

张小林, 应黎, 赵冬安. 超深勘察钻孔 ASR 法地应力测试技术应用. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 198-207. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220118.

Zhang Xiaolin, Ying Li, Zhao Dong'an. Application of In-Situ Stress Measurement Technology of Ultra Deep Survey Borehole ASR Method. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 198-207. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220118.

超深勘察钻孔 ASR 法地应力测试技术应用

张小林, 应黎, 赵冬安

中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031

摘要: 宝灵山隧道是某铁路先开段的重难点控制性工程, 其中宝灵山 DZ-06 勘察钻孔深 2 118.00 m, 是该段深度最大的控制性勘察钻孔。在钻孔的 2 072.53、2 084.27 m 深度选取合适岩心, 采用 ASR 法(非线性应变恢复法)开展了地应力测试, 并与该钻孔采用水压致裂法获取的地应力结果进行对比, 同时验证了 ASR 法对于估测超深钻孔的三维地应力大小和方向的实用价值。结果表明: 在钻孔 2 072.53~2 084.27 m 深度范围, ASR 法 2 个测点获取的最大主应力、中间主应力、最小主应力平均值分别为 59.70、54.03、30.74 MPa, 最大主应力近水平, 方向近 SN 向, 说明该区域以水平构造应力为主; ASR 法的最大主应力测试结果均值与水压致裂法测试结果回归值一致性很好, 最小主应力测试结果均值与水压致裂法测试结果回归值的一致性处于合理范围, 两种方法的水平主应力方向测试结果基本一致。

关键词: 铁路隧道; 勘察钻孔; 地应力; ASR 法; 水压致裂法

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220118

中图分类号: TU452

文献标志码: A

Application of In-Situ Stress Measurement Technology of Ultra Deep Survey Borehole ASR Method

Zhang Xiaolin, Ying Li, Zhao Dong'an

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China

Abstract: Baolingshan tunnel is a key and difficult control engineering in the first section of a certain railway. The depth of survey Borehole DZ-06 is 2 118.00 m, which is the deepest survey borehole in this railway. Appropriate cores were selected at the depths of 2 072.53 m and 2 084.27 m, and in-situ stress test was carried out by anelastic strain recovery method (ASR). The results show that in the depth range of 2 072.53 - 2 084.27 m, the average values of the maximum principal stress, intermediate principal stress and minimum principal stress obtained from the two measuring points of ASR method are 59.70, 54.03 and 30.74 MPa respectively. The maximum principal stress is nearly horizontal and the

收稿日期: 2022-04-20

作者简介: 张小林(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事铁路、公路、轨道、市政工程的设计研究工作,
E-mail: 176727655@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972284)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41972284)

direction is close to SN direction, indicating that the area is dominated by horizontal tectonic stress. The average value of the maximum principal stress test result of ASR method is in good agreement with the regression value from the hydraulic fracturing method test, the consistency of the minimum principal stress test value and the regression value of the hydraulic fracturing method test result is in a reasonable range, and the horizontal principal stress direction test results from the two methods are basically consistent.

Key words: railway tunnel; survey boreholes; in situ stress; ASR method; hydraulic fracturing measurement

0 引言

非弹性应变恢复法 (anelastic strain recovery method, ASR 法) 是一种基于岩心的地应力测量方法, 首先由 Voight^[1] 提出, Teufel^[2] 进行了实用性研究和发展来解决二维问题, Matsuki^[3] 又将其拓展为三维问题。其基本原理是: 由于岩石是一种具有流变性的黏弹性材料, 当其被钻出后会脱离原始应力场, 立即释放弹性应变, 紧接着发生非弹性应变恢复; 因此测量应力释放后岩心的非弹性应变恢复量, 结合岩石的非弹性应变恢复柔量, 可计算得到原地应力状态。

随着国内地震科学研究和某些铁路等大型深部地下工程建设的深入开展, 深部应力特征的研究需求愈来愈迫切, 但实际中又缺乏经济、简便的深部地应力测量方法。因此, 近年来 ASR 法依托其优势越来越多的应用于实际的深部三维地应力测量中^[4-6]。例如: 林为人^[5] 介绍了 ASR 法的测试原理和实验技术, 并基于 ASR 法对台湾车龙浦断层钻探 A 孔 783 m 深处砂岩样品进行原地应力测定, 指出 ASR 法对于测试三维地应力的主方向和估测主应力的较大实用价值, 特别是在应力释放法、水压致裂法无法实施, 或者需要通过多种方法补充验证, 增加结果可信度时, 优势更加明显; 王连捷等^[6-10] 用 ASR 法得到了汶川地震断裂带科学钻孔、腾冲科学钻探孔深处的三维地应力状态, 并与震源机制解进行了对比, 表明 ASR 法测试结果是可信的, 可用于深孔三维地应力测量; 孙东生等^[11] 先在塔里木盆地采用 ASR 法与 DITF 法 (钻井诱发张裂缝法) 共同确定应力状态, 使 ASR 法应用深度达到 7 km, 随后结合某矿山测试案例, 对比了水压致裂和 ASR 两种方法获取的地应力值, 验证了 ASR 法的有效性^[12]; 许峰^[13] 采用 ASR 法研究了某煤矿水害防治底板隔水层原始地应力分布状态; 上官拴通等^[14] 实测获取了唐山市乐亭县马头营干热岩勘探区 3~4 km 深度范

