

文章编号: 1000-7598 (2010) 12-3984-07

大连地下石油储备库地应力场反演分析

于 崇¹, 李海波¹, 李国文², 刘亚群¹

(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, 武汉 430071; 2.大庆油田工程有限公司, 黑龙江 大庆 163712)

摘 要: 初始地应力场是地下工程稳定性评价的基础。结合大连地下石油储备库工程, 提出一种基于现场地应力实测资料直接反演初始地应力场的新方法。首先, 通过现场实测地应力结果的统计分析, 建立初始地应力与高程之间的关系; 其次, 由于主应力的方向与模型坐标轴方向不重合, 进行应力变换; 最后, 基于 FLAC^{3D} 的 FISH 语言编写函数, 采用 Hoek-Brown 强度准则, 直接反演大连地下石油储备库的初始地应力场。计算结果与实测结果的对比分析表明: 直接法反演的初始应力场的拟合度较高, 误差较小, 可以满足工程的需要。该法是一种切实可行、简单有效的方法。

关 键 词: 初始地应力场; 反演分析; 石油储备; FLAC^{3D}

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Inversion analysis of initial stress field of Dalian underground oil storage cavern

YU Chong¹, LI Hai-bo¹, LI Guo-wen², LIU Ya-qun¹

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

Abstract: Initial stress field is the basis of the stability evaluation of underground engineering. In initial stress field analysis of Dalian underground oil storage cavern, based on site stress test data, a new method of inversion of initial stress field is proposed. Firstly, the relationship between initial stress field and elevation is established according to the analysis of measured stresses. Secondly, because the direction of principal stress and model coordinate axis do not coincide, the stress must be transformed. Finally, inversion of initial stress field is completed with functions using the Hoek-Brown rock mass strength criterion. The functions are defined with the programming language FISH embedded within FLAC^{3D}. Through the comparison between calculated stresses and measured stresses, it is shown that the proposed method has higher inversion precision, smaller error and meets the needs of engineering, which reveals that it is a practical, simple and effective method.

Key words: initial stress field; inversion analysis; oil storage; FLAC^{3D}

1 引 言

石油是重要的战略资源, 自 20 世纪 80 年代以来, 由于国民经济的快速增长, 我国对石油的需求逐步加大。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。为此, 建立石油战略储备是确保能源安全、维护国民经济健康发展的重要手段。由于地下岩洞石油储备方式具有占地省、安全性高、对景观破坏小、维修费低、投资省、适合战备要求的特点, 因而作为石油战略储备的主要手段。

在地下岩洞石油储备库设计中, 地应力场的确定及反演是储备库稳定性评价的基础, 大量的现场地应力测试工作复杂、成本高, 因此, 如何利用有限的测试数据来反演工程区域的初始地应力场分布情况显得尤为重要。岩体初始地应力反演的主要方法如表 1^[1-10]所示。

本文结合大连地下石油储备库工程, 尝试一种区别于以上常规方法的初始地应力反演新方法。首先, 利用现场实测的地应力结果, 回归分析各测点初始地应力值与高程之间的关系; 然后, 在所建立的数值模型中, 根据主应力的方向与模型坐标轴方向, 进行应力变换; 最后, 基于 FLAC^{3D} 的 FISH 语

收稿日期: 2009-09-21

第一作者简介: 于崇, 男, 1981 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事地下储油洞室稳定性研究方面的工作。E-mail: yuchongsir@163.com

言开发平台, 采用 Hoek-Brown 强度准则, 直接生成回归分析所得到初始地应力场, 再将反演结果与现场实测结果进行了对比分析, 验证了此种方法的合理性、有效性。

表 1 地应力反演方法

Table 1 Inversion analysis of initial stress field

方法	原理	适用范围
自重应力法	假定初始地应力场由岩体自重产生。	适用于地质构造简单或风化程度较高的岩体初始地应力场的估算。
回归分析法	地应力值作为因变量, 自重应力场和各项因素下的构造应力场作为自变量, 利用最小二乘法求解回归系数。	适用于有较多的初始地应力监测资料的情况。
函数法	根据弹性力学理论, 假定一个统一应力函数或位移函数来反映所求区域的初始应力场。	单函数描述地质构造复杂的岩体误差较大, 因此, 仅适用于地质构造简单的均匀地层。
位移反分析法	根据现场实测的位移资料, 反算地应力的大小和方向。	适用于施工期具有位移变形监测资料的工程。
边界法	不断改变边界条件(力或位移), 使已知点的计算地应力值或变形破坏方式与已知条件相比较达到最佳拟合。	适用各种岩体情况的地应力反演, 但因边界调整无规律可循, 对解的惟一性没有理论依据, 解的收敛性难以判断, 不可避免地产生边界效应。

