

文章编号: 1006-6616 (2000) 02-0071-6

# 大茅隧道地应力测量及围岩体稳定性研究

吴满路, 廖椿庭

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 本文介绍了大茅隧道岩石三轴实验和地应力测量结果, 分析了隧道围岩体应力作用特征。作用于该区的应力以水平应力为主, 量值不大, 最大主应力方向为NW。这与该区主要断裂为压扭性的力学性质及震源机制解的结果是一致的。最后结合该区工程地质条件, 对隧道施工安全措施及其稳定性进行了讨论。

**关键词:** 隧道; 地应力测量; 稳定性

**中图分类号:** TU459<sup>+</sup>.4, TU457

**文献标识码:** A

## 0 前言

大茅隧道工程是海南东线高速公路的咽喉工程, 隧道分左右两线, 右线已经竣工通车, 左线正处于详勘阶段。由于隧道围岩体工程地质条件复杂等多方面原因, 在大茅隧道右线施工过程中, 曾发生多次较大塌方, 造成人员伤亡。为了给隧道左线施工设计提供科学依据, 在工程地质勘察中开展了岩石力学试验和地应力测量工作。

## 1 隧道区工程地质概况<sup>①</sup>[1,2]

隧道(左线)位于大茅洞(右线)东部大岭北段鞍部低山区, 山势总体走向近SN, 高差约90 m。设计的隧道轴线方向为N58°W, 隧道长度约1 km左右, 隧道地段地形坡度较陡。隧道东部至中部岩石为燕山期中粒黑云母花岗岩, 西部为细粒斑状黑云母花岗岩, 此外, 隧道区还普遍分布着闪长玢岩岩脉, 该岩脉风化程度较深, 直到隧道底部仍呈强风化状态, 是隧道围岩中的薄弱带。

影响本区稳定性的主要区域性断裂有EW向的尖峰-吊罗断裂和九所-陵水断裂。新生代以来断裂活动主要表现在山脉走向与构造线一致, 沿断裂分布有多处温泉, 迄今这两条断裂仍具活动性。隧道区经地表地质调查及槽探、钻探、物探等勘查, 构造以节理裂隙为主, 由于经过多期构造运动, 岩体较破碎, 节理裂隙相当发育。节理面的力学性质为压扭性和张扭性, 并可见到铁锰质锈斑, 局部可见钙质充填物。主要有三组陡倾角节理裂隙: 240°∠79°; 70°

收稿日期: 1999-10-07

作者简介: 吴满路(1968—), 男, 助理研究员, 主要从事地应力测量、岩石力学以及地壳稳定性方面的研究工作

① 派力工程有限公司海南分公司. 大茅隧道工程地质勘察报告, 1997.

$\angle 66^\circ$ ;  $155^\circ \angle 67^\circ$ 。

隧道段地表沟谷发育,但大多汇水面积小,地表径流短,排泄条件好,不会对隧道有不良影响。地下水属基岩裂隙水,主要靠地表大气降水补给。在隧道北段,中段地下水相对贫乏,对隧道围岩稳定性影响不大;在隧道南段,地表有洼地积水,由于岩体中节理、裂隙的发育,且连通性较好,地表水很容易下渗软化岩体而降低岩体强度,对隧道围岩稳定性会有不良影响。因此,对地表水的疏导应予重视。

隧道区岩石风化深浅各处不一,在脉岩和节理裂隙发育的地段风化较深,而在地势较高的地段风化较浅。总体上看,基岩强风化层较薄,但风化带深度较大,有些地段深的达 85 m 以上,直到隧道底部仍是弱风化岩石。总体上看,该隧道处于弱风化岩石中,未发现断裂破碎带通过,围岩的工程地质条件较好,但局部洞段也存在潜在不良影响。

隧道所在区没有发震断裂通过,地震烈度为 IV 度。据有关研究资料表明,东南沿海地震区现代构造应力场具有水平应力为主导和主压应力轴呈扇形分布的特征,由东向西主压应力轴方向具有近 EW 向渐变为 SEE、SE、SSE 向特征。

## 2 地应力测量方法简介

目前,国内外地应力测量方法较多<sup>[3]</sup>,我们采用的是套心应力解除法,使用的探头为 YG-73 型压磁应力计<sup>[4]</sup>。这种探头性能稳定,测量精度高,在国内被广泛应用,取得了满意的结果<sup>[5,6]</sup>。

通过在单孔中进行多次测量,然后进行统计处理分析,尽量减少测量误差和人为误差。根据现场取得的原始测量资料,利用最小二乘法对数据进行处理,求出应力状态。平面应力计算可求出最大主应力和最小主应力的大小及方向<sup>[4]</sup>。