围的地应力状态, 并分析了研究区断层稳定性; 侯奎奎等^[15] 通过 3 种不同方法获取了三山岛金矿 2 005 m 竖井建井区域的地应力状态, 通过对比指出, ASR 法、水压致裂法获取的水平大小主应力比随埋深的变化规律基本相同, 与声发射法的测试结果差异较大。类似地, 王锦山、陈天星等学者对 ASR 法也进行了应用研究^[16-17]。尽管如此, ASR 法还未完全成熟, 还有一些因素对测试结果的影响尚不清楚, 例如 ASR 法的测试和解算均基于岩心的均质且各向同性假设, 未考虑岩心各向异性的影响等。此外测试过程中温度变化、岩石的非弹性应变恢复柔量和矿物失水等因素均对测试结果有影响, 虽然有些学者^[18-19] 已经对此开展了部分研究, 但仍需要大量的系统研究工作。本文通过对 2 000 m 级超深勘察钻孔采用 ASR 法地应力测试, 获取工程区深部地应力状态, 并将测试结果与水压致裂法对比, 验证 ASR 法的有效性, 以期今后超大埋深、高海拔、构造活动强烈工程地应力测试提供参考。

1 非弹性地应力测量方法简介

1.1 ASR 法基本原理

岩石的流变性是 ASR 法地应力测试的理论基础, 如图 1 所示。对岩石施加载荷时, 立即产生弹性

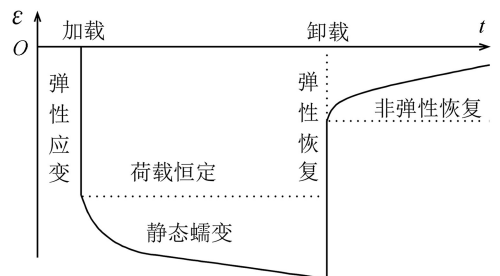


图 1 岩石流变性应力应变图

Fig.1 Stress-strain diagram of rock rheology

变形,然后在恒定荷载下产生蠕变;当荷载卸去时,弹性恢复瞬间完成,进而发生非弹性恢复。对于钻孔取心,岩心被钻取的过程即对应卸载过程,可通过测量非弹性恢复量推算地应力状态。

Matsuki^[3]以一般应力状态下任意方向非弹性应变恢复方程为基础,结合拉普拉斯变换解中相似原理以及非弹性应变恢复柔量,给出了任意方向非弹性应变 $\epsilon_a(t)$ 的恢复方程:

$$\epsilon_a(t) = \frac{1}{3}[(3l^2 - 1)\sigma_x + (3m^2 - 1)\sigma_y + (3n^2 - 1)\sigma_z + 6lm\tau_{xy} + 6mn\tau_{yz} + 6nl\tau_{zx}] \cdot J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha_T \Delta T(t) \quad (1)$$

式中: l, m, n 为应变轴的余弦; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 分别为 6 个应力分量; J_{as} 和 J_{av} 分别为剪切模式和体积模式下的非弹性应变恢复柔量; σ_m 为平均应力(MPa); p_0 为孔隙压力(MPa); α_T 为岩石的线性温度膨胀系数; $\Delta T(t)$ 为测量 t 时间内的温度变化值。

并给出了三维主应力计算公式:

$$\sigma_i = \frac{e_i(t)}{J_{as}(t)} + \frac{[\epsilon_m(t) - \alpha_T \Delta T(t)]}{J_{av}(t)} + p_0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中: $e_i(t)$ 为非弹性偏应变, $i = 1, 2, 3$; $\epsilon_m(t)$ 为平均正应变。由式(1)和式(2)可知,原地应力的大小与非弹性应变恢复量、测量期间温度变化、岩石温度膨胀系数、孔隙压力、非弹性应变恢复柔量有关。假设测量期间温度恒定、孔隙压力不变,则可通过测量获取的岩石非弹性应变恢复量和非弹性应变恢复柔量确定应力分量。

1.2 ASR 法测量流程

ASR 法现场测试流程如图 2 所示。

首先从钻孔中获取刚从原位状态解除的岩心。尽量挑选各向同性、均质、无裂隙的完整岩心,长度一般不少于 15 cm。岩心须尽快进行测量以便获得更多的岩石原位地应力信息,尽早测量能提高测量的可靠度,一般从取心到开始检测不宜超过 4 h,并保持其含水率不变。

到达实验室后,首先用清洗试剂清洁表面的附着物(泥浆、机油等),若有凹凸不平的地方须先用砂纸进行轻微打磨,之后再用酒精湿纸巾擦拭干净。按照设计位置粘贴 3 组应变片,尽量避免裂纹以及不平滑之处。沿被测岩心横截面将圆周三等分并标记,沿标记线粘贴应变片,确保每组应变花之间夹角

为 120° 。每一个应变花均包含 4 个应变片($-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$),如图 3 所示。确保应变仪工作正常后,连接应变仪后开始检测岩石的非弹性应变恢复量,为了试验的可靠度试验时间一般不少于 7 d。测量结束后,用计算机进行处理,通过应变恢复值得出测点的应力大小以及方向。