2 工程概况

大连地下石油储备库目前正处于可行性研究阶段, 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, 而且重量大。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, 岩体平均纵波速度均大于 4 500 m/s, RQD 大于 90%, 局部达 100%。根据《工程岩体分级标准》(GB50218—94) [11], 库区微风化斜长角闪片麻岩 BQ 值评分均属于 I~II 级; 根据《水利水电工程地质勘察规范》(GB50287—99) [12], 库区微风化斜长角闪片麻岩 T 值评分均属于 I~II 级。

3 库区洞室群初始地应力场特征分析

本工程在拟建库区共进行了 3 个钻孔的现场地

应力试验^[13], 即钻孔 DZ-2-01、DZ-2-02、DZ-2-03。各钻孔的侧压系数范围如下: DZ-2-01 的侧压系数 $\lambda = 2.07 \sim 4.18$; DZ-2-02 的 $\lambda = 2.88 \sim 4.17$; DZ-2-03 的 $\lambda = 2.89 \sim 3.31$ 。在试验深度范围内, 各孔侧压系数 σ_H / σ_V 均大于 1, 表明库区地应力场以构造应力场为主导。两个水平主应力分别为大主应力和中主应力, 垂直主应力为小主应力。图 1 为 3 个测试钻孔侧压系数 λ 与测试深度的关系图。

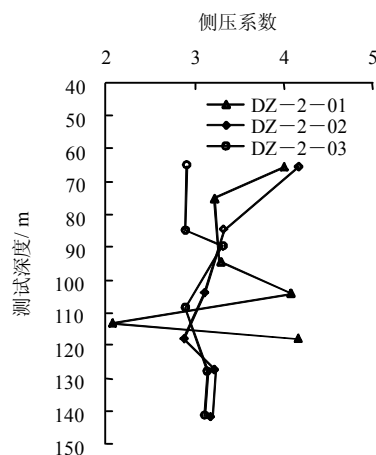


图 1 3 个钻孔侧压系数与测试深度关系图

Fig.1 Relationships between lateral pressure coefficient and test depth for 3 boreholes

图 2 为 3 个钻孔大主应力值与测试深度的关系图。图 3 为 3 个钻孔中主应力值与测试深度的关系图。从图中可以看出, 在试验深度范围内, 除个别点外, 3 个钻孔大主应力、中主应力值比较接近。在相同试验深度处, 钻孔 DZ-2-01 大主应力、中主应力值略大, 钻孔 DZ-2-02 次之, 钻孔 DZ-2-03 略小。

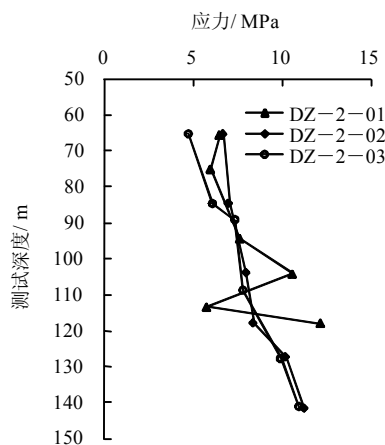


图 2 3 个钻孔大主应力值与测试深度关系图

Fig.2 Relationships between maximum principal stress and test depth in the region of three boreholes

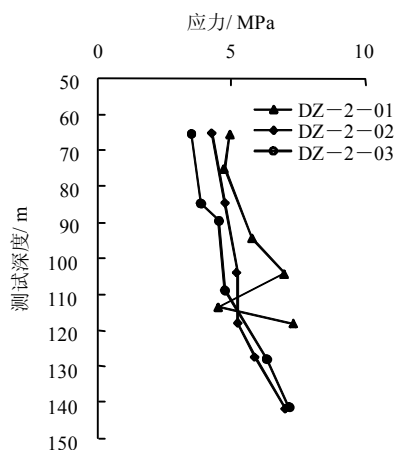


图3 3个钻孔中主应力值与测试深度关系图

Fig.3 Relationships between intermediate principal stress and test depth in the region of three boreholes

