

通渝隧道 Kaiser 效应地应力测试研究

徐林生

重庆交通学院 土木建筑学院, 重庆 400074

摘要: 通过 5 组岩石声发射 Kaiser 效应地应力的测试, 查明了通渝深埋特长公路隧道工程岩体内地应力的总体状态为潜在走滑型, 隧道中部测得的地应力量级普遍较高, 实测最大主应力 σ_1 最高达 33.04MPa, 因而施工过程中应密切关注其高地应力与岩爆问题。

关键词: 隧道; 地应力; Kaiser 效应

中图分类号: U451+.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-716X(2006)02-0025-03

通渝隧道是 202 省道城黔路燕子河至大进段二级公路建设的关键性控制工程。该隧道主要穿越寒武系至三叠系的一套碳酸盐岩—碎屑岩建造地层(图 1), 全长 4279m、最大埋深 1000 余米, 属深

埋特长公路隧道, 高地应力是该隧道的主要工程地质问题之一。为了指导和配合通渝隧道的顺利施工, 受重庆市公路局的委托, 我们承担了该隧道工程的岩石声发射 Kaiser 效应地应力测试研究任务。

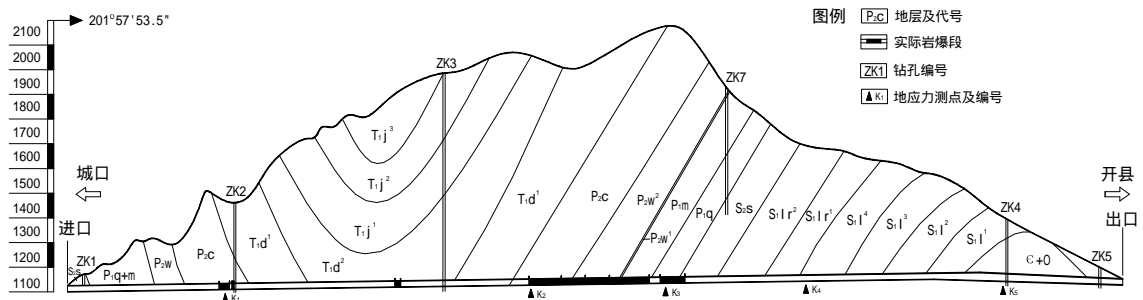


图 1 通渝隧道工程地质剖面

1 岩石声发射 Kaiser 效应地应力测试的基本原理

脆性材料对曾经受过的力具有记忆性。1950 年, 德国 J.Kaiser 博士发现多晶金属的应力从其历史最高水平释放后, 再重新加载, 当应力达到和超过先期所受过的最大应力值时, 才会有明显的声发射现象出现, 这就是著名的 Kaiser 效应。从很少产生声发射到大量产生声发射的转折点称为 Kaiser 点, 其所对应的应力即为材料先期受到过的最大应力^[1]。1963 年, 美国岩石力学家 R.E.Goodman 通过试验证实了岩石也同样具有 Kaiser 效应现象, 从而为应用这一技术测定岩体的天然应力状态奠定了基

础。20 世纪 70 年代末期以来, 日本、美国、中国等学者对这一问题开展了广泛的理论及实验研究, 相继解决了 Kaiser 效应方向的独立性、噪声排除等难题, 使 Kaiser 效应地应力测试方法具有了实用性^[2,3]。

Kaiser 效应测试地应力的关键是准确地确定 Kaiser 点的位置。按照弹性理论, 对于受力物体中的某一点, 若已知其 6 个方向的应力分量, 那么这一点的三向应力状态就可以完全确定。因此, 可以将现场定向采取的完整岩样, 按 X、Y、Z、X45° Y、Y45° Z、Z45° X 这 6 个方向制取定向试样, 每个方向制取 4 至 6 个试件, 每个试件尺寸为 3cm×3cm×10cm 左右; 各定向试样经过切、磨成形后, 两加

