

# 岩块卸荷效应与工程岩体质量评价

陈祥<sup>1</sup>, 孙进忠<sup>2</sup>, 张杰坤<sup>2</sup>, 许兆义<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国地质大学 工程技术学院, 北京 100083)

**摘要:**工程岩体质量评价是地下洞室工程选址、设计必须回答的主要工程地质问题,在许多常用的岩体质量评价方法中,岩体的完整性指数是一个重要评价指标,而由于岩芯卸荷效应和室内、原位波速测试的频率差异方面的原因导致岩体完整性指数不能够准确的表示岩体的完整程度,有时甚至会产生岩体完整性指数大于1的不合理现象。论文针对以上问题开展岩块波速-应力关系相关的试验,研究岩块的波速-应力关系,提出岩块卸荷指标和频率修正系数2个因子对岩体完整性指数计算公式进行修正,进而对国标BQ岩体质量分级法进行改进。最后将改进的BQ岩体质量分级法在黄岛地下水封石油洞库工程中进行应用,评价结果表明场区绝大部分岩体质量都为I级或II级。

**关键词:**卸荷;波速-应力关系;卸荷指标;频率修正系数;岩体质量评价

**中图分类号:**TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)06-0053-07

## The Unloading Effect of Rock Samples and the Quality Evaluation of Engineering Rock Masses

CHEN Xiang<sup>1</sup>, SUN Jin-Zhong<sup>2</sup>, ZHANG Jie-kun<sup>2</sup>, XU Zhao-yi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, P. R. China)

**Abstract:** For most evaluating methods of engineering rock mass, the integrality index is an important assessment factor. However, sometimes the value of integrality index would be more than 1.0 because of unloading effect of rock samples and differentia of frequency between the measurements of rock samples and rock mass. In order to solve this problem, unloading index and frequency correcting coefficient were put forward to revise the integrality index. Moreover, the BQ evaluating method proposed in the national standard (GB 50218-94) was improved with the revised method. With the case study of the project of water sealed underground oil tank in Huangdao, it was found that the quality of rock mass in the site was grade I or II.

**Key words:** unloading; relation between P-wave velocity and stress; unloading effect index; frequency correcting coefficient; quality evaluation of rock mass

岩体质量的分级评价对地下工程的设计、施工及运营等都有十分重要的意义,质量高、稳定性好的岩体,不需要或只需要很少的加固支护措施,并且施工安全、简便;质量差,稳定性不好的岩体需要复杂昂贵的支护措施,常常在施工中带来意想不到的复杂情况,因此正确、及时地对工程岩体质量作出稳定

性评价,是经济合理地进行岩体开挖和加固支护设计、快速安全施工必不可少的条件。

目前,常用的岩体质量评价方法有RMR分类法、Q系统法、GSI分类法、水利水电工程围岩工程地质分类和国标BQ分级法等。在许多岩体质量评价方法中,岩体完整性指数( $K_v$ )是一个重要评价

收稿日期:2009-07-08

作者简介:陈祥(1980-),男,博士,主要从事地质工程、岩土工程研究,(E-mail)chx1120@126.com。

指标,从理论上讲,原位岩体波速总是小于室内岩样波速,所以岩体完整性指数应该永远是小于 1 的。但是,在南水北调工程与陕京管道交叉穿越改造易县段隧道工程岩体质量评价中发现岩样波速小于原位岩体波速的现象,在排除了仪器和试验操作方面的原因后,分析认为这是由于岩块卸荷效应所致。易县段隧道工程岩体为薄层板岩,其层理结构属于原生结构,与次生的构造(破碎)结构面不同,在未经扰动的原位状态下,板岩中的岩层与结构面紧密结合,所以,原位钻孔测试所得的岩体波速( $V_{pm}$ )较高;当岩芯从原位岩体中取出后,岩芯必然发生卸荷作用,卸荷效应使得岩芯中的薄层结构紧密程度降低,从而所测得的岩块波速( $V_{pr}$ )比原位岩体的波速( $V_{pm}$ )还要低。同样,李晓昭等人在润扬大桥声波测试中<sup>[1]</sup>,边智华等人在南京长江大桥二桥基岩波速测试中都发现相同的现象<sup>[2]</sup>。

此外,目前现场测试岩体波速的方法主要有地震法和钻孔波速,而室内新鲜岩样的波速都是用超声波来测量,这几种方法将产生不同频率的波动,由于实际岩体并不是理想的弹性介质,因此这种频率的差异会造成对同一段岩体这几种方法的测量结果不一致。如果在资料处理时,不对这 2 种方法测得的波速结果进行频率修正,也会给评价结果带来误差。