钻孔 DZ-2-01 孔口高程为 72.02 m, 钻孔 DZ-2-02 孔口高程为 78.05 m, 钻孔 DZ-2-03 孔口高程为 68.42 m。由于钻孔 DZ-2-01 测试深度分别为 104.11、113.36、117.82 m 的地应力值离散性较大, 故回归分析中未包含这 3 个点的值。图 4 为 3 个钻孔 15 个测点的大主应力值、中主应力值与高程的回归分析图。

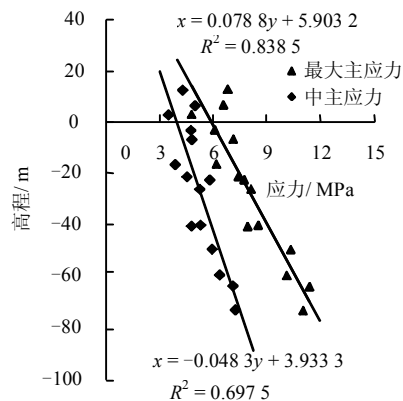


图4 大主应力、中主应力与高程回归分析图

Fig.4 Relationships between maximum principal stress & intermediate principal stress and elevation

结果表明: 大主应力、中主应力随高程呈现良好的线性关系, 其公式如下:

$$\sigma_1 = -0.0788z + 5.9032, \quad -72.78 \leq z \leq 12.81, \quad R^2 = 0.9157 \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 z 分别表示大、中主应力和高程值; R^2 为相关系数。

$$\sigma_2 = -0.0483z + 3.9333, \quad -72.78 \leq z \leq 12.81, \quad R^2 = 0.8352 \quad (2)$$

4 初始应力场的数值反演

4.1 实体几何模型及网格划分

根据库区的地形图建立的计算模型如图 5 所示, 储油洞室及补水幕巷道模型如图 6 所示。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, 底面高程为 -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。模型中包含 8 个储油洞室, 洞库的轴向方向为 N40° W (北偏西 40°), 洞室之间净间距为 30 m, 两组洞库之间的净间距为 50 m, 以确保洞室围岩的强度和稳定性。6 个水幕巷道分为 1 条主巷道和 5 条分支巷道。主巷道与洞库的轴线方向平行, 布置在两组储存不同油品的洞库中间, 长度为 780 m; 分支巷道与洞库轴线方向垂直, 每条巷道间距为 165 m, 长度为 430 m。储油洞室拱顶高程为 -40 m, 底板高程为 -70 m; 水幕巷道拱顶高程为 -20 m, 底板高程为 -25 m。整个模型采用六面体单元, 共 200 238 个单元, 200 362 个节点。