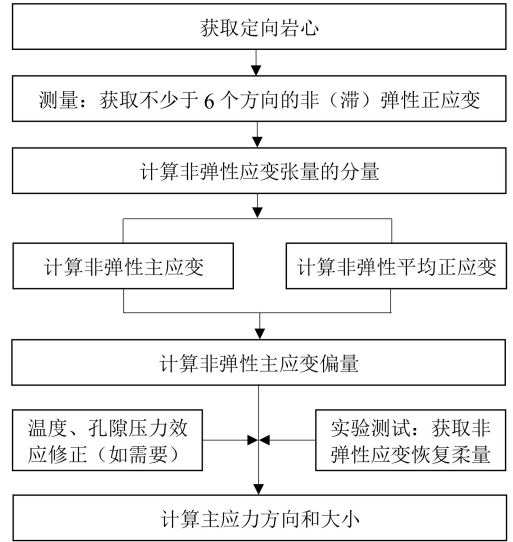


图 2 ASR 地应力测量操作流程

Fig. 2 Operation flow chart of ASR in-situ stress measurement method

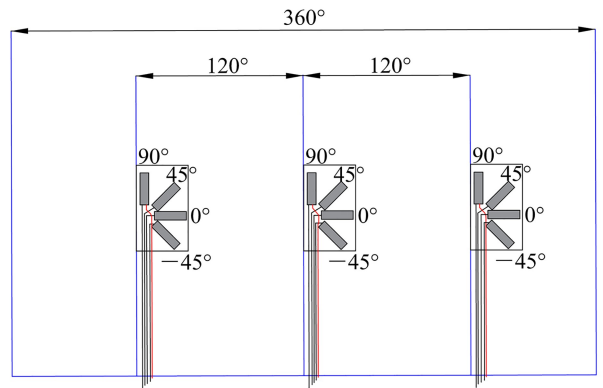


图 3 应变片粘贴示意图

Fig. 3 Schematic diagram of strain gauge pasting

如果试样在上述测试过程中可能发生温度变化,测试过程中需同步获取岩心的温度变化情况,后期通过温度标定实验,剔除岩心非弹性应变测量过程中由温度变化导致的温度应变误差;再结合非弹性应变恢复柔量实验,根据 ASR 理论计算主应变及主应力。

2 某铁路超深钻孔测试案例

2.1 测试项目概况

宝灵山隧道位于四川省甘孜藏族自治州康定市,是某铁路先开段的控制性工程之一,隧道设计全长 26 445 m,最大埋深达到了 1 810 m。根据勘察设计需要,计划在宝灵山 DZ-06 钻孔(以下简称 DZ-06 孔)开展地应力测试,获取宝灵山隧道埋深附近的原地应力场特征。DZ-06 孔位于泸定县黄草坪村附近,终孔深度为 2 118.00 m,为某铁路先开段深度最大的控制性勘察钻孔之一。

隧址区位于甘孜藏族自治州康定市,在二级构造上处于鲜水河构造带、龙门山构造带、川滇南北向构造带三大构造体系交会部位(图 4)。由于中生代以来多个陆块碰撞拼接和长期的岩石圈伸展、收缩等作用,加之长期的岩浆作用和变质作用,此处形成了复杂的造山带^[20],地质构造极其复杂。

地层岩性为上覆第四系残坡积物(Q_4^{dl+el})粉质黏土,第四系更新统昔格达组(N_2x)黏土、粉细砂卵石,基岩为古元古代侵入岩奥长花岗岩($Pt_3\gamma o$)、花岗闪长岩($Pt_3\gamma\delta$)。本次 ASR 法地应力测试深度为 2 072.53~2 084.27 m,岩性为花岗闪长岩。

2.2 ASR 法测试条件

本次在 DZ-06 孔选取了 2 段完整岩心开展测试。BLS-01 试样取样深度为 2 072.53 m,长度约 25 cm;BLS-02 试样取样深度 2 084.27 m,长度约 27 cm。2 个试样岩性均为花岗闪长岩。钻孔岩心取样前,及时跟踪钻孔进度以及岩心情况,选择深度和完整性合适的部位为测点。当岩心从钻孔中提出后,仔细挑选完整均匀且符合标准的岩样,立即由索道运输至山下并在 2 h 内完成应变片粘贴,密封岩样以确保测试过程中的含水量不发生变化,现场岩心取样照片如图 5 所示。

2.3 ASR 法定标实验与测试结果

样品现场非弹性恢复应变采集完成后,将试样运回实验室,对岩心进行室内温度标定和非弹性应变恢复柔量实验,然后再根据 ASR 理论计算主应变及主应力。

2.3.1 温度标定实验

由于试样在取心和贴片过程中温度会发生变化,进而导致试样的温度应变,给应变测量结果带来误差;因此需要通过温度标定实验,反算试样在非弹性应变测量过程中的温度变化情况。利用热电偶记录的温度变化数据以及此过程中的应变数据,得到各通道的温度系数,剔除岩心非弹性应变测量过

