

南水北调西线第一期工程调水区 水压致裂地应力测量及其工程意义

彭 华¹, 崔 巍², 马秀敏¹, 李金锁¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国华水水电开发总公司, 北京 100054)

摘 要: 本文介绍了水压致裂地应力测量原理和方法及其在南水北调西线工程中的应用。在调水工程沿线测得主应力大小、方向, 并分析了其相互关系和分布规律。结果表明现今地壳应力场水平主应力占主导地位, 属逆断层状态, 且 $\sigma_{H_{\max}}/\sigma_v$ 较大, 属于构造影响强烈地区, 主压应力方向总体呈 NE 向, 与区域构造线呈锐角相交, 是造成区域大多数断裂压扭左行运动的主要动力。进一步分析了深埋隧道发生岩爆灾害的可能性, 为南水北调西线工程各引水线路的优化设计和隧道灾害防治提供了可靠资料。

关键词: 地应力; 水压致裂地应力测量; 岩爆; 南水北调

中图分类号: TU457

文献标识码: A

0 前言

南水北调西线工程从通天河、雅砻江、大渡河三条河流引水到黄河, 是我国在西部地区规划的巨型跨流域水利工程。计划第一期工程达-贾线, 由甘孜州的仁达引雅砻江支流、鲜水河、达曲、泥曲及大渡河支流麻尔曲、杜柯河水到黄河支流贾曲, 输水线路长 260.3km, 其中隧道长度 244.1km, 工程主体由 5 个水库和 7 个首尾相连的特长深埋隧道组成。线路穿越巴颜喀拉褶皱带不同的地质单元和活性极强的断裂、地震带, 这些断裂运动速率较快, 第四系以来呈现间歇性整体隆起, 地震活动频繁, 地应力高度集中, 地壳稳定性问题十分突出, 复杂地质环境对工程将是一个严峻的考验。

为了解工程区地应力的赋存状态和基本特征, 分析隧道开挖过程中发生诸如岩爆等地质灾害的可能性, 以及为隧道的衬砌设计、断面选择以及轴线方位的确定和工程线路区域地壳稳定性评价提供必要的参数, 在调水线路沿线的 7 个专用钻孔中, 作者采用水压致裂方法进行了翔实原地应力测量^①。

收稿日期: 2006-03-12

基金项目: 中国地质调查局“南水北调西线第一期工程地壳稳定性调查与评价”(编号: 200113000092)项目成果。

作者简介: 彭华 (1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事地应力测量、地质灾害、围岩稳定性和岩石力学与工程施工等方面的研究工作, E-mail: penghuahgs2005@yahoo.com.cn。

① 彭华, 南水北调西线第一期工程区地壳稳定性调查研究报告, 地质力学研究所, 2003。

1 水压致裂原地应力测量原理

水压致裂法地应力测量是70年代发展起来的能够测量地壳深部应力可靠而有效的方法^[1-2]。该方法是1987年国际岩石力学学会试验方法委员会颁布的确定岩石应力建议方法中所推荐的方法之一,是目前国际上能较好地直接进行深孔应力测量的先进方法,该方法无需知道岩石的力学参数就可获得地层中现今地应力的方向和大小,并具有操作简便、可在任意深度进行连续或重复测试、测量速度快、测值稳定可靠等特点^[3-5],因此近年来该方法发展很快,在国内已做过大量的工作^[4,6,7],并取得了丰硕的成果。

水压致裂原地应力测量是以弹性力学为基础^[8-9],并以下面三个假设为前提。

- (1) 岩石是线弹性和各向同性的;
- (2) 岩石是完整的,压裂液体对岩石来说是非渗透的;
- (3) 岩层中有一个主应力分量的方向与测试孔孔轴平行。

在上述理论和假设前提下,水压致裂的力学模型可简化为一个平面应变问题,根据弹性力学原理,在钻孔压裂过程中,孔壁破裂后,若继续注液增压,裂缝将向纵深处扩展。若马上停止注液增压,并保持压裂回路密闭,裂缝将停止延伸。由于地应力的作用,裂缝将迅速趋于闭合。通常把裂缝处于临界闭合状态时的平衡压力称为瞬时关闭压力 P_s ,它等于垂直裂缝面的最小水平主应力,即:

$$P_s = S_h \quad (1)$$

最大水平主应力 S_H 可由下式求得:

$$S_H = 3P_s - P_r - P_0 \quad (2)$$

岩石的原地抗张强度:

$$T_{kf} = P_b - P_r \quad (3)$$

垂直应力可根据上覆岩石的重量来计算:

$$S_v = \rho g d \quad (4)$$

式中: P_b —压裂段的岩石被破裂压裂(MPa), P_r —裂缝重新张开的压力(MPa), T_{kf} —抗张强度(MPa), ρ —岩石密度, g —重力加速度, d —钻孔深度(m)。

