DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.02.016

文章编号: 1006-6616 (2020) 02-0167-08

利用室内和现场水压致裂试验联合确定地应力与岩石抗拉 强度

王成虎,高桂云,王 洪,王 璞

WANG Chenghu, GAO Guiyun, WANG Hong, WANG Pu

中国地震局地壳应力研究所地壳动力学实验室,北京 100085 Key Lab of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China

WANG C H, GAO G Y, WANG H, et al., 2020. Integrated determination of principal stress and tensile strength of rock based on the laboratory and field hydraulic fracturing tests [J]. Journal of Geomechanics, 26 (2): 167–174 DOI: 10.12090/j. issn. 1006–6616. 2020. 26. 02. 016

Abstract: The compliance of the drilling-rod hydraulic fracturing in-situ stress measurement can affect the determination accuracy of the maximum horizontal principal stress. Utilizing tensile strengths based on the hollow cylinder hydraulic fracturing test to replace reopening pressures to calculate maximum horizontal principal stresses is a very promising option to cut down the negative effects from the drilling-rod test system. Eight hydraulic fracturing in-situ stress measurement tests were conducted in a 65 m-deep borehole in an under-construction railway tunnel in Fujian Province. Seventeen hollow cylinders made from the cores recovered from the same borehole were fractured hydraulically in laboratory. The average tensile strength based on the hollow cylinder hydraulic fracturing test is 8.40 MPa, which is close to 8.22 MPa, that determined by the classic hydraulic fracturing in-situ stress measurement. For the 8 in-situ stress measurements within a very narrow depth range of 20 m, the average value of the minimum horizontal principal stress is 8.41 MPa, and the average value of the maximum horizontal principal stress based on the hollow-cylinder tensile strength is 16.88 MPa, which is close to 16.70 MPa, the average value that calculated by the reopening pressure. The relationship between the three major principal stresses is $\sigma_{\rm H} > \sigma_{\rm V} >$ $\sigma_{\rm h}$, which is favorable for the strike-slip faulting. Based on the comparative analysis, for the drilling-rod hydraulic fracturing test system, when the test depth is shallow and the system compliance is minor, there are no marked differences in the calculated maximum principal stresses between based on the reopening pressures and the hollowcylinder-test tensile strengths, which proves that the tensile strengths based on the hollow-cylinder test can be utilized to calculate the maximum horizontal principal stress during the hydraulic fracturing in-situ stress measurement; at the same time, the tensile strength of rock mass in the test interval, determined by the field hydraulic fracturing test with minor test system compliance, is definitely reliable for use.

Key words: hydraulic fracturing; in-situ stress measurement; hollow cylinder test; tensile strength of rocks; maximum horizontal principal stress

摘 要: 钻杆式水压致裂原地应力测试系统的柔性会影响最大水平主应力的计算精度。利用空心岩柱液 压致裂试验获得的岩石抗拉强度来取代重张压力计算最大水平主应力是降低钻杆式测试系统柔性的负面 影响的重要途径。在福建某隧道深度为65m的钻孔内开展了8段的高质量水压致裂原地应力测试,随后 利用钻孔所揭露的完整岩芯开展了17个岩样的空心岩柱液压致裂试验。利用空心岩柱液压致裂所得的抗

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41574088)

第一作者简介:王成虎(1978-),男,博士,研究员,主要从事地应力与地质力学、断层力学等相关研究。E-mail: huchengwang@163.com 收稿日期: 2019-11-16;修回日期: 2019-12-27;责任编辑:吴芳

引用格式:王成虎,高桂云,王洪,等,2020.利用室内和现场水压致裂试验联合确定地应力与岩石抗拉强度 [J].地质力学学报,26 (2):167-174 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.02.016

拉强度平均值为 8.40 MPa, 与经典水压致裂法确定的岩体抗拉强度 8.22 MPa 接近。对于 20 m 的范围内 8 个测段的原地应力量值,最小水平主应力平均值为 8.41 MPa,基于重张压力 P_r 的最大水平主应力平均值 为 16.70 MPa;基于空心岩柱抗拉强度的最大水平主应力量值平均值为 16.88 MPa,两种方法获得的最大 水平主应力平均值基本一致。最大最小水平主应力与垂直主应力之间的关系表现为 $\sigma_{\rm H} > \sigma_{\rm V} > \sigma_{\rm h}$,这种应力 状态有利于区域走滑断层活动。通过对比分析可知,对于钻杆式水压致裂原地应力测试系统,当测试深 度小且测试系统柔性小时,基于重张压力和基于空心岩柱抗拉强度得到的最大水平主应力量值差别不大, 这说明基于空心岩柱的岩石抗拉强度完全可以用于水压致裂最大水平主应力的计算,同时基于微小系统 柔性的水压致裂测试系统获得的现场岩体强度也是可靠的。