收稿日期: 2004-12-27; 修订日期: 2005-03-15

作者简介: 徐林生(1964—), 男, 浙江桐乡市人, 博士后, 教授, 从事岩土力学与隧道工程的教学、科研工作。

载端面须经双端面磨床精磨,使其平行度、垂直度与平整度得以充分保证,并置于实验室测试系统中;在加载的同时,同步测定声发射特征参数,由此可以获得每个定向试件的 Kaiser 点所对应的荷载 P_k 。然后就可以按下列步骤整理、计算测点的空间应力与状态:

1) 计算各试件 Kaiser 点应力 s_k :

$$s_k = 10P_k / S$$

式中: s_k ——Kaiser 点所对应的应力,单位为 MPa; P_k ——Kaiser 点荷载,单位为 kN; S ——该试件的截面积,单位为 cm^2 。

2) 求解应力分量

测点各方向正应力分量 s_k 与应力分量 s_x 、 s_y 、 s_z 、 t_{xy} 、 t_{yz} 、 t_{zx} 的关系为:

$$s_k = A_{k1}s_x + A_{k2}s_y + A_{k3}s_z + A_{k4}s_{xy} + A_{k5}s_{yz} + A_{k6}s_{zx}$$

式中:

$$A_{k1}=l_{ij}^2, \quad A_{k2}=m_{ij}^2, \quad A_{k3}=n_{ij}^2$$

$$A_{k4}=2l_{ij}m_{ij}, \quad A_{k5}=2m_{ij}n_{ij}, \quad A_{k6}=n_{ij}l_{ij}$$

其中 l 、 m 、 n 为方向余弦; i 为测试方向 ($i=1, 2, \dots, 6$); j 为 i 方向的第 j 个试件 ($j=1, 2, \dots, N$); N 为每个方向的试件数; $k=i \cdot j$

求 s_k 式的矩阵形式也可以表示为:

$$[s]^k = [A] \cdot [s]$$

式中: $[s]^k$ ——各方向正应力列阵; $[s]$ ——6 个应力分量组成的列阵; $[A]$ ——上述基本元素组成的 $N \times 6$ 阶系数矩阵。

采用最小二乘法,就可以从上式中求得最佳应力分量 $[s]$ 。

3) 求解主应力量值

解下列三次方程:

$$s^3 - J_1 s^2 + J_2 s - J_3 = 0$$

得到以下各主应力量值:

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= 2\sqrt{-P/3} \cos W/3 + J_1/3 \\ s_2 &= 2\sqrt{-P/3} \cos(W+2p/3) + J_1/3 \\ s_3 &= 2\sqrt{-P/3} \cos(W+4p/3) + J_1/3 \end{aligned} \right\}$$

式中: $P=J_1^2/3+J_2$;

$$\delta = -2J_1^3/27 + J_1 J_2/2 - J_3;$$

$$w = \arccos \left[q/2 / \sqrt{-(P/2)^2} \right]$$

J_1 、 J_2 、 J_3 为应力状态的三个不变量,分别为:

$$\left. \begin{aligned} J_1 &= s_x + s_y + s_z \\ J_2 &= s_x s_y + s_y s_z + s_z s_x - t_{xy}^2 + t_{yz}^2 - t_{zx}^2 \\ J_3 &= s_x s_y s_z - s_x t_{yz}^2 - s_y t_{xy}^2 - s_z t_{zx}^2 + 2t_{xy} t_{yz} t_{zx} \end{aligned} \right\}$$

4) 求解主应力方向

解下列联解方程:

$$\begin{bmatrix} s_i - s_x & t_{xy} & t_{zx} \\ t_{xy} & s_i - s_y & t_{yz} \\ t_{zx} & t_{yz} & s_i - s_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_i \\ m_i \\ n_i \end{bmatrix} = 0$$

$$l_i^2 + m_i^2 + n_i^2 = 1$$

式中, $i=1, 2, 3$, 解得:

$$\left. \begin{aligned} l_i &= 1/\{1 + [((s_i - s_x)t_{yz} + t_{xy}t_{zx})/((s_i - s_y)t_{zx} + t_{xy}t_{yz})]^2 \\ &\quad + [((s_i - s_x)(s_i - s_x) - t_{xy}^2)/((s_i - s_y)t_{zx} + t_{xy}t_{yz})]\} \\ m_i &= [(s_i - s_x)t_{yz} + t_{xy}t_{zx}] / [(s_i - s_y)t_{zx} + t_{xy}t_{yz}] \\ n_i &= [(s_i - s_x)(s_i - s_y) - t_{xy}^2] / [(s_i - s_y)t_{zx} + t_{xy}t_{yz}] \end{aligned} \right\}$$

