

文章编号: 1000-7598 (2009) 05-1381-06

雪峰山公路隧道的超前预测预报研究

马 亢¹, 徐 进¹, 张志龙^{1,2}, 王兰生², 李朝政¹

(1. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 2. 成都理工大学 工程地质研究所, 成都 610059)

摘 要: 雪峰山隧道为上海—瑞丽国道主干线湖南省邵阳—怀化高速公路上最大的控制性工程, 全长约 7 km, 最大埋深约 850 m, 为典型的越岭长大公路隧道。采用不同方法, 对该隧道的断层破碎带、塌方、岩爆及大变形等地质灾害和围岩稳定性问题进行了超前预测预报研究。研究以地质分析为基础, 运用了 TSP、地质雷达、赤平投影和关键块体检索法、断层错动机制解、室内岩石力学试验、数值模拟以及隧道内地质观测分析方法对前方各类地质信息开展超前预报, 取得了较好的效果, 并成功地预测预报了断层 F_2 的出现及无强烈岩爆灾害的可能性, 对安全施工提供了保证, 可为今后类似工程借鉴。

关 键 词: 公路隧道; 预测预报; 地质灾害; 围岩稳定性; 安全施工

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Research on advanced prediction and forecast of Xuefeng Mountain Highway tunnel

MA Kang¹, XU Jin¹, ZHANG Zhi-long^{1,2}, WANG Lan-sheng², LI Chao-zheng¹

(1. School of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, State Key Lab of Hydraulics and Mountain River Eng., Chengdu 610065, China;

2. Inst. of Eng., Geology Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Xuefeng Mountain tunnel is the largest controlling project of Shaoyang—Huaihua Expressway in Hunan Province which belongs to the Shanghai—Ruili National Key Highway. The length of the tunnel is about 7 km and the largest thickness of its overlay is about 850 m. It is a typical thru-mountain long highway tunnel. Several different methods were used to predict the geologic disaster and stability problems of the tunnel, such as fault, rockburst, large deformation of surrounding rock, etc. Based on geological analysis, methods such as TSP, geologic radar, projection and key block search method, mechanism of fault movement, testing of surrounding rock stress, etc. were applied to forecast the geologic information in tunnel facing frontage; and good effect was achieved; especially the successful prediction and forecast of F_2 appearance and zero possibility of strong rockburst. This provided guarantee for the tunnel safety construction, and a good example for other similar projects.

Key words: highway tunnel; prediction and forecast; geologic hazard; stability of surrounding rock; construction safety

1 引 言

由于地质条件的复杂性, 以及技术手段和人们认识水平等方面的限制, 即使投入很大的勘察经费也难以解决和回答隧道在施工中可能出现的所有地质问题, 如断层破碎带、塌方、岩爆及大变形等, 而这些灾害一旦发生, 轻则影响施工进度, 增加工程成本, 重则损毁机械设备, 甚至危及施工人员的安全, 且事后处理工作难度较大, 给隧道施工造成严重的影响。近几年, 随着隧道工程数量的增加、规模的扩大, 遇到的地质条件越来越复杂, 这一问

题变得更加突出。为了尽量避免和减少隧道工程施工中可能出现的灾害, 在做好地质勘察的同时, 采用工程地质方法与物探方法相结合、现场调查分析与室内试验相结合, 对隧道前方的各类地质信息进行及时和准确地预测预报, 以防止突发性灾害, 保证施工工期、人员安全, 评判围岩稳定性^[1-3]。

雪峰山隧道是邵阳—怀化高速公路建设沿线最大的控制性工程, 地质情况比较复杂。根据前期勘察成果, 该隧道在施工过程中存在大规模塌方、岩爆及大变形和局部失稳的可能性。为了保障隧道施工的顺利实施, 减少可能出现的突发性灾害, 在

收稿日期: 2007-10-09

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目 (No. 200331879802); 国家重点基础研究发展规划(973)项目 (No. 2002CB412705, No. 2002CB412707); 国家自然科学基金重点项目 (No. 50639100)。

