

# 重大工程建设中的地应力测量 及其在设计中的应用<sup>1</sup>

郭啟良

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

**摘要** 水压致裂技术现已发展成为确定地下洞室三维原地应力状态、高压洞室围岩的自身承载能力以及岩体高压透水性的可靠实用方法, 并已经在核废料处置、长大深埋交通隧道以及水电站高压洞室工程中得到广泛应用。实践表明, 综合测定岩体的物理力学参数, 充分利用围岩承载力优化工程设计, 对确保工程安全和提高设计水平具有重要意义。

**关键词:** 地应力测量 水压致裂 深埋地下洞室 岩体承载力

## 引言

随着国家经济建设的发展和我国综合国力的不断增强, 一系列重大工程的建设相继提到议事日程。除了在建的世界级重大工程——三峡工程外, 诸如南水北调、西气东输、高速公路和铁路网以及核能开发等, 都是相继开工建设的这一系列工程中具有代表性的重大工程。

所有这些重大工程的建设, 最为典型的突出特征是: 工程建设规模庞大, 工程投资额度巨大。因此, 确保工程建设的顺利进行及工程建成后的安全运行, 不仅对确保工程建设的经济效益和社会效益至关重要, 甚至对国民经济建设的稳定发展都具有重要意义。

显而易见, 地质工作是所有这些重大工程的坚实基础。然而随着工程建设的发展, 仅仅查清地层岩性、结构构造及一般地球物理特性的传统地质工作, 远远不能满足当今这些重大建设工程科学设计和确保安全的需要。这主要源自于这些重大工程不可避免的长大深埋地下洞室工程或超高大坝建筑工程。我国在建的多条穿山越岭隧道, 埋深达千米、数千米, 延伸长达二十多公里, 多座水利水电工程的大坝高达三百多米。显然, 由于地壳深部地球物理环境与地壳表部的显著不同, 在地温、高水压渗透、高地应力的客观环境下的深埋洞室工程建设, 进行深部岩体地质力学特性的研究, 对于确保工程的顺利进行尤为关键。通过地质调查、钻孔勘探可以确定工程区岩体的岩性、结构构造以及地温分布、岩体透水性状等, 但对

1 国家自然科学基金重大项目: 持续高地应力作用下深埋长隧洞软弱围岩长期变形研究(90302011)

【收稿日期】2006-01-08

【作者简介】郭啟良, 男, 生于1954年。1982年毕业于长春地质学院, 研究员。主要从事地应力测试技术、方法及其在工程中的应用研究。E-mail: guoql302@sohu.com

于地应力的分布状况则只有通过原地测量才能得到。因此，地应力测量是所有这些重大地质工程勘测过程中不可或缺的一项重要勘测内容。

## 1 地应力测量技术及其发展

### 1.1 水压致裂应力测量方法的发展

地应力测量是在工程所在场地的钻孔中原地进行的，测定的是工程利用部位的岩体中正在起作用的地应力。现今地应力作用是决定深埋地下工程稳定与安全的关键因素，因此地应力测量结果是工程科学设计的依据（郭啟良等，2002）。

在垂直深钻孔中进行原地应力测量，水压致裂技术是目前国内外广泛应用的唯一可靠方法。由于水压致裂应力测量方法简便易行，直接测量地应力值，且测试成果丰富翔实，因此在国内外地质工程中得到了普遍应用，测试技术和方法获得了长足的发展。

水压致裂应力测量是在钻孔完钻后的裸孔段，用跨接式封隔器封隔任一测段，通过向测段岩层连续注水增压，直至将岩层张裂开来。图1是水压致裂应力测量系统的结构简图。根据弹性力学原理，水压破裂总是在最大水平主应力方向的孔壁上首先产生，并且在垂直于最小主应力方向的平面内扩展。因此，在水压破裂缝形成之后的某一时刻关泵停止注压，张裂着的破裂面在地应力的作用下渐趋闭合，在破裂面趋于闭合而尚未完全闭合的这一瞬时时刻，测段上的水压力与破裂面岩层上作用着的地应力达到了暂时的平衡。显然，破裂面瞬时闭合的这一平衡力，即破裂面的瞬时闭合压力就等于测段岩层的最小水平主应力。为了获得较为可靠的测试结果，对任一测段的测量一般都重复进行多个循环，图2是水压致裂应力测量的一段原始记录曲线。

