

工作应力状态下岩体变形模量的研究

于震平¹, 李铁汉²

(1. 中国建筑工程总公司 科技部, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 工程岩体力学参数的大小与围压有着密切的关系。对于工程实践而言, 用于工程设计的岩体参数值, 应该反映该岩体工程在工作应力状态下的性状。以原位载荷试验结果推测拱坝工作状态下的岩体变形模量为例, 推导了以初始地应力表达的原位试验试样的围压公式和受力岩体在工作应力状态下的围压公式, 建立了原位试验结果与围压之间的关系。并将这种根据原位试验结果推求受力岩体在工作应力状态下的变形模量的方法用于计算黄河2号水电站高拱坝坝基(肩)岩体的变形模量, 其结果是合理的, 可以用于工程设计实践中。

关键词: 岩石力学; 变形模量; 地应力; 围压

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)10-1662-05

STUDY ON DEFORMATION MODULUS OF ROCK MASS IN WORKING STRESS STATE

YU Zhen-ping¹, LI Tie-han²

(1. *Science and Technology Department, China State Construction Engineering Corporation, Beijing 100037, China;*
2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The parameter values of rock mass have a direct bearing on its confining pressure. The parameter values applied in the design of a project should reflect the situation of the project in working stress state. The formula of confining pressure expressed in initial in-situ stress of in-situ test samples and the formula of surrounding rock pressure confining pressure in working stress state are established based on the example of deducing the deformation moduli of foundation rock mass of the high arch dam of the Hydropower Station No.2 on the Yellow River in working state from in-situ test results. The relationship between in-situ test results and confining pressure is established. The calculation results of the example are reasonable, which proves that the proposed method can be used in design.

Key words: rock mechanics; deformation modulus; in-situ stress; confining pressure

1 引言

工程岩体是一种复杂的介质, 其物理力学性质受到诸多因素的控制, 反映性质的参数值具有不确定性。其中的随机性较早地为人们所认识, 对其也有较深入的研究。随着工程实践经验的积累, 人们认识到岩体参数除了其随机性外, 还存在结构性,

并在空间上呈现规律性变化。对此, 从现场实测资料的整理中, 文[1]提出了岩体物理场的概念。造成岩体参数结构性的原因是多方面的, 文[2]通过对大量资料数据的分析研究, 认为地应力(或围压)的有规律变化, 是造成岩体参数结构性的主要原因。

地应力对岩体性质参数的影响, 早已引起了人们的重视。参数的取得依赖于各种试验, 但室内外的试验如何体现真实的应力状态(围压), 一直是人

收稿日期: 2004-01-05; **修回日期:** 2004-03-24

作者简介: 于震平(1957-), 男, 1982年毕业于武汉地质学院地质力学系, 现为教授级高级工程师, 主要从事岩土工程方面的设计和研究工作。E-mail: yuzhp@cscec.com.cn.

们关心的问题。室内试验完全脱离了岩体赋存的地应力条件，即使是一些原位试验，如大型水电工程在平硐中所做的直剪试验、载荷板试验等，也是在二次应力场中完成的，不同于岩体工程工作状态下的地应力条件。在试验结果中如何考虑应力状态(围压)的影响，是岩土工作者不可回避的问题。本文以原位载荷试验为依托，在推导了以初始地应力表达的原位试验试样的围压公式和受力岩体在工作应力状态下的围压公式的基础上，提出了计算受力岩体在工作应力状态下的变形模量的方法。

2 岩体变形模量与应力状态的关系

2.1 初始地应力场统计

原位试验或平硐的开凿是在地应力场中进行的，要考虑应力状态对岩体参数值的影响，首先应该对初始地应力场有所了解。

大型岩体工程场区的地应力场一般通过应力点的实测加以了解。进一步可以利用实测地应力值，采用有限元反分析得到比较全面的场区应力场。但是在反分析中又需要岩体的弹性模量值。利用实测地应力值，也可以通过简单的统计方法来了解场区地应力场，当然统计得到的地应力主平面应该相互垂直。

