

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.01.019

地下水封石油洞库洞轴走向的数值分析

徐大宝, 杨 征, 胡谋鹏, 詹胜文

(中国石油管道局工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: 由于深埋地下洞室的高地应力对洞室稳定性有很大影响, 对于大断面地下水封石油洞库来说洞室的断面形状、高跨比、埋深和间距确定以后, 就应该分析洞室的洞轴走向与最大地应力的最优夹角问题。在数值模拟中采用 Hoek - Brown 准则将岩石的物理参数转化为岩体的物理参数, 同时采用相应公式将地勘报告中的地应力转为软件坐标系认可的地应力。模拟中采用洞轴与最大主应力方向平行和 10° 夹角的两种方案, 通过比较开挖后的位移和最大主应力来分析得到最合理的洞室洞轴走向与地应力方向之间夹角。

关键词: 洞群; 洞轴走向; 洞轴; Hoek - Brown 经验参数准则

中图分类号: TE823

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)01-0103-05

Numerical Analysis of Underground Water Seal Oil Storage at Axis Direction

XU Dabao, YANG Zheng, HU Moupeng, ZHAN Shengwen

(China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract: The high ground stress have great influence on the stability of the caverns. After analyzing the cross-section shape, height-span ratio, depth and spacing of the underground water seal oil caverns, the cavity hole axis and the direction of the maximum stress of the optimum angle problem were analyzed in this paper. The physical parameters of rocks are transformed into physical parameters of rock mass by using HOEK - BROWN criterion. According to the corresponding formula, the in-situ stress in geological prospecting report is converted which can be recognized by the software coordinate system. Two schemes of parallel and 10° degree angle between the hole axis and the maximum principal stress direction have been used in the simulation. By comparing the displacement and maximum principal stress after excavation, the most reasonable angle between the axis of the tunnel and the ground stress is obtained.

Keywords: cavern group; trend of cavity axis orientation; cavity axis; Hoek - Brown empirical parameter criterion

地下水封洞库是在地下岩层中通过人工开挖形成具有一定形状和体积的存储空间, 利用地下水压力将油气产品封闭在存储空间中的一种存储方式。该存储方式具有经济、安全和环保等优点, 目前多数发达国家已广泛采用地下水封储油方式。地下水封洞库深埋于上百米的地下, 大跨度、高边墙的储油洞室的稳定性设计是地下水封洞库设计的关键所在。因此, 根据国家二期石油储备工程即辽宁某地下水封洞库的建库地点工程地质、水文地质条件, 需要对储油岩库的布局、岩洞断面的形状、施工方案和方式方法等优化设计及长期稳定性分析进行了较系统的

研究。限于篇幅, 本文主要论述储油洞室的最佳洞轴走向, 使得既满足地质构造、地质环境和主导应力方向等基本条件, 又使洞库群的洞轴布局更加合理。

1 工程概况

辽宁某地下水封储油库储油洞室^[1]埋深近 90 m, 与水幕巷道、施工巷道、连接巷道等相互交叉, 组成复杂的大型地下洞室群。根据现场地勘资料可知场区表层为残积土层, 其下基岩为中粗粒花岗岩, 局部发育细晶岩及辉绿岩岩脉。按照岩石的风化等级和完整程度将场区地层综合分层为残积土、全风化

层、强风化层、中等风化层、微风化层、未风化层。基岩表层的残积土厚度约 25 m, 储油洞室处于微风化和未风化地层中。储油洞室高度 24 m、跨度 19 m, 一条洞室的长 1000 m, 洞室断面为直墙拱形。

2 地下洞室洞轴走向的数值分析

2.1 力学模型及开挖方法

本文数值模拟试验三维计算采用大型岩土工程分析软件 FLAC^{3D}, 在模拟的过程中将洞室所在围岩看成是连续介质的材料, 在数值模拟中采用弹塑性理论进行计算, 其模拟中遵从的屈服准则为数值模拟中常用的 Mohr - Coulomb 准则^[2]。在进行开挖时, 储油洞室的开挖步与实际开挖步一致, 即分为 3 次开挖形成, 即上台阶、中台阶和下台阶。