关键词:水压致裂;地应力测量;空心岩柱试验;岩石抗拉强度;最大水平主应力

中图分类号: TU45 文献标识码: A

0 引言

水压致裂原地应力测试方法是目前工程技术 人员和科学家认识原地应力场的最主要的方法之 一 (Haimson and Cornet, 2003; 王成虎, 2014)。目 前国内外广泛使用的水压致裂测试系统主要分为 三大类,包括钻杆式、缆线式和多功能综合类, 三类系统各有利弊(王成虎等, 2012)。对于这三 种测试系统,测试系统误差主要来源于测试压力-时间曲线上关键参数重张压力 (P_x) 和闭合压力 (P_a) 的判读,目前较为成熟的方法大约六种,所 产生的误差为 10% 左右 (Amadei and Stephansson, 1997),由于计算公式的原因,最大水平主应力的 量值的误差为 30% 左右 (Amadei and Stephansson, 1997;中国地震局地壳应力研究所和日本电力中央 研究所, 1999)。王成虎等(2012)曾指出利用钻 杆式测量设备开展水压致裂原地应力测试时,压 裂段测试重张压力 (P_{i}) 的值受测试系统柔性的 影响较大,以此用经典水压致裂 Hubbert-Willis 公 式得到的最大水平主应力会产生偏差,如果能利 用实验室岩石抗拉强度参与计算,即可一定程度 降低测试系统柔性的负面影响。同时,水压致裂 测试中测试段岩体的抗拉强度 (Hudson et al., 1973)和孔壁破裂压力确定问题是影响最大水平 主应力计算的关键参数 (Daneshy, 1973; Zoback and Pollard, 1978; Haimson and Zhao, 1991)。当前 代表性的岩石抗拉强度测试方法包括直接拉伸试 验、巴西劈裂试验、三点或四点弯曲拉伸试验、 空心岩柱试验等 (Coviello et al., 2005; Perras and Diederichs, 2014)。由于抗拉强度测试值的离散性 特征, Hudson 曾建议根据不同的实验岩石力学原 理选择加载条件相似的试验方法 (Hudson, 1970)。 Haimson 等开展了室内空心岩柱(岩块)水压致裂 试验来研究破裂压力和抗拉强度,发现破裂压力 与加载速率的正比关系和与试样的中空小孔直径 之间的尺寸效应关系 (Haimson and Zhao, 1991; Cuisiat and Haimson, 1992)。水压致裂原地应力测 量法中传统最大水平主应力的计算存在很大误差 (Ito et al., 1999, 2006, 2010; Haimson and Cornet, 2003; 谭成轩等, 2019; 陈群策等, 2019), 因此 Haimson 等建议使用室内空心岩柱微型水压致裂测 试所获得的破裂压力或者抗拉强度来估算最大水 平主应力 (Haimson and Zhao, 1991; Cuisiat and Haimson, 1992)。Yamashita et al. (2010)利用空 心岩柱试验获得的岩石抗拉强度重新计算了日本 阪神地震 Atera 断层的震后地应力状态,他们认为 在深孔地应力测量中由于测试系统柔性的过大问 题,利用重张应力计算的最大水平主应力严重低 估了区域最大主应力水平, 而基于空心岩柱抗拉 强度计算的最大水平主应力很好的支持了 Atera 断 层区域的地壳动力学观测结果。Chang et al. (2014) 在已有研究的基础上,总结出了将空心岩 柱试验测定的抗拉强度用于水压致裂最大水平主 应力计算的经验公式,并以此确定了 Seokmo 岛的 地应力状态。