第一作者简介: 马亢, 男, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事隧道工程、岩体力学以及工程计算等方面的研究工作。E-mail: makangscu@163.com

其复杂地段施工过程中,运用 TSP、地质雷达、赤平投影和块体检索法、断层错动机制解、洞壁应力测试、室内岩石力学试验、隧道内地质观测分析等方法对前方各类地质信息开展预测预报,取得了满意的效果,为施工提供了良好的建议并具有指导作用。

2 工程概况

雪峰山隧道为上下行线分离的双洞隧道,平均长度约 6 951 m,属于特长隧道。隧道最大埋深约 850 m,约 50 %的洞段埋深超过 450 m。隧道轴线方向为 NW67°,通过 6 条主要大断层,岩性主要为变质砂岩和硅质板岩,且岩性变化不大。隧道所在区属侵蚀深切中山地貌区,包括山顶倒转背斜和忘公店—锅塘冲倒转向斜 2 个主要褶皱构造。雪峰山山脊线有明显转折,隧道与山脊线近于正交。

3 断层破碎带的预测预报

以雪峰山隧道断层 F_2 为研究对象,主要运用 TSP 探测、地质雷达、洞壁应力测试、断层前兆法、断层错动机制解等方法,开展超前预测预报研究。

3.1 F_2 断层带的性状

据勘察设计资料, F_2 断层带为区域性大断层,其总体的产状为 $110^\circ \sim 130^\circ \angle 50^\circ \sim 60^\circ$,与洞轴线大角度相交,宽度约 210 m,推测隧道在 ZK97+180~415 段将遭遇该断层。该断层带具断块的特征,断块与两侧地层特征差异明显,断块内地层断褶明显;断层带内石英脉发育,部分石英脉有揉皱的特征,在此类石英脉附近的岩石一般有片理化迹象;断层带内局部可见条带状或团块状铁锰质矿石及斑点状的黄铁矿,还可见石香肠构造;断层带内局部为碎裂岩、构造角砾,还可见到变形较弱的围岩透镜体;断层带内小褶曲发育,且轴面较陡;断层带主要为石英岩、绢云母片岩及石英片岩,糜棱岩化强烈,断续分布有宽约 0.2~0.5 m 的由构造角砾、断层泥组成的破碎带。该断层为逆断层,主要表现为韧性剪切性质,后期经过了脆性改造。

3.2 TSP 超前探测

本次 TSP203 探测基于中南大学的部分测试结果。测试桩号为 YK96+982,共有 24 个炮点。距掌子面与最近的炮点距离为 7 m,检波器距最近炮点为 15 m。探测结果如图 1~3 所示。

根据 TSP203 探测结果,掌子面前方 232 m 范围内,围岩纵波平均速度为 4 700~5 000 m/s,密度为 2.50~2.88 g/cm³,泊松比为 0.20~0.32,结果见表 1。