2.2 围岩参数的确定

在确定围岩参数时, 工程界的普遍做法是将小尺度的试验结果进行“打折”, 打折的依据是岩体地质条件, 有时还需要考虑工程重要性^[3-5]。其目的是体现岩体特性的尺寸效应, 具体方法以经验为主。而 Hoek 和 Brown 提供了一整套工程岩体力学参数的估计方法。

岩体强度的摩尔 - 库仑强度准则为:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cdot \cos\phi}{1 - \sin\phi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (1)$$

其中的 c 和 ϕ 为岩体的摩尔 - 库仑强度参数。

Hoek - Brown 提出了岩体峰值强度的经验性准则, 形式如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (2)$$

其中的 σ_c 为岩石单轴抗压强度, m_b , s , 和 a 为 Hoek - Brown 强度参数, 为待定参数。

显然地, 如果确定了式(2)中的待定系数 m_b , s , 和 a (Hoek - Brown 强度参数), 则可以帮助估计式(1)中的黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ , 单位 MPa。式(2)中的 σ'_{3n} 为试验中最小主应力的最大值与完整岩块的单轴抗压强度的比值。事实上, Hoek 等人建立了摩尔 - 库仑强度参数和 Hoek - Brown 强度参数的如下

关系:

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (3)$$

$c =$

$$\frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}] (s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + [6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}] / [(1+a)(2+a)]}} \quad (4)$$

如果能够比较方便可靠地确定 Hoek - Brown 强度参数 m_b , s , 和 a 等, 则可以根据以上两式转换成岩体的 c 和 ϕ 。这些参数的确定方法如下:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{\sigma_{gsi} - 100}{28}\right) \quad (5)$$

其中的 m_i 取决于岩石类型, 反映岩石的软硬程度, 可以通过室内三轴试验确定。根据既往对花岗岩和辉绿岩的室内三轴试验成果, 这两种岩石的 m_i 分别可以取为 33 和 19。 σ_{gsi} 的全称是地质强度指标, 是岩体质量的描述指标, 如 σ_{mmr} 和 Q 等指标相当。很多岩石力学工程者建立了这些指标之间的关系, 如 $\sigma_{gsi} = \sigma_{mmr} - 5$ 等, 与具体工程岩体条件有关。此外, σ_{mmr} 和 Q 之间也可以存在一定的换算关系, 如

$$\sigma_{mmr} = 9 \ln Q + 44 \quad (6)$$

式(2)中的参数 s 和 a 的确定方法为: 当 $\sigma_{gsi} > 25$ 时 (相当于水电分类中 IV 类以上的岩体), Hoek 建议:

$$s = \exp\left(\frac{\sigma_{gsi} - 100}{9}\right), \text{ 和 } a = 0.5 \quad (7)$$

待定参数转化为 σ_c 、 m_i 和 σ_{gsi} , 其中前两者采用岩石试样的室内试验确定, 对于 σ_{gsi} 值的确定限于篇幅, 请参考相关文献。此外, 基于岩体的 σ_{gsi} 值, Hoek 等人还给出了大尺度岩体变形模量的估计方法, 其计算式为:

$$\text{变形模量 } E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100} \cdot 10^{(\sigma_{gsi} - 10)/40}} \quad (8)$$

