

西部地区地震活动与地应力研究

刘允芳, 肖本志

(长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 中国地震活动主要集中在西部地区, 随着中国对西部地区建设的投资力度逐年加大, 对该地区地震机制和地应力测量的研究越来越显得重要和紧迫。据此, 叙述了该地区地震活动与地应力的关系及其研究的现状, 主张加强深钻孔地应力测量。重点介绍了空心包体式钻孔三向应变计深钻孔地应力测量技术和方法, 同时介绍了新疆下坂地水利枢纽地应力测量成果。

关键词: 岩石力学; 西部开发; 地震活动研究; 地应力测量与研究

中图分类号: TD 311; P 315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)24-4502-07

STUDY ON SEISMIC ACTIVITY AND GEOSTRESS IN WEST CHINA

LIU Yun-fang, XIAO Ben-zhi

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The seismic activities in China are chiefly concentrated in the West Region. The study of seismic mechanism and geostress measurement in West China becomes very important while the construction investment increases rapidly in recent years. The relation between seismic activity, geostress, and their present situation of study have been recounted. The geostress measurements in deep boreholes should be strengthened; and the technique and method of geostress measurement by hollow inclusion triaxial strain gauge have been emphatically described. Meanwhile, the geostress measured results at the Xiabandi Hydraulic Project in Xinjiang Autonomous Region have been presented.

Key words: rock mechanics; development of West China; study of seismic activity; geostress measurement and study

1 引言

国家对西部地区的投资力度逐年加大, 近 3 a 来, 国家在西部地区新开工了 36 项重点工程, 投资总规模 6 000 多亿元, 如青藏铁路、西气东输、西电东送、水利枢纽、交通干线建设等关系西部地区发展全局有重大影响的工程全面展开; 一批重大项目相继开工, 基础设施建设迈出了实质性步伐。例如: 共建设和改造大型水库 30 多座, 新增公路通车里程约 5×10^4 km, 新建铁路新线 1 641 km, 复线 1 311 km, 电气化线路 1 370 km, 新建和改扩建机

场 31 个, 西电东送工程在建装机容量约 $2\,200 \times 10^4$ kW。

中国是世界地震活动较多的国家之一, 且中国地震活动主要集中在西部地区。地震发生造成重大伤亡和经济损失。地震灾害的形式主要有振动破坏和地面破坏两种。振动破坏由地震力作用直接引起建筑物的破坏, 是地震活动的主要灾害。地震力是由地震时地震波的传播而引起的地面运动, 使建筑物的地基、基础以及上部结构都发生振动而施加在建筑物的一种附加荷载。地面破坏可分为破裂破坏和地基破坏, 前者是地面出现地震断层和地裂缝而引起跨越破裂带及其附近的建筑物变形或破坏; 后

收稿日期: 2004-07-23; **修回日期:** 2004-09-21

作者简介: 刘允芳(1936-), 男, 1961年毕业于上海交通大学工程力学系固体力学专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事地应力测量以及地下洞室围岩稳定性方面的研究工作。E-mail: ckyjjs@public.wh.hb.cn.

者是地震使软土震陷、砂土液化及淤泥塑流变形等而导致地基失效。

另外,西部地区具有资源丰富,市场潜力很大的特点,如:水力、石油、煤炭等资源的开发和利用。对于地面、地下、边坡岩石工程的设计及其衬砌计算和稳定性分析,其工程所在地的地应力场资料是必不可少的。

因此,地震活动机制、地震灾害预测预报的研究和地应力测量与研究在中国西部地区将愈发显得重要。

2 地震活动与地应力状态的关系

根据对大陆板块内部地震分布与活断层关系的分析可知:硬脆性岩体、活动性地质结构带和较高地应力场是强震发生的必备条件。硬脆性岩体能积聚很大的弹性应变能,当应变能超过了其极限强度时,就会导致突然的脆性破裂,大量释放应变能而发生强烈地震。地震活动带常常与地质构造应力带密切相关,呈带状分布,并多与构造线的方向一致,其强度也与构造应力带强度有关。强震一般都发生在新的构造活动强烈的深大断裂带地应力高度集中地区。因此,地应力的测量与研究对西部地区地震活动的研究具有非常重要的意义。

