



龙羊峡水电站水压致裂应力测量

高建理 丁健民 梁国平 郭启良*

(国家地震局地壳应力研究所 北京 100085)

提 要

我们采用小型轻便水压致裂应力测量设备对位于黄河上游的龙羊峡水电站大坝左坝肩附近的四个约100m深的钻孔进行了原地应力测量。结果表明,在所测深度范围内三向主应力之间的关系 $S_H > S_h > S_v$,水平主应力 S_H 和 S_h 以及最大剪应力 τ_{max} 的值随高程的降低有增加的趋势。由对实测孔部分压裂段的印模得出坎区 S_H 方向近南北。龙羊峡地区现今构造应力场复杂, S_H 方向在深部为NE-NNE,浅部大致为近南北-NE向。在现今构造应力场作用下 F_1 断层带有复活的可能,其形式将表现为浅部逆断层型、深部右旋走滑型错动。然而,四个实测孔周围的岩体稳定性计算结果说明,处于活动断裂带以外的岩体完整部位基本上处于稳定状态。

一、前 言

水压致裂应力测量是目前唯一能同时获取地壳较深处应力方向和大小的方法,自七十年代问世以来,无论是在国外还是在国内都被广泛应用于地壳构造应力场的测量与研究(1~7)。近些年,这种应力测量方法已被逐渐用于多种工程的设计中,诸如核电、水电、道路、桥梁以及矿山等工程的稳定性设计。迄今为止,我们已采用轻便水压致裂应力测量设备对国内四座水电站计十二口深约100m至400m的钻孔进行了原地应力测量,黄河上游龙羊峡水电站便是其中之一。测量结果不仅完满地解决了工程设计中的有关问题,而且也为测区附近的构造应力场分析提供了宝贵资料。

龙羊峡电站位于青藏高原,是黄河上游具有综合效益的大型控制性水电工程。拦河大坝建在黄河上游龙羊峡谷入口约1.5km处的印支期花岗闪长岩体上。主坝为重力拱坝,两岸通过重力墩与左右岸付坝相连。针对坝肩稳定分析中存在的工程地质问题,此次应力实测点选在左岸坝肩下游 F_1 断层的上盘和 F_2 断层带(北大山水沟断裂)附近。共测量了四个钻孔。其中有三个孔基本在与 F_1 断层大致相垂直的一个剖面内,这对分析 F_1 断层带在水库蓄水后

*参加野外工作的还有郭杰、刘启芬、张克良、胡贞瑞、王海中和杨曾学。

的稳定性极为有用。另一孔则选在F₇断层带内, 对该孔的应力实测有助于弄清单层带本身的应力状态和岩体强度。

二、测区地质构造概况

龙羊峡电站位于青海省共和县境内黄河龙羊峡谷中, 地处共和盆地东南缘。其北为青海南山褶断带, 南为阿尼玛卿隆起带, 为隆起与拗陷的接壤区。

区内构造格架主要有一系列NNW向相间排列的隆起与拗陷带, 如日月山—蛙里贡山隆起带和青海湖—共和盆地拗陷带等。另外断裂十分发育, 主要有NW、NWW和近南北向三组, 其中以南侧的布青山—阿尼玛卿山深大断裂和当郎沟深大断裂规模最大(图1)。

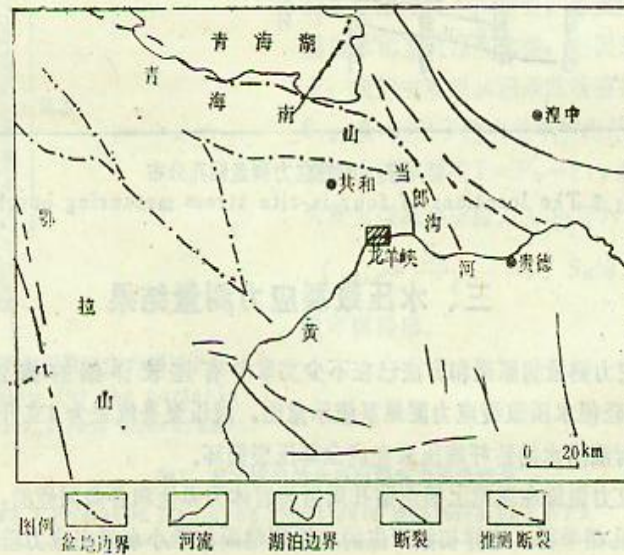


图1 龙羊峡地区构造略图

Fig.1 Sketch of geological structure in Longyangxia region

在近期以来, 本区以大面积隆起运动为主, 印支期有大量花岗闪长岩岩浆以岩盘形式侵入下三迭统砂板岩层中。第四纪中更新世以来又表现为大面积间歇上升, 从而形成了夷平面及黄河沿岸的多级阶地。同时老断层有复活迹象, 其中以当郎沟断裂和坝址区F₇断层带较为明显。

F₇断裂出露于坝址下游南侧的北大山水沟中, 破碎带总宽近100m, 分6-10条, 南北向延伸达30km。沿该断层在黄河两岸形成深切沟谷, 使两岸坝肩对山体支撑受到影响, 尤其是Q₃以来该断层已有复活的迹象, 这对坝址的稳定威胁颇大。因此, 了解该断层附近的原地应力状态有益于验证现有坝肩设计的合理性, 以保证大坝的安全。这就是此次实测应力点选取的宗旨(图2)