由此,可据下式求得各主应力的角度与方向:

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \arcsin(n_i) \\ b_i &= \arcsin(m_i / \cos a_i) \end{aligned} \right\}$$

式中: a_i ——主应力 s_i 与 XOY 平面的夹角; b_i ——主应力 s_i 在 XOY 面上的投影与 X 轴的夹角。

2 Kaiser 效应地应力测试成果与分析

通渝隧道 Kaiser 效应地应力测试所采用的设备为美国产 MTS815 Teststar 程控伺服岩石刚性试验机 and AE-400 声发射测试仪。前者控制精度高、加载相当稳定,试验中不产生噪声和振动;后者灵敏度高,测试结果可靠。所有测试过程与数据均由计算机控制和采集,极大地提高了测试精度和准确性。试验中,采取在试件两加载端面与试验机的上下压头间垫以聚四氟乙烯与橡皮膏的方法,有效地防止了端部摩擦和噪声,并使试件受力均匀,保证了测试结果的可靠性。

通渝隧道 Kaiser 效应地应力测试综合成果如表 1 所列。5 组地应力 Kaiser 效应测试成果表明,通渝隧道通过部位工程岩体中的初始应力状态为:最大主应力 s_1 呈 NE—SW 方向,它与水平面的夹角较小,介于 $15^\circ \sim 20^\circ$ 之间,其量级总体上为中间大(最大实测值为 33.04MPa)、两侧则逐渐减小;中间主应力 s_2 近于直立,它与水平面的夹角较大,介于 $72^\circ \sim 78^\circ$ 之间,其量级与自重应力比较接近;最小主应力 s_3 为 SE 方向,它与水平面的夹角也较小,介于 $8^\circ \sim 18^\circ$ 之间,其量级约等于自重应力衍生的水平应力再加 $1 \sim 3$ MPa 之和。

3 结 论

通渝隧道 Kaiser 效应地应力的测试结果与实际施工工程地质状况较为吻合,其工程岩体内地应力的总体状态为潜在走滑型,隧道中部测得的地应力量级普遍较高,实测最大主应力 s_1 最高达 33.04 MPa;因而施工过程中密切关注了其高地应力与岩爆等相

表 1 通渝隧道地应力 Kaiser 效应地应力测试综合成果

样号	取样位置与岩性	主应力	量级/MPa	方向	倾角
K1	K20+250 右壁、 中厚层状灰岩	σ_1	27.43	S30° W	-20°
		σ_2	8.72	N30° E	-72°
		σ_3	4.95	S60° E	-18°
K2	K21+450 左壁、 中厚层状灰岩	σ_1	32.41	N40° E	+15°
		σ_2	23.59	N50° W	-75°
		σ_3	11.02	S50° E	-13°
K3	K22+000 右壁、 厚层状鲕粒灰岩	σ_1	33.04	N35° E	+10°
		σ_2	26.51	N55° W	-78°
		σ_3	12.16	S55° E	-8°
K4	K22+590 左壁、 中层状粉砂岩	σ_1	18.19	N40° E	+15°
		σ_2	13.75	N50° W	-75°
		σ_3	7.68	S50° E	-13°
K5	K23+400 右壁、 厚层状白云岩	σ_1	10.19	N30° E	+20°
		σ_2	6.12	N60° W	-72°
		σ_3	4.08	S60° E	-18°

注: ①主应力方向以象限角表示, 它代表水平主应力的水平投影方向; ②主应力倾角中正号表示仰角, 负号表示俯角; ③取样具体位置详见图 1 所示。

关施工地质灾害问题, 从而确保该隧道安全、顺利施工。

致谢 在测试研究过程中, 得到了重庆市公路局、重庆市兴渝公路有限责任公司、重庆交通科研设计院、重庆市交通工程监理咨询有限公司和中铁 19 局 2 公司、中铁隧道集团 3 公司等有关领导、工程技术人员的帮助、支持, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 蔡美峰, 乔 兰, 李华斌. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [2] 秦四清, 李造鼎, 张倬元, 等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [3] 张广清, 金 衍, 陈 勉. 利用围压下岩石的凯泽效应测定地应力[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 360—363.