地震活动呈现在岩体中地应力积聚和释放的过程。以 1976 年 7 月 28 日在河北省唐山地区发生的 7.8 级地震为例,地震前后地应力变化如表 1^[1]所示。由表 1 可知,在地震活动区,地应力的变化是相当大的,以唐山附近顺义吴雄寺观测站为例,该测点经过了一个应力积累到释放过程:震前的 1971~1973 年,最大剪应力 τ_{\max} 由 0.65 MPa 积累到 1.10 MPa;震后的 1976 年 9 月~1977 年 7 月, τ_{\max} 由 0.95 MPa 释放到 0.30 MPa。主应力方向的变化均在主震后 1 a 左右,其后便恢复到震前的状态。

唐山 7.8 级地震震发构造断层带总体走向为 NNE 向^[1]。其地震应力积累过程中的主导方向是近 EW 向。一旦地震发生,断层带移动,近 EW 向的最大主应力(压应力)迅速释放。应力释放的大小,越靠近断层带越大,越远则越小。因此主应力方向也显示出随时间而变化的现象,即靠近断裂带,偏离 EW 向的程度最大;距离越远,偏离度越小。但只要震源应力场不变,这种偏离状态不会持久,最终会恢复到近 EW 向的应力积累方向^[2]。

表 1 唐山地震期间地应力的变化^[1]

Table 1 Variation of geostresses during the seism at Tangshan^[1]

地点	测量 时间/年月	最大主应力方向		水平应力 /MPa		最大剪 应力 /MPa
		地震前	地震后	σ_1	σ_2	
唐山凤凰山	197610	近 EW	NW47°	2.5	1.7	0.40
三河弧	197610		NW69°	2.1	0.5	0.80
怀柔坟头山	197611		NW83°	4.1	1.1	1.50
	197106	NW75°		3.1	1.8	0.65
顺义吴雄寺	197301	NW73°		2.6	0.4	1.10
	197609		NW83°	3.6	1.7	0.95
	197707		NW75°	2.7	2.1	0.30
滦县 1# 孔	197608		NW84°	5.8	3.0	1.40
滦县 2# 孔	197609		NW89°	6.6	3.2	1.70

注:最大剪应力 $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2$ 。

3 西部地区的地震活动和地应力研究

中国处于欧亚大陆板块与印度洋板块、太平洋板块交接部位附近,是世界上最大的一块板内地震区。中国西部和西南部边界是地中海—喜马拉雅山地震活动带所经过的地方,是亚欧大陆上最主要的地震带。在西部地区,印度洋板块向北推挤造成强大的近南北向主压应力,北边又盘踞着坚硬的西伯利亚地块,使这一地区产生了一系列巨大的活动断裂,现代构造活动强烈而复杂,因此地震活动的强度大而频度高。地震活动主要集中在沿强烈隆起的青藏高原四周、横断山脉、天山南北麓、祁连山一带,属于强烈构造应力区,包括西藏、新疆、甘肃、青海、云南、宁夏、四川西部等地区。

西部地区的地震灾害常有发生,2003 年是中国西部地区发生地震灾害最频繁的一年,震级 5 级以上的地震就有 12 次之多,造成重大人员伤亡和经济损失。发生地震的省、自治区有:新疆、青海、云南、内蒙古、四川、甘肃等及中、俄、蒙交界处,且有的是在 1 a 内在同一地区相继发生 2 次地震。例如:2003 年 7 月 21 日 23 时 16 分在云南省楚雄彝族自治州大姚县(震中位置为:北纬 26.0°,东经 101.2°,距大姚县城约 30 km 的县华乡)发生 6.2 级地震。仅隔近 3 个月(2003 年 10 月 16 日 20 时 28 分),又发生 6.1 级地震;在新疆维吾尔自治区巴楚—伽师地区一年内也相继发生 2 次地震(将在节 5 介绍)。