2 水压致裂测试方法

水压致裂原地应力测量方法就是利用一对可膨胀的封隔器在选定的测量深度封隔一段钻孔,然后通过泵入流体对该试验段(常称压裂段)增压,同时利用数据采集器记录压力随时间的变化。通过绘图软件,可得实测记录曲线,并对记录曲线进行分析,得到特征压力参数,再根据上述的理论计算公式^[3-5],就可得到测点处的最大和最小水平主应力的量值以及岩石的水压致裂抗张强度等岩石力学参数。

测试系统如图1所示,是由地质力学所研制的双回路水压致裂应力测量系统。所谓双回路,就是用两个独立的加压系统通过高压油管,分别向封隔段和试验段加压。其特点是在测量过程中,可同时观察封隔器和试验段内的压力变化,一旦发现封隔段座封压力不够或封隔器密封不好时,就可随时进行补压,为测量数据的可靠性提供了保证。

3 地应力方向的确定方法

钻孔压裂裂缝的展布方向就是最大水平主压应力的方向,用印模的方法测定。测量仪器由自动定向仪和印模器组成。在封隔段压裂之后即可进行裂缝方位的测定,印模器可直接把孔壁上的裂缝痕迹印下来。印模器从外观看,与封隔器大致相同,所不同的是,它的表层覆盖着一层半硫化橡胶。测定方位时,先将接有定向仪的印模器放到测量段的深度,然后在地面通过增压系统将印模器膨胀。为了获得清晰的裂缝痕迹,需要施加足够的高压,促使孔壁已有裂缝重新张开以便

半硫化橡胶挤入,并保持相应的时间,印模器表面就印制了与裂缝相对应的凸起印迹。

待保压时间结束后,卸掉印模器的压力并将其提出钻孔。在印模器下方的定向器中装有罗盘,红外线摄像机通过铠装电缆与地表电视机相连,通过电视机可直接读出印模器的基线方位角。同时用透明塑料薄膜将印模器围起,绘下印模器表面凸起的印痕和基线标志,然后利用基线方位即可算出所测破裂面的方向,也就是最大水平主压应力的方向。

