

# 大连地下石油储备库初始渗流场数值反演

于 崇<sup>1</sup>, 李海波<sup>1</sup>, 李国文<sup>2</sup>, 夏 祥<sup>1</sup>, 谢 冰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 大庆油田工程有限公司, 黑龙江 大庆 163712)

**摘要:** 初始渗流场分析是水封式地下石油储备库设计中的重要内容和先决条件, 现场压水试验只能提供较准确的各向同性渗透系数, 而不能反映各向异性的渗透特征。结合大连地下石油储备库工程, 提出一种基于随机节理网络模拟技术反演岩体各向异性渗透特征的方法。首先, 采用三维离散元程序 3DEC 内置的 Fish 语言, 直接生成不同尺寸的三维节理网络模型, 通过推导的判别式来统计模型中各组节理的个数及产状信息。其次, 利用裂隙介质的渗透张量理论计算不同尺寸的岩体渗透张量, 进而确定节理岩体的表征体元(REV)。根据现场压水试验实测资料, 修正节理岩体的渗透张量, 再利用 Matlab 软件计算渗透主值及渗透特征向量。最后, 考虑渗透系数的空间正交各向异性, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 的 FI\_anisotropic 的渗流模型反演库区的初始渗流场, 为水封式地下石油储备库水幕设计及稳定性分析提供较合理的初始渗流场条件。

**关键词:** 岩石力学; 初始渗流场; 数值反演; 石油储备

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)03 - 0609 - 08

## INVERSION ANALYSIS OF INITIAL SEEPAGE FIELD OF DALIAN UNDERGROUND OIL STORAGE CAVERN

YU Chong<sup>1</sup>, LI Haibo<sup>1</sup>, LI Guowen<sup>2</sup>, XIA Xiang<sup>1</sup>, XIE Bing<sup>1</sup>

(1. State Key laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Daqing Oilfield Engineering Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712, China)

**Abstract:** The initial seepage field analysis is prerequisite and important content for the water-tight underground oil cavern design. Although the field water pressure test can provide a more accurate isotropic permeability coefficient, which does not reflect the anisotropy permeability of jointed rock mass. In initial seepage field analysis of Dalian underground oil storage cavern, based on joints network simulation technique, a new method for calculating the anisotropy permeability is proposed. Firstly, different sizes of three-dimensional random joint networks are generated with the programming language Fish embedded within 3DEC. The values of joint geometric characters and number of random joints in each group are decided through the derivable formulas. Different sizes of rock permeability tensor are calculated based on fractured rock permeability tensor theory; meantime, with the size of three-dimensional random joint networks increasing, representative elementary volume is also determined until rock permeability tensor is not changed obviously. As the difficulty of fracture width measurement, some fracture fillings and the presence of non-connected, as well as the impact of fracture roughness, the calculated permeability tensor have a certain degree of error in value. It is necessary to amend

**收稿日期:** 2009 - 09 - 14; **修回日期:** 2009 - 11 - 11

**作者简介:** 于 崇(1981 - ), 男, 2007 年毕业于辽宁工程技术大学岩土工程专业, 现为博士研究生, 主要从事地下工程稳定性方面的研究工作。  
E-mail: yuchongsir@163.com

according to field water pressure test. Principal value and characteristic vector of permeability tensor are easily calculated with Matlab software. Finally, considering the space orthotropic permeability coefficient, the initial seepage inversion is completed with the fl\_anisotropic model within FLAC<sup>3D</sup>, the fl\_anisotropic model parameters are obtained from principal value and characteristic vector of permeability tensor. The inversion analysis provides initial seepage field for water-tight underground oil cavern water curtain design and stability analysis.

**Key words:** rock mechanics; initial seepage field; inversion simulation; oil storage

## 1 引言

随着经济的高速增长,我国对石油的消耗量也迅速攀升。然而国内的石油产量增速远滞后于石油的消耗量增速,促使中国对外石油的依存度不断加大。在特定的时期,受世界政治、经济、军事形势的影响及少数大国的操控,完全可能出现我国石油远不能满足国内需求的严重局面。为避免此种局面出现,急需建立石油战略储备库,确保我国能源安全,维护国民经济健康发展。

石油储备主要有地上储备和地下储备 2 种方法。其中地下储备具有占地省、安全性高、对景观破坏小、维修费低、投资省、适合战备要求的诸多优点,具备建设地下储备库条件的国家,都把地下石油库作为本国石油战略储备的主要手段。地下储油主要指地下盐穴或硬岩岩洞储油。许多国家和地区不易找到理想的盐矿地质环境,从而采用在硬岩中开挖人工洞室群储备石油。

储油洞室位于稳定的地下水位线以下。洞室开挖前,地下水通过节理裂隙等渗透到岩层的深部并完全充满岩层空隙。当储油洞库开挖形成后,周围岩石中的裂隙水就向被挖空的洞室流动。在洞室中注入油品后,油品周围会存在一定的压力差,因而在任一油面上,水压力都大于油压力,使油品不能从裂隙中漏走。同时利用油比水轻以及油水不能混合的性质,流入洞内的水则沿洞壁汇集到洞底部形成水床,并由油泵抽出<sup>[1, 2]</sup>。在运营期整个储油洞室处在裂隙水的包围之中,因而此种储油方式又称为水封式地下石油储备。