设现场三维地应力实测得到主应力的方向 σ_i 以及用方位角 φ_i 及倾角 β_i ($i = 1, 2, 3$) 表示的方向，如图 1 所示。

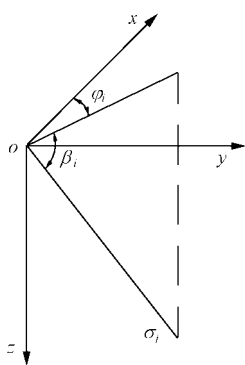


图 1 坐标系中的实测主应力

Fig.1 Principal stress in the coordinates

图中主应力的方向余弦为

$$\left. \begin{aligned} m_i &= \cos \beta_i \cos \varphi_i \\ n_i &= \cos \beta_i \sin \varphi_i \\ l_i &= \sin \beta_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

场区地应力大小可根据实测值采用统计方法表示成空间坐标的函数形式，如本文节 3.2 中所示。应力场统一方向按如下公式统计：

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i &= \frac{1}{n} \sum_k^n \varphi_{ik} \\ \beta_i &= \frac{1}{n} \sum_k^n \beta_{ik} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

此外，还应该考虑到各主平面相互垂直，即

$$m_i m_j + n_i n_j + l_i l_j = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3; i \neq j) \quad (3)$$

式(2)，(3)共 9 个方程，要求解 6 个未知数 φ_i, β_i ($i = 1, 2, 3$)。式(3)是必要条件，所以可以从式(2)中选取 3 个方程确定 φ_i, β_i 值。如果 σ_1 的 φ_1, β_1 及 σ_2 的 φ_2 由式(2)得到，则 $\beta_2, \varphi_3, \beta_3$ 可综合式(3)求得，即

$$\left. \begin{aligned} \tan \beta_2 &= -(m_1 \cos \varphi_2 + n_1 \sin \varphi_2) / l_1 \\ \tan \varphi_3 &= (m_1 l_2 - m_2 l_1) / (n_1 l_2 - n_2 l_1) \\ \tan \beta_3 &= (m_1 \cos \varphi_3 - n_1 \sin \varphi_3) / l_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2.2 原位载荷试验等效围压

现场原位载荷试验大多在平硐中进行的，岩体处于二次应力场状态下。二次应力场可用平硐的环向应力 σ_θ 和径向应力 σ_r 表述。为了求出二次应力场，可先求出地应力场在垂直于平硐轴线的水平应力分量 σ_H 和垂直应力分量 σ_V 。设 x 轴平行于平硐轴线，则 $\sigma_y = \sigma_H, \sigma_z = \sigma_V$ ，如图 2 所示。

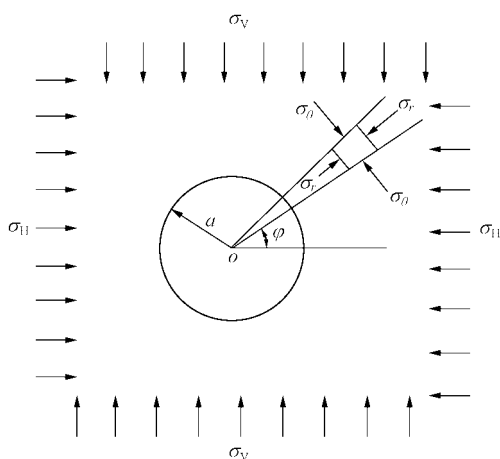


图 2 圆形平硐的二次应力场

Fig.2 Second stress field around a tunnel

在图 1 所示的坐标轴下，根据坐标变换的原则，有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sum_{i=1}^3 \sigma_i m_i^2 \\ \sigma_y &= \sum_{i=1}^3 \sigma_i n_i^2 \\ \sigma_z &= \sum_{i=1}^3 \sigma_i l_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ 为初始地应力场主应力，由地应力实测数据统计得到。

将平硐的横截面近似看作半径为 a 的圆形，则二次应力^[3]为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{\sigma_H + \sigma_V}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_V}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_r &= \frac{\sigma_H + \sigma_V}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_H - \sigma_V}{2} \left(1 + 3 \frac{a^2}{r^2} - 4 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： r 为平硐横截面圆心起算的矢径， θ 为横截面矢角。

