

文章编号: 1000-7598 (2011) 11-3503-05

基于正交设计的地下水封洞库群优化

宋 琨¹, 晏鄂川¹, 杨 举¹, 季惠彬^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074, 2. 北京东方新星石化工程股份有限公司, 北京 100070)

摘 要: 大型地下水封石洞油库是目前国内外石油战略储备的重要方式, 为保证该类大断面不支护地下洞室群的稳定, 需优化洞室群的布置。在分析山东某地下水封洞库群工程地质条件的基础上, 建立洞室群数值模型。根据三轴试验、围岩 RMR (rock mass rating) 分类和广义 Hoek-Brown 准则估计了 II、III 和 IV 类围岩的岩体力学参数。以洞室埋深、轴向和间距为因素, 采用正交设计的方法进行数值试验, 以关键点位移和塑性区面积作为评价指标对试验结果进行直观分析, 得到对洞室围岩变形和塑性区面积影响最显著的为洞室轴向, 并研究了轴向对围岩变形和塑性区面积的影响, 得到该水封洞库洞室群的最优布置方案为埋深-60.0 m, 轴向 N30°W, 间距为 25 m。其研究结果对地下水封洞库洞室群的布置具有一定工程意义和理论价值。

关 键 词: 地下水封油库; 洞室优化; 正交设计; 广义 Hoek-Brown 准则

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Based on orthogonal design to optimize water sealed underground oil storage caverns

SONG Kun¹, YAN E-chuan¹, YANG Ju¹, JI Hui-bin^{1,2}

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Beijing New Oriental Star Petrochemical Engineering Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Storing oil in large underground caverns by water sealed is an important way of strategic oil reserve in the world. It needs to optimize the layout of caverns for the stability of such a large-scale unlined underground cavern. Based on the analysis of the engineering geological characteristic of an underground project in Shandong province, the numerical model was established. And the mechanical parameters of rock mass were estimated by the generalized Hoek-Brown failure criterion with the integration of rock sample triaxial test and rock mass classification of rock mass rating (RMR) system. Choosing the depth, axial direction and space as factors, and calculated the displacement of the caverns by the FLAC^{3D} code in different schemes, determined by the orthogonal design. The visual analysis of the results of the evaluating index, key point displacement and plastic zone area was done. The axial direction is the significant factor, and the influence on the stability was studied separately. The optimized layout of the underground caverns is that the depth is -60.0 m, axial direction is N30° W and space is 25 m. It has some values for the layout of the underground oil storage caverns.

Key words: water sealed underground oil storage caverns; caverns optimization; orthogonal design; generalized Hoek-Brown failure criterion

1 引 言

大型地下水封石洞油库以其安全性高、运营费用低等显著优点而成为目前国内外石油战略储备的一种重要方式。自第 1 个地下水封石洞原油库在瑞典斯德哥尔摩(1948 年初)建成以后^[1], 世界上许多国家相继建设了大量的地下水封洞库, 包括原油、LPG (liquefied petroleum gas) 和 LNG (liquefied

natural gas) 等储备库。我国也于 1977 年在山东建造了第一个 15 万 m³ 的原油水封洞库。通常地下水封洞库大多建造在工程地质条件较好的花岗岩和花岗片麻岩岩体中, 采用不衬砌或少衬砌方式的高边墙、大跨度地下洞库。为保证该类大断面不支护地下洞室群的稳定, 需优化洞室群的布置, 使洞室围岩变形最小。

国内外学者大多通过数值方法, 开展地下水封

收稿日期: 2010-03-27

基金项目: 北京市科学技术委员会项目资助(No. 20090102(2796)); 交通运输行业联合科技攻关项目资助(No. 2010-353-342-260)。

第一作者简介: 宋琨, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事岩土体稳定性评价和灾害防治等方面的研究工作。E-mail: songkuncug@yahoo.cn