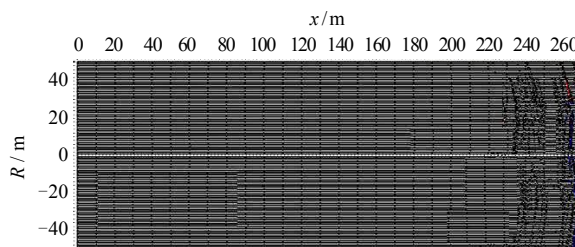


图 1 TSP 探测深度偏移剖面
Fig.1 Depth-exursion section of TSP

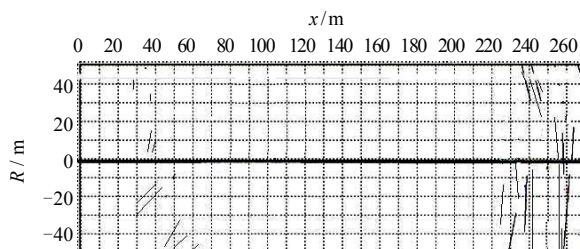


图 2 TSP 探测提取的反射层
Fig.2 Reflected layer selected from TSP

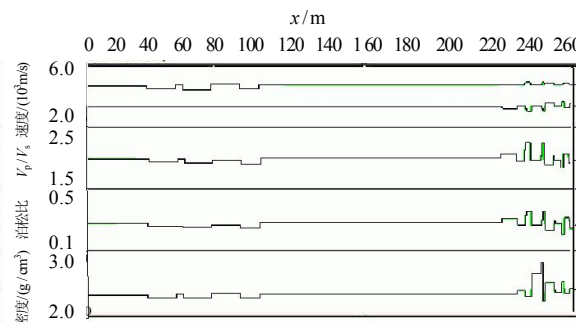


图 3 TSP 探测的 2D 结果显示
Fig.3 2D results of TSP tests

表 1 TSP203 超前探测结果一览表
Table 1 Results of TSP203 tests

序号	里程	长度 / m	推断结果
1	YK96+982~97+022	28	岩石较完整,局部节理裂隙较发育,含水
2	YK97+010~169	159	岩体完整
3	YK97+169~214	45	F_2 影响带,其中 204~214 岩石软弱,即将进入 F_2 主干断裂破碎带

由于雪峰山隧道左右两洞基本平行,桩号位置基本相近,根据前期勘察的成果和 F_2 的性状,可以由右洞 TSP 测试结果,预测左洞也将将在 ZK97+200 附近遇到同一个大的断层破碎带。

3.3 地质雷达超前探测

为了短距离控制隧道掌子面 ZK96+965 前面 50 m 范围内围岩变化情况,防止提前遇到大的断层,根据中南大学的测试资料,采用美国劳雷公司

的 SIR3000 地质雷达的 100 m 天线进行了详细的探测, 探测成果如图 4 所示。分析雷达探测成果图, 在掌子面前方 45 m 范围内岩体较完整, 不会提前遇到大的断层带 F_2 , 可进行常规的施工作业, 仅在掌子面前方 22 m 左右 (桩号为 ZK96+987) 的局部范围内节理裂隙发育, 含水。

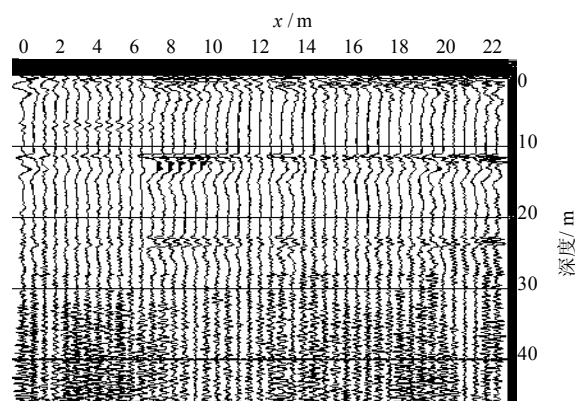


图 4 雪峰山隧道 ZK96+965 掌子面雷达检测成果图
Fig.4 Results of radar tests at section ZK96+965

3.4 硐壁二次应力测试

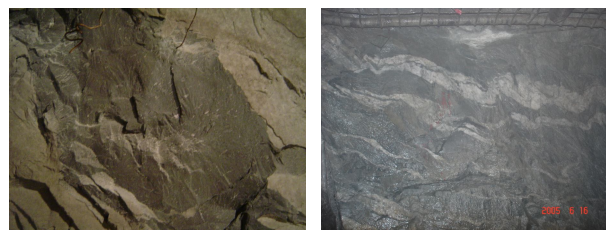
课题组在 ZK97+195 和 ZK97+200 桩号附近采用应力解除法进行硐壁二次应力测试, 结果见表 2。将这 2 处测点的量测结果与其他测点的结果进行对比, 其结果明显偏高。结合同类工程的经验分析, 认为可能是受到局部构造作用影响的结果, 故预测前方可能存在较大规模的构造带。