在水封式地下石油储备设计中,初始渗流场分析是水封式地下石油储备库设计中的重要内容和先决条件。为了获得岩体渗透特性常采用现场试验法,该法假定岩体的渗透特性为各向同性,基于压水试验求解岩体的渗透系数<sup>[3]</sup>,得到的渗透系数为均质各向同性参数,无法反映裂隙岩体的各向异性特征<sup>[4]</sup>。渗透特性的各向异性取决于节理网络分布状况,而

节理样本可能比较分散,在一个区间内随机变化。本文结合大连地下石油储备库工程,提出一种基于随机节理网络模拟技术反演岩体各向异性渗透特征的方法。首先利用三维离散元程序 3DEC 内置的 Fish 语言,直接生成不同尺寸的三维节理网络模型,通过几何关系推导出节理与模型相交的判别关系式,从而决定不同尺寸模型计算区域中各组节理的个数及产状信息。然后利用裂隙介质的渗透张量理论计算不同尺寸的岩体渗透张量,进而确定节理岩体的表征体元(REV)。由于裂隙开度测量的困难性、节理面粗糙度等因素的影响,计算所得的渗透张量在数值上会存在一定误差,但是该误差只是主渗透系数张量数值上的变化,而不引起其方向的变化,主渗透系数张量的方向只取决于节理组的产状<sup>[4]</sup>。为了弥补渗透系数张量在数值上的误差,根据现场压水试验实测渗透系数,修正节理岩体的渗透张量,再利用 Matlab 软件计算渗透主值及渗透特征向量,最后利用 FLAC<sup>3D</sup> 的 Flanisotropic 的渗流模型,考虑渗透系数的空间正交各向异性,依据计算求得渗透系数反演库区的初始渗流场。

## 2 工程概况

大连地下石油储备库目前正在可行性研究阶段,库区内采用地下开凿硬岩水封式的储备方式。

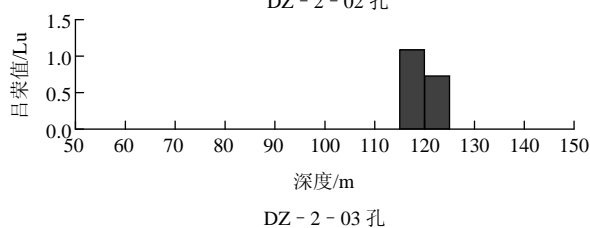
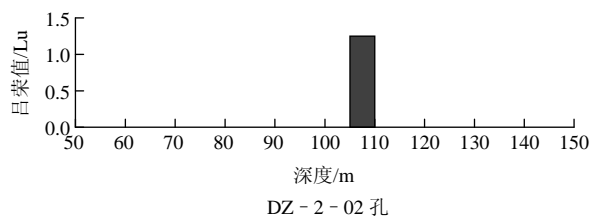
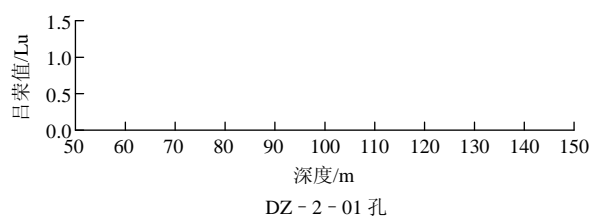
库址属太古宇深层变质岩系,得胜片麻岩组,库区内没有大的露头,新鲜岩石致密、硬度高,而且质量大。部分露头风化较强,属强风化带,片麻状节理清晰,岩石成片脱落,岩脉较少,岩体成块状。微风化斜长角闪片麻岩的单轴饱和抗压强度在 77.45~92.34 MPa 以上,属于坚硬岩。岩体完整,岩体结构类型为整体块状结构。除极个别小范围内岩体纵波波速偏低外,3 个钻孔岩体平均纵波速度均 >4 500 m/s, RQD > 90%,局部达 100%。根据规范<sup>[5]</sup>,场区微风化斜长角闪片麻岩 BQ 值评分均属于 I~II 级;根据规范<sup>[6]</sup>,场区微风化斜长角闪片麻岩 T 值评分均属于 I~II 级;根据南非科学和工业

研究委员会(CSIR)提出的 CSIR 分类指标, 场区微风化斜长角闪片麻岩 RMR 值评分均属于 I~II 级<sup>[7]</sup>。

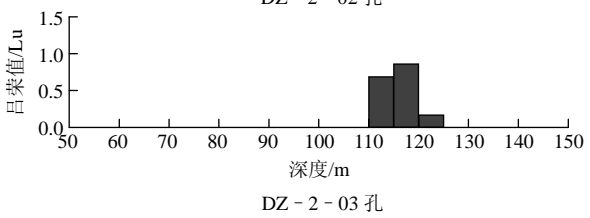
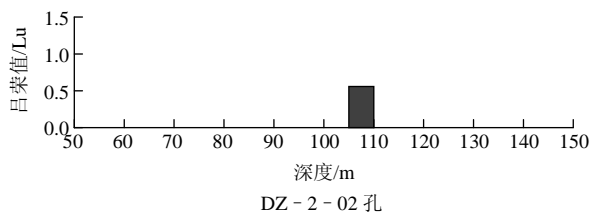
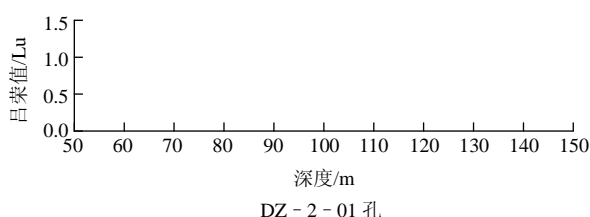
### 3 库区现场渗透性测量及数据分析