Geostress measurement of Kaiser effect in Tongyu highway tunnel

XU Lin-sheng

School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract: Through geostress measurement by Kaiser effect method, it is found out that the general space stress state of rockmass in deeply-lying and especially long Tongyu highway tunnel belongs to the potential strike-slip type. The measured geostresses in the middle part of the tunnel are generally very large with the σ_1 major principal stress of 33.04 MPa. So during the construction process, the problems of high geostress and rockburst have to be taken into account.

Key words: tunnel; geostress; Kaiser effect

通渝隧道Kaiser效应地应力测试研究

作者: [徐林生, XU Lin-sheng](#)
 作者单位: [重庆交通学院, 土木建筑学院, 重庆, 400074](#)
 刊名: [重庆交通学院学报](#) ISTIC PKU
 英文刊名: [JOURNAL OF CHONGQING JIAOTONG UNIVERSITY](#)
 年, 卷(期): 2006, 25 (2)
 引用次数: 1次

参考文献(3条)

1. 蔡美峰, 乔兰, 李华斌. [地应力测量原理和技术](#) 1995
2. 秦四清, 李造鼎, 张倬元. [岩石声发射技术概论](#) 1993
3. 张广清, 金行, 陈勉. [利用围压下岩石的凯泽效应测定地应力](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2002(03)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [凌贤长, 王丽霞, 吴立新, 王禹兰](#) [隧道盾构法掘进触发二次地应力分布规律研究](#) -[哈尔滨工业大学学报](#)2003, 35(4)
 以拟建哈尔滨市松花江隧道为例, 采用因子对目标函数影响的优化分析思想, 直接针对隧道施工过程中, 在各种不同工况下, 建立尽可能逼近实际问题的有限元数值计算模型, 通过大量的反复数值模拟实验, 研究因盾构掘进在土体中触发二次地应力的分布规律, 总结各单项因子对土体变形力学性状的影响特性, 预估隧道周围土体最危险破坏点位置, 为合理确定顶板安全厚度提供理论依据。
2. 期刊论文 [方建勤, 胡居义, 林才奎, 程崇国, 靳晓光, FANG Jian-qing, HU Ju-yi, LIN Cai-kui, CHENG Chong-guo, JIN Xiao-guang](#) [茶林顶隧道地应力演化及断层带施工力学分析](#) -[地下空间与工程学报](#)2009, 5(3)
 结合复杂地质条件下茶林顶隧道区的山体演化过程, 进行了地应力场的二维有限元数值模拟, 获得其原始地应力; 以隧道最大埋深断层典型断面为例, 建立了隧道施工穿过断层带过程的空间三维数值模型, 模拟了隧道围岩-支护结构的位移应力随施工步的变化情况, 为隧道优化设计和安全施工提供了依据。