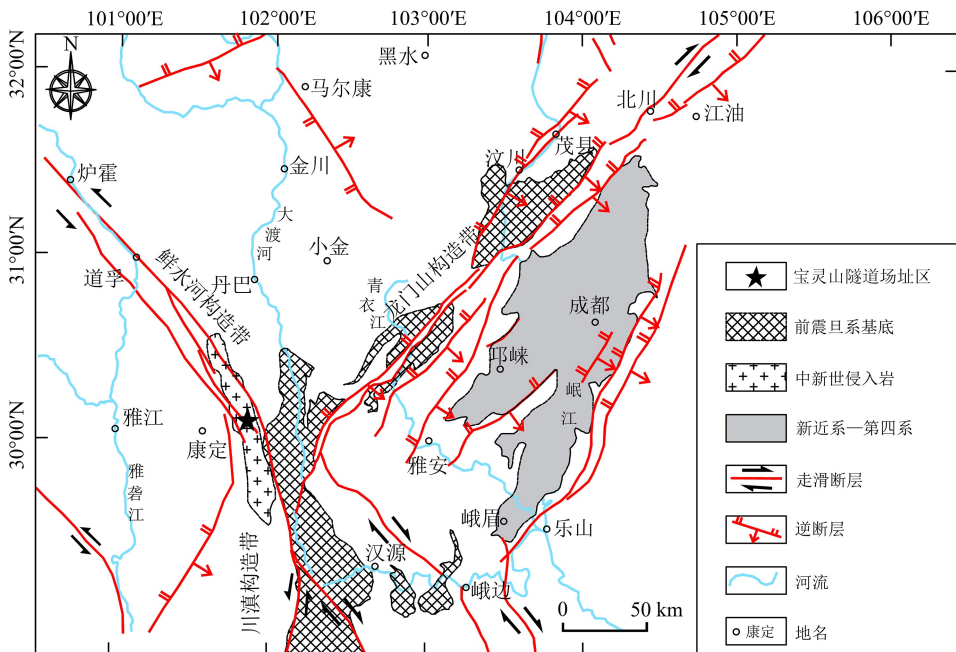


图 4 宝灵山隧道项目场址区域地质构造

Fig.4 Regional geological structure of Baolingshan tunnel project site



图 5 现场取样照片

Fig.5 Site sampling photos

程中由温度变化导致的应变误差。

标定试验开始前首先打开岩心非弹性应变采集仪,将采集仪的数据接收间隔时间设定为 10 min/次,随后将整个系统放入可调节温度的恒温箱中,设定初始温度为 10 ℃,之后每隔 3.5 h 调节恒温箱温度,共有 10、20、30 ℃ 3 个温度区间,标定完成后进行采集仪数据读取。

2.3.2 计算应变选取

根据温度标定实验结果,对 BLS - 01、BLS - 02 试样的应变采集数据进行温度变化修正,两个试样的 ASR 法应变恢复测试曲线见图 6。

由图 6 可见:测点岩心的非弹性恢复应变在采集前 50 h 增加迅速,随后缓慢增加并最终趋于稳定,12 个通道非弹性应变变化规律相同;2 个试样测量期间温度均有波动,波动范围±4 ℃,与现场实际情况相符。温度增加而非弹性应变减小是由于岩石与应变片热膨胀系数不同造成的。

在 BLS - 01、BLS - 02 试样的应变-时间曲线稳定峰值阶段数据选取数据,剔除温度误差后,可得宝灵山隧道 BLS - 01、BLS - 02 试样计算应变值。

2.3.3 非弹性应变恢复柔量标定实验

通过岩石的本构关系,计算岩样剪切非弹性应变恢复柔量和体积非弹性应变恢复柔量^[5]:

$$J_{av}(t) = (\epsilon_{1a} + 2\epsilon_{3a}) / (\sigma_1 + 2\sigma_3); \quad (3)$$

$$J_{as}(t) = (\epsilon_{1a} - \epsilon_{3a}) / (\sigma_1 - \sigma_3). \quad (4)$$

式中:σ₁ 为最大主应力(轴向应力);σ₃ 为最小主应力(围压);ε_{1a} 为轴向非弹性恢复应变;ε_{3a} 为径向非弹性恢复应变。

对 BLS - 01 试样进行 30 MPa 的单轴加压、卸压室内实验,在此过程中采集应变数据,计算获取柔量比,应变曲线如图 7 所示(在时间约 40 h 时卸压)。