根据岩土工程勘察评价报告<sup>[7]</sup>, 库区内在 3 个深钻孔一共完成了 36 段压水试验。图 1 为在工程区 3 个钻孔 36 段压水试验及其成果。

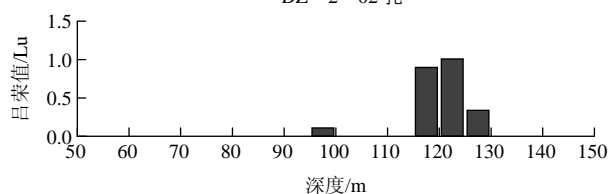
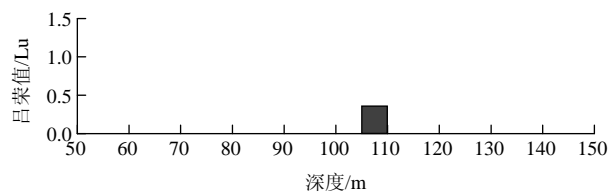
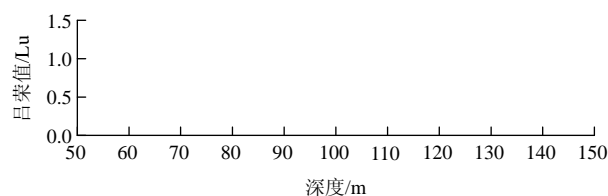
图 1 中横坐标为试验点的深度, 纵坐标为吕荣值, 即: 1 吕荣为 1 m 试验长度、在 1 MPa 试验压力下, 压入流量为 1 L/min 时的透水性。



(a) 地面压力为 0.4 MPa



(b) 地面压力为 1.0 MPa



(c) 地面压力为 1.6 MPa

图 1 3 个钻孔压水试验结果

Fig.1 Water pressure tests in 3 boreholes under ground pressure

结果表明: 试验深度域内在地面压力为 1.6 MPa 下, DZ - 2 - 02 孔有 1 段和 DZ - 2 - 03 孔有 4 段 1.0~9.0 Lu/min 左右的流量, 吕荣值基本上 <1.0 Lu, 占试验段总数的 13.89%。比较 3 个钻孔, DZ - 2 - 01 孔透水率最小, DZ - 2 - 02 孔透水率次之, DZ - 2 - 03 孔透水率最大, 但透水率均不超过 1.5 Lu, 3 个钻孔在测量深度域内的岩石完整段不透水, 裂隙段透水率低连通性差, 说明岩体具有抵御高水头作用的能力。

根据试验结果计算了岩体的渗透系数, 个别试验段渗透系数在  $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  量级, 其他试验段渗透系数更低。36 段压水试验中, 只有 4 段在 5 个压力阶段有流量, 确定出的  $P-Q$  曲线类型, 主要为充填型。

### 4 库区初始渗流场数值反演

假设岩体为各向同性的多孔介质, 可以根据现场单孔压水试验计算岩体的渗透系数, 而实际岩体的渗透特性具有明显的各向异性。

要反映岩体各项异性渗透特征, 必须反映节理岩体的网络分布。本文依据现场地质调查资料, 基于三维离散元程序 3DEC, 直接生成三维节理网络。利用推导的判别式, 统计不同尺寸计算区域内节理的产状信息和节理条数。在此基础上, 依据裂隙岩

体渗透张量理论，确定岩体的表征体元及渗透张量。经过现场实测渗透系数的修正后，再利用 Matlab 软件计算渗透主值及渗透特征向量。最后，采用等效连续介质模型的方法，利用 FLAC<sup>3D</sup> 的空间正交各向异性渗流模型 Fl\_anisotropic 反演库区的初始渗流场。

4.1 三维节理网络模型的生成

三维节理网络模拟技术是借助于计算机实现岩体内部大量节理随机分布的几何特征。目前国内外学者主要采用传统法和直接法来实现三维节理网络的数值模拟。传统法是根据现场地质调查划分优势节理组，假设节理面的迹长、间距、产状等服从某种分布形式，再根据分布密度函数利用 Monte Carlo 法模拟生成三维空间中的节理网络<sup>[8]</sup>。直接法是基于三维离散元软件直接生成三维节理网络。主要过程<sup>[9~11]</sup>：(1) 将节理按产状进行分组；(2) 产生随机数数库；(3) 从随机数数库中抽取随机数，当某区间内随机数的频率等于实际测量值落入到该区间的频率时，便停止向该小区间内投入随机数，转而向其他小区间内投入随机数。这样产生的随机数就与实际测量值分布相同；(4) 根据得到的随机数绘出节理网络几何图形。