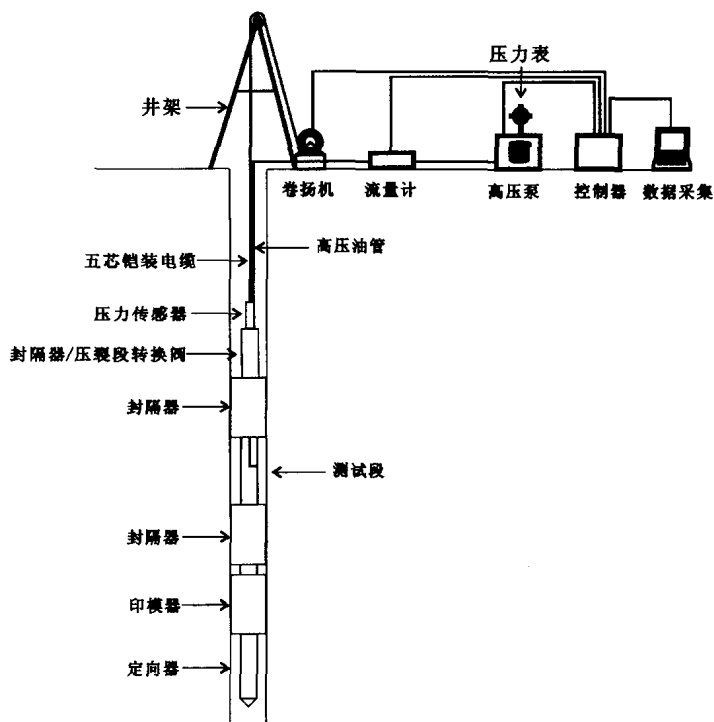


图1 水压致裂地应力测量系统原理图

Fig.1 Principle for the hydrofracturing in-situ stress measurement system

4 工程区地应力测试结果及分析

4.1 测点选择

南水北调西线工程区的原地应力测试点的选择,主要是根据线路工程的分布及所处的地质构造位置,尽量靠近坝址、隧道进出口等重点工程部位,且又有适合钻孔施工的场地、水源条件。在上述的条件下,确定了7个地应力测量点,它们是:阿坝南钻孔(32.3m)、阿坝县第一牧场钻孔(31.5m)、甘孜绒岔寺钻孔(24.9m)、甘孜石门坎钻孔(27.6m)、色达霍西电站钻孔(25.3m)、上杜柯坝址钻孔(32.5m)、亚尔堂坝址钻孔(150m)。岩性为三叠系砂岩和板岩,测点布置见图2。

4.2 工程区实测地应力值的测试结果

工程区测试段典型压裂曲线如图3。在压裂过程中,压裂曲线破裂压力峰值明显,经过2~3个循环后,重张压力趋于稳定,后续循环重复性较好,规律性很强,说明原生裂隙的重张及扩展表现不明显,测试结果可靠(见图3(a)),但在岩石较完整段,需要两次加压才出现裂隙,见图3(b)。印模结果表明:所有测试孔压裂段产生的裂缝以竖直方向为主,

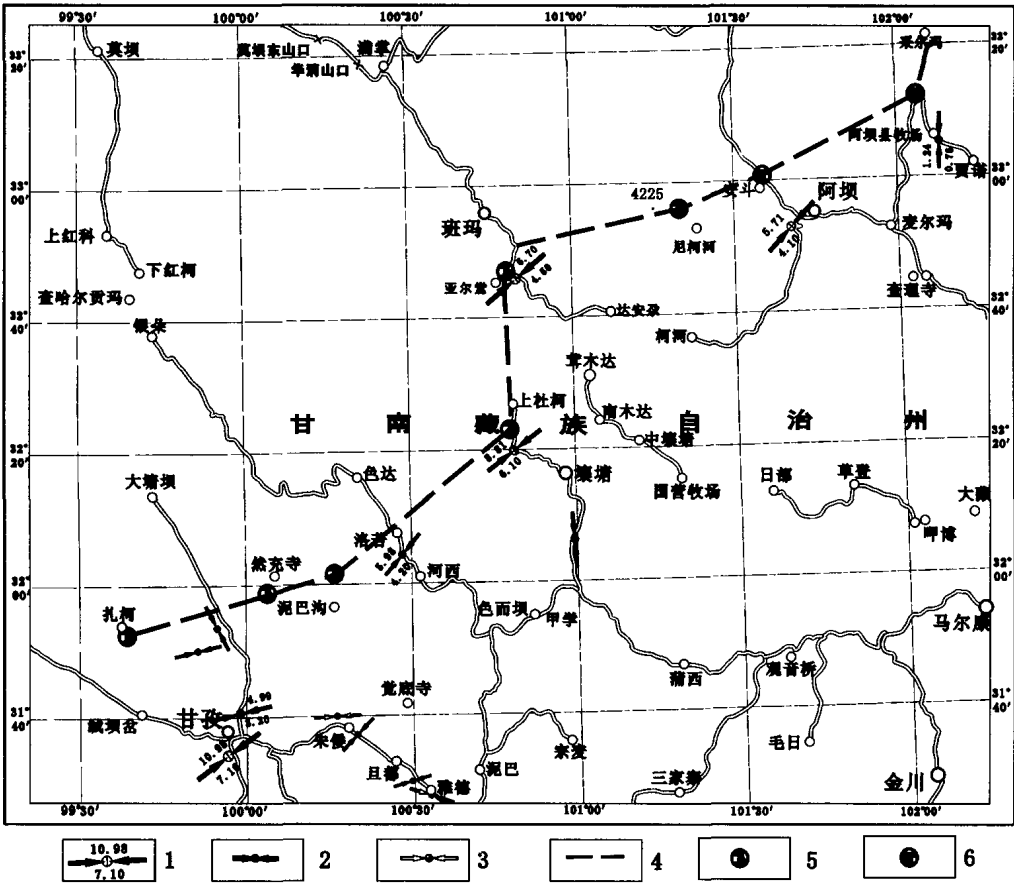


图 2 工程区地应力测点布置图

Fig.2 Layout of in-situ stress measuring sites in the work area

1. 水压致裂法地应力测点及水平最大和最小主应力值; 2. 震源机制解 P 轴方向; 3. 断层位移计算主压应力方向; 4. 调水隧道; 5. 枢纽坝址; 6. 渡槽

