

工程区地应力场的综合分析法研究

王成虎, 张彦山, 郭啟良, 赵仕广

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要: 针对如何准确确定工程区地应力场提出了综合分析法, 即利用断层力学分析法、原地应力实测和数值模拟综合分析工程区地应力场, 以期得到更为全面准确的结论。断层力学分析法可以和原地应力实测相互支持印证, 并为数值模拟提供依据, 而数值模拟可以帮助深刻理解地质条件对实测数据的影响, 同时能很好地展现地应力场的三维分布。文中以位于山东胶东半岛的一个研究实例来展示该方法的有效性。工程区地质构造活动主要受近 EW 晚更新世活动断裂控制, 利用断层力学分析法可得该区域三向主应力关系应为 $S_H > S_V > S_h$, 最大水平主应力的方向应为 $N60^\circ E - N120^\circ E$ 。实测结果显示该区域应力状态有利于走滑断层活动, 且最大水平主应力方向 $N66.6 - 87.6^\circ W$ 。依据室内实验数据和工程地质调查结论, 构建三维数值模型, 模拟分析工程区的应力场, 分析得到工程区的应力场三维分布特征, 数值模拟结果与原地实测的结果较一致。综合分析数值模拟和工程地质调查结果, 原地应力测值受地质构造影响较为明显, 数值模拟结论能较好地代表完整岩体区的应力分布状态。

关键词: 综合分析法; 原地应力测量; 断层力学模型; 数值模拟; 地应力场; 胶东半岛

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2011)10 - 1562 - 07

作者简介: 王成虎(1978 -), 男, 陕西定边人, 副研究员, 从事地应力场与岩体力学研究。E-mail: huchengwang@126.com。

New integrated analysis method to analyze stress regime of engineering area

WANG Cheng-hu, ZHANG Yan-shan, GUO Qi-liang, ZHAO Shi-guang

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract: An integrated analysis method (IAM) for how to accurately determine the stress regime of an engineering area is presented, which utilizes the faulting mechanical analysis method, in-situ stress measurement and numerical modeling technologies to determine the stress regime comprehensively to draw a reliable conclusion. The faulting mechanical analysis method and in-situ stress measurement techniques can support and verify each other mutually, and offer basis for the numerical model. Moreover, the numerical modeling can help understand the influences of geological conditions on the measured data. At the same time, the numerical model can reveal a 3-D distribution of stress regime. A case is demonstrated to prove the efficiency of this method. This engineering area is located in the Shandong Peninsula, and tectonically controlled by the sub-EW late Pleistocene active faults. The geotechnical investigations show that almost all the small regional faults are nearly EW and dip by 65-85 degrees. According to the faulting mechanical analysis method, the relationship among the three principal stresses should be $S_H > S_V > S_h$, and the direction of the S_H should be $N60^\circ E - N120^\circ E$. The in-situ stress measurements indicate that the stress state is favorable for strike-slip faults, and the orientation of S_H is $N66.6 - 87.6^\circ W$. Both conclusions agree well with the data shown by the World Stress Map. One numerical model based on laboratory tests and geotechnical investigation results is set up to simulate the stress regime of this engineering area. The numerical modeling results are consistent with the in-situ stress measurements. At the same time, the numerical modeling and the geotechnical investigations show that some measured data are affected by the small regional faults remarkably. The results of the numerical modeling can reflect the stress regime of intact rock mass.

Key words: integrated analysis method; in-situ stress measurement; faulting mechanics; numerical modeling; stress regime; Shandong Peninsula

0 引言

地下工程原地应力场的确定与分析对于工程稳定

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40704018); 中央级科研院所基本科研业务专项项目(ZDJ2009-1); 铁道部重大课题“隧道围岩稳定性及其控制技术”项目(2009G005-D)

收稿日期: 2011 - 01 - 18

性分析和设计都具有举足轻重的作用。而如何较为可靠地确定工程区地应力场，仍然是进行工程设计和建设所要面临的一大难题。实测或许是最佳的选择，依据国际岩石力学学会于 2003 年给出的建议方法^[1]，目前得到广泛认可和使用的办法为水压致裂测量法和套芯应力解除法。但是所有的实测方法都是基于大量的理论假设，而在实际测量过程中，每次原地应力测量都会受到测试点地质条件的影响^[2]。最令开展实测的工程技术人员尴尬的是“实际原地应力场是未知的，而实测结果又受到测试理论和测试条件的干扰，那么如何证明测试结果就可靠且准确呢？”。针对此，Cornet (1993) 和 Ask (2004, 2009) 等人提出“综合确定法”(ISDM)^[3]，即利用多种方法或者多种设备的实测数据进行综合比较分析，进而得到这个工程区的应力场。Haimson (2010) 也指出尽量使用基于其它理论的数据或者第三方的数据来验证实测数据的可靠性^[2]。Stephansson (2010) 提出了最终原地应力场分析模型^[4]。鉴于此，笔者在这里针对国内的工程实践和技术环境，提出一套可行的工程区地应力场综合分析方法和步骤，并以一个工程实践为例来展示其应用效果，供其它工程实践参考。