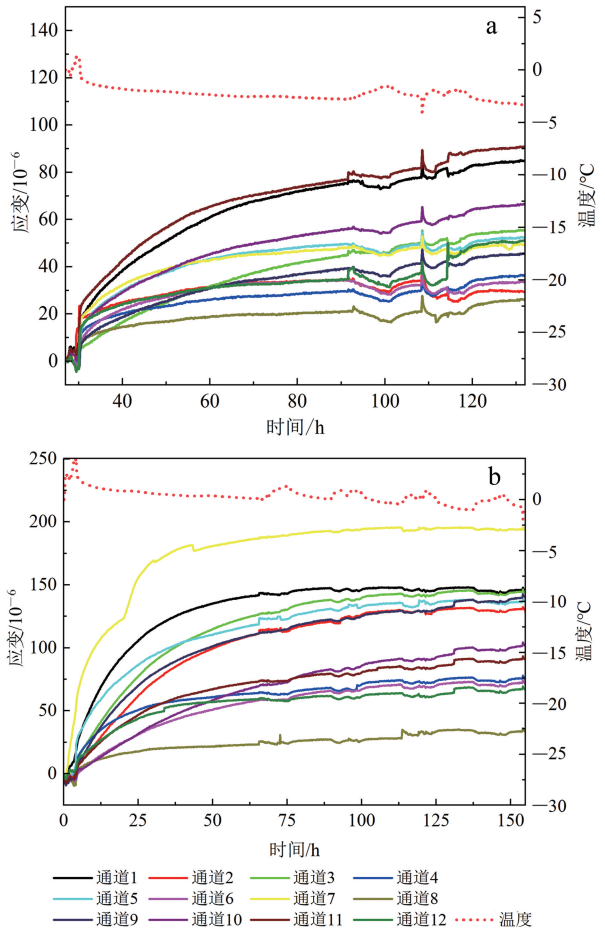


图 6 BLS - 01 (a) 和 BLS - 02 (b) 测点岩心非弹性应变曲线

Fig.6 Inelastic strain curve of BLS - 01 (a) and BLS - 02 (b) cores

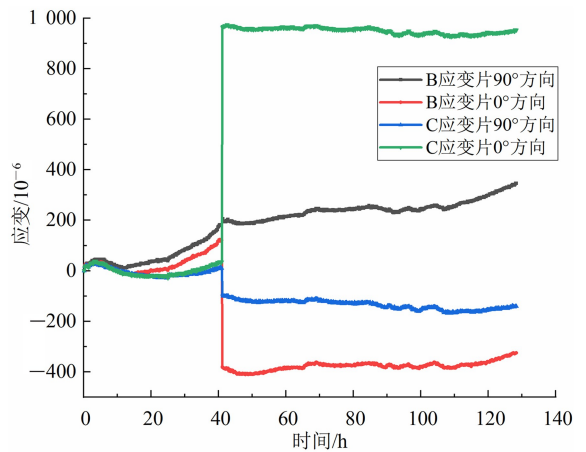


图 7 BLS - 01 试样单轴 30 MPa 加压、卸压过程应变曲线
Fig.7 Strain curve of Core BLS - 01 during uniaxial 30 MPa pressurization and unloading

取卸载过程岩样的非弹性应变恢复量进行计算柔量比:

$$J_{as}(t)/J_{av}(t) = 1.90。 \quad (5)$$

同时,由于 BLS-02 试样与 BLS-01 试样的岩性一致,取样深度相差很小,故 BLS-02 试样取相同的柔量比。

2.3.4 ASR 地应力测量结果

根据 BLS-01、BLS-02 试样的应变数据,剔除漂移明显的应变数据后计算地应力。计算时,利用超声波成像测井获取的压裂缝方向或钻井诱导缝方向,确定最大水平主应力方向,在此基础上确定 ASR 地应力测量岩心样品上标志线方位,进而利用 ASR 法确定三维主应力方位,计算结果见表 1。

表 1 数据表明,宝灵山隧道 2 个测点三向主应力平均值分别为: $\sigma_1 = 59.70$ MPa, $\sigma_2 = 54.03$ MPa, $\sigma_3 = 30.74$ MPa。

2.4 不同方法的测量结果对比

DZ-06 钻孔终孔后,于孔内开展了水压致裂法地

应力测试。采用单回路、双封隔器测试系统。该方法是目前深钻孔地应力测试的最常用方法^[21-23],其测试原理、设备构成及测试流程参见相关规范^[24]。

水压致裂法地应力测试,一般采用印模方法或孔内摄像^[25]方法确定主应力的方向。对于超深钻孔测试,印模方法存在成功率不高、测试效率低等问题;孔内摄像方法由于岩粉、泥浆等因素难以取得清晰图像。因此,对于 DZ-06 超深钻孔,为避免少量岩粉、泥浆等对孔壁图像清晰度的影响,主应力方向测试采用超声成像测试技术。利用英国 RG 公司的超声波成像测井仪,分别获取钻孔压裂段岩体测试前、后的超声成像图,通过对比,确定压裂段岩体裂缝的方位,同时还结合钻孔岩体的崩落特征,综合确定水平最大主应力的方向。

在 420.00~2 032.00 m 深度范围内开展了多段测试。其中,深度大于 1 000.00 m 的 6 个测试段的测试结果如表 2 所示。钻孔 2 040.00 m 深度存在局部坍塌,最大测试段深度为 2 032.00 m。

表 1 宝灵山隧道 DZ-06 孔不同测点 ASR 法主应力计算结果

Table 1 Calculation results of principal stress at different measuring points of Borehole DZ-06 in Baolingshan tunnel with ASR method

测点	深度/m	主应力	主应力/ MPa	方位角/ (°)	倾角/ (°)	水平最大 主应力/MPa	水平最小 主应力/MPa	水平最大主 应力方位/(°)
BLS-01	2 072.53	σ_1	58.65	10.4	3.6	58.65	25.97	10.4
		σ_2	53.87	80.8	48.7			
		σ_3	25.97	85.2	42.1			
BLS-02	2 084.27	σ_1	60.75	22.9	5.8	60.75	35.51	22.9
		σ_2	54.18	88.5	71.5			
		σ_3	35.51	112.8	18.5			

表 2 宝灵山隧道 DZ-06 孔水压致裂法地应力测试结果

Table 2 In-situ stress test results of Borehole DZ-06 in Baolingshan tunnel with hydraulic fracturing method

深度/m	应力/MPa								
	p_H	p_0	p_b	p_r	p_s	N	σ_H	σ_h	σ_v
1 052.00	10.52	7.52	37.04	25.47	23.92	11.57	38.78	23.92	27.35
1 282.50	12.83	9.83	35.26	22.09	24.34	13.17	41.09	24.34	33.35
1 470.00	14.70	11.70	—	27.31	24.26	—	33.78	24.26	38.22
1 775.00	17.75	14.75	—	29.30	30.22	—	46.62	30.22	46.15
1 891.00	18.91	15.90	38.50	35.30	34.50	3.17	52.40	34.50	49.17
2 032.00	20.32	17.32	40.23	31.74	34.04	8.49	53.06	34.04	52.83

注: p_H 为钻杆内静水压力; p_0 为地下水静水压力; p_b 为破裂压力; p_r 为重张压力; p_s 为关闭压力; N 为岩体抗压强度; σ_H 为水平最大主应力; σ_h 为水平最小主应力; σ_v 为估算自重应力。上述单位均为 MPa。“—”表示未发现。

压裂完成后,根据水压致裂地应力测试前后孔壁压裂缝方位,结合成像测井获取的钻井诱导缝和孔壁崩落信息,统计了宝灵山 DZ-06 孔深部水平最大主应力方位(1 500.00 m 以下由于塌孔,设备受阻),见图 8。

