

软弱千枚岩地层围岩亚分级及支护方式研究

齐万鹏¹, 张德华¹, 严竞雄¹, 史振宇²

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 中铁十二局集团有限公司, 太原 030024)

[摘要] 包家山隧道穿越的千枚岩地层工程地质复杂, 断层多, 岩体性质变化大, 围岩稳定性差, 遇水极易软化。依据现有围岩分级的施工方法进行施工, 施工中多次出现掉块、坍塌现象。在确定包家山隧道千枚岩基本水理性质基础上, 依据《铁路隧道设计规范》(TB10003-2005), 运用国标《工程岩体分级标准》(GB50218-94) 中岩体基本质量指标(BQ), 对隧道IV、V级千枚岩进行了较为细致的分级, 将IV、V级围岩分为两个亚级, 建立了千枚岩围岩施工阶段亚级分级方法。获得了不同亚级的包家山千枚岩隧道施工方法, 并运用该亚级对应的施工方法进行施工, 实现了日进度达到3.75 m, 保证了施工安全和施工进度。

[关键词] 隧道施工; 千枚岩; 亚分级; 软化; 水理性质

[中图分类号] U452.1⁺² **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)01-0098-07

1 前言

隧道围岩分级是评定围岩的性质、判断隧道围岩稳定性、选择隧道施工方法及支护参数的前提。传统的铁路、公路隧道围岩分级采用经验类比法, 依据隧道围岩分级表, 并同时考虑围岩地下水和地应力特征进行。

包家山隧道穿越的千枚岩地层工程地质复杂, 断层多, 岩体性质变化大, 围岩稳定性差, 遇水极易软化。依据现有围岩分级的施工方法进行施工, 施工中多次出现掉块、坍塌现象。传统的围岩分级方法已难以满足包家山隧道千变万化的千枚岩地层情况。因此, 在确定包家山隧道千枚岩基本水理性质基础上, 依据《铁路隧道设计规范》(TB10003-2005) 基础上, 运用国标《工程岩体分级标准》(GB50218-94) 中岩体基本质量指标(BQ), 对隧道IV、V级千枚岩进行了较为细致的分级, 将IV、V级围岩分为两个亚级, 建立了千枚岩围岩施工阶段亚级分级方法, 获得了不同亚级的包家山千枚岩隧道施工方法, 并运用该亚级对应的施工方法进行施

工, 实现了日进度达到3.75 m, 保证了施工安全和施工进度。

2 包家山隧道工程概况

2.1 工程概况

包家山特长隧道位于包茂线(陕西境)小河—安康高速公路的咽喉部位, 全长11.2 km, 是全国第三长公路隧道, 也是国家规划的包头至茂名公路大通道的控制性工程, 其所处区域工程地质以千枚岩为主, 属南羊山断裂和石泉—安康断裂之间, 地段断层、褶皱发育影响全隧道的较大规模断层有37条。断层带周边常见强构造混杂带、强糜棱岩化、片理化等, 断层两侧及褶皱轴部裂隙发育岩石破碎, 围岩稳定性差, 破碎带多, 地下水丰富。

隧道为单向行驶双车道隧道, 开挖面积106.4 m²。隧道净宽10.25 m, 净高5.0 m, 除洞口段结合地形、地质条件设置明洞外, 其余地段均按新奥法原理设计, 采用柔性支护体系结构的复合式衬砌, 见表1。

[收稿日期] 2011-05-08

[作者简介] 齐万鹏(1986—), 男, 甘肃武威市人, 北京交通大学硕士研究生, 主要从事隧道及地下工程设计理论与技术研究;

E-mail: tsuidaoc@sina.com

表1 包家山隧道支护设计情况

Table 1 Supporting system of Baojiashan tunnel

围岩级别		洞口段	V	IV	III	
	类型	$\phi 89 \times 8$ 管棚	$\phi 50 \times 5$ 小导管	$\phi 25$ 超前锚杆		
超前支护	间距/cm	40	40	40		
	长度/m	10 ~ 30	5	5		
初期支护	喷砼厚	25 号/cm	24	22	10	
	径向	直径/mm	$\phi 25$	$\phi 22$	$\phi 22$	
	系统	长度/cm	400	350	300	
	锚杆	锚杆布置/cm	100 \times 75	100 \times 75	100 \times 100	120 \times 120
	钢筋网	直径/mm	$\phi 8$	$\phi 8$	$\phi 8$	$\phi 8$
		钢筋布置/cm	20 \times 20	20 \times 20	20 \times 20	20 \times 20
施工支护	型钢钢架	钢拱	I 20a	I 18	I 16	
		间距/cm	75	75	100	
二次衬砌	25 号混凝土/cm		50	45	40	
仰拱			50	45	40	