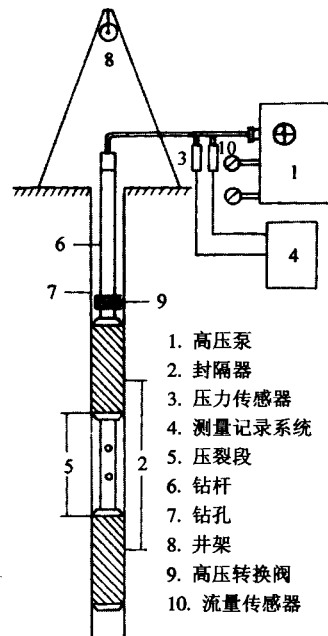
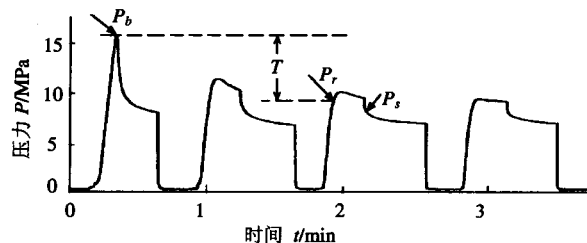


图1 水压致裂应力测量系统

Fig. 1 The hydraulic fracturing measurement system



$P_b$ : 破裂压力;  $P_r$ : 破裂重张压力;  $P_s$ : 瞬时闭合压力;  $T$ : 测段岩石原地抗张强度

图2 水压致裂应力测量原始记录曲线

Fig. 2 The original record curve of hydraulic fracturing stress measurement

由上述可见，根据水压致裂应力测量的基本理论及测试原理，在单一垂直钻孔中水压致裂应力测量只能确定平面应力，即最大、最小水平主应力。随着水压致裂基本原理及方法研究的发展，在相当理想的岩性结构情况下，充分利用不同方向的原生节理裂隙及完整层段，在单一垂直钻孔中进行三维应力测量，就理论而言也是可行的（刘允芳等，1999）。鉴于实际测试工作中往往受各种因素的限制，目前相对成熟完善的水压致裂三维应力测量都是在地下洞室的同一测点，通过布置在不同方向上的3个钻孔来分别测量实现的，也就是说，通过测定各个不同方向上的应力分量，计算求得其三维应力状态（丁立丰等，2004）。水压致裂三维原地应力测量方法已在国内外地下洞室工程中得到了广泛应用。

## 1.2 岩体抗载强度的测定

在抽水蓄能电站、气垫调压室、承压输水隧洞等各类压力洞室工程中，洞壁围岩往往承受着较高的水（气）压力。为了工程的稳定与安全，传统的设计方法都是内衬钢板，外衬钢筋混凝土。这固然保证了工程的安全，但造价高昂，而且工艺复杂，工期较长。随着岩体力学研究的深入以及工程设计思想的改变，人们认识到岩体自身具备一定的抗载能力，充分利用围岩自身的承载能力降低衬砌设计要求，优化工程设计，取消钢衬甚至完全不衬砌，都是可行的（郭敬良等，1994）。这无疑将节省巨额的直接投资，缩短建设周期，创造巨大的经济和社会效益。

由上述可知，准确的确定出岩体自身的承载强度，对于工程的科学设计是至关重要的，它是优化工程设计的依据。鉴于压力洞室围岩原地抗载强度测定的重要意义，我们采用水压致裂技术进行了岩体承载力的原地测定，取得了良好的测试结果，得到了工程设计部门的高度赞同与全面应用。

压力洞室围岩承载力的原地测定，一般选择在具有代表性的原生节理、裂隙层段上进行，以此确定出洞室围岩自身承受压力作用的最低限度。测试系统的结构亦如图1所示，只是测定长度有所不同。现场测试按逐级增大压水压力的方式进行，且在每一压力阶段都准确测定其稳定压水流量。稳定流量的标准按照有关规程的规定执行。通过各级压力下的稳定流量的测量，便可绘制出测段的压力—流量曲线图，根据测试曲线的变化特征，便可较为准确的测定出该测段岩层的抗载强度。