洞库的围岩稳定性研究, 如 Lu^[2] 基于 Mohr-Coulomb 准则模拟了地下储气库在 52 MPa 高压下的围岩变形; Lee 等^[3] 采用有限元、反分析、块体理论和裂隙网络模拟等方法, 研究了地下储库的稳定性; Tezuka 等^[4] 分析了日本水封式储油洞库的围岩稳定性; 连建发^[5]、陈奇等^[6] 分析了液化石油气地下洞库围岩稳定性; 王芝银等^[7] 采用 FLAC^{3D} 中的黏弹性 Maxwell 模型, 分析了某地下水封储油库的长期稳定性; 陈祥^[8]、时洪斌^[9] 采用数值方法分析了黄岛水封油库的围岩稳定性。在地下洞室群布置的优化方面, 主要通过岩层走向^[10]、破裂面^[11]、地应力^[12] 等与轴向的夹角优化洞室的轴线方向, 采用三维地质建模技术^[13]、分布密度法^[14]、块体理论^[15] 等优化断面和间距等。如何采用合理的评价指标, 优化水封洞库洞室群的布置还有很多问题需要解决。

以山东某地下洞库群为模型, 本文在采用广义 Hoek-Brown 准则估计岩体力学参数的基础上, 采用正交试验设计的方法, 优化了洞室群的埋深、轴线方向和间距等布置。

2 洞室群区工程地质条件

水封地下洞库库址区属低山丘陵地貌, 地形坡度为 35°~55°, 最高点位于库址区西北角, 高程为 350.9 m, 最低点高程为 97.5 m。该区发育 7 条断层, 其中 F3 为洞库群的控制性断层, 具右行压扭性质, 产状为 NE40° ∠53°~70°, 破碎带宽约 2.5 m。

库址区出露的地层主要是晚元古界浅肉红色~浅青灰色花岗片麻岩 (K1ηγ), 主要矿物成分为钾长石、斜长石、石英、角闪石、黑云母等, 细粒花岗片麻结构, 块状构造; 局部侵入早白垩世灰绿~深灰色煌斑岩脉 (K1χ) 和闪长岩 (K1δ), 细晶~隐晶结构, 块状构造, 在坡脚、冲沟内分布厚约 0.5~2.5 m 的第四系残坡积、洪积层 (Q₄^{del+pl}) 砾质黏性土或砂质黏性土, 如图 1 所示。

通过水压致裂测试, 本区的最大主应力为 13~16 MPa, 最小水平主应力为 6~9 MPa, 垂直应力为 3~10 MPa, 最大主应力方向为 N73° W。

3 洞库群正交数值试验

3.1 洞库群的数值模型

该水封洞库的初步设计参数为: 洞室轴线方向为 N5° W, 洞高为 30 m, 跨度为 20 m, 洞室净间距为 30 m, 埋深为 -60 m, 如图 2 所示。

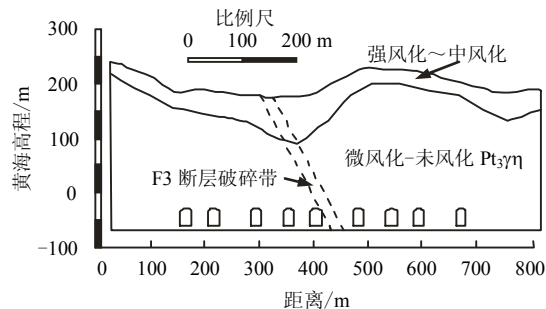


图 1 水封洞库区工程地质剖面图
Fig.1 Geological profile of water sealed underground oil storage caverns

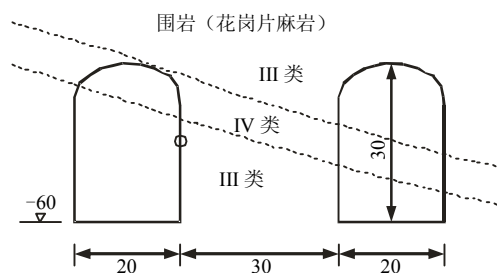


图 2 水封洞库洞室模型(单位: m)
Fig.2 Sketch model of water sealed underground oil storage caverns (unit: m)