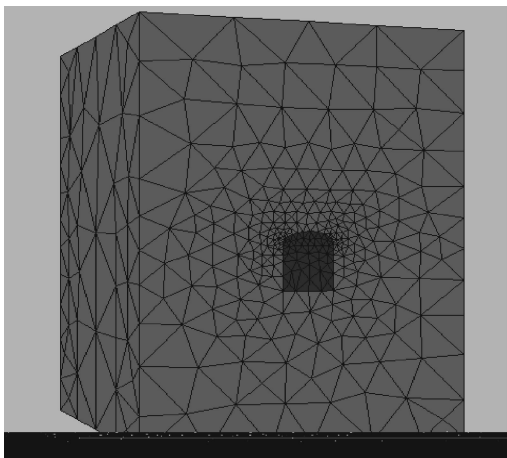
其中的 D 为损伤因子, 反映爆破破坏和应力松弛对节理岩体的扰动程度, 本次工作中可以取为零。采用上述方法, 通过计算求得岩体力学参数见表 1。

表 1 场区岩体力学参数

岩体风化程度	σ_{gsi}	σ_{ci}/MPa	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
全风化	45	160	5.21	3.08	0.08	71.60	0.63
强风化	55	160	8.81	5.60	0.18	70.29	1.13
中等风化	63	160	12.72	8.71	0.33	71.56	1.51
微风化	70	160	19.58	13.71	0.71	71.18	2.55
未风化	77	160	28.21	20.72	1.11	66.28	4.51

2.3 模拟方案

洞轴分析模型见图 1,通过地应力测试结果分析表明,场区最大和最小水平主应力均大于相应深



度处垂直方向应力,最大水平主应力的方向为近东西方向^[6-7]。

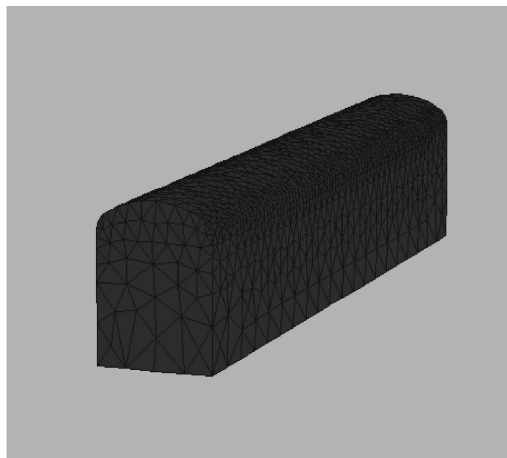


图 1 洞轴分析 FLAC^{3D}模型

针对地应力主方向测试结果,根据库区地质资料及地理环境可选择两种方案进行洞轴选择分析,即两种方案为:

方案 1:洞轴沿最大主应力方向;

方案 2:洞轴沿 EW 向布置,即洞轴轴线方向与最大主应力方向夹角为 10°。

2.4 地应力的选取^[8-9]

根据勘察报告,取最小主应力为岩体上覆重量,第一主应力为 3.90 倍自重,呈水平状;第二主应力为 2.46 倍自重,在水平面上与第一主应力垂直。第一、第二主应力与最小主应力的比例系数根据测试结果确定,至此建立了工程场区三个主应力与埋深的关系式,再根据具体计算模型中的坐标系进行必要的转换以后^[2],即可输入到各计算模型。

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= rh \\ \sigma_2 &= k_2 \cdot \sigma_3 = 2.46\sigma_3 \\ \sigma_1 &= k_1 \cdot \sigma_3 = 3.90\sigma_3 \end{aligned} \quad (9)$$

采用上述方法,根据地质勘察报告相关数据,转换后的地应力分量为:

方案 1: $\sigma_y = -10.66 \text{ MPa}$, $\sigma_x = -6.03 \text{ MPa}$;