(1) 西北院地勘一队工程地质组, 黄河龙羊峡水电站工程地质说明, 1985。

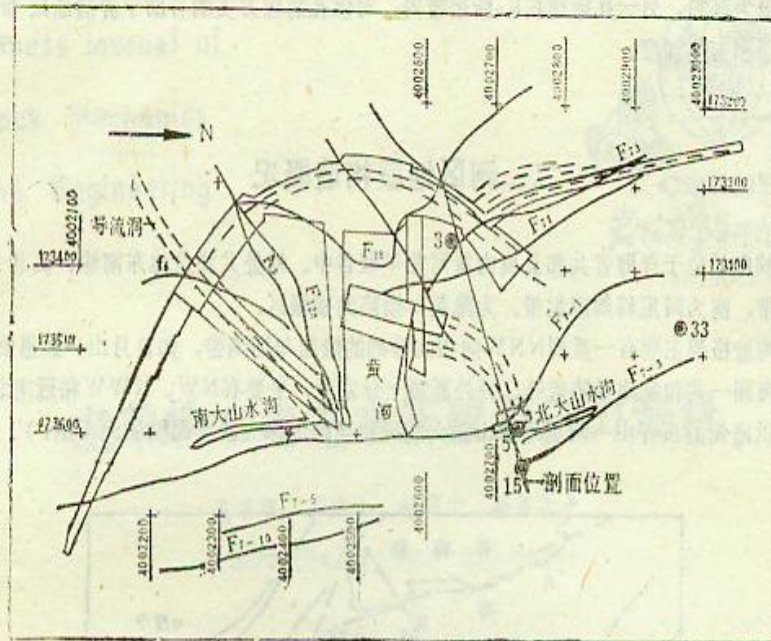


图2 原地应力测量钻孔分布

Fig.2 The locations of four in-situ stress measuring boreholes

三、水压致裂应力测量结果

水压致裂应力测量的原理和方法已在不少文章中有过较详细的描述。在此不再赘述^[8,9]，图3是轻便水压致裂应力测量系统示意图。液压泵是流量为4立升/分的小型油泵。实验时以油泵对灌满水的钻杆施压来完成全部压裂循环。

水压致裂应力测量在理论上假定钻孔周围的岩体为弹性和各向同性的，并且有一个主应力（ S_v ）与钻孔相平行。这样初始产生的水压裂缝面与最小水平主应力垂直。最小水平主应力值（ S_h ）可由稳定的瞬时闭合压力（ISIP）确定，所谓的ISIP即在压裂过程中，当岩石被压裂后停泵使压力降到最低值，此刻压裂缝刚好闭合，破裂内的压力ISIP与外界最小水平主应力 S_h 达到平衡。这时的ISIP就等于 S_h 。最大水平主应力则由钻孔周围应力集中的有关方程确定。

$$S_H = 3S_h - P_r - P_0 \quad (1)$$

式(1)中 P_r 为重张压力，第二压裂循环后才会出现； P_0 为压裂段围岩的孔隙压力，通常以静水压力代替。为了确保主应力值的计算精度，我们在试验中对每个压裂段进行了四个循环的压裂，最终取三次重张压力和第二、三两次循环的瞬时闭合压力的平均值分别作为计算 S_h 和 S_H 的压力参数。

此次水压致裂应力测量选取了坝区四个地下水长期观测孔，它们是3号、5号、15号和33号孔。因条件限制压裂的段数各不相同，其中3号孔三段、5号孔五段、15号孔两段、33号孔三段。图4为它们的压力-时间曲线

各压裂段的坐封压力一般为6~8MPa，每段均采取了先坐封后循环压裂的办法。在岩石被压裂后又施行了三次循环压裂，这样在确定压力参数时可避免其它因素的影响。考虑到

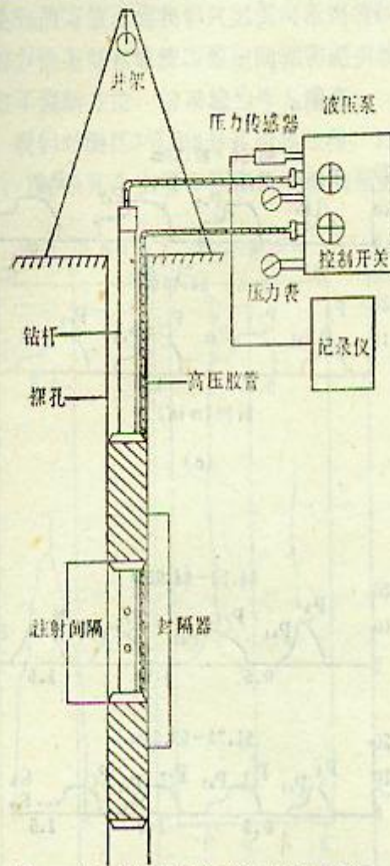


图3 小型轻便水压致裂应力测量系统

Fig.3 System for the portable hydrofracturing stress measurement

压力传感器被置于井口, 故各压力参数均加上测量段深度上的岩石孔隙压力(这里以静水压力代替)以获得实际井下压力值。 S_H 和 S_H 的计算也基于压裂段的井下压力参数值。

图4中标出了各段破裂压力 P_b 、各循环的重张压力 P_r 和瞬时闭合压力 P_s , 以及最小水平主应力 S_h 和垂直应力 S_v 。在测量深度范围内三向主应力之间关系为 $S_H > S_h > S_v$, 压裂缝由垂直缝外延转至水平缝。故循环压裂的最后一个ISIP值定低于前几个值, 它近似等于垂直应力值 S_v (从压力—时间曲线上读出的是地面压力值, 加上压裂段的孔隙压力后才是压裂段处的实际压力值)。当然, 垂直应力 S_v 也可由上覆岩体比重及厚度求得, 但因测区地形起伏较大, 我们主要以从记录曲线直接读取的办法求 S_v 。表1列出了此次龙羊峡电站应力实测结果。该表中抗张强度 $T = P_b - P_r$, 最大剪应力 τ_{max} 为最大与最小主应力(S_H 与 S_v)之差的一半

