

鲁布革水电站原位试验洞位移反馈 岩体应力场研究

马启超 王宝林

(天津大学水利系)

提 要

本文根据鲁布革水电站原位试验洞实测位移,应用数理统计原理,通过有限元数学模型的回归分析计算,求解出岩体初始应力场和位移场。回归结果与实测位移、实测应力值相比较是一致的,且符合工程实际。本文的研究结果表明,以实测位移为依据进行回归分析计算,其方法是可行的,成果是可靠的,可用于实际工程。

一、前 言

近些年,地下洞室的设计理论逐渐摆脱以衬护为主体的传统观念,着重研究围岩的自承能力。岩体初始应力状态既是当前工程界十分重视的研究课题,也是评价地下洞室围岩稳定的主要依据。

过去岩体应力场的分析理论是建立在静水压力和自重应力场的基础上,计算成果与工程实测值相矛盾。目前随着岩体力学理论、计算技术和量测技术的发展,就有可能对复杂地质体进行模拟计算,并为工程设计提供可靠性较高的实测位移和实测应力值。将实测值与数值分析(有限元或边界元)和数理统计相结合已成为目前研究岩体应力场的主要途径。具体有两种反分析方法:①以实测应力值为依据,建立数学模型,用多元回归方法反演出岩体应力场和位移场,简称应力回归分析法^[1];②以实测位移值为依据,反馈出岩体应力场和位移场,简称位移回归分析法或位移反馈法。上述方法的理论基础是一致的,即都是以实测信息为依据,用多元回归分析求解出残差值为最小时的地应力场。

鲁布革水电站共有7个全应力和2个平面应力实测值。据此,我们用应力回归法进行了平面和空间地应力回归分析计算^[2,3]。验证结果表明,回归应力值与实测应力值基本一致;回归最大主应力方向与区域地质变形场方向基本一致;用回归应力场资料求得试验洞位移值与原位试验洞实测位移基本一致。这说明回归应力场是正确的,是符合鲁布革工程实际的,并为工程所采用。本文着重论述位移回归分析法,并用工程实例阐明该法的实用性与合理性。

二、原位试验洞的实测位移^[4]

水电部昆明勘测设计院科研所等单位进行了现场原位试验。试洞布置如图1,位于105号

到稿日期:1989年2月10日。

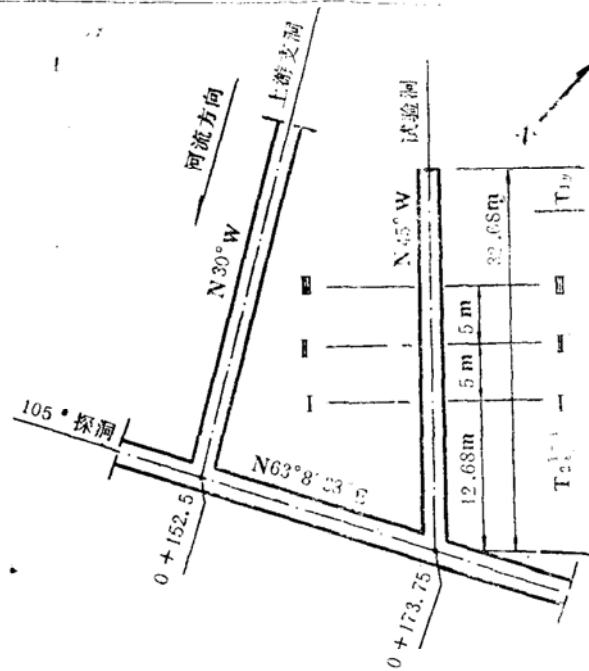


图1 现场试验洞布置图

探洞0+175m处上游侧地下厂房的岩体中，洞轴线与厂房轴线一致为 $N45^{\circ}W$ ，剖面尺寸按原设计的1/10比尺缩小为高5.0m，宽2.6m方圆形洞，洞长32.0m，共布置了3条观测断面，每个断面对称布置了5个观测孔(图2)。

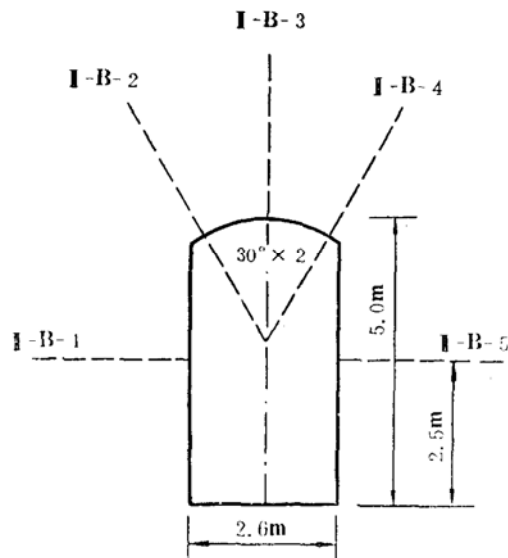


图2 试验洞Ⅱ-Ⅱ断面图

原位试验洞地质条件，洞口至28.0m段为三迭系关岭组第一段(T_2^{1-1})角砾状灰质白云岩和白云质灰岩，厚层块状，层理不明显。28.5m—33.9m段为下三迭系永宁镇组(T_{1y})石灰岩和白云质灰岩，中厚层和厚层状，层理明显，多闭合，层间常有泥质薄膜，见图1。