初期支护:洞口段采用径向系统锚杆、超前管棚周壁预注浆,钢拱支撑配合喷射混凝土形成整体;V级围岩段采用径向系统锚杆、超前小导管周壁预注浆,钢拱支撑配合喷射混凝土形成整体;IV级围岩段采用径向系统锚杆、超前锚杆,钢拱支撑配合喷射混凝土形成整体;III级围岩段采用径向系统锚杆配合喷射混凝土形成整体。

二次衬砌:明洞、洞口浅埋段、涌水段、塑性变形段、交叉段及设备洞室均采用钢筋混凝土结构,其余地段采用素混凝土结构。对IV、V级围岩均采用带仰拱衬砌,III级围岩不带仰拱,但对于2#斜井与主洞交叉处采用带仰拱衬砌。在二次衬砌墙脚下采用加厚曲边墙型式,确保墙脚外侧纵向排水管不侵入边墙内。

防排水设计:隧道的防排水遵循“防、排、截、堵结合,因地制宜,综合治理”的原则。要求排水通畅、防水可靠、施工方便,保证运营期间隧道内不渗不漏,达到基本干燥要求,保证衬砌结构和洞内设备的正常使用以及行车安全。隧道明洞段采用粘土隔水层作为第一道防水线防止地表水渗漏,明洞衬砌外铺设土工布及防水板作为第二道防水措施;暗洞隧道在初期支护和二次衬砌间敷设土工布及防水板;二次衬砌沉降缝采用中埋式橡胶止水带止水,施工缝采用P-201止水膏。在初期支护中根据地下水量大小按规定间距设置排水半管将汇水引入衬砌两侧墙脚外侧纵向排水花管中,沿隧道全长在行车道中心下设置中心排水管,纵向排水花管中的水通

过横向连接引入中心排水管,通过中心排水沟将水排出洞外。纵向排水花管、中心排水沟及路面两侧边沟间隔适当距离设置检查井及沉淀池,方便维修及利用高压水冲洗疏通。

2.2 工程及水文地质概况

隧道工程地质以粉砂质绢云母千枚岩夹炭质板岩为主,千枚岩含量占45%左右。围岩节理、裂隙发育——很发育,呈薄层状角砾结构,产状不稳定,围岩破碎,局部结构充填泥质物,面光滑,稳定性差。

区内岩体均为浅变质岩类,根据岩石结构和力学性质不同分为千枚状软质岩类、片状半坚硬岩类和板状、层状硬质岩类。

1)千枚状、片状软质岩类(II B):片岩、千枚岩或以千枚岩为主夹板岩等地层,主要分布在隧道YK151+665~YK156+910、YK157+870~YK159+270、YK159+517~YK161+900、YK162+260~YK162+840,占隧道长度的89.10%。岩石质软,强度较低,抗风化能力差,节理裂隙发育,岩石破碎,其饱和单轴抗压强度 R_c 为2.9~28.9 Mpa。

2)硬质岩类(II A):以层状灰岩或板岩为主,主要有灰岩、细晶灰岩,白云岩、碳质板岩、钙质粉砂质板岩等,主要分布在隧道中部和南部地段,里程桩号为YK156+910~YK157+870、YK159+270~YK159+517、YK161+900~YK162+260,占隧道总长的10.9%,细晶或微晶结构,岩石致密、坚硬,节理裂隙发育,饱和抗压强度 R_c 在11.3~72.0 Mpa。部分地段溶蚀强烈,可见直径1~4 m的溶洞和0.10