$$(\tau_{max} = \frac{S_H - S_v}{2}), S_H \text{ 的方位则由对压裂缝印模得出。}$$

表1 龙羊峡电站水压致裂应力测量结果

Tab.1 Hydraulic fracturing stress data measured at LWPS

序号	钻孔号	压裂段深度 (m)	高程 (m)	压力参数 (MPa)					地应力值 (MPa)				S_H 方位 ($^{\circ}$)
				P_0	P_b	P_s	P_r	T	S_H	S_P	S_v	τ_{max}	
1	3#	48.61—49.46	2414.27	0.49	10.5	5.75	10.33	0.17	7.70	5.99	4.49	1.11	N37°E
2	3#	53.72—54.57	2409.16	0.54	16.7	7.5	14.2	2.5	8.84	8.04			N10°E
3	3#	58.72—59.57	2404.16	0.59	17.0	5.5	9.17	7.83	7.92	6.09	4.59	1.67	N10°W
4	5#	68.96—69.81	2399.99	0.69		3.3	4.8		5.81	4.0	3.0	1.41	
5	5#	77.72—78.57	2191.23	0.77	8.5	3.9	5.5	3.0	7.02	4.7	3.9	1.56	
6	5#	80.48—81.33	2388.47	0.80	10.5	4.5	5.5	5.0	8.97	5.3	4.5	2.15	N54°W
7	5#	92.26—93.11	2376.69	0.92	15.5	8.0	10.0	5.5	14.87	8.9	7.0	3.94	N2°W
8	5#	95.20—96.05	2373.75	0.95		7.5	9.2		14.34	8.5	5.5	4.42	N1°W
9	15#	86.50—87.35	2386.15	0.87	12.9	7.09	8.93	3.97	13.15	7.94	2.26	5.45	
10	15#	93.60—94.45	2379.05	0.94	12.97	6.23	9.67	3.30	9.99	7.2	2.44	3.78	N64°W
11	33#	84.10—84.95	2444.55	0.84	11.0	6.5	7.5	3.5	12.75	7.3			
12	33#	91.71—92.58	2436.92	0.92	7.37	4.5	6.8	0.57	7.58	5.4	4.9	1.34	
13	33#	97.73—98.59	2430.91	0.98	6.25	2.5	4.8	1.45	3.72	3.5	2.6	0.56	