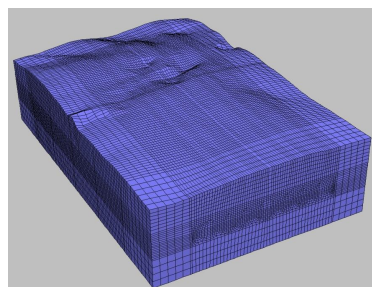


图5 计算模型

Fig.5 Calculation model

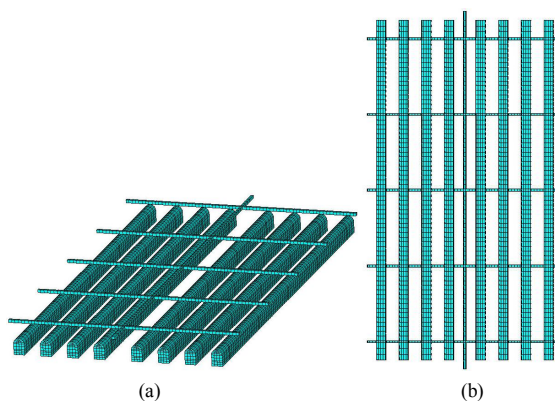


图6 洞室及补水幕巷道模型图

Fig.6 Caverns and water tunnels model

4.2 本构模型及材料参数

FLAC^{3D} 中内置 12 种岩土本构模型以适应各种工程分析的需要。目前工程界常采用 Mohr-Coulomb

本构模型, 但大量研究表明, Hoek-Brown 强度准则具有线性的 Mohr-Coulomb 强度理论无法比拟的优点^[14]: ①综合考虑了岩块和结构面的强度、岩体结构及地质条件等多种因数的影响, 能够反映岩体的非线性破坏特征。②弥补了 Mohr-Coulomb 准则中岩体不能承受拉应力以及对低应力区不太适用的不足, 能解释低应力区和拉应力区以及对强度的影响, 因而更符合岩体的破坏特征。因此, 本文中采用 Hoek-Brown 强度准则进行数值反演。

节理岩体的广义 Hoek-Brown 准则 2002 版本定义为^[15]

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3)$$

式中: m_b 为 Hoek-Brown 常数 m_i 的折减值, 由下式求得

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (4)$$

式中: D 为岩体在爆破损伤或应力松弛扰动作用下的影响程度。对于未受扰动岩体, $D = 0$; 对于严重扰动岩体, $D = 1$ 。

令 $\sigma'_3 = 0$, 可得到岩体的单轴抗压强度:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^a \quad (5)$$

参数 s 和 a 可由下式计算而得

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (7)$$

GSI 为地质强度指标, 其值可以根据节理特征与岩块胶结程度由图 7 确定, 图中 N/A 表示个别情况不适用该方法取值。

Hoek 证明了对于脆性岩体, 其单轴抗压强度等于二维拉伸强度。令 $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma'_t$, 可得到岩体的抗拉强度为

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \quad (8)$$

Hoek-Brown 准则 2002 年版本对用户应用该准则遇到的一些疑问和实际问题进行了澄清, 并尽可能地提供了比较严格的计算输入参数的方法。这些方法可在 RockScience 公司编写的 Windows 程序“RocLab”下实现。该程序包含了估计完整岩块的单轴抗压强度和材料常数 m_i , 以及确定地质强度指标 GSI 以和扰动系数 D 所必须的图表。其中扰动系数 D 可采纳表 2 的推荐值, 结合实际工程情况本文偏于保守取 $D = 0.8$ 。其他 Hoek-Brown 材料参数如表 3、4 所示。

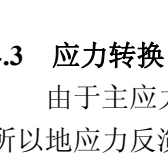
岩石种类: 常规	岩石表面情况				
	很好	好	一般	差	很差
GSI 值: 50					
	岩石表面质量降低 $\Rightarrow$				
 完整的-完整的岩体或仅有少数间距很大节理 节理化的-岩体被 3 类相互	90	80		N/A	N/A
 正交的节理面分割为立方体, 但块体之间相互联结的很好	70	60			
 高度节理化的-岩石块体被 4 种或更多种不连续面分割为相互联结的角砾	50	40			
 节理化的/杂乱的-岩石块体被多种相交的不连续面切割成角砾状的块体组成, 块体间有错位或折叠	30	20			
 非常杂乱的-岩石块体非常破碎, 块体间联结很弱, 块体有角砾、圆砾及混合体					10
 遍布节理的-因密集的低强度节理面分割, 无块体	N/A	N/A			

图 7 地质强度指标 GSI 分级表^[16]

Fig.7 The values of geological strength index (GSI)

表 2 扰动因子 D 的推荐值^[17]

Table 2 Guidelines for estimating disturbance factor D

岩体表面	岩体描述	建议的 D 值
	围岩质量好的岩体中控制爆破或是采用 TBM 机开挖, 以上两种情况对隧道附近岩体扰动较小。	0
	围岩质量较差岩体中采用机器或是人工开挖 (无爆破), 对附近岩体扰动较小。	0
	应力集中导致顶拱明显下降, 在未设置如图所示的仰拱情况下, 扰动剧烈。	0.5 未设置仰拱
	硬岩中采用非控制爆破开挖, 导致局部严重损伤, 围岩破坏深度为 2 m 或 3 m。	0.8