原位试验洞开挖释放变形曲线与室内、室外单轴、三轴和承压板试验结果的应力-应变关系曲线均近似为直线型，各向异性和流变性能不明显，岩石属脆性破坏等。这些特性反映了高地应力作用下结构效应减弱，呈连续介质的特征。因之鲁布革厂区岩体可近似认为均质脆性弹性体。

计算中选取鲁布革工程推荐的试验洞Ⅱ—Ⅱ断面实测位移值(表1)。在测试过程中,由于位移传感器被固定在孔口表面,所获得的实测数据是测点与孔口之间相对位移。因之一般要求最深的一个测点应位于非扰动区,该测点的位移便可看作孔口的绝对位移(u_0),这样任一测点的绝对位移可用 u_0 减去相对位移求得。

表1 原位试验洞(Ⅱ—Ⅱ)断面实测位移值(mm)

测孔号	测点位置(m)								
	0.2(0.3)	1.30	1.95	2.60	3.90	5.20	7.80	10.40	14.00
Ⅱ-B-1	1.008	0.224	-0.196	0.056	0.308		0.56		0
Ⅱ-B-3	0.729	0.189		-0.054					0
Ⅱ-B-5*		0.54		0.37		0.15	0.05	0.08	0
	测点位置(m)								
	0	1.0	2.0	4.0					
Ⅱ-B-2 ¹	0.896	0.463	0.028	0					
Ⅱ-B-4 ¹	0.224	0	-0.112	0					

注: 1.沿测孔向洞内变形为正。

2.有*号为预埋孔

三、计算原理与计算方法

位移回归分析法的基本思路是,在岩体初始应力场的基础上,采用洞室开挖的方法破坏围岩应力的平衡状态,促使岩体初始应力释放和转移,引起围岩应力重分布,从而进入新的应力状态(称为二次应力场),与此同时围岩也随之产生变形;继而根据这一变化过程中的变形特性建立数学模型。

(一)计算模型的建立

1.计算域范围

工程岩体初始应力场一般按工程需要,从半无限域中取出部分区域进行计算。选取计算域的原则是,在充分考虑到地形、地貌、地质条件和岩性、结构面等因素的基础上,以地质体相对独立的自然边界作为计算域边界。故其侧面边界应选在河谷或分水岭等地形特征部位(准正负对称面),深度方向的下边界延深到不受地下洞室和河谷地形影响深度。这样既包括了地形、岩性、构造等地质影响因素,又可简化计算域的边界条件。建立的约束条件应符合静力平衡要求。根据试验洞测试和岩性试验结果,假定岩体为连续介质各向同性弹性体,其介质参数一般采用测试资料。

2.待回归因素的分析与模拟

一般认为岩体应力场有三种主要形成因素,即岩体自重、地质构造运动和岩体温度应力。对岩体温度应力一般认为其影响很小(特殊情况除外),可以忽略不计。这样一般是初拟

岩体自重和地质构造运动为待回归因素, 等回归后再检验其是否合理; 有些次要因素也会在逐步回归分析中自动筛选和剔除。这样就便于把计算域简化为岩体自重模式和地质构造运动模式(图3(a), (c))。为模拟洞室开挖过程变形特性, 还需分别建立岩体自重和地质构造运动二次位移场或应力场分析模式(图3(b), (d))。

