

地应力测量及其地下工程应用的思考

谭成轩¹⁾, 孙炜锋¹⁾, 孙叶²⁾, 王连捷¹⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

2) 国土资源部实物地质资料中心, 河北燕郊, 056201

内容提要: 国内外地应力实测资料证实, 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)。为此, 本文讨论了地应力测量及其地下工程应用值得注意的问题。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; 工程应用应考虑具体工程所处不同构造部位、不同岩性、不同岩体结构、不同深度等局部地应力状态的变化和差异, 此外, 工程本身不同的设计结构、尺寸等引起的局部地应力状态变化也需予以充分考虑。

关键词: 地应力; 构造应力; 非构造应力; 地下工程

在地应力测量和各种工程建设过程中, 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, 地表附近构造应力受到不同程度的干扰, 经常叠加着非构造应力(如地形等引起的应力), 这种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、2、表1、2、3)。这种非构造应力干扰主要表现在两个方面: 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、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(白世伟等, 1982; 陈彭年等, 1990)。由于坝址区河谷呈似“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

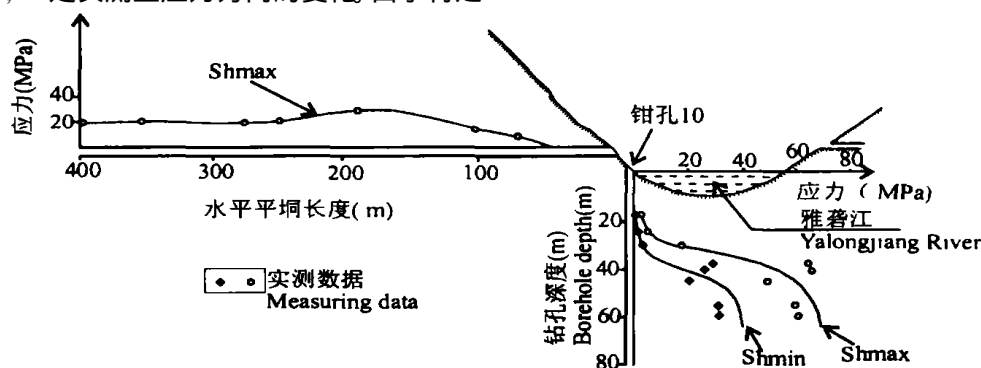


图1 四川雅砻江二滩电站坝址区地应力测量结果

Fig 1 In situ stress measurements at the dam site of Ertan power station on the Yalongjiang River, Sichuan Province, China

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 50579098)和国土资源部百名人才计划联合资助的成果。

收稿日期: 2006-07-09; 改回日期: 2006-08-12; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 谭成轩, 男, 1964年生, 研究员。1996年博士毕业于中国地质科学院研究生部, 地质力学专业, 地应力场研究方向。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。通讯地址: 100081, 北京市海淀区民族大学南路11号院, 中国地质科学院地质力学研究所。

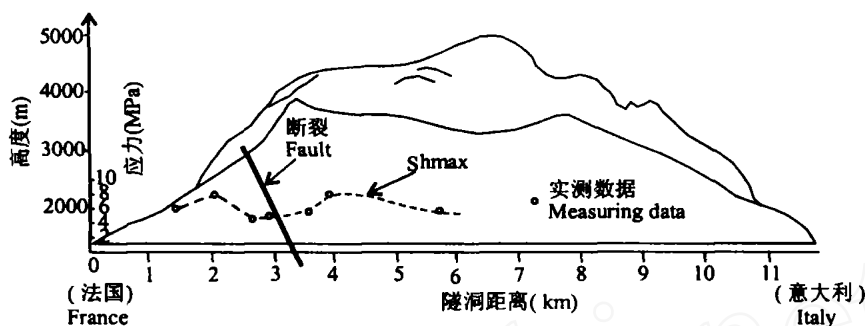


图2 法国和意大利之间横穿勃朗峰山体隧道公路中地应力测量结果

Fig. 2 In situ stress measuring results in the tunnel passing Brown Hill between France and Italy

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变化(表1);另外,从水平探洞内实测最大水平主压应力变化分析,在进入洞内一定深度测值达到最大值,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(陈彭年等,1990; Martin C D et al, 1990; 高建理等,1990; 李方全等,1982; Zoback M D et al, 1980)。