本节基于第二种方法，采用三维离散单元程序 3DEC 直接生成三维裂隙网络，图 2 为节理等密度图。裂隙面几何形态参数如表 1 所示，本区岩石节理不发育，从山体露头中看出节理属闭合型，根据工程岩体分级标准中闭合节理张开程度规定<sup>[5]</sup>，裂隙宽度取 0.5 mm。

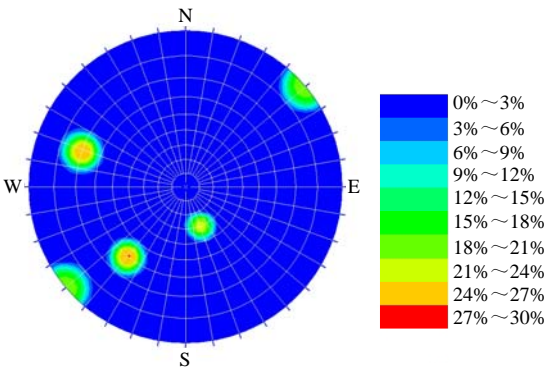


图 2 节理等密度图

Fig.2 Joint isopycnic chart

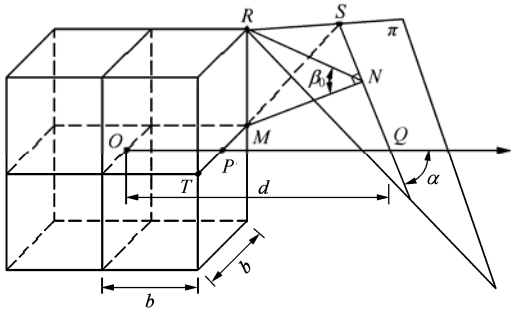
在给定尺寸的计算模型区域内，随着尺寸的增加，所包含的节理数也增加，因此应根据节理产状等信息统计模型区域中包含的各组节理的条数，通过几何关系推导出节理面与模型相交的判别公式的过程如下：

表 1 裂隙面几何形态参数

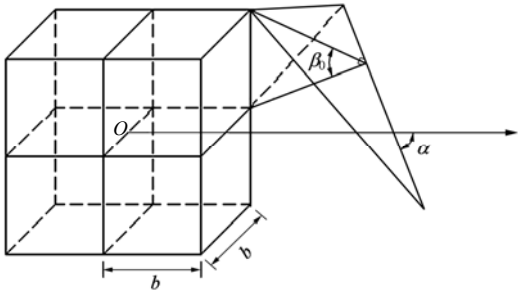
Table 1 Joint surface geometry parameters

裂隙组号	倾向/(°)	倾角/(°)	间距/m
1 <sup>#</sup>	155~165	25~35	2~5
2 <sup>#</sup>	225~235	85~95	2~5
3 <sup>#</sup>	285~295	65~75	2~5
4 <sup>#</sup>	215~225	55~65	2~5

当倾向  $0 < \alpha \leq 90^\circ$  时，如图 3(a)所示，点  $O$  为模型的中心，点  $P$  为线段  $TM$  的中点，射线  $OP$  指向正北，平面  $OTM$  为模型的中心平面，将模型上下等分，且与节理面  $\pi$  交于直线  $SQ$ ，点  $S$  在线段  $PM$  延长线上，节理面  $\pi$  交模型于点  $R$ 。在直角三角形  $Rt\Delta SPQ$  中，由  $\angle SQP = \angle \alpha$ ， $PQ = OQ - OP$ ，可得  $PS = (OQ - OP) \tan \alpha$ 。从点  $M$  向线段  $SQ$  引垂线，垂足为点  $N$ 。在直角三角形  $Rt\Delta SNM$  中，由  $\angle SMN = \angle \alpha$ ， $MS = PS - PM = (OQ - OP) \tan \alpha - PM$ ，可得到  $MN = MS \cos \alpha = [(OQ - OP) \tan \alpha - PM] \cos \alpha$ 。在直角三角形  $Rt\Delta RMN$  中，可得到， $\tan \beta_0 = \frac{RM}{MN} = \frac{RM}{[(OQ - OP) \tan \alpha - PM] \cos \alpha}$ 。为书写的方便，设定线段  $OQ$  的长度为  $d$ ，线段  $OP$  长度为  $b$ ，则线段  $RM$  长度为  $b$ ，线段  $PM$  长度为  $b/2$ ， $\tan \beta_0$  可以表示为  $\tan \beta_0 = \frac{RM}{MN} = \frac{b}{\left[ (d - b) \tan \alpha - \frac{b}{2} \right] \cos \alpha}$ 。