表 2 ZK97+195 和 ZK97+200 附近硐壁围岩应力测试成果
Table 2 Testing results of surrounding rock at sections ZK97+195 and ZK97+200

测点 编号	位置	岩性	埋深 / m	量测结果		
				σ_1 / MPa	σ_2 / MPa	方位角 α / (°)
EZY6	ZK97+195 右壁	变质砂岩	340	54.71	28.03	-30.44
EZZ3	ZK97+200 左壁	变质砂岩	340	65.31	24.18	42.60

3.5 前兆预报法

本次课题组在现场跟踪调查的过程中发现, ZK97+ 193 桩号附近边墙围岩有薄片状脱落现象, 且断口新鲜; 在 ZK97+214 桩号附近围岩断口多呈贝壳状, 嵌合紧密, 干燥; ZK97+223 桩号附近的两侧硐壁出现厚约 5~15 cm、长度最大达 20 m 的石英脉, 且发生了揉皱 (图 5)。根据此前积累的经验和对 F_2 性状的认识, 这些现象都是大型构造带的征兆, 课题组认为, 此洞段已在处于 F_2 的影响带, 即将进入 F_2 的主干构造带。



(a) 薄片状脱落 (b) 石英脉
图 5 ZK97+193 附近的薄片状脱落和
ZK97+223 附近的石英脉

Fig.5 Flaked collapse at section ZK97+193
and quartz at section ZK97+223

3.6 断层错动机制解预测

按地质力学和构造地质学观点, 断层裂隙在空间上有一定组合形式^[4]: 1959 年, Badgley 曾提出一对共生共轭断层断裂的组合模式, 模式中将低序次的断裂视为主断层错动时派生的分主应力的产物, 派生的低序次断裂与主断裂之间存在一定的成生联系, 它仅出现在发生错动的断层的附近, 并且与断层的受力状态有关, 这种相关性可以用以解析断裂的相关性; 1970 年前苏联学者 Zabrodin 首次提出采用赤平投影方法, 运用这种相关性预测潜在的断层; 1978 年王士天教授等将这一方法与赤平投影分析法相结合, 建立了一套分析断裂空间组合的解析系统, 称之为断层错动机制解, 并用这种方法在四川西部凉山州一带进行了现场检验。

课题组在王兰生教授的现场指导下, 在 ZK97+223 掌子面现场调查时发现, 节理裂隙变得非常发育, 对该掌子面附近的节理裂隙进行了详细的现场量测, 并用 Dips 软件进行统计分析 (图 6)。

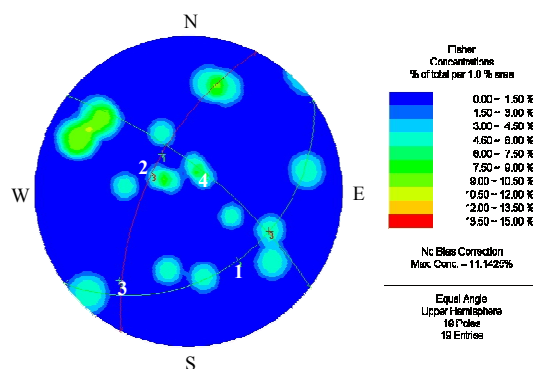


图 6 ZK97+223 附近节理裂隙统计及错动机制解分析图
Fig.6 Analytical figure of joint statistics and movement
mechanism at section ZK97+223

由图可以看出, 根据节理裂隙的赤平投影极点拟合得到两个 M 大圆 (图 6 中的 1、2), 二者相交于一点, 且各个大圆上的节理裂隙组之间又有共生组合角度关系, 故该交点即为与这 2 个大圆上的节

理裂隙组有共生关系的、可能存在于掌子面前方的断层的极点(图6中的3)。在此基础上,结合雪峰山隧道已开挖揭示的断层破碎带的特性及该掌子面附近的地质特征,分析认为,ZK97+223 掌子面已是一断层影响带,前方不远处可能存在较大规模的断层带(即 F_2)。