西部地区地震活动的强度和频度与其所处构造应力带关系密切,受现代构造应力场所控制,但地应力实测资料却较少。在西藏、新疆、青海等省份的广大地区,地应力实测资料几乎空白。西部地区地应力状态与东部地区大不相同,东部地区地应力值较低,一般深度在 300 m 上,最大主应力为 10 MPa,如唐山地区,深度在 300 m 上的最大主应力为 8 MPa,三峡工程的永久船闸地区,深度在 100 m 上的最大主应力为 10 MPa;而西部地区地应力值较高,是中国的高地应力地区,如甘肃金川矿区在深度 500 m 上最大主应力超过 30 MPa,四川二滩电站河谷地区,在深度 40.5 m 上最大主应力为 65.9 MPa。因此,近 30 多年来在西部兴建的拉西瓦、李家峡、二滩、天生桥、鲁布格等水电工程及甘肃金川镍矿地下采掘都曾遇到了高地应力问题。有的在勘探钻孔中出现饼状岩芯,有的在开挖过程中发生岩爆或边坡崩塌等现象^[3]。

4 空心包体式钻孔三向应变计深钻孔地应力测量技术

地震活动机制的研究及地震灾害的预测预报,必须在地质构造断层带的关键部位建立地震台站及其网络系统,同时也必须在地震活动带和地质构造应力带周围岩体进行地应力测量,然后在计算机上进行数值模拟计算。研究地震活动机制,地应力测量必须达到一定深度。在深钻孔地应力测量中,水压致裂测量法是最优秀和简捷的,但是只能实测得到钻孔横截面上二维应力状态,这里不再赘赘。本文介绍空心包体式钻孔三向应变计深钻孔地应力测量技术,作为水压致裂测量法的一种补充和相互印证的手段。

空心包体式钻孔三向应变计的制作,是先将 3 个应变丛沿圆周间隔 120° 分布粘贴在薄的环氧树脂圆筒上,应变片接线完成后在外层再浇注一层薄的环氧树脂层,把应变丛完全嵌固在环氧树脂层中。安装时,环氧树脂粘结剂由应变计的胶室通过排胶孔排出,充填了应变计与钻孔岩壁的空隙。由于应变计的测量元件电阻应变片嵌固在环氧树脂层中,安装过程中测量引线不受拽拉,安装容易成功,实测数据也不会丢失。另外,由于相对增加了被解除的中空岩芯的岩壁厚度,不易在套钻解除过程中断裂。因此,这种应变计比较容易取得地应力实测资料,测量成功率较高,也能适应地质条件相对较差、

裂隙较多的岩体中进行测量。由于其突出优点,在国内外得到广泛应用。

1997 年长江科学院根据澳大利亚 CSIRO 型空心包体式钻孔三向应变计优点,研制了 CKX-97 型空心包体式钻孔三向应变计,已经在多个工程中进行测量,取得了很多成功的经验。2001 年,对此应变计又重新进行改进,使其在测量时能做到真正的空心,改进后的应变计命名为 CKX-01 型空心包体式钻孔三向应变计。采用 CKX-01 型空心包体式钻孔三向应变计进行深钻孔地应力测量,在测量前对应变计的内部结构进行改造。在其胶室中装一排水管,测量时将 CKT-1 型水下粘结剂注满胶室,当应变计送入被测位置后,推动胶室活塞,粘结剂由排胶孔排出;同时将应变计与岩壁之间孔隙的积水挤入排水管排出,最后水下粘结剂充满此孔隙。待粘结剂完全固化后,即可进行套钻解除和测量。在深钻孔地应力测量时,应变计是借助于瑞典的深钻孔水下三向应变计的安装器来完成其安装和测量工作的。2001 年 8~12 月在广东惠州抽水蓄能电站的地下厂房、引水系统浅埋段,采用这类应变计进行深钻孔地应力测量,最深测量深度已达 365 m,创国内套芯应力解除法地应力测量的最深记录^[4]。CKX-01 型空心包体式钻孔三向应变计结构示意图如图 1 所示。

CKX-01 型空心包体式钻孔三向应变计布设了 3 个等间距应变丛,序号用 i 表示,对应的极角为 θ_i ;每个应变丛由 4 个应变片组成,序号用 j 表示,对应的角度为 φ_{ij} 。根据应变观测值 ε_k 与岩体应力状态的关系,可得到下列观测值的表达式^[5]为