为了降低水压致裂最大水平主应力估算过程 中对重张压力(P_r)的依赖,王成虎等(2017) 研发了"多直径岩芯液压致裂岩石抗拉强度快速 试验机",并利用这台快速试验机开展了广泛的空 心岩柱液压致裂试验,确定了水压致裂测试段岩 石的抗拉强度值。得到了抗拉强度后,利用室内 空心岩柱液压致裂测试的岩石抗拉强度结果取代 利用测试曲线确定的重张压力 P_r,并分析了两种 方法估算最大水平主应力之间的差别。这种方法 为提高水压致裂原地应力测量中最大水平主应力 的估算提供了新的可靠途径。同时,通过对比现 场和室内水压致裂测试获得的岩石抗拉强度,发 现两者基本一致,能够发挥相互校验的功能。文 章将利用空心岩柱液压致裂试验获得的岩石抗拉 强度来取代重张压力计算最大水平主应力,从而 降低钻杆式测试系统柔性的负面影响,利用室内 和现场水压致裂试验联合确定福建某隧道内的地 应力与岩石抗拉强度值。

1 现场和室内水压致裂测试原理介绍

1.1 现场水压致裂原地应力测试原理简介

水压致裂原地应力测量是以弹性力学为基础, 对岩体进行线弹性、各向同性和密闭完整性假设, 同时认为其中一个主应力与孔轴相平行。基于这 些理论和假设,水压致裂力学模型可简化为平面 应力问题,具体的力学公式推导参见文献 (Amadei and Stephansson, 1997; Haimson and Cornet, 2003),为了引述讨论方便,对此次研究需要用到 的经典水压致裂原地应力计算公式进行简要介绍, 见公式(1)—(3)。现场水压致裂测量地应力 时,首先进行第一次压裂得到破裂压力值,然后 重复水压致裂过程,由于围岩第一循环已经破裂, 当压力达到 P,时裂缝便重新张开,抗拉强度 T 可 以忽略,即求算公式如公式(4)—(5):

$$P_{\rm b} = 3\sigma_{\rm h} - \sigma_{\rm H} - P_0 + T \tag{1}$$

$$\sigma_{\rm h} = P_{\rm s} \tag{2}$$

$$\sigma_{\rm H} = 3P_{\rm s} - P_{\rm h} - P_{\rm 0} + T \tag{3}$$

$$P = 3\sigma_1 - \sigma_2 - P_2 \tag{4}$$

$$\sigma_{\rm T} = 3P - P - P_{\rm c} \tag{5}$$

其中, P_b 为破裂压力, MPa; P_s 为闭合压力, MPa; P_0 为孔隙压力, MPa; T 为抗拉强度, MPa; $\sigma_{\rm H}$ 为最大水平主应力, MPa; $\sigma_{\rm h}$ 为最小水 平主应力, MPa。

1.2 室内空心圆柱液压致裂测试简介

如前面所述, Haimson and Zhao (1991)、 Yamashita et al. (2010)、Chang et al. (2014)都利 用空心岩柱液压致裂开展了相关试验,并且利用 测定的岩石抗拉强度估算水压致裂最大水平主应 力值,获得了良好的应用效果。钻杆式水压致裂 地应力测试系统在中国大陆得到了良好地推广应 用,由于其系统结构设计极大地满足了国内各行 各业的现场工作需求(谭成轩等,2019;陈群策等,2019)。在这种大的工程背景下,利用室内试验来提高水压致裂的最大水平主应力测量精度就是较好的技术途径之一。对于空心岩柱液压致裂测试,Jaeger and Cook (2007)指出空心圆筒承受内部流体压力和轴向荷载时,通常破坏呈现为平面径向拉伸破裂,基本的力学模型如图 1a 所示。



 σ_z —轴向应力; σ_r —径向应力; σ_{θ} —切向应力; P_r —内孔液压力; P_a —轴向压力; r_1 —岩样内孔半径; R_2 —岩样外半径

图1 空心岩柱试验力学模型与加载示意图

Fig. 1 Mechanical model of the hollow cylinder rock specimen test and the loading diagram