只有在甘孜绒岔寺测点和阿坝测点由于岩层不太完整，测段内发育有原生裂隙，在同一区域应力背景下，地应力大小明显受岩石完整程度、断裂构造的影响而差异较大。印模能清楚地观察到，同一孔内，在较完整孔段，地应力值较高；节理、裂隙发育孔段地应力值较低。

根据对测试资料的整理及计算分析，确定了各个测段的破裂压力 P_b 、裂缝重张压力 P_r 、破裂面的瞬时闭合压力 P_c 、岩层的岩石孔隙压力 P_p 以及测段岩石的原地抗拉强度 T 。根据测得的压力参数，利用上述公式计算，得到最大、最小水平主应力值 (S_H 、 S_k) 及垂直主应力值 S_v ，计算中岩石的容重取 2.70g/cm^3 。印模结果见图 4，水压致裂地应力测量结果见表 1。

4.3 地应力测试结果分析

根据水压致裂应力测量结果，在测量深度域内 (24.9 ~ 149.6m)，调水区最大水平主应力值为 1.06 ~ 12.05MPa，平均值为 6.48MPa，最小水平主应力值为 0.75 ~ 7.5MPa；平均值为 4.30MPa，铅直应力值为 0.41 ~ 1.08MPa；平均值为 0.71MPa，调水区 3 个主应力之间的关系表现为： $\sigma_{H_{\max}} > \sigma_{H_{\min}} > \sigma_v$ ，水平主应力占主导地位，属逆断层状态，且 $\sigma_{H_{\max}}/\sigma_v = 6 \sim 9$ 较大，属于构造影响强烈地区，现今地壳应力场的主压应力方向为 NE12.7° ~ NE70.1°，总体呈 NE

向, 优势方向约为 NE44.7°, 与区域构造线 (300°) 呈锐角, 造成区域大多数断裂压扭左行的扭动特征。

测试结果表明: 巴颜喀拉山不仅是工程区地理上的地貌分区界线、长江与黄河水系的分水岭, 也是一条重要的新构造分区界线, 两侧的地应力状态完全不同, 表现为以北地应力值较小, 方向偏北; 以南明显增大, 数值相差 5 ~ 10 倍, 以 NE 向为主。巴颜喀拉山以南地区在上杜柯-亚尔堂地区地应力值明显较大, 可能与该区壤塘-阳陪断裂、中壤塘-桑日麻断裂及地震活动有关。另外, 甘孜断块位于鲜水河断裂带与甘孜-玉树走滑断裂带雁行斜接复

合的拉分盆地和岩桥区, 属于低应力区, 最大主地应力方向偏东, 近 EW 向。以上结果与工程区 (即巴颜喀拉山地区) 中强地震的震源机制解的 P 轴方向、卫星影像水系信息宏观资料分析结果一致。

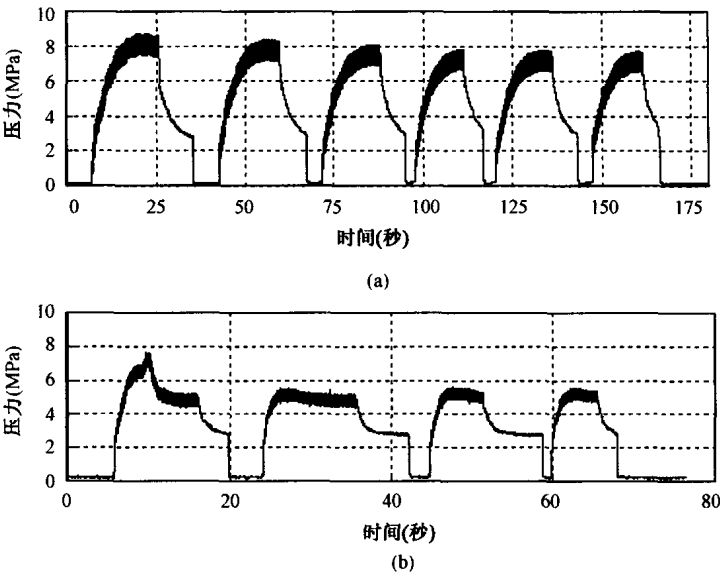


图 3 南水北调西线工程区地应力钻孔压裂典型曲线

Fig.3 Typical curve of fracturing in in-situ stress in the work area of the western line of the south-north water diversion project