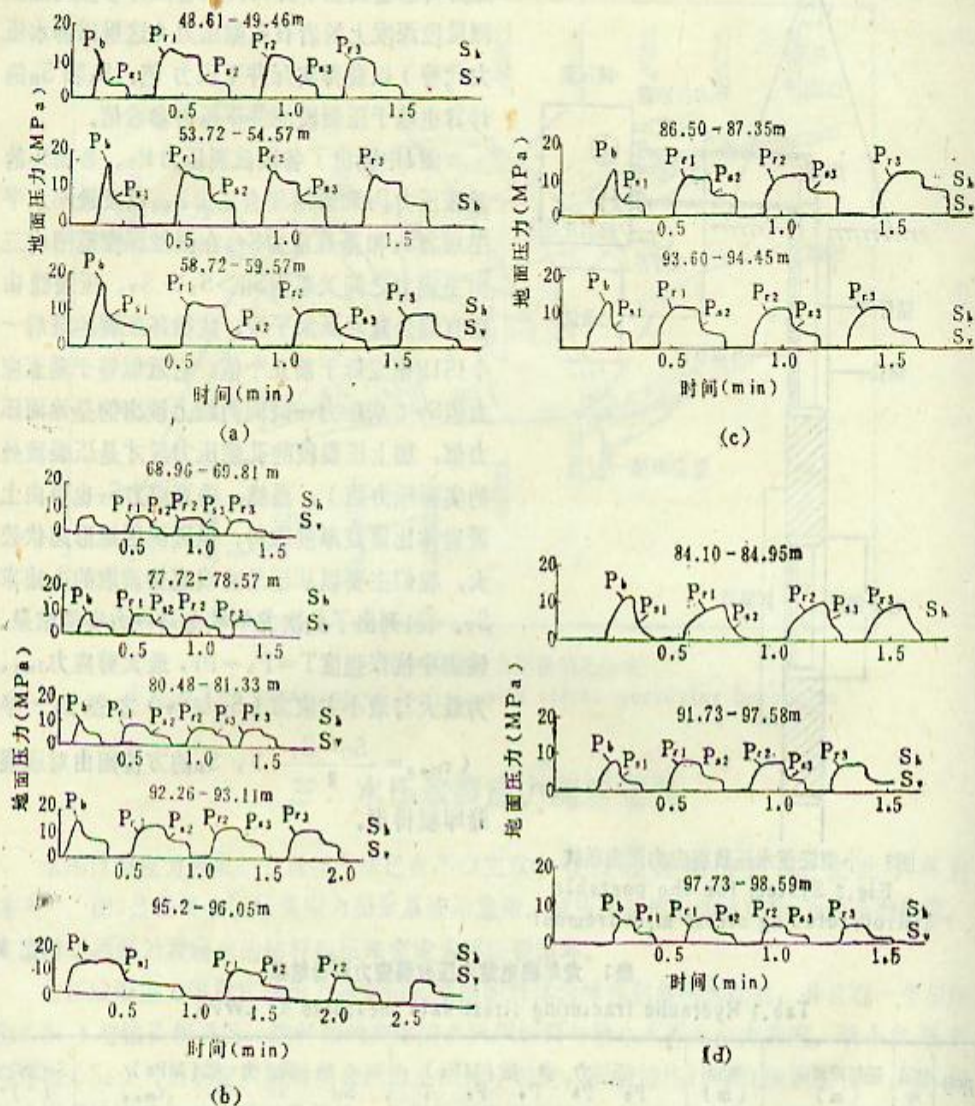


图4 四个应力测量孔的压力—时间曲线

Fig.4 The pressure--time records of four stress measuring holes

(a)3号孔 (b)5号孔 (c)15号孔 (d)33号孔

(a)hole No.3 (b)hole No.5 (c)hole No.15 (d)hole No.33

四、主应力方位及其与区域构造应力场的关系

1. 印模结果

水压致裂试验所产生的裂缝在孔壁上基本直立，但也有少数为倾斜裂缝。这是因为并非所有 S_v 都与钻孔平行，相应的 S_H 和 S_h 也未必水平。换句话说，实际的三向主应力 S_1 、 S_2 和 S_3 并不一定与 S_H 、 S_h 和 S_v 相重合。然而，裂缝基本产生于孔壁上切向应力最小的部位，该最小切向应力值恰好等于最小水平主应力值，即 S_h 方位与裂缝延伸方向垂直，而该方向必然

就是 S_H 的方位。故我们只需测出压裂缝的延伸方向便可得出 S_H 的方位。目前用于测定裂缝方位的方法主要有橡胶印模定向器和超声波井。下电视测井因条件所限，我们仅以前一种方法测定了裂缝方位，结果较为令人满意。

我们对测区3号和5号孔印模三段，15号孔印模一段，求出的裂缝方位（ S_H 方位）已列于表1。图5是几个主要印模段压裂缝的形态。

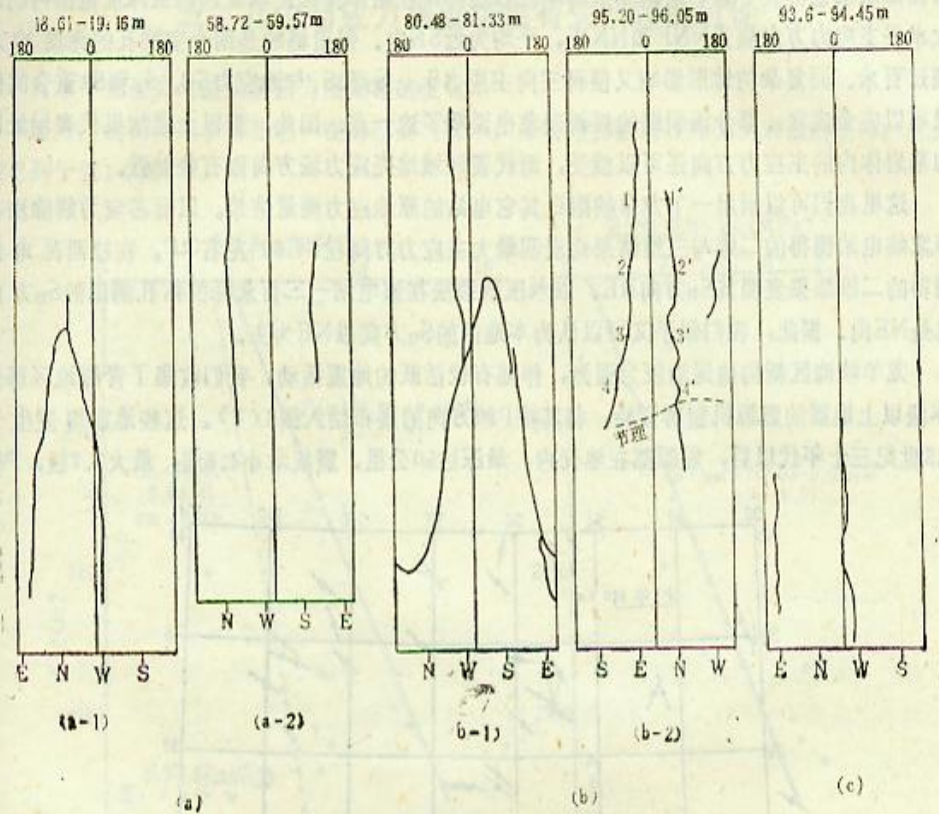


图5 水压裂缝的印模结果

Fig.5 The impressions of hydraulic fracturing cracks

(a) 3号孔 (b) 5号孔 (c) 15号孔

(a) hole No.3 (b) hole No.5 (c) hole No.15

3号孔的三段印模中有两段较理想，裂缝形态见图5-a。图5-a-1所示为48.61-49.46m压裂段的裂缝形态，该裂缝略带倾斜，在孔壁上对称展布，长达40cm，求得其方位为 $N37^\circ E$ 。图5-a-2展示了58.72-59.57m压裂段的裂缝形态。两条裂痕呈直立对称展布，长者达53cm，短者也有21cm，裂缝方位 $N10^\circ W$ 。53.72-54.57m压裂段的印模不太理想，大致方位为 $N10^\circ E$ 。可见，3号孔附近 S_H 的方向为NNE到近SN向。

5号孔计压裂五段，印模了其中三段。图5-b展示了两个较理想的印模，图5-b-1所示为80.48-81.33m压裂段的裂痕印模，该裂痕亦略带倾斜，长达44cm，对称展布，裂缝方位 $N54^\circ W$ 。其上部还有一条直立缝可能是原生节理。图5-b-2为95.20-96.05m压裂段的印痕，该裂缝近于直立，长约44cm，平均方位为 $N1^\circ W$ 。92.26-93.11m压裂段的印痕不太理想，其大致方位为 $N2^\circ W$ 。所以，5号孔附近的 S_H 方向为NNW-NW。

15号孔共压裂两段,印模一段(图5-c)。印模段深93.6—94.45m,裂缝对称直立,长约23cm左右,方位为 $N64^{\circ}W$ 。该孔位于段层F附近,其 S_H 的方向可能会受局部应力场的影响。