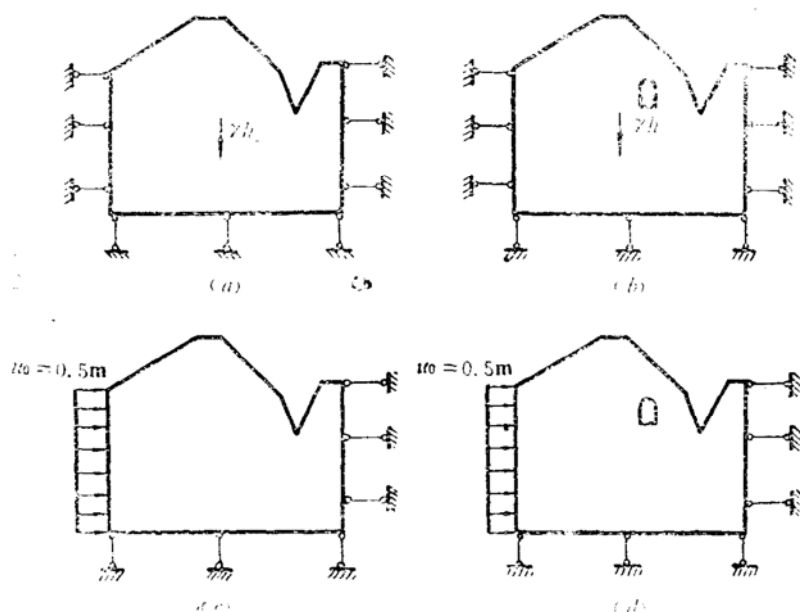


图3 位移回归计算模式

将计算域进行有限元剖分。在岩体自重模式(图3(a))的侧面施加水平约束, 在其底面施加垂直约束, 这样就限制了模型的刚体位移(图3(a), (b))。只要确知岩体容重参数 γ , 即可求得岩体自重位移场和应力场; 洞室按一次开挖, 求解出二次位移场, 二者差值即为初拟岩体自重作用下的“拟观测值”, 其回归系数估值 $b\gamma h$ 应接近于期望值1。对地质构造运动模式, 因构造运动作用未知, 无法直接求解, 回归法的主要思想就是在边界上施加作用力或位移来模拟地质构造运动作用。计算模式除在一个侧面施加作用力或位移外, 其约束条件同岩体自重模式。作法是先假设边界力 p_0 或边界位移 u_0 作为初拟地质构造运动的作用力或位移, 然后按图3(c)与(d)模式分别进行有限元计算, 求出实测点处的初始位移场位移和二次位移场位移, 二者差值即为初拟地质构造运动作用下的“拟观测位移”。将它与相应点处的岩体自重位移一起作为计算模式的“拟观测值”。然后与相应点的实测位移进行回归计算, 求解出各待定因素的回归系数估值 b_i , 将各模式的初拟 p_0 或 u_0 与 γ 值分别乘以相应的 b_i , 即为各待定因素的实际荷载。再分别进行实际荷载作用下各模式计算, 将其结果叠加, 即得出与实测值残差平方和最小时的地应力场。这样就将少数测点位移或应力转换为场的应力和位移。

(二) 位移回归分析

1. 多元回归方程式

对图3所示的四种计算模式分别进行初拟荷载作用下的有限元计算, 求解出位移场, 将依次得到初始应力场和二次应力场的水平和竖直位移, $[U_{\gamma h}^{(1)}], [V_{\gamma h}^{(1)}], [U_{u_0}^{(2)}], [V_{u_0}^{(2)}], [U_{p_0}^{(1)}], [V_{p_0}^{(1)}], [U_{u_0}^{(2)}], [V_{u_0}^{(2)}]$ 。对于平面问题, 每个测点可提供两个实测线位移, (U, V)

V), p 个测点可有 n 个值($n=2p$), 用 δ_k 表示, $k=1, 2, \dots, n$ 。

若单独考虑岩体自重作用时, 开挖洞室后各空间点的初拟释放变位为

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{vh} &= \left[U_{vh}^{(2)} \right] - \left[U_{vh}^{(1)} \right] && \text{(水平向)} \\ \Delta V_{vh} &= \left[V_{vh}^{(2)} \right] - \left[V_{vh}^{(1)} \right] && \text{(竖直向)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

同理, 单独考虑地质构造运动时, 有

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_u &= \left[U_{u0}^{(2)} \right] - \left[U_{u0}^{(1)} \right] && \text{(水平向)} \\ \Delta V_u &= \left[V_{u0}^{(2)} \right] - \left[V_{u0}^{(1)} \right] && \text{(竖直向)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

即在右侧面竖直边界上 $\Delta U=0$, 在底部边界上 $\Delta V=0$ 。实际上在试验洞周的非扰动区, $\Delta U, \Delta V$ 几乎等于零, 与实测值的不动点是一致的。

这样将求得与各实测点相对应的数学模型上的“拟观测值”, $\Delta U_{vh}, \Delta V_{vh}, \Delta U_u, \Delta V_u$ 用 $\delta_{kvh}^{(u)}, \delta_{kvh}^{(v)}, \delta_{ku}^{(u)}, \delta_{ku}^{(v)}$ 表示; 也可将上述值换算到观测孔方向上, 这时 $n=p$, 用 $\delta_{kvh}, \delta_{ku}$ 表示, 可写出多元回归方程式^[5]为

$$\delta_k = \beta_1 \delta_{kvh} + \beta_2 \delta_{ku} + \dots + \varepsilon_k \quad (3)$$