## 3 岩石三轴试验

大茅隧道区出露的岩石比较简单,只有花岗岩和闪长玢岩脉。闪长玢岩脉较破碎,无法取样;花岗岩岩样均取自  $S_{\text{左ZK}_2}$  勘探孔的不同深度段,这些岩样代表隧道区围岩。考虑到该处实测应力值和上覆岩层的自重情况,围压分别采用 2 MPa、4 MPa、6 MPa。

隧道周边的围岩,通常是处于三维应力状态下,三轴试验能近似地反映岩石的自然受力条件,所以选用三轴强度指标比较合理。实验结果如表 1 和图 1 所示。

表 1 大茅隧道岩石三轴强度实验结果

Table 1 The results of triaxial strength test of granite from the Damao Tunnel

岩性	送样编号	试样编号	采样深度/m	侧向应力 $\sigma_3$ /MPa	抗压强度 $\sigma_1$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa
花岗岩	$S_{\text{左ZK}_2-1}$	2-1	65.0~65.15	2	113.4	28.1
	$S_{\text{左ZK}_2-2}$	2-2	65.27~65.50	4	186.2	31.6
	$S_{\text{左ZK}_2-3}$	2-3	69.0~69.19	4	94.9	12.8
	$S_{\text{左ZK}_2-4}$	2-4	69.8~69.98	6	194.1	33.2

注:其中 2-3 试样,岩石中裂隙发育,试验数据偏低,这组数据供参考。

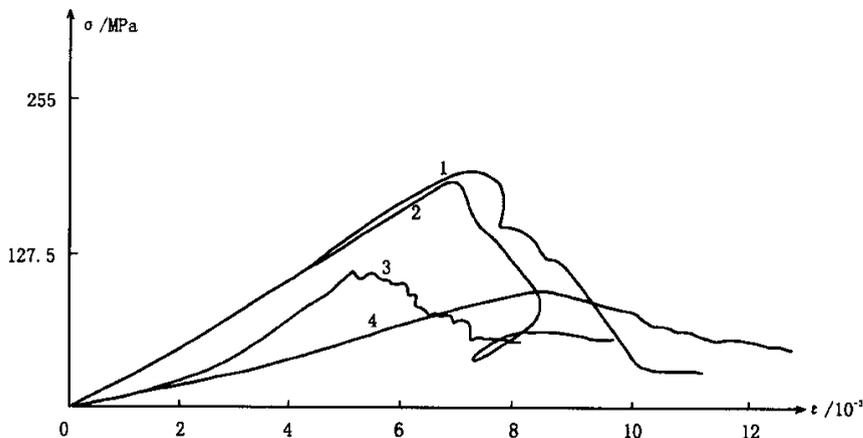


图 1 大茅隧道花岗岩三轴试验曲线

Fig. 1 Triaxial strength test curves of granite from the Damao Tunnel

1. 试样 2-4 三轴试验曲线 (侧向压力 6 MPa); 2. 试样 2-2 三轴试验曲线 (侧向压力 4 MPa);  
3. 试样 2-1 三轴试验曲线 (侧向压力 2 MPa); 4. 试样 2-3 三轴试验曲线 (侧向压力 4 MPa)

从表 1 和图 1 中可以看出:

- (1) 随着侧压的增大, 轴向承压也增大, 三轴抗压强度比单轴抗压强度高。
- (2) 随着侧压的增大, 岩石破裂后残余强度也逐渐增大。

试验结果表明, 岩石超过峰值强度而破裂, 但仍具有一定的强度 (这个强度表示裂隙岩石的强度, 即残余强度)。由于岩体内部节理、裂隙十分发育, 岩体的总体强度很低, 加之地表水的渗入对岩体的软化作用和孔隙水的压力作用, 使岩体的稳定性进一步降低。因此, 必须注意地表水的排放并要对隧道周边进行及时支护, 使隧道周边围岩处于三维应力状态下, 提高岩体整体强度, 使隧道稳定性提高。

## 4 现场地应力测量

我们在大茅隧道左线附近开展地应力测量工作, 目的在于了解隧道区的应力状态。根据地应力测量的选点原则, 结合隧道区工程地质条件, 我们选择了 3 个测点: DK1、DK2、DK3 (图 2)。隧道区节理裂隙较发育, 岩石破碎, 而目前国内外采用的各种地应力测量方法都要求岩体较完整, 这就需要在较破碎的岩体中去寻找较完整的测量段。经过多个测段的测量, 在二个测孔中取得了可靠的数据, 具体情况如下:

DK1 测点: 位于隧道北端山坡下较平坦处, 岩性为花岗岩, 表层为第四纪覆盖层, 其下为强风化层、弱风化层。测段选在 11 m 以下, 测孔深度 18 m, 测量结果如表 2 和图 2 所示。

DK2 测点: 位于隧道北端山坡上, 测孔表层为第四纪覆盖层, 下部为强风化、弱风化花岗岩, 测孔深度 18 m。在弱风化花岗岩中进行了多个测段的测量, 由于岩石破碎, 均未取得理想的结果。

DK3 测点: 位于隧道南端的山坡下, 岩性为花岗岩, 表层为强风化层, 其下为弱风化层, 测孔深度 14 m。由于岩石中石英含量较高, 钻进较困难, 但岩心采取率较高。测量结果如表

2、图 3 和图 4。

表 2 大茅隧道地应力测量结果

Table 2 The results of stress measurements in the Damao Tunnel

测点	最大主应力值/MPa	最小主应力值/MPa	最大主应力方向	最大剪应力 $\tau$ /MPa $\tau = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2$
DK1	3.3	2.0	N76°W	0.65
DK3	3.1	1.7	N79°W	0.7

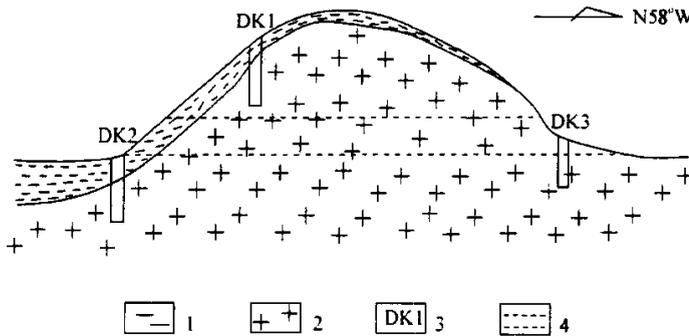


图 2 大茅隧道地应力测点布置示意图

Fig. 2 Sketch map showing the locations of stress measurements at the Damao Tunnel

1. 第四纪覆盖层; 2. 燕山期黑云母花岗岩; 3. 地应力测点; 4. 拟建中的隧道

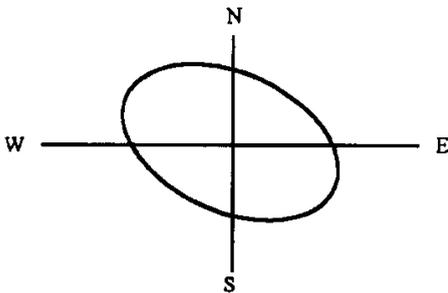


图 3 DK1 测点平面应力椭圆

Fig. 3 Stress ellipse in DK1 measuring point

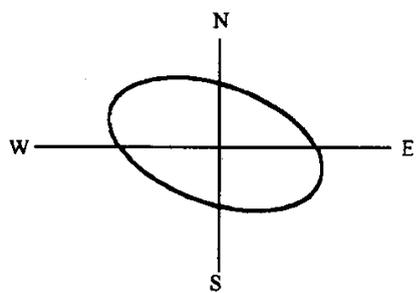


图 4 DK3 测点平面应力椭圆

Fig. 4 Stress ellipse in DK3 measuring point

## 5 结论

根据地应力测量和岩石力学试验结果, 结合隧道区岩体工程地质条件, 提出如下几点意见。

(1) 从表 2 应力测量结果看, 大茅隧道区的最大水平主应力值为 3.3 MPa, 方向为 NW, 方向为 NW, 方向为 NW,

这个应力量值与我国其他地区表层实测应力值相差不大，属于中等应力量值。

(2) 实测最大主应力方向为 NWW，该方向与该地区震源机制解的最大主应力方向基本一致，另据震源机制分析认为，该区震源错动类型为走滑型，这与上述工程地质调查提出的影响本区的主要断裂为压扭性的力学特性是一致的，表明该区的应力作用特征也是以水平应力为主导的。

(3) 隧道上覆岩层厚度从几十米至百余米，按  $\gamma H$  计算最大垂向应力为 2.6 MPa（垂高按 100 m 计，岩石平均容重约为  $2.6 \text{ g/cm}^3$ ），空间应力状态为  $\sigma_1 > \sigma_v > \sigma_2$ （其中  $\sigma_1$  为最大水平主应力， $\sigma_v$  为垂向应力， $\sigma_2$  为最小水平主应力），在这种应力状态下，断层的活动方式为走滑型，这与震源机制分析结果是一致的。