$$E\varepsilon_k = A_{k1}\sigma_x + A_{k2}\sigma_y + A_{k3}\sigma_z + A_{k4}\tau_{xy} + A_{k5}\tau_{yz} + A_{k6}\tau_{zx} \quad (k = 3(i-1) + j, i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} A_{k1} &= [K_1 + \mu - 2(1 - \mu^2)K_2 \cos 2\theta_i] \sin^2 \varphi_{ij} - \mu \\ A_{k2} &= [K_1 + \mu + 2(1 - \mu^2)K_2 \cos 2\theta_i] \sin^2 \varphi_{ij} - \mu \\ A_{k3} &= 1 - (1 + \mu K_4) \sin^2 \varphi_{ij} \\ A_{k4} &= -4(1 - \mu^2)K_2 \sin^2 \varphi_{ij} \sin 2\theta_i \\ A_{k5} &= 2(1 + \mu)K_3 \sin 2\varphi_{ij} \cos \theta_i \\ A_{k6} &= -2(1 + \mu)K_3 \sin 2\varphi_{ij} \sin \theta_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: K_1, K_2, K_3, K_4 均为修正系数,是根据钻孔半径 R 、应变计内半径 R_1 、应变片嵌固部位半

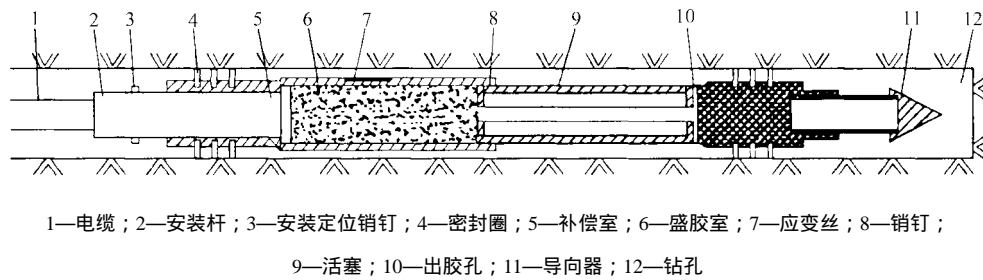


图 1 CKX-01 型空心包体式钻孔三向应变计结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of CKX-01 hollow inclusion triaxial gauge

径 ρ 、围岩的弹性模量 E 、泊松比 μ 和环氧树脂层的弹性模量 E_1 、泊松比 μ_1 计算确定，且有

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= d_1(1 - \mu\mu_1)(1 - 2\mu_1 + R_1^2 / \rho^2) + \mu\mu_1 \\ K_2 &= (1 - \mu_1)d_2\rho^2 + d_3 + d_4\mu_1 / \rho^2 + d_5 / \rho^4 \\ K_3 &= d_6(1 + R_1^2 / \rho^2) \\ K_4 &= [\mu_1 - (\mu_1 - \mu)d_1(1 - 2\mu_1 + R_1^2 / \rho^2)] / \mu \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= 1/[1 - 2\mu_1 + m^2 + \zeta(1 - m^2)] \\ d_2 &= 12(1 - \zeta)m^2(1 - m^2)/(R^2 D) \\ d_3 &= [m^4(4m^2 - 3)(1 - \zeta) + \chi_1 + \zeta] / D \\ d_4 &= -4R_1^2[m^6(1 - \zeta) + \chi_1 + \zeta] / D \\ d_5 &= 3R_1^4[m^4(1 - \zeta) + \chi_1 + \zeta] / D \\ d_6 &= 1/[1 + m^2 + \zeta(1 - m^2)] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

且有

$$\left. \begin{aligned} D &= (1 + \chi\zeta)[\chi_1 + \zeta + (1 - \zeta)(3m^2 - 6m^4 + 4m^6)] + \\ &\quad (\chi_1 - \chi\zeta)m^2[(1 - \zeta)m^6 + (\chi_1 + \zeta)] \\ \zeta &= G_1 / G = [E_1(1 + \mu)] / [E(1 + \mu_1)] \\ m &= R_1 / R \\ \chi &= 3 - 4\mu \\ \chi_1 &= 3 - 4\mu_1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

CKX-01 型空心包体式钻孔三向应变计的一次测量可获得 12 个观测值方程，解 6 个应力分量未知量，利用最小二乘法原理解得岩体地应力的 6 个应力分量，然后解得 3 个主应力的量值及其方向^[6]。

5 新疆下坂地水利枢纽地应力测量与研究

新疆下坂地水利枢纽位于塔什库尔干河中下游。塔什库尔干河全长 298 km，流域面积 9 980 km²，属冰川融雪补给型河流。下坂地水利枢纽距塔什库尔干塔吉克自治县城 45 km，距喀什市 315 km。该

