

文章编号: 1006-6616 (2003) 03-0275-07

## 地应力测量值得注意的若干问题

谭成轩<sup>1</sup>, 孙叶<sup>2</sup>, 王连捷<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质科学院城市与工程场地稳定性研究中心, 河北 三河 燕郊 065201)

**摘要:** 国内外实测资料证实地表附近构造应力受多种影响因素的干扰, 经常叠加着非构造应力(如地形等引起的应力)。本文讨论了地应力测量前后值得注意的若干问题: 地应力测量前应充分考虑测量孔位的选定和地形地貌、岩性、断裂等的影响; 地应力测量后应对测值的各种影响因素和可靠性进行分析, 进行岩石力学性质校正和对比分析以及测值的代表性分析等。

**关键词:** 地应力测量; 地应力; 构造应力; 非构造应力

中图分类号: P553

文献标识码: A

### 0 引言

在各种工程建设和地应力测量过程中, 由于构造(断层、褶皱等)、地形、岩石力学性质、区域构造活动强度(即区域构造应力作用大小)、地表风化剥蚀和沉积速度以及人类活动等多种因素的影响, 地表附近地应力状态受到不同程度的干扰, 经常叠加着多种非构造应力(如地形等引起的应力), 由地形引起的非构造应力往往在沟谷谷底、坡角引起明显的应力集中, 并导致主应力方向发生变化, 这种现象已为国内外实测资料所证实(图1、表1)<sup>[1-15]</sup>。非构造应力对地应力测量的干扰主要表现在2个方面: 一是实测应力大小的显著增大即应力集中; 二是实测主应力方向的变化。由于特定地区上述多种影响因素的不同组合, 构造应力受干扰的情形也不同。一般来说, 构造活动强烈地区实测应力大小和方向都受影响(表1、图1), 而构造活动较弱地区主要引起主应力方向的变化(表2、表3)。

图1为四川雅砻江二滩电站坝址区压磁应力解除地应力测量结果<sup>[1]</sup>。坝址区河谷呈“V”型, 左岸谷坡 $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ , 右岸谷坡 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ , 且处于构造强烈活动的川滇经向构造带, 从图1可以看出, 应力测值在近谷底钻孔深度30m以下快速增大, 最大水平主压应力测值在钻孔深度40m左右时高达65MPa, 最小水平主压应力测值在钻孔深度60m左右时超过30MPa, 这是正常最大、最小水平主压应力在该深度测值的8~10倍, 并且最大主压应力方向也发生了

收稿日期: 2003-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 49802017)资助。

作者简介: 谭成轩(1964-), 男, 研究员, 1996年博士毕业于中国地质科学院研究生部。主要从事三维构造应力场及其在地壳稳定性评价、工程地质、地质灾害等方面的应用研究。

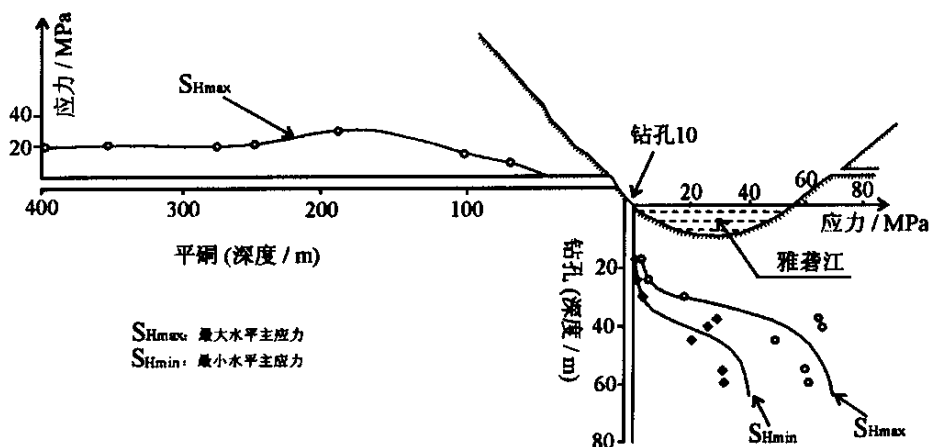


图 1 四川雅砻江二滩电站坝址区地应力测量结果

Fig. 1 In-situ stress measurements at the dam site of the Ertan Power Station on the Yalong River, Sichuan Province, China