1 综合分析法的理论及步骤

根据 Amadei 和 Stephansson 等人的原地应力来源分类^[5]，原地应力主要由重力、构造应力、残余应力及陆壳应力组成。对于中国大陆境内的陆壳，构造应力主要受近现代构造运动的控制。因此我们完全可以通过对工程场区周边近现代构造运动的分析，定性得到构造应力的基本性态；然后结合部分原地应力测试来量化分析我们的地质学定性分析结论，同时也可以通过对断层力学定性分析结论来检验实测结果是否可靠准确；实测数据点一般都离散，且数据量有限，无法连续三维地再现整个应力场分布，故以前面的定性分析和实测数据为依据，采用数值模拟技术反演工程场区地应力场的三维分布，可以更好地反映各种地质因素对实测数据的影响。

在分析地壳中的应力与活动断层之间的关系时，Anderson E M (1901, 1951)^[6]关于 3 个主应力与 3 种主要断层类型之间关系的理论已被普遍接受并被广泛应用。根据他的理论，正断层，走滑断层和逆断层分别对应着 3 种应力状态，即 $S_V > S_H > S_h$ ， $S_H > S_V > S_h$ 和 $S_H > S_h > S_V$ 。同时，Anderson 理论认为中间主应力是通过断层面的，断层的形成和发展主要受到地壳中最大主应力和最小主应力之间的关系控制，而且对于一个特定地区在特定的地质时期内，受稳定地壳应力状态

作用形成的断层形态也基本是稳定的。因此三维应力状态分析可以转化为二维平面应力分析，再结合摩尔库伦理论，就可以得到三向主应力与断层形态之间更为详尽的关系。后来的科学家们基于 Anderson 理论又进行其它方面的拓展研究，为 Anderson 理论添加了更为丰富的内容，使得人们对三向应力状态与断层形态之间的关系认识更为清楚，图 1 形象地概括了 Anderson 理论所包涵的主要内容。

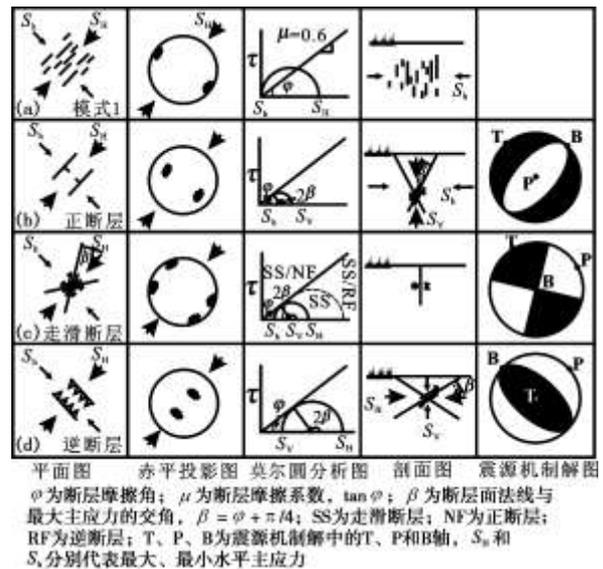


图 1 各种断层和裂隙类型与最大、最小水平主应力方向之间的关系示意图 (据文献[7], 有修改)

Fig. 1 Schematic illustration of orientation of various types of fractures and faults with respect to orientation of S_H and S_h (after Reference [7], modified)

根据 Byerlee 的研究结果^[9]，岩石摩擦系数一般为 0.6~1.0，由此可知，正断层倾角一般都大于 60° ，而逆断层倾角一般都小于 30° 。图 1 所给出的理论是简化了的断层力学模型和 3 个主应力之间的关系，在实际的工程地质勘察中，往往会遇到各种逆冲伴有走滑分量或者正断伴有走滑分量的断层，地震研究中的震源机制解也给出大量这样的实例，这时就要利用 Angelier J 提出的利用断层擦痕来反演构造应力张量^[10-12]。