~0.20 m 宽的溶蚀裂缝,地震勘探测得深部有直径 5 ~ 100 m 不等的岩溶异常区。图 1 给出了包家山

隧道右线岩体分布图。

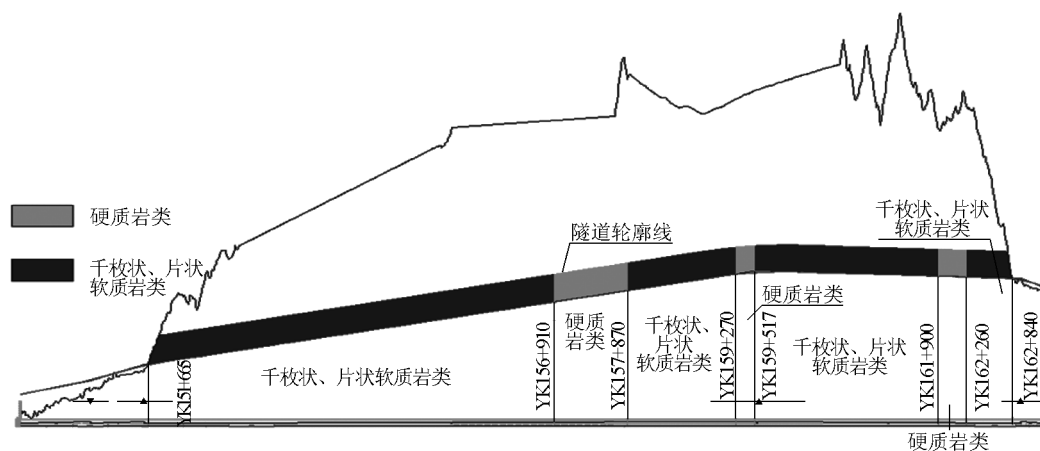


图 1 包家山隧道右线岩体分布图

Fig. 1 Distribution picture of rock mass in right line of Baojiashan tunnel

隧道经过地段地下水埋藏分布极不均匀,受岩性构造及岩溶发育程度等因素控制。根据岩性的差异分成 3 个富水地段,综合考虑基岩裂隙水的极不均匀性质和隧道施工运营安全,隧道总涌水量取断面流量法和渗渠法的平均值 $1\ 188.61\text{m}^3/\text{h}$,即左、右线均为 $28\ 512\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

2.3 原设计围岩分级概况

依据围岩的主要特征和围岩基本质量指标 BQ 将包家山隧道围岩划分为 III、IV 级围岩,以软岩至较坚硬岩为主,BQ 在 251 ~ 450 之间,少数地段为 V 级围岩,属全、强风化的软岩,岩体破碎, $BQ \leq 250$,见表 2。

表 2 包家山隧道围岩分级情况

Table 2 Condition of rock classification in Baojiashan tunnel

项目	单位	围岩分级			
		V	IV	III	合计
右线	长度/m	685	5 782	4 728	11 195
	百分比/%	6.00	51.70	42.20	
左线	长度/m	740	5 588	4 872	11 200
	百分比/%	6.40	50.00	43.60	
合计	长度/m	1 425	11 370	9 600	22 395
	百分比/%	6.30	50.80	42.90	

2.4 原施工方案设计

包家山隧道洞口段采用径向系统锚杆、超前管

棚周壁预注浆,钢拱支撑配合喷射混凝土形成整体;洞身 V 级围岩段采用径向系统锚杆、超前小导管周壁预注浆,钢拱支撑配合喷射混凝土形成整体;IV 级围岩段采用径向系统锚杆、超前锚杆,钢拱支撑配合喷射混凝土形成整体;III 级围岩段采用径向系统锚杆配合喷射混凝土形成整体。

运用上述施工方案,在隧道开挖过程中,多次出现中型及小型塌方现象,施工极为困难。因此项目部下决心针对不同涌水量,不同完整程度的千枚岩进行专项研究,确定更为细致的适合包家山隧道的千枚岩围岩亚分级方法及相应的施工方法,保证工程安全及顺利实施。

隧道进出口明洞均采用分层小切口明挖,进行锚喷混凝土的加固。明洞采用就地模筑全断面整体式钢筋混凝土衬砌,明洞回填时,对称回填土石并分层夯实,每层厚度不得大于 50 cm。

隧道暗洞施作在明洞施作后进行。隧道暗洞加强段、V 级围岩采用台阶分步开挖,每环进尺控制在 1.0 m,台阶长度不小于 6 m,采用弱爆破或机械开挖,初期支护及时封闭。下半断面应采用拉中心槽,两侧留足台阶土,马口跳槽开挖落地,马口长度不大于 3 m,及时完成初期支护;IV 级围岩采用正台阶法开挖;最终全断面模筑二次混凝土衬砌;III、II 级围岩采用全断面开挖。