表 1 四川雅砻江二滩电站坝址区 10 号钻孔压磁应力解除地应力测量结果

Table 1 Results of crustal stress measurements of hole No. 10 at the dam site of the Ertan Power Station on the Yalong River, Sichuan Province, China

钻孔深度/m	最大水平主压应力	最小水平主压应力	最大水平主压应力	岩性
	( $S_{Hmax}$ )/MPa	( $S_{Hmin}$ )/MPa	方向	
17.6	1.8	0.5	N78°W	
24.5	5.0	1.2	N87°E	
30.0	18.0	3.0	N80°W	正
37.5	65.0	29.1	N34°E	长
40.5	65.9	25.9	N50°E	岩
45.0	49.4	20.2	N28°E	
55.3	60.0	31.5		
59.4	61.0	32.0	N50°E	

变化(表 1);另外,从水平探硐内实测最大水平主压应力变化分析,在进入硐内一定深度时测值达到最大值,然后又变小,这与我们固有的越往山体内部应力测值越大的认识恰好相反,图 2 也有这种现象,所不同的是图 2 中由于存在一断层活动而使应力释放,造成应力测值在断层附近变小<sup>[2]</sup>。

表 2 和表 3 分别为长江三峡工程坝址附近的茅坪钻孔和坝址西北约 40km 的秭归钻孔水压致裂地应力测量结果<sup>[3,4]</sup>。秭归附近长江河谷呈似“V”型,谷坡 15°~25°,茅坪附近长江河谷较秭归要开阔,呈似“U”型,谷坡 10°~20°。由于长江三峡位于扬子准地台,构造活动较川滇经向构造带要明显减弱,从表 2 和表 3 可以看出,应力集中现象不明显,但应力方向变化较大。

表 2 湖北茅坪水压致裂地应力测量结果

Table 2 Results of hydrofracturing crustal stress measurements at Maoping, Hubei Province

钻孔深度 /m	最大水平主压应力 ( $S_{Hmax}$ )/MPa	最小水平主压应力 ( $S_{Hmin}$ )/MPa	铅直应力 ( $S_v$ )/MPa	最大水平主压应力 方向	岩性
154 ~ 155	12.05	6.80	4.13	N71°E	
195 ~ 196	13.20	7.20	5.23		
254 ~ 255	12.05	7.05	6.81	N63°E	
273 ~ 274	12.15	7.10	7.31		
331 ~ 332	13.17	8.05	8.87	N56°E	
390 ~ 391	14.65	9.15	10.45	N64°E	
419 ~ 420	16.21	9.58	11.23		
470 ~ 471	16.80	10.07	12.60	N17°E	花
555 ~ 556	13.80	9.30	14.87	N29°W	岗
639 ~ 640	18.60	11.90	17.13	N60°W	岩
669 ~ 670	17.30	11.40	17.93	N68°W	
696 ~ 697	22.50	14.64	18.65		
736 ~ 737	17.67	11.96	19.72		
755 ~ 756	20.55	13.05	20.23	N70°W	
774 ~ 775	19.85	13.35	20.74	N80°W	
790 ~ 791	21.10	13.80	21.17		

表 3 湖北秭归水压致裂地应力测量结果

Table 3 Results of hydrofracturing crustal stress measurements at Zigui, Hubei Province

钻孔深度 /m	最大水平主压应力 ( $S_{Hmax}$ )/MPa	最小水平主压应力 ( $S_{Hmin}$ )/MPa	铅直应力 ( $S_v$ )/MPa	最大水平主压应力 方向	岩性
393.25	17.88	11.40	10.07	N66°E	
403.80	13.79	8.63	10.34		
429.77	14.97	9.84	11.00		砂岩
476.32	17.59	12.27	12.19	N42°E	
495.67	22.37	13.99	12.69	N46.5°E	
498.00	20.35	13.30	12.75	N16°E	

因此，无论在地应力测量前的测量地点的选取，还是在测量后构造应力场分析与应用，都应对上述各种影响因素进行分析，探讨非构造应力在具体研究位置的影响范围、方式与程度，确定具有区域代表性的构造应力的测量位置和深度。

