

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.06.036

# 地下水封储油洞库岩体力学参数试验研究

牛庆明, 朱 华

(北京东方新星石化工程股份有限公司, 北京 100070)

**摘 要:** 目前,国内正在进行二期战略石油储备地下水封储油洞库的建设。地下水封洞库工程中,岩体力学参数的准确选取对洞室结构稳定性的计算具有重要的作用。通过在某地下水封洞库中进行的岩体结构面直接剪切试验得到的试验结果,和 Barton 等提出的 JRC - JCS 模型、 $Q$  值估算变形模量经验公式以及 Hoek - Brown 强度准则计算的结果进行对比和分析,发现用经验估算方法以及 Hoek - Brown 强度准则计算的结果和现场原位试验所得数据基本一致,经验估算方法和 Hoek - Brown 强度准则可以应用到地下洞库工程建设中,是确定地下洞库岩体力学参数简便适用的方法。

**关键词:** 水封洞库;直剪试验;力学参数;Hoek - Brown 准则

中图分类号: TU458<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)06-0176-05

## Experimental Study on Rock Mass Mechanical Parameters of Water Sealed Underground Petroleum Storage Caverns

NIU Qing-ming, ZHU Hua

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

**Abstract:** At present, the construction of water sealed underground petroleum storage caverns is ongoing for the second phase of strategic petroleum reserve in domestic. In the engineering construction of the caverns, the correct selection of rock mechanical parameters is important for the stability calculation of cavern structure. The results obtained from structural plane direct shear tests of a underground storage cavern, were compared and analysed with those acquired from adapting JRC - JCS model and deformation modulus empirical formula through  $Q$  value which was put forward by Barton etc. as well as Hoek-Brown criterion. It was found that the data obtained with experience estimation method and Hoek-Brown criterion was almost the same with in situ test data. This indicates that experience estimation method and Hoek - Brown criterion can be applied to the engineering construction of underground storage caverns. They are simple and practical methods to determine the rock mass mechanical parameters in water sealed underground storage caverns.

**Keywords:** water sealed storage caverns; direct shear tests; mechanical parameters; Hoek-Brown criterion

岩体是指地质历史过程中形成的,由岩块和结构面网络组成的,具有一定结构并赋存于一定的天然应力状态和地下水等地质环境中的地质体。地下洞室是指人工开挖或天然存在于岩土体中作为各种用途的构筑物,地下洞室的开挖破坏了原有岩体的相对平衡状态,产生了一系列的岩体力学作用,研究地下洞室的岩体稳定性可以有效的保证和指导工程建设的进行<sup>[1]</sup>。地下水封储油洞库是建设在具有稳定地下水位的弱透水性块状岩体(较完整~完整的

坚硬结晶岩岩体、岩浆岩或变质岩)中,用水封的原理(储油洞室上一定高度设有水幕巷道,洞室周围形成稳定的水压,利用水压大于油压的原理防止油气泄漏)存储原油或 LPG 天然气等介质的地下洞室<sup>[2-3]</sup>。地下水封洞库在国外发展较快,从 20 世纪 30 年代末瑞典利用水封储存石油产品开始,20 世纪 60—70 年代进入高峰期,截止到 1988 年,斯堪迪纳维亚半岛已有超过 200 座地下石油、原油等地下水封洞库,在韩国、日本、中东等地建有多座地下储油

洞库<sup>[4]</sup>。国内战略储备油库一期选择地面储罐的方式,由于储量在 100 万 m<sup>3</sup> 以上时,地下储油洞库相比地上油罐有极大的优势,所以二期战略石油储备选择地下水封储油的方式进行建设<sup>[5]</sup>,目前在建的油库有黄岛、锦州、惠州、湛江等多座储量在 300 万 m<sup>3</sup> 以上的油库。

自然岩体和工程岩体的失稳主要源于结构面,岩体的破坏机制在很大程度上受结构面控制,地下水封储油洞库的中储油主洞室的特点是大跨度、高边墙、不衬砌,储油主洞室中发生失稳的部位一般出现在拱肩和边墙位置,由于拱肩部位的应力集中和高边墙形成的大临空面与不利的结构面组合,导致不稳定块体的滑落倾塌从而发生工程事故<sup>[6]</sup>,研究地下水封洞库中岩体的力学参数,对地下水封洞库建设有重要的理论意义和工程价值。本文利用在地下水封洞库中进行的岩体原位试验,利用试验得到