3 包家山隧道千枚岩围岩亚分级研究

3.1 千枚岩工程特性试验研究

千枚岩除了具有其他软岩的共性外,还有一些特殊的性质。当前国内外对千枚岩工程特性的研究较少,只在乌鞘岭等隧道中进行过一些千枚岩施工技术方面的研究,但以往的研究因工期等多种原因

限制不够详细,不足以满足新的工程的需要,所以通过物理力学试验对千枚岩的工程特性进行研究。

岩石的物理力学性质特征是影响岩石工程性质的重要因素,也是设计和施工的重要依据^[2,3]。本工程对包家山隧道小康段不同里程处的岩石采样,进行了岩石的质量指标、岩石的水理性质指标物理力学性质试验。试验结果见表3。

表3 岩石物理力学性质试验结果

Table 3 Experiments results of physics and mechanics properties of rock

岩样 分组	密度、含水率、饱和吸水率试验				单轴压缩试验			三轴压缩试验		备注
	天然密度 $\rho_0 /$ ($g \cdot cm^{-3}$)	烘干密度 $\rho_d /$ ($g \cdot cm^{-3}$)	饱和密度 $\rho_w /$ ($g \cdot cm^{-3}$)	饱和吸水率 $w_s / \%$	单轴抗 压强度 σ_c / MPa	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$	黏聚力 C / MPa	
A组	2.763	2.762	2.765	0.099	19.07	6.82	0.117	42.58	4.56	饱水单三轴
B组	2.719	2.719	2.722	0.113	84.44	11.58	0.149	55.50	13.11	饱水单三轴
C组	2.760				53.12	6.80	0.059	41.28	11.75	天然

注: B组试样件数少,抗剪强度指标计算供参考

3.2 分级指标体系的选取

影响千枚岩围岩分级的主要因素可以用围岩分级的指标体系来表达。当前国内外主要采用岩石坚硬程度、岩体完整性状态和地下水作为最常用的围岩分级的指标,其最高采用率达100%。关宝树等学者研究认为,一般岩质围岩施工阶段,围岩分级指标除了包括岩石坚硬程度、岩体完整程度的基本指标外,修正指标中影响较大的为地下水状态^[4,5]。

包家山隧道围岩亚分级研究中,也采用上述3项指标进行围岩亚级分级。

3.3 包家山隧道千枚岩亚分级

为了保证《公路隧道设计规范》(JTG D70 - 2004)的连续性,以及更好地满足工程实际,本次研究在《铁路隧道设计规范》(TB10003 - 2005)基础上,运用国标《工程岩体分极标准》(GB50218 - 94)中岩体基本质量指标(BQ),对隧道IV、V级千枚岩进行了较为细致的分级,将IV、V级围岩分为两个亚级。围岩基本质量指标值[BQ]可按公式计算

$$[BQ] = BQ - 100(K1 + K2 + K3)。$$

式中,[BQ]为围岩基本质量指标修正值;BQ为围岩基本质量指标;K1为地下水影响修正系数;K2为主要软弱结构面产状影响修正系数;K3为初始地

应力状态影响修正系数。上述3项修正系数依据国标《工程岩体分极标准》(GB50218 - 94)进行取值,见表4~表6。

表4 地下水影响修正系数 K1

Table 4 Amendatory influence coefficient K1 of groundwater

BQ	>450	450~351	350~251	≤250
潮湿或点滴状出水	0	0.1	0.2~0.3	0.4~0.6
淋雨状或涌流状出水, 压力≤0.1 MPa 或单位出水量≤10L/(min·m)	0.1	0.2~0.3	0.4~0.6	0.7~0.9
淋雨状或涌流状出水, 压力>0.1 MPa 或单位出水量>10 L/(min·m)	0.2	0.4~0.6	0.7~0.9	1.0

表5 主要软弱结构面产状影响系数 K2

Table 5 Shape influence coefficient K2 of main weak structural plane

结构面产状及其与洞轴线的组合关系	结构面走向与洞轴线夹角 < 30°, 结构倾角 < 30°~75°	结构面走向与洞轴线夹角 > 60°, 结构倾角 > 75°	其他组合
K2	0.4~0.6	0~0.2	0.2~0.4