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(李方全等,1993; 袁登维等,1996; Tan Chengxuan et al, 1997)。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。

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深度,分析地应力状态在地下空间的变化分布,尤其是沿各种线性地下工程设计线路的变化和差异,更好地为地下工程建设服务。

1 地应力测量前值得注意的问题

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、地表风化等因素(陈庆宣等,1998)。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(Pan E et al, 1995; Pan E et al, 1994; Amadei B et al, 1992; Amadei B et al, 1988; Savage W Z et al, 1995; Savage W Z et al, 1985; Savage W Z et al, 1992; Swolfs H S et al, 1986; McTigue D F et al, 1981; McTigue D F et al, 1987; Liu L et al, 1992; Liao J J et al, 1992; Savage W Z et al, 1986; McGarr A. et al, 1988; Tan C et al, 2000)。作者在前人研究的基础上,依据实测资料,运用大量室内三维模拟分析讨论了地形地貌

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 drill 10 at the dam site of Ertan power station
on the Yalongjiang River, Sichuan province, China

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)	最大水平 主压应力 方向	岩性
20	1.8	0.5	N 78 W	正 长 岩
24.5	5.0	1.2	N 87 E	
30.0	18.0	3.0	N 80 W	
37.5	65.0	29.1	N 34 E	
40.5	65.9	25.9	N 50 E	
45.0	49.4	20.2	N 28 E	
55.3	60.0	31.5		
59.4	61.0	32.0	N 50 E	

对地应力大小的影响, 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:

(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°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°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, 在沟谷底部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

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	花岗岩
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		
390~391	14.65	9.15	10.45	N56°E	
419~420	16.21	9.58	11.23	N64°E	
470~471	16.80	10.07	12.60		
555~556	13.80	9.30	14.87	N17°E	
639~640	18.60	11.90	17.13	N29°W	
669~670	17.30	11.40	17.93	N60°W	
696~697	22.50	14.64	18.65	N68°W	
736~737	17.67	11.96	19.72		
755~756	20.55	13.05	20.23		
774~775	19.85	13.35	20.74	N70°W	
790~791	21.10	13.80	21.17	N80°W	

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	砂岩
403.80	13.79	8.63	10.34		砂岩
429.77	14.97	9.84	11.00		砂岩
456.27	9.91	5.00	11.68	N42°E	泥岩
476.32	17.59	12.27	12.19		砂岩
495.67	22.37	13.99	12.69		砂岩
498.00	20.35	13.30	12.75	N16°E	砂岩

变化异常, 并且断裂对地应力的影响范围与断裂的规模成正比。断裂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(Martin C D et al, 1990; 高建理等, 1990; 李方全等, 1982; Zoback M D et al, 1980; 苏生瑞等, 2002; Evans K F et al, 1989)。

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°。加拿大地下研究实验室(URL)通过穿越两个逆断层竖井现场实验, 测定最大水平主应力方位在断裂上下相差近90°(Martin C D et al, 1990)。

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(高建理等, 1990; 李方全等, 1982; Zoback M D et al, 1980)。

1.4 地应力测量深度的确定

地应力测量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, 以确定测孔钻探深度, 避免测量未超过非构造应力影响范围而影响研究区区域应力场分析(白世伟等, 1982; 李方全等, 1993)。

2 地应力测量后值得注意的问题

2.1 地应力测量状态影响因素与可靠性分析

对于所测地应力状态需要进行区域地质背景和多种影响因素分析, 确定测值的可靠性, 否则测值的质量大大降低。从Zoback所编世界应力图可以看出, 我国已有的地应力数据需加强地质背景和影响因素分析(Zoback M L et al, 1992)。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, 一个不确定的测值是没有意义的, 甚至会产生误导作用。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, 如果没有必要的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(袁登维等, 1996)。

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中高, 一个典型实例是长江三峡库区秭归测孔的泥岩段测值较其上下砂岩段低许多。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, 否则对比分析是不确切不科学的。这就需要对不同地点的测值在岩石物理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(陈庆宣等, 1998)。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, 其研究意义较没有前提的对比分析大大增加(Zoback M D et al, 1980)。