图3是某气垫调压室围岩抗载强度测试的压力—流量记录曲线。由图可见，以6.0MPa为拐点，流量随压力变化的曲率其前后截然不同。在此压力之前的各个压力阶段，流量随压力规律性的线性变化，但当增压至6.0MPa以后，流量突然增大。由此表明，测定岩层不能承受该压力作用而发生张裂或原生裂隙进一步扩展延伸，因此，在压力—流量曲线图上，其曲率变化的拐点所对应的应力，就标志着测段岩层保持其原始性状所能承受的最大压力，即洞室围岩的抗载强度。

## 1.3 岩体高压透水率测定

在压力洞室工程的勘测钻孔中进行高压压水测试，旨在确定在工程实际运行状态下岩体的真实透水性，以便为工程的防渗设计提供

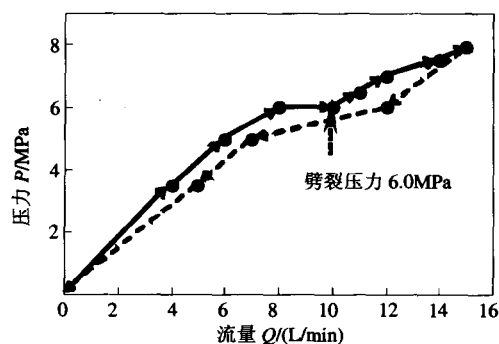


图3 压力—流量原始记录曲线

Fig. 3 The original record of pressure-flow rate

可靠的依据。工程实践表明,在常规压水压力下不透水的岩层,在工程运行状态压力下往往是漏水的(郭啟良等,2005)。这是由于难免存在于岩体中的节理裂隙等各种软弱结构面,在高压作用下有可能被张裂或进一步延伸,甚至进而与其延展范围内的破裂带相串通,形成透水通道。因此,只有按照岩体实际承受的压力进行高压压水测试,才能准确的给出工程设计所需要的真实透水性资料。

表 1 是某工程的一段实际压水测试成果。由表可见,测段岩层在 2.0MPa 压水压力下根本不透水,但当压水压力升高至 3.0MPa 时,原本滴水不漏的该测段岩层却猛然以 20L/min 的稳定流量显著漏水,当压水压力升高至 4.0MPa 时,漏水流量进一步增大至 32L/min,即使是在降压循环的测试中,原来在 2.0MPa 压水压力下不透水的该测段岩层,这时也以 17L/min 的稳定流量漏水。该测试成果表明,由于该测段岩层不能承受 3.0MPa 的压水压力作用而发生张裂、扩展,从而形成了一定范围内的透水通道,因而使该测段的原始结构性状发生了显著变化。由此进一步说明,在应力洞室工程中进行高压压水测试的必要性与重要意义。

表 1 华北某水利工程钻孔高压压水测试成果

Table 1 The results of water high pressure test in borehole from a water resource project in North China

测段深度 (m)	压力分级	压力 (MPa)	流量 (L/min)	透水率 (Lu)
120.00—125.00	1	1.00	0.00	0.00
	2	2.00	0.00	0.00
	3	3.00	20.00	1.33
	4	4.00	32.00	1.60
	5	3.00	26.00	1.73
	6	2.00	17.00	1.70
	7	1.00	2.00	0.40

## 2 水压致裂技术在重大工程建设中的作用与意义

### 2.1 在水利水电高压洞室工程设计中的应用

在抽水蓄能电站的高压输水隧洞、高水头电站以及气垫调压室等压力洞室工程中,为了充分利用洞室围岩自身的承载能力,最大限度的降低衬砌设计要求,在工程实践的基础上,国外学者总结出了压力洞室取消钢衬的最小主应力准则<sup>1</sup>,即只要高压输水洞线上任一点的最小主应力都不小于最大内水压力,则可以取消钢衬,甚至完全不衬砌。这充分说明,在地下洞室工程中进行原地应力测量的重要意义。

众所周知,无论采用哪种施工方法,洞室的人为开挖都势必会改变围岩的原始平衡状态,使得围岩应力状态发生变化。一般而言,在洞壁附近形成一个松弛圈,其应力值会明显偏低。然后过渡到一定深度范围,为应力集中区,主应力值会显著偏高。只有在不受开挖影响的更深部,才能确定出真实反映原地的应力状态。因此,洞室围岩的应力状态是随深度而变化的,需要圈定出应力松弛圈、应力集中区的深度界限及其各自的应力分布特征。

如图 4 所示,这是华东地区某高压输水隧洞围岩应力随深度的分布,该测试成果是在同

1 谷兆祺,1985.挪威水电工程经验介绍.挪威:泰比亚公司,47—156.