水利枢纽是以解决春旱缺水及生态补水为主，结合发电的综合利用工程。下坂地水库正常蓄水位高程 2 960 m，库容 7.85 × 10⁸ m³，装机容量为 150 MW。地下厂房长 71 m，宽 17.9 m，高 35 m，轴线方位为正北向；引水泄水隧洞的埋深较深，最大埋深达 1 400 m。

坝址区为一单斜构造的横向谷，主要由元古界变质岩及第四纪松散堆积物组成，岩层走向 300°~320°，倾向 SW(上游)，倾角 55°~70°。水库区主要位于瓦卡谷地边缘，呈“U”形，两岸山高坡陡，山峰高程约 4 300 m，相对高度 400~1 300 m，基岩裸露，其坡度在 45°以上；河谷狭窄，宽约 200~310 m，河床高程 2 899~2 860 m。坝址区断层较发育，测绘统计约有 90 条，断层依据走向可分为 4 组，其中以 NWW 向压扭性断层最为发育，破碎带宽度 0.1~5.0 m；其次为 NNE 向张性断层，破碎带宽度 0.2~1.3 m；岩体以整体块状为主，呈新鲜~微风化。

5.1 地震活动背景

新疆维吾尔自治区是中国发生地震灾害较多的省区之一，2003 年在其境内曾发生 4 次震级为 5.8~6.8 级地震，其中在喀什地区周围发生了 3 次地震。2 月 24 日 10 时 03 分在巴楚—伽师地区(距伽师县城东约 40 km)发生 6.8 级强烈地震(震中位于北纬 39.5°，东经 77.2°)，仅隔 2 个月后(5 月 4 日 23 时 44 分)，又在该地区发生 5.8 级地震。第 3 次地震是 9 月 2 日 7 时 16 分在阿克陶县境内(县城西南约 19.3 km 的布伦口乡，距塔吉克斯坦边境 25 km)发生 5.9 级地震(震中位于北纬 38°33'，东经 74°59')。伽师县和巴楚县地处天山南麓，塔尔木盆地西缘和北西缘，伽师县隶属喀什地区，县城距喀什市 65 km。

新疆伽师县和巴楚县在地中海—喜马拉雅地震带上，位于中国天山地震带的西部，是地震高活跃区。该地区历史上曾多次发生过强烈地震，如 1902

年在伽师西北方的阿图什发生 8.25 级地震,是新疆有记载以来的最强地震;1985 年伽师西边的乌恰县发生 7.4 级地震,是新中国成立以来新疆发生的最大地震。2003 年在该地区曾发生了 5.8 级和 6.8 级 2 次地震。

下坂地水利枢纽位于伽师县西南约 330 km,地处中国西部的帕米尔高原,临近地震活动带,并处于高地应力地区。

5.2 地应力测量的布局与测量方法

地应力现场测量分两期进行:2002 年 1 月和 9 月,在中坝址左坝肩的 PD7[#] 勘探平洞洞深 120 m 的 ZK 86[#] 铅垂钻孔中和右坝肩的 PD 6[#] 勘探平洞洞深 100 m 的 ZK 87[#] 铅垂钻孔中,采用水压致裂法进行地应力测量,共获得 14 个测段的二维地应力实测资料,最深测深为 67.8 m,其中 4 个测段作了破裂缝印模定向记录。2002 年 9 月~10 月,在地下厂房区的 PD13[#] 勘探平洞洞深 160 m 的丁字洞洞口两侧的 SYZK-1[#]~5[#] 的 5 个水平钻孔中,采用套钻孔应力解除法中的 CKX-01 型空心包体式钻孔三向应变计进行地应力测量,共获得 19 个测点的三维地应力实测资料,最深测深为 9.95 m (并非采用深钻孔测量)。

5.3 地应力实测成果及其分析

(1) 地下厂房区采用空心包体式钻孔三向应变计测量的实测成果

由于该应变计进行地应力测量时,应变片并非直接粘贴在钻孔岩壁上,在成果整理中首先要确定修正系数 $K_1 \sim K_4$ 。CKX-01 型空心包体式钻孔三向应变计进行地应力测量的实际尺寸和弹性常数为: $R = 18.25 \text{ mm}$, $R_1 = 15.0 \text{ mm}$, $\rho = 16.25 \text{ mm}$, $E = 45.0 \text{ GPa}$, $\mu = 0.22$, $E_1 = 3.0 \text{ GPa}$, $\mu_1 = 0.3$,根据式(3)~(5)的计算得到:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= 1.133 \ 150 \\ K_2 &= 1.158 \ 294 \\ K_3 &= 1.092 \ 121 \\ K_4 &= 0.948 \ 160 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