2. 龙羊峡地区的地壳应力场

由于龙羊峡地区地形复杂,断层发育,使得地壳浅部的应力状态比较复杂。坝址区的应力测量结果也证实了这一点。如果将不甚理想的印模结果排除,坝址区测量深度范围内的最大水平主应力方向应为NNE和NNW,平均为近SN向。但遗憾的是四个实测孔的深度均未超过百米,而复杂的地形影响又使得三向主应力 S_1 、 S_2 和 S_3 与地应力 S_H 、 S_h 和 S_r 重合的假设难以完全成立,部分压裂缝的倾斜现象也说明了这一点。因此,若以上述结果代表坝址区地基岩体内的主应力方向还可以接受,而代表区域地壳应力场方向则有些勉强。

这里我们可以引用一下龙羊峡附近其它电站的原地应力测量结果。以套芯应力解除法在李家峡电站测得的二维与三维结果均表明最大主应力方向在 $NE60^{\circ}$ 左右⁽¹¹⁾。在拉西瓦电站测得的二维结果表明其 S_H 方向NE。以水压致裂法在该电站一二百米深的钻孔测出的 S_H 方向也是NE向。据此,我们似乎又可以认为本地区的 S_H 方向以NE为主。

龙羊峡地区新构造运动较为强烈,伴随有较活跃的地震活动。我们收集了青海地区部分本级以上地震的震源机制解资料,将其按P轴方向的展布绘入图6⁽²⁾。这些地震均发生于4.5世纪三十年代以后,震源都在地壳内,最深达50公里,震级最小4.6级,最大7.7级,P轴

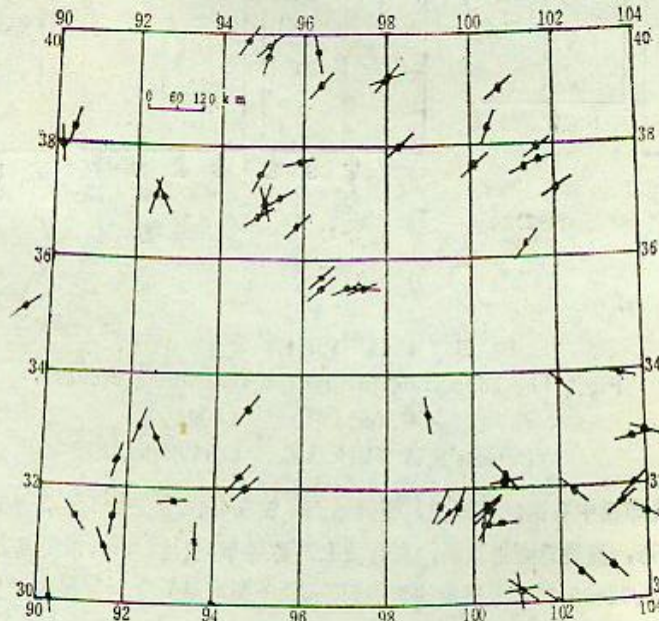


图6 青海地区部分中、强地震P轴方位展布图

Fig.6 The distributions of the P-axis orientations of parts of middle--strong earthquakes in Qinghai province

展布以NE向为主,平均约 $N47^{\circ}E$ 。

综上所述,龙羊峡地区构造应力场的主压应力方向在地壳浅部变化较大,多受局部地貌

(2)兰州地震局,龙羊峡地区地震烈度评定报告,1985

特点和断层活动方式控制, 坝址区为近南北向, 附近其它地区则可为NE向, 但是地壳深部的主压应力方向则表现为NNE-NE, 少数近南北。总体上看呈NE向展布。这可与更大区域的构造应力场统一起来, 其力源显然应该来自印度板块向北插入欧亚板块而产生的强大推挤力。