多直径岩芯液压致裂岩石抗拉强度快速试验 机的研发细节和技术要点参见文献(王成虎等, 2017),试验机的基本结构图如图1b所示。快速 试验机包括加载系统、压力监测和数据采集系统、 样品夹持系统。对于样品夹持,满足常见规格尺 寸的地质勘探钻孔岩芯,试验岩石力学样品的径 高比一般为1:1~1:2(王成虎等,2017)。样品 加工需将岩芯切割,两端磨平,然后钻造中空孔。 加载系统包括施加轴压和孔内内压。试验机压力 监测能够实时监测轴压和内孔液压,数据采集系 统能够同步在计算机上实现监测和数据采集。岩 石抗拉强度计算如公式6所示,具体的处理过程参 见文献(王成虎等,2017)。

$$\sigma_{\theta} = -\frac{P_{\rm r}(R_2^2 + r_1^2)}{R_2^2 - r_1^2} \tag{6}$$

2 现场和室内水压致裂测试工作介绍

2.1 现场水压致裂原地应力测试工作简介

赣龙铁路某隧道在施工过程中发现了塌方和 围岩片帮现象。由于该隧道在前期勘察阶段只开 展了应力预测工作,没有开展详细的地应力实测, 故受施工单位的委托,项目组在隧道内一个深 65 m、孔径为 Φ76 mm 的钻孔内开展了水压致裂地 应力测量工作。隧道设计单位和施工单位对隧道 洞身部位的应力状态非常关注,要求尽可能地提 供高精度的地应力状态参数。鉴于此,在隧道内 现场测试结束后,项目组利用现场取得的大量岩 芯开展了空心岩柱液压致裂试验,利用室内试验 测得的岩石抗拉强度来计算最大水平主应力。测 点和取样点位于埋深 400 m 隧道内的钻孔中。钻孔 揭露岩性为下古生界奥陶一志留系 (0—S) 板岩。 岩芯呈灰褐、灰色,微风化,局部节理裂隙较发 育,碎屑粒径多数为 0.4~0.5 mm。

现场测量过程中,测试设备与王成虎等 (2012)所记录的测试系统一致,关键技术环节采 用了新设备,如采用了项目组研发的高压流体控 制系统(王成虎等,2014)、数据采集系统(王成 虎等,2016)和数据处理系统(中国地震局地壳 应力研究所,2013),同时采用低系统柔性的双回 路测试设备,系统柔性对重张压力的影响可以忽 略不计,测试效果良好。测试过程中,为了获得 质量更高的测试曲线,遵循公式(1)所阐释的原 则,高压泵流量设定为8.0 L/min。测试过程完全 遵照文献(Amadei and Stephansson,1997; Haimson and Cornet,2003)所描述的标准测试过程,取得 了良好的测试数据,各个测试段的记录曲线如图2 所示。在该孔21.00~42.0 m的深度域内一共获得 了8个标准的水压致裂原地应力测量曲线。参照文 献 (Amadei and Stephansson, 1997; Haimson and Cornet, 2003) 提供的经典方法,由重张压力和闭合压力分别计算出各测段处的最大水平主应力和最小水平主应力值,如表1所示。由表1可知,利用现场低系统柔性测试设备获得岩体抗拉强度相对稳定,平均值为8.22 MPa,标准差为1.76 MPa。



图 2 某隧道内钻孔水压致裂原地应力测量压力-时间曲线

Fig. 2 Recorded *P-t* curves of hydraulic fracturing campaign in a railway tunnel

表 1 水压致裂原地应力测量成果表

Table 1 Summary of hydraulic fracturing stress measurements

深度	$P_{\rm b}$	P _r	$P_{\rm s}$	P_0	Т	$\sigma_{ m H}$	$\sigma_{\rm h}$	$\sigma_{ m V}$	σ_{H}
/m	/MPa								
21.7~22.3	15.74	7.04	7.41	0.41	8.70	14.78	7.41	11.39	80°
23.7~24.3	15.30	8.47	8.57	0.43	6.83	16.81	8.57	11.44	97°
25.7~26.3	17.87	9.87	8.82	0.45	8.00	16.14	8.82	11.49	
27.7~28.3	19.88	8.71	9.30	0.47	11.17	18.72	9.30	11.55	
29.7~30.3	16.69	7.75	8.39	0.49	8.94	16.93	8.39	11.60	
31.7~32.3	16.02	8.49	7.57	0.51	7.53	13.71	7.57	11.66	
39.7~40.3	13.39	8.46	9.69	0.59	4.93	20.02	9.69	11.87	
41.7~42.3	18.33	8.68	9.11	0.60	9.65	18.05	9.11	11.93	