一测点的 3 个不同方向的钻孔中获得的。由图可见，在洞壁浅表的 8m 以内，各孔各测段的主应力值明显偏低，而在 8—18m 深度范围内，各孔各测段的主应力值则高得多，向更深部直至孔底，各孔段的主应力值则趋于基本一致的应力水平上。根据这一实测资料，我们可以对不同界域的应力状态进行计算分析，表 2 就是应力松弛圈、应力集中区和正常应力分布域上三维应力状态的计算成果。

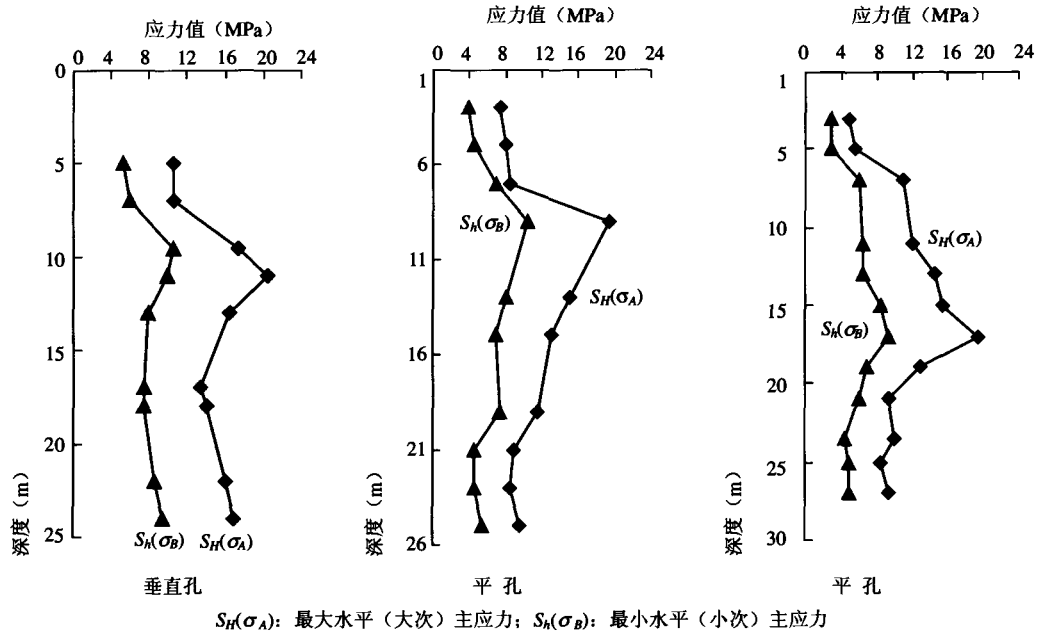


图 4 某地下洞室围岩各测孔平面应力值  $S_H(\sigma_A)$ 、 $S_H(\sigma_B)$  随孔深变化

Fig. 4 The variation of plane stress  $S_H(\sigma_A)$ ,  $S_H(\sigma_B)$  with depth change in each boreholes

表 2 测点三维地应力计算结果

Table 2 The results from three dimensional stress measurement

计算空间 应力的深度(m)	$\sigma_1$			$\sigma_2$			$\sigma_3$		
	数值 (MPa)	方位 (°)	倾角 (°)	数值 (MPa)	方位 (°)	倾角 (°)	数值 (MPa)	方位 (°)	倾角 (°)
8.0 左右	10.38	334	21	8.02	67	55	4.33	243	35
8.0—18.0	19.28	314	16	14.44	24	48	7.45	236	37
18.0—30.0	15.13	317	14	9.68	23	58	6.08	235	28

由上表可见，在洞壁约 8m 以内的浅表，由于洞室的开挖扰动，形成了松弛圈，而在 8—18m 深度范围，其主应力值则几乎是前者的两倍，为明显的应力集中区，在不受开挖影响的正常应力分布域内，其主应力值比应力集中区的也低的多。