a. 阿坝地应力钻孔压裂曲线; b. 甘孜绒岔寺地应力钻孔压裂曲线

表 1 工程区原地应力测量结果

Table 1 Results of in-situ stress measurements in the work area

钻孔名称	序号	测段深度 (m)	压裂参数 (MPa)					主应力值 (MPa)			破裂方位 (°)
			P_b	P_r	P_s	P_o	T	S_H	S_k	S_v	
阿坝 1-1 段	1	20.00	10.28	7.54	4.53	0.20	2.74	5.85	4.53	0.540	
阿坝 1-2 段	2	23.00	9.17	6.30	4.10	0.23	2.87	5.77	4.10	0.621	
阿坝 1-3 段	3	26.00	8.63	6.20	4.10	0.26	2.43	5.84	4.10	0.702	
阿坝 1-4 段	4	31.00	9.55	6.40	4.10	0.31	3.15	5.59	4.10	0.837	38.6
阿坝县第一牧场 2-1 段	1	25.00	3.10	0.76	0.75	0.25	2.34	1.24	0.75	0.675	
阿坝县第一牧场 2-2 段	2	30.00	3.40	0.92	0.76	0.30	2.48	1.06	0.76	0.810	12.7
甘孜绒岔寺 1 段	1	15.00	7.53	4.50	3.20	0.15	3.03	4.95	3.20	0.405	
甘孜绒岔寺 2 段	2	22.00	9.76	4.70	3.10	0.22	5.06	4.38	3.10	0.594	70.1
甘孜石门坎 1 段	1	25.00	15.74	10.20	7.50	0.25	5.54	12.05	7.50	0.675	45.5
色达霍西电站 1 段	1	22.00	11.30	6.50	4.20	0.22	4.80	5.88	4.20	0.594	34.6
上杜柯坝址 2 段	1	25.00	15.98	10.97	6.50	0.25	5.01	8.28	6.50	0.675	
上杜柯坝址 3 段	2	31.00	13.15	9.30	6.10	0.31	3.85	8.69	6.10	0.837	55.6
亚尔堂坝址 1 段	1	35.00	15.30	5.56	5.80	0.35	9.74	11.49	5.80	0.945	54.3