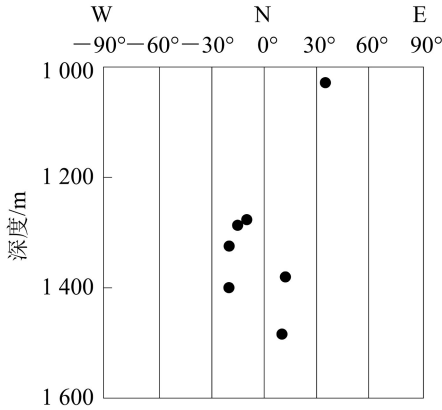


图 8 宝灵山隧道 DZ-06 孔最大水平主应力方位

Fig. 8 Maximum horizontal principal stress orientation of Borehole DZ-06 in Baolingshan tunnel

将宝灵山 DZ-06 钻孔两种方法的地应力测试结果进行对比。由于两种方法的测试深度不同,为方便比较,将 ASR 法和水压致裂法测试结果作线性回归图(图 9),宝灵山 DZ-06 孔水压致裂法测得的最大主应力线性回归方程为 $\sigma_H = 0.02698H - 0.19885$, $R^2 = 0.8463$, H 为深度(m)。结果(图 9)表明,ASR 法的测试得到的最大主应力结果与水压致裂法水平最大主应力结果一致性很高;ASR 法测试得到的最小主应力结果较离散,与水压致裂法水平最小主应力测试结果相比有一定偏差。

以水压致裂法测试结果的回归计算值为基数,分别计算了两测点 ASR 法测试结果的偏差,结果见表 3。由表 3 可知:ASR 法的最大主应力测试值与回归值偏差分别为 3.8% 和 6.9%,两测点均值偏差仅为 5.4%,一致性很好;ASR 法测试的最小主应力测试值与回归值的偏差分别为 -26.9% 和 -0.5%,两测点均值偏差为 -13.7%,一致性处于合理范围。需要注意的是,水压致裂最深测段(2 032.00 m,也是与 ASR 法测段深度最接近的点)测得的最大主应力与回归值相比偏小,而 ASR 法与同深度回归值相比偏大,提示我们在主应力大小取值时尽量取多点的线性回归值,以避免偶然误差。

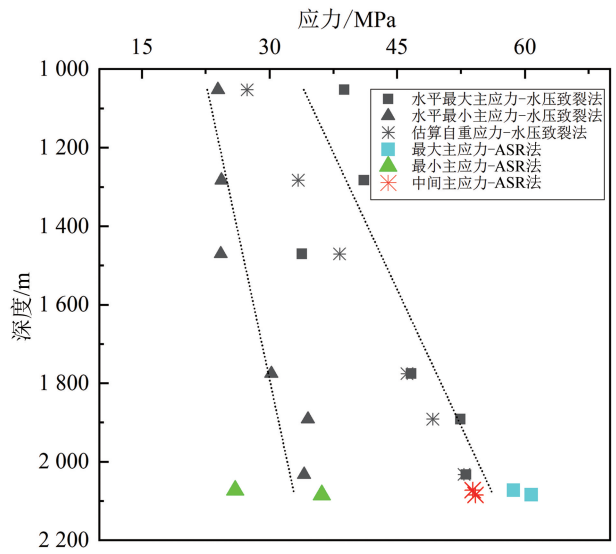


图 9 宝灵山隧道 DZ-06 孔两种方法的地应力测试结果
Fig. 9 In-situ stress test results of Borehole DZ-06 in Baolingshan tunnel of two methods

表 3 ASR 法与水力压裂法回归值偏差

Table 3 Deviation of regression values between ASR method and hydraulic fracturing method

应力类型	测点	应力/MPa		偏差/%
		测试值	回归值	
水平最大主应力	BLS-01	58.65	56.50	3.8
	BLS-02	60.75	56.80	6.9
	均值	59.70	56.65	5.4
水平最小主应力	BLS-01	25.97	35.51	-26.9
	BLS-02	35.51	35.68	-0.5
	均值	30.74	35.60	-13.7

水压致裂法测试结果表明,水平最大主应力的优势方向处于 NW20°—NNE14°之间,ASR 法测试的最大主应力方向处于 NNE10.4°—NE22.9°之间,两种方法的主应力方向测试结果基本一致。

3 讨论

在工程勘察行业,水压致裂法是目前最普遍使用、最成熟的深孔地应力测试方法,该方法操作简单、测试周期短,且无需岩石弹性参数参与计算,因此广泛应用于工程勘察初期。

然而,随着某些铁路经历强烈构造运动及复杂地质区域深埋工程勘察的深入开展,地面勘察深钻孔甚至超深钻孔越来越多,孔壁岩体往往存在局部

破碎段,水压致裂法测试设备时常无法顺利下放至钻孔底部(隧道埋置深度)附近开展测试,而地应力场特征又是隧道勘察设计的关键性基础参数,这已经成为目前某些铁路工程勘察工作中的显著问题之一。同时,随着超深钻孔的水压致裂设备复杂程度、现场条件要求的大幅提高,测试效率也随之降低,测试周期加长,成本增加。因此,铁路深部工程勘察工作对简便、可靠的深部地应力测量方法的实际需求愈发迫切。

ASR 法作为近年来出现的新方法,随着解算理论和测试技术的进步,在国内外越来越多地应用于深部三维地应力测量。该方法基于钻孔岩心的应变测量,仅需现场取得适合测试的岩心,在室内完成主要的测量工作,大大节约了现场测试工作时间和成本;测试过程无需钻机配合,不会影响钻机的工作效率;同时,由于基于岩心应变测量,单个测试点的测试周期不受深度影响。这些都是 ASR 法的显著优势。