3. 学位论文 [黄强](#) [小净距公路隧道施工中围岩地应力分析研究](#) 2009
 中国地域辽阔, 地形复杂, 高等级公路建设中大量遇到隧道工程。山岭隧道常常因为地形限制, 隧道间距一般难以满足普通技术规范要求而采用小净距隧道及连拱隧道等特殊结构型式。本文以瑞(金)渝(州)高速公路九岭隧道的施工建设为依托, 采用有限元数值分析和现场监测相结合的方法针对九岭小净距隧道施工过程中围岩应力的变化进行了下面几个方面的研究:
 (1) 本文分析了隧道围岩应力的分析方法, 包括了岩上的初始应力、开挖后的二次应力、支护后的三次应力以及偏压状态下围岩应力的分析。
 (2) 本文利用有限元分析软件ANSYS, 用平面4节点实体线性单元模拟围岩, 用Beam3单元模拟喷射混凝土, 用杆单元模拟锚杆, 用Beam3单元模拟二次衬砌, 选取Drucker-Prager屈服准则模拟围岩, 采用“反转应力逐步释放法”, 利用杀死和激活单元来模拟九岭隧道不同围岩, 不同施工方式, 不同施工阶段的开挖和支护过程。
 (3) 对九岭隧道深埋情况下III级围岩全断面开挖和IV级围岩台阶开挖两种情况进行模拟; 对九岭隧道出洞口V级围岩浅埋偏压条件下的YK195断面不同开挖方式进行了模拟。模拟了浅埋偏压条件下单洞采用CRD法开挖时四种不同工序和小净距隧道两种不同开挖方案, 并对之比选, 采用关键点监测的方法找到偏压小净距隧道开挖过程中应力场的变化规律; 对实测数据和数值模拟结果的对比分析。
 (4) 简明阐述了新奥法施工的概念和隧道监测监控的方法和手段。结合九岭隧道监测监控项目, 对九岭隧道IV级和V级围岩中的两个断面的实际监测数据进行分析, 并通过建立有限元模型求解出数值解, 通过数值解和实测数据的对比分析, 得到钢弦式传感器可以应用于隧道围岩应力变化的测量, 对实际施工具有指导意义的结论。
 通过以上几个方面的研究, 可以得到:
 (1) 拱脚、拱顶和中间岩柱是施工中应该给予重点关注的部位;
 (2) 后行隧道开挖过程中, 会对先行隧道洞周应力产生影响, 影响的程度和围岩的级别以及开挖方式等因素有关, 围岩岩质越好、开挖扰动越小, 对先行隧道的应力影响越小。
 (3) 偏压小净距隧道开挖时不同工序对围岩应力分布存在影响, 左洞及右洞的应力场相互重叠, 产生了复杂的应力重分布, 由于偏压的存在, 隧道围岩最终应力场并不对称, 深埋侧隧道附近围岩的应力略大于浅埋侧隧道围岩, 就开挖工序上说, 宜采用先开挖隧道埋深小的一侧较为有利。
 (4) 采用台阶开挖时, 在开挖下台阶并进行支护的前后, 围岩的应力发生了较大的变化, 当下台阶逐渐远离监测断面, 围岩的应力逐渐趋于平缓。
 (5) 二次支护施作后, 因为二次衬砌阻碍了围岩和初次衬砌的变形, 围岩的应力也发生较大的变化。
4. 期刊论文 [张文忠, Zhang Wenzhong](#) [关角隧道越岭区区域地应力特征分析及应用](#) -[铁道勘察](#)2008, 34(2)
 从区域构造特征、震源机制解及水压致裂法等方面分析和实测了关角隧道越岭区的地力特征, 并对与地应力有关的岩爆、软岩变形等地质问题进行了全面的阐述与评价。
5. 期刊论文 [李飞, 王述红, 李正仁, 王胜, Li Fei, Wang Shu-hong, LI Zheng-ren, WANG Sheng](#) [地应力水压致裂法测量及其在隧道工程的应用](#) -[西部探矿工程](#)2009, 21(4)