五、几个与应力测量结果有关问题的讨论

1. 水平主应力与最大剪应力随高程的变化

这里, 我们将四个钻孔统一在高程的尺度下, 分析应力随高程降低所表现的规律, 应力值已列于表1(图7)。

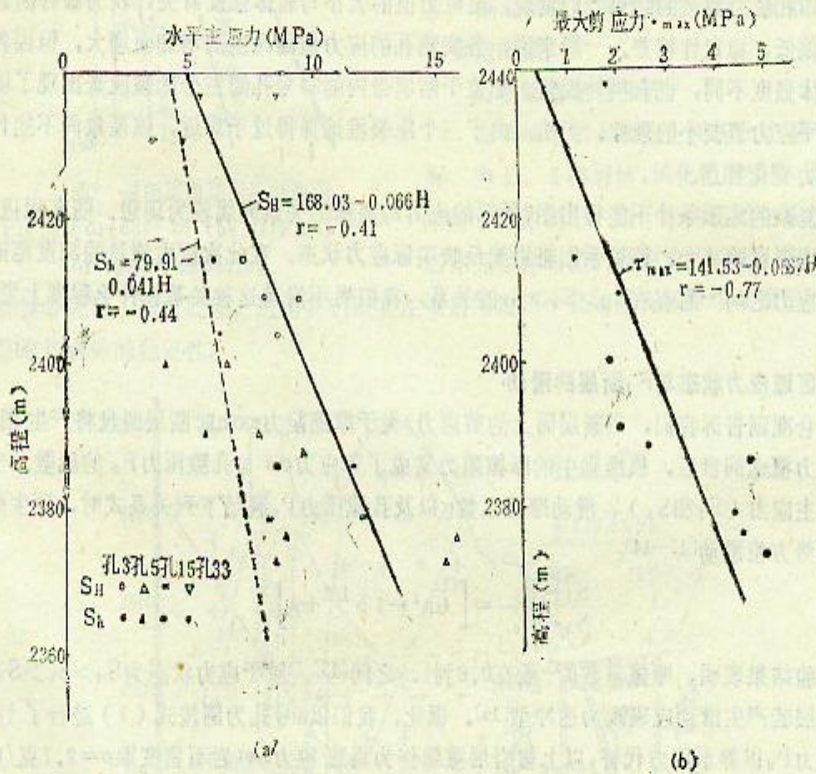


图7 应力值随高程的变化

Fig.7 The changes of stress values with elevation

(a)水平主应力 (b)最大剪应力

(a)horizontal principal Stresses S_H and S_h

(b)maximum shear stress τ_{max}

图7-a显示出随海拔高程的降低水平主应力值有增加的趋势。这种趋势与平原地区有所不同, 它具体表现在相关系数上。平原区主应力与深度呈正相关, 相关系数在0.85以上, 相关性显著。然而在本区, 由于地形复杂, 应力测量点又分布在不同地貌单元, 从而很难找出理想关系式来表示其他应力值随深度变化的规律。在此次测量中除5号孔外, 即使是在同一钻孔内, 因几个测量段所占的孔段长度远小于整个孔的有效深度, 故也很难得出某一个孔周

围应力与深度的关系。因此,我们反做了地应力值随高程降低而变化的回归计算(计算时未采用33号孔最顶部压裂段的应力值),式(2)为回归关系式。

$$\begin{cases} S_H = 168.03 - 0.066H \\ S_h = 79.91 - 0.041H \end{cases} \quad (2)$$

深度与应力值成正比,高程则应与应力值成反比,所以式(2)中高程H的系数为负,相应的相关系数也应为负,其中 S_H 与H的相关系数 $r = -0.44$, S_h 与H的相关系数 $r = -0.41$ 。可见,相关性均不十分理想,尚未能达0.5,故式(2)只是反映了水平主应力随高程降低的大致规律。

图7-b为最大剪应力 τ_{max} 随高程的变化,随高程的降低 τ_{max} 也有增大的趋势,其线性回归关系式为 $\tau_{max} = 141.35 - 0.058H$,相关系数 $r = -0.77$,其相关性比较显著。

从四孔应力测量的结果我们发现,地应力值的大小与岩体强度有关,较为破碎的岩体地应力值偏低,稳定性较差。一般来说,各实测孔的应力值随深度的增加而增大,但因各压裂段的岩体强度不同,也有例外现象。如位于断层带内的33号孔的三个压裂段竟出现了随深度加大水平应力值变小的现象。当然,由于三个压裂段选择得过于靠近,该现象尚不能代表全孔的应力变化特点。

在复杂的地形条件下能得出图7所示的应力与高程的关系尚属较为理想。随高程进一步降低,地形影响减小,该关系图将更能反映实际应力状态。在此次应力测量的深度范围内,三向主应力之间一直存在 $S_H > S_h > S_v$ 的关系,我们尚不清楚这种关系在什么程度上发生转变。

2. 区域应力状态与F₇断层的滑动

库仑准则告诉我们,当断层面上剪应力 τ 大于摩擦阻力 $\mu\sigma_n$ 时断层两盘将产生滑动。有效应力概念问世后,该准则中的摩擦阻力又成了正应力 σ_n 与孔隙压力 P_0 的函数。当最大和最小主应力(S_1 和 S_3)、滑动摩擦系数 μ 以及孔隙压力 P_0 满足下列关系式时,原生断层将沿其优势方位滑动^[12-14]:

$$\frac{S_1 - P_0}{S_3 - P_0} = \left[(\mu^2 - 1)^{1/2} + \mu \right]^2 \quad (3)$$

实验结果表明,摩擦系数 μ 一般在0.6到1.0之间^[15]。对于应力状态为 $S_H > S_h > S_v$ 的地区,断层若产生滑动应表现为逆冲型^[16]。据此,我们以5号孔为例按式(3)进行了计算。孔隙压力 P_0 以静水压力代替,以上覆岩层重量作为垂直应力 S_v (岩石密度取 $\rho = 2.7$ 克/厘米³) (图8)。实际测量出的 S_H 值若进入了图8中逆断层区,则认为该实测值所在深度上可能会产生逆断层滑动。对本区岩石的力学实验得出摩擦系数均在0.6—1.0之间。⁽¹⁾所以在该孔测量深度范围内的原生断层将以逆冲型滑动为主。若考虑 S_h ,断层滑动将是逆走滑型。

F₇断层系是坝址区的主要断裂,它又被称为北大山水沟断裂。该断裂沿坝址下游的北大山水沟展布,是一条走向N10°W,倾向NE,出露长达15km的继承性复活断裂。在近期以来,F₇断层系中的F₇₋₁、F₇₋₂和F₇₋₃曾多次活动,迄今是否仍在继续对大坝的稳定至关重要,这次应力测量的主要目的就是要解决这一问题。图9展示了3号、5号和15号孔所在剖面的位置和钻进总深度,并在钻孔两侧画出了 S_H 和 τ_{max} 的大小以及 S_H 的方向。距F₇断层约250m的3号孔附近 S_H 值偏低,不超过9兆帕, τ_{max} 值更低,小于2MPa; S_H 方向也较稳定,为NNW向。然而,离F₇断层带较近的5号孔则大不相同。随深度增加应力值迅速上升, S_H 值最