3.2 数值计算参数

结合钻孔岩芯、钻孔摄像和岩石试验等, 采用 RMR^[16] 分类体系, 对洞室深度内 (高程 -100~0 m) 围岩进行岩体质量分类 (图 2)。根据广义 Hoek-Brown 强度准则^[17] 估计岩体的力学参数:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (2)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4)$$

式中: σ'_1 、 σ'_3 分别为岩石破坏时最大和最小有效主应力; σ_{ci} 为岩石单轴抗压强度; m_i 岩石为材料常数, 可通过岩石的三轴试验数据进行拟合得到, 或按岩石类型确定; m_b 为 m_i 的折减值; s 、 a 为岩体常数; D 为扰动系数; GSI 为 Hoek 等提出的地质强度指标, 与 RMR 的关系为^[18]

$$GSI = RMR - 5 \quad (5)$$

通过 46 个岩样的室内三轴试验 (12 组, 每组 4 个岩样), 获得如图 3 所示的摩尔圆。

根据式 (2)~(5), 确定洞室围岩岩体力学参数如表 1 所示。

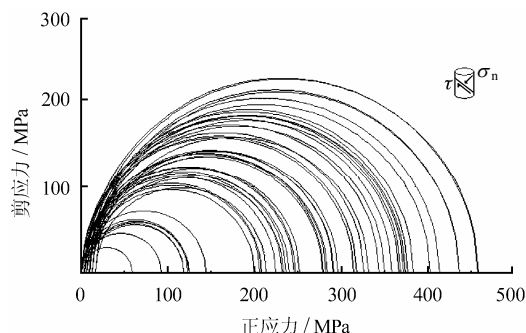


图 3 岩石三轴试验应力摩尔圆

Fig.3 Mohr stress circles of triaxial test of rock samples

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical properties of rock masses

类别	σ_{ci} /MPa	RMR	GSI	m_i	D	m_b	s	a	E_m /(10^3 MPa)	ν
II 类	232.1	73	68	16.802	0	5.358	0.029	0.502	28.180	0.24
III 类	232.1	52	47	16.802	0	2.531	0.003	0.507	8.414	0.25
IV 类	232.1	37	32	16.802	0	1.481	0.001	0.520	3.548	0.27

3.3 正交数值试验

洞室群优化的目的实际上是寻找多种组合下洞室变形的最小极值点或稳定性系数的最大极值点，极值点搜索的计算量较大，且随着模型参数数目增加，其工作量巨大，难以实现。为此，本文采用试验设计中应用较好的正交设计方法，优化组合多个洞室参数，以获得一个较优的模型。

对水封地下洞室群设计阶段的优化，主要涉及洞室的埋深、洞轴线方向（轴向）和洞室间距。洞室的埋深不仅与围岩岩体质量有关，还与保证水封效果的水文地质条件有关，根据水封效果的评价，确定洞底高程在 $-50 \sim -60$ m。洞室轴向布置要考虑地应力和结构面优势方向等的影响，确定洞室轴向为 $N60^\circ W \sim N$ 。相邻洞室净间距为 $20 \sim 30$ m。若每一因素的水平增加，则试验数目将呈几何级数增长。因此，在每一因素的取值范围内分别确定了 3 个水平，其取值见表 2。

表 2 模型参数试验水平取值

Table 2 The values of different levels experiment

水平	因素		
	埋深/ m	轴向	间距/ m
1	-60	N	30
2	-55	$N30^\circ W$	25
3	-50	$N60^\circ W$	20

正交试验方案可通过选取适当的正交试验表来构造。根据表 2 所示的 3 因素 3 水平试验，可选择正交表 $L_9(3^4)$ 选取前 3 列来构造试验方案，此时试

验次数应为 9 次，试验方案见表 3。

数值试验的评价指标选择洞室边墙的关键点^[19]位移 D_k （图 2 中左洞室右边墙中点画圈处为关键点，因该点附近布置有连接巷道，且对邻洞影响较明显）和塑性区面积 S_p （洞室周围所有的塑性区面积之和），试验结果列于表 3。

