

文章编号:1006-2106(2014)09-0017-04

## 铁路岩体初始应力场评估的探讨\*

韩康\*\* 付开隆 周树齐

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**研究目的:在实际工作中,根据地应力资料进行评估,铁路绝大部分隧道都处于极高地应力、高地应力状态,引发围岩调整、工程措施加强,从而会引起投资大量增加,甚至在分析隧道衬砌开裂和变形的原因时引发大的争议和混乱,但实际已开挖的隧道发生岩爆、大变形的工程案例却是极少数。本文通过岩体力学理论、地应力资料、工程案例并结合相近行业有关规定,对铁路规范中的铁路岩体初始应力场评估进行探讨。

**研究结论:**(1)铁路规范对初始地应力场的评估不符合实际,应修改,初步判定实测地应力大于30 MPa时,岩爆发生的可能性增大;(2)对初始地应力场的评估结论应慎重,引发的增加投资应纳入动态设计;(3)勘察设计阶段的地应力测试应合理、适当;(4)该研究成果可应用于铁路规范修改及隧道勘察。

**关键词:**铁路;岩体;初始应力场评估;探讨

**中图分类号:**U452.1+1 **文献标识码:**A

## Discussion on the Assessment of Initial Stress Field of Railway Rock Mass

HAN Kang, FU Kai-long, ZHOU Shu-qi

(China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract: Research purposes:** In actual work, according to the ground stress data for assessment, most railway tunnels are under very high ground stress and high ground stress state, which causes adjustment of surrounding rock and engineering measures to strengthen, thus these will cause large increased investment, even cause large dispute and chaos in analysis causes of tunnel lining cracking and deformation, but the engineering case that rock burst and large deformation occurred in actual excavation of tunnel is very rare. In this paper, according to rock mass mechanical theory, the ground stress information and engineering case, combined the relevant provisions of similar industry, the assessment of initial stress fields of rock mass in railway specification is discussed.

**Research conclusions:** (1) The assessment of railway specification to initial ground stress field is not realistic and should be revised, preliminary judgment when the measured in-situ stress >30 MPa, the possibility of rockburst is increased. (2) Assessment conclusion of initial ground stress field should be discreet, the increased investment should be incorporated into the dynamic design. (3) The stress tests of survey design stage should be reasonable and appropriate. (4) The research results can be applied to the modification of railway norms and tunnel exploration.

**Key words:** railway; rock mass; assessment of initial stress field; discussion

在实际工作中,根据地应力资料进行评估,铁路绝大部分隧道都处于极高地应力、高地应力状态,引发围岩调整、工程措施加强,从而会引起投资大量增加,甚至在分析隧道衬砌开裂和变形的原因时引发大的争议

和混乱,但已开挖的隧道实际发生岩爆、大变形的工程案例是极少数,有其特殊性,规律性有待进一步研究。本文通过岩体力学理论、地应力资料、工程案例并结合《水力发电工程地质勘察规范》(GB 50287—2006)附

\* 收稿日期:2015-05-13

\*\* 作者简介:韩康,1965年出生,男,教授级高级工程师。

\*\*\* 本文由中国铁道学会工程分会线路分专业委员会推荐

录 P(P124)表 P. 0. 2 岩体初始地应力的分级,对铁路规范中的铁路岩体初始应力场评估进行探讨。

### 1 相关规范的规定及理论验算实例

#### 1.1 相关规范的规定

《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2007)(以下简称铁路规范)条文说明(P179)对初始地应力场的规定如表 1 所示,《水力发电工程地质勘察规范》(GB 50287—2006)(以下简称水电规范)附录 P(P124)对岩体初始地应力的分级如表 2 所示。

表 1 初始地应力场评估基准

初始地应力状态	主要现象	评估基准( $R_c/\sigma_{max}$ )
极高地应力	硬质岩:开挖过程中时有岩爆发生,有岩块弹出,洞壁岩体发生剥离,新生裂缝多,成洞性差	< 4
	软质岩:岩芯常有饼化现象,开挖过程中洞壁岩体有剥离,位移极为显著,甚至发生大位移,持续时间长,不易成洞	
高地应力	硬质岩:开挖过程中可能出现岩爆,洞壁岩体有剥离和掉块现象,新生裂缝较多,成洞性较差	4 ~ 7
	软质岩:岩芯时有饼化现象,开挖过程中洞壁位移显著,持续时间较长,成洞性差	