4.3 应力转换

由于主应力的方向与模型坐标轴方向不重合, 所以地应力反演之前应先进行应力转化, 图 8 为应力转化计算图。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma'_x l_1^2 + \sigma'_y m_1^2 + 2\tau'_{xy} l_1 m_1 \\ \sigma_y &= \sigma'_x l_2^2 + \sigma'_y m_2^2 - 2\tau'_{xy} l_2 m_2 \\ \tau_{xy} &= (\sigma'_x - \sigma'_y) l_1 m_1 + \tau'_{xy} (l_1 m_2 + l_2 m_1) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: σ'_x 、 σ'_y 、 τ'_{xy} 为原坐标下的应力; σ_x 、 σ_y 、

表 3 未扰动区内 Hoek-Brown 模型计算力学参数
Table 3 Mechanical parameters of Hoek-Brown model in undisturbed region

岩性	高程 / m	地质强度指标 GSI	单轴抗压强度 / MPa	m_i	岩体变形模量 / GPa	体积模量 / GPa	剪切模量 / GPa	m_b	s	a
强风化片麻岩	>48.0	35	35.00	28	5.1	4.3	2.0	2.748	0.000 7	0.516
中风化片麻岩	48.0~34.0	50	45.00	29	16.9	11.3	6.8	4.863	0.003 9	0.506
	34.0~8.4	74	78.29	33	57.7	34.3	23.6	13.039	0.055 6	0.501
	8.4~-15.6	84	77.45	32	62.3	37.1	25.5	18.071	0.169 0	0.500
微风化片麻岩	-15.6~-31.6	84	79.69	32	68.8	51.3	26.9	18.071	0.169 0	0.500
	-31.6~-53.6	84	80.92	32	71.9	35.6	30.9	18.071	0.169 0	0.500
	-53.6~-69.6	87	79.20	32	73.7	38.0	31.3	20.115	0.235 9	0.500
	<-69.6	89	83.62	32	81.5	45.3	34.0	21.604	0.294 6	0.500

表 4 扰动区内 Hoek-Brown 模型计算力学参数
Table 4 Mechanical parameters of Hoek-Brown model in disturbed region

岩性	高程 / m	地质强度指标 GSI	单轴抗压强度 / MPa	m_i	岩体变形模量 / GPa	体积模量 / GPa	剪切模量 / GPa	m_b	s	a
	-15.6~-31.6	84	79.69	32	35.1	26.2	13.7	12.346	0.088 5	0.500
微风化片麻岩	-31.6~-53.6	84	80.92	32	36.7	18.2	15.8	12.346	0.088 5	0.500
	-53.6~-69.6	87	79.20	32	39.0	20.1	16.6	14.760	0.139 5	0.500
	<-69.6	89	83.62	32	44.0	24.4	18.3	16.626	0.188 9	0.500

τ_{xy} 为新坐标下的应力； l_1 、 l_2 、 m_1 、 m_2 为新坐标对老坐标的方向余弦。

这里 $\sigma'_x = \sigma_1$ ， $\sigma'_y = \sigma_2$ ， $\tau'_{xy} = 0$ ， $\alpha = 35^\circ$ ，计算求得 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 如下：

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_x &= \sigma_h \cos^2 35^\circ + \sigma_H \sin^2 35^\circ \\ \sigma'_y &= \sigma_h \sin^2 35^\circ + \sigma_H \cos^2 35^\circ \\ \tau'_{xy} &= (\sigma_h - \sigma_H) \cos 35^\circ \sin 35^\circ \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

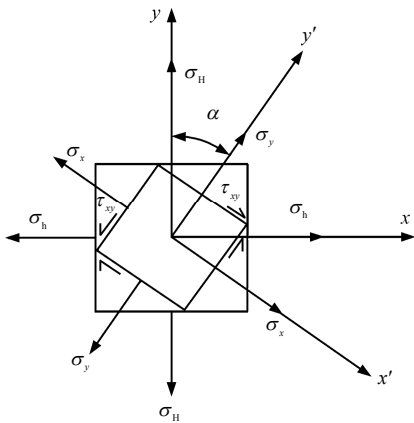


图 8 应力转换计算图
Fig.8 The calculation chart of stress conversion

4.4 数值计算及结果分析

根据所建储油库的高程位置，并没有对岩体浅部进行现场地应力测试。浅部地应力一般以自重应力为主，到达一定深度转化为构造应力为主。因此，地表至高程 6.77 m 范围内，遵循以上原则使侧压力