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, 在一定时间和地区范围内, 应力场可能发生较大变化。

3 地应力测量结果在地下工程应用中值得注意的问题

3.1 地应力状态沿地下工程设计线路变化分析

由于具体地下工程设计线路穿越不同构造部位、不同岩性、不同岩体结构、不同埋藏深度等, 以及工程本身不同的设计结构、尺寸等, 均会造成沿地下工程线路不同地点局部地应力状态的变化和差异, 因此, 在工程设计时需要充分考虑这种变化, 在工程

施工过程中预防工程地质灾害的发生。随着我国西部大开发的不断深入, 由于我国西部构造强烈活动, 地下工程建设将面临越来越多的工程地质和灾害问题。一个典型的实例是我国甘肃境内的亚洲第一特长山岭隧道乌鞘岭隧道在建设过程由于对地应力状态沿隧道设计线路的变化考虑不够充分, 而直接运用局部地点所测地应力状态进行穿越隧道设计, 结果在施工过程中出现了许多没有预期到的重大工程地质问题, 如塌方、隧道变形等。

3.2 地应力状态在不同深度变化分析

地应力测量和各种工程建设已证实, 在深切峡谷地区地壳浅表层, 地应力大小随深度变化分为应力降低(或卸荷)区、应力增高(或集中)区和原始应力区, 最大水平主应力方向一般随深度也发生变化。但到目前为止, 尚没有从理论和实践中总结出具有普适性的三个应力深度区间参考值和最大水平主应力方向随深度变化规律。三个应力区间的岩体特征和地应力状态存在显著差异: 应力降低(或卸荷)区岩体由于卸荷作用而较为破碎, 实测地应力大小较正常值偏低, 最大水平主应力方向离散度大; 应力增高(或集中)区岩体结构又分为两种情况, 一种由于应力集中长期作用已造成岩体出现饼状岩芯而使应力释放, 实测地应力大小仅稍高于正常值, 另一种岩体仍为完整状态, 应力集中尚未造成岩体出现饼状岩芯现象而释放应力, 实测地应力大小远远高于正常值, 应力增高(或集中)区最大水平主应力方向离散度一般也较大; 原始应力区一般岩体较完整, 实测地应力大小趋于正常值, 最大水平主应力方向相对较稳定, 离散度小。因此, 地下工程应尽量避免应力降低(或卸荷)区和应力增高(或集中)区, 前者在工程施工和安全运营过程中将会出现一系列工程地质和灾害问题, 后者一方面会造成建设成本大大提高, 另一方面受应力集中长期作用, 地下工程也将会出现不同程度的工程地质和灾害问题。从安全施工和运营、节约建设成本等方面考虑, 根据具体地下工程, 适当增大地下深度而把工程设计在原始应力区, 可能是未来地下工程设计值得考虑的一种优选方案, 也是未来地下工程适宜性分析需要考虑的重要因素之一。

4 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, 需在地应力测量前后进行必要的分析, 在地下工程应用中应充分考虑

工程所处地质条件的差异性以及工程设计的不同所引起的地应力状态的变化,使所测地应力结果能够更好的为工程建设服务。

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,使所测应力状态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,提高测值的质量。

在地下工程设计中应充分考虑线路穿越不同构造部位、不同岩性、不同岩体结构、不同埋藏深度等,以及工程本身不同的设计结构、尺寸等,所造成沿地下工程线路不同地点局部地应力状态的变化和差异。同时尽可能把地下工程设计在原始应力区。