针对以上问题进行了相关的试验,该文提出了岩块卸荷指标和频率修正系数 2 个因子对岩体完整性指数计算公式进行修正,并对国标 BQ 分级法的岩体基本质量指标计算方法进行改进,最后将该方法在黄岛地下水封石油洞库工程进行了应用。

## 1 岩块卸荷效应

岩体作为一种地质体受长期复杂的地质活动作用,在其内部通常形成一定的应力状态,这种应力称为地应力或原岩应力。地应力的方向和大小对岩体的物理力学性质和稳定性都有显著影响,同样,作为构成岩体的重要组成部分——岩块,当其被从原有的地质环境中取出时,它在原位岩体中受到的应力将被解除,其物理力学性质亦会发生变化,在此将这种变化称为岩块卸荷效应。介质波速是反映介质物理力学状态的一个综合性指标:波速高,说明介质弹性强,结构致密,力学强度高;波速低,说明介质弹性差,结构疏松,力学强度低,从而通过测定物体纵波波速即可知道物体内部的状态。因此,研究岩块在受荷状态下波速的变化情况(波速-应力关系),可以定量的评价其卸荷程度。

对岩石波速-应力关系已进行了一定的研究,O'connel<sup>[3]</sup>对干燥和饱水的裂隙介质的波速进行了研究;高龙生<sup>[4]</sup>对中国大陆岩石标本在高围压下进行了超声波速研究;黄承贤<sup>[5]</sup>通过实验研究了围压下岩石弹性波速;施行觉等<sup>[6]</sup>研究了循环应力作用下松散介质的波速和衰减特性;赵明阶等<sup>[7]</sup>建立了岩块的简易裂隙模型,并推导节理岩体在应力场作用下的弹性波传播速度和衰减随应力的变化关系;马中高等<sup>[8]</sup>在不同有效压力情况下测试了岩石的超声波纵横波速度,分析了有效压力对岩石速度的影响;闫治国等<sup>[9]</sup>、Gaviglio<sup>[10]</sup>研究了纵波波速与密度,纵波波速与弹性模量,纵波波速与峰值应力的关系;韩放等<sup>[11]</sup>利用声发射观测动态检测损伤的扩展,通过超声波检测来定量评价岩石试块的损伤程度;樊秀峰等<sup>[12]</sup>对砂岩在循环荷载作用下的疲劳损伤特性进行实时超声波速的跟踪研究;Benson 等<sup>[13]</sup>对 2 种岩石在不同压力的纵波、横波速度、孔隙率和渗透系数进行测试,并建了波速与渗透系数间的关系;Min-Su Cha<sup>[14]</sup>等对多块岩样进行了试验,发现岩样波速随应力增加呈非线性增加;Takato 等<sup>[15]</sup>在对花岗岩岩样进行三轴试验过程中进行了岩样波速、裂隙密度的测试,分析了它们随应力的变化规律。

该文从黄岛地下水封石油洞库场区取得若干岩块,对其在自行设计的试验装置下进行岩石波速-应力关系试验,获得岩块在受荷过程中波速的变化情况,并定义了岩块卸荷指标,从介质波速变化方面对岩块卸荷效应进行了初步研究。

### 1.1 试验装置及过程

岩块波速-应力试验在岩石三轴试验机上进行,需在对岩样进行加压的同时测量岩样的波速,整个试验装置可以分为 2 个部分:力学试验装置和波速测量装置,其示意图如图 1 所示,其主要由岩石三轴试验机、压力传递筒、波速探头和工程多波参数分析仪组成。岩石三轴试验机负责应力的施加及测量;压力传递筒材质为钢筒,置于岩样两端,其主要是为了保证固定于岩样两个端面上的波速探头在加压过程中不会受到压力而损坏,在钢筒的底部挖出一个小孔,便于波速探头的电缆引出;岩石的上下表面与 2 个压力传递筒之间各放置 1 块钢板,以便岩样表面受力均匀;然后紧贴上下 2 块钢板分别放置激发和接收探头,探头由弹簧支撑,并用黄油使之与钢板紧密耦合;岩样的变形用引伸计来测量,可同时测量岩样的径向变形和轴向变形;波形的存储分析设备为 DB4 型工程多波参数分析仪,可以即时记录并