## 1 地应力测量前应考虑的问题

### 1.1 测量孔位的选定

地应力测量孔位的选定应考虑地形地貌、测孔周围的断裂分布、岩性、人工活动、地表

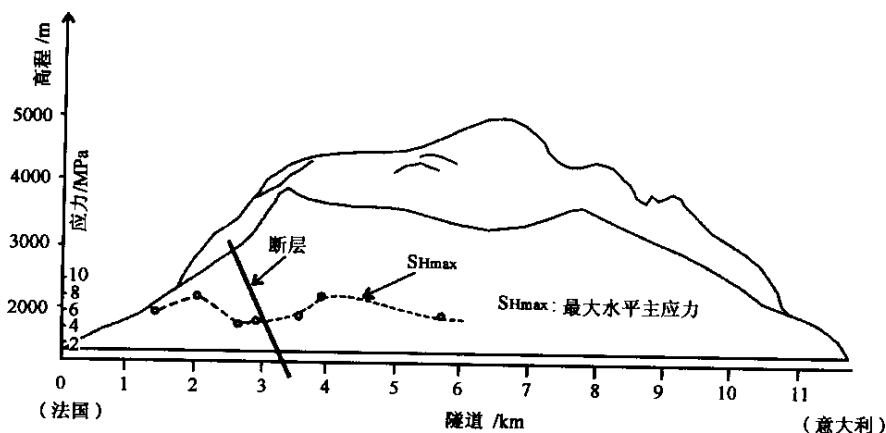


图2 法国和意大利之间横穿勃朗峰山体隧道公路中地应力测量结果

Fig.2 Results of in-situ stress measurements in the tunnel across Blanc Mountain between France and Italy

风化等因素<sup>[6]</sup>。孔位应尽可能选在地形相对平缓地段,对于峡谷区,在测量之前应作一定的前期分析,大致确定所测地段非构造应力的影响深度,以确定测孔深度,避免测量未超过非构造应力影响范围而影响区域研究区应力场分析<sup>[1,7]</sup>。为配合重大工程建设需要,测量孔位应尽量较均匀分布在研究区具有代表性的构造部位,以便对研究区应力分布有总体了解,并与模拟实验结果相互验证。研究区测孔应尽量选同一岩性,这样可避免测值之间的岩性校正,便于对比分析。

### 1.2 地形地貌对地应力测量状态的影响分析

关于地形地貌对地应力的影响,国内外许多科学家已作了大量研究<sup>[7~15]</sup>。作者在前人研究的基础上,依据实测资料,运用大量室内三维应力场有限元数值模拟分析讨论了地形地貌对应力的影响,并提出“构造应力面”的概念,即由三维空间不同地点非构造应力影响消失的深度点构成的曲面。在构造应力面之上,非构造应力和构造应力同时存在,而在构造应力面之下,仅构造应力存在。相关认识如下<sup>[7]</sup>:

(1) 沟谷宽度影响非构造应力集中范围大小和形状,而不影响构造应力面的深度。

(2) 山体高度(或山体坡度)不仅影响非构造应力集中范围大小和形状,还影响构造应力面的深度。

(3) 水平侧压力是引起非构造应力集中的主要因素。当山体坡度小于 $40^\circ$ 时,重力作用不会在沟谷或坡角引起非构造应力集中,但当山体坡度大于 $40^\circ$ 时,重力作用会在沟谷或坡角引起一定程度的非构造应力集中,但应力集中强度较弱。

(4) 水平侧压力和山体高度是影响构造应力面深度的主要因素。当水平侧压力随深度变化梯度与重力梯度相等时,在沟谷谷底构造应力面深度近似等于山体高度。当水平侧压力随深度变化梯度增大,构造应力面深度与其呈线性增加,同时在沟谷或坡角非构造应力集中强度加强。

### 1.3 断裂对地应力测量状态的影响分析

断裂发育的复杂程度与地应力状态的变化密切相关,断裂越发育,地应力状态的变化幅度越大,在断裂极为发育的地区,应力方向极为分散,应力大小变化异常,并且断裂的规模

及其活动性对地应力的影响范围成正比。缓倾角 ( $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ) 断裂面往往构成地应力局部分区的界面, 断裂面以上的应力状态常常代表被断裂扰动的局部应力场, 而断裂面以下的应力状态代表区域应力场<sup>[16~21]</sup>。

与区域主应力方位相比, 断裂附近的主应力方位往往发生不同程度的变化, 变化幅度从几度到近  $90^{\circ}$ 。加拿大地下研究实验室 (URL) 通过穿越 2 个逆断层 (倾角:  $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ) 竖井现场实验, 测定最大水平主应力方位在断裂面上下相差近  $90^{\circ}$ <sup>[16]</sup>。