方案 2: $\sigma_y = -10.46 \text{ MPa}$, $\sigma_x = -6.23 \text{ MPa}$,

$\sigma_{xy} = -0.94 \text{ MPa}$ 。

2.5 模拟结果分析

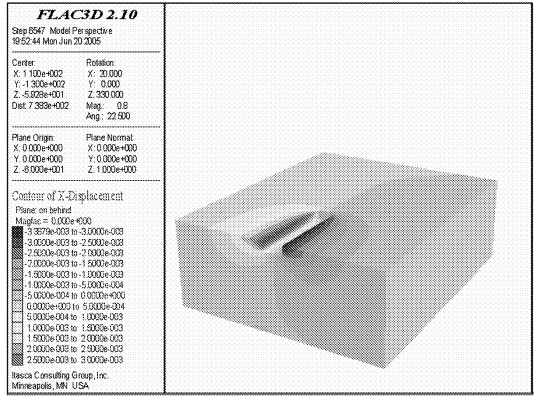
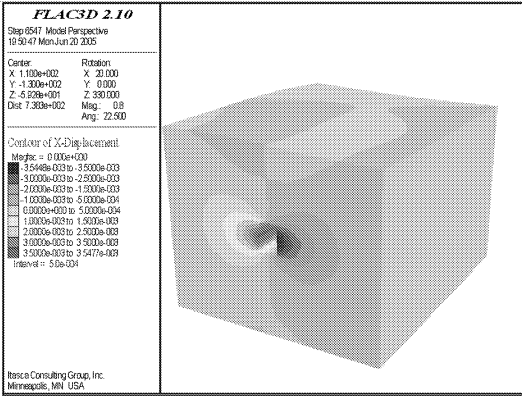
图 2 给出了 2 种方案开挖施工下的全场位移变化规律及特殊点的位移变化比较曲线。由图 2 可见,方案 1:洞库左壁向右水平最大位移为 3.496 mm,右壁向左最大水平位移为 2.500 mm。方案 2:

洞库左壁向右水平最大位移为 3.524 mm,右壁向左最大水平位移为 3.5 mm。通过比较分析可见,无论洞轴沿上述哪种方案设置,洞体侧壁因开挖引起的水平位移量均较小,但由于构造应力的作用,洞体截面 z 向对称轴线均有向南偏移的趋势,方案 1 比方案 2 稍小些,这种在多洞室开挖时比单洞开挖要明显的多,这对洞室整体围岩稳定性影响甚微,可不予考虑^[10-15]。

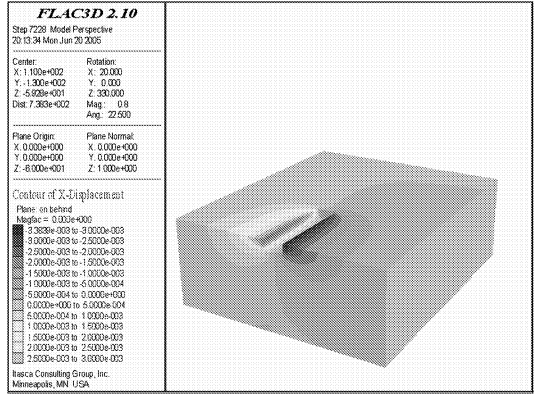
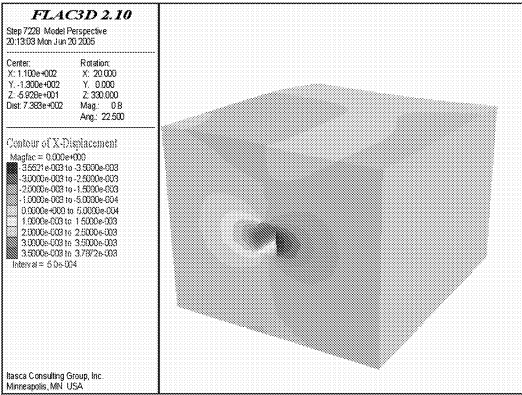
图 3 给出了主应力分布规律,在 2 种方案中洞库侧壁均出现拉应力。方案 1 侧壁最大拉应力在 1.5 MPa ~ 1.67 MPa 之间;方案 2 最大拉应力在 2.0 MPa ~ 2.32 MPa 之间。方案 2 是方案 1 的 1.33 ~ 1.39 倍,2 种方案的最小主应力差别不大。虽然两方案的拉应力均未超过岩石的抗拉强度,但由围岩稳定的角度考虑,方案 1 比方案 2 要合理,故方案 1 为最佳的洞轴布置方案。