表 3 正交设计试验方案及结果

Table 3 The orthogonal design scheme and results

试验号	埋深 / m	轴向	间距 / m	D_k / cm	S_p / m^2
1	-60	N	30	0.534	814.6
2	-60	$N30^\circ W$	25	0.435	764.1
3	-60	$N60^\circ W$	20	1.009	820.7
4	-55	N	25	0.614	882.4
5	-55	$N30^\circ W$	20	0.566	817.5
6	-55	$N60^\circ W$	30	1.164	787.4
7	-50	N	20	0.657	931.9
8	-50	$N30^\circ W$	30	0.622	783.5
9	-50	$N60^\circ W$	25	1.159	738.6

3.4 正交试验结果分析

正交试验的结果分析主要是直观分析，即通过计算各因素不同水平的试验指标均值及各因素的指标均值的极差，评定因素重要性顺序，找出每个因素的最优点水平，将各因素的最优水平组合起来，得到对于该试验指标的最优因素组合方案。对位移和塑性区面积，均值越小越好，极差越大越重要，其结果见表 4、5。

表 4 对评价指标 D_k 的正交试验直观分析结果Table 4 Visual analysis results of evaluating index, D_k

因素	不同水平的 D_k 均值/cm			极差/cm	重要性排序	最佳水平
	1	2	3			
埋深	0.659	0.781	0.813	0.154	2	1
轴向	0.602	0.541	1.111	0.570	1	2
间距	0.774	0.736	0.744	0.038	3	2

表 5 对评价指标 S_p 的正交试验直观分析结果Table 5 Visual analysis results of evaluating index, S_p

因素	不同水平的 S_p 均值/ m^2			极差/ m^2	重要性排序	最佳水平
	1	2	3			
埋深	799.80	829.20	818.00	29.40	3	1
轴向	876.40	788.37	782.23	94.17	1	3
间距	795.17	795.13	856.70	61.57	2	2

通过对评价指标关键点位移和塑性区面积的直观分析可知，洞室轴向对位移影响最大，间距影响最小；轴向对塑性区面积影响最大，埋深影响最小。因此，洞室布置的最优方案为：埋深 -60.0 m、轴

向为 $N30^\circ W \sim N60^\circ W$ ，间距为 25 m。

4 洞室轴向对围岩稳定性的影响

正交试验中，若选择的水平数增加 1，则需选用 $L_{16}(4^5)$ 的正交表，试验次数为 16 次，相对 $L_9(3^4)$ 增加 7 次。此时，对洞室轴向的水平为 N、 $N20^\circ W$ 、 $N40^\circ W$ 和 $N60^\circ W$ ，相对原 3 水平的试验方案，精度提高不明显。因此，本文借鉴试验科学（如化学试验、医药试验）里的方法进行影响最明显因素的单因素试验。

单因素数值试验是在洞室埋深和间距固定的条件下研究洞室轴向对围岩变形的影响。在正交试验确定的最优方案的范围内，以洞室埋深 -60 m、间距为 25 m、轴向分别为 $N30^\circ W$ 、 $N35^\circ W$ 、 $N40^\circ W$ 、 $N45^\circ W$ 、 $N50^\circ W$ 、 $N55^\circ W$ 和 $N60^\circ W$ 进行数值试验，并对左洞室边墙、拱顶和底板关键点进行监测（监测点位置见图 4），其结果如图 5 所示。通过图 5 可以看出，随着洞室轴向的偏转（逆时针），洞室围岩的变形逐渐增大，其中底板中点（GP4）和边墙中点（GP2）的变形最小，拱顶的变形最大（GP3），几乎与洞室的最大变形相同。随洞室轴向偏转，塑性区面积先减小后增大。