断裂及其附近应力量值的变化较为复杂, 既有应力增大的, 也有降低的, 这主要与断裂带附近应力随时间的变化有关<sup>[17~19]</sup>。

## 2 地应力测量后应考虑的问题

### 2.1 地应力测量状态影响因素与可靠性分析

对于所测应力状态需要进行区域地质背景和各種影响因素分析, 分析测值的可靠性, 否则测值的质量大大降低。从 Zoback 所编世界应力图所引用世界各国的地应力实测数据质量划分来看<sup>[22]</sup>, 进行各测点地质背景和影响因素分析, 有助于提高我国已有的地应力测量数据的质量。地应力测量状态影响因素与可靠性分析的重要性在某种程度超过测量本身, 一个缺少地质背景和影响因素分析的测值可能会产生误导作用。一个典型的实例是长江三峡地区, 地应力测量与区域构造地质分析、震源机制等所得的应力状态存在差异, 如果不进行影响因素和可靠性分析, 将会给构造应力场分析和地壳稳定性评价带来很大困难, 甚至可能导致错误的结论。为了从有限的应力测值推广到区域范围, 需进行构造应力场分析和模拟, 而模拟的应力边界条件该如何确定, 是当时研究的一个难题, 因为不正确的应力场模拟结果将直接影响地壳稳定性评价结果<sup>[4]</sup>。

### 2.2 岩石力学性质对地应力测量大小的影响及其校正分析

众所周知, 不同岩性的强度差异导致应力测值的差异, 高强度岩石中所测应力较低强度岩石高, 一个典型实例是长江三峡库区秭归测孔的页岩段测值较其上、下砂岩段低一个数量级。不同地点测值的对比分析的前提是同一岩性和同一测量深度, 否则对比分析是不科学的。这就需要对不同地点的测值在岩石力学参数现场和室内测试的基础上进行岩性校正, 然后在同一深度或同一高程进行对比分析<sup>[6]</sup>。Zoback 在研究圣安德烈斯断裂带剪应力随测点到断层距离变化的对比分析中, 就特别强调所有测值都是在 200m 深度上进行的, 并在所作图件上明确标注<sup>[19]</sup>, 其研究意义较没有前提的对比分析大大增加。

### 2.3 地应力测量状态代表性分析

对所测地应力状态需进行代表性分析, 确定测值是代表局部应力场, 还是代表区域应力场。在进行实测应力代表性分析过程中, 要考虑构造应力随时间的变化情况, 往往在重大地质事件 (如地震) 的前后, 由于构造应力存在积累、加强、释放和调整的变化过程, 在一定地区范围内, 应力场可能发生较大变化。