式中 β_i 为待回归系数; ε_k 是随机变量, 表示各次观测过程中出现的随机误差, 当有 k 个观测值时, 一般假定为

- (1) ε_k 的数学期望值全为零, 即 $E(\varepsilon_k)=0, k=1, 2, \dots, n$;
- (2) 各次观测误差服从正态分布;
- (3) 各次观测值相互独立, 并有相同精度, 即 ε_k 之间的协方差可表示为

$$C_{ov}(\varepsilon_k, \varepsilon_h) = \begin{cases} 0 & \text{当 } k \neq h \\ \sigma^2 & \text{当 } k = h \end{cases} \quad (k, h=1, 2, \dots, n)$$

协方差反映了各随机误差($\varepsilon_k, \varepsilon_h$)间的关连程度, 如 $k=h$ 即为方差, 如 $k \neq h$, 由于各观测值是独立的, 所以为零。

2. 回归系数的最小二乘估计

为了估计方程(3)待回归系数 β_i , 可采用最小二乘法。设 $b_1, b_2, \dots, b_m$ 分别是各回归系数 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 的最小二乘估值, 则回归方程为

$$\delta_k = b_1 \delta_{kvh} + b_2 \delta_{ku} + \dots + b_m \delta_{km} + e_k \quad (4)$$

式中 e_k 为误差 ε_k 的估值, 称为残差。取 δ_k' 为 δ_k 的估值, $\delta_k' = b_1 \delta_{kvh} + b_2 \delta_{ku} + \dots + b_m \delta_{km}$ 。则 $e_k = \delta_k - \delta_k'$, 根据最小二乘法原理, 可以求解出估值 b_i , 因之其解是唯一的。为使残差平方和 $Q = \sum_{k=1}^n e_k^2 = \sum_{k=1}^n (\delta_k - \delta_k')^2$ 达到最小, 则对 b_i 的偏导数皆应应为零, 即 $\frac{\partial Q}{\partial b_i} = 0$ 。整理后

可得法方程式

$$[S_{ij}][b_i] = \{S_i \delta\} \quad (5)$$

式中

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^n \delta_{ki} \delta_{kj}$$

$$S_{i\delta} = \sum_{k=1}^n \delta_{ki} \delta_k$$

$i, j = 1, 2, \dots, m$ (m 为待回归因素个数)

当保持位移拟观测值的组数 n 大于入选回归方程的待回归因素的个数 m ($n > m$), 并且入选的各因素之间相互线性独立时, 法方程 (5) 有唯一解, 并可表示为

$$b_i = \sum_{j=1}^m C_{ij} S_{j\delta} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

式中 C_{ij} 为法方程式系数矩阵的逆矩阵元素。

3. 回归效果的检验

$$\text{残差平方和 } Q = S_{\delta\delta} - U \quad (7)$$

式中 $U = \sum_{i=1}^m b_i S_{i\delta}$, 为回归平方和; $S_{\delta\delta}$ 为总离差; Q 值越小, U 值越大, 回归效果越好。

复相关系数

$$R = \sqrt{1 - Q/S_{\delta\delta}} \quad (8)$$

一般情况下, $0 < R < 1$, R 值越接近 1, 回归效果越好。在使用 R 值时, n 应大于 m 的 5—10 倍才有效, 当 $m = n$ 时, 总会得到 $R = 1$ 。因此更有意义的是进行 F 检验。

$$F = \frac{\frac{U}{m}}{\frac{Q}{n-m-1}} \quad (9)$$

当 $F > F_{\alpha}(m, n-m-1)$ 时, 表示 m 个自变量的总体效果显著。 $F_{\alpha}(m, n-m-1)$ 是显著水平 α 的临界值。

在逐步回归分析中, 为了检验每个自变量的贡献大小与引进次序时采用

$$V_i = \frac{S_{i\delta}^2}{C_{ii}} \quad (10)$$

式中 C_{ii} 为逆阵的主元素; $S_{i\delta}$ 为每次求逆后的自由项。

用显著性 F_i 可控制待回归因素是否引进或剔除。 F_i 由下式确定

$$F_i = \frac{\frac{V_i}{1}}{\frac{Q}{n-m-1}} \quad (11)$$

若取显著水平 $\alpha = 0.05$, $F_{\alpha}(1, n-m-1) = 4$, 当 $F_i < F_{\alpha}$ 时, 相应的自变量贡献显著, 应当引进, 否则不予引进。