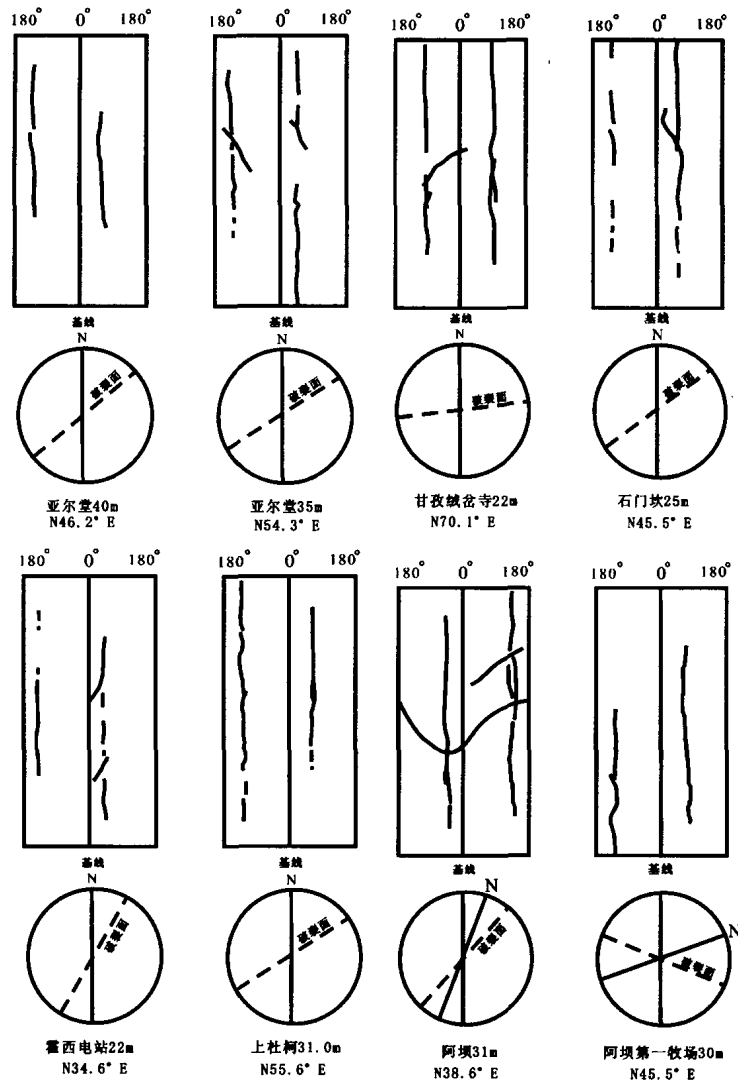


图 4 工程区原地应力测量印模图

Fig.4 Printing map of in-situ stress measurements in the work area

上（自左向右）：1. 亚尔堂第 2 段印模 2. 亚尔堂第 1 段印模 3. 甘孜绒岔寺第 2 段印模 4. 石门坎第 1 段印模
下（自左向右）：1. 霍西电站第 2 段印模 2. 上杜柯第 3 段印模 3. 阿坝第 4 段印模 4. 阿坝第一牧场第 2 段印模

从应力与深度的关系看，应力随深度变化有增加的趋势。根据测点主应力测值进行线性回归，结果如下（图 5）：

$$S_H = 4.13 + 0.0865 D \tag{5}$$

$$S_h = 2.62 + 0.0626 D \tag{6}$$

其中， D 为钻孔深度，单位为 m ；主应力单位为 MPa 。

同时，与国内其他地区测量结果相比较，工程区深埋特长隧道及坝址的上杜柯、亚尔堂地应力水平属中偏高水平。

5 主要引水线路隧洞围岩岩爆的可能性分析

5.1 岩爆的危险性

岩爆是岩体具有高地应力的一种典型的表现形式。岩体内由于开挖硐室，改变了岩体的初始应力状态，引起硐室周围应力场的重新分布^[8]。在硐室附近其地应力值可能达到初始地应力的几倍，从而导致岩爆的突发。但是，实际观测得知，高地应力并不是岩体发生岩爆的唯一条件，还与围岩储存弹性变形能的能力及围岩变形速度等因素有关^[10]。

围岩类别也和岩爆有着直接关系。一般围岩类别越高（如Ⅱ、Ⅲ类围岩），岩体越完整致密，岩体结构越呈块、层状，岩爆越易发生；相反低类别围岩，往往是应力释放地段，发生岩爆的可能性较小^[10]。由于地应力与深度成一定的比例关系，所以地下工程埋深越大，发生岩爆的概率越大。工程实例证明^[10]，埋深200m的洞室，围岩完整地段，其岩体初始应力就可能造成围岩应力集中导致岩爆。从测试结果看，调水线路洞轴线与最大主应力作用方向交角较小，可降低岩爆的烈度，对侧墙稳定相对有利。

5.2 岩爆的判据

岩爆预测是地下建筑工程地质勘察的重要任务之一，为了解决这一问题，除了研究岩爆的产生条件和发生机制以外，还需要建立定量的判别准则作为基本判断依据。从一些国家的有关岩爆发生标准的规定和在总结已有经验、研究成果的基础上，国内外已建立了多种准则。如巴顿方法、卢森岩爆判别准则、陶振宇提出的岩爆判别准则、瑞士的SIA198号岩体分级标准、Bussenes建议、Barton建议及前苏联H·A·多尔恰尼诺夫的建议和我国工程岩体分级标准、铁道部建议的岩爆划分标准等，国内应用最多的是侯发亮岩爆判别准则^[10]：

$$\sigma_{\theta} \geq (0.19 \sim 0.40) \sigma_c \tag{7}$$

其中， σ_{θ} 为围岩切向应力； σ_c 为围岩的单轴抗压强度。式中括号内的系数值需要根据围岩应力的组合状态而定，即取决于最小与最大主应力值 σ_2 、 σ_1 之比。不同围岩应力状态下岩爆的临界应力公式见表2。