对于工程区的原地应力测量，应该严格按照国际岩石力学学会于 2003 年发布的建议方法和步骤来执行^[1]，这样做一方面可以保证测量过程和计算过程准确无误，另一方面可以方便更多的人来使用这些数据而不至于怀疑数据的可靠性。当然，实际测量过程中，实测人员要面对各种各样的问题^[2]，在这种情况下，可以参考笔者在文献[13, 14]中所提出的方法进行数据拟合和误差分析，以期达到对原地应力状态更为准确的认知。

对于数值模拟方法,主流的方法包括有限元法、离散元法、边界元法等^[15]。数值模型的精度和复杂程度取决于分析时的工作条件,在硬件和软件条件均允许的条件下,数值模型应尽可能的贴近地质模型,减少模型的简化假设,使得结论更为真实可靠。

通过以上分析,可以概括给出工程区地应力场综合分析的一般步骤:

(1) 根据《工程区工程地质勘察报告》和《工程区地震活动安全性评价报告》得到工程区范围内及周边较为详尽的构造纲要,利用 Anderson 理论对这些构造特征进行分析,得到三向应力状态的基本关系和各个主应力方向与构造迹线的相对关系。

(2) 开展原地应力实测,获得实测原地应力数据。

(3) 分析第一步获得的结论是否和第二步获得结论是否一致? 如果一致,那么开展后面的数值模拟分析工作; 如果不一致,分析结论冲突的原因,并决定是否需要补充实测工作。

(4) 利用工程地质勘察报告的结果构建地质模型,以第一步和第二步的结论为依据,构建数值模拟模型,得到工程场区的三维原地应力分布。

(5) 对前面 4 步的工作进行综合分析讨论,得到该工程区原地应力场的综合结论。

下面以一个工程实例说明“工程区地应力场综合分析法”,以供别的工程参考使用。

2 工程及工程地质背景概况

某工程区位于山东胶东半岛,研究区隶属中朝准地台和扬子准地台,近场区位于郯庐断裂带以东,在区域地质构造上属于胶南—文登地台隆起带,基岩主要包括晚元古代晋宁期二长花岗岩、印支期黑云角闪(或角闪黑云)石英二长岩和印支期石英正长岩。



图 2 工程区近场区构造框架图

Fig. 2 Skeleton map of geological structures around engineering area

工程区在漫长的地质年代里,经历了不同时期构造运动的影响,区域主要构造和次级构造比较发育,在近场区附近规模较大的断裂有 4 条(图 2),按断层

走向可分为近 E-W 向和近 S-N 向两组。近 E-W 向断裂仅有东殿后断裂 1 条,为晚更新世早期活动断裂,近 S-N 向断裂有金牛山断裂、仙姑顶断裂和老母猪河断裂 3 条,为早中更新世活动断裂。工程区内无大断裂发育,在新构造运动时期主要表现整体隆起和断块周围的断裂活动,晚第三纪以来泰礴顶一带隆起较快,其周围隆起较弱。新构造运动还具有间歇性隆起的特点,据夷平面和现代分水岭两侧水系差异分析,北陡南缓,隆起具有掀斜的特点。第四纪新构造活动逐渐减弱。

3 应力测量简介

该电站要兴建大规模的输水系统和地下厂房,地应力值直接影响地下工程稳定性分析评估结果及支护措施的采纳,而地应力方向会影响水电站输水系统和地下厂房的轴线设置方向。对于该电站,共布置 5 个钻孔,分别位于地下厂房、高压管道岔管及尾水管 3 个工程部位(如图 3 所示),借此来了解工程区的应力状态。原地应力测量所采纳的方法为水压致裂法,因为工程所处岩体为坚硬完整的花岗岩岩体,钻孔岩芯完整,非常适合使用水压致裂法开展应力测量。

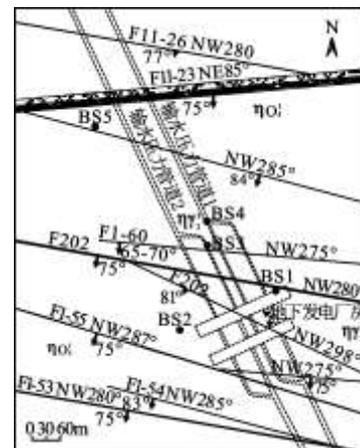


图 3 水压致裂测点布置及地下工程布置与区域构造示意图

Fig. 3 Schematic map of hydrofracturing measurement spots, layout of underground structures and regional tectonic structures

测试设备、测试步骤和参数计算严格执行国际岩石力学学会推荐的技术标准^[1]和我国国标。原地应力测量参数取值和计算严格按照文献[1]所提供的公式和原则执行,垂直应力 S_v 由上覆岩体容重估算,其中 ρ 取 2.65 g/cm^3 ,计算公式及过程下同。测量结果详见表 1。

