

二郎山公路隧道轴线地应力测试研究

王成绪 (煤炭科学研究院西安分院 710054)

摘要 介绍了二郎山公路隧道轴线上 3 个钻孔的地应力测试结果, 应用水压致裂法在钻孔中测试, 所测的两个不同大小的水平主应力都大于垂直主应力(除了地表以下很浅处外), 这个地应力与区域大地构造方向一致, 在此基础上评价了隧道硐室围岩的稳定性。

关键词 隧道 地应力 稳定性 二郎山

中国图书分类法分类号 TU457

作者简介 王成绪 男 50 岁 高级工程师 岩石力学

1 引言

拟建中的二郎山公路隧道位于四川省西部天全县与泸定县交界的二郎山主脉, 距成都约 280 km, 距泸定县城约 20 km, 隧道标高 2 150 m。二郎山公路隧道地区山势陡峻, 东部八卦山山顶海拔 3 165 m, 西部干海子山顶海拔 3 218 m。

本次测试利用工程勘察 CZK10、CZK8、CZK9 三个钻孔进行了水压致裂法地应力测试。

2 隧址区地质概况

隧道轴线穿越的主要地层为志留系、泥盆系碳酸盐岩 碎屑岩沉积岩系。共划分为观雾山组、马坝组、甘溪组、平驿铺组、纱帽组、罗惹坪组等 7 个组 15 个岩组段, 地层总厚 2 111.99 m, 隧道进出口谷坡地带尚有第四系松散堆积不等厚覆盖。

二郎山大地构造位置隶属龙门山 NE 向构造带, 鲜河 NW 向构造带与南部的川滇 SN 向构造带组成的“Y”字形构造的三岔口交接地带。以二郎山断裂东西两支(F_1 、 F_2)为代表的深大断裂继续向 NE 向伸延相连, 构成龙门山主干断裂带。隧址区则处于二郎山 NE 向构造与大相岭 NE 向构造的过渡部位, 属于大相岭背斜南西翼, 为一向西倾的单斜构造, 岩层走向 NE30°~50°, 倾向 SW210°~240°, 倾角 15°~32°, 产状稳定, 岩层倾向与隧道轴线方向 (223°18') 基本一致。

区内以断裂为主, 共发育 9 条断裂构造, 其结构面性质皆为扭压扭性, 断裂带宽度较窄, 胶结程度好, 裂隙发育影响范围不大。现将隧道硐室的 F_{c1} 与 F_{c2} 两条断层简述如下:

F_{c1} 断层: 扭性右行平移正断层。呈 NE 向斜切隧道轴线(CZK8 孔东约 200 m), 走向 NE20°~30°, 倾向 NW290°~300°, 倾角 60°~85°, 地层断距 150~300 m, 断层带宽 0.3~1.0 m, 主要由糜棱岩组成, 裂隙发育影响带宽约 10~15 m。

F_{c2} 断层: 为 F_{c1} 旁侧分支断层, 扭性右行平移断层, 斜切隧道轴线, 后与 F_{c1} 断层斜交, 走向近 SN, 倾向 W, 倾角 63°~75°, 地层断距 40~80 m(缺失), 断层带宽 0.5~0.8 m, 裂隙发育影响宽度 15~25 m。

3 地应力测试结果

在 CZK8、CZK9、CZK10 三个钻孔中采用水压致裂法分段测试, 分述如下:

CZK10 孔孔口标高 2 748.3 m, 钻孔深度 632.2 m。地下水静止水位埋深为 232.7 m, 孔径 91 mm。共测试 10 个测试段, 测试段岩性有厚层白云岩、灰岩、粉砂岩夹粉砂质泥岩。

由于测试段岩石组分与结构的不均一性, 致使应力值有些差异, 最小水平主应力值为 9~12 MPa, 最大水平主应力值高达 15~18 MPa, 最大水平主应力的平均方向为 NE59.5°(表 1)。