2.2 空心岩柱液压致裂测试简介

从现场选择了岩芯开展空心岩柱液压致裂室 内试验来确定岩石抗拉强度。将岩样设计为高径 比为1:1的标准尺寸,岩样钻孔设计为盲孔,岩 样两端磨平,以保证测试过程中的端面密封效果, 最后在岩样中心对中钻造中心盲孔(图3)。所用 岩样为直径71.5 mm的岩芯,盲孔孔径分别为 20 mm、28 mm,孔深分别为35 mm、45 mm、 55 mm。结合其他学者关于注液速率的研究试验, 确定0.02 MPa/s这一适中的加压速率,以减少试 验的变量因素,便于比对试验结果。



(b) 岩样劈裂为两半

图 3 微型压裂后的岩样照片

Fig. 3 Photos of the rock specimen after the hydraulic fracturing tensile test

按上述试验设计方案,完成试验后,共有17 个理想的试验数据满足进一步分析要求,计算平 均值、标准差,并将这些数据绘制成直方图(图 4)。由图4可知,得到的平均值都较为接近,只 是部分试验数据的标准差较大,其中一个组的试 验数据标准差为0.519。试验数据较为离散,应该 与抗拉强度测试本身的复杂性有关,也与岩样本 身的不均质性有关 (Coviello et al., 2005; Perras and Diederichs, 2014)。根据图4所示数据计算得 到的长汀板岩的岩样抗拉强度为8.4 MPa。

3 两种不同最大水平主应力计算方法的对比分析

基于表1中的原始水压致裂测试数据,并利用





公式(3)、(5)分别计算得到利用岩石抗拉强度 的最大水平主应力量值和利用重张压力 P. 的最大 水平主应力量值(表2)。同时利用表2中的数据 进行绘图(图5)。由表2和图5可知,无论哪一 种方法,最大最小水平主应力与垂直主应力之间 的关系表现为 $\sigma_{\mu} > \sigma_{\nu} > \sigma_{\mu}$,这种应力状态有利于区 域走滑断层活动。水压致裂原地应力测试工作在 20 m 的深度范围内展开, 20 m 的测试范围内应力 梯度和岩体的非均匀性对应力量值的影响轻微, 故可以对测试值进行数学统计分析。最小水平主 应力量值在 20 m 的范围内波动较小,范围为 7.41 ~9.69 MPa, 平均值为 8.41 MPa, 标准差为 0.75 MPa; 基于重张压力 P, 计算得到的最大水平主应 力量值范围为 13.71~20.02 MPa, 平均值为 16.70 MPa,标准差为 1.92 MPa;基于空心岩柱液压致 裂试验测定的抗拉强度计算得到的最大水平主应 力量值范围为 14.28~23.29 MPa, 平均值为 16.88 MPa,标准差为 2.69 MPa。将每个测段基于两种 方法获得的最大水平主应力进行统计分析, 计算 平均差系数,如表2所示,平均差系数最大为 8%, 最小为1%, 大部分测段的平均差系数≤5%, 由此可知,两种方法得到的最大水平主应力量值 差别不大,两种方法得到的平均值也证明了这一 点。然后,基于抗拉强度的最大水平主应力量值 的标准差为 2.69 MPa, 大于基于重张压力的最大 水平主应力量值的标准差 1.92 MPa, 说明基于抗 拉强度得到最大水平主应力量值较为离散。两种 方法计算得到的最大水平主应力值相差较小,相 对较为稳定, Haimson and Cornet (2003) 曾指出, 水压致裂原地应力测量中最小水平主应力的误差

范围一般为10%~15%;最大水平主应力的误差范围一般为30%~45%,故这两种方法得到的最大主应力量值都是可以接受的。

表 2 基于两种方法计算的水压致裂原地应力测量成果表

Table 2 Summary of hydraulic fracturing stress measurements based on two methods

隧道内测试	自然	$\sigma_{ m h}/$	$\sigma_{_{ m V}}/$	$^{\odot}\sigma_{ m H}^{1}$ /	$^{\odot}\sigma_{ m H}^{2}$ /	③平均差
深度/m	埋深/m	MPa	MPa	MPa	MPa	系数
21.73~22.28	422.01	7.41	11.39	14.78	14.28	1%
23.73~24.28	424.01	8.57	11.44	16.81	18.18	5%
25.73~26.28	426.01	8.82	11.49	16.14	16.34	1%
27.73~28.28	428.01	9.30	11.55	18.72	15.75	8%
29.73~30.28	430.01	8.39	11.60	16.93	16.19	2%
31.73~32.28	432.01	7.57	11.66	13.71	14.38	3%
39.73~40.28	440.01	9.69	11.87	20.02	23.29	8%
41.73~42.28	442.01	9.11	11.93	18.05	16.61	4%