 利用水压致裂地应力测量法对实际工程进行了地应力测量, 详细分析了水压致裂曲线压力-时间的特征及破裂压力、重张压力、关闭压力及最大水平主应力的破裂方向的确定方法。此外, 在获得已知各个测点的地应力大小和方向后, 进一步分析工程区地应力及侧压力系数的分布规律, 分析了侧压力系数对隧道围岩稳定性构成影响的可能性。地应力测量数据的分析结果可以作为隧道设计、断面的选择及隧道轴线方向的确定的科学依据。
6. 学位论文 [康勇](#) [深埋隧道围岩破坏机理相关问题研究](#) 2006
 随着我国隧道建设逐渐向着“长、大、深、群”方向发展, 隧道快速施工及由于围岩破坏所致灾害的预测与治理成为面临的最主要任务, 但由于隧道工程的复杂性和不可预见性, 现有的隧道围岩破坏机理相关研究尚不成熟, 大多仅仅停留在对应力状态和破坏判据的研究上, 缺乏对深埋隧道围岩破坏过程的相关研究。
 本文结合国家自然科学基金重点项目“隧道及地下空间工程结构物的稳定性与可靠性”, 以重庆市通渝深埋特长公路隧道为工程背景, 从细观损伤力学和分形理论两个角度对深埋隧道围岩破坏机理进行了探讨, 同时对其重要影响因素地应力也进行了测试分析和弹塑性有限元反演分析, 在此基础上, 针对深埋硬岩隧道围岩脆性破坏的主要形式——岩爆灾害进行了预测研究。
 本文所研究内容及获得的结论主要包括以下几个方面:
 (1) 通过RFA2D对深埋隧道围岩渐进破坏模式以及岩石细观损伤的模拟, 得出深埋硬岩隧道围岩破坏顺序依次为拱顶开裂-左右拱肩裂纹扩展-左右拱脚深部裂纹, 以拉裂破坏为主, 石灰岩在单轴压缩条件下破坏形式为劈裂破坏, 其破裂演化过程分为四个阶段: 压密-弹性变形-损伤局部化-破坏单元贯通, 与全应力应变曲线的各个阶段相对应, 损伤围岩及岩石表现出明显的非线性特性和损伤局部化特征, 损伤过程中声发射数量可以表征损伤变量的变化。
 (2) 通过对深埋隧道围岩节理裂隙及围岩损伤演化的分形特征的研究, 得出了深埋隧道围岩破坏过程也具有空间及时间分布上的自相似性, 并提出了用分形维数来判断深埋隧道围岩破坏程度的方法。本文在盒计维法的基础上, 应用Fractalfox2.0对现场实拍节理裂隙网络的照片计算了通渝隧道围岩的分维数, 建立了空间维数、分形维数和损伤变量之间的定量关系: $D = 3 - \frac{1}{F}$, 并推广至零维、一维、二维、三维空间。
 (3) 在利用Kaiser效应声发射法测试隧道地应力的基础上, 运用同济曙光软件GeoFBA2DPV2.4对通渝隧道工程所在山体地层演化历史进行了弹塑性有限元分析, 得到通渝隧道轴向现代地应力状况与隧道埋深、地层岩性及构造发育程度有关。研究表明, 上述两种方法所获得的地应力成果与水压致裂法测试结果吻合, 故在实际应用中, 联合以上三种手段, 对传统地应力测试手段进一步发展和拓宽, 具有较好的适用性和可靠性。
 (4) 在对岩爆的定义及相关影响因素进行分析的基础上, 对现行岩爆预测判据进行了总结比较, 提出了利用BP神经网络来预测深埋隧道岩爆的预测方法, 并基于Visual C++6.0自主开发了岩爆预测系统, 在通渝隧道岩爆预测中的应用结果表明, 该方法可靠性较高。
 (5) 通过对深埋隧道岩爆灾害成灾机理及其预测理论的研究机理, 结合通渝隧道岩爆预测实例, 认为采用人工神经网络预测岩爆时采用隧道切向应力、岩石单轴抗压强度、岩石单轴抗拉强度、岩石弹性能量指数、围岩最大切向应力与岩石单轴抗拉强度比、岩石抗压强度与抗拉强度之比等六大关键指标是合理可行的。
 本论文的主要创新点如下:
 (1) 运用细观损伤力学对深埋隧道围岩渐进破坏及岩石细观损伤进行了演化过程分析, 得出了该过程中声发射数目与岩石(体)损伤变量之间的关系, 揭示了深埋隧道围岩破坏的声发射特性和损伤特性。
 (2) 研究了深埋隧道围岩破坏的分形特性, 提出了用分维数来定义隧道围岩损伤变量, 建立了分形维数、空间维数和岩体损伤变量之间的定量关系, 实现了分形特征和损伤特性的有机结合。