CZK8 孔位于轴线的东段, 孔口标高 2 597.3 m, 终孔深度 470.3 m, 地下水静止水位 184 m, 孔径 91 mm。共测试 11 个测试段, 测试段的岩性有砂质泥岩、泥质粉砂岩夹石英粉砂岩薄层或条带、厚层石英粉砂岩与中厚层状粉砂岩、厚层灰岩、中厚层细粒石英砂岩、薄层泥灰岩、白云岩夹泥岩, 在孔深 335.9 m 处揭露 F_{c1} 断层, 并在其它部位揭露 F_{c1} 断层的分支断层。

由于岩石组分与断层的影响, 水平主应力值明

表 1 CZK10 孔岩石应力测试成果表

序号 (段)	深度/m	压裂参数/MPa					应力值/MPa	
		P_b	P_r	P_s	P_h	T	S_h	S_b
1	79.72~80.62	8.21	6.81	4.00	—	1.40	5.19	4.00
2	159.70~160.60	7.97	7.30	4.60	—	0.67	6.50	4.60
3	149.35~149.25	7.65	6.60	4.55	—	1.05	6.95	4.55
4	279.61~280.51	12.96	12.29	9.79	0.47	0.67	16.61	9.97
5	537.90~538.80	19.26	14.38	11.88	3.06	4.88	18.20	11.88
6	550.10~551.00	15.20	12.15	10.30	3.08	3.10	15.07	10.00
7	563.40~564.37	14.67	13.64	10.68	3.12	1.03	15.28	10.68
8	587.50~588.40	14.43	13.67	10.88	3.56	0.86	15.41	10.88
9	600.48~601.38	17.97	13.60	11.20	3.68	4.37	14.32	11.20
10	621.52~622.42	16.01	15.77	11.82	3.90	1.24	16.79	11.82

注: P_b —岩石破裂压力; P_r —重张压力; P_s —闭合压力; P_h —静水压力; T —抗拉强度; S_h —最大水平主应力; S_b —最小水平主应力

显小于 CZK10 孔。在断层附近, 主应力方向也发生明显变化, 最大水平主应力方向平均为 NE45.3°(表 2)。

CZK9 孔口标高 2 745.3 m, 终孔深度 615.5 m, 地下水静止水位 71.2 m。孔径 91 mm。共测试 12 个测试段, 岩性有粉砂岩、石英砂岩、砂质泥岩。

由于岩性的不同, 水平主应力值有较大差异, 最大水平主应力的方向平均为 NE49.5°(表 3)。

4 地应力结果评述

4.1 水平主应力

一般来说, 垂直方向的主应力值是上覆地层的重力。二郎山隧道轴线地区的水平主应力在埋深 200 m 以下, 两个水平主应力都大于垂直主应力, 两个水平主应力值随着深度的增加而增加, 但不呈线性增加。

水平主应力值与岩性组合、岩石结构有关。在同一深度上, 两种不同岩性的测试段, 其主应力值有一定的差异。在同一个孔内, 两个深度相邻的测试段, 由于岩性的不同, 主应力值差异较大, 这种现象在 3 个孔的测试过程中表现为破裂压力的差异, 在相对较“软”的岩层里应力则以较大的应变能的形式贮存在岩层中。

4.2 CZK8 孔内的异常

在 CZK8 孔深度 326.68~327.58 m 处, 岩性为钙质泥岩, 测得的最大主应力值 $S_h=19.2$ MPa, 最小主应力值 $S_b=14.8$ MPa, 这和孔深 313.84 m 处的测试段有着明显的差异。此段为厚层状石灰岩,