根据前面给出的测量成果(如表 1 所示)可知,最大、最小水平主应力均随着深度的增加而增加,但是五个测孔所揭示的应力状态不尽相同。钻孔 BS1 和钻孔 BS3 中测得的水平值偏低,最大、最小水平主应

力和垂直主应力之间的关系表现为 $S_H \geq S_V > S_h$; 而钻孔

表 1 水压致裂原地应力测量结果表

钻孔编号	岩性	测段深度 /m	测段高程 /m	主应力值/MPa			S_H 方向 /($^{\circ}$)		
				S_H	S_h	S_V			
地下厂房 BS1	石英二长岩、二长花岗岩	37.40	115.99	7.65	5.57	7.54	N80°W		
		45.40	107.99	8.37	5.25	7.75	—		
		55.40	97.99	10.16	6.00	8.01	—		
		65.40	87.99	9.22	5.32	8.28	N66°W		
		75.40	77.99	9.32	5.42	8.54	—		
		85.40	67.99	9.42	5.78	8.81	—		
		95.40	57.99	9.51	5.87	9.07	—		
		105.40	47.99	9.35	5.97	9.34	—		
		117.40	35.99	9.99	6.09	9.66	N75°W		
		127.40	25.99	10.09	6.45	9.92	—		
		137.90	15.49	10.58	6.68	10.20	—		
		148.40	4.99	10.42	6.78	10.48	—		
		151.40	1.99	10.97	7.07	10.56	—		
		地下厂房 BS2	石英二长岩二长花岗岩	36.70	113.3	16.37	8.87	8.92	—
				56.70	93.3	17.56	9.56	9.45	N79°E
66.70	83.3			16.16	9.16	9.72	—		
76.70	73.3			16.76	8.76	9.98	—		
86.70	63.3			17.86	9.86	10.25	—		
95.70	54.3			14.64	7.84	10.49	—		
106.20	43.8			14.05	8.05	10.76	N86°E		
116.70	33.3			13.65	7.65	11.04	—		
126.70	23.3			17.75	9.75	11.31	—		
136.70	13.3			15.85	8.85	11.57	N88°W		
高压管道岔管 BS3	石英二长岩	146.70	3.3	17.44	9.44	11.84	—		
		18.20	136.03	11.94	6.90	9.13	—		
		28.20	126.03	12.04	7.00	9.39	N62°W		
		38.20	116.03	12.13	6.67	9.66	N61°W		
		48.20	106.03	10.13	5.51	9.92	N67°W		
		58.20	96.03	10.65	6.03	10.19	—		
		68.20	86.03	12.01	6.55	10.45	—		
		78.20	76.03	10.85	6.23	10.72	N63°W		
		88.20	66.03	11.94	6.36	10.98	—		
		98.20	56.03	11.46	6.42	11.25	—		
高压管道岔管 BS4	石英二长岩	108.20	46.03	11.56	6.52	11.51	N69°W		
		114.70	39.53	11.62	7.42	11.68	—		
		124.70	29.53	12.56	7.10	11.95	N75°W		
		130.70	23.53	12.20	7.16	12.11	—		
		141.20	13.03	12.72	8.10	12.39	—		
		36.80	117.7	18.36	10.36	10.67	N80°E		
		62.80	91.7	15.62	10.62	11.36	—		
		72.80	81.7	15.22	9.22	11.63	—		
		82.80	71.7	16.82	12.82	11.89	—		
		93.30	61.2	18.42	11.92	12.17	—		
尾水支管区	石英二长岩、二	102.30	52.2	19.51	13.01	12.41	N72°W		
		111.30	43.2	16.59	10.59	12.65	—		
		127.90	26.6	14.76	9.76	13.09	N85°W		
		253.37	320.98	13.72	9.15	6.73	—		
		283.94	290.41	14.21	9.58	7.54	N80°W		
314.26	260.09	14.01	9.68	8.34	—				

BS5	长花岗岩互层	340.75	233.6	14.36	9.44	9.04	—
		391.34	183.01	17.56	11.44	10.38	N88°W
		439.71	134.64	18.13	12.01	11.67	—
		458.43	115.92	18.12	11.79	12.16	—
		496.62	77.73	18.84	12.57	13.17	—
		534.70	39.65	19.37	12.94	14.18	N72°W
		545.46	28.89	19.67	13.05	14.47	—
		560.34	14.01	16.52	11.19	14.86	—