的数据计算结构面的剪切参数和岩体的弹性模量,并结合  $Q$  系统法中对岩体力学参数的估算,将试验结果进行对比,得到一种便捷的选取岩体力学参数的方法。

## 1 岩体结构面剪切试验

山东某地下水封石洞油库工程为我国第二期石油储备库,是目前国内首例正在实施的大型地下水封石洞油库工程,该工程主要由施工巷道、储洞室等组成,试验在此地下洞库中进行<sup>[6]</sup>。

### 1.1 结构面剪切参数计算

首先选取一条有代表性的长大节理作为岩体结构面直剪的试验对象,在主洞室左右侧墙分别开挖两个试验洞,然后在试验洞内进行试样的制备,结构面特征详见表 1。

表 1 结构面特征一览表

岩性	结构构造	产状	结构面形态	风化程度	结合情况	充填情况	地下水	$Q$ 值
花岗片麻岩,局部有煌斑岩脉侵入,岩体强度高	残斑状细粒结构,花岗片麻状构造	150°∠56°	平直光滑,稍有起伏	未风化~微风化	一般	3 mm~4 mm 厚的灰白色粘土矿物充填	无地下水	$Q$ 值 $\approx 5$ , III 类围岩 <sup>[7]</sup>

本次原位直剪试验完成一组共 6 个试样,编号分别为  $Y_1 \sim Y_6$ ,完成的 6 个垂直荷载段试验中,垂直荷载分别为 50 t、75 t、100 t、140 t、175 t、200 t,对应的正应力分别为 2.36 MPa、3.39 MPa、5.03 MPa、5.72 MPa、7.48 MPa、7.54 MPa。

试验按照《水利水电工程岩石试验规程》<sup>[8]</sup>(SL264-2001)要求进行,在岩石中打孔灌浆固定 4 个测量支架,剪切位移方向上左右各安装 2 个千分表,法向位移 4 个角各安装一只千分表(图 1 所示)。



图 1 现场试验情况和简图

试验结果如表 2 所示。

根据表 2 数据绘制剪切应力和剪切位移曲线(见图 2)。

表 2 结构面剪切试验数据

试样编号	剪切面积 $S/\text{m}^2$	垂直荷载 $F_1/\text{kN}$	正应力 $\sigma_i/\text{MPa}$	剪切荷载 $F_2/\text{kN}$	剪应力 $\tau_i/\text{MPa}$
$Y_1$	0.21	500	2.36	188	0.89
$Y_2$	0.22	750	3.39	248	1.12
$Y_3$	0.20	1000	5.03	535	2.69
$Y_4$	0.24	1400	5.72	700	2.86
$Y_5$	0.23	1750	7.48	706	3.02
$Y_6$	0.27	2000	7.54	655	2.47

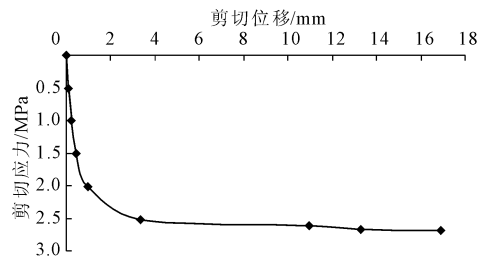


图 2 试件剪切应力与剪切位移关系图

由图 2 可看出,该结构面的剪切强度低;且强度随着位移的变化小,结构面强度屈服后,无明显的剪切峰值强度及剪切应力的下降段,即峰值强度与残余强度相差很小,属于典型的塑性变形型,这与试验结构面内主要为薄层的粘土矿物充填有关(见图 3)。



图 3 剪切试验完成后结构面擦痕和充填物示意图

根据以上数据分析可知本结构面的峰值强度与残余强度相差很小,因此确定本结构面的强度参数,仅采用峰值强度来计算;根据《水利水电工程岩石试验规程》<sup>[8]</sup>(SL264-2001)中的要求,利用最小二乘法确定结构面抗剪强度参数:

$$\tan \phi = \frac{n \sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \tau_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2} \quad (1)$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \sum_{i=1}^n \tau_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2} \quad (2)$$

由表 2 绘制的正应力与剪应力关系图见图 4。

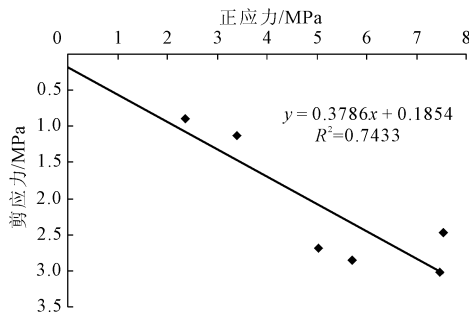


图 4 正应力和剪应力曲线关系图

根据图 4 与式(1)、式(2)计算:

$\tan \phi = 0.3786$ ,  $\phi = \arctan 0.3786 = 20.74^\circ$ ,  $c = 0.1854 \text{ MPa}$ 。

## 1.2 刚性承压板法岩体变形模量计算

岩体结构面剪切试验中,在法向应力方向上安装了 4 个千分表,测量正应力和剪切应力加载过程中法向位移的变化,试验中按照刚性承压板法试验的要求进行加压,由于需要完成剪切试验,因此,没有进行退压,只计算岩体变形模量<sup>[9]</sup>。

正应力加载到 140 t 即 5.6 MPa 时与工程压力相近,因此,使用 5.6 MPa 的正应力加载时的数据来计算岩体变形模量,承压板 50 cm × 50 cm,面积 0.25

m<sup>2</sup>,试验结果见表 3。

表 3 法向位移试验数据

荷载 $F/\text{kN}$	正应力 $P/\text{MPa}$	位移 $W/\text{mm}$
0	0.0	0.000
250	1.0	0.013
500	2.0	0.034
750	3.0	0.059
1000	4.0	0.100
1250	5.0	0.124
1400	5.6	0.139

根据表 3 数据绘制  $P - W$  曲线如图 5。

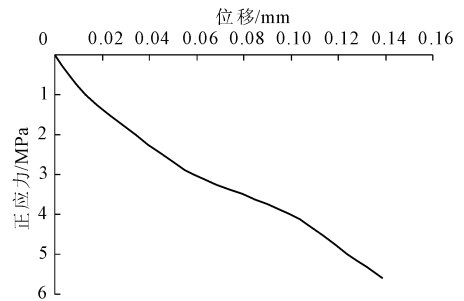


图 5  $P - W$  曲线图

$P - W$  曲线呈复合型,也反映了岩体内结构面发育不均,且少量结构面内有粘土矿物充填,岩体变形形成弹 - 塑 - 弹变性趋势,根据下列公式进行计算:

$$E = pD(1 - \mu^2)\omega/W \quad (3)$$

式中: $p$  为承压板单位面积上的压力; $D$  为承压板的直径; $\omega$  为承压板形状与刚度有关的系数,方形取值  $\omega = 0.886$ ; $\mu$  为泊松比,参照详细勘察结果  $\mu = 0.2$ ; $W$  为总变形值<sup>[4]</sup>。

通过式(3)计算得知:变形模量  $E = 17.1 \times 10^3$  MPa。

## 2 经验估算方法确定岩体力学参数

### 2.1 JRC - JCS 模型

经验估算法是由 Barton(1973) 在 100 多条人工拉断节理研究的基础上首先提出的,JRC - JCS 模型表达为:

$$\tau = \sigma_n \tan [K_{\text{JRC}_n} \lg (P_{\text{JCS}_n} / \sigma_n) + \sigma_r] \quad (4)$$

式中: $\tau$  为法向应力下的剪切应力; $\sigma_n$  为法向应力; $\sigma_r$  为基本摩擦角; $K_{\text{JRC}_n}$  为结构面粗糙度系数; $P_{\text{JCS}_n}$  为结构面抗压强度。经过大量的工程研究实例,JRC - JCS 模型具有较好的工程应用价值<sup>[10]</sup>。

通过现场试验确定结构面的回弹值和新鲜岩体的回弹值,结构面回弹值  $r = 26$ ,新鲜岩体回弹值  $R$

= 50, 花岗片麻岩的基本摩擦角  $\varphi_b = 31^\circ$ 。

$$\lg(P_{JCS_n}) = 0.00088r\gamma + 1.01 \quad (5)$$

式中:  $r$  为结构面表面回弹值;  $\gamma$  为花岗片麻岩岩石密度。

根据 Barton(1977) 研究表明<sup>[10]</sup>, 当结构面处于较高的法向应力时, 基本摩擦角与残余摩擦角大致相同, 但是当结构面处于较低的法向应力时, 结构面风化且其厚度不足 1 mm, 则控制结构面峰值抗剪强度之后的残余抗剪强度是残余摩擦角, 这时, JRC - JCS 模型中的基本摩擦角应以残余摩擦角代替。残余摩擦角可由基本摩擦角和结构面的回弹值来估算, 当法向应力较低时, Barton 根据 Richards 的试验结果线性回归得到:

$$\varphi_r = 10 + (\varphi_b - 10)r/R \quad (6)$$

计算  $\varphi_r = 20.92^\circ$ ,  $P_{JCS_n} = 49.7 \text{ MPa}$ 。

通过轮廓曲线仪测量试验结构面的结构面构面粗糙度系数,  $K_{JRC_n} = 3.6$ <sup>[11]</sup>。试验所在位置的最大地应力约为 6 MPa, 正应力选取范围为 5 MPa ~ 7 MPa。代入式(4) 计算, 计算结果如图 6 所示:

$$\varphi = 21.8^\circ, c = 0.1914 \text{ MPa}$$

与现场原位剪切试验相比, JRC - JCS 模型得到的结果误差在 5% 以内。

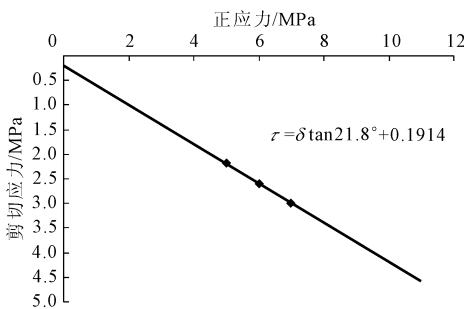


图 6 正应力和剪应力关系曲线图

### 2.2 Q 值确定岩体变形模量的经验公式

挪威的 Bhasin 和 Barton 等人(1993) 研究了岩体分类指标  $Q$  值、纵波速度  $V_{mp}$  和岩体平均变形模量  $E_m$  (GPa) 之间的关系, 提出了以下的经验公式<sup>[1]</sup>:

$$V_{mp} = 1000\lg Q + 3500 \quad (7)$$

$$E_m = (V_{mp} - 3500)/40 \quad (8)$$

区域岩体  $Q$  值 = 5, 由式(7) 和式(8) 计算,  $V_{mp} = 4198.97 \text{ m/s}$ ,  $E_m = 17.5 \times 10^3 \text{ MPa}$ , 与试验结果对比相差很小。

### 3 Q 值通过 Hoek - Brown 准则确定岩体力学参数

Hoek 和 Brown 以 Griffith 的脆性断裂理论为基

础, 通过对大量岩石三轴试验和现场岩体试验成果的统计分析, 提出了 Hoek - Brown 强度准则, 也称为狭义强度准则<sup>[12]</sup>。近年来, Hoek 等对该准则进行重新定义, 引入了地质强度指标  $GSI$  分类系统来确定岩体的 Hoek - Brown 常数<sup>[13]</sup>。表达式如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (9)$$

式中:  $\sigma_{ci}$  为岩石块体的单轴抗压强度;  $m_b$ 、 $s$ 、 $a$  均为岩体的 Hoek - Brown 常数。

2002 版 Hoek - Brown 强度准则引入岩体扰动系数  $D$ , 对 Hoek - Brown 常数  $m_b$ 、 $s$ 、 $a$  进行修正, 计算式如下:

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

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (10)$$

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

确定 Hoek - Brown 常数  $m_b$ 、 $s$ 、 $a$  后, 就可以计算岩体力学参数。

式(9) 中, 当  $\sigma_3 = 0$  时, 可求得岩体单轴抗压强度:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c s^a \quad (11)$$

对于脆性材料, 单轴抗拉强度等于双轴抗压强度。所以, 设  $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_t$ , 代表双轴受压条件, 则抗拉强度为:

$$\sigma_t = \frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \quad (12)$$

变形模量  $E_m$  通过式(8) 求取。

研究表明, 对 Hoek - Brown 强度准则, 与之等效的抗剪强度参数黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  值的计算公式<sup>[14]</sup>:

$$\varphi = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (13)$$

$$c = \frac{[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}](s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + [6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}]/[(1+a)(2+a)]}} \quad (14)$$

其中  $\sigma_{3n} = \sigma_{3max}/\sigma_c \quad (15)$

$\sigma_{3max}$  为最小主应力上限值, 对于隧道工程<sup>[9]</sup> 有:

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0.47 \left( \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H_t} \right)^{-0.94} \quad (16)$$

式中:  $H_t$  为隧道埋深。

$GSI$  和岩体波速  $v_p$  存在以下关系:

$$GSI = 15v_p - 7.5 \quad (17)$$

由式(7)和式(17)推导得出:

$$GSI = 15(\lg Q + 3) \quad (18)$$

地质强度指标  $GSI$  分类系统考虑了岩体的风化程度、节理发育组合情况和充填情况等,  $Q$  法地质围岩分类系统综合考虑了岩体  $RQD$ 、节理面充填、粗糙度、组合情况、地应力、地下水等因素, 在地应力和地下水影响几乎可以忽略的地下水封洞库中,  $GSI$  值和  $Q$  值有很好的对应关系, 可以用  $Q$  值来确定  $GSI$  值, 计算区域岩体参数。