## 3 认识

由于地表附近各种影响因素的相互作用, 所测地应力经常叠加着非构造应力, 需在应力测量前后进行必要的分析。

在地应力测量前,需要分析地形地貌、断裂等的影响,确定测量孔位在研究区的分布和测量深度,使应力测量点(段)位置能够超过非构造应力影响范围。

在地应力测量后,需要进行测值的影响因素和可靠性分析、测值的岩性校正和对比性分析以及测值的代表性分析,提高数据的质量,使所测应力数据能够更好地为工程建设服务。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 白世伟,李光煜.二滩水电站岩体应力场研究[J].岩石力学与工程学报,1982,1(1):45~55.
- [ 2 ] 陈彭年,陈宏德,高莉青.世界地应力实测资料汇编[M].北京:地震出版社,1990.
- [ 3 ] 李方全,张伯崇,苏恺之,等.三峡坝区水库诱发地震研究——茅坪钻孔的现场测试与分析[M].北京:地震出版社,1993.
- [ 4 ] 袁登维,梅应堂,秦兴黎,等.长江三峡工程坝区及外围地壳稳定性研究[M].武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [ 5 ] 安欧.构造应力场[M].北京:地震出版社,1992.
- [ 6 ] 陈庆宣,王维襄,孙叶,等.岩石力学与构造应力场分析[M].北京:地质出版社,1998,58~228.
- [ 7 ] Tan Chengxuan, Wang Ruijiang, Sun Ye, et al. Numerical modeling estimation of the tectonic stress plane (TSP) beneath topography with quasi-U-shaped valleys [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40 (6).
- [ 8 ] Pan, E., Amadei, B., Savage, W. Z. Gravitational and tectonic stresses in anisotropic rock with irregular topography [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1995, 32: 201~214.
- [ 9 ] Amadei, B., Pan, E. Gravitational stresses in anisotropic rock with inclined strata [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1992, 29: 225~236.
- [ 10 ] Savage, W. Z. Gravity-induced stresses in finite slopes [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1995, 32: 132.
- [ 11 ] Swolfs, H. S., Savage, W. Z. Topographic modification of in-situ stress in extensional and compressional tectonic environments [J]. Int. Sym. Rock Stress & Rock Stress Measurements, 1985, 22: 291~302.
- [ 12 ] McTigue, D. F., Mei, C. C. Gravity induced stresses near axisymmetric topography of small slopes [J]. Int. J. Num. Anal. Methods Geomech., 1987, 11: 257~268.
- [ 13 ] Liu, L., Zoback, M. D. The effect of topography on the state of stress in the crust: Application to the site of the Cajon Pass Scientific Drilling Project [J]. J. Geophys. Res., 1992, 97: 5095~5108.
- [ 14 ] Liao, J. J., Savage, W. Z., Amadei, B. Gravitational stresses in anisotropic ridges and valleys with small slopes [J]. J. Geophys. Res., 1992, 97: 3325~3336.
- [ 15 ] Savage, W. Z., Swolfs, H. S. Tectonic and gravitational stress in long symmetric ridges and valleys. J. Geophys. Res., 1986, 91: 3677~3685.
- [ 16 ] Martin, C. D. Characterizing in-situ stress domains at the AECL underground research laboratory [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27: 631~646.
- [ 17 ] 高建理,丁建民,梁国平,等.龙羊峡水电站水压致裂应力测量[J].岩石力学与工程学报,1990,9(2):134~145.
- [ 18 ] 李方全,孙世宗,李立球.华北及郯庐断裂带地应力测量[J].岩石力学与工程学报,1982,1(1):73~86.
- [ 19 ] Zoback, M. D., Tsukara, H., Hickman, S. Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andreas Fault——Implications for the magnitude of shear stress at depth [J]. J. Geophys. Res., 1980, 85: 6157~6173.
- [ 20 ] 苏生瑞,王士天,朱合华.断裂对地应力场影响的研究[A].见:中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集[C].2002.
- [ 21 ] Evans, K. F. Appalachian stress study. Regional scale stress variations and their relation to structure and contemporary tectonics [J]. J. Geophys. Res., 1985, 94: 17619~17645.
- [ 22 ] Zoback, M. L. First and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97 (B8): 11703~11728.

## GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE DAYINGEZHUANG GOLD DEPOSIT IN THE JIAODONG AREA AND ITS RESOURCE PROSPECTS AT DEPTH

LI Wei-ge , LI Long-yi , ZHANG Rui-zhong , QIAN Jin , GUO Jun-li  
( Dayingezhuang Gold Mine , Shandong Zhaojin Group , Zhaoyuan 265414 , Shandong , China )

**Abstract** : The Dayingezhuang gold deposit in the Jiaodong area , Shandong Province , is a hidden ( to a burial depth of more than 250 m from the surface ) , mesothermal , alteration-type gold deposit in a fractured zone. It has been mined for more than ten years. Check drilling has revealed that the orebody has a tendency of the second enrichment at depth. The orebody has a controlled maximum dip width of 890 m or more and still extends downward without pinching out , indicating that the deposit has very vast ore prospects at depth.

**Key words** : alteration-type gold deposit ; depth ; second enrichment zone ; Jiaodong

( 上接 280 页 )

## SOME PROBLEMS OF IN-SITU CRUSTAL STRESS MEASUREMENTS

TAN Cheng-xuan<sup>1</sup> , SUN Ye<sup>2</sup> , WANG Lian-jie<sup>1</sup>

1. Institute of Geomechanics , Chinese Academy of Geological Sciences ( CAGS ) , Beijing 100081 , China ;
2. Urban and Engineering Site Stability Research Center , CAGS , Yanjiao 056201 , Hebei , China )

**Abstract** : Measuring data at home and abroad confirm that tectonic stress near the surface is interfered with by several influence factors and is usually overlapped by non-tectonic stress , e. g. stress caused by topography. This paper discusses the problems that need consideration before and after crustal stress measurements. Before the measurements , we should give full consideration to the determination of measuring sites and the influences of landforms , rock types , fractures and so on. After the measurements , an analysis on the various influence factors and reliability of measuring values and correction and comparative analysis of the mechanical properties of rocks , as well as a representative analysis of the measuring values are necessary.

**Key words** : geostress measurement ; geostress ; tectonic stress ; non-tectonic stress