BS2、BS4 和 BS5 测得的水平值偏高, 最大、最小水平主应力和垂直主应力之间的关系表现为 $S_H > S_V > S_h$ 。由前面的钻孔布置与区域地质构造的关系简图可知, 钻孔 BS1 和钻孔 BS3 得到的应力值偏低可能与钻孔位置与地质构造过于接近有关。由此可知工程区最大水平主应力为 $14.86 \text{ MPa} \pm 4 \text{ MPa}$, 最小水平主应力为 $8.38 \text{ MPa} \pm 4 \text{ MPa}$ 。应力值会随高程和平面位置的不同而有所变化。

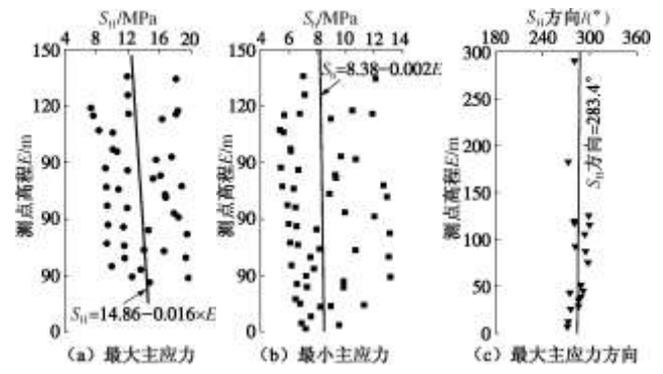


图 4 实测最大最小水平主应力值及最大水平主应力方向随高程分布图

Fig. 4 Values of measured maximum and minimum horizontal principal stresses and orientation of maximum horizontal principal stresses vs. elevations

总体来看, 工程区最大水平主应力的方向在 $N65^{\circ} - 80^{\circ}W$ 的范围内, 将各个测点所获得的最大水平主应力方向随高程变化关系拟合得到图 4 (c), 可知 S_H 方向 $= 283.4^{\circ} \pm 10^{\circ}$, 即 $N76.6 \pm 10^{\circ}W$ 。由此表明工程区现今构造应力场为以 NWW 方向或近 $E-W$ 向挤压为主。这一结果符合本区震源机制解得出的挤压应力场方向, 与世界应力图所反映的区域构造应力场方向亦相吻合^[16] (如图 5)。

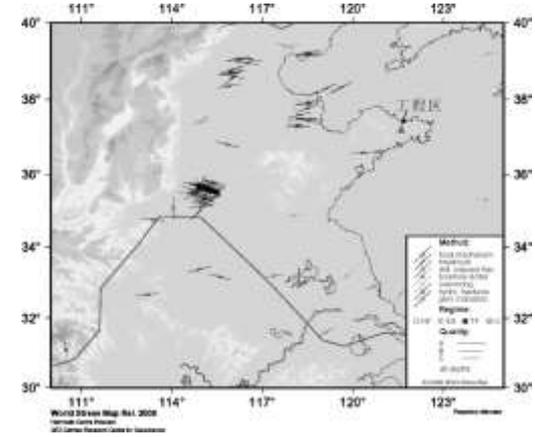


图5 世界应力图所揭示的工程区周边应力的应力状态^[16]
Fig. 5 Stress directions around engineering area indicated by World Stress Map^[16]

4 原地应力场数值模拟分析

由前面的实测结果可知,实测结果相对较为离散,且相对于近 6 km² 的拟建工程区来说,仅通过 5 个钻孔的实测结果来描述整个工程区原地应力场状态显得有些无能为力。在这种情况下,以实测结果为参照的边界条件,借助数值模拟手段反演整个工程厂区的应力分布特征,以方便工程设计使用。

4.1 模型建立及参数输入

以电站工程区地质平面图(1:2000)为基础,建立有限元计算模型。模型在水平面内东西向长度约为 2208.0 m,南北向长度约 2136.40 m;模型底面的地面高程为-150 m,上界面以地表面为自由面。模型的东、西、南、北和下边界为规则的平面,为方便加载,将模型东、西、南、北边界均设置为与最大、最小水平主应力平行(或垂直)的平面,这样可以在边界条件设置过程中忽略剪应力的影响。有限元模型的基本形状、尺寸、有限单元网格剖分如图 6 所示。本次数值计算采用大型三维有限元计算程序 3D-sigma,整个模型共划分出单元 32256 个,节点 140356 个。