(a)  $0 < \alpha \leq 90^\circ$



(b)  $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$

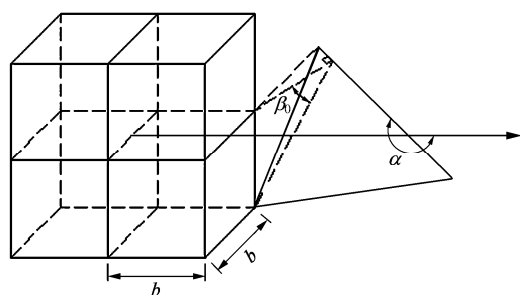
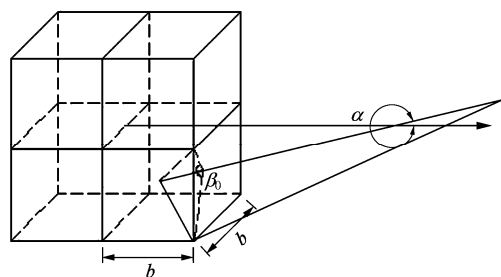
(c)  $180^\circ < \alpha \leq 270^\circ$ (d)  $270^\circ < \alpha \leq 360^\circ$ 

图3 节理面与模型相交的判别图

Fig.3 Discrimination diagrams of model and joint surface intersection

随着倾角的增加, 节理面将不会与模型相交。则不满足相交的条件如下:

$$\beta > \beta_0 = \tan^{-1} \left[ \frac{b}{(d-b)\sin\alpha - \frac{b}{2}\cos\alpha} \right] \quad (1)$$

当倾向  $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$  时, 如图 3(b) 所示, 不满足相交的条件如下:

$$\beta > \beta_0 = \tan^{-1} \left[ \frac{b}{(d-b)\sin\alpha + \frac{b}{2}\cos\alpha} \right] \quad (2)$$

当倾向  $180^\circ < \alpha \leq 270^\circ$  时, 如图 3(c) 所示, 不满足相交的条件如下:

$$\beta > \beta_0 = \tan^{-1} \left[ \frac{b}{-(d-b)\sin\alpha + \frac{b}{2}\cos\alpha} \right] \quad (3)$$

当倾向  $270^\circ < \alpha \leq 360^\circ$  时, 如图 3(d) 所示, 不满足相交的条件如下:

$$\beta > \beta_0 = \tan^{-1} \left[ \frac{b}{-(d-b)\sin\alpha - \frac{b}{2}\cos\alpha} \right] \quad (4)$$

图 4 为按照以上步骤生成的分别为  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ ,  $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ ,  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ ,  $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ ,  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ,  $35\text{ m} \times 35\text{ m}$ ,  $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ ,  $45\text{ m} \times 45\text{ m}$  计算区域的三维节理模型图。

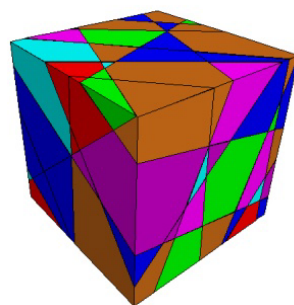
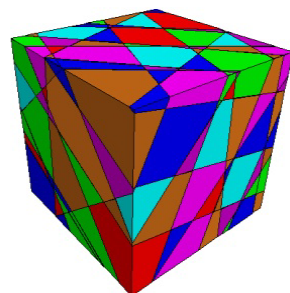
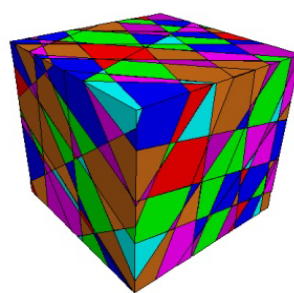
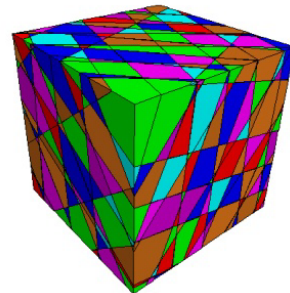
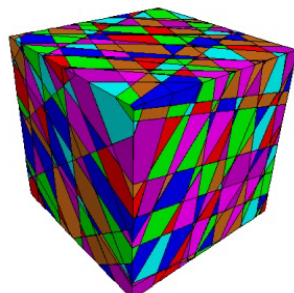
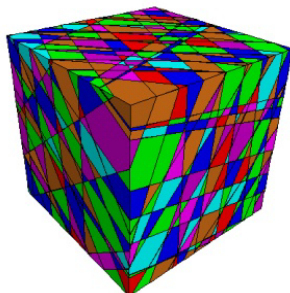
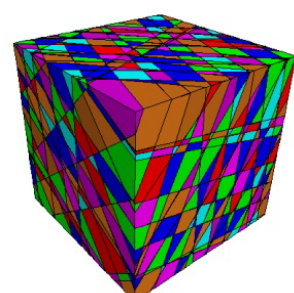
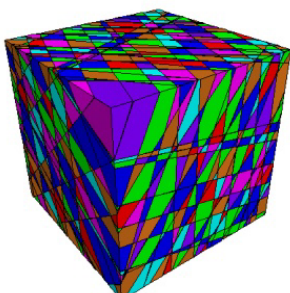
(a)  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ (b)  $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ (c)  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ (d)  $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ (e)  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ (f)  $35\text{ m} \times 35\text{ m}$ (g)  $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ (h)  $45\text{ m} \times 45\text{ m}$ 