一般情况下载荷板试验在平硐的硐底或硐壁进行，前者可取 $\theta = 3\pi/2$ ，后者则取 $\theta = 0$ 。且方向面上的剪应力为 0，正应力可作为主应力，也即为试样的围压。原位载荷试验的影响深度一般为板径的 3.5 倍，则试样的等效围压为

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_\theta &= \frac{1}{3.5b} \int_a^{3.5b+a} \sigma_\theta dr \\ \bar{\sigma}_r &= \frac{1}{3.5b} \int_a^{3.5b+a} \sigma_r dr \\ \bar{\sigma}_z &= \mu(\bar{\sigma}_\theta + \bar{\sigma}_r) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： b 为载荷板直径， μ 为岩体泊松比， $\bar{\sigma}_z$ 为平硐轴向应力。

从而，由原位载荷试验成果以及相应试验点的等效围压 $\bar{\sigma}_\theta$ ， $\bar{\sigma}_z$ ，可采用统计分析的方法，建立岩体变形模量与等效围压的相关方程，可表示为

$$E_s = f(\bar{\sigma}_\theta, \bar{\sigma}_z) \quad (8a)$$

或

$$E_s = f(\sigma_2, \sigma_3) \quad (8b)$$

式(8)即为原位试验变形模量与试样等效围压的关系方程。

如果在原位载荷试验点附近有地应力实测资

料，那么直接利用实测点地应力资料计算试样等效围压后再统计，将会减少确定场区地应力场时的误差，由此得到具体的式(8)将更准确。

2.3 工程岩体工作应力状态下的围压

岩体工程在工作状态下，岩体内的应力状态既与初始应力状态不同，也与二次应力状态不同，岩体性质参数值受到工作应力状态的影响。例如，水库蓄水后拱坝坝端对坝基(肩)岩体产生一作用力，每一拱圈可以看作是一个大型的载荷试验，此时岩体的变形模量受到了平行于作用力方向的各面上法向应力，也就是围压的影响。如果能从这无数多个平行面中找出最大、最小正应力作用的面，也即求出新的应力状态下的 σ_2 ， σ_3 (拱端作用力即为 σ_1)，则由式(8)就可以求出在工作应力状态下岩体的变形模量。

为了得到工作应力状态下岩体的围压，可将问题表述为：具有初始应力的一点，作用有外力 P ，求初始应力在平行于外力作用方向的平面上的最大、最小主应力。

设初始地应力的 3 个主应力分别为 σ_1 ， σ_2 ， σ_3 ，外力 P 的作用方向 \bar{p} 是已知的，与 3 个主应力轴的方向余弦分别为 m, n, l (已知)；又设平行于 \bar{p} 的平面中具有极值正应力平面的外法线方向为 \bar{q} ，与 3 个主应力轴的方向余弦为 m', n', l' (未知)，则初始应力在外法线方向为 \bar{q} 的平面的正应力为

$$\sigma_n = \sigma_1 m'^2 + \sigma_2 n'^2 + \sigma_3 l'^2 \quad (9)$$

又因 $\bar{p} \perp \bar{q}$ ，有

$$\left. \begin{aligned} mm' + nn' + ll' &= 0 \\ m'^2 + n'^2 + l'^2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

问题的关键是求 σ_n 的极值，显然，这是一个条件极值问题。

设 $F = \sigma_1 m'^2 + \sigma_2 n'^2 + \sigma_3 l'^2 + \lambda_1 (m'^2 + n'^2 + l'^2 - 1) + \lambda_2 (mm' + nn' + ll')$ ，并令

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial m'} &= 2\sigma_1 m' + 2\lambda_1 m' + \lambda_2 m \\ \frac{\partial F}{\partial n'} &= 2\sigma_2 n' + 2\lambda_1 n' + \lambda_2 n \\ \frac{\partial F}{\partial l'} &= 2\sigma_3 l' + 2\lambda_1 l' + \lambda_2 l \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(10)，(11)构成五元二次方程组，化解该方程组得

$$(\sigma_n^2 + b\sigma_n + c)\sigma_n = 0 \quad (12)$$

其中，

$$b = \sigma_1 m^2 + \sigma_2 n^2 + \sigma_3 l^2 - \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$$