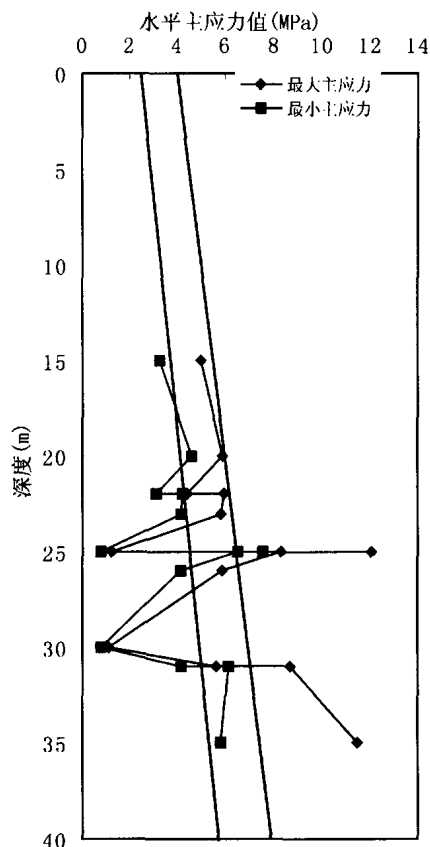


图5 工程区各钻孔水平主应力随深度变化曲线图

Fig.5 Variations of horizontal principal stress with depth in various drill holes of the work area

表2 侯发亮岩爆判别准则

Table 2 Judging criteria for rock bursts (after Hou Faliang)

A 状态	$\sigma_2/\sigma_1 = 0.00$	$\sigma_{kr} = 0.188\sigma_c$
B 状态	$\sigma_2/\sigma_1 = 0.25$	$\sigma_{kr} = 0.294\sigma_c$
C 状态	$\sigma_2/\sigma_1 = 0.50$	$\sigma_{kr} = 0.360\sigma_c$
D 状态	$\sigma_2/\sigma_1 = 0.75$	$\sigma_{kr} = 0.383\sigma_c$
E 状态	$\sigma_2/\sigma_1 = 1.00$	$\sigma_{kr} = 0.402\sigma_c$

注： σ_c 为岩石的单轴抗压强度； σ_{kr} 为发生岩爆的临界应力

5.3 岩爆分析

西线调水工程洞体深埋于山体基岩内，上覆岩体厚度为 300 ~ 900m，最大厚度近 1500m。隧道将要穿越高地应力区，通过工程岩体力学性质的测试，作为隧洞围岩的三叠系浅变质砂板岩、花岗岩、花岗闪长岩属坚硬脆性岩石，具备了储存高能量的条件。以隧洞围岩的三叠系浅变质砂板岩为例，有限元计算隧道顶、底板部位，即约 1100m 处的垂直应力 $S_v = 29.7\text{MPa}$ ，根据弹性力学的公式可以得出与隧道轴线垂直的平面内的两个主应力 $\sigma_1 = 35.36\text{MPa}$ 、 $\sigma_2 = 29.7\text{MPa}$ 。致密砂板岩单轴抗压强度 40 ~ 120MPa，属于坚硬的岩石。根据发生岩爆的临界判据，发生岩爆的临界切向应力取 $\sigma_{kr} = 0.402\sigma_c$ ，见表 2。按侯发亮岩爆判别准则属于 D 状态，其围岩表面最大切向应力大于发生岩爆的临界切向应力，在这种应力条件下，考虑到洞身部位为坚硬的三叠系板岩，工程施工时产生岩爆的可能性较大（表 3）。

表 3 判断岩爆的发生的结果

Table 3 Analytic results of rock bursts

围岩岩性	σ_c/MPa	σ_0/MPa	σ_2/σ_1	存在状态	σ_{kr}/MPa	结果	岩爆的可能性
砂板岩	40 ~ 120	76.38	0.84	D	15.35 ~ 46.04	$\sigma_\theta > \sigma_{kr}$	可能性较大

6 结论

(1) 南水北调西线第一期工程区现今地壳应力在测量深度域内（24.9 ~ 149.6m），最大水平主应力值为 1.06 ~ 12.05MPa，平均值为 6.48MPa，最小水平主应力值为 0.75 ~ 7.5MPa；平均值为 4.30MPa，铅直应力值为 0.41 ~ 1.08MPa；平均值为 0.71MPa，主压应力方向为 NE12.7° ~ NE70.1°，总体呈 NE 向，优势向约为 NE44.7°，工程区深埋特长隧道及坝址的上杜柯、亚尔堂地应力水平属中偏高水平。