存储波形。

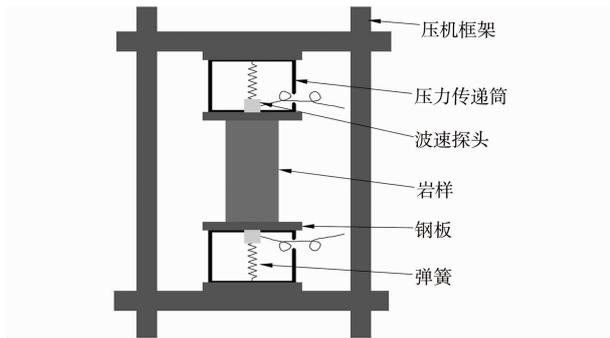


图 1 试验装置示意图

整个试验装置安装完成后,力学试验装置即可进行常规单轴抗压强度试验,与此同时,每隔一定间隔压力(试验间隔为 2~5 kN)测量一次波速,存下每次测量的波形,试验完成后计算各个压力下岩样的波速(纵波速度)。正式试验前,应首先进行系统走时确定,即应预先测得超声波穿过 2 块钢板所花的走时,作为系统走时,随后正式试验所测的超声波走时都需减掉该系统走时才是超声波穿过岩块所用的走时。

试验岩块为黄岛地下水封石油洞库场区普遍分布的花岗质片麻岩完整岩块,其孔隙率约为 5% 左右,其它物理及波动参数如表 1 所示。

表 1 波速-应力试验岩块参数

序号	样品编号	取样深度/m	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙率/%	纵波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	横波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	抗压强度/MPa
1	16-1	193.00	2.61	5.2	4 490.47	2 696.51	116.3
2	17-4	134.00	2.63	5.1	4 597.50	3 098.44	123.2
3	21-1	97.00	2.61	5.2	4 638.64	2 758.11	117.6

## 1.2 试验结果及分析

2.2.1 波速-应力关系 一般情况下,岩石的应力-应变试验过程中,体积应变曲线可以分为 3 个阶段<sup>[16]</sup>:

1) 体积变形阶段: 体积应变在弹性阶段内随应力增加而呈线性变化(体积压缩),可以理解为岩石内微裂隙的压密阶段,在此阶段波速随应力的增加而增加;

2) 体积不变阶段: 在这一阶段,岩石虽有变形,但体积大小几乎没变化,岩石波速维持为一常数;

3) 扩容阶段: 当应力继续增加时,微裂纹开始扩展,岩石的体积会大幅增加直至破坏,岩石波速将会迅速降低。

图 2 为根据 16-1 # 岩样的波速-应力试验数据绘成的波速-应力关系曲线,曲线记录至破坏荷载前 5~10 kN 岩样的波速-应力关系,从曲线可以较清楚地分别出岩石变形的 3 个阶段,第 3 个阶段在整个波速变化趋势上有所体现,但是波速下降的幅度不大,这可能与该试验所采用的岩样都是脆性岩石有关,其破坏过程多在一瞬间完成,以致于无法捕捉到破坏前瞬间的岩块波速。

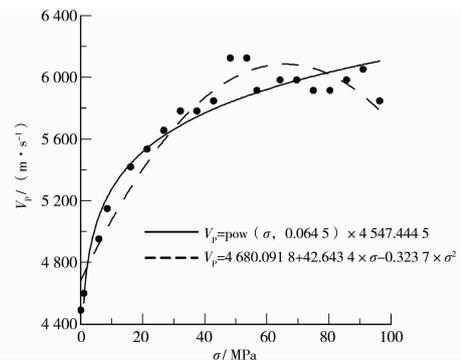


图 2 16-1 # 岩样波速-应力关系曲线

用幂函数和二次函数 2 种函数曲线可以较好的对 2 种岩样的波速-应力关系曲线进行拟合。从图 2 中可以看出,2 种曲线的交点基本上为波速增加阶段向波速恒定阶段的过渡点,其对应的  $\sigma$  值约为 (1/4~1/3) 倍抗压强度 ( $R_c$ ), 记为  $\sigma_c$ 。当  $\sigma < \sigma_c$  时,幂函数可以较准确的拟合加荷初期岩块波速随应力迅速增加,随后增加速度变缓的过程;当  $\sigma > \sigma_c$  时,二次函数可以拟合岩块波速达到峰值,随后迅速下降的过程。