本文针对某铁路先开段最深的控制性勘察钻孔——宝灵山隧道 DZ-06 孔进行的 ASR 法地应力测试工作,验证了非弹性应变恢复法对工程勘察期间千米级勘探孔地应力估算的可靠性,这也为 ASR 法在后期超大埋深、高海拔、构造活动强烈工程的地应力测量工作提供了一种新的思路。

4 结论

1) ASR 法测试结果表明,宝灵山 DZ-06 孔 2 072.53~2 084.27 m 深度范围,2 个测点三向主应力平均值分别为: $\sigma_1 = 59.70$ MPa, $\sigma_2 = 54.03$ MPa, $\sigma_3 = 30.74$ MPa。最大主应力近水平,说明该区域主要以水平构造为主。

2) 与水压致裂法测试结果相比,ASR 法的最大主应力测试结果均值与水压致裂法测试结果均值偏差仅为 5.4%,一致性很好;ASR 法的最小主应力测试值与水压致裂法测试结果回归值偏差分别为 -26.9%和 -0.5%,两测点均值偏差为 -13.7%,一致性处于合理范围。ASR 法测试的最大主应力方向为 NNE 10.4°—NE 22.9°,与水压致裂法测试结果基本一致。

3) 宝灵山隧道 DZ-06 孔的 ASR 法地应力测试结果可靠,同时也表明非弹性应变恢复量测定法对于估测超深钻孔的三维地应力大小和方向有较大的实用价值,特别是由于孔壁或岩心破碎导致水压

致裂法或应力释放法等无法实施时,具有更高的应用价值。

参考文献(References):

- [1] Voight B. Determination of the Virgin State of Stress in the Vicinity of a Borehole from Measurements of a Partial Anelastic Strain Tensor in Drill Cores[J]. *Rock Mechanics & Engineering Geology*, 1968, 6 (4): 201 - 215.
- [2] Teufel L W. Determination of In-Situ Stress from Anelastic Strain Recovery Measurements of Oriented Core [C]//*Rock Mechanics in Productivity and Protection. The 25th Symposium on Rock Mechanics*. Denver: [s. n.], 1983: 421 - 430.
- [3] Matsuki K. Three-Dimensional In-Situ Stress Measurements with Anelastic Strain Recovery of a Rock Core [C]//Wittke W. *Proceeding of the 7th International Congress on Rock Mechanics*. Aachen: [s.n.], 1991: 557 - 560.
- [4] Matsuki K, Takeuchi K. Three-Dimensional In-Situ Stress Measurements by Anelastic Strain Recovery of a Rock Core[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 1993,30 (7):1019 - 1022.
- [5] 林为人. 基于岩芯非弹性应变恢复量测定的深孔三维地应力测试方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27 (12):2387 - 2394.
Lin Weiren. A Core-Based Method to Determine Three-Dimensional In-Situ Stress in Deep Drilling Wells: Anelastic Strain Recovery Technique [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27 (12): 2387 - 2394.
- [6] 王连捷,孙东生,林为人,等. 地应力测量的非弹性应变恢复法及应用实例[J]. *地球物理学报*, 2012, 55 (5): 1674 - 1681.
Wang Lianjie, Sun Dongsheng, Lin Weiren, et al. Anelastic Strain Recovery Method to Determine In-Situ Stress and Application Example[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55 (5): 1674 - 1681.
- [7] 王连捷,崔军文,孙东生,等. 腾冲科学钻探孔非弹性应变恢复法三维地应力测量[J]. *地球学报*, 2016, 37 (1): 111 - 115.
Wang Lianjie, Cui Junwen, Sun Dongsheng, et al. Determination of Three-Dimensional In-Situ Stresses by Anelastic Strain Recovery in Tengchung Scientific Drilling Hole[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37 (1): 111 - 115.