3.7 氦气测试预报

岩土体中气体(CO_2 、 CH_4 、氦气等)的分布和含量同构造活动关系密切,故可以通过现场测试这些气体的相对含量来间接预测断裂构造或岩体结构的存在。有关研究表明^[5-6],低应力区,亦或岩体结构松散部位,氦通常较高;高应力区,亦或岩体紧密镶嵌部位,氦通常较低。因此,在适宜的条件下,通过测试隧道不同洞段的氦气含量,也可以辅助来预测预报断裂破碎带。由于雪峰山隧道中氦气测试点距所研究的 F_2 断层较远,问题的针对性不是很强,但这不失为一种有效的断层预测方法。

3.8 F_2 断层的综合预测预报

综合上述多种方法的分析预测结果表明,从 ZK97+180 开始,进入 F_2 断层的影响带;从 ZK97+220 开始,进入 F_2 的边缘带,并预报在 ZK97+235 左右将进入 F_2 的主干断裂破碎带。

后经施工揭示,ZK97+235~250 段节理变密,岩层发生了明显的弯曲甚至皱曲,交错层理发育,ZK97+250 之后片理化特征、韧性剪切特征非常明显,显现出与岩层产状相近的不规则片理面,同时层间错动明显发育,皱曲发育。从 ZK97+285 开始,韧性剪切特征进一步加剧,围岩多为碎裂状,节理凌乱发育,出现大量的石英脉揉皱,并出现渗水、滴水现象,局部甚至出现股状涌水,围岩稳定性变差,已完全进入 F_2 断层的主干断裂带^[5-8]。

4 围岩失稳的预测预报

在以脆性岩体为围岩的隧道施工中,由于岩石本身的强度远高于结构面的强度,因此,脆性围岩的强度主要取决于岩体软弱结构面的发育、分布、空间组合以及洞轴线方位。只有当结构面的组合使围岩内可能出现导致塌落或滑动的分离体,且其尺寸小于隧道跨度时,这类围岩才有失稳的可能。

对于由几组节理切割下隧道围岩是否存在失稳的判定,赤平投影的方法和判定原理是:在赤平投影图中,受过构造切割而成的多面体楔顶的铅直线由网中心点代表,当几组代表节理的大圆围成的封闭区,既未包住网的中心点,又落在滑落面摩擦角为 φ 的摩擦圆之外时,该岩块滑落的下滑力不足

以克服在其发生滑动的节理面上的摩擦阻力,因此,该岩块是稳定的,否则为不稳定块体,施工中需采取一定的支护措施^[7]。因此,在隧道掘进中对隧道的围岩稳定作出定性的分析和评价,具有十分重要的意义,同时也是超前地质预报中的一个主要内容。

在对已开挖洞段及掌子面跟踪的基础上,通过收集施工地质资料,对 ZK96+070/ZK96+289 已开挖段内的数百组结构面进行了统计分析(图7)。可以看出,ZK96+070~ZK96+289 已开挖段主要发育有以下4组结构面:① $110^\circ \sim 136^\circ \angle 65^\circ \sim 85^\circ$, ② $210^\circ \sim 230^\circ \angle 75^\circ \sim 90^\circ$, ③ $310^\circ \sim 340^\circ \angle 50^\circ \sim 85^\circ$, ④ $30^\circ \sim 70^\circ \angle 50^\circ \sim 75^\circ$ 。使用 UNWEDGE 对由结构面切割而成的块体做稳定性分析。每次取4组优势结构面中的3组进行分析,共分成4种情况分析,其中由①、③、④组结构面切割的情况及不稳定块体检索见图8。