3 结 论

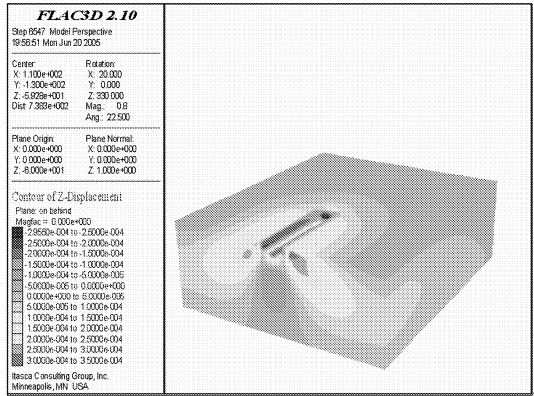
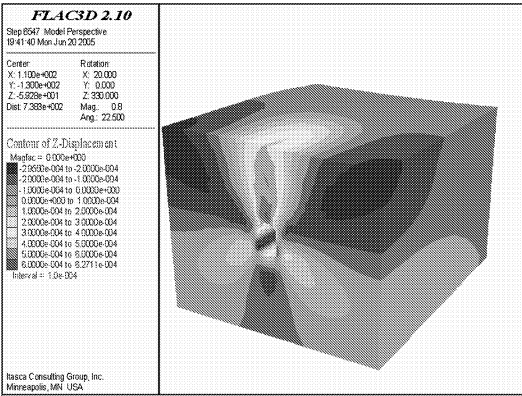
经三维分析对比,最佳洞轴线为沿最大主应力方向,但当洞轴线与最大主应力方向夹角为小角度(当前设计和计算方案角度为 10°)时,储洞围岩的变形、塑性屈服区、受拉破坏区均增加范围较小,基本不影响整体稳定性,即 10°以内可作为洞室轴线合理布置允许区域。文中所给出的主要是比较洞周特殊点位移和开挖后洞库边界附近围岩的主应力等,更合理的选择仍有待于更多的勘察资料,再进行深入的研究。



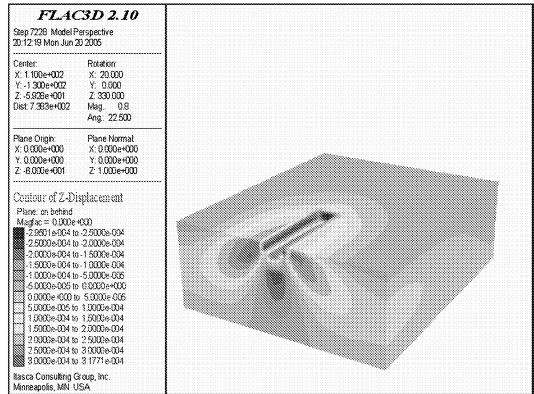
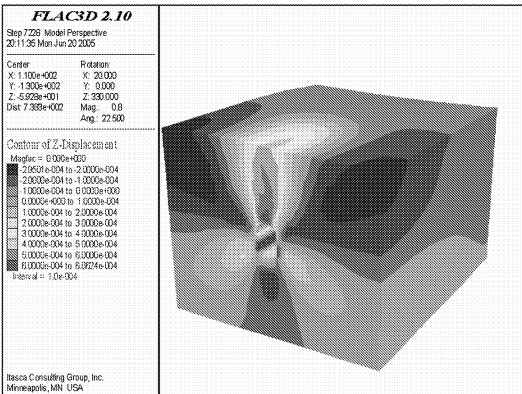
(a) 水平位移等色线图 (洞轴与主方向平行)



(b) 水平位移等色线图 (洞轴与主方向夹角10°)