由上述可见，在压力洞室中的水压致裂三维应力测量，通过丰富翔实的测量结果可以很好的圈定出应力松弛圈、应力集中区及正常应力分布域的深度界限，确定出不同界域上的三维应力分布状态，揭示出洞壁围岩不同深度的应力分布特征，从而为工程的科学设计提供可靠的地应力依据。

## 2.2 在交通隧道设计中的应用

随着交通建设的发展,穿山越岭的长大深埋隧道不可避免。但在深埋长大隧道的建设中,由于高水平地应力作用,往往在软弱岩层及构造破碎带洞段发生变形破坏,而在坚硬完整岩层洞段发生岩爆等地质灾害,这不仅会阻碍工程建设的顺利进行,甚至会造成人员生命与财产的重大损失。

图 5 是某长大深埋交通隧道的变形情况。由图可见,隧道变形强烈,以致支护破坏,甚至型钢亦被严重扭曲。变形监测记录表明,隧道围岩的变形持续发展,该隧道水平收敛变形最大达 1034mm (DK177+590 测点),一般为 500—700 mm,拱顶下沉达 1053mm (DK177+510 测点),而且在将近 80 天的监测过程中,持续变形不收敛,表现为较为典型的软弱围岩流变大变形(卿三惠等, 2005)。

表 3 是在该隧道相对较完整洞段上进行的水压致裂三维应力测量结果。该测试结果的分析表明,该深埋隧道洞段的现今地壳应力场总体特征为:存在较为明显的水平构造应力作用,水平构造应力作用的强度与其埋深的重力作用基本一致。隧道围岩的强烈变形是在较为强烈的水平构造应力与上覆岩层重力的共同作用下,该洞段软弱岩层难以承受该作用力,以致发生流变大变形。

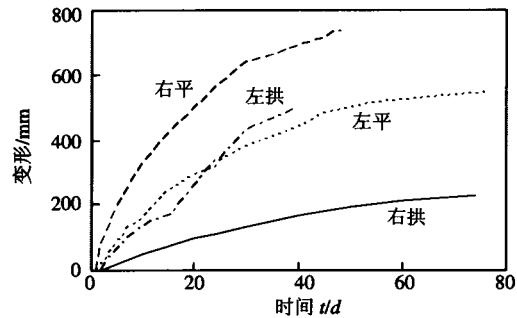


图 5 某深埋隧道围岩变形记录曲线

Fig. 5 The deformation record curve of a deep buried tunnel

表 3 三维应力计算结果

Table 1 Three dimensional stress measurement results

测点	主应力	量值(MPa)	方位	仰角	倾向
5 <sup>#</sup> 测点	$\sigma_1$	19.46	243°	78°	NEE
	$\sigma_2$	16.26	22°	9°	SSW
	$\sigma_3$	7.56	133°	7°	NW
6 <sup>#</sup> 测点	$\sigma_1$	22.21	22°	1°	SSW
	$\sigma_2$	20.73	284°	86°	SEE
	$\sigma_3$	10.81	112°	4°	NWW

该隧道围岩流变大变形形成机制的地应力分析表明,在较为强烈的地应力作用下,由于软弱岩层发生了流变大变形,导致岩层自身的抗载能力完全丧失,这时洞壁围岩的变形完全由初期支护来抗衡,使得支护失效,型钢被严重扭曲破坏,以致隧道掘进被迫停工,严重影响了工程建设。因此,根据原地应力状态,科学的进行支护设计,并选择在围岩适度变形,应力适度释放,围岩还未丧失其承载能力的时机及时的进行支护,这对于最大限度的控制围岩变形,保证工程安全,具有重要意义。

## 2.3 在核废料地质处置中的应用

近年来,经济建设对能源的强劲需求强有力的推动了核能利用的发展。核电站在为经济发展提供了能源的同时,也产生了数量可观的放射性核废料留待处理。处置放射性核废料的通常方法是将其与水泥搅拌成浆液,然后压注到地下数百米深的地下岩层中使之固化,以达