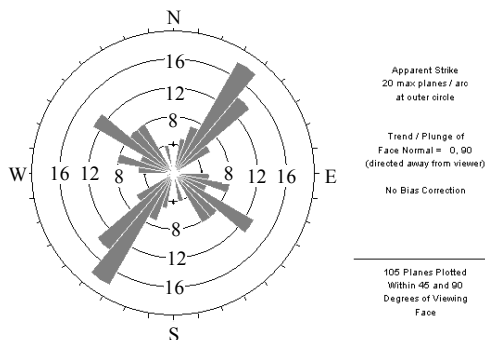


图7 结构面统计玫瑰花图

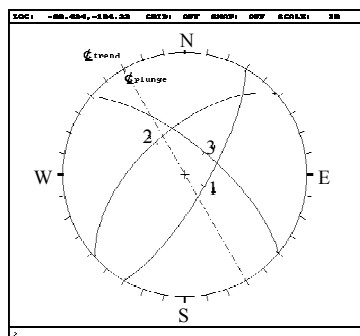
Fig.7 Rose figure of the statistics of joint distribution

综合上述的分析,并结合地质判断和工程类比,对原设计为IV类围岩、结构面发育仍以上述4组为主的未开挖洞段 ZK96+289~615 进行预测,结果表明,该段围岩的稳定性总体上较好,出现大规模塌方的可能性不大,主要问题为局部块体的不稳定问题,不稳定块体出露的位置主要在拱腰和顶拱,这类块体的体积不会太大(不超过 $50 m^3$),对施工不会造成严重影响,这与实际看到的情况相吻合。由于提前预报及施工措施的到位,避免了地质灾害的发生。

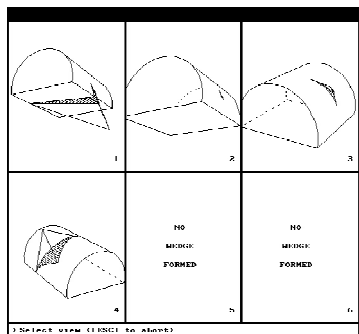
5 岩爆的预测预报

在隧道埋深较大、围岩完整干燥且挤压紧密的可能发生岩爆洞段采集岩样,在室内进行系列岩石力学试验,结合现场所做的洞壁应力测试成果按一定的判据(应力-强度比 σ_θ / R_b ^[6,8])来研究岩爆发生的可能性,以供类似的洞段作为参考。试验仪器

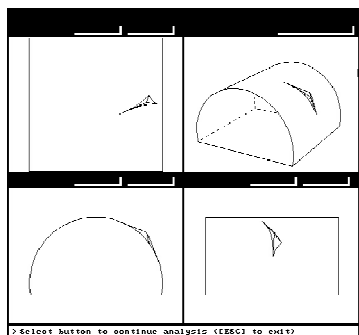
及部分试验成果分别见图 9、10、表 3、4。



(a) ①组、③组和④组结构面赤平投影图



(b) 隧道内可能出露的块体



(c) 不稳定块体 3 不同角度的视图

图 8 ZK96+070-ZK96+289 不稳定块体的节理组合赤平投影及检索图

Fig.8 Joints combination projection and access of unstable block from section ZK96+070 to ZK96+289

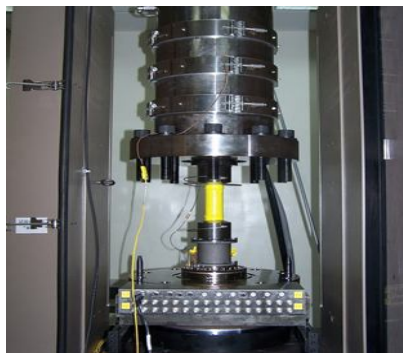
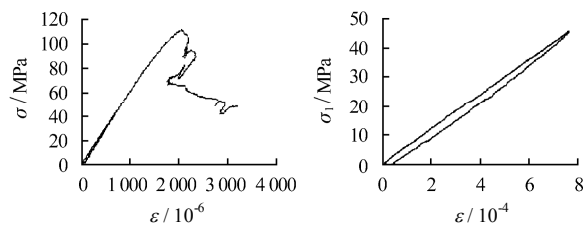