四、数值计算与成果分析

(一) 计算模式

取计算域如图4所示。待回归因素计算模式见图3，

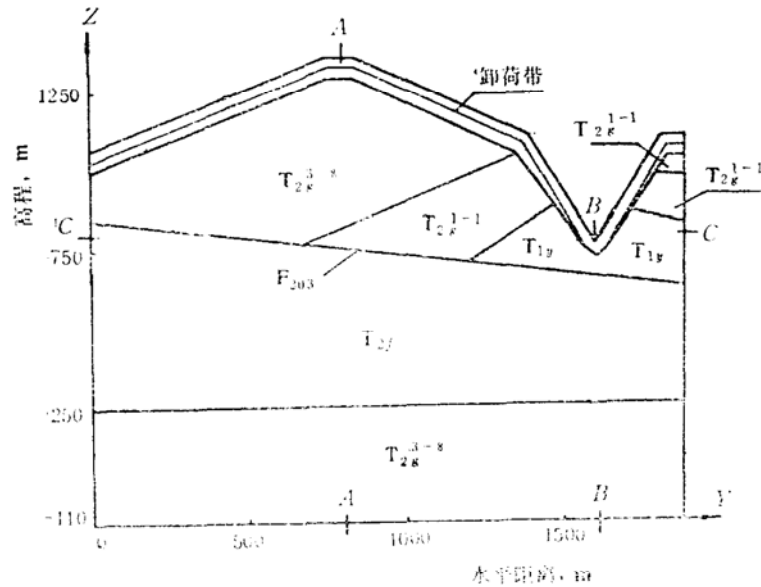


图4 地应力计算断面图

共剖分为414个四边形等参单元和78个退化单元，在洞周附近剖分较密，结点493个。

(二) 岩性指标

如表2所示，选取岩石的物理力学指标弹模 E ，泊松比 μ 及容重 γ 值。

表2 岩石物理力学指标

岩 层 符 号	$E(\text{GPa})$	μ	$\gamma(\text{kN/m}^3)$
卸 荷 带	16.0	0.30	27.0
断 层 带	8.0	0.30	27.0
$T_{2z}^{1-2}, T_{2z}^{1-3}, T_{2z}^{2-1}, T_{2z}^{2-4}, T_{2z}^{2-3}, T_{2z}^{2-4}, T_{2z}^{3-8}$	25.0	0.22	27.4
T_{2z}^{1-1}	32.5	0.22	27.4
T_{1y}	20.5	0.22	27.4
T_{2z}^{2-2}	12.5	0.22	27.0

(三) 实测位移值

取图2所示的原位试验洞II—II断面的实测位移值如前列表1。

(四)初拟荷载

对于岩体自重模式,体积力密度采用表2中数值。对于地质构造运动模式,初拟边界位移 $u_0 = 0.5\text{m}$ 。

(五)计算结果与成果分析

自重回归系数 $b_{vh} = 1.013$,地质构造运动回归系数 $b_u = 0.41495$;自重因素贡献 $V_{vh} = 2.508$,地质构造运动因素贡献 $V_u = 1.6192$;回归平方和 $U = 2.847665$,残差平方和 $Q = 0.308745$;复相关系数 $R = 0.95$,均方差估值 $S_y = 0.1965$,显著度 $F = 36.893$ 。回归方程为 $\delta'_k = 1.013\delta_{kvh} + 0.41495\delta_{ku}$,求得位移回归值 δ'_k 及残差 e_k 均列入回归计算表3中。

表3 回 归 计 算 表

测孔编号	实测位移 δ_k (mm)	数学模型“拟观测位移”(mm)		回归位移 δ'_k (mm)	残 差 $e_k = \delta_k - \delta'_k$ (mm)
		自重模式 δ_{kvh}	构造模式 δ_{ku}		
II-B-1	1.008	0.3522	0.933	0.744	0.264
	0.308	0.0811	0.463	0.263	0.045
II-B-2	0.896	0.765	0.380	0.932	-0.036
	0.463	0.591	0.263	0.708	-0.245
II-B-3	0.729	0.654	-0.186	0.585	0.144
II-B-4	0.224	-0.018	-0.250	-0.122	0.346
	-0.112	-0.025	-0.177	-0.099	-0.013
II-B-5	0.54	0.217	0.789	0.547	-0.007
	0.37	0.1054	0.575	0.345	0.025
	0.15	0.0565	0.373	0.211	-0.061
	0.05	0.0386	0.265	0.149	-0.099

1.回归分析的效果

从以上回归结果可以看出:①岩体自重回归系数 $b_{vh} = 1.013$,接近于期望值1,说明岩体自重因素作用稳定,容重取值合理。②显著度 $F = 36.893 > F_{2,3}^{0.01} = 8.65$, $R = 0.95$,说明回归效果高度显著。③由残差 e_k 看出,除少数值相差较大外,其余均较满意。

2.地应力场成因分析

$R = 0.95$,说明初拟岩体自重和地质构造运动因素是形成岩体应力场的主要因素是符合鲁布革工程实际的。根据在回归分析中贡献大小的判别准则^[1], $V_{vh} > V_u$ 说明岩体自重因素是第一位的,起主导作用。这个结论与用实测应力回归分析法求得地应力场成因分析的结论是一致的。