图 3、图 4 为 17-4 # 和 21-1 # 岩样的波速-应力关系,二者与 16-1 # 岩样的波速-应力关系具有相同的规律,比较它们的拟合曲线函数,发现三者的表达式相近,说明对于相同地区岩性相同的岩石,这种波速-应力关系具有较好的重复性。

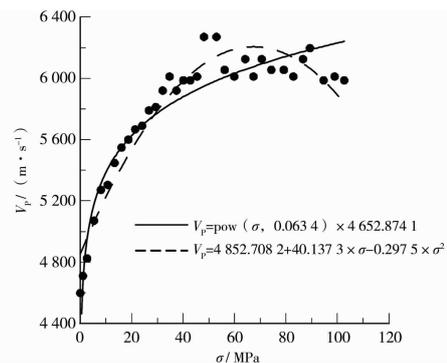


图 3 17-4 # 岩样波速-应力关系曲线

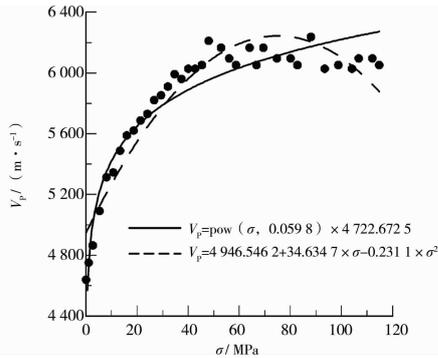


图 4 21-1 # 岩样波速-应力关系曲线

1.2.2 卸荷指标 岩块从原位岩体中取出时,必然会经历卸荷过程,岩块的内部结构和性质会发生变化,而岩块的波速变化能较好的反映这种变化。对岩块进行加荷,同时测定其波速,得到岩块的波速-应力关系,并将岩块在原位所受应力对应的波速与未受荷时的波速之比定义为卸荷指标,记为  $I_U$ ,则卸荷指标可按照下式计算:

$$I_U = \frac{V_{pr}(\sigma_1)}{V_{pr0}} \quad (1)$$

式中,  $V_{pr}(\sigma_1)$  为岩块在受原位地应力作用下的波速,即为原位波速;  $V_{pr0}$  为岩块在未受荷载的条件下测得的波速,定义为初始波速;  $\sigma_1$  为岩块在原位所受的与加荷方向一致的地应力分量,该试验原位取芯钻孔均为竖直孔,而室内波速-应力试验的加荷方向亦为轴向,因此室内试验加荷方向与竖直方向一致。

在研究岩块的卸荷问题时,除了极高应力区(地应力场最大主应力与岩石抗压强度之比大于 1/4)的岩体外,对应力小于  $\sigma_c$  范围内的波速-应力关系更感兴趣,综合上述 3 块片麻岩岩样的波速-应力关系,可得在应力小于  $\sigma_c$  范围内,黄岛地下水封油库场区片麻岩波速与应力的关系表达式为:

$$V_p(\sigma) = 4641.0 \times \sigma^{0.063} \quad (2)$$

根据表 1 可得场区片麻岩岩块的初始波速约为 4575.5 m/s,将其和式(2)代入式(3)可得片麻岩卸荷指标的计算公式:

$$I_{Up} = 1.0143 \times \sigma_1^{0.063} \quad (3)$$

式(3)中波速-应力试验加荷方向需与原位地应力方向一致,该文试验岩样都是从这些现场竖直勘探钻孔中取出,室内波速-应力试验的应力亦是沿岩样轴向施加,即波速-应力试验加荷方向与原位垂直地应力方向一致。根据岩样的取样深度可知 16-1 #、17-4 # 和 21-1 # 岩样在原位所受的垂直地应力大小分别为 5.29 MPa、3.62 MPa 和 2.62 MPa,将其分别代入式(3)中可得 3 块岩样的卸荷指标分别为 1.13、1.10 和 1.08。