$$c = \sigma_1 \sigma_2 l^2 + \sigma_2 \sigma_3 m^2 + \sigma_3 \sigma_1 n^2$$

式(12)的解 $\sigma_n = 0$ 不是问题的解, 所以

$$\sigma_n^2 + b\sigma_n + c = 0$$

解得

$$\sigma = \frac{1}{2}(-b \pm \sqrt{b^2 - 4c}) \quad (13)$$

式(13)即是所要求的平行于外力作用方向平面上的初始地应力最大、最小正应力。

在求出岩体工程场区地应力后, 可以用式(13)求岩体工作应力状态下的围压 σ_2, σ_3 , 从而利用式(8)可求得工作应力状态下的岩体变形模量。

3 实例计算

3.1 场区概况

以黄河 2 号水电站高拱坝坝基(肩)岩体变形模量的计算为例, 来说明本方法的应用。

黄河 2 号水电站位于青海省境内的黄河干流上, 与上游已建成的 1 号电站首尾相接。河流以 NE 向流入, 至坝址处呈近 EW 向。河谷呈“V”字形, 两岸基本对称。2 400 m 高程以下谷坡陡立, 坡度为 65°~70°; 2 400 m 高程以上岸坡略缓, 平均 40°~45°。谷底至岸顶相对高差达 600~700 m。

坝区出露的地层主要为三叠系全新统内陆沉积物。水电枢纽构筑物主要位于花岗岩上。勘察单位在坝区花岗岩体中进行了多组原位载荷试验, 得到的岩体变形模量值相差甚大。其中很多测试点的载荷作用方向、水平深度等没有资料, 无法用于统计。在三维地应力测点附近有 16 个数据, 如表 1 所示。

3.2 初始地应力场

坝区为高地应力地区, 区域构造应力场为 NE~NEE 向, 但在坝区受地形、构造等影响, 形成 σ_1 主导方向近 SN 向略偏 E 的局部应力场。最大主应力倾角大多在 40°左右, 向坡内倾角由大变小。两岸主应力值明显受地形影响, 向坡内逐渐变大, 渐变带达 150 m 左右。中主应力方向以小倾角大致沿河流走向。有关单位在场区作了 10 个点的三维地应力测量, 据此, 文[1]以边坡至岩体的水平距 D 及高程 L 为变量, 统计得到主应力值为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= 124.57 + 0.072D - 0.05L & R &= 0.79 \\ \sigma_2 &= 109.38 + 0.05D - 0.05L & R &= 0.72 \\ \sigma_3 &= 66.28 + 0.04D - 0.03L & R &= 0.78 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

表 1 试样等效围压与实测变形模量

Table 1 Confining pressure of samples and rock mass deformation moduli by in-situ test

序号	加载方向	E_s /GPa	$\bar{\sigma}_\theta$ /MPa	$\bar{\sigma}_z$ /MPa
1	水平	1.75	-0.892	-0.286
2	垂直	3.29	3.691	1.222
3	垂直	4.46	5.068	1.679
4	垂直	5.24	1.117	0.618
5	垂直	7.21	-0.756	0.023
6	垂直	6.31	6.917	2.829
7	垂直	7.55	5.392	1.922
8	水平	8.34	5.715	2.135
9	水平	6.05	10.801	3.864
10	垂直	12.23	6.090	2.494
11	水平	16.83	9.472	3.437
12	垂直	19.52	9.800	3.876
13	水平	22.40	16.455	5.413
14	垂直	19.40	9.232	3.959
15	水平	18.23	18.276	6.030
16	垂直	18.09	10.409	4.103

3.3 变形模量与等效围压的关系

为了避免由初始地应力场统计所造成的误差, 选择了附近有地应力实测资料的 16 个原位试验测出的变形模量值, 通过其附近的地应力实测数据, 由式(7)求出试样的等效围压 $\bar{\sigma}_\theta$ 和 $\bar{\sigma}_z$, 如表 1 所示。根据表 1 数据统计得到变形模量与等效围压的关系:

$$E_s = 3.71 + 0.57\sigma_2 + 1.23\sigma_3, R = 0.78 \quad (15)$$

式中: $\sigma_2 = \min(\bar{\sigma}_\theta, \bar{\sigma}_z)$, $\sigma_3 = \max(\bar{\sigma}_\theta, \bar{\sigma}_z)$ 。