①—基于公式(5)计算, P_r 采用经典水压致裂法利用 P-t 曲线确定; ②—基于公式(3)计算, 岩石抗拉强度 T采用空心岩柱液压 致裂试验确定; ③—平均差系数采用常用的统计学公式计算, 以 每个测试段的两个值 $\sigma_{\rm H}^1$ 、 $\sigma_{\rm H}^2$ 为样本进行计算



Fig. 5 Plot of three principal stresses versus depth

4 讨论

水压致裂原地应力测量过程中可以获得测试 段岩体的抗拉强度,公式也非常简单,就是破裂 压力减去重张压力的值,在试验研究中,利用该 方法获得的抗拉强度值如表1所示,利用该方法获 得的岩石抗拉强度平均值为8.22 MPa,标准差为 1.75 MPa, 这一平均值与前面利用空心岩柱液压 致裂试验获得的岩石抗拉强度 8.40 MPa 接近, 而 且标准差也相当。此次测试在隧道内展开,采用 Φ36 mm 细钻杆双回路测试系统,测试深度为 21~ 42 m, 水压致裂原地应力测量系统的柔性非常小, 仅相当于常见钻杆式水压致裂原地应力测试系统 的 1/10。因此基于重张压力确定的原位岩体抗拉 强度和室内空心岩柱液压致裂试验确定的岩石抗 拉强度基本一致。岩石抗拉强度测定的方法较多, 而且基本每种方法都存在一些局限性,测试结果 也较为离散。此次的原位测试试验和室内测试试 验研究成果说明,使用空心圆柱液压致裂试验来 测定岩石抗拉强度并以此确定水压致裂原地应力 测试中的最大水平主应力的可靠性较高:试验结 果也说明可以利用室内试验和原位水压致裂试验 联合确定岩石和岩体的抗拉强度。具体措施是在 获得可靠的现场水压致裂 P-t 曲线的前提条件下, 把试验段位置的岩芯取回到室内开展空心岩柱液 压致裂试验,一方面可以提高最大水平主应力的 计算精度和可靠性,另一个方面可以帮助可靠确 定岩体和岩石的抗拉强度,而准确的抗拉强度值 有助于开展岩体破裂诱发发展过程的分析研究。

通过对公式(1)分析可知,如果利用室内实 验获得的抗拉强度来计算水压致裂原地应力测试 中的最大水平主应力,那就需要确定水压致裂曲 线的破裂压力 P_b,破裂压力也会受到多重因素的 影响,特别是加压速率是影响破裂压力值的重要 因素之一; Amadei and Stephansson (1997) 推荐了 宽泛的加压速率为0.1~2 MPa/s,并指出加压速率 取决于现场增压泵的恒定流量。Chang et al. (2014)利用花岗岩开展试验时发现注压速率由 0.03 MPa/s 升高到 9 MPa/s 时, 岩石抗拉强度值 呈增大的趋势,并利用已有研究中的试验结果给 出了相应的抗拉强度值随加压速率增加的拟合公 式,同时指出增压速率每增加一个数量级,抗拉 强度会增加21%。因此在水压致裂原地应力测试 中,首先一定要控制测试过程的加压速率,如果加 压速率过高,会导致得到的 P_b 不准确,也就无法利 用室内实验测定的抗拉强度来计算最大水平主应力。 通过对比试验研究中 P_b 值的分布特征可以看出 P_b 值的变化直接会导致 $\sigma_{\rm H}$ 值发生十分显著的变化, 例如测试中 39.73~40.28 m 的深度段的异常 P, 低值 直接导致了该段的最大水平主应力值异常高值。

5 结论

钻杆式水压致裂原地应力测试系统的柔性会 严重影响最大水平主应力的计算精度,此次研究 比较了利用重张压力 P,和利用空心岩柱液压致裂 试验获得的岩石抗拉强度来计算最大水平主应力 的优缺点,同时对比确定了测试段岩体的抗拉强 度,为现场测定岩体抗拉强度提供了新渠道。通 过以上系统的研究工作,得到如下结论。