注: $R_c$ 为岩石单轴饱和抗压强度(MPa); $\sigma_{max}$ 为最大地应力值(MPa)。

表 2 岩体初始地应力的分级

应力分级	最大主应力量级 $\sigma_m$ /MPa	岩石强度应力比 $R_b/\sigma_m$	主要现象
极高地应力	$\sigma_m \geq 40$	< 2	硬质岩:开挖过程中时有岩爆发生,有岩块弹出,洞壁岩体发生剥离,新生裂缝多;基坑有剥离现象,成形性差;钻孔岩芯多有饼化现象。 软质岩:钻孔岩芯有饼化现象,开挖过程中洞壁岩体有剥离,位移极为显著,甚至发生大位移,持续时间长,不易成洞;基坑岩体发生卸荷回弹,出现显著隆起或剥离,不易成形
高地应力	$20 \leq \sigma_m < 40$	2 ~ 4	硬质岩:开挖过程中可能出现岩爆,有岩块弹出,洞壁岩体有剥离和掉块现象,新生裂缝较多;基坑时有剥离现象,成形性一般尚好;钻孔岩芯时有饼化现象。 软质岩:钻孔岩芯有饼化现象,开挖过程中洞壁岩体位移显著,持续时间较长,成洞性差;基坑有隆起现象,成形性较差
中等地应力	$10 \leq \sigma_m < 20$	4 ~ 7	硬质岩:开挖过程洞壁岩体局部有剥离和掉块现象,成洞性尚好;基坑局部有剥离现象,成形性尚好。 软质岩:开挖过程中洞壁岩体局部有位移,成洞性尚好;基坑局部有隆起现象,成形性一般尚好
低地应力	$\sigma_m < 10$	> 7	无上述现象

注: $R_b$ 为岩石单轴饱和抗压强度(MPa); $\sigma_m$ 为最大地应力值(MPa),一般情况下,岩石强度应力比与最大主应力量级同时满足才属于该等级的应力区。

#### 1.2 理论验算实例

根据《岩体力学》(刘佑荣、唐辉明编著)理论:大部分岩体中的水平应力大于铅直应力,绝大多数情况下平均天然水平应力与天然铅直应力的比值( $\lambda$ )为 1.5 ~ 10.6,绝大部分地区的铅直天然应力  $\sigma_v = 0.027 0H$ (注:应力单位为 MPa,深度  $H$  单位为 m),以西南地区常见的泥岩、灰岩为例,在水平应力大于铅直应力情况下,采用冒进(不保守)的参数进行评估,可得出以下结论,如表 3、表 4 所示。

从西南地区常见的泥岩、灰岩验算实例看,铁路规范的标准很低,水电规范受最大主应力量级的控制,门

槛比铁路高很多。

表 3 泥岩 ( $R_c = 5 \text{ MPa}, \lambda = 1.5$ )

规范	极高地应力	高地应力	中等应力
铁路规范	埋深 $\geq 31 \text{ m}$	埋深 $\geq 17 \text{ m}$	-
水电规范	埋深 $\geq 988 \text{ m}$	埋深 $\geq 494 \text{ m}$	埋深 $\geq 247 \text{ m}$

表 4 灰岩 ( $R_c = 40 \text{ MPa}, \lambda = 1.5$ )

规范	极高地应力	高地应力	中等应力
铁路规范	埋深 $\geq 247 \text{ m}$	埋深 $\geq 141 \text{ m}$	-
水电规范	埋深 $\geq 988 \text{ m}$	埋深 $\geq 494 \text{ m}$	埋深 $\geq 247 \text{ m}$

根据《工程地质分析原理》(张倬元、王士天、王兰生著,1994,第 88 页)提出:产生岩饼的应力量级范围

一般大于 30 MPa,据此反算埋深大于 740 m。

## 2 工程案例

### 2.1 地应力测试主要情况

西南地区位于艰险山区,线路工程中隧道多,埋深大,地应力测试资料丰富。已建成的代表性铁路隧道情况如表 5 所示。

表 5 西南地区代表性铁路隧道情况

铁路线路名称	隧道座数 /座	隧道长度 /km	最大埋深 /m	地应力测试(点)
成昆线	427	336.8	1 650	-
南昆线	262	195.39	700	1
渝怀线	195	245.195	1050	21
贵广线	230	480	850	约 210
渝利线	63	165	836	47

地应力测试主要情况:

(1)从中铁二院项目地应力测试结果看:位于河流峡谷附近少量的少量隧道(如方斗山隧道、板桃隧道、彭水隧道)地应力为  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ ,其余的为  $\sigma_H >$

$\sigma_h > \sigma_v$ ,与岩体力学的理论相符,即大部分岩体中的水平应力大于铅直应力。

(2)地应力测试结果与测试方法有关:如二郎山公路越岭隧道,长 4 176 m,最大埋深达 760 m,在勘察设计阶段,采用钻孔水力压裂法完成了地应力的测试工作,在隧道主轴线及其附近测得的  $\sigma_H$  最大值可达 53.47 MPa(CZK 3 孔深 707.43 ~ 708.26 m);在施工过程中采用应力解除法进行地应力测试,隧道区最大主应力量级为 17.5 ~ 35.3 MPa。

(3)地应力测试结果与具体操作有关:如某铁路已施工完成的隧道,在既有隧道的平道中钻孔 15 m,深度 5.9 ~ 11.9 m 范围,测出的地应力不同,最大相差 50%。

### 2.2 已建成的主要铁路深埋隧道案例

根据《中国隧道及地下工程修建技术》(王梦恕等著)介绍:截至 2007 年底,我国已营业线路的铁路隧道 5 941 座,3 750 271 延长米,长度不小于 500 m 的隧道有 1 987 座。现就接触、收集到的一些代表性铁路深埋隧道的地质简况列一简表,如表 6 所示。

表 6 代表性铁路深埋隧道的地质简况

线路	隧道名	长度/km	最大埋深/m	岩性	最大地应力 /MPa	岩爆	软质岩位移	备注
衡广复线	大瑶山隧道	14.295	910	灰岩	-	-	-	$\sigma_v = 24.57$
成昆线	关村坝隧道	6.107	1 650	灰岩	-	√(有 300 m 中等岩爆,为峡谷应力集中区)	-	$\sigma_v = 44.55$
南昆线	米花岭隧道	9.392	700	泥岩、砂岩	-	-	-	$\sigma_v = 18.9$
南昆线	家竹箐隧道	4.99	404	泥岩夹煤层	$\sigma_1 = 19.62$	-	√(有 390 m 软岩大变形,煤层段)	最大瓦斯压力 1.34 MPa,水平地应力为垂直地应力的两倍
渝怀线	板桃隧道	8.625	1 050	灰岩	-	-	-	$\sigma_v = 28.35$
渝怀线	武隆隧道	9.418	800	灰岩	-	-	-	$\sigma_v = 21.6$
渝怀线	彭水隧道	9.028	720	灰岩	-	-	-	$\sigma_v = 19.44$
渝怀线	园梁山隧道	11.068	780	$\sigma_H = 17.39$	-	-	埋深 574 m 处测得	
渝利线	方斗山隧道	7.246	836	灰岩	$\sigma_H = 22.15$	-	-	
渝利线	沙子关隧道	9.252	700	泥岩、砂岩	$\sigma_H = 24.8$	-	-	
贵广线	宝峰山隧道	13.854	850	砂岩	$\sigma_H = 24.6$	-	-	计算得出
贵广线	岩山隧道	14.51	637	砂质板岩	$\sigma_H = 25.83$	-	-	埋深 468 m 处测得
兰新线	乌鞘岭隧道	20.05	1100	千枚岩	$\sigma_H = 32.84$	-	√	-
西康线	秦岭翠华山隧道	11.271	600	片麻岩	$\sigma_H = 38.39$	√	-	水平地应力为垂直地应力的 2.4 倍,方向不利

主要体会:

(1) 绝大部分隧道一般不会发生岩爆及软质岩大变形。

(2) 发生岩爆及软质岩大变形的是极少数,有其特殊性,规律性有待进一步研究。如关村坝隧道最大埋深达 1 650 m ( $\sigma_v = 44.55$  MPa), 根据成昆铁路技术总结, 特别记录了发生中等岩爆的位置位于离隧道出口 600~900 m 范围(埋深 1 200 m), 应为峡谷地段应力集中区范围, 而隧道中部埋深最大位置未做记录; 秦岭翠华山隧道地应力高 ( $\sigma_H = 38.39$  MPa) 水平地应力为垂直地应力的 2.4 倍, 且方向不利。家竹箐隧道有 390 m 软岩大变形, 位于煤层地段, 最大瓦斯压力 1.34 MPa, 水平地应力为垂直地应力的两倍 ( $\sigma_1 = 19.62$  MPa); 乌鞘岭隧道地应力高 ( $\sigma_H = 32.84$  MPa), 方向不利, 岩体破碎。

