上边界水头为 5 m，下边界水头为 0 m；其余为流量（隔水）边界。采用离散裂隙网络渗流模型求解渗流场；图 3、4 为计算所得的水位等值线图以及流速矢量图。

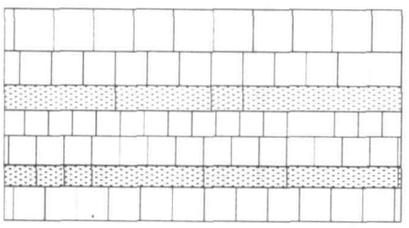

图 2 离散裂隙网络图

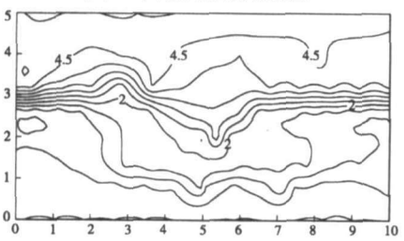

图 3 裂隙网络模型计算等值线图

由等值线图及流速矢量图可看出，地下水在软岩层面上以水平运动为主；仅在切层裂隙处存在垂向渗流，且流速矢量较大，这是由于切层裂隙的存在破坏了软弱岩体的相对隔水性，在上下硬岩间产生水力联系，地下水仅在切层裂隙处下渗，使得地下水在其中分布很不均匀。这说明层状岩体渗流场受控于软岩及切穿它的切层裂隙的组合。

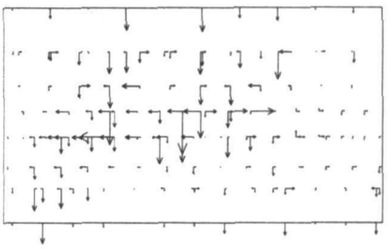

图 4 裂隙网络模型计算流速矢量图

5 结 语

区别常见的裂隙生成方法，软硬互层状岩体中裂隙发育规律不同于一般岩体，因此其中的离散裂隙网络也生成也有所不同，本文在阐述裂隙发育规律的基础上，综合考虑裂隙发育机理，对软硬互层中裂隙的生成进行了初步的探讨。相对与层内裂隙，切层裂隙控制着互层岩体中的渗流场，而对于切层裂隙的研究尚很少，有待进一步研究。

参考文献：

[1] GRINGARTEN Emmanuel. Fracner: Stochastic simulation of fractures in layered systems[J]. Computers & Geosciences, 1998,**24**(8): 729 - 736.

[2] PASCAL Christophe, ANGELIER Jacques, CACAS Marie Christine, HANCOCK Paul L. Distribution of joints: probabilistic modelling and case study near Cardiff[J]. Journal of Structural Geology, 1997, **19**(10):1273 - 1284.

[3] 张有天.岩石水力学与工程[M].北京:中国水利水电出版社，2005:243 - 244.

[4] 孙广忠.岩体结构力学[M].北京:科学出版社,1988:44 - 46.

[5] 吴占寿.岩体断裂的等间距规律初探[J].南昌水专学报,1995,**14**(1):33 - 38.

[6] BAI Tai-xu, POLLARD David D. Fracture spacing in layered rocks: a new explanation based on the stress transition[J]. Journal of Structural Geology, 2000,**22**(10):43 - 57.

[7] HOBBS D W. The formation of tension joints in sedimentary rocks: an explanation[J]. Geological Magazine, 1967,**104**:550 - 556.

[8] POLLARD D D, SEGALL P. Theoretical displacements and stresses near fracture in rocks: with application to faults, joints, veins, dikes and solution surfaces[M]// ATKINSON B K (Ed). Fracture Mechanics of Rock. London: Academic Press, 227 - 349.

[9] BECKER Alexander, GROSS Michael R. Mechanism for joint saturation in mechanical layered rocks: an example from southern Israel[J]. Tectonophysics, 1996, **257**:223 - 237.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net