图 9 MTS815Teststar 程控伺服岩石刚性试验机
Fig.9 MTS815Teststar test system



(a) YK98+830 处岩样(单轴)应力-应变曲线(轴力垂直层理)

(b) ZK97+780 Wet 测试曲线

图 10 部分试验结果

Fig.10 Part of test results

表 3 部分岩样岩爆倾向性指数测试结果

Table 3 Part of rockburst Wet test results

取样桩号	埋深 / m	岩性	Wet 值 (ϕ_{SP} / ϕ_{ST})	岩爆 预测结果
ZK97+780	460	硅化砂质板岩	7.96	严重, 高烈度
ZK97+894	505	硅化砂质板岩	9.89	严重, 高烈度
ZK100+540	596	硅化砂质板岩	13.86	严重, 高烈度
YK98+830-1	620	变质砂岩	7.37	严重, 高烈度
YK98+830-2	620	变质砂岩	16.81	严重, 高烈度

注: YK98+830-1 层理与轴向力垂直, YK98+830-2 层理与轴向力平行。

表 4 部分岩样的 σ_θ / R_b 判据预测结果

Table 4 Part of rock sample results according to the σ_θ / R_b norm

取样桩号	σ_θ / MPa	R_b / MPa	σ_θ / R_b 比值	预测结果
ZK97+780	17.23*	108.93	0.16	不产生岩爆
ZK97+894	24.77*	142.21	0.17	不产生岩爆
ZK100+540	18.32	58.51	0.32	轻度岩爆
YK98+830-1	20.83	97.96	0.21	不产生岩爆
YK98+830-2	20.83	127.23	0.16	不产生岩爆

注: *代表此数值为该桩号附近测点值。

综合室内单轴压缩全过程曲线型式 (II 型)、抗压强度与抗拉强度比值 R_b / σ_t 判据以及弹性应变能指数 Wet 试验等都表明: 雪峰山隧道区的变质砂岩和硅化砂质板岩具有良好的硬度, 具备发生岩爆的强度条件, 即具备发生岩爆的内部条件。但通过 σ_θ / R_b 判据来看, 除了 ZK100+540 处岩样发生轻度岩爆外, 其余各处不具备发生岩爆的外部条件。结合已开挖洞段的地质情况和寻找岩爆迹象 (片帮, 贝壳状断口等), 预报雪峰山隧道不会发生强烈岩爆, 只可能以轻微岩爆为主。实际施工过程中并没有发生明显的岩爆现象, 只在局部位置见到类似岩爆的破裂特征, 这与试验预测分析的结果相一致。

6 围岩大变形预测

由于雪峰山隧道某些洞段节理发育, 岩体比较破碎, 因此施工中岩爆的可能性很小, 但从另一角度上分析, 由于围岩的软弱性, 可能造成围岩开挖

后的大变形问题。选取 F₈ 断层破碎带中软弱典型断面 (YK95+942.5) 进行有限元数值模拟分析^[9]。埋深约为 90 m, 围岩类别为 II 类。围岩力学参数按规范建议及室内试验综合取值结果见表 5, 计算结果见表 6。

表 5 YK95+942.5 断面有限元计算岩体力学参数取值
Table 5 Rock mass mechanics parameters of FEM computation at section YK95+942.5

计算参数	重度 / (kN/m ³)	凝聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)	泊松比	弹性模量 / MPa
取值	24	0.15	35	0.35	75.40

表 6 隧道开挖后围岩变形计算结果
Table 6 Computing results of the surrounding rock deformation

围岩部位	拱顶下沉	周边收敛 / mm	
	/ mm	拱腰(水平 x 轴)	边墙(水平 x 轴)
变形最大值	26.81	19.82	23.09

从计算结果可以看出, 隧道变形值均小于 30 mm, 根据国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GBJ86—85)^[10]关于洞周容许相对收敛量的规定, 雪峰山隧道断层破碎带中的软弱围岩变形在正常范围内, 不会出现大变形, 隧道掘进到该洞段或相应类似洞段不需要采取特殊的支护手段, 与实际相符。