5 个钻孔 19 个测点的三维地应力实测资料列于表 2^[7],在表中地应力实测资料是以各钻孔的平均值给出。

(2) 左右岸坝肩采用水压致裂法测量的实测成果

2 个钻孔 14 个测段的二维地应力实测资料中有破裂缝定向记录的 4 个测段实测成果列于表 3^[7]。

分析表 2 和 3 各项数据,对地下厂房区和

表 2 地下厂房区各钻孔地应力测量实测值的平均值

Table 2 Average values of geostress measured results in various boreholes in the area of underground powerhouse MPa

钻孔号	测点数量	测点深 /m	应力分量						水平面主应力及方位角				主应力、倾角及方位角									
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}	σ_H	σ_h	$\beta_H/(^\circ)$	α_1	$\alpha_1/(^\circ)$	$\beta_1/(^\circ)$	σ_2	$\alpha_2/(^\circ)$	$\beta_2/(^\circ)$	σ_3	$\alpha_3/(^\circ)$	$\beta_3/(^\circ)$		
SYZK-1 [#]	1	9.92	6.38	9.65	5.09	-0.34	0.14	0.85	9.69	6.35	264.19	6.9	6.35	264.19	0.7	264.3	6.78	26.9	-5.3	4.65	63.1	173.0
SYZK-2 [#]	5	7.45~9.95	6.79	8.23	5.57	1.64	-0.60	-0.33	9.30	5.72	303.29	4.2	10.1	303.0	5.73	10.3	31.2	5.44	75.6	256.8		
SYZK-3 [#]	2	7.78~8.51	5.57	9.48	5.94	0.48	0.61	0.28	9.54	5.51	276.99	6.5	9.8	277.4	5.93	62.4	206.7	5.41	25.6	2.7		
SYZK-4 [#]	7	7.45~9.95	5.71	9.79	5.85	0.19	0.60	0.07	9.80	5.70	272.79	8.9	8.5	272.8	5.78	61.4	198.6	5.68	26.9	-1.6		
SYZK-5 [#]	4	7.63~9.38	5.93	9.11	6.34	-0.51	-0.77	-0.03	9.19	5.85	261.19	3.8	14.0	261.7	6.21	64.1	202.6	5.79	21.3	-		
平均值	19	7.45~9.95	6.08	9.25	5.76	0.29	-0.00	0.17	9.28	6.05	275.29	2.8	0.2	275.2	6.13	24.5	5.3	5.68	65.5	184.8		

注:(1) $\sigma_i, \alpha_i, \beta_i (i=1, 2, 3)$ 分别为大、中、小主应力的量值、倾角、方位角;(2) $\sigma_H, \sigma_h, \beta_H$ 分别为最大和最小水平主应力的量值、最大水平主应力的方位角;(3) 应力分量所采用的坐标系为地下厂房坐标系: x 轴为正北向, y 轴为正西向, z 轴为铅垂向上方向。

表 3 坝肩区有破裂缝记录的地应力测量的实测值

Table 3 Geostress measured results with fracture in the area of dam abutment MPa

孔号	孔深/m	高程/m	P_b	P_r	P_s	σ_t	σ_H	σ_h	方位角
ZH ₈₆	26.98	2 936	6.5	5.7	3.9	0.8	6.3	3.9	NE26 °
	61.14	2 902	6.6	4.6	4.1	2.0	7.7	4.1	NE27 °
ZH ₈₇	34.13	2 920	6.5	5.0	3.0	1.5	4.0	3.0	NE52 °
	56.62	2 897	6.5	5.0	4.0	1.5	7.0	4.0	NE48 °