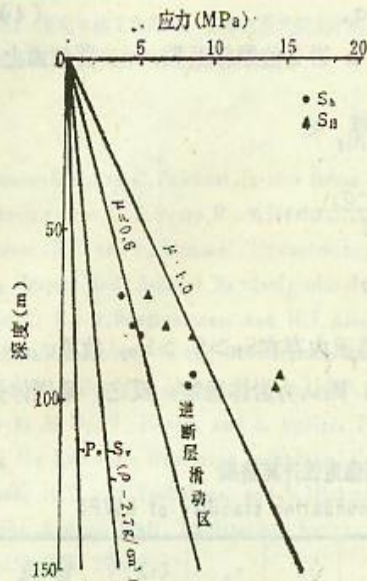


图8 逆断层滑动深度预测图
Fig.8 Forecast of the slip depth of thrust faulting

高达14.87MPa, $\tau_{m,x}$ 也达4.42MPa, 这一现象应引起重视. 15号孔居 F_{7-1} 与 F_{7-3} 之间, 其应力值略低于5号孔, S_H 最大值达13.15MPa, $\tau_{m,x}$ 达4.54MPa. 该孔的 S_H 方向为 $N64^\circ W$, 这与前两孔差别较大, 可能是受断层影响的结果. 不过, 我们发现从3号、5号到15号孔, 随着与断层 F_7 距离的缩小, S_H 的方向由 NE 转至 NNW 和 NW 这显然在一定程度上, 受断层的影响. 由此可见, 坝址区的 S_H 方向近南北. 而深部主压应力方向为 NE (据震源机制解), 若 F_7 断层活动, 其浅部应为逆走滑型, 深部为右旋走滑型.

3. 坝址稳定性分析

龙羊峡电站大坝的主坝部分地基完整性好, 为I、II类岩体, 风化程度微弱, 而坝肩则深插于距地表三、四十米的弱风化基岩上, 其岩体完整性略差. 断裂较为发育. 施工中已对原生断裂带进行了灌浆处理, 这里我们以在左坝肩附近四个孔的应力测量结果简单计算一下较完整地基岩体的稳定性.

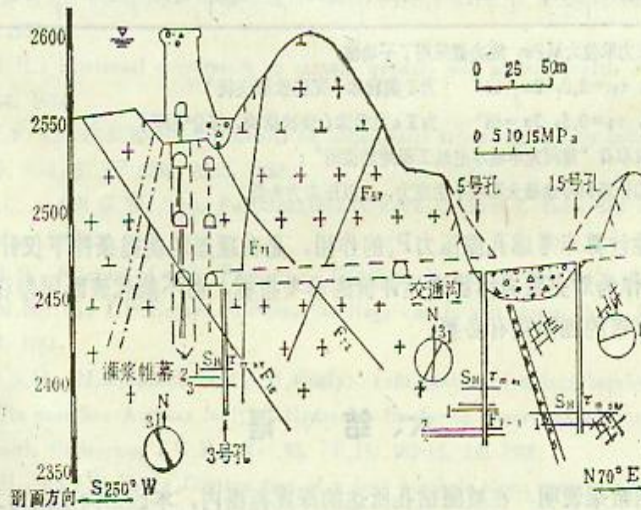


图9 龙羊峡大坝原地应力测量地质剖面图
Fig.9 A geological profile of in-situ stress measurements in Longyangxia dam area

岩体稳定性问题的实质就是在现有应力状态下岩体能否失稳. 岩体失稳通常以剪破裂或张破裂形式出现. 由于此次实测结果为压应力, 故若失稳将会出现剪破裂.

决定岩体内部是否会发生剪破裂的条件为: (1) 抗剪应力的大小; (2) 剪切面上正应力大小. 破裂的形成服从库仑剪切破裂准则, 其表达式为:

$$[\tau] = \tau_0 - \mu \sigma_n \quad (4)$$

式中 $[\tau]$ —临界失稳剪应力, τ_0 —岩体的内聚力, μ —岩石的摩擦系数, σ_n —剪切面上的正应力。

剪切面上的正应力 σ_n 和剪应力 τ_n 可由下式求出:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha \\ \tau_n &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $2\alpha = 90^\circ - \arctg \mu$ 。在本区实测应力的深度范围内存在 $S_H > S_h > S_V$, 故取 $\sigma_1 = S_H$, $\sigma_2 = S_V$ 。最终以 τ_n 与 $[\tau]$ 进行比较, 若 $\tau_n < [\tau]$, 则认为岩体稳定; 反之, 则岩体失稳。计算结果见表2。

表2 龙羊峡电站坝基稳定性计算结果

Tab.2 Calculated results of dam foundation stability of LWPS

钻孔号	深度 (m)	μ	τ_0	2α	S_H	S_V	σ_n	τ_n	$[\tau]$	稳定性
3#	48-60	1.0	2.0	45°	7.82	4.54	-7.92	1.16	9.92	$\tau_n \ll [\tau]$ 稳定
5#-1	68-82	0.9	0.5	48°	7.21	3.8	-6.45	1.27	6.31	$\tau_n \ll [\tau]$ 稳定
5#-2	92-94	0.9	0.5	48°	14.61	6.25	-13.23	3.11	12.41	$\tau_n \ll [\tau]$ 稳定
15#	86-95	0.9	0.5	48°	11.57	2.35	-10.04	3.43	9.54	$\tau_n \ll [\tau]$ 稳定
33#	84-99	0.9	0.5	48°	5.65	3.75	-5.97	0.71	5.87	$\tau_n \ll [\tau]$ 稳定

注: (1)表2中应力单位为MPa, 应力值采用了平均值;

(2) $\mu=1.0$, $\tau_0=2.0$, $2\alpha=45^\circ$ 为I类岩体(完整致密块状)

$\mu=0.9$, $\tau_0=0.5$, $2\alpha=48^\circ$ 为II类岩体(块状结构, 部分破碎)

上述参数取自“黄河龙羊峡水电站工程地质说明”;

(3)正应力的计算只考虑最大和最小主应力, 且以压应力为负。

上述的稳定性计算未考虑孔隙压力 P_0 的作用, 是在理想的前提条件下仅针对完整岩体的, 故表2结果仅作为对完整岩体稳定性评价的参考指标, 而不能代表断层带和软弱岩体。所以, 对坝区断层带的加固很有必要。