由工程地质勘察报告可知,在数值模拟范围内,工程岩体主要为二长花岗岩和部分石英二长岩;研究区的岩体以 II 类岩体为主,靠近地表处和局部地区为 III 类岩体。主要工程区内也没有大的断层破碎带通过,受大型地质构造影响较小,只存在岩体结构面及规模较小的断层破碎带,宽度几厘米至十几厘米不等,因此这些小规模尺寸的不连续面和体不可能对整个模型的连续性产生影响^[15],在建模的过程中可以不予考虑,对计算结果也不会产生影响。有限元模型为弹性模型。

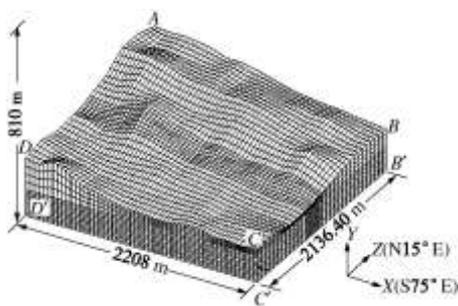


图6 有限元计算模型三维视图

Fig. 6 3D view map of finite-element numerical model

根据工程地质勘察报告推荐使用的岩石力学参数,结合本次有限元计算模型的特点,利用国内外公认的最新的 Hoek-Brown 准则估算研究区内岩体力学

参数,如图 7 所示,这些参数即为数值模拟中的输入参数。

以工程区内获得的原地应力测量实测数据为约束条件,反演模型边界的应力作用方式和大小。在此基础上,进行正演计算,得到研究区域内现今地应力场的空间分布规律。经过反演计算以及反复的边界参数调整,确定了未知载荷的作用方式以及量值,最终确定的边界载荷见图 7 所示,高程在 300 m 以上采用常数加载。

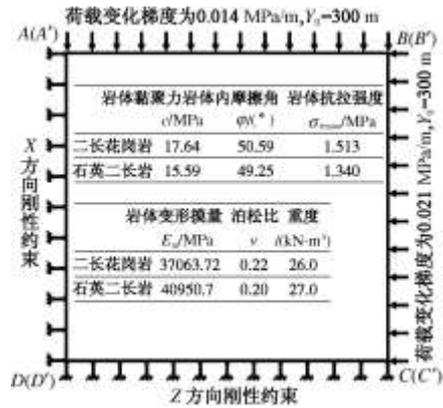
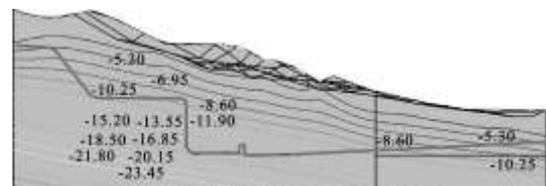


图7 有限元计算模型边界条件及参数输入

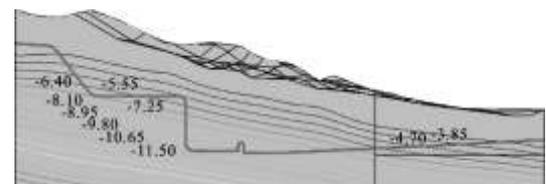
Fig. 7 Boundary conditions and input parameters for numerical model

4.2 数值模拟结果分析

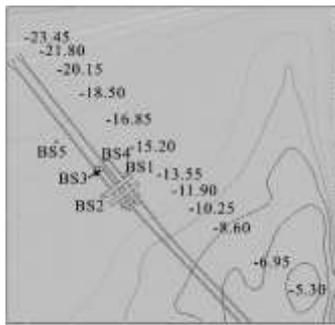
数值模拟计算结果如图 8 所示。通过数值模型总体来看,最大主应力和最小主应力都呈现出自上而下逐渐增加的规律(如图 8 (a)、(b) 所示),但受地形地貌影响,在地势低洼和地形起伏变化剧烈处出现应力集中,使得局部地段应力值增大,这也相应地影响了主应力的方向,出现一定程度地偏转。总体来看,重力作用和构造作用力对工程区内的应力分布状态具有重要的控制作用。最大主应力方向为呈 NWW,最小主应力方向呈近 NNE 向。