左右岸坝肩区的地应力状态有以下几点认识：

(1) 实测成果可靠性评价：例如地下厂房区 5 个测量钻孔共 19 个测点几乎获得相一致的地应力实测资料，不同钻孔的测量成果能够得到相互印证。各钻孔实测的应力分量，最大和最小水平主应力的量值及其方向，大、中、小主应力的量值及其方向的变化幅度都不大，基本上处于同一量值水平，说明各钻孔的实测成果对地应力状态作了相一致的描述。例如：5 个钻孔实测的应力分量与其平均值相差的绝对值，正应力分量为 0.092 ~ 1.022 MPa，平均为 0.405 MPa。5 个钻孔实测的铅垂向应力分量的平均值为 5.76 MPa，略大于上覆岩体自重($\gamma H = 0.027 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3} \times 150 \text{ m} = 4.05 \text{ MPa}$)，符合一般的变化规律。

(2) 地应力的量值

地下厂房区：大主应力 σ_1 在 9.28 MPa 左右，中主应力 σ_2 在 6.13 MPa 左右，小主应力 σ_3 在 5.68 MPa 左右。

坝肩区：在测深 67 m 范围内，最大水平主应力 σ_H 左坝址为 5.1 ~ 7.7 MPa，右坝址为 3.8 ~ 8.7 MPa，最小水平主应力 σ_h 左坝址为 3.7 ~ 4.1 MPa；右坝址为 2.5 ~ 5.0 MPa，并且应力量值随深度加深而加大，都属中等应力水平。

(3) 地应力的方向

地下厂房区：大主应力呈水平向(倾角 $< 14^\circ$)，方位角近 EW 向($261.7^\circ \sim 303.0^\circ$ ，平均为 275.2°)，与最大水平主应力方向几乎一致；中主应力倾角较小($< 27^\circ$)，方位角近 NS 向(平均为 5.3°)；小主应力倾角较大($> 60^\circ$)，方位角近 EW 向(平均为 184.8°)。

坝肩区：最大水平主应力方向呈 NE 向(左坝址为 $NE26^\circ \sim 27^\circ$ ，右坝址为 $NE48^\circ \sim 52^\circ$ ，平均为 38.3°)。

地下厂房区主应力方向和坝肩区水平主应力方向与坝址区最为发育的 NWW 向压扭性断层走向和次为发育的 NNE 向张性断层走向大致一致。

(4) 地应力的状态：从地下厂房区地应力实测成果分析可知，在地应力测量范围内，大主应力的量值和最大水平主应力的量值同为 9.28 MPa，其方位角也同为 275.2° ，而铅垂向正应力分量为 5.76 MPa，侧压系数 $\lambda = 1.6$ 。因此，地下厂房区周围岩体的地应力以地质构造应力场为主导。

(5) 地应力与地下厂房稳定性的关系：由于实测地应力的中主应力方向正好与地下厂房的轴向几乎一致，因此，地下厂房横截面上，主要受水平向的大主应力(倾角 $0.7^\circ \sim 14.0^\circ$ ，平均为 0.2°)和铅垂向主应力作用，侧压系数 $\lambda = 1.6$ 。这种大主应力与地下厂房轴线相垂直的情况，对地下厂房的稳定性较为不利。由于水平向应力相对较大，可能在厂房顶拱产生拉应力区，在侧墙中部产生较大的压性应力集中。

地下厂房和坝肩两测区的实测成果，地应力量值相差不大，但地下厂房区大主应力与坝肩区最大水平主应力的方向相差较大(相差 $43^\circ \sim 69^\circ$)。这是因为水压致裂法测量钻孔地处峡谷地带，地形变化较剧烈，钻孔附近节理裂隙及断层较为发育(左坝址测量钻孔附近存在正断层 F_{61} ，走向为 $NE12^\circ$ ，右坝址测量钻孔附近存在逆断层 F_{48} ， F_{49} ，其走向为 $NW60^\circ$ ， $NW57^\circ$)，地应力受地形、地貌和断层构造的影响较大。因此，上述水压致裂法测量成果仅适用于两岸坝肩部分地区。