式(15)即为式(8)的具体化。

3.4 库区蓄水后坝基(肩)岩体变形模量

拱坝在工作状态下, 拱端对岩体的作用力方向大致水平并与河流走向成 35°夹角。拱圈对岩体的作用可以看作是一种大型的载荷试验。因此, 拱圈的插入深度以及拱端的厚度也会影响到岩体变形模量值, 其数据如表 2 所示。

表 2 拱圈插入深度与拱端厚度

Table 2 Depth into rock and width of the arch dam

高程/m	插入深度/m		拱端厚度/m	
	左岸	右岸	左岸	右岸
2 460	50	34	10.00	10.00
2 430	93	35	22.73	22.73
2 400	47	31	33.60	33.60
2 360	30	28	44.88	44.88
2 320	15	30	52.08	52.08
2 280	33	30	54.80	54.80
2 240	18	22	52.60	52.60

根据拱端插入深度和拱端厚度，由式(14)求出受力岩体平均初始应力大小，并依据拱端对岩体的作用方向，由式(13)计算受力岩体的围压，将其代入式(15)，求得拱坝在工作状态下各高程坝基(肩)岩体变形模量，如表 3 所示。勘察单位根据传统方法给出的各高程岩体变形模量同时列于表 3。

表 3 岩体变形模量值比较

Table 3 Comparison of deformation moduli determined by different methods GPa

高程/m	本文方法		传统方法	
	左岸	右岸	左岸	右岸
2 460	4.012	3.471	8~10	8~10
2 430	7.094	7.961	8~10	8~10
2 400	11.046	11.465	15	15
2 360	13.886	15.835	20	20
2 320	16.311	20.033	20	20
2 280	20.770	23.351	20	20
2 240	21.862	25.198	20	20

由表 3 可知，用二种方法求出的岩体变形模量具有可比性。传统方法更依赖于经验。本文方法主要考虑了围岩的影响，通过一系列的计算得到，人为因素相对较少，其结果可以供工程实践时参考。

4 结 语

天然岩体存在于一定的环境之中，反映岩体物理力学性质的参数值也随环境而变化。大多数测试岩体性质参数的试验改变了岩体原来的赋存条件，特别是对参数值有较大影响的地应力(围压)状态。如何考虑围压对试验结果的影响，一直是岩土工程工作者所关心的问题。本文提出了原位载荷试验变形模量的围压校正方法，并用于工程实践的计算，其结果可以供工程实践参考。

初始地应力场的正确预测，对于岩体性质参数值的围压校正具有十分重要的作用。除了本文所采用的统计法外，还可以采用应力函数趋势分析法、数值模拟法等。但根据少量的实测点应力状态，目前还难以得到符合实际的场区地应力场。所以，在有三轴地应力实测点的附近区域，应该同时进行各种原位试验。这样原位试验点的初始地应力状态可以直接运用地应力实测资料，以减少场区初始地应力场预测的误差。本文算例就是采用实测地应力点附近区域的变形模量试验值，统计得到变形模量与围压的关系式(即式(15))。

岩体工作状态下的围压计算式(式(13))仅仅考虑了初始地应力状态，没有考虑工作荷载所造成的围压附加应力，这方面的问题将在以后的研究中加以改进。

参考文献(References)：

[1] 李铁汉. 高地应力梯度与岩体物理场[A]. 见：面向 21 世纪的岩石力学与工程[C]. 北京：中国科学技术出版社，1996. 657-663.(Li Tiehan. High ground stress gradient and rock mass physical field[A]. In：Rock Mechanics and Engineering Facing the 21st Century[C]. Beijing：China Science and Technology Press，1996. 657-663.(in Chinese))

[2] 于震平，李铁汉. 工程岩体物理场[J]. 现代地质，1997，11(3)：347-353.(Yu Zhenping，Li Tiehan. Physical field of engineering rock masses[J]. Geoscience，1997，11(3)：347-353.(in Chinese))

[3] 李铁汉，潘别桐. 岩体力学[M]. 北京：地质出版社，1980. 172.(Li Tiehan，Pan Bietong. Rock Mass Mechanics[M]. Beijing：Geological Publishing House，1980. 172.(in Chinese))