表 2 CZK8 孔应力测试成果表

序号 (段)	深度/m	压裂参数/MPa					应力值/MPa	
		P_b	P_r	P_s	P_h	T	S_h	S_b
1	150.38~151.28	9.59	6.17	4.01	—	3.42	5.86	4.01
2	171.42~172.32	—	6.37	4.22	—	—	6.29	4.22
3	296.07~296.97	12.27	10.37	7.66	1.12	1.90	11.49	7.66
4	313.84~313.74	—	—	5.74	1.30	—	7.65	5.74
5	326.68~327.58	14.67	14.67	11.47	1.43	0.95	19.26	11.47
6	347.45~348.35	19.34	19.34	13.07	1.63	4.47	22.71	13.07
7	386.24~387.14	20.48	20.48	10.06	2.02	8.02	16.70	10.06
8	401.51~402.41	18.27	18.27	13.12	2.18	2.85	21.76	13.12
9	414.60~415.50	22.75	22.75	13.95	2.31	6.25	23.04	13.95
10	437.21~438.11	23.47	23.47	20.57	2.53	0.57	36.28	20.57
11	450.56~451.46	25.41	25.41	17.41	2.67	5.90	30.35	17.41

表 3 CZK9 孔应力测试成果表

序号 (段)	深度/m	压裂参数/MPa					应力值/MPa	
		P_b	P_r	P_s	P_h	T	S_h	S_b
1	234.18~235.08	8.84	6.54	4.64	1.64	2.20	5.64	4.04
2	327.25~328.15	19.70	15.20	11.57	2.57	4.50	16.94	11.57
3	355.55~356.45	14.30	11.70	9.76	2.86	3.00	14.72	9.76
4	386.59~387.49	10.27	8.27	6.47	3.17	2.00	7.77	6.47
5	463.46~464.36	16.26	8.16	7.23	3.93	8.10	9.60	7.23
6	491.90~492.80	—	12.27	10.32	4.22	—	14.47	10.32
7	510.60~511.50	20.63	15.53	11.91	4.31	5.32	16.11	11.91
8	523.30~524.20	22.24	16.84	14.53	4.43	6.00	22.32	14.53
9	536.67~537.57	21.32	17.47	15.82	4.37	3.85	25.62	15.82
10	553.84~554.74	15.74	12.89	10.74	4.34	2.85	14.49	10.74
11	567.20~568.10	—	10.27	8.57	4.97	—	10.47	8.57
12	601.08~601.98	18.77	14.87	12.21	5.31	3.90	16.45	12.21

测得 $S_h=7.65$ MPa, $S_b=5.74$ MPa。两个测试段相距仅十多米, 两段岩性差异很大, 地应力大相径庭, 钙质岩段是厚层灰岩段的两倍多。地应力的方向也发生了较大变化, 最大水平主应力方向为 NE23°, 与该孔最大水平主应力方向 NE45.3°相差 22°之多。

这个测试段的异常是因为 F_{C1} 断层从该段附近通过, 断层的作用使应力在此发生变化, 主应力值显示较高的应力比, 两水平主应力相差较小, 水平主应力方向与断裂的扭动方式近于一致。

4.3 应力集中现象

三个孔基本上在同一标高 2 200~2 300 m 处都存在应力集中现象。距地表以下一定深度, 水平主应力迅速增加, 再过一定深度, 地应力值变小, 或者增加的幅度变化。CZK10 孔从孔深 280 m 开始, 水平主应力增加迅速, 水平主应力高达 15~18 MPa, 最小主应力值为 9~12 MPa。CZK8 孔在孔深 350 m

左右水平主应力值增加梯度最大,最大水平主应力值达到21~23 MPa。CZK9孔从孔深460 m以下水平主应力值大幅增加,最大水平主应力值高达25 MPa。

以上不仅说明二郎山隧道区是高应力区,而且说明在隧道硐室围岩处存在应力集中现象,这与在钻孔施工中见到不少“岩饼”的情况是一致的。

4.4 大地构造机理

新构造运动是现今区域构造应力场长期作用的结果。新生代以来,中国大陆的地壳运动主要表现为高纬度相对向低纬度的水平走滑,西邻受印度大陆板块相对北移阻挡,地壳缩短加厚,从而使青藏地区上升隆起,形成喜马拉雅构造域。位于喜马拉雅构造域隆起弧东部边缘的川西地区,受到东部地区向南滑移,西部印度大陆地块北移所形成的一对南北向区域顺扭应力力偶的作用,使该地区受到北东方向的挤压,导致川西地区形成一系列的北西向构造,从而形成了现今区域构造应力场背景下的构造格局。