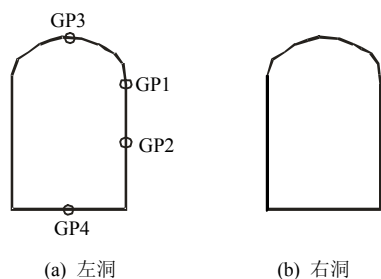


图 4 数值试验监测点布置图

Fig.4 Monitoring points' layout of numerical calculation

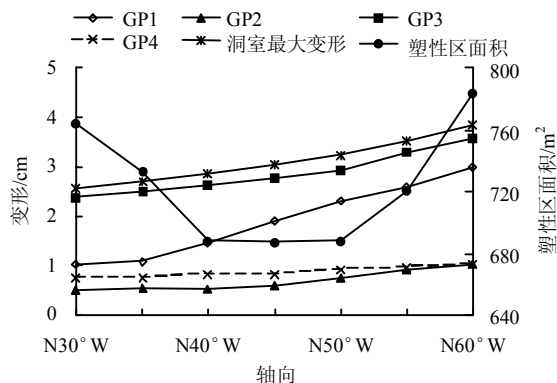


图 5 不同轴向下位移和塑性区面积变化曲线

Fig.5 The curves of displacement and plastic zone area under different axial directions

图 6 为各监测点变形的相对变化率（相对初值—轴向为 $N30^\circ W$ 的位移的变化率）。从图中可以看出，GP1 点的相对变化率最大，最大值为 66.04%，轴向在 $N35^\circ W \sim N45^\circ W$ 间变化时，相对变化率由 5.12% 增加为 46.01%，变化最明显。最大变形和 GP3 点的位移变化率基本随轴向的改变线性增加。

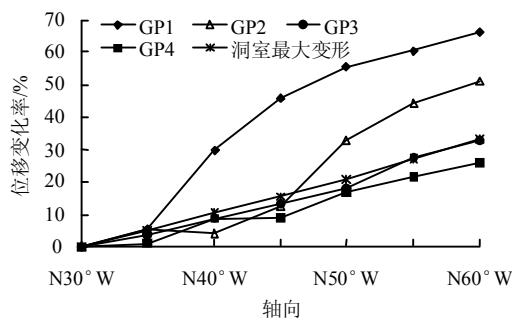


图 6 不同轴向下监测点位移变化率

Fig.6 The changes of displacement under different axial directions

国内外对洞室围岩稳定性的研究主要以变形为控制指标和判据，通过图 5、6 的分析，综合确定洞室的最优轴向为 $N30^\circ W$ 。因此，该水封洞库洞室群的最优布置方案为：埋深为 -60.0 m，轴向 $N30^\circ W$ ，间距为 25 m。

5 结 论

(1) 通过正交试验的直观分析得到，对该洞室群围岩变形和塑性区面积影响最大的为洞室轴线方向，对变形影响最小的为间距，对模型塑性区面积影响最小的是洞室埋深。

(2) 该水封洞库洞室群的最优布置方案为埋深为 -60.0 m，轴向为 $N30^\circ W$ ，间距为 25 m。

(3) 通过洞室轴向对围岩稳定性影响的单因素试验研究获得，随着洞室轴向的偏转（逆时针），围岩的变形逐渐增大，拱顶的变形量最大，顶拱与边墙连接处的相对变化率最大，最大值为 66.04%；随洞室轴向偏转，塑性区面积先减小后增大。

致谢：本研究的野外工作得到了北京东方新星石化工程股份有限公司胡德新总工和宋矿银高工的支持和帮助，在此深表感谢！

参 考 文 献

- [1] MOBERG S H. Storage of heavy fuel oil in rock caverns during three decades[C]//International Symposium on Storage in Excavated Rock Caverns. Stockholm: [s. n.], 1977: 117-123.