(4) 设计的隧道轴线为 N58°W，最大主应力方向与其夹角很小，在此情况下，隧道周边的受力状态为：垂向为上覆岩层自重压力，两侧作用的水平应力近似于最小主应力。按隧道断面为马蹄形形状分析，隧道周边受力基本上比较均匀，这种应力状态有利于隧道的稳定；另一方面，隧道底板处于弱风化花岗岩区，由于最大主应力量值不大，并且弱风化花岗岩的自身强度也比较高，正常情况下，隧道底板可以采用平底，而不必采用仰拱。

(5) 岩石三轴试验表明：随着围压的增大，岩石的抗压强度也增大，即使岩石超过峰值强度而破裂，仍有一定强度（残余强度），可以在隧道周边形成压力拱。因此，只要使隧道围岩处于三维受力状态，就有利于隧道围岩的稳定，这就要求在隧道掘进过程中，尽量缩短围岩暴露时间，做到及时支护，确保施工安全<sup>[7]</sup>。

(6) 工程地质调查表明，由于隧道周边围岩风化程度不同，其强度差别也较大。闪长玢岩脉呈强风化状态，且风化带深度较深，是设计和施工中需要特别注意的软弱带。因此，必须加强施工过程中的工程地质预测预报，对掌子面前方可能出现的软弱带进行预测。此外，还要根据节理裂隙的产状以及它们的组合特征，分析隧道顶板是否有不稳定块体，是否对隧道围岩的稳定构成威胁<sup>[8~10]</sup>。

(7) 在隧道周边的围岩中，如出现软弱夹层，该处将出现局部的拉应力区。由于隧道围岩节理裂隙很发育，且裂隙基本无胶结，所以，只要出现拉应力区，该处就有岩体失稳的危险。因此，在施工过程中，应特别注意掌子面前方顶板是否存在软弱夹层，如果出现软弱夹层，在掘进过程中，应进行超前支护。通常在掘进爆破时，出现临空面的卸载现象，使该处的岩体从三维受力状态突变为二维受力状态，岩体强度明显下降，很容易诱发围岩体的崩落，如果采用了超前预支护，使岩体处于预支护的围压状态，就能提高岩体的自身强度。

(8) 由于隧道围岩节理裂隙很发育，地表水很容易渗入，在水对岩体的软化作用以及孔隙水压力作用下，岩体的自身强度明显下降，岩体的承载力也明显下降，往往出现拉应力区，导致围岩体崩塌失稳。

(9) 从施工支护角度考虑，完整围岩自身具有一定强度，开挖后，隧道周边围岩能够形成稳定的压力拱，一般情况下，采用一次性成形混凝土浇注支护即可。而对于软弱夹层带，除了采用超前预支护外，还必须在掘进一个断面深度后进行补强的喷锚网支护，增强超前预支护后围岩的整体强度，然后再同完整围岩一起进行成形混凝土浇注支护，保证施工安全。

在现场工作中，派力工程有限公司海南分公司于邦存、任国林等有关同志给予了大力协助，在此致以衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 广东省地质矿产局. 广东省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [2] 胡凤珍, 陈彭年, 高莉青, 等. 中国及其邻区构造应力场 [M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [3] 苏恺之. 地应力测量方法 [M]. 北京: 地震出版社, 1985.
- [4] 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭, 等. 地应力测量及其在工程中的应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [5] 王连捷, 任希飞, 丁原辰, 等. 地应力测量在采矿工程中的应用 [M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [6] 廖椿庭, 崔鸣铎, 任希飞, 等. 金川矿区应力测量与构造应力场 [M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- [7] 肖树芳, 杨淑碧. 岩体力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [8] 黄鼎成, 王振山. 地下工程围岩稳定性与岩体结构关系 [M]. 北京: 科学出版社, 1976.
- [9] 于学馥. 地下工程围岩稳定分析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [10] 霍克, 布朗著 (E Hock, E T Brown). 连志升译. 岩石地下工程 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.

## STRESS MEASUREMENTS AND STUDY OF STABILITY OF THE DAMAO TUNNEL

WU Man-lu, LIAO Chun-ting

(*Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** The results of stress measurements carried out in the Damao tunnel in Hainan Province indicate that predominantly horizontal maximum compressive stress of no great magnitude trends NWW, which agrees with that of the major compressive faults in the area and focal mechanism solution. The results of a triaxial test of the strength of the granite into which the tunnel is excavated are also given. Finally the safety measures during excavation as well as the stability of tunnel are discussed.

**Key words:** tunnel; stress measurement; stability