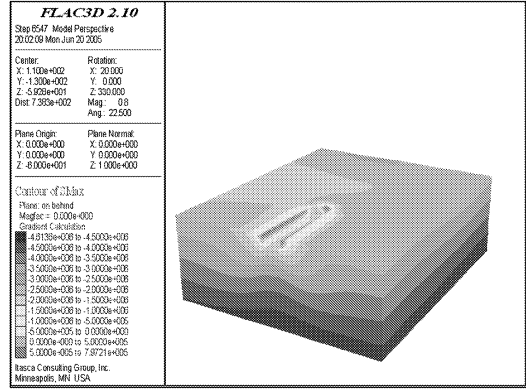
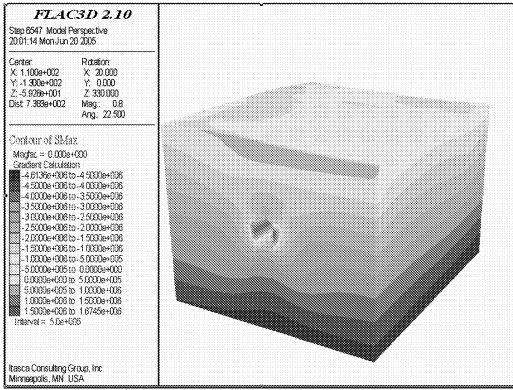


(c) 垂直方向位移等色线图 (洞轴与主方向平行)

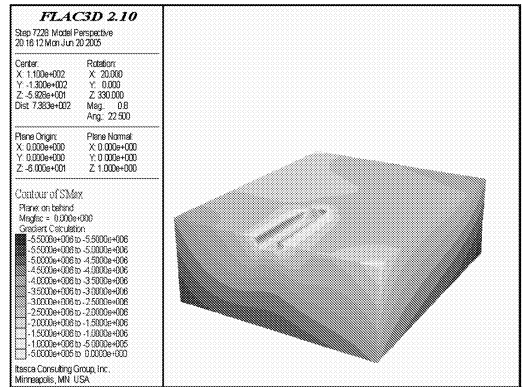
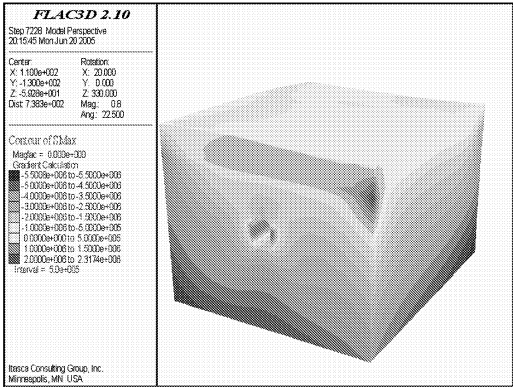


(d) 垂直方向位移等色线图 (洞轴与主方向夹角10°)

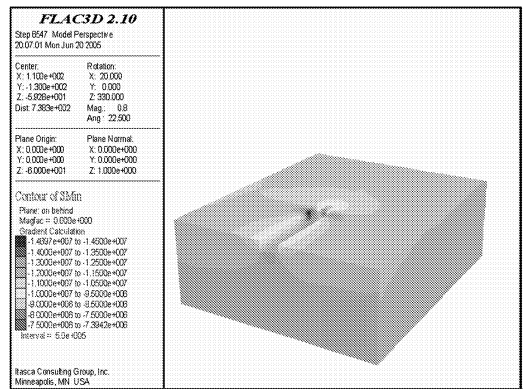
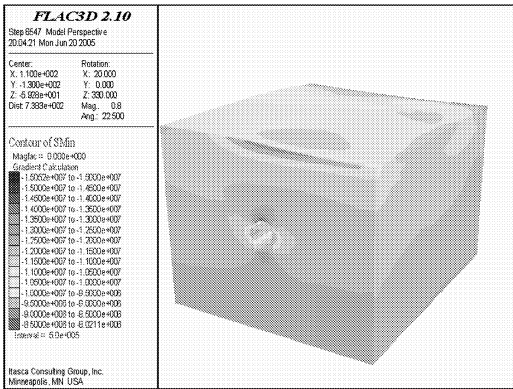
图 2 两种方案位移比较示意图