系数逐渐增大；高程在 6.77 m 以下，则依据回归模型及应力转化公式即可反演该部应力场。以上的步骤可利用 FLAC^{3D} 的 FISH 语言编写相应的程序实现。

图 9~11 为 3 个主应力分布云图。在地表附近，由于地形的影响，应力分布不均，变化较明显，而深部岩体的应力场分布相对较均匀稳定。为了检验计算模拟结果的可靠性，将数值计算的 3 个测试钻孔 15 个测点地应力结果与现场实测的地应力结果对比分析如表 5 所示，图 12~14 为各应力的拟合柱状图。结果表明，地应力仅个别测点的应力值相差较大，如第 4 测点的大应力实测值为 6.79 MPa，计算值为 4.97 MPa，绝对误差为 -1.82 MPa，相对误差为 -26.7%；分析原因主要由于测点部位的岩体质量相对较差，使得现场实测的地应力值偏小，而反演分析采用的回归分析公式并不能真实地反映由于岩体质量较差带来的地应力值的降低，故使得这

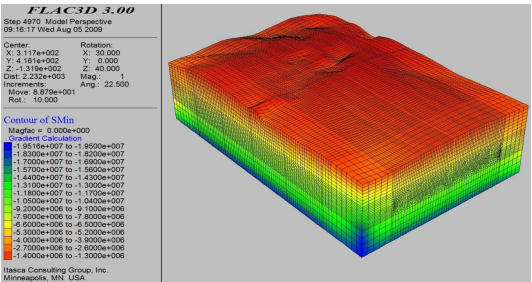


图 9 大主应力云图
Fig.9 Nephogram of maximum principal stresses

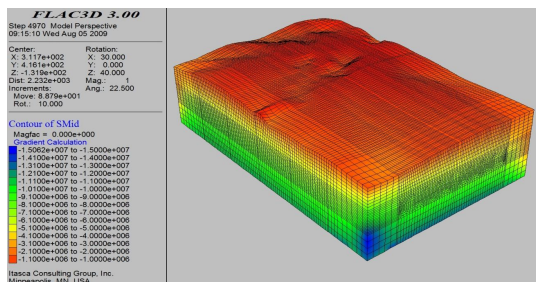


图 10 中主应力云图

Fig.10 Nephogram of intermediate principal stresses

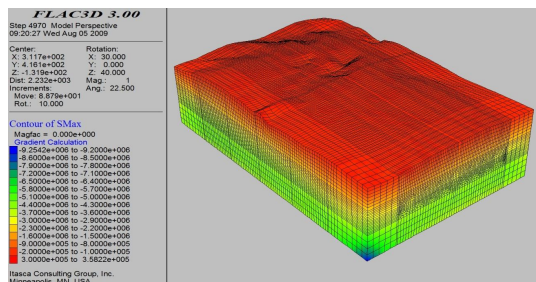


图 11 小主应力云图

Fig.11 Nephogram of minor principal stresses

表 5 初始应力测值与反演应力值的比较

Table 5 Comparison between measured stresses and calculated stresses in inversion analysis