试验区域  $Q$  值 = 5, 通过式(18)计算  $GSI = 55$ ,  $m_i = 33$ , 扰动系数  $D$  取 0.7。

代入式(10)计算:  $m_b = 2.7843$ ,  $s = 0.0015$ ,  $a = 0.5040$ 。

Hoek - Brown 常数  $m_b$ 、 $s$ 、 $a$  取值确定后, 通过计算可以得到岩体参数值, 见表 4。

表 4 围岩  $Q$  值预测的岩体力学参数

岩体名称	岩体抗压强度 /MPa	岩体抗拉强度 /MPa	岩体变形模量 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )
花岗岩麻岩 (微风化)	3.8	-0.05	17.5	0.17	22

## 4 结 论

(1) 现场原位剪切试验得到结构面抗剪强度参数:  $c = 0.1854$  MPa,  $\varphi = 20.74^{\circ}$ , JRC - JCS 模型计算得到  $c = 0.1914$  MPa,  $\varphi = 21.8^{\circ}$ , 控制误差在 5% 以内。利用原位剪切试验得到的岩体变形参数  $E = 17.1 \times 10^3$  MPa, 使用经验公式计算得到  $E_m = 17.5 \times 10^3$  MPa。

(2) 通过 Hoek - Brown 强度准则计算的岩体抗剪强度参数:  $c = 0.17$  MPa,  $\varphi = 22^{\circ}$ , 和原位试验以及 Barton 经验估算公式得到的结果基本一致, 而 Hoek - Brown 强度准则较全面的反映了岩体结构特征对岩体强度参数的影响, 推荐使用 Hoek - Brown 强度准则通过  $Q$  法获取地下洞库内区域岩体强度参数, 再通过 JRC - JCS 模型获取特定节理面的剪切参数。

(3) 地下水封洞库工程洞室开挖首先进行超前地质预报, 超前地质预报可以采取钻孔、综合分析、物探等多种手段进行, 由于物探法精度达不到要求, 所得结果多有偏差, 建议通过钻孔成像超前探孔的方法通过解析取得掌子面向前 15 m ~ 30 m 的节理组合状况 (包括  $Q$  值、JRC、隙宽、充填等信息)<sup>[15]</sup>,

计算得到岩体强度参数, 采用经验分析和数值模拟的方法综合判定前方围岩的稳定性, 通过每一回次得到的数据, 形成数据库, 结合开挖后地质编录、监测数据和支护参数等信息进行反演, 建立地下洞室的三维数值分析模型, 得到地下洞室结构的稳定性和水封性相关方面的数据, 为水封洞库的正常运营提供数据支持。

## 参考文献:

- [1] 刘佑荣, 唐明辉. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.
- [2] 国家发展和改革委员会. Y/T0610 - 2008. 地下水封洞库岩土工程勘察规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [3] 彭振华, 李俊彦, 孙承志, 等. 地下水封洞库的库址选址研究[J]. 油气储运, 2008, 27(1): 60-62.
- [4] 高 飞. 国内外地下水封洞库发展简析[J]. 科技资讯, 2010, (24): 61.
- [5] 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[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [6] 朱 华, 汪 飞, 刘 阳, 等. 块体理论在地下水封石油洞库围岩稳定性的分析与应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1): 151-159.
- [7] Barton N. Some new  $Q$  - value correlations to assist in site characterisation and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39(2): 185-216.
- [8] 中华人民共和国水利部. SL264 - 2001. 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [9] 原中华人民共和国电力工业部, 国家质量技术监督局. GB/T50266 - 99. 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [10] 杜时贵. 岩体结构面的工程性质[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [11] 杜时贵. 岩体结构面粗糙度系数及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [12] 闫长斌, 徐国元. 对 Hoek - Brown 公式的改进及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4030-4035.
- [13] Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition[C]//Proceedings of NARMS - TAC 2002, Minging Innovation and Technology. Hammah W, Bawden J C, Telesnicki M, et al. Toronto: University of Toronto, 2002: 267-273.
- [14] 盛 佳, 李向东. 基于 Hoek - Brown 强度准则的岩体力学参数确定方法[J]. 采矿技术, 2009, 9(2): 12-14.
- [15] 宋 琨. 花岗岩片麻岩体渗透特性及水封条件下洞库围岩稳定性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.