## 2 岩块(体)波速测试频率修正

目前现场测试岩体波速的方法主要有地震法和钻孔波速法,其频率段多为地震波段,而室内新鲜岩样的波速都是用超声波来测量,其频率的为超声波段,这几种方法将产生不同频率的波动,由于实际岩体并不是理想的弹性介质,其对弹性波具有一定的吸收作用,因此粘弹性模型来模拟岩石介质更加符合实际情况。根据地震学的知识可推导出波在粘弹性介质中的传播速度为<sup>[17]</sup>:

$$V_{pN}^2 = V_p^2 - i \frac{4\eta\omega}{3\rho} \quad (4)$$

式(4)中,  $\eta$  为粘性系数,  $\rho$  为介质密度,  $\omega$  为圆频率,  $V_{pN}$  为粘弹性介质中纵波的传播速度,  $V_p$  为弹性介质中纵波的传播速度。式(4)表明,在粘弹性介质中,纵波的传播速度是复数,当波的频率很低时,波速的虚数部分对波速的作用可以忽略,这时,粘弹性介质中纵波的传播速度可以近似等于完全弹性介质中的纵波速度;而当波的频率很高时,波速的虚数部分将会对整个波速有较大贡献,此时粘弹性介质中的纵波速度与频率相关,存在频散现象。因此这种频率的差异会造成对同一岩体 2 种方法的测量结果不一致。如果在资料处理时,不对这 2 种方法测得的波速结果进行频率修正,也会给分级结果带来误差。

在实际工程中也有学者发现这个问题并探讨了不同频率纵波速度之间的关系,田洪礼、董晓光<sup>[18]</sup>对预制的混凝土桩进行纵波速度测量,他们采用频率分别为 63 kHz(超声波)和 27 Hz(地震波)换能器对一批长度为 6~8 m 的预制桩进行纵波速度测量,测试结果如表 2 所示。

表 2 混凝土桩超声波速度与地震波速度对比<sup>[15]</sup>

桩号	超声波速度	地震波速度	$V_{PC}/V_{PD}$	桩号	超声波速度	地震波速度	$V_{PC}/V_{PD}$
	$V_{PC}/(m \cdot s^{-1})$	$V_{PD}/(m \cdot s^{-1})$			$V_{PC}/(m \cdot s^{-1})$	$V_{PD}/(m \cdot s^{-1})$	
1	4830	4266	1.132	11	4510	3950	1.142
2	4610	4050	1.138	12	4700	4156	1.131
3	4560	4050	1.126	13	4500	4000	1.125
4	4526	3950	1.146	14	4780	4210	1.135
5	4650	4100	1.134	15	4550	4050	1.123
6	4600	4100	1.122	16	4650	4050	1.148
7	4680	4156	1.126	17	4680	4050	1.156
8	4650	4050	1.148	18	4720	4156	1.136
9	4310	3810	1.130	19	4780	4210	1.135
10	4680	4256	1.126	20	4810	4156	1.157

在此将非弹性介质中超声波速度与地震波速度的比值定义为频率修正系数,记作  $I_F$ ,在实际应用时,将地震波速度乘以频率修正系数即可将所测得的地震波频段的波速修正到岩石测试较常用的超声波频段,减少由于测试频率的不同而带来岩石波速差异。

在研究岩石中超声波速度与地震波速度时,由于通常所能获得的岩石样品的长度都很小,多为数十 cm,测试仪器由于精度所限不能准确反映出 2 种频率的波在岩石样品中传播速度差异,而混凝土介质与岩石介质在性质上具有较好的相似性,因此,田洪礼等人在混凝土桩测试中得到的混凝土介质中超声波和地震波速度之间的关系亦可较好的代表岩石介质中超声波和地震波速度之间的关系。根据表 2 中所列数据,混凝土桩中超声波与地震波速度比值为 1.136 左右,据此,可以估定岩石介质中超声波速度与地震波速度的比值亦为 1.136 左右,即将岩石介质的频率修正系数定为 1.136。

### 3 岩体基本质量指标 BQ 值的修正

卸荷指标和频率修正系数都可以通过相应状态或测试条件下纵波速度之间的关系来表示,也就是说岩块卸荷和频率差异给岩体质量评价带来的误差主要来自它们给评价因子——岩体完整性指数带来的误差,因此,可以根据卸荷指标 ( $I_U$ ) 和频率修正系数 ( $I_F$ ) 来修正岩体完整性指数,从而达到修正岩体质量指标 BQ 值的目的。

考虑到岩块卸荷和频率差异的影响,可以将岩体完整性指数的计算公式改写为:

$$K'_v = \left( \frac{I_F \cdot V_{pm}}{I_U \cdot V_{pr}} \right)^2 \quad (5)$$

式中:  $K'_v$  为修正后的岩体完整性指数;  $V_{pm}$  为原位岩体纵波速度;  $V_{pr}$  为岩块的纵波速度(未受荷);  $I_F$  为频率修正系数,取值为 1.136;  $I_U$  为卸荷指标,可按式(3)计算。