测点 编号	测点 孔号	高程 / m	大主应力				中主应力				小主应力			
			实测数值	计算数值	绝对误差	相对误差	实测数值	计算数值	绝对误差	相对误差	实测数值	计算数值	绝对误差	相对误差
			/ MPa	/ MPa	/ MPa	/ %	/ MPa	/ MPa	/ MPa	/ %	/ MPa	/ MPa	/ MPa	/ %
1 [#]	DZ-2-01	6.77	6.55	6.36	-0.19	-2.9	4.96	4.94	-0.02	-0.4	1.63	1.86	0.23	14.1
2 [#]	DZ-2-01	-2.85	6.07	7.37	1.30	21.4	4.73	5.72	0.99	20.9	1.88	2.22	0.34	18.3
3 [#]	DZ-2-01	-22.15	7.71	8.64	0.93	12.0	5.79	6.72	0.93	16.1	2.35	2.61	0.26	11.0
4 [#]	DZ-2-02	12.81	6.79	4.97	-1.82	-26.7	4.27	3.65	-0.62	-14.6	1.63	1.90	0.27	16.7
5 [#]	DZ-2-02	-6.50	7.10	6.10	-1.00	-14.1	4.78	4.32	-0.46	-9.6	2.13	2.27	0.14	6.5
6 [#]	DZ-2-02	-25.79	8.09	7.60	-0.49	-6.1	5.22	5.22	0.00	-0.1	2.60	2.78	0.18	6.7
7 [#]	DZ-2-02	-39.76	8.49	8.77	0.28	3.3	5.27	6.00	0.73	13.8	2.95	3.14	0.19	6.4
8 [#]	DZ-2-02	-49.19	10.31	9.30	-1.01	-9.8	5.91	6.32	0.41	6.9	3.18	3.32	0.14	4.4
9 [#]	DZ-2-02	-63.50	11.36	10.58	-0.78	-6.8	7.07	7.07	0.00	0.0	3.55	3.74	0.19	5.2
10 [#]	DZ-2-03	3.15	4.77	4.45	-0.32	-6.8	3.48	3.61	0.13	3.6	1.63	1.68	0.04	2.8
11 [#]	DZ-2-03	-16.15	6.16	5.90	-0.26	-4.2	3.85	4.49	0.64	16.6	2.13	2.21	0.08	3.9
12 [#]	DZ-2-03	-20.98	7.39	6.28	-1.11	-15.0	4.51	4.74	0.23	5.0	2.23	2.35	0.12	5.2
13 [#]	DZ-2-03	-40.22	7.90	7.82	-0.08	-1.0	4.76	5.88	1.12	23.5	2.73	2.82	0.09	3.3
14 [#]	DZ-2-03	-59.20	10.08	9.40	-0.68	-6.7	6.33	6.82	0.49	7.8	3.20	3.35	0.15	4.6
15 [#]	DZ-2-03	-72.78	11.00	10.24	-0.76	-7.0	7.21	7.36	0.15	2.1	3.53	3.65	0.12	3.5

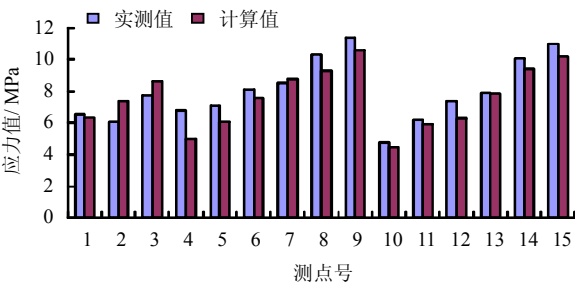


图 12 大主应力拟合柱状图
Fig.12 Fitting histogram of maximum principal stresses

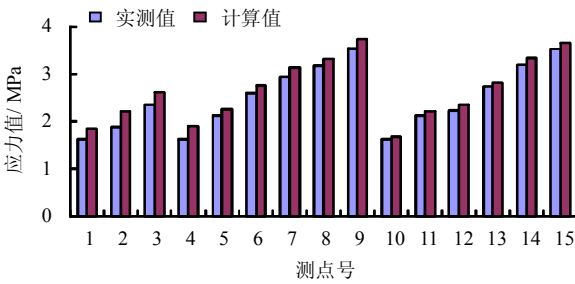


图 14 小主应力拟合柱状图
Fig.14 Fitting histogram of minor principal stresses

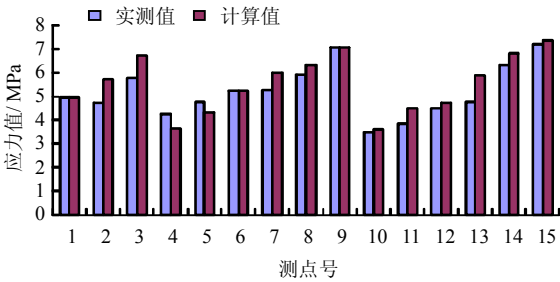


图 13 中主应力拟合柱状图
Fig.13 Fitting histogram of intermediate
principal stresses

些测点的误差较大。储油洞室所在位置各测点的误差较小，说明此种方法对该库区的初始地应力场的拟合效果较好。

5 结 论

(1) 通过对现场地应力的实测资料处理和分析，得出 3 个主应力的大小及方向。在测试深度范围内，侧压系数基本稳定在 3.2 左右。各孔侧压系数均大于 1，且三向主应力的关系为： $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ ，表