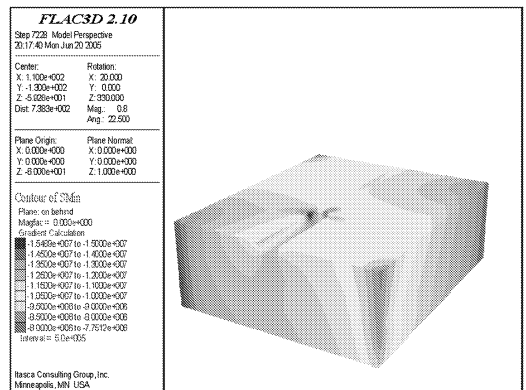
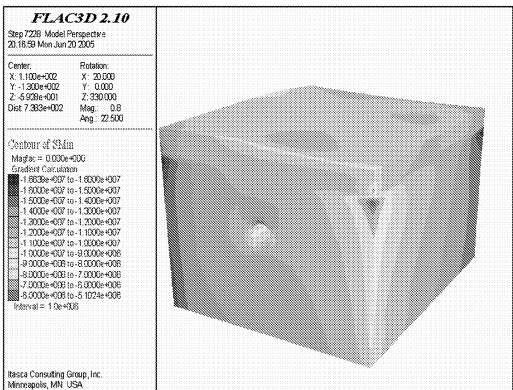
(a) 最大主应力等色线图 (洞轴与主方向平行)



(b) 最大主应力等色线图 (洞轴与主方向夹角10°)



(c) 最小主应力等色线图 (洞轴与主方向平行)



(d) 最小主应力等色线图 (洞轴与主方向夹角10°)

图 3 两种方案应力比较示意图

(下转第 112 页)

参考文献:

- [1] 中国石油天然气管道工程有限公司. 国家二期石油储备基地某地下储备库工程可行性研究,《土工程勘察》档案号:地-1591/明[R]. 廊坊:中国石油天然气管道工程有限公司,2006.
- [2] Itasca 公司. FLAC3D 4.0 系列手册[M]. 美国:Itasca 公司,2010.
- [3] 彭文斌. FLAC3D 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2009:30-102.
- [4] 胡谋鹏,梁久正,许杰. 地下水封储油库围岩稳定性数值分析[J]. 油气储运,2013,32(4):370-375.
- [5] 胡谋鹏,梁久正. 地下水封石油储备库洞室间距及数值分析[J]. 石油工程建设,2013,39(3):17-19.
- [6] 陈祖煜. 岩质边坡稳定分析-原理、方法、程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:201-243.
- [7] 李术才,朱维申,张玉军. 裂隙岩体大型洞室群施工顺序优化研究[J]. 岩土工程学报,1998,20(1):1-4.
- [8] Evert Hoek, Paul Marinos. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses(Part 1)[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000(11):1-5.
- [9] Evert Hoek, Paul Marinos. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses(Part 2)[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000(12):1-6.
- [10] Martin C D, Kaiser P K, McCreath D R. Hoek - Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels[J]. Can Geotech J, 1999,36:136-151.
- [11] Evert Hoek. 实用岩石工程技术[M]. 刘丰收,崔志芳,王学潮,等译. 郑州:黄河水利出版社,2002.
- [12] 陈祖煜. 岩质边坡稳定分析—原理、方法、程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [13] 陈育民. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008:28-97.
- [14] 林航,曹平,赵延林,等. 强度折减法在 Hoek - Brown 准则中的应用[J]. 中南大学学报,2007,38(6):1219-1224.
- [15] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997,34(8):1165-1186.