3.位移大小与分布规律

洞周位移分布见图5,图中横线上、下数值分别为洞壁各结点的水平位移(Δu)和垂直位移(Δv),洞周II-B-1—II-B-5 5个观测孔方向上的实测和回归位移对比变化曲线见图6。

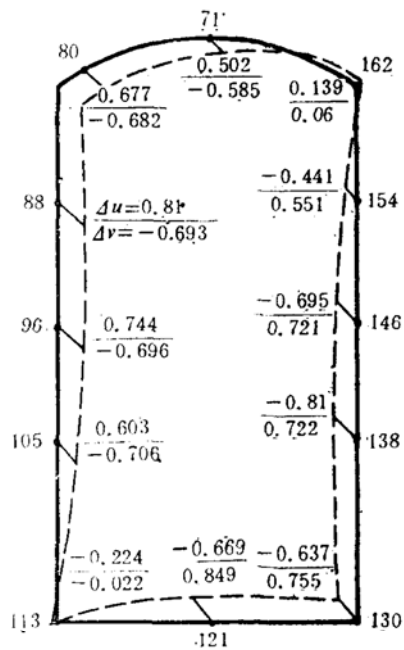
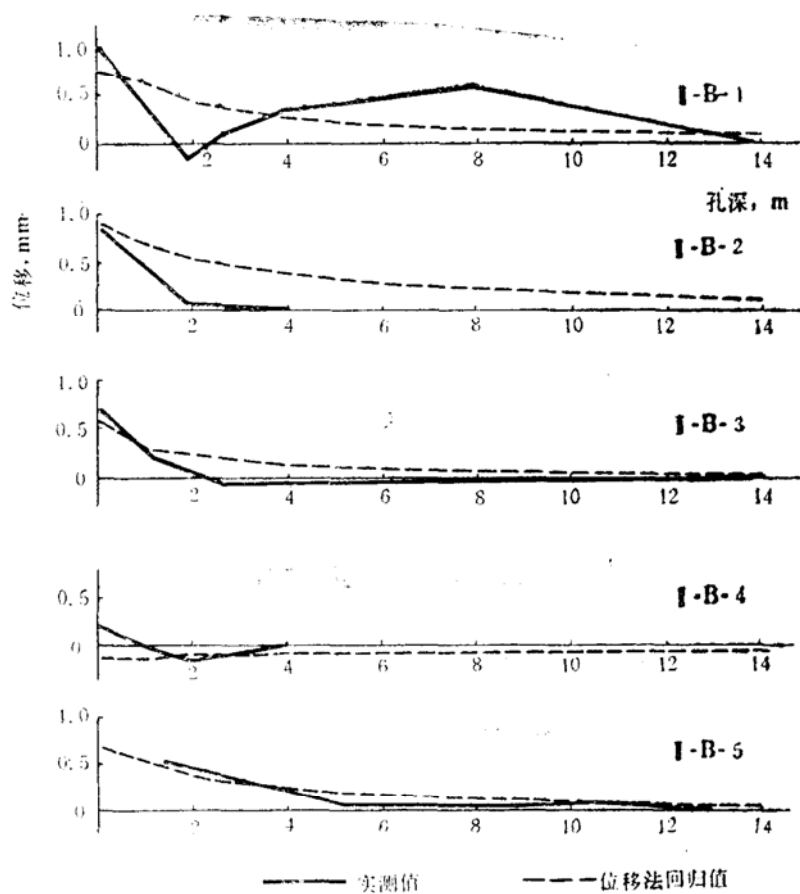
图5 洞周位移分布图($\Delta u, \Delta v$ 单位, mm)

图6 测孔位移对比曲线

从图5、图6和表3可以看出:

(1)前面列出的资料^[4]的实测结果是,边墙位移为0.6—1.2mm,顶拱位移为0.5—0.8mm。位移法回归结果是,左(内)边墙(96点)为0.744mm,右(外)边墙(146点)为0.695mm,顶拱(71点)为0.585mm。两者相比符合程度很好。

(2)从洞周位移分布规律,位移回归法结果与实测结果也是一致的,即边墙位移大于顶拱位移;左(内)边墙大于右(外)边墙位移;左(内)30°斜孔位移远大于右(外)30°斜孔位移。上述分布规律是受河谷边坡地应力作用方向的制约,使最大位移发生在最大主压应力方向上,如图5中88点和138点所示。

(3)测孔位移随深度变化曲线,由回归值与实测位移反映出其变化趋势是一致的。计算曲线较实测曲线收敛得慢些,它预示着,在试验洞围岩0—2m范围内是应力松弛区,位移值变化较大;在10—12m以外基本上处于应力平稳区,即原岩应力区,位移很小;中间范围为应力调整过渡区,位移从大变小。这一结论与洞室影响范围是2—3倍洞径的论点以及声波测试结果都是一致的。