(3) 提出了将隧道区山体地应力演化历史的弹塑性有限元分析作为Kaiser效应测试地应力的辅助手段,并针对高地应力深埋硬岩隧道岩爆灾害,采用BP神经网络算法,基于Visual c++6.0开发了岩爆预测系统,预测结果与实际情况具有很好的吻合性。

7. 期刊论文 姚建伟, 韦随庆, 王瑞琦, YAO Jian wei, WEI Sui qing, WANG Rui qi 某隧道工程地应力及岩爆研究 - 土工基础 2006, 20(3)

根据隧道水压致裂法地应力测试研究的结果,对测试区域的地应力水平及隧道围岩稳定性做出了评价,并根据地应力条件和岩石强度参数,采用强度理论对隧道发生岩爆的可能性进行综合评价。

8. 期刊论文 王坛华, 陈剑平, 李杨, 张国柱, Wang Tan-hua, CHEN Jian-ping, LI Yang, ZHANG Guo-zhu 深埋低水平地应力硬岩隧道稳定性研究 - 水文地质工程地质 2009, 36(2)

低地应力是地下工程中极易被忽视的一种应力状态,它对地下工程稳定性有重要影响。本文通过分析地应力影响特征,指出了地应力分析应从地质构造和构造形迹分析入手。鉴于地应力测量中存在多种问题,提出了地下工程低地应力的地质标志判别方法。结合低水平地应力条件,给出了块体组合结构面强度的分级办法,推导出地下工程中常见块体的二维计算公式,并将其应用于工程实践,结果证明该计算方法比较符合实际。

9. 学位论文 李金锁 南水北调西线麻尔曲—阿柯河特长深埋隧道岩爆灾害预测及其对工程的影响 2006

本论文是在前人的研究成果进行充分收集、分析总结的基础上,通过野外地质调查、现场地应力测试、室内岩石物理力学性质的测定,进而运用Ansys软件对隧道工程区的重点地段进行了三维有限元数值模拟,分析预测了南水北调西线麻尔曲—阿柯河深埋特长隧道岩爆灾害。通过近两年的调查研究,着重在以下方面展开了工作:

- (1) 对工程区的地质、地形、地貌、工程地质及活动断裂的展布进行调查;
- (2) 采用水压致裂地应力测量方法对麻尔曲—阿柯河深埋特长隧道工程区进行地应力测试,得出了现今地应力分布规律和作用特征。
- (3) 现场采集典型岩石标本,进行不同类型岩石的物理力学性质测试,测定各种岩石的物理力学参数;
- (4) 对岩、土体进行分类;特别是砂、板岩及砂板岩互层岩体的结构面特征。
- (5) 利用应力场三维有限元数值模拟方法对工程区的重点地段现今地应力场进行模拟、综合分析研究。
- (6) 在此基础上,对深埋长隧道施工中可能出现的岩爆灾害进行分析预测,进而提出防治措施和建设性意见。

通过以上所做工作取得了以下工作进展和认识:

1. 本论文是以南水北调西线麻尔曲—阿柯河特长深埋隧道可能出现的岩爆灾害预测为主要研究对象;在野外地质调查的基础上,结合地应力的现场实测,多种形式的岩石力学试验研究和三维、二维有限元数值模拟,综合分析评价了隧道工程区地应力和隧道沿线围岩应力的分布规律,并在此基础上根据已有的国内外多种岩爆判别准则,对隧道开挖岩爆发生的部位和等级进行综合分析和预测,从而为合理制定隧道的开挖设计和施工、支护方案及具体的防治措施提供依据。

2. 通过野外工程地质调查得知,隧道工程区岩石主要为浅变质的砂岩和板岩,砂岩主要为中厚层-厚层状结构;板岩主要为薄层状结构。根据现场回弹初步测定,线路区弱风化砂岩单轴抗压强度一般在41MPa~128MPa之间;弱-微风化板岩单轴抗压强度一般在21~95MPa之间,大部分板岩属于中等坚硬岩,少部分为坚硬岩和较软岩。