图4 不同尺寸的三维节理模型图

Fig.4 Three-dimensional joint model diagrams of different sizes

## 4.2 节理岩体的表征体元 REV 及渗透张量

根据节 4.1 建立的节理网络模型, 统计不同尺寸上的随机节理的条数及产状信息。依据裂隙岩体

渗透张量理论, 计算不同尺寸模型的渗透张量, 确定岩体的表征体元及渗透张量。

计算原理: 苏联学者 Pomm 和美国学者 Snow 以裂隙统计为基础, 创立了岩体裂隙渗透张量理论<sup>[12~14]</sup>。他们先后提出假设, 即使不同方向裂隙组在裂隙网络系统中相互连通, 一个方向上裂隙组的裂隙水流丝毫不受另一个方向裂隙组裂隙水流的干扰。据此, 可将实际介质按裂隙网络的各方向裂隙组分解成几个只具有唯一方向裂隙组的虚拟介质, 则通过实际介质的水流等于把这些虚拟介质的水流叠加起来, 即

$$\mathbf{V} = \sum_{i=1}^m \mathbf{V}_i = \sum_{i=1}^m \frac{g b_i^3 \lambda_i}{12\nu} (\mathbf{I} - \alpha_i \alpha_i) \mathbf{J}_i \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{V}$  为裂隙网络系统中地下水渗流速度向量 ( $\text{L}^2\text{T}^{-1}$ ),  $\mathbf{V}_i$  为第  $i$  组裂隙介质中地下水渗流速度向量 ( $\text{L}^2\text{T}^{-1}$ ),  $b_i$  为第  $i$  组裂隙的平均裂隙隙宽 ( $\text{L}$ ),  $\lambda_i$  为第  $i$  组裂隙的平均密度 ( $\text{L}^{-1}$ ),  $\nu$  为地下水运动黏滞系数 ( $\text{L}^2\text{T}^{-1}$ ),  $\mathbf{I}$  为单位向量,  $\alpha_i$  第  $i$  组裂隙面的法向单位向量,  $\mathbf{J}_i$  为裂隙网络系统中地下水水力梯度向量,  $m$  为裂隙组的总数。

如果写成达西定律的形式, 则有

$$\mathbf{V} = K \mathbf{J}_f \quad (6)$$

其中,

$$K = \sum_{i=1}^m \frac{g b_i^3 \lambda_i}{12\nu} (\mathbf{I} - \alpha_i \alpha_i) \quad (7)$$

根据区域尺寸的大小统计各组节理的条数及产状信息, 再直接利用式(5)~(7)就可计算出该区域等效均质各向异性岩体的渗透张量。然后通过 Matlab 软件编写程序可以得到不同尺寸的渗透主值及渗透特征向量, 当渗透主值及方向均趋于稳定时, 此时研究区域大小即为相应的渗透表征体元(REV)。

图 5 为 3 个渗透主值与模型尺寸的关系图, 由于 4 组节理间距基本相同, 所以当模型尺寸增加时, 各组节理增加的个数也相近, 渗透主值变化不是很剧烈, 当模型超过  $35 \text{ m} \times 35 \text{ m}$  之后, 3 个渗透主值均不再有明显的变化, 则  $35 \text{ m} \times 35 \text{ m}$  计算域尺寸可以作为 REV 的大小。

由于裂隙开度测量的困难性、节理面粗糙度等因素的影响, 计算所得的渗透张量还应该利用现场水文地质试验测定的岩体渗透系数资料进行修正,

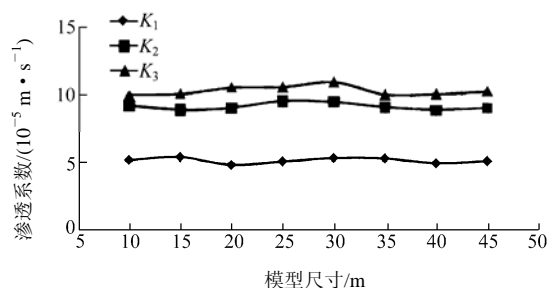


图 5 模型尺寸与渗透主值的关系图

Fig.5 Relationships between model size and principal permeability values

计算公式<sup>[15~18]</sup>如下:

$$\mathbf{K}' = \frac{\sqrt[n]{k_1 k_2 \cdots k_n}}{\sqrt[3]{K_1^{3-m_1-m_2} K_2^{m_1} K_3^{m_2}}} \bar{\mathbf{K}} \quad (8a)$$

其中,

$$m_1 = \frac{K_2}{K_1}, \quad m_2 = \frac{K_3}{K_1} \quad (8b)$$

式中:  $k_1, k_2, \dots, k_n$  为根据水文地质试验确定的岩体各向渗透系数 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $K_1, K_2, K_3$  为计算的等效渗透张量  $\bar{\mathbf{K}}$  的渗透主值 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

按式(8a)计算的渗透系数张量如下:

$$\mathbf{K}' = \begin{bmatrix} 0.758 2 & -0.139 4 & 0.147 7 \\ -0.139 4 & 0.927 9 & 0.147 7 \\ 0.147 7 & 0.147 7 & 0.922 9 \end{bmatrix} \times 10^{-8} \quad (9)$$

其渗透主值为

$$\{K_1, K_2, K_3\} = \{0.566 3 \quad 0.972 8 \quad 1.076 8\} \times 10^{-8} \text{ m/s} \quad (10)$$