表6 初始应力状态影响系数 K3

Table 6 Influence coefficient K3 of original stress state

BQ	>550	550 ~ 451	450 ~ 351	350 ~ 251	≤250
极高应力区	1.0	1.0	1.0 ~ 1.5	1.0 ~ 1.5	1.0
高应力区	0.5	0.5	0.5	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1

表7 包家山隧道千枚岩亚级分级标准

Table 7 Criterion of sub-classification for phyllite in Baojiashan Tunnel

围岩级别		BQ 范围
级别	亚级	
IV	IV1	350 ~ 276
	IV2	275 ~ 251
V	V1	250 ~ 211
	V2	≤210

修正后的[BQ]值采用表7的BQ范围进行分级。

表8 包家山隧道右线围岩级别表

Table 8 Rock classification of right line in Baojiashan tunnel

起讫里程	长度/m	围岩级别	备注	起讫里程	长度/m	围岩级别	备注
ZK151 + 655 ~ K151 + 900	245	V1 级	洞口加强,采用V级加强衬砌	ZK154 + 070 ~ K155 + 440	1 370	IV2 级	
ZK151 + 900 ~ K152 + 650	750	IV2 级		ZK155 + 440 ~ K155 + 790	350	III2 级	
ZK152 + 650 ~ K152 + 920	270	III2 级		ZK155 + 790 ~ K155 + 890	100	IV1 级	
ZK152 + 920 ~ K153 + 458	538	IV1 级		ZK155 + 890 ~ K156 + 390	500	III2 级	
ZK153 + 458 ~ K154 + 070	612	IV1 级		ZK156 + 350 ~ K156 + 500	110	IV2 级	

运用上述分级方法,在包家山隧道里程 YK151 + 650 ~ K156 + 500 段,采用施工阶段的动态分级方法对该标段进行了亚分级。隧道右线 YK155 + 810 ~ K155 + 890, YK156 + 350 ~ K156 + 490 段共220 m 被划分为IV1 级, YK151 + 930 ~ K152 + 650, YK152 + 890 ~ K153 + 430, YK153 + 430 ~ K154 + 090, YK154 + 090 ~ K155 + 390 段共 3 220 m 被划分为IV2 级,280 m 被划分为V2 级。

3.4 包家山隧道千枚岩亚分级后施工方法

通过现场测试记录及试验对不同亚级别的千枚岩隧道做出相应的施工方法总结,采用亚分级的对应的施工方法进行施工。

3.4.1 超前地质预报

施工中坚持以 TSP203 预报为主、超前钻探为辅的预报方案,用 30 in 超前钻探对 TSP203 预报结果进行验证。综合运用 TSP203 地质预报系、超前钻孔、开挖面岩性前推法等方法手段预报前方工程水文地质变化,并及时对岩体进行亚分级,调节支护参数和施工方法,确保安全快速通过该地段。以V2 级围岩段为例,介绍围岩亚分级后,隧道的施工方法。

为了减小对的围岩扰动,将支护及时封闭成环,使隧道能顺利通过 V2 级千枚岩地段,确定采用“上部弧形导坑预留核心土,三台阶七步开挖平行流水作业法”施工。这种方法具有以下施工特点:

1)三台阶平行作业,施工空间较大、可以引入

大型施工机械作业,施工效率高。

2)施工方法转换较快,进度稳定,安全和工期有保障。

3)施工工艺简单,施工投入少。

表9 千枚岩亚分级对应施工方法

Table 9 Construction method for each sub-classification of phyllite rock

围岩级别	千枚岩现场分级判断依据	工程措施
IV	IV1 局部较破碎,大面积渗水	采用两台阶法开挖,超前锚杆、超前小导管预支护 采用三台阶预留核心土方法开挖,超前小导管注浆,掌子面超前注浆
	IV2 较破碎,涌水	
V	V1 破碎,大面积渗水或线状涌水,掉块	采用三台阶预留核心土方法开挖,加大钢拱架尺寸,超前小导管注浆(必要时双层),掌子面超前注浆,喷射高强度混凝土
	V2 极破碎,涌水,掉块,坍塌	采用三台阶预留核心土方法开挖,超前小导管注浆(双层),掌子面超前注浆,必要时周边注浆,喷射钢纤维混凝土