参 考 文 献

- 安欧 1992 构造应力场 北京:地震出版社
- 白世伟,李光煜 1982 二滩水电站岩体应力场研究 岩石力学与工程学报, 1(1): 45~ 55
- 陈彭年,陈宏德,高莉青 1990 世界地应力实测资料汇编 北京:地震出版社
- 陈庆宣,王维襄,孙叶,等 1998 岩石力学与构造应力场分析 北京:地质出版社
- 高建理,丁建民,梁国平,等 1990 龙羊峡水电站水压致裂应力测量. 岩石力学与工程学报, 9(2): 134~ 145
- 李方全,孙世宗,李立球 华北及郯庐断裂带地应力测量 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 73~ 86
- 李方全,张伯崇,苏恺之,等 1993 三峡坝区水库诱发地震研究-茅坪钻孔的现场测试与分析. 北京:地震出版社
- 苏生瑞,王士天,朱合华 2002 断裂对地应力场影响的研究. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集
- 袁登维,梅应堂,秦兴黎,等 1996 长江三峡工程坝区及外围地壳稳定性研究. 武汉:中国地质大学出版社
- Amadei B, Pan E 1992 Gravitational stresses in anisotropic rock with inclined strata Int J. Rock Mech. Min Sci & Geomech Abstr, 29: 225~ 236
- Amadei B, Savage W Z, Swolfs H S 1988 Gravity-induced stresses in stratified rock masses Rock Mech. Rock Engng, 21: 1~ 20
- Evans K F 1989 Appalachian stress study: Regional scale stress variations and their relation to structure and contemporary tectonics J. Geophys Res, 94: 17619~ 17645
- Liao J J, Savage W Z, Amadei B 1992 Gravitational stresses in anisotropic ridges and valleys with small slopes J. Geophys Res, 97: 3325~ 3336
- Liu L, Zoback M D 1992 The effect of topography on the state of stress in the crust: Application to the site of the Cajon Pass Scientific Drilling Project J. Geophys Res, 97: 5095~ 510
- Martin C D 1990 Characterizing in-situ stress domains at the AECL underground research laboratory. Canadian Geotechnical Journal, 27: 631~ 646
- McGarr A 1988 On the state of lithospheric stress in the absence of applied tectonic forces J. Geophys Res, 93: 13609~ 13617
- McTigue D F, Mei C C 1987 Gravity induced stresses near axisymmetric topography of small slopes Int J. Num. Anal Methods Geomech, 11: 257~ 268
- McTigue D F, Mei C C 1981 Gravity induced stresses near topography of small slopes J. Geophys Res, 86: 9268~ 9278
- Pan E, Amadei B, Savage W Z 1994 Gravitational stresses in long symmetric ridges and valleys in anisotropic rock Int J. Rock Mech. Min Sci & Geomech. Abstr, 31: 293~ 312
- Pan E, Amadei B, Savage W Z 1995 Gravitational and tectonic stresses in anisotropic rock with irregular topography. Int J. Rock Mech. Min Sci & Geomech. Abstr, 32: 201~ 214
- Savage W Z, Swolfs H S 1986 Tectonic and gravitational stress in long symmetric ridges and valleys J. Geophys Res, 91: 3677~ 3685
- Savage W Z, Swolfs H S, Amadei B 1992 On the state of stress in the near surface of the Earth's crust J. Pure Appl Geophys, 138: 207~ 228
- Savage W Z, Swolfs H S, Powers P S 1985 Gravitational stress in long symmetric ridges and valleys Int J. Rock Mech. Min Sci & Geomech. Abstr, 22: 291~ 302
- Savage W Z 1995 Gravity-induced stresses in finite slopes Int J. Rock Mech. Min Sci & Geomech. Abstr, 32: 132
- Swolfs H S, Savage W Z 1986 Topographic modification of in-situ stress in extensional and compressional tectonic environments Proc Int Sym. Rock Stress & Rock Stress Measurements, 89~ 98
- Tan C, Sun Y, Wang R 2000 Present activity of the Shenzhen fault zone and its impact on the safety of a planned diversion tunnel in Shenzhen, China Engineering Geology, 57(1&2): 73~ 80
- Tan Chengxuan, Sun Ye, Wang Ruijiang, et al 1997 Assessment and zonation of regional crustal stability in and around the dam region of the Three Gorges Project on the Yangtze River Environmental Geology, 32(4): 285~ 295
- Zoback M D, Tsukara H, Hickman S 1980 Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andreas Fault—Implications for the magnitude of shear stress at depth J. Geophys Res, 85: 6157~ 6173
- Zoback M L 1992 First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project Journal of Geophysical Research, 97(B8): 11703~ 11728

A Consideration on In-Situ Crustal Stress Measuring and Its Underground Engineering Application

TAN Chengxuan¹⁾, SUN Weifeng¹⁾, SUN Ye²⁾, WANG Lianjie¹⁾

1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081

2) Real Geological Data Center, Ministry of Land and Mineral Resources, Yanjiao, 056201

Abstract

Tectonic stress near the surface of crust, which is measured and tested at home and abroad, is always affected by a few factors, and is overlapped by non-tectonic stress, e.g. stress caused by topography. Therefore, this paper has discussed the items needed to pay attention before and after crustal stress measuring. Before the measurements, we should focus on the determination of measuring sites and on the influence of the factors of landform, rock types, fractures, and so on. After the measurements, an analysis on the reliability, the correction and comparison, and the representative of the measuring values is necessary. The variation and difference of local crustal stress states should be considered at different structural sites, different rock types, different rock mass constitutions, different depths and so on along underground engineering route line. In addition, the variation of local crustal stress states caused by different engineering design texture, size and so on should also be taken into consideration.