川西地区北西向新构造的形成时间,与北东向构造的切割叠加关系,水系的流向与控制,构造圈闭的压力系数差异,岩体波速的区别以及地震震中分布,烈度展布的特点,都是确定川西地区现今区域应力场为NE—SW向挤压的重要事实和证据。

二郎山公路隧道隧道区的地应力方向与上述区域构造应力场相吻合。

4.5 对隧道开挖的应用

二郎山公路隧道位于高地应力区,加上隧道埋深较大,必然会遇到围岩稳定性问题,因而根据地应力测试结果评价围岩稳定性是十分有意义的。

盖里(1986)提出,要利用不同的应力状态来确定隧道开挖轴线的方向。低的垂直主应力,高的水平主应力地区可利用水平应力上的差异,其中最大水平主应力方向是隧道轴线的最佳方向。二郎山公路隧道轴线展布方向为225°18',这与该地区最大水平主应力方向之间的夹角仅为6°左右,选择此轴线方

向对隧道硐室围岩相对稳定是有利的。

对于高的垂直主应力、低的水平主应力地区在选择隧道(或煤矿巷道)方向时,应与最小水平主应力的方向一致(霍尔,布郎1980),王成绪等人(1994)在黄陵矿区一号井平巷掘进方向最优化设计研究时得到了同样的结论。

前已述及,除了个别观测点以外,二郎山公路隧道区的应力状态都为 $S_H > S_h > S_v$ (S_v 为垂直主应力),取 $\lambda = \frac{S_H}{S_v}$,由于隧道硐室围岩的地应力 S_H 在18.9~19.6 MPa,所以其 $\lambda = 1.24 \sim 1.28$ 。这是岩石发生岩爆的标志。在隧道开挖时要引起重视,防止意外事故发生。

5 结论

通过二郎山公路隧道轴线地应力测试分析研究,可得出以下结论:

a. 隧道地区的地应力状态是 $S_H > S_h > S_v$,最大水平主应力的方向为NE48.3°~50.5°,与轴线延伸方向夹角为5°~7.2°,这对于隧道硐室围岩稳定是有利的。

b. 二郎山隧道区的地应力场与川西现代区域大地构造作用是一致的。

c. 水平主应力有随深度增加的趋势,在标高2 200~2 300 m处有一应力集中带,最大水平主应力达25.6 MPa,隧道开挖时可能会发生岩爆,应重视解决。

参考文献

- 1 祁林,蒋能强,孙林松.四川地区近代地应力场与发震机制规律探讨.四川地质学报,1994;(2):81~87
- 2 四川省地震局第六研究室.川藏公路二郎山隧道工程区地震基本烈度复核及地震危险性分析报告,1991
- 3 Hoer, E, Brou N R. Underground Excavations in Rock. Institute of Mining and Metallurgy, London; 1980

THE MEASURE OF GROUND STRESS IN ROAD TUNNEL AXIS OF ERLANG MOUNTAIN

Wang Chengxu (Xi'an Branch, CCRI)

Abstract This paper introduces the measuring results of ground stresses of 3 holes in the road tunnel axis of Erlang mountain with hydraulic fractured method. The two major horizontal stresses are bigger than vertical stresses (except the shallow under the earth surface). The directional coincidence of ground stress and geotectonic is discussed, and surrounding rock stability of chamber in the tunnels is evaluated.

Keywords tunnels; ground stress; stability; Erlang mountain