3.4.2 超前注浆

富水千枚岩地段每 3 m 进行一次超前注浆,注浆小导管钻孔从工作面最后一榀工字钢拱架上部穿

过,打入小导管后,钢管尾部和工字钢架焊接成整体。止浆墙采用喷射混凝土,掌子面上台阶范围喷10 cm厚混凝土进行封闭,采用两台KBY50/70注浆泵进行注浆作业。径向注浆小导管在进行初期支护时同步打设,在开挖下一循环的时候对本循环打设的径向小导管进行注浆。为了节约时间,径向注浆管全部用铁丝绑在预埋在边墙的钢筋上,采用4台同型号注浆泵注浆。

3.4.3 开挖

上部弧形导坑采用人工风镐开挖,必要时辅以弱爆破;核心土长度同上台阶长度,核心土距拱顶开挖面1.5 m,坡脚距拱脚2.5 m。中下台阶及仰拱采用微震光面爆破开挖,严格掌握炮眼数量、深度及装药量,以减少爆破震动对围岩的影响。各部开挖后及时初喷3~5cm混凝土封闭掌子面,网喷、锚杆、钢架联合支护作业。上导坑拱脚、中下导坑墙角增设锁脚锚管,拱架拱脚下垫槽钢;仰拱紧跟下台阶施作,按每段4HI开挖及时施作仰拱混凝土,使支护闭合成环。上、中台阶开挖后挖掘机将洞渣扒至下台阶,同时上导坑开始架立钢架,挖掘机座于中台阶配合ZL50C装载机装渣,北方奔驰车出渣。

运用上述分级方法及相应的施工方法,在包家山隧道工期紧张,工程水文地质复杂,隧道穿越地段有20条断层,IV、V级围岩占70%以上的工程背景下,建立了一套能适应地质变化而迅速过渡的施工方法,充分发挥了先进的大型施工机具的优势,提高工作效率,取得了最佳的掘进速度和经济效益。包家山千枚岩隧道施工实现了日进度达到3.75 m,保证了施工安全和施工进度,大大减少了断层破碎带

富水段的施工风险,保证了隧道施工安全、质量及工期。

4 结语

针对包家山千枚岩隧道,通过亚分级法对千枚岩围岩进行研究,得到以下结论:

1)在《铁路隧道设计规范》(TB10003-2005)的基础上,运用国标《工程岩体分级标准》(GB50218-94)中岩体基本质量指标(BQ),对隧道IV、V级千枚岩进行了较为细致的分级,将IV、V级围岩分为两个亚级,建立了千枚岩围岩施工阶段亚级分级方法。

2)确定了包家山隧道千枚岩水理性质。遇水后,其单轴抗压强度、泊松比、黏聚力都急剧下降,水敏感性强,明确了包家山隧道遇水软化的工程特性。

3)获得了不同亚级的包家山千枚岩隧道施工方法。

4)运用亚分级对应施工方法进行施工,实现了日进度达到3.75 m,保证了施工安全和施工进度。

参考文献

- [1] 胡月兰. 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
- [2] 孙广忠. 岩体力学基础[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [3] 常士骝. 工程地质手册[M]. 北京:中国建筑出版社,1992.
- [4] 张文珍,左辉. 黄壁庄水库大理岩、千枚岩工程地质特性[J]. 土工基础,2006,20(2):51-54.
- [5] 张继奎,方俊波. 高地应力千枚岩大变形隧道支护参数试验研究[J]. 铁道工程学报,2005(5):66-70.

Research on supporting methods and sub-classification of complex phyllite rock layer in Baojiashan tunnel

Qi Wanpeng¹, Zhang Dehua¹, Yan Jingxiong¹, Shi Zhenyu²

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. China Railway 12th Bureau Group Co., Ltd, Taiyuan 030024)

[**Abstract**] The geology of the region which Baojiashan tunnel crossed through was very complex. The layer was consisted of broken phyllite which was easily softened with water. The rock mass had collapsed several times while excavation by the construction methods which designers offered. In this article, the sub-classification of phyllite was established according to *State Standard Classification of Rock* and *Designing Standard of Railway Tunnel*. Based on this sub-classification, a series of construction methods in phyllite were set up eventually. And Baojiashan tunnel was successfully built using the construction methods mentioned above.

[**Key words**] tunnel construction; phyllite; sub-classification; soften; water prosperities of rock