施工中, YK95+942.5 附近的位移监测数据略小于计算结果值, 主要是因为安装监测仪器滞后开挖作业, 基本反映出计算方法预报的有效性。

7 结 论

(1) 针对雪峰山公路隧道施工过程中的断层破碎带、围岩稳定性、岩爆及大变形等几类主要问题的预测、预报提供了一套较完整的研究方法和思路, 效果较好, 可以推广应用于类似的隧道工程中去。

(2) 对于处于复杂地质条件下的长大越岭隧道, 不能简单地依靠一种或几种方法进行超前预报(如断层预报), 各种方法均有所长且各有侧重, 要根据所要研究的问题合理地选择预报方法, 只有方法得当, 并在现场跟踪调查的基础上, 综合分析各种试验成果及现场地质特征现象, 结合不同方法开展综合预报, 才能取得较好的效果。

(3) 本文运用的研究方法较多, 某些方法(如 TSP、MTS 室内试验等)的成本相对较高, 对于诸如雪峰山等类型的特长深埋隧道, 以及其他地质条件复杂以及重要的隧道工程可以有选择地采用, 这

对于减少灾害、保证施工安全, 提高施工进度是非常有效的; 而对于一些长度短、埋深较浅、地质情况较简单、技术问题不突出的一般性的隧道工程, 采用常规的技术手段能够解决并满足工程要求的, 尽量使用常规方法, 以便达到节约成本的目的。

致谢: 文中引用了中南大学继善高科技有限公司的部分 TSP 和地质雷达等测试资料, 在现场工作中得到了课题组所有成员、贵州桥梁总公司和湖南邵怀高速公路公司的大力支持和配合, 在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 王青海, 李晓红. 超前预测预报在笔架山隧道施工中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 951—954.
WANG Qin-hai, Li Xiao-hong. Application of advanced prediction and forecast in Bijiaoshan Tunnel Construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 951—954.
- [2] 吴俊, 毛海和, 应松, 等. 地质雷达在公路隧道短期地质超前预报中的应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 1): 155—158.
WU Jun, MAO Hai-he, YING Song, et al. Application of ground probing radar to short-term geological forecast for tunnel construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.1): 155—158.
- [3] 何发亮, 李苍松. 隧道施工期地质超前预报技术的发展[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(3): 12—14.
HE Fa-liang, LI Cang-song. The development of geology forecast technology in tunnel construction[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2001, 38(3): 12—14.
- [4] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [5] 张志龙. 越岭长大公路隧道地质预报中的关键技术研究[博士学位论文 D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- [6] 王兰生, 李天斌, 赵其华, 等. 深埋长隧道高地应力与围岩稳定问题[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [7] 王良奎. 多种超前地质预报方法在隧道施工中的应用[J]. 金属矿山, 2001, 305(11): 45—47.
WANG Liang-kui. Application of multi-method of geology forecast in tunnel[J]. **Metal mine**, 2001, 305(11): 45—47.
- [8] 张志龙, 王兰生, 王跃飞, 等. 雪峰山高速公路隧道 F₂ 断层带的综合超前地质预报[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3312—3316.
ZHANG Zhi-long, WANG Lan-sheng, WANG Yue-fei, et al. Comprehensive advanced geological prediction of fault F₂ in Xuefeng mountain highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 3312—3316.
- [9] 马亢, 徐进, 王兰生, 等. 雪峰山公路隧道开挖过程中围岩应力应变场特征分析[J]. 公路, 2007, (3): 177—182.
MA Kang, XU Jin, WANG Lan-sheng, et al. An analysis on the characteristics of surrounding-strata stress-deformation field of XueFeng highway tunnel engineering[J]. **Highway**, 2007, (3): 177—182.
- [10] 冶金部建筑研究总院. GBJ86—85 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1986.