明库区地应力场以构造应力场为主导。

(2) 基于 $FLAC^{3D}$ 的 FISH 语言二次开发, 提出一种基于现场地应力实测资料直接反演初始地应力场的新方法。该法依据现场实测地应力回归模型, 直接赋予整个模型单元相应的应力, 无需提出具体的应力或位移函数, 避免了边界法不断调节边界条件带来的不足, 而且避免了边界效应。

(3) 储油洞室作为地下油库的关键部位。通过对反演结果与实测结果的对比分析, 直接法反演的应力场在关键部位处拟合度较高, 误差较小, 为后期的稳定性评价提供较准确的初始地应力场。

参考文献

- [1] 张建国, 张强勇, 杨文东, 等. 大岗山水电站坝区初始地应力场反演分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3071—3078.
ZHANG Jian-guo, ZHANG Qiang-yong, YANG Wen-dong, et al. Regression analysis of initial geostress field in dam zone of Dagangshan hydropower station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3071—3078.
- [2] 赵德安, 李国良, 陈志敏, 等. 乌鞘岭隧道三维地应力场多元有限元回归拓展分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2687—2694.
ZHAO De-an, LI Guo-liang, CHEN Zhi-min, et al. Three-dimensional FE regression analysis of multivariate geostress of Wushaoling tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.1): 2687—2694.
- [3] 尚岳全. 岩体稳定和区域稳定数值模拟模型边界条件确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 201—204.
SHANG Yue-quan. The ways of determining boundary conditions in geomechanical numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(2): 201—204.
- [4] 袁风波. 岩体地应力场的一种非线性反演新方法研究[硕士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.
- [5] 朱付广, 王世杰, 胡伟, 等. 岩体初始地应力场的反演分析方法[J]. 科技咨询早报, 2007, (9): 213.
ZHU Fu-guang, WANG Shi-jie, HU Wei, et al. The inversion analysis method of in-situ stress[J]. **Science and Technology Consulting Herald**, 2007, (9): 213.
- [6] 周洪波, 付成华. 弹性和弹塑性有限元在溪洛渡水电站坝区地应力反演中的应用[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(6): 63—67.
ZHOU Hong-bo, FU Cheng-hua. Application on elastic and elastoplastic finite elements in dam site geostress back analysis of Xiluodu Hydropower Station[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2006, 23(6): 63—67.
- [7] 刘允芳. 三峡船闸区重点剖面和部位地应力场的概化[J]. 长江科学院院报, 1996, 13(3): 40—44.
LIU Yun-fang. Generalization of geostress field for major sections and positions of lock area of three gorges project[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 1996, 13 (3): 40—44.
- [8] 梅松华, 盛谦, 冯夏庭, 等. 龙滩水电站左岸地下厂房区三维地应力场反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4006—4011.
MEI Song-hua, SHENG Qian, FENG Xia-ting, et al. Back analysis of 3D in-situ stress field of underground powerhouse area of Longtan Hydropower Station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(23): 4006—4011.
- [9] 谢红强, 何江达, 肖明砾. 大型水电站厂址三维地应力场回归反演分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2471—2476.
XIE Hong-qiang, HE Jiang-da, XIAO Ming-li. Regression analysis of 3D initial geostress in region of underground powerhouse for large hydropower station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2471—2476.
- [10] 姚显春, 李宁, 曲星, 等. 拉西瓦水电站地下厂房三维高地应力反演分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 246—252.
YAO Xian-chun, LI Ning, QU Xing, et al. Back analysis of three-dimensional initial geostress Laxiwa underground powerhouse[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 246—252.
- [11] 中华人民共和国建设部. GB 50218—94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
- [12] 中华人民共和国水利部. GB 50287—99 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [13] 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.
- [14] 宋建波, 张倬元, 于远忠, 等. 岩体经验强度准则及其在地质工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [15] HOEK E. Practical rock engineering[M]. North Vancouver: Evert Hoek Consulting Engineer Inc., 2006.
- [16] MARINOS P, HOEK E. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation[C]//Proceedings Geo. Eng. 2000 Conference. Melbourne: [s. n.], 2000: 1422—1442.
- [17] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion — 2002 edition[C]//Proceeding of NARMS-TAC Conference. Toronto: University of Toronto Press, 2002: 267—273.