(3) 铁路规范对初始地应力场的评估与实际差距很大, 水电规范也显得保守。

(4) 从中铁二院经历的铁路隧道(已施工完成)深孔勘测看, 实测地应力小于 30 MPa, 深孔岩心未见饼化现象, 隧道施工未见岩爆发生, 初步判定实测地应力大于 30 MPa 时, 岩爆发生的可能性增大。

### 3 结论

(1) 铁路规范对初始地应力场的评估不符合实际, 应修改, 初步判定实测地应力大于 30 MPa 时, 岩爆发生的可能性增大。

岩爆、软岩大变形是一种复杂的地质现象, 它的发生与岩石的力学性质、构造、地应力、隧洞形状、岩石完整性、开挖方式等多种因素有关, 影响因素众多。目前地应力测试理论的假设条件与实际存在一定差距, 如水压致裂原地应力测量是以弹性力学为理论基础, 并以下面三个假设为前提: 岩石是线弹性和各向同性的; 岩石是完整的, 压裂液体对岩石来说是非渗透的; 岩层中有一个主应力的方向和孔轴平行。地应力测试数据与测试方法、仪器、操作过程等很多因素有关, 岩石单轴饱和抗压强度的实验资料数据也是一个范围值, 离散性大, 这样岩石强度应力比 ( $R_c/\sigma_{max}$ ) 的人为因素相当大, 在众多因素中, 采用人为因素影响大的强度应力比来进行铁路岩体初始应力场评估是不合适的, 也与实际相差很大, 今后的研究方向应是多因素的综合确定, 比如水电规范增加了最大主应力量级因素, 情况要好的多。根据铁路工程经验, 初步判定实测地应力大于 30 MPa 时, 岩爆发生的可能性增大。

(2) 对初始地应力场的评估结论应慎重, 引发的增加投资应纳入动态设计。

初始地应力场的评估可能引起岩爆、大变形的结

论, 还会引起围岩调整, 这都会引起投资大量增加。由于现行规范有关规定不成熟, 在勘察设计阶段, 应充分收集既有工程的岩爆、大变形资料, 对有关问题的定性尽量参照相邻工程, 以免引起误判; 若没有可参照的工程案例, 存在较多因素都支撑岩爆、大变形的可能性, 但不确定, 则引发的增加投资应纳入动态设计, 达到节省投资的目的。

(3) 勘察设计阶段的地应力测试应合理、适当。目前, 地应力测试越来越多, 相应的勘察成本增加, 由于有关岩爆、大变形的评估标准不成熟, 在勘察设计阶段, 根据地应力测试数据进行评估的结果很少采用, 适用性不高。因此, 为了合理节约勘察成本, 在勘察设计阶段, 应充分收集既有工程的岩爆、大变形资料, 认真分析岩石的力学性质、岩石完整性、地质构造、天然应力状态等众多因素, 研究确定地应力测试的必要性、合理性。

### 参考文献:

- [1] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.  
**Liu Yourong, Tang Huiming. Rock Mass Mechanics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999.**
- [2] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.  
**Wang Mengshu. Tunnel and Underground Engineering Construction Technology in China [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.**
- [3] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.  
**Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Principles of Engineering Geology Analysis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.**
- [4] GB 50287—2006, 水力发电工程地质勘查规范[S].  
**GB 50287—2006, Code for Hydropower Engineering Geological Investigation[S].**
- [5] TB 10012—2007, 铁路工程地质勘察规范[S].  
**TB 10012—2007, Code for Geology Investigation of Railway Engineering [S].**
- [6] 杜世回. 秦岭翠华山特长隧道高地应力问题研究[J]. 铁道工程学报, 2012(2): 55—58.  
**Du Shihui. Study on High Stress of Cuihuashan Super Long Tunnel in Qinling Mountain Area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(2): 55—58.**
- [7] 韩康, 王科. 铁路地震安全性评价与地震动参数取值的探讨[J]. 高速铁路技术, 2014(5): 9—11.  
**Han Kang, Wang Ke. Discussion on Railway Earthquake Safety Evaluation and Earthquake Dynamic Parameter Values [J]. High Speed Railway Technology, 2014(5): 9—11.**