(1) 通过细致严谨的室内试验研究,获得了福 建汀州地区志留系板岩的抗拉强度值。空心岩柱 液压致裂所得抗拉强度平均值为 8.4 MPa,标准差 为 1.87 MPa。利用破裂压力 P_b与重张压力 P_r之 差获得的板岩岩石抗拉强度平均值为 8.22 MPa, 标准差为 1.76 MPa。现场试验测定的结果与室内 试验结果具有可比性。此次研究结果也说明可以 利用室内试验和原位水压致裂试验联合确定岩石 和岩体的抗拉强度。

(2)此次研究在 20 m 的范围内获得了 8 段原 地应力量值,可以忽略应力梯度和岩体不均匀性 对现场测试应力量值的影响。最小水平主应力量 值,范围为 7.41~9.69 MPa,平均值为 8.41 MPa, 标准差为 0.75 MPa;基于重张压力 P_r 计算得到的 最大水平主应力量值范围为 13.71~20.02 MPa,平 均值为 16.70 MPa,标准差为 1.92 MPa;基于空心 岩柱液压致裂试验测定的抗拉强度计算得到的最 大水平主应力量值范围为 14.28~23.29 MPa,平均 值为 16.88 MPa,标准差为 2.69 MPa。最大最小水 平主应力与垂直主应力之间的关系表现为 $\sigma_{\rm H} > \sigma_{\rm v} >$ $\sigma_{\rm h}$,这种应力状态有利于区域走滑断层活动。该 区域最大水平主应力方向为近东西向。

(3)通过对比分析可知,对于钻杆式水压致裂 原地应力测试系统,当测试深度小且测试系统柔 性小时,基于重张压力和基于空心岩柱液压致裂 岩石抗拉强度得到的最大水平主应力量值差别不 大,这说明基于空心岩柱液压致裂测试获得的岩 石抗拉强度完全可以用于水压致裂最大水平主应 力的计算。但在利用岩石抗拉强度计算水压致裂 测试最大水平主应力时,还需考虑加压速率对破 裂压力的影响因素,只有准确确定了破裂压力, 才能更好地利用岩石抗拉强度得到更为准确的最 大水平主应力。

References

- AMADEI B, STEPHANSSON O, 1997. Rock stress and its measurement [M]. Dordrecht: Springer.
- CHANG C D, JO Y, OH Y, et al., 2014. Hydraulic fracturing in situ stress estimations in a potential geothermal site, Seokmo Island, South Korea [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47 (5): 1793-1808.
- CHEN Q C, SUN D S, CUI J J, et al., 2019. Hydraulic fracturing stress measurements in xuefengshan deep borehole and its significance [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 853-865, doi: 10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2019. 25. 05. 070. (in Chinese with English abstract)
- COVIELLO A, LAGIOIA R, NOVA R, 2005. On the measurement of the tensile strength of soft rocks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 38 (4): 251-273.
- CUISIAT F D, HAIMSON B C, 1992. Scale effects in rock mass stress measurements [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 29 (2): 99-117.
- DANESHY A A, 1973. A study of inclined hydraulic fractures [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 13 (2): 61-68.
- HAIMSON B C, CORNET F H, 2003. 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 and Mining Sciences, 40 (7-8): 1011-1020.
- HAIMSON B C, ZHAO Z L, 1991. Effect of borehole size and pressurization rate on hydraulic fracturing breakdown pressure [C] //Proceedings of the the 32nd U. S. symposium on rock mechanics. Norman: American Rock Mechanics Association.
- HUDSON J A, 1970. A critical examination of indirect tensile strength tests for brittle rocks [D]. Minneapolis: University of Minnesota.
- HUDSON J A, HARDY M P, FAIRHURST C, 1973. The failure of rock beams: Part II-Experimental studies [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 10 (1): 69-82.
- Institute of China Seismological Bureau Crustal Stress, CRIEPI, 1999. Study on the formation and propagation of hydrostatic cracking [M]. Beijing: Earthquake Press. (in Chinese)
- Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, 2013.
 " Data acquisition and processing code for hydraulic fracturing insitu stress measurement system." Abbreviated as DADPC for HF: No. 2013SR122558 [CP]. 2013-08-30 [2013-11-09].
- ITO T, EVANS K, KAWAI K, et al., 1999. Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36 (6): 811-826.
- ITO T, IGARASHI A, KATO H, et al., 2006. Crucial effect of system compliance on the maximum stress estimation in the hydrofracturing method: Theoretical considerations and field-test verification [J]. Earth, Planets And Space, 58 (8): 963-971.
- ITO T, SATOH T, KATO H, 2010. Deep rock stress measurement by

hydraulic fracturing method taking account of system compliance effect [C] //Proceedings of ISRM international symposium on insitu rock stress. Beijing: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