4. 应力大小及分布规律^[6,7]

位移回归法求解出的地应力场的可信度,还应受到应力实测值的再检验。实测值更具有权威性。如图1,在上游支洞有一个应力实测值,换算到试验洞计算剖面的应力以及位移回归法求解出相应点处的应力值列入表4中,以资比较验证。表4中实测应力不变量 $I_1 = (\sigma_y + \sigma_z) = -18.189\text{MPa}$,位移回归应力不变量 $I_1' = -16.192\text{MPa}$, θ 为第一主应力与水平面的夹角,逆时针方向为正。图7(a),(b)和(c)绘制了A—A(山脊处)和B—B(河谷处)垂直剖面以及横穿河谷标高约为750—780m处作水平剖面C—C的应力变化曲线。

表4 位移回归与实测应力对比表

项 目	主应力(MPa)		$\theta(^{\circ})$	分应力 (MPa)			$\frac{\sigma_y}{\sigma_z}$	$\frac{I_1'}{I_1}(\%)$
	σ_1	σ_2		σ_y	σ_z	τ_{yz}		
实测应力值	-4.774	-13.415	30.95	-7.059	-11.130	3.811	0.634	89.02
位移回归应力值	-4.109	-12.083	32.50	-6.411	-9.781	3.614	0.655	

从表4和图7可以看出

(1)位移回归应力值与实测应力值符合度是一致的。二者应力不变量的比值 I_1'/I_1 已达89.02%。

(2)水平应力与垂直应力比值 σ_y/σ_z ,位移回归法结果为0.655,应力实测结果为0.634,说明应力分布规律是一致的。

(3) σ_z 随深度线性增加,其值大于上覆岩体自重,这是水平地质构造应力侧向效应结果。 σ_z 沿水平向(图7(c))随地形起伏而增减。

(4) σ_y 随深度逐渐增加,增加速率小于 σ_z ,在河谷底部有明显的应力集中现象,应力集中度约为1.5,见图7(b)与(c)。

(5) τ_{yz} 在河谷底部也有集中趋势,到一定深度后其值很小,见图7(b)与(c)。 τ_{yz} 沿水平向在山脊与河谷准对称面两侧符号相反,对称面上 $\tau_{yz} = 0$ 。