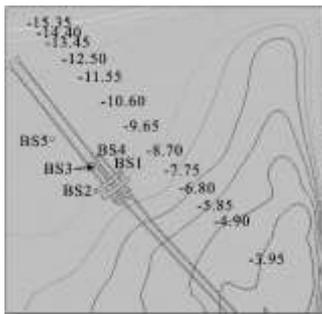
(a) 沿输水隧道轴线最大主应力分布图



(b) 沿输水隧道轴线最小主应力分布图



(c) 高程 37 m 平面最大主应力分布图



(d) 高程 37 m 平面最小主应力分布图

图 8 数值模拟结果图

Fig. 8 Results of numerical modeling

由数值模拟计算得到的厂房区的最大主应力范围在 13.55~16.85 MPa 之间, 而最小主应力范围在 7.75~10.65 MPa 之间; 高压岔管区的最大主应力范围在 15.20~18.50 MPa 之间, 而最小主应力范围在 8.70~11.50 MPa 之间; 输水管线经过区域较广, 而且埋深在不同部位各不相同, 310 高程输水管线的最大主应力范围为 8.60~11.90 MPa, 最小主应力范围为 5.55~7.25 MPa; 37 高程输水管线的最大主应力范围为 5.30~13.55 MPa, 最小主应力范围为 3.85~8.95 MPa; 如果管线埋深较浅, 则应力值偏小, 反之亦然。

数值模拟结果代表了工程区 II 类完整岩体中的原地应力分布水平。而对于局部受结构面和岩体中的破碎带影响较大的区域, 需要结合工程岩体质量和原地实测的结果来进行估算。

4.3 数值模拟结果和实测结果比较

为了更好分析数值模拟结果, 将数值模拟结果与实测结果进行比较。数值模型是按照比例尺和工程地质图构建的, 因此只要精确给出每个钻孔在数值模型坐标系中的位置, 便可取得该点在数值模型中的应力状态, 也可以得到应力状态随高程变化的关系。为了节省篇幅, 这里只选取钻孔 BS2 的实测结果与数值模拟结果进行比较, 如图 9 所示。由此可见, 数值模拟结果与实测结果对应较好, 故数值模型较好地反映了工程区的应力三维分布状态。

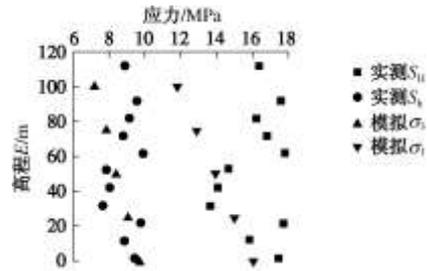


图 9 BS2 钻孔实测结果和数值模拟结果比较

Fig. 9 Comparison between measurements and numerical modeling results

5 综合分析

如图 2 所示, 工程区附近规模较大的断裂有 4 条, 其中近 SN 的 3 条断裂均为早中更新世活动断裂, 而近 EW 的东殿后断裂为晚更新世活动断裂, 倾向 N, 倾角 75~85°。由图 2 可知, 工程区范围内小规模断层走向均近 EW, 倾角范围在 65~85°之间, 说明工程区地质构造活动主要受近 EW 晚更新世活动断裂控制。该区域新近活动的断层均为陡倾角断层 (>60°), 由前面所提出的断层力学分析方法进行分析可知, 该工程区的应力状态应为 $S_V > S_H > S_h$ 或者 $S_H > S_V > S_h$, 即有利于正断层或者走滑断层活动的应力状态, 图 5 表明工程区周边近现代以来的发震断层主要为走滑断层, 那么可以得出工程区应力状态为走滑断层应力状态, 即 $S_H > S_V > S_h$; 由图 2 给出的走滑断层走向和最大水平应力方向之间的相对关系可知, 最大水平主应力方向与断层走向的夹角约 30°左右, 即 N60—120°W。5 个钻孔的测得的最大水平主应力方向为 283.4°±10°, 即为 N66.6—87.6°W, 且 5 个钻孔给出三向主应力关系为 $S_H > S_V > S_h$ 。结合前面关于实测结果的论述可知, 断层力学分析法和水压致裂原地应力实测关于三向主应力量值之间的关系和主应力方向的结论是完全一致, 并能相互验证。

如前面所述, 世界应力图给出的利用震源机制解和钻孔崩落得到的该区域的远场应力场方向也为近 EW 向。因此该工程的应力场方向为 N66.6—87.6°W。对于工程区的水平应力量值, 由表 2 可知, 实测所得到的应力量值相对较为离散, 特别是钻孔 BS1 和 BS3 的应力量值偏低, BS4 在底部测段的应力值也较低, 结合岩芯描述和测点布置与工程场区小构造的相对位置关系分析可知, 这些测点可能受到区域小构造的影响, 因而应力值较低, 故这些测点代表了受地质构造影响部位的应力量值水平。而钻孔 BS2, BS4 和 BS5 以及数值模拟得到的结果则代表了完整岩体中应力量值的分布水平。以高程平面 E=37.0 m 上厂房区附近的工程岩体为例, 在受地质构造影响的地段, 应力值