- [2] LU MING. Finite element analysis of a pilot gas storage in rock cavern under high pressure[J]. **Engineering Geology**, 1998, 49(3-4): 353-361.
- [3] LEE CHUNG-IN, SONG JAE-JOON. Rock engineering in underground energy storage in Korea[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2003, 18(5): 467-483.
- [4] TEZUKA M, SEOKA T. Latest technology of underground rock cavern excavation in Japan[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2003, 18(2-3): 127-144.
- [5] 连建发. 锦州大型地下水封 LPG 洞库岩体完整性参数及围岩稳定性评价研究[博士学位论文 D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2004.
- [6] 陈奇, 慎乃齐, 连建发, 等. 液化石油气地下洞库围岩稳定性分析——以山东某地实际工程为例[J]. **煤田地质与勘探**, 2002, 30(3): 33-36.
- CHEN Qi, SHEN Nai-qi, LIAN Jian-fa, et al. Stability analysis of surrounding rock mass of underground storage for LPG—Take a real project in Shandong province as an example[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2002, 30(3): 33-36.
- [7] 王芝银, 李云鹏, 郭书太, 等. 大型地下储油洞黏弹性稳定性分析[J]. **岩土力学**, 2005, 26(11): 1705-1710.
- WANG Zhi-yin, LI Yun-peng, GUO Shu-tai, et al. Viscoelastic stability analysis of underground petroleum storage caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 1705-1710.
- [8] 陈祥. 黄岛地下水封石油洞库岩体质量评价及围岩稳定性分析[博士学位论文 D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- [9] 时洪斌. 黄岛地下水封洞库水封条件和围岩稳定性分析与评价[博士学位论文 D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [10] 倪绍虎, 肖明, 邹红英. 岩层走向对地下洞室围岩稳定的影响[J]. **武汉大学学报(工学版)**, 2008, 41(3): 47-51.
- NI Shao-hu, XIAO Ming, ZOU Hong-ying. Influence of bedding strike direction on stability of underground caverns[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2008, 41(3): 47-51.
- [11] 周建民, 金丰年, 王斌, 等. 不同破裂面条件下洞室轴线走向的计算方法[J]. **地下空间与工程学报**, 2005, 1(3): 367-369.
- ZHOU Jian-min, JIN Feng-nian, WANG Bin, et al. Calculating method of cavity axis' orientation in fractures[J]. **Chinese Journal of Underground Space**, 2005, 1(3): 367-369.
- [12] 李莉, 何江达, 余挺, 等. 关于地下厂房纵轴线方位的优化设计[J]. **四川大学学报(工程科学版)**, 2003, 35(3): 34-37.
- LI Li, HE Jiang-da, YU Ting, et al. Optimized design on the direction of longitudinal axle of underground plant[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2003, 35(3): 34-37.
- [13] 钟登华, 刘杰, 李明超, 等. 基于三维地质模型的大型地下洞室群布置优化研究[J]. **水利学报**, 2007, 38(1): 60-66.
- ZHONG Deng-hua, LIU Jie, LI Ming-chao, et al. Layout optimization of large scale underground structure group based on 3-D geological model[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 38(1): 60-66.
- [14] 王后裕, 陈上明, 言志信, 等. 地下洞室断面和间距优化计算的分布密度法[J]. **工程力学**, 2004, 21(3): 204-208.
- WANG Hou-yu, CHEN Shang-ming, YAN Zhi-xin, et al. Distribution density method for optimization of spacing and cross section of underground openings[J]. **Engineering Mechanics**, 2004, 21(3): 204-208.
- [15] 邵冠慧, 李晓昭, 赵晓豹, 等. 基于块体理论安全系数的隧道优化设计[J]. **工程地质学报**, 2010, 18(4): 581-585.
- SHAO Guan-hui, LI Xiao-zhao, ZHAO Xiao-bao, et al. Tunnel design optimization based on safety factor of key-block theory[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(4): 581-585.
- [16] BIENIAWSKI Z T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- [17] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion[C]//Proc. NARMS-TAC Conference. Toronto: [s. n.], 2002: 267-273.
- [18] 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.
- [19] ZHU W S, LI X J, ZHANG Q B, et al. A study on sidewall displacement prediction and stability evaluations for large underground power station caverns[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(7): 1055-1062.