但是,需要指出的是目前原位钻孔岩体波速测试时,亦采用在钻孔中进行一发双收的单孔法,其激发探头发出的频率也在超声频段,因此,若原位岩体波速测试采用这种方法进行时,就无需对岩体波速进行频率修正了。

### 4 工程实例

黄岛地下水封石油洞库场址位于山东省东南部,隶属于青岛市黄岛区管辖,整个场区面积约 3 km<sup>2</sup>。油洞库设计总储容量为 300 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,分 3

个洞罐储存,其中每个洞罐由 3 个洞室组成,洞顶布置标高为 -30 m,洞室横断面形状为直墙圆拱形,高 30 m,宽 20 m。

根据原位地应力测试及地应力场数值模拟分析可知,库址区内最大主应力值一般为 10~12 MPa,中间主应力值为 6~8 MPa,最小主应力基本受岩体自重控制,最大主应力方向为水平 NWW 向,最小主应力方向为竖直方向,库址区属于低-中地应力区。

为了探明场区的岩层分布及岩体质量,勘探工作在场区共布置了 21 个钻孔,实际钻探了 17 个(zk6、zk7、zk11、zk20 未打)。地下油库的地下洞室洞顶高程位于 -30 m,洞底高程位于 -60 m,因此,岩体质量评价的重点为该段高程附近的岩体,评价所用指标取值以该段岩体参数为准。

对黄岛地下水封石油洞库工程岩体质量进行评价采用改进的国标 BQ 分级法,以钻孔为评价关键单元,最后得到库址区工程岩体质量分区图。根据 17 个勘探孔揭露,场区岩体的结构面在深部多为紧闭型,透水性较差,因此评价时无需对 BQ 值进行地下水及软弱结构面影响修正。另外,根据现场水压致裂地应力测试及地应力场数值模拟,场区属于地应力区,亦无需对 BQ 值进行初始应力状态影响修正。因此,黄岛地下水封石油洞库工程岩体质量指标 BQ 值可按下式计算:

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K'_v \quad (6)$$

式中,  $R_c$  为完整岩块的单轴饱和抗压强度;  $K'_v$  为修正后的岩体完整性指数。

根据室内岩石试验,得到各个钻孔内高程为 -60~-30 m 内岩样的饱和单轴抗压强度和岩块波速。根据室内岩样超声波速测试,得到片麻岩岩样最大波速为 5 500 m/s,取样深度约为 155 m,该波速值即可看作完整岩块的波速。考虑岩块的卸荷效应,按照式(3)可计算出卸荷指标为 1.11。

现场原位钻孔波速测试测得各个钻孔内高程为 -60~-30 m 内岩体的原位波速,分别将各个钻孔中的岩体波速及完整岩块波速和卸荷指标代入式(5)中,即可得到库址区岩体的修正后的完整性指数。黄岛地下水封石油洞库工程钻孔岩体波速测试采用的是上述单孔一发双收的方法,因此,对场区工程岩体进行质量评价时,不需要考虑频率差异的影响。

将实测的岩块饱和单轴抗压强度和计算的修正后的岩体完整性指数代入式(6)即可得到场区岩体的修正后的质量指标,再按工程岩体质量评价标准<sup>[13]</sup>进行分级,列于表 3。表 3 中还列出了未经修正的岩体质量 BQ 值和岩体质量分级,对比修正前

后的岩体质量指标 BQ 值,可以发现修正后的 BQ 值略低于未经修正的 BQ 值,这是因为岩芯从原位环境取出后发生卸荷效应,使得其内部的微裂隙扩张,致使取出后的岩芯波速低于其位于原位环境下的实际波速。

表 3 钻孔岩体质量指标

钻孔号	BQ 值	质量级别	修正后的 BQ 值	修正后的质量级别	钻孔号	BQ 值	质量级别	修正后的 BQ 值	修正后的质量级别
zk1	472.7	II	433.8	II	zk13	615.6	I	582.6	I
zk2	530.3	II	489.8	II	zk14	586.1	I	547.2	II
zk3	554.0	I	515.1	II	zk15	573.6	I	531.5	II
zk4	635.2	I	593.6	I	zk16	584.7	I	557.2	I
zk5	495.0	II	462.0	II	zk17	605.4	I	577.9	I
zk8	502.0	II	464.7	II	zk18	585.9	I	559.8	I
zk9	558.9	I	527.3	II	zk19	588.6	I	561.1	I
zk10	541.1	II	502.2	II	zk21	702.0	I	669.0	I
zk12	579.6	I	552.1	I					