渗透系数矩阵的特征向量为

$$\omega = \begin{bmatrix} 0.726 9 & -0.685 8 & 0.036 5 \\ 0.480 6 & 0.546 0 & 0.686 2 \\ -0.490 6 & -0.481 2 & 0.726 5 \end{bmatrix} \times 10^{-8} \quad (11)$$

### 4.3 库区渗流场的数值生成

通过以上的分析, 得到库区节理岩体各向异性的渗透主值及渗透特征向量。采用等效连续介质模型的方法, 选用 FLAC<sup>3D</sup> 软件 Model 中 Fl\_anisotropic 模型来反映渗透系数的空间各向异性。图 6 为 Model 中 Fl\_anisotropic 模型各向异性渗透张量的主方向示意图<sup>[19]</sup>。代表 3 个渗透主值  $K_1, K_2, K_3$  由 3 个角度倾向的方位角、倾向角、旋转角确定。倾向的方位角为倾向的方位角, 倾向角为倾向角, 旋转角为在渗透主值  $K_1, K_2$  平面内、倾向顺时针旋转至渗透主值  $K_1$  的角度。



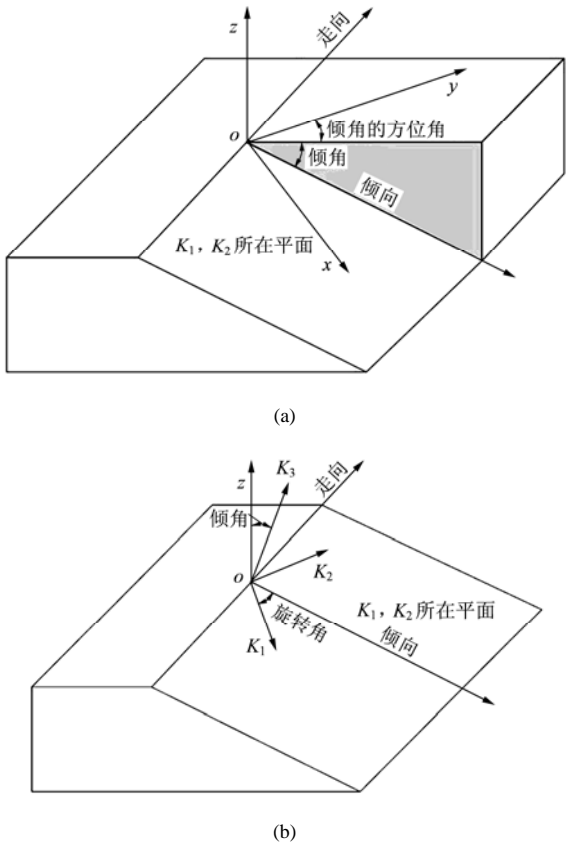


图 6 渗透张量的主方向示意图<sup>[19]</sup>  
Fig.6 Abridged general view of principal directions of tensor<sup>[19]</sup>

渗流场反演的模型长×宽 = 980 m×630 m, 地表最高处高程为 90 m 左右, 最低处高程为 40 m 左右, 底面高程 -170 m。模型以储油洞室的轴向方向为  $y$  轴, 横截面方向为  $x$  轴, 垂直向上为  $z$  轴。模型中采用 8 个储油洞室, 洞库的轴向方向为  $NW40^\circ$ , 由于模型坐标轴并不是指向正北方向, 应先根据相似变换, 将渗透张量转化到计算模型坐标轴下。根据节 4.2 的计算结果, 反演厂区内的渗流场。图 7 为库区的初始渗流场的孔隙水压力云图。

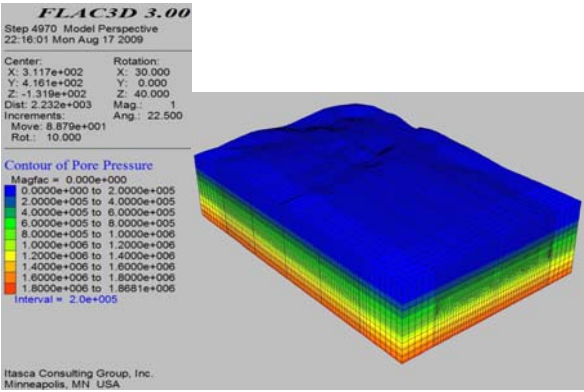


图 7 孔隙水压力云图(单位: Pa)  
Fig.7 Nephogram of pore water pressures(unit: Pa)

## 5 结 论

现场压水试验是获得岩体渗透特性的基本方法, 但是不能反映各向异性的渗透特征。为了获得各向异性的渗透系数, 本文结合大连地下石油储备库工程, 提出一种基于随机节理网络模拟技术反演岩体各向异性渗透特征的方法。主要步骤如下: (1) 根据现场地质调查资料, 利用三维离散元程序 3DEC 内置的 Fish 语言, 直接生成不同尺寸的三维节理网络模型。(2) 利用裂隙介质的渗透张量理论计算不同尺寸的岩体渗透张量, 进而确定节理岩体的表征体元(REV)。(3) 由于裂隙开度测量的困难性、节理面粗糙度等因素的影响造成计算的渗透系数张量在数值上产生误差。为了弥补该误差, 根据现场压水试验实测渗透系数, 修正节理岩体的渗透张量。(4) 利用 Matlab 软件计算渗透主值及渗透特征向量。(5) 采用 FLAC<sup>3D</sup> 的空间正交各向异性渗流模型 Fl\_anisotropic 反演库区的初始渗流场。