到永久封存的目的。

采用水压致裂技术处置核废料,首要问题是在高压压注过程中不能产生纵向的破裂缝,以免破坏覆盖层的圈闭作用,否则,压注的核废料将溢散到地表。水压裂缝的形态固然受到岩性结构、构造等地质条件的影响,但更主要的是受控于其原地应力状态的制约。前者可以通过地质调查、钻孔勘探查明,而地应力状态则只有通过原地测量才能确定。显然,原地应力测量对于安全处置核废料具有重要意义。

理论研究和生产实践都表明,垂直钻孔中水压致裂所产生的破裂面,都是在最大水平主应力方向的孔壁上首先产生,并在垂直于最小主应力的平面内扩展,因为该方向对裂缝传播阻力最小,张裂缝总是沿着最小阻力路径传播扩展。因此,只要在垂直主应力为最小主应力的情况下,水压致裂所产生的张裂缝最终都是在水平方向延展与传播。

在我国西北某核废料处置场址的深钻孔中的地应力测量结果表明,该区现今地壳应力场的总体特征为最大水平主应力( $S_H$ )大于最小水平主应力( $S_h$ ),大于垂直主应力( $S_V$ ),即: $S_H > S_h > S_V$ ,其中水平主应力占主导地位,垂直应力为最小主应力。显然,该区地应力分布状态有利于水平裂缝的产生和传播,具备核废料地质处置的地应力条件。后经注浆试验证明,破裂形态及其分布均较理想,浆片基本为水平状。

### 3 结语

无论是核废料的地质处置,还是在交通(公路、铁路)、水利水电工程的高压力洞室以及矿产资源的深部开采中,地应力研究对于工程的科学设计和安全都具有重要的现实意义。在水平主应力为最大主应力的情况下,将洞室的长轴布置在近于最大主应力的方向上;在垂直应力为最大主应力的情况下,则将长轴选择在最小主应力的方向上。这样可使洞室围岩应力尽量均衡,差应力最小,最有利于围岩的稳定。同时,充分利用围岩自身的抗载能力,科学的优化工程设计,对于促进工程设计水平的提高具有重要作用。

随着近年来深埋工程的建设,在完整坚硬岩层洞段发生岩爆,在松散软弱岩层洞段发生流变大变形,诸如此类的地质灾害时常发生,因此地应力的测量研究引起了广大工程技术人员的深切关注。在深埋地质工程的前期勘测中,查明工程所在深度岩层的地应力状态,开展地应力测量工作,已经成为人们的广泛共识。因此,地应力测量是地质勘测中必不可少的一项勘测内容,地应力的测量研究必将在各类重大地质工程建设中发挥极为重要的作用。

### 参考文献

- 丁立丰,郭啟良,陈群策,2004.小天都水电站水压致裂法三维应力测量研究.水力发电学报,23(5):44—49.
- 郭啟良,安其美,赵仕广,王海忠,1994.水力劈裂测试在天湖电站设计中的应用.水力发电,4期:57—59.
- 郭啟良,安其美,赵仕广,2002.水压致裂应力测量在广州抽水蓄电站设计中的应用研究.岩石力学与工程学报,21(6):828—832.
- 郭啟良,丁立丰,张志国,2005.压力洞室围岩的高压透水率测试技术与应用研究.岩石力学与工程学报,24(2):230—235.
- 刘允芳,1999.在单钻孔中水压致裂法的三维应力测量.岩石力学与工程学报,18(2):192—196.
- 卿三惠,黄润秋,2005.乌鞘岭特长隧道软弱围岩大变形特性研究.现代隧道技术,42(2):7—14.

## **In-situ Stress Measurement for the Vital Project Construction and Its Application in Designing**

Guo Qiliang

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

**Abstract** The hydraulic fracturing technology has been developed into a reliable and practical method to determine the in-situ stress state of underground caverns, self-bearing capability of wall rock of high-pressure cavern and the high-pressure hydraulic permeability of rock mass, which has been widely used in the disposal of nuclear waste, the long and deeply-buried communication tunnels and the high-pressure caverns of hydraulic power plant. The practices indicate that comprehensively determining physical and mechanical parameters of rock mass and fully utilizing the bearing capacity of wall rock to optimize the design are of great significance to assure the engineering safety and approve the design level.

**Key words:** In-situ stress measurement; Hydraulic fracturing; Deeply-buried cavern; Bearing capacity of rock mass