根据室内试验获得的岩块波速-应力关系,将发生卸荷效应岩芯的波速归位到其在原位环境某一方应力作用下的实际波速,进而对岩体质量 BQ 值进行修正,因此修正后的岩体质量指标值更符合原位环境下岩体的实际质量。将表 3 中计算得到的各个钻孔位置修正后的岩体质量 BQ 值布置到地形图上,即可勾画出场区的岩体质量指标等值线图,如图 5 所示。从图 5 可以看出,场区岩体的质量指标 BQ 基本上都在 500 以上,总体上在 F4 断裂带(场区中部虚线表示)附近 BQ 值小,向东西两侧 BQ 值变大,而从门楼山往东,BQ 值又有变小趋势。根据工程岩体质量评价标准,可以圈出库址区岩体质量均为 I 级或 II 级,F4 断裂带岩体破碎,设为 IV 级岩体。

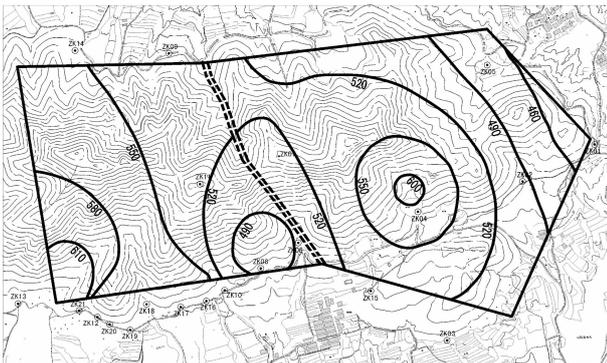


图 5 黄岛地下水封石油洞库场区岩体质量指标等值线图

## 5 结论与建议

1) 岩芯从钻孔中取出后,岩芯因其在钻孔内周边所受的原位地应力被解除而必将发生卸荷效应,通过对从黄岛地下水封石油洞库场区钻孔取回的岩样进行波速-应力试验,揭示库址区岩样的波速-应力关系:波速-应力关系曲线可以较清楚地分别出岩石变形的 2 个阶段,即体积变形阶段和体积不变阶段,而扩容阶段在整个波速变化趋势上有所体现,但是波速下降的幅度不大;波速-应力关系曲线基本上以  $\sigma = \sigma_c = (1/4 \sim 1/3)R_c$  为界,当  $\sigma < \sigma_c$  时,岩样波速随应力迅速增加,波速-应力关系符合幂函数曲线;当  $\sigma > \sigma_c$  时,岩样波速逐渐达到峰值,随后迅速下降,波速-应力关系符合二次函数曲线。根据岩样的波速-应力关系,提出岩样的卸荷指标,并将其定义为岩块在原位所受应力对应的波速与未受荷时的波速之比。

2) 将岩体看作粘弹性介质,通过理论推导,表明岩体介质中波的传播速度是复数,并且与频率相关,采用不同频率段的测试方法进行岩体、岩块波速测试,其测试结果往往有所差异,因此提出岩块(体)波速测试频率修正系数,将工程波速测试中常用的地震波和超声波 2 种波速统一到一个频率标准下。但是,粘弹性介质中,波的传播速度与频率相关,并且为复数,因此无法给出方便工程应用的地震波与超声波速度的关系式,根据前人对混凝土桩的 2 种波速对比试验,提出岩体介质的近似的频率修正系数,因此,在今后的工作中有必要收集实际工程中岩体的 2 种波速,对提出的频率修正系数进行校核。

3) 根据卸荷指标和频率修正系数对岩体完整性指数的计算公式进行修正,得到修正的岩体完整性指数,并用其替换岩体基本质量指标计算公式中的岩体完整性指数,得到改进的 BQ 岩体分级法。将改进的 BQ 岩体分级法在黄岛地下水封石油洞库工程岩体质量评价中进行应用,评价结果表明场区绝大部分岩体质量均为 I 级或 II 级,F4 断裂带岩体破碎,设为 IV 级岩体。

4) 该文仅对黄岛地下水封油库场区的花岗质片麻岩岩样进行了波速-应力试验,虽然得到一些较为满意的关系,但是其不具有普遍代表性,因此,下一步工作还需要采集更多类型的岩样进行试验,分析不同类型岩样的波速-应力关系及其卸荷效应,建立不同岩性、不同应力环境对应的卸荷指标。