六、结 语

此次应力实测结果表明, 在被测钻孔所达的深度范围内, 本区三向主应力之间存在 $S_H > S_h > S_V$ 的关系, 其中 S_H 的方位近南北, 而区域主压应力场方向为 NNE—NE。水平主应力和最大剪应力值随高程的降低大致呈线性递增。坝址区附近较完整岩体将基本处于稳定状态, 而 F₁ 断层带则有活动的趋势, 将表现为浅部逆走滑、深部右旋走滑错动。

由于本区的地形条件复杂, 此次实测钻孔深度略嫌浅, 且又集中于黄河左岸坝肩部位, 如若要全面掌握龙羊峡电站坝址区的应力状态和 F₁ 断层较深部的活动特性, 还应进行深度在 300 米以上钻孔的应力测量以排除地形过于起伏所造成的影响。同时, 右岸也应补充一些应力测量工作。

致谢: 在龙羊峡工作期间, 曾得到西北院龙羊峡地质组的晏鸿图、吴倚坤和张钊等同志的热情帮助, 本所丁旭初、施兆贤同志参加了初期筹备工作, 在此深表谢意。

参 考 文 献

- (1) Haimson, B.C. and C. Fairhurst, In situ stress determinations at great depth by means of hydraulic fracturing, *proc. U.S. Symp. Rock. Mech.*, 11th, PP.559-584, 1970
- (2) Haimson, B.C. and F. Rummel, Hydrofracturing stress measurements in the Iceland Research drilling Project drill hole at Reydarfjordur, Iceland, *J.G.R.*, Vol.87, PP.6631-6649, 1982.
- (3) Rummel, F., J. Baumgartner, and H.J. Alfeid, Hydraulic fracturing stress measurements along the eastern boundary of the SW-German block, in *Hydraulic Fracturing Stress Measurements*, edited by M.D. Zoback and B.C. Haimson, PP.3-17, National Academy Press, Washington, D.C., 1983.
- (4) Zoback, M.D., J. Healy, and J. Roller, Preliminary stress measurements in central California using the hydraulic fracturing technique, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.115, PP.135-152, 1977.
- (5) Zoback, M.D., H. Tsukahara, and S. Hickman, Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andreas fault: Implications for the magnitude of shear stress at depth, *J.G.R.*, Vol.85, PP.6157-6173, 1980.
- (6) 李方全等, 唐山地区深部应力测量, *华北地震科学*, 1985; 3(3)
- (7) 李方全等, 四川西部水压致裂深部应力测量, 地壳构造与地壳应力文集(2), 地震出版社, 1988.
- (8) Haimson, B.C., The hydrofracturing stress measuring method and recent field results, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol 15, 1978.
- (9) 李方全, 浅谈水压致裂法, *地震战线*, No.6, 1980,
- (10) 丁健民, 梁国平, 唐山, 天津和沧州地区的油井水力压裂应力测量, *地震学报*, 1985; 7: 363-337
- (11) 丁旭初等, 黄河上游某水电站地应力测量及地下厂房设计中有关问题的研究, 地壳构造与地壳应力文集(2), 地震出版社, 1988.
- (12) Sibson, R.H., Frictional constraints on thrust, wrench, and normal faults, *Nature*, Vol.249, PP.542-544, 1974.
- (13) Brace, W.F. and D.L. Kohlstedt, Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments, *J.G.R.* Vol.85, PP.6248, 6252, 1980.
- (14) Jaeger, J.C. and N.G.W. Cook, *Fundamentals of Rock Mechanics*, 2nd., 585 PP., Chapman and Hall, London, 1976.
- (15) Byerlee, J.D., Friction of rock, *Pure Appl. Geophys.* Vol.116, PP.615-626, 1978.
- (16) Zoback, M.D., and J.H. Healy, Friction, faulting, and in situ stress, *Ann. Geophys.*, Vol.2, PP.689-698. 1984.
- (17) Hickman, S.H., M.D. Zoback, and J.H. Healy, continuation of a deep borehole stress measurement profile near San Andreas fault—1. Hydraulic fracturing stress measurements at Hi Vista, Mojave Desert, California, *J.G.R.*, Vol.93, PP.15, 183-15, 195 1988.
- (18) Stock, J.H. and J.H. Healy, Continuation of a deep borehole stress measurement profile near the San Andreas Fault—2. Hydraulic fracturing stress measurements at Black Butter, Mojave Desert, California, *J.G.R.*, Vol.93, PP.15, 196-15, 206, 1988.

Hydraulic Fracturing Stress Measurements at the Longyangxia Water-Power Station

Gao Jianli Ding Jianmin Liang Guoping Guo Qiliang

(*Institute of Crustal Dynamics S.S.B. Beijing 100085*)

Abstract

We have measured in-situ stresses in four near 100 meter depth boreholes located at the left dam shoulder of the Longyangxia water-power station of the upper Yellow River using a set of portable hydro-fracturing stress measurement equipments. The results of measurements show that the relations between three principal stresses are $S_H > S_h > S_v$ within measuring depths, and the values of the horizontal principal stresses (S_H and S_h) and the maximum shear stress (t_{max}) will increase with the reduction of elevation. From the impressions of hydro-fracturing cracks we find that the orientations of S_H are near S-N. The recent tectonic stress field in this region is very complex. The S_H orientation may be NE to NNE in the depths and near S-N to NE at the shallows. Under recent tectonic stress field, fault F_7 is able to be active. The type of faulting may be thrust at the shallows and right strike-slip at the depth. The calculation results about rock stability round four boreholes of measuring stress prove that the rock mass under the major dam as well as its shoulder which is integrated or is of few pre-existed, is almost stable.