Key words: geostress; tectonic stress; non-tectonic stress; underground engineering

GCL 防水毯中膨润土的水化膨胀应力特征研究

申俊峰^{1,2)}, 李胜荣^{1,2)}, 贺少辉³⁾, 张广山¹⁾, 佟景贵¹⁾, 阎柏琨¹⁾

1) 地质过程和矿产资源国家实验室, 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京, 100083;

2) 深部过程与探测技术教育部重点实验室, 北京, 100083; 3) 北京交通大学土建学院, 100044

GCL (Geosynthetic clay liner) 防水毯是广泛用于工程建筑的一种防水材料。一般认为其防水机理是由于其中的膨润土颗粒吸水膨胀后, 形成胶体状隔水层, 阻隔水分子进一步扩散而达到防水目的。但水化膨胀过程中产生的应力特征迄今没有深入研究。本次试验采用自制膨胀应力测定仪, 对美国 CETCO 公司膨润土防水毯饱和吸水条件下膨胀应力进行了直接测定, 结果表明: 应力测定仪工作性能稳定, 测定结果重现性好。膨润土防水毯吸水膨胀应力随时间的变化可明显分出3个阶段。(0~50h) 应力快速增加, 增幅为 $7 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ MPa/h}$; (50~1730h) 应力缓慢增加, 增幅

$7.54 \times 10^{-6} \sim 2.02 \times 10^{-5} \text{ MPa/h}$; (1730h 之后) 为平缓波动阶段, 该段膨胀应力平均值 0.0719 MPa , 瞬间最大值 0.729 MPa 。撤销饱和吸水条件, 膨胀应力值以 $1.53 \times 10^{-5} \text{ MPa/h}$ 速率降回到初始值。显微观察表明: 膨胀应力主要源于层状蒙脱石晶体之间的吸水和蒙脱石晶体内层间域的吸水, 导致体积膨胀所致。膨胀应力分阶段变化趋势暗示: 膨胀应力的增加会阻止水扩散进行, 进而抑制水渗透, 增强防水效果。此外, 饱和吸水状态下, 膨润土的持续膨胀应力对其周围工程材料将产生潜在影响, 特别是安置于地下水水位附近时, 水位变化导致的应力振荡有可能破坏周围工程材料。

浙江古代青瓷(1127~1279年)的化学组成及其意义

彭子成¹⁾, 梁宝鑫²⁾, 余君岳²⁾, 郑培凯³⁾, 李德卉²⁾

1) 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥, 230026; 2) 香港城市大学物理及材料科学系, 九龙;

3) 香港城市大学中国文化中心, 九龙

本文用 ENGLE-II 型微探针能量色散 X 荧光光谱 (EDXRF) 技术测定了一批青釉瓷残片中的 16 种元素氧化物的含量, 其残片来自浙江杭州地区的南宋郊坛窑和老虎洞窑。由主量元素判别方程的 Q 值表明, 两类青釉瓷均属官窑制品。主成分统计分析看出, 郊坛官窑与老虎洞官窑的瓷釉成分有明显不同, 但其胎质成分的分布, 却有部分的重叠, 这显示了当时两处官窑的工匠们在使用胎料中的交往。从釉

层、过渡层和胎层的 Al_2O_3 和 CaO 的含量数据表明, 郊坛官窑和老虎洞官窑的青釉瓷制品, 分别存有厚度为 $120 \sim 140 \mu\text{m}$ 和 $230 \sim 240 \mu\text{m}$ 的过渡层, 表明两处使用釉料和烧制工艺上的差异, 这揭示了应用微探针型 EDXRF 技术研究古陶瓷微结构的特点。本文的研究结果, 为文物考古工作者判定老虎洞窑确属史书记载的另一处南宋官窑提供了科技考古的证据。