### 参考文献:

[1] 李晓昭,安英杰,俞缙,等. 岩芯卸荷扰动的声学反应与

- 卸荷敏感岩体[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2086-2092.
- LI XIAO-ZHAO, AN YING-JIE, YU JIN, et al. Acoustic responses to rock core unloading-disturbance and unloading-sensitive rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2086-2092.
- [2] 边智华,李维树. 南京长江二桥基岩的工程力学性质试验研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 42-45.
- BIAN ZHI-HUA, LI WEI-SHU. Research on engineering mechanics properties of rock foundation under second Changjiang bridge in Nanjing[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(4): 42-45.
- [3] O'CONNEL. Seismic velocities in dry and saturated cracked solids[J]. J. Geophys. Res., 1974, 97: 5412-5426.
- [4] 高龙生,葛焕称. 中国大陆岩石标本在高压下的弹性波速的初步研究[J]. 地球物理学报, 1975, 18(1): 26-38.
- GAO LONG-SHENG, GE HUAN-CHEN. A preliminary study of P- and S-wave velocities under high pressure of rock samples from the mainland of China [J]. Acta Geophysica Sinica, 1975, 18(1): 26-38.
- [5] 黄承贤,宋大卫. 在围压下岩石弹性波速的研究[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(2): 32-41.
- HUANG CHENG-XIAN, SONG DA-WEI. Study on elastic wave velocity of rock under confining pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(2): 32-41.
- [6] 施行觉,孙道远. 循环应力作用下松散介质的波速和衰减特性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 114-116.
- SHI XING-JUE, SUN DAO-YUAN. Wave velocity and attenuation in the incompact medium under cyclic stress [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 114-116.
- [7] 赵明阶. 二维应力场作用下岩体弹性波速与衰减特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 123-130.
- ZHAO MING-JIE. Study on wave velocity and attenuation in 2d stresses field [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 123-130.
- [8] 马中高,伍向阳,王中海. 有效压力对岩石纵横波速度的影响[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(3): 183-187.
- MA ZHONG-GAO, WU XIANG-YANG, WANG ZHONG-HAI. Effect of effective pressure on compressional and shear wave velocities[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(3): 183-187.
- [9] 闫治国,朱合华,邓涛,等. 三种岩石高温后纵波波速特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 2010-2015.
- YAN ZHI-GUO, ZHU HE-HUA, DENG TAO, et al. Experimental study on longitudinal wave characteristics of tuff, granite and breccia after high temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 2010-2015.
- [10] GAVIGLIO P. Longitudinal waves propagation in a Limestone: The relationship between velocities and density[J]. Rock Mech. Rock Eng., 1989, 22(4): 290-299.
- [11] 韩放,纪洪广,张伟. 单轴加卸荷过程中岩石声学特性及其与损伤因子关系[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(5): 452-455.
- HAN FANG, JI HONG-GUANG, ZHANG WEI. Relationship between the acoustic characteristics and damage variable in the process of uniaxial loading and unloading [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(5): 452-455.
- [12] 樊秀峰,简文彬. 砂岩疲劳特性的超声波速法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 557-563.
- FAN XIU-FENG, JIAN WEN-BIN. Experimental research on fatigue characteristics of sandstone using ultrasonic wave velocity method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 557-563.
- [13] PHILIP BENSON, ALEXANDRE SCHUBNEL, SERGIO VINCIGUERRA, et al. Modeling the permeability evolution of microcracked rocks from elastic wave velocity inversion at elevated isostatic pressure[J]. Journal of geophysical research, 2006, 111(4): 1-11.
- [14] MIN-SU CHA, YOUNG-JONG SIM, GYE-CHUN CHO, et al. The effect of joint conditions on the longitudinal and flexural wave velocities of a rock mass [J]. Key Engineering Materials, 2006(1): 306-309.
- [15] TAKATO TAKEMURA, MASANOBU ODA. Changes in crack density and wave velocity in association with crack growth in triaxial tests of Inada granite[J]. Journal of geophysical research, 2005, 110(5): 1-14.
- [16] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [17] 牛滨华,孙春岩. 半空间均匀各向同性单相固体弹性介质与地震波传播[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [18] 田洪礼,董晓光. 超声波速度与地震波速度对应关系的应用[J]. 河南地质, 1997, 15(4): 293-297.
- TIAN HONG-LI, DONG XIAO-GUANG. Application of the relationship of ultrasonic velocity and seismic wave velocity[J]. Henan Geology, 1997, 15(4): 293-297.

(编辑 胡英奎)