综上所述,该工程岩体应力场可以分为三个应力区,即应力释放区(风化卸荷带);应力

集中区(河谷底部)和应力平稳区。上述应力分布规律与用应力回归法求解的地应力场^[2,8]是完全一致的。

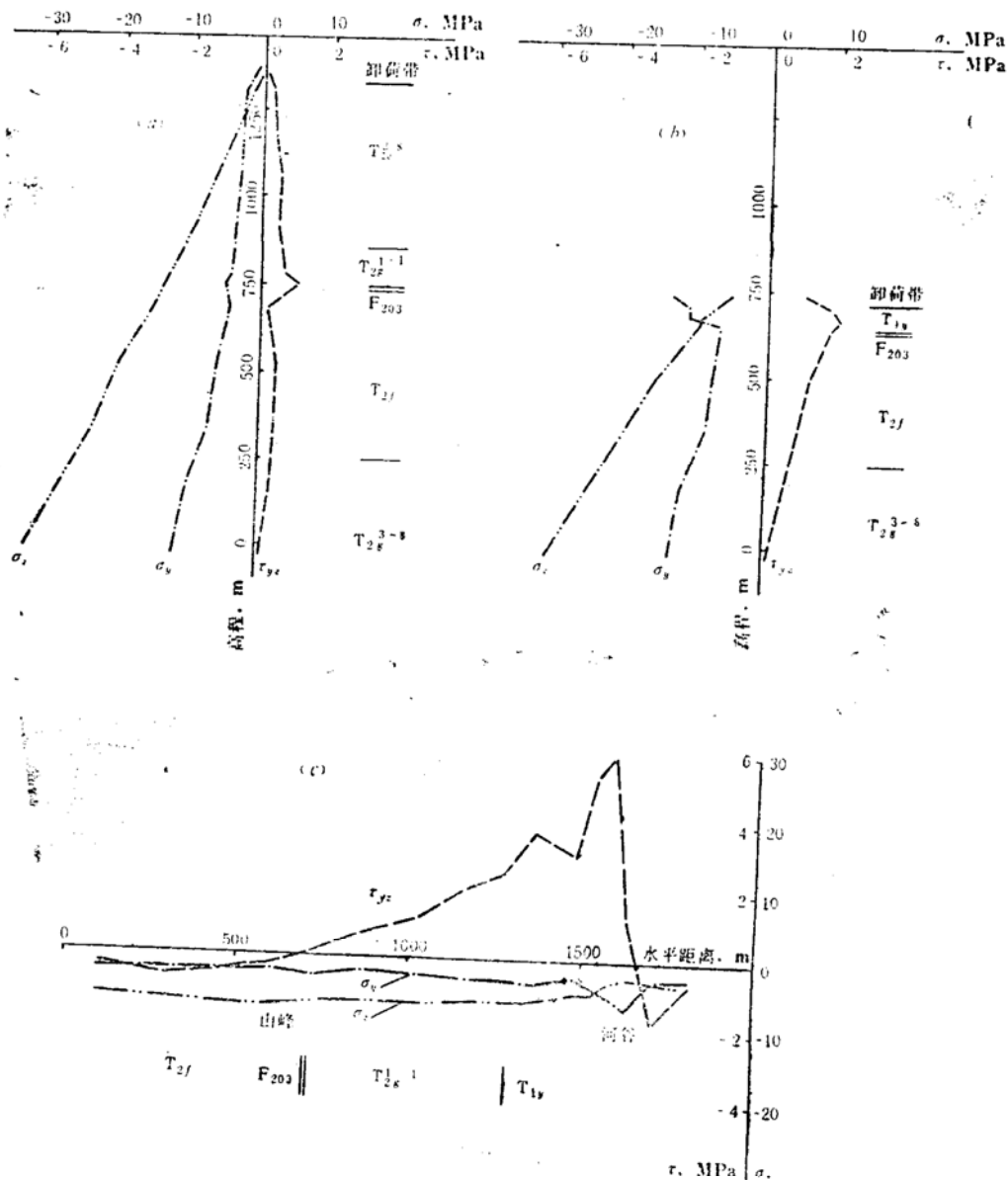


图7 应力分布图

(a) A—A垂直剖面应力分布图(山脊)

(b) B—B垂直剖面应力分布图(河谷)

(c) C—C水平剖面应力分布图

五、结 语

1. 通过对鲁布革工程岩体应力场的分析研究, 证明了以实测位移为依据反馈岩体应力场的位移回归分析法是可行的, 求解出的地应力场和位移场符合鲁布革工程实际。经验证回归计算值与实测值(位移与应力)符合度是满意的。从而说明该法的实用性与正确性, 可供实际工程应用。

2. 本文着重论述了平面问题的位移回归法,其基本原理也适用于空间问题求解。若考虑洞周位移释放的空间效应^[8],图5中96点沿孔向位移为1.13mm,80点沿孔向位移为0.82mm,71点为0.64mm,与平面回归结果是一致的,且更符合工程实际。所以位移回归法也是一种适应性较强的地应力场反分析方法,不但适用于平面或空间情况,以及单介质和多介质条件下的地应力场分析,而且还可进行其成因分析。

3. 实测资料更具有权威性。用实测位移反馈岩体应力场,其相应点回归应力可与应力实测值对比,受其实测值的再检验。同样,用实测应力反演的岩体位移场,其相应点的回归位移亦应受到位移实测值的再检验。这样的再检验,一方面进一步验证和提高计算理论和计算成果的正确性和可信度,另一方面对现场施工过程中可能出现的应力与位移作出必要的监控与预估。

顾洪参加了部分计算工作。

参 考 文 献

- [1] 郭怀志等,岩体初始应力场的分析方法,岩土工程学报,Vol.5, No.3, 1983, pp.64—75。
- [2] 薛玺成等,鲁布革工程二维初始地应力场分析报告,天津大学,1986.2。
- [3] 马启超等,鲁布革工程三维初始地应力场分析,天津大学,1986.2。
- [4] 水电部昆明勘测设计院科研所等,鲁布革水电站地下厂房原位模型洞围岩变形量测试研究报告,1985.10。
- [5] 中国科学院计算中心概率统计组,概率统计计算,科学出版社,1979年4月,pp.105—181。
- [6] 马启超,工程岩体应力场的成因分析与分布规律,岩石力学与工程学报,Vol.5, No.4, 1986, pp.329—342。
- [7] 马启超等,对岩体地应力场分布规律的初步探讨,水利水电技术,1985年第7期,pp.28—34。
- [8] 天津大学,《水电、矿冶、土木岩体工程的初始地应力场研究》工作汇报纲要,1987.10。

Research on Ground Stress Field of Rock Masses by Feedback of In-Situ Displacements Measurement

Ma Qichao Wang Baolin

(Tianjin University)

Abstract

In this paper, according to the field displacement measurement data of rock chamber model test and the regression analysis of the finite element mathematical model, the ground stress field of rock masses is determined. The calculated results are in agreement with the measured displacement and the measured stress. It is shown that the regression method based on the measured displacement is feasible, the results are reliable, and it may be used in practical engineering.