约为: $S_H=10.00\sim 12.00$ MPa, $S_h=10.00\sim 12.00$ MPa, 三向应力关系表现为 $S_H\geq S_V>S_h$; 完整岩体中的应力值约为: $S_H=13.50\sim 15.50$ MPa, $S_h=7.75\sim 9.65$ MPa, 三向应力关系表现为 $S_H>S_V>S_h$ 。实际上, 最大最小水平应力值会随着工程部位埋深的不同而有所变化, 如果埋深和工程岩体质量发生了变化, 可以参照文献[13, 14]所给定的方法进行估算。

6 结 语

综上所述, 工程区地应力场综合分析法充分利用了工程项目勘察阶段所取得的各方各面的资料来分析地应力场, 断层力学分析法可以和实测资料互相支持验证, 而三维数值模拟可以帮助理解实测点地质条件对实测数据的影响。这一综合分析方法让工程技术人员对工程区应力状态的认识更为深刻, 更为全面。

与以前的单一使用实测资料或者数值模拟反演技术来确定工程区地应力场相比, 综合分析法有着明显的优势, 为设计人员使用地应力数据提供了全面的视角, 但同时也给地应力场分析工作提出了更高的工作要求。

参考文献:

- [1] HAIMSON B C, CORNET F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF) [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2003, **40**: 1011 - 1020.
- [2] HAIMSON B C. The effect of lithology, inhomogeneity, topography, and faults, on in situ stress measurements by hydraulic fracturing, and the importance of correct data interpretation and independent evidence in support of results [C]// *Rock Stress and Earthquakes - Xie (ed.)*, 2010, Taylor & Francis Group, London.
- [3] ASK D, STEPHANSSON O, CORNET F H, et al. Rock stress, rock stress measurements, and the integrated stress determination method (ISDM) [J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2009, **42**: 559 - 584.
- [4] STEPHANSSON O, ZANG A. How to generate the Final Rock Stress Model (FRSM) at a site or an area[C]// *Rock Stress and Earthquakes - Xie (ed.)*, 2010, Taylor & Francis Group, London.
- [5] AMADEI B, STEPHANSSON O. Rock stress and its measurement[M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [6] ANDERSON E M. The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain[M]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951.
- [7] MARK D ZOBACK. Reservoir geomechanics[M]. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [8] 陈 颢. 地壳岩石的力学性能—理论基础与实验方法[M]. 北京: 地震出版社, 1988. (CHEN Yong. Mechanical performance of rock mass in the Earth's Crust-Theoretical basis and laboratory methods[M]. Beijing: Earthquake Publish Company, 1988. (in Chinese))
- [9] BYERLEE J D. Friction of rock[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1978, **116**: 615 - 626.
- [10] ANGELIER J. Determination of the mean principal stresses for a given fault population[J]. *Tectonophysics*, 1979, **56**: 17 - 26.
- [11] ANGELIER J. Tectonic analysis of fault slip data sets[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, **89**: 5835 - 5848.
- [12] 谢富仁, 刘光勋, 梁海庆. 滇西北及邻区现代构造应力场 [J]. *地震地质*, 1994, **16**(4): 329 - 337. (XIE Fu-ren, LIU Guang-xun, LIANG Hai-qing. Recent tectonic stress field in northwestern Yunnan province and its adjacent areas[J]. *Seismology and Geology*, 1994, **16**(4): 329 - 337. (in Chinese))
- [13] 王成虎, 郭启良, 侯砚和, 等. 地下水封油库场址地应力场及工程稳定性分析研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(5): 698 - 705. (WANG Cheng-hu, GUO Qi-liang, HOU Yan-he, et al. In-situ stress field and project stability of underground water-sealed oil depots[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(5): 698 - 705. (in Chinese))
- [14] 王成虎, 刘立鹏, 郭启良, 等. 地应力测量数据分析及对工程稳定性控制设计的意义[J]. *工程地质学报*, 2008, **16**(增刊 1): 377 - 381. (WANG Cheng-hu, LIU Li-peng, GUO Qi-liang, et al. One method to analyze the measured in-situ stress data and its significance to the project stability design[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, **16**(S1): 377 - 381. (in Chinese))
- [15] 何满潮, 黄润秋, 王金安, 等. 工程地质数值法[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (HE Man-chao, HUANG Run-qiu, WANG Jin-an, et al. Numerical modeling methods in engineering geology[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [16] HEIDBACH O, TINGAY M, BARTH A, et al. The release 2008 of the World Stress Map [DB/OL]. Potsdam, Helmholtz Centre Potsdam, 2008.