5.4 对地震活动研究的期望

新疆下坂地水利枢纽地应力测量，是针对工程建设服务的一个项目，是为了工程地下洞室的优化设计及其稳定性评价、有压隧洞的支护设计等目的服务的。并不是针对地震机制研究的项目。由于该地区地形起伏变化较大，最低深谷高程为 2 742 m，最高山脊高程为 4 700 m，最大高差近 2 000 m。可是地应力测量最深测点的高程，在左右坝肩采用水压致裂法测量的 2 个钻孔为 2 886 m，远远不及侵蚀基准面高程；在地下厂房区采用应力解除法测量的 5 个钻孔为 2 759 m，也不及侵蚀基准面高程。因此这次地应力测量都是在侵蚀基准面以上进行，测量成果受地形地貌的影响较大，实测地应力量值偏低，地应力方向也受地形地貌、地质构造的影响。对该地区发生的地震机制的研究，还需要进行大量的深钻孔地应力测量工作，尤其是地震前后的地应力测量以及地震台站的应力和应变长期观察。这里仅介绍在该地区的地应力测量技术和方法以及新疆下坂地水利枢纽地应力实测成果。

6 结 语

(1) 中国西部地区正处于南边的印度洋板块和

北边的西伯利亚板块的挤压之中，是地中海—喜马拉雅山地震活动带所经过的地方，是亚欧大陆上最主要的地震活动带，是中国发生地震灾害的主要地区。地震灾害的破坏力极强，形成了西部大开发战略步骤的重大障碍。

(2) 国家对西部地区经济建设的投资力度逐年加大的形势下，对该地区地震活动机制的研究提到了议事日程。除了在地质构造断层带的关键部位建立地震台站及其网络系统外，还必须在地震活动带和地质构造应力带周围岩体进行地应力测量，尤其是深钻孔地应力测量。目前该地区地应力实测资料贫乏，积累地应力实测资料特别重要。

(3) 空心包体式钻孔三向应变计地应力测量具有操作简捷、测量成功率高突出优点。这种测量方法的深钻孔测量，可作为水压致裂测量法的一种补充和相互印证的手段。采用这种深钻孔测量方法，长江科学院已有测量深度达 365 m 的记录，它给地震活动机制的研究提供了可喜前景。

(4) 新疆下坂地水利枢纽正处在西部地区地震高活跃区。由于 2002 年的地应力测量是针对工程服务的一个项目，并不是针对地震机制研究的，测量深度不深，实测成果受地形地貌的影响较大，还不能据此对该地区地震活动机制做出评论。但是地应力实测成果不仅对工程建设提供了很有价值的资料，而且对今后地震机制的研究，提供了一个优良的地应力测量方法，同时也积累了第一性地应力实测资料。

参考文献(References):

- [1] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定性分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.(Yu Xuefu, Zheng Yingren, Liu Huaiheng, et al. Stability Analysis of Surrounding Rock in Underground Engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 1983.(in Chinese))
- [2] 陶振宇. 对天然岩体初始应力的几点认识[J]. 水文地质工程地质, 1980, (2): 16-20.(Tao Zhenyu. Some knowledge of initial stress in natural rock mass[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1980, (2): 16-20.(in Chinese))
- [3] 刘允芳, 何建华. 地应力研究与西部大开发[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增): 1 638-1 644.(Liu Yunfang, He Jianhua. The great development in West China and geostress study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.): 1 638-1 644.(in Chinese))
- [4] 钟作武, 陈云长, 罗超文, 等. 空心包体式钻孔三向应变计的深钻孔地应力测量技术——岩石力学新进展与西部开发中的岩土工程问题[A]. 见: 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002. 713-715.(Zhong Zuowu, Chen Yunchang, Luo Chaowen, et al. Technique of geostress measurement in deep borehole by hollow inclusion triaxial strain gauge—new advance of rock mechanics and problems of rock and soil engineering in development in West[A]. In: Proceedings of the 7th Symposium of Rock Mechanics and Engineering in China[C]. Beijing: China Science and Technology Press, 2002. 713-715.(in Chinese))
- [5] 刘允芳, 朱杰兵, 刘元坤. 空心包体式钻孔三向应变计地应力测量的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 448-453.(Liu Yunfang, Zhu Jiebing, Liu Yuankun. Research on hollow inclusion triaxial strain gauge for geostress measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 448-453.(in Chinese))
- [6] 刘允芳. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000.(Liu Yunfang. Geostress in Rock Mass and Engineering Construction[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [7] 刘允芳, 尹健民, 刘元坤. 新疆下坂地水利枢纽地应力测量与研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 242-246.(Liu Yunfang, Yin Jianmin, Liu Yuankun. Measurement and study of in-situ stresses for the Xiabandi Hydraulic Project, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 242-246.(in Chinese))