3. 通过隧道工程区实地原岩地应力的测试,对工程区应力场有了一个全面的认识:工程区地应力场以水平主应力为主,测孔水平地应力值与垂直地应力值之比较高,即 $SH > Sh > Sv$,反映了该区为逆断层型应力状态;巴颜喀拉山两侧的地应力状态完全不同,表现为北部地应力值较小,方向偏北;南部明显增大,数值相差5~10倍,方向以东北方向为主;应力随深度变化的规律按测点主应力测值进行线性回归,得到如下结果:

$$SH = -4.13 + 0.077DSh - 2.62 + 0.057D \text{ 其中, } D - \text{钻孔深度(m); } SH - \text{最大水平主应力(MPa); } Sh - \text{最小水平主应力(MPa)。}$$

4. 基于麻尔曲—阿柯河特长深埋隧道有限元计算分析结果可以看出:

水平应力总体表现为隧道断层两侧量值较高,在断层两侧附近有明显的应力集中,约为 $\sigma_1 = 81\text{MPa}$ 和 49.5MPa , $\sigma_2 = 46.1\text{MPa}$ 及 24.3MPa ,向两端量值逐渐减小,通过断层时应力降低。隧道中部量值有一定的偏高;对于垂直应力, σ_3 值最大处为 11.5MPa 。

垂直于隧道轴线方向截面二维模型结果显示:垂直主应力 σ_2 表现为中间部位弱,而向顶、底板处出现应力集中,其最大值为 $\sigma_2 = 34.7\text{MPa}$ 且出现在断面的顶部; σ_3 为水平应力,表现为中间部位弱,向顶、底板处出现极强的应力集中,最小值为 0.8MPa ,出现在断面的侧帮;最大值为 132.6MPa ,出现在断面的顶板。这在某种程度上体现出隧道开挖后出现的一种应力重分布及应力集中的现象。

5. 采用卢森、陶振宇、侯发亮及挪威Russenes的岩爆判据,对隧道区围岩应力状态与岩体强度关系进行分析,得出隧道工程区具备了发生岩爆的地应力条件,预测砂岩体施工断面将可能发生IV级烈度的岩爆。

本论文具有以下创新点:

1. 南水北调西线麻尔曲—阿柯河深埋特长隧道工程不论是基础地质工作还是具体工程灾害研究,前人在这方面所做工作几乎为一片空白,特别是在具体工程的详细灾害预测工作方面,前人没有做过具体调查研究工作,所以本论文所做的工作是一项填补空白的工作,将对南水北调西线工程建设提供科学依据。

2. 在野外地质调查的基础上,结合地应力的现场实测,多种形式的岩石力学试验研究和Ansys有限元数值模拟,研究工程区现今地应力场,综合分析评价隧道工程区地应力和隧道沿线围岩应力的分布规律,并在此基础上根据已有的国内外多种岩爆判别准则,对隧道开挖时可能发生岩爆的部位和等级进行综合分析和预测,从而为合理制定隧道的开挖支护方案及具体的防治措施提供依据。

3. 在隧道岩爆灾害预测研究过程中,由传统的定性研究向半定量和定量研究方向发展,为工程应用提供更为可靠的科学依据。

4. 通过数值模拟分析对隧道工程开挖前后隧道周边受力状态进行对比分析研究,提出工程中的薄弱环节,为重点防治地段、为今后进一步工作提供了依据。

10. 期刊论文 孟永会, 马宁, MENG Yong-hui, MA Ning 基于水压致裂法的隧道围岩地应力试验研究与岩爆预测分析 - 华中科技大学学报

(城市科学版) 2008, 25(2)

本文在分析水压致裂法测试地应力原理的基础上,结合隧道工程实际,采用水压致裂法进行隧道围岩地应力的测试研究分析工作,获取了隧道围岩的最大、最小水平主应力量值及最大水平主应力的方向,以及岩体破裂压力、岩体抗拉强度、岩体瞬时闭合压力、破裂面的重张压力等地应力及岩体力学参数,并根据隧道区的地应力资料,和岩石参数进行了岩爆预测分析,为隧道工程的设计、施工提供科学依据和技术支撑。

引证文献(1条)

1. 李彦兴, 董平川 利用岩石的Kaiser效应测定储层地应力[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2009(z1)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_cqjtxyxb200602007.aspx

下载时间: 2010年5月31日