- JAEGER J C, COOK N G, ZIMMERMAN R W, 2007. Fundamentals of rock mechanics [M]. 4th ed. London: Wiley-Blackwell.
- PERRAS M A, DIEDERICHS M S, 2014. A review of the tensile strength of rock: concepts and testing [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 32 (2): 525-546.
- TAN C X, ZHANG P, LU S L, et al., 2019. Significance and role of in-situ crustal stress measuring and real-time monitoring in earthquake prediction research [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 866-876, doi: 10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2019. 25. 05. 071. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, 2014. Brief review and outlook of main estimate and measurement methods for in-situ stresses in rock mass [J]. Geological Review, 60 (5): 971-996. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, SONG C K, XING B R, 2012. Compliance of drilling-rod system for hydro-fracturing in situ stress measurement and its effect on measurements at great depth [J]. Geoscience, 26 (4): 808-816. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, WANG R T, WANG C Q, 2017. Development of multiplediameter core hydraulic fracturing machine to test tensile strength of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36 (S1): 3321-3331. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, WANG X J, HOU Y H, et al., 2014-04-09. Highpressure fluid control panel for hydraulic fracturing in-situ stress measurement system: CN201320624928.8 [P].
- WANG C H, WANG X J, MAO J Z, et al., 2016-01-22. Data acquisition instrument for hydraulic fracturing in-situ stress measurement system: CN201310471715.0 [P].

YAMASHITA F, MIZOGUCHI K, FUKUYAMA E, et al., 2010.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID): 可扫码直接下载文章电子版,听到作者语音介绍 本篇论文及相关写作思路 Reexamination of the present stress state of the Atera fault system, central Japan, based on the calibrated crustal stress data of hydraulic fracturing tests obtained by measuring the tensile strength of rocks [J]. Journal of Geophysical Research, 115 (B4): B04409.

ZOBACK M D, POLLARD D D, 1978. Hydraulic fracture propagation and the interpretation of pressure-time records for in-situ stress determinations [C] //Proceedings of the 19th U. S. symposium on rock mechanics. Stateline, Reno: American Rock Mechanics Association: 14-22.

附中文参考文献

- 陈群策,孙东生,崔建军,等,2019. 雪峰山深孔水压致裂地应力测 量及其意义 [J]. 地质力学学报,25 (5):853-865, doi: 10.12090/j. issn. 1006-6616.2019.25.05.070.
- 谭成轩,张鹏,路士龙,等,2019. 原位地应力测量与实时监测在地 震预报研究中的作用和意义 [J]. 地质力学学报,25 (5):866-876, doi: 10.12090/j. issn. 1006-6616.2019.25.05.071.
- 王成虎, 宋成科, 邢博瑞, 2012. 水压致裂应力测量系统柔性分析 及其对深孔测量的影响 [J]. 现代地质, 26 (4): 808-816.
- 王成虎, 2014. 地应力主要测试和估算方法回顾与展望 [J]. 地质 论评, 60 (5): 971-996.
- 王成虎,王显军,侯砚和,等,2014-04-09.水压致裂原地应力测量 高压流体控制系统:CN201320624928.8 [P].
- 王成虎,王显军,包林海,等,2016-01-22.水压致裂法原地应力测量数据采集系统:CN201310471715.0 [P].
- 王成虎,王仁涛,王春权,2017.多直径岩芯液压致裂岩石抗拉强 度快速试验机研发 [J].岩石力学与工程学报,36 (S1): 3321-3331.
- 中国地震局地壳应力研究所,日本电力中央研究所,1999.水压致 裂裂缝的形成和扩展研究 [M].北京:地震出版社.
- 中国地震局地壳应力研究所,2013.水压致裂原地应力测量数据采 集与分析系统 [简称:水压致裂测试数采分析系统,V1.0]: 2013SR122558 [CP].2013-08-30 [2013-11-09].