(2) 工程区应力场 3 个主应力之间的关系表现为： $\sigma_{H_{\max}} > \sigma_{H_{\min}} > \sigma_v$ ，水平主应力占主导地位，反映了该区为逆断层型应力状态；且 $\sigma_{H_{\max}}/\sigma_v$ 较大，属于构造影响强烈地区。

(3) 巴颜喀拉山两侧的地应力状态完全不同，表现为以北地应力值较小，方向偏北；以南明显增大，以 NE 向为主。甘孜断块位于鲜水河断裂带与甘孜-玉树走滑断裂带雁行斜接复合的拉分盆地和岩桥区，为低应力区，最大主地应力方向为近 EW 向。以上结果与本区震源机制解得出的挤压应力方向基本一致。

(4) 岩体原地抗张强度：利用水压致裂法所测得的工程区岩体原地抗张强度为 2.34 ~ 9.74MPa。比实验室实测岩石抗张强度低，这主要经历多次构造运动，岩石节理裂隙发育造成的。

(5) 通过岩爆分析，工程施工时产生岩爆的可能性较大，为防治岩爆发生，建议南水北调西线工程各引水线路在优化过程中，应尽量避免穿越构造活动强烈的高地应力区及易发生岩爆的地段。

参 考 文 献

- [1] 李方全. 我国现今地应力状态及有关问题 [J]. 地震学报, 1986, 8 (2): 156 ~ 171.
- [2] 曾秋生. 中国地壳应力状态 [M]. 北京: 地震出版社, 1990.

- [3] 王连捷. 地应力测量及其在工程中的应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [4] 王连捷, 丁原辰, 刘琦胜, 等. 引黄隧洞地应力测量 [J]. 地质力学学报, 1996, 2 (1): 62 ~ 69.
- [5] 王连捷, KX-81 型空心包体式三轴应力计 [C]. 地质力学文集. 北京: 地质出版社, 1988 (8): 127 ~ 136.
- [6] 李方全, 刘鹏, 等. 云南丽江县团山水库 430m 深孔水压致裂地应力测量 [A]. 地壳构造与地壳应力文集 [C]. 北京: 地震出版社, 85 ~ 92.
- [7] 廖春庭. 金川矿区地应力测量与构造应力场研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- [8] E. Hoek, E. T. Brown, 岩石地下工程 [M]. 冶金工业出版社, 1986.
- [9] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术 [M]. 北京: 科技出版社, 2000.
- [10] Hou Faliang, Jia Yuru. The Relations Between Rockburst and Surrounding Rock Stress in Underground Chambers [C]. In: Proceedings of the International Symposium Engineering in Complex Rock Formations. Science Press, Beijing, China, 1986, 11: 497 ~ 505.

HYDROFRACTURING IN-SITU STRESS MEASUREMENTS OF THE WATER DIVERSION AREA IN THE FIRST STAGE OF THE SOUTH-NORTH WATER DIVERSION PROJECT (WESTERN LINE)

PENG Hua¹, CUI Wei², MA Xiu-min¹, LI Jin-suo¹

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. China Huashui Hydropower Development Corporation, Beijing 100054, China)

Abstract: This paper introduces the principle and method of hydrofracturing in-situ stress measurement and its applications in the south-north water diversion project of the western line. The magnitude and direction of the principal stress were measured along the line of the water diversion project and their mutual relation and distribution characteristics were analyzed. The results show that horizontal principal stress is dominant in the present crustal stress field, indicating a reversed fault state. Because the $H_{\max}/\sigma_v$ value is higher, the tectonic activity in the area is intense. The principal compressional stress is generally northeast-directed and intersects with the regional tectonic line at an acute angle. Therefore, it is the main dynamic force for the transpressional sinistral movement of most regional faults. Moreover, the possibility of rock bursts in the deep tunnels is analyzed. These provide reliable data for the prevention and control of hazards in tunnels and the optimized design of various diversion lines for the south-north water diversion project.

Key words: in-situ stress; hydrofracturing in-situ stress measurement; rock burst; south-north water diversion project