- [8] 崔军文,李宗凡,王连捷,等.汶川地震断裂带科学钻探 1 号井(WFSD-1)非弹性应变恢复法(ASR 法)三维地应力测试与“5.12”汶川地震的形成机制[J].岩石学报,2013,29(6):2033-2047.
Cui Junwen, Li Zongfan, Wang Lianjie, et al. Determination of Three-Dimensional in Situ Stresses from Anelastic Strain Recovery (ASR) of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole - 1 (WFSD-1) and Formation Mechanism of the “5.12” Wenchuan Earthquake [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29 (6): 2033 - 2047.
- [9] 孙东生,林为人,王连捷,等.汶川地震断裂带科学钻一号孔 ASR 法地应力测量[J].中国地质,2013,40(3):840-845.
Sun Dongsheng, Lin Weiren, Wang Lianjie, et al. In-Situ Stress Measurement by ASR Method of Scientific Drilling No 1 Hole in Wenchuan Earthquake Fault Zone[J]. Geology in China, 2013, 40 (3): 840 - 845.
- [10] 孙东生, Lin Weiren, 崔军文, 等.非弹性应变恢复法三维地应力测量:汶川地震科学钻孔中的应用[J].中国科学:地球科学,2014,44(3):510-518.
Sun Dongsheng, Lin Weiren, Cui Junwen, et al. Three-Dimensional in Situ Stress Determination by Anelastic Strain Recovery and Its Application at the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Hole - 1 (WFSD-1) [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44 (3): 510 - 518.
- [11] 孙东生,吕海涛,王连捷,等. ASR 和 DITF 法综合确定塔里木盆地 7 km 深部地应力状态[J].岩石力学与工程学报,2018,37(2):383-391.
Sun Dongsheng, Lü Haitao, Wang Lianjie, et al. Determination of the In-Situ Stress State at 7 km Depth Under Tarim Basin by ASR and DITH Methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (2): 383 - 391.
- [12] 孙东生,陈群策,张延庆.ASR 法在井下矿山地应力测试中的应用前景分析[J].地质力学学报,2020,26(1):33-38.
Sun Dongsheng, Chen Qunce, Zhang Yanqing. Analysis on the Application Prospect of ASR In-Situ Stress Measurement Method in Underground Mine [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26 (1): 33 - 38.
- [13] 许峰.基于 ASR 法的底板隔水层原始地应力分布研究[J].煤矿安全,2018,49(7):34-38.
Xu Feng. Research on Original Stress Distribution of Floor Aquifuge Based on Anelastic Strain Recovery Method[J]. Safety in Coal Mine, 2018, 49 (7): 34 - 38.
- [14] 上官拴通,孙东生,张国斌,等.唐山地区 3~4 km 深部地应力测量及断层稳定性分析[J].地质学报,2021,95(12):3915-3925.
Shangguan Shuantong, Sun Dongsheng, Zhang Guobin, et al. In-Situ Stress Measurement and Fault Stability Analysis Within a Depth of 3 - 4 km in the Tangshan Area [J]. Journal of Geology, 2021, 95 (12): 3915 - 3925.
- [15] 侯奎奎,吴钦正,张凤鹏,等.不同地应力测试方法在三山岛金矿 2 005 m 竖井建井区域的应用及其地应力分布规律研究[J].岩土力学,2022,43(4):1093-1102.
Hou Kuikui, Wu Qinzheng, Zhang Fengpeng, et al. Application of Different In-Situ Stress Testing Methods in 2005 Meters Shaft-Building Area of Sanshandao Gold Mine and the Distribution Law of In-Situ Stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43 (4): 1093 - 1102.
- [16] 王锦山,彭华.地震断裂带深孔岩芯非弹性应变恢复法三维地应力测试[J].防灾减灾工程学报,2018,38(1):185-192.
Wang Jinshan, Peng Hua. Inelastic Strain Recovery Method to Determine 3D In-Situ Stress of the Deep Hole Core in Earthquake Fault [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38 (1): 185 - 192.
- [17] 陈天星.基于非弹性应变恢复法地应力测量及应用研究[D].秦皇岛:燕山大学,2020.
Chen Tianxing. Research on In-Situ Stress Measurement and Application Based on Inelastic Strain Recovery[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.
- [18] 彭治豪,刘小燕.淮南孜矿红砂岩的非弹性变形柔度比探究[J].科学技术与工程,2018,18(30):1-7.
Peng Zhihao, Liu Xiaoyan. Determination of the Ratio of Anelastic Strain Recovery Compliance of Red Sandstone Retrieved from the Coalmine in Huainan [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18 (30): 1 - 7.
- [19] 马秀敏,彭华,白金朋,等.岩石非弹性应变恢复(ASR)地应力测试方法中柔量研究进展评述[J].地质力学学报,2017,23(4):526-530.
Ma Xiumin, Peng Hua, Bai Jinpeng, et al. Review on Research Progress of Flexibility in Rock Inelastic Strain Recovery (ASR) In-Situ Stress Measurement Method[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (4):

- 526 - 530.
- [20] 谢樊,王海燕,侯贺晟,等.中亚造山带东段浅表构造速度结构:深地震反射剖面初至波层析成像的揭露[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(2):584 - 596.
- Xie Fan, Wan Haiyan, Hou Hesheng et al. Near-Surface Fine Velocity Structure in Eastern Segment of Central Asian Orogenic Belt: Revealed by First-Arrival Wave Tomography from Deep Seismic Reflection Profile [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51 (2): 584 - 596.
- [21] 罗卫锋,胡志方,王胜建,等.基于可控源电磁技术的页岩压裂监测试验:以宜昌地区鄂阳页 2HF 井为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(4):1338 - 1347.
- Luo Weifeng, Hu Zhifang, Wang Shengjian, et al. Monitoring Test of Shale Fracturing Based on Controlled Source Electromagnetic Technology: Taking Well Eyangye 2HF in Yichang Area as an Example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52 (4): 1338 - 1347.
- [22] 李培月,何晓东,周长静,等.苏里格地区致密砂岩矿物组成与微观结构及其对水力压裂的潜在影响[J].水文地质工程地质,2023,50(3):1 - 11.
- Li Peiyue, He Xiaodong, Zhou Changjing, et al. Mineral Compositions and Microstructure of Tight Sandstone Reservoir in the Sulige Area and Their Potential Influence on Hydraulic Fracturing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50 (3): 1 - 11.
- [23] 柴乃杰,周文梁.基于优化组合权-模糊可变集的坝基岩体质量分级[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(2):514 - 525.
- Chai Naijie, Zhou Wenliang. Quality Classification of Rock Mass in Dam Foundation Based on Optimized Combination Weight and Fuzzy Variable Set [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53 (2): 514 - 525.
- [24] 原地应力测量水压致裂法和套芯解除法技术规范:DB/T 14 - 2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- Specification of Hydraulic Fracturing and Overcoring Method for In-Situ Stress Measurement: DB/T 14 - 2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [25] 魏翔,侯振坤.基于钻孔电视的深部岩体节理三维网络模拟[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(5):1605 - 1612.
- Wei Xiang, Hou Zhenkun. 3D Network Simulation of Deep Rock Joints Based on Borehole TV [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51 (5): 1605 - 1612.