该方法既考虑现场原位裂隙岩体的渗透特性, 又反映了裂隙介质渗透特性的各向异性, 所做的工作可以为实际工程提供一定的参考价值。

## 参考文献(References):

[1] 杨明举, 关宝树. 地下水封储气洞库原理及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 301 - 305.(YANG Mingju, GUAN Baoshu. Theoretical and numerical simulation study of underground gas-storage caverns with water curtain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 301 - 305.(in Chinese))

[2] 杨明举, 关宝树, 钟新樵. 水封式地下储气洞库的应用及研究[J]. 地下空间, 2000, 20(3): 171 - 175.(YANG Mingju, GUAN Baoshu, ZHONG Xinqiao. Applied study of underground gas-storage caverns with water curtain[J]. Underground Space, 2000, 20(3): 171 - 175.(in Chinese))

[3] 何 吉, 徐 青, 陈胜宏. 裂隙岩体渗透特性反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 1): 2 730 - 2 735.(HE Ji, XU Qing, CHEN Shenghong. Back analysis of permeability of fractured rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 2 730 - 2 735.(in Chinese))

[4] 李 平, 卢文喜, 杨 威, 等. 水库裂隙岩体渗透系数张量的确定[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1 393 - 1 396.(LI Ping, LU Wenxi, YANG Wei, et al. Determination of hydraulic conductivity tensor of fractured rock mass in reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering,

- 2007, 38(11): 1 393 - 1 396.(in Chinese))
- [5] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50218 - 94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50218 - 94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.(in Chinese))
- [6] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50287 - 99 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50287 - 99 Code for water resources and hydropower engineering geological investigation[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese))
- [7] 义宗贞. 国家二期石油储备基地大连地下储备库工程岩土工程勘察评价报告[R]. 大庆: 大庆油田工程有限公司, 2005.(YI Zongzhen. The national second-stage oil storage bases Dalian underground oil storage cavern geotechnical engineering evaluation report[R]. Daqing: Daqing Oilfield Engineering Co., Ltd., 2005.(in Chinese))
- [8] 王贵宾, 杨春和, 殷黎明. 岩体节理三维网络模拟技术及渗透率张量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 591 - 3 594. (WANG Guibin, YANG Chunhe, YIN Liming. 3D network simulation technique of joints in rock mass and permeability tensor analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 591 - 3 594.(in Chinese))
- [9] 王 涛, 朱焕春, 李 浩, 等. 论生成节理随机数的直接法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 489 - 492.(WANG Tao, ZHU Huanchun, LI Hao, et al. On the computerized direct method generating joint random number[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 489 - 492.(in Chinese))
- [10] 朱焕春, 陈文理. 生成节理随机数的直接法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(2): 10 - 12.(ZHU Huanchun, CHEN Wenli. Direct method forming joint random number[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997, 30(2): 10 - 12.(in Chinese))
- [11] 王 涛, 盛 谦, 陈晓玲. 基于直接法节理网络模拟的三维离散单元法计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1 649 - 1 653. (WANG Tao, SHENG Qian, CHEN Xiaoling. 3D discrete element method based on direct method of joint network simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1 649 - 1 653.(in Chinese))
- [12] 朱珍德, 郭海庆. 裂隙岩体水力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2007.(ZHU Zhende, GUO Haiqing. Principles of fractured rock mass hydraulics[M]. Beijing: Science Press, 2007.(in Chinese))
- [13] 张金才, 王永奉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997.(ZHANG Jincai, WANG Yongfeng. Rock mass permeability and coal mine water inrush[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.(in Chinese))
- [14] 夏才初, 孙宗欣. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.(XIA Caichu, SUN Zongxin. Engineering mechanics of joints rock[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.(in Chinese))
- [15] 纪 伟. 裂隙岩体渗流等效性及数值模拟研究[硕士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2005.(JI Wei. Study of equivalent characteristic and numerical simulation of seepage in fractured rock[M. S. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2005.(in Chinese))
- [16] 荣 冠, 周创兵, 王恩志. 裂隙岩体渗透张量计算及其表征单元体积初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 740 - 746. (RONG Guan, ZHOU Chuangbing, WANG Enzhi. Preliminary study on permeability tensor calculation of fractured rock mass and its representative elementary volume[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 740 - 746.(in Chinese))
- [17] 田开铭, 万 力. 各向异性裂隙介质渗透特性的研究与评价[M]. 北京: 学苑出版社, 1989.(TIAN Kaiming, WAN Li. Research and evaluation on permeability of anisotropic fractured media[M]. Beijing: Academy Press, 1989.(in Chinese))
- [18] 柴军瑞, 李守义. 大柳树水利枢纽坝区松动岩体的水力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 677 - 1 680.(CHAI Junrui, LI Shouyi. Hydraulic properties of dynamo-relaxed rock mass at site of Daliushu dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1 677 - 1 680.(in Chinese))
- [19] Itasca Consulting Group, Inc.. FLAC<sup>3D</sup>(fast Lagrangian analysis of continua in 3D)[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2002.