

张集线旧堡隧道工程地质条件和岩体结构特征研究*

孙福军^① 陈洋^② 曾庆利^③ 乔志斌^① 李杰^①

(^①中铁十二局第二工程公司 太原 030032)

(^②蒙冀铁路有限责任公司 呼和浩特 010050)

(^③中国科学院研究生院地球科学学院 北京 100049)

摘要 新建的张集铁路(张家口-集宁段)旧堡隧道是全线关键性控制工程,位于河北省万全县旧堡乡与尚义县土禾村之间,隧道穿越由晚太古代马市口组(Arm)麻粒岩和黑云母斜长片麻岩组成的一套高级变质岩建造,断裂构造极为发育,岩体破碎。原设计Ⅱ、Ⅲ级围岩洞段占隧道线路总长的71.8%,而已施工揭露的工程地质条件较差,全部变更为Ⅲ级加强及Ⅳ、Ⅴ级围岩,变更率高达80.3%。施工过程中多次发生挤压大变形、塌方、突涌水等施工地质灾害,共处理大塌方段8处小塌方21处计130m,处理大变形18段计550m。本文分析了DK30+520~910洞段地层岩性、地质构造、地应力、地下水等隧道围岩主要工程地质条件,从结构面和工程地质岩组的物理力学特性出发,研究了该洞段特殊的岩体结构,指出该隧道围岩岩体结构特征主要受与隧道轴线小角度相交的构造挤压破碎带及软硬交替产出的岩组控制,隧道围岩变形破坏受岩体结构控制作用明显,并总结了施工中可能遇到的几种岩体结构。该研究对类似工程地质条件地区隧道工程围岩分类、支护设计和施工有一定的借鉴意义。

关键词 工程地质条件 岩体结构 围岩分级 旧堡隧道

中图分类号:U452.1+2 **文献标识码:**A

ENGINEERING GEOLOGICAL CONDITIONS AND SPECIAL ROCKMASS STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF JIUBAO RAILWAY TUNNEL

SUN Fujun^① CHEN Yang^② ZENG Qingli^③ QIAO Zhibin^① Li Jie^①

(^①The Second Branch-Company of the 12th Bureau of CRCC, Taiyuan 030032)

(^②Mengji Railway Co. Ltd., Hohhot, Inner Mongolian 010050)

(^③College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Jiubao Tunnel, located between Wangquan county to Shangyi county of Hebei province, is the key and controlling works of the under-constructed Zhangjiakou-Jining Railway Line. The tunnel passes through the granulite and the biotite gneiss of the Upper Archen Era, where faults well developed faults and the rock mass is fractured. The geological conditions disclosed during tunneling were greatly different from those of the construction design drawing. The alteration ratio of the classification of tunnel surrounding rocks even reaches 80.3%. It was due to insufficient understanding to rock mass structure. The high alteration directly caused the occurrence of many geohazards such as squeezing, collapse, water in-rush during tunneling. The paper takes the section of DK30+520~DK30+910 as the example and makes the comprehensive analysis to the key geological conditions of tunnel sur-

* 收稿日期: 2009-11-16; 收到修改稿日期: 2010-04-09.

基金项目: 自然科学基金面上项目(40972199); (40972198).

第一作者简介: 孙福军, 主要从事工程地质及环境地质灾害方面的研究. Email: qlzeng2008@126.com

rounding rock. The key conditions include geology, geotechnics, earth stress and underground water. It studies the special characteristics of rock mass structure and directs that the tunnel surrounding rock is complicatedly controlled by the fault fracture zones and the alternative outcropping of weak and hard engineering geological rock masses. It is the special rock mass structural characteristics that controls the deformation and collapse of tunnel. It also summarizes the rock mass structure types which are possibly encountered during tunnel construction. The research result on the rock mass structure of Jiubao Tunnel is helpful to the tunnel design change and construction in the metamorphic and greatly tectonic disturbed areas.

Key words Engineering geological conditions, Rockmass structure, Rock classification, Jiubao tunnel

1 引言

岩体结构是指岩体中结构面和结构体的形态和组合特征,是影响隧道和地下工程围岩稳定性的重要因素。早在 20 世纪 70~80 年代,谷德振、孙广忠等就提出地质构造控制论和岩体结构控制论,认为:岩体受力后变形、破坏的可能性、方式和规模受岩体自身结构制约的,即岩体结构特征控制着岩体的力学性质、变形特性和破坏机制,并将岩体分为块裂、完整、碎裂和散体等 4 种结构类型^[1,2];并且这一关于岩体结构研究成果被作为我国《工程岩体分级标准》(GB50218-94)的基本评价指标之一^[3]。近年来,国内学者在岩体结构面粗糙度系数及抗剪强度估算方法^[4]、岩体结构要素的分形几何^[5]、三维岩体结构面连通率^[6]、复杂岩体结构的精细描述^[7]、岩体结构三维可视化模型^[8]等方面取得了较大研究进展;对于软弱、破碎岩体,也进行了诸如断层岩的分类、物理力学特性和稳定性评价的研究,以及泥化夹层的物质与结构特征及其力学性质的研究等^[1,2]。国外学者虽很少提岩体结构,但非常重视岩体中结构面(称为不连续面)及完整岩块的特征,如 Hoek & Marinos 认为“隧道围岩可能沿着既有不连续面发生剪切破坏,并取决于每个不连续面组的数量、间距、贯通性、产状、抗剪强度以及完整岩块的坚硬程度”^[9];国外研究者通常将我国岩体结构所涵盖的研究内容具体到岩体质量评价(围岩分级)上,例如 Deere 等的岩石质量设计指标(RQD, Rock Quality Designation Index)考虑了岩体中节理等结构面^[10], Wickham 等的岩石结构分级(RSR, Rock Structure Rating)考虑了岩性、岩石硬度、地质构造、节理和地下水等要素^[11], Barton 的岩体质量 Q 分级考虑了 RQD、节理组数、粗糙系数、蚀变系数、节理水折减系数及应力折减系数等^[12], Bieniawski 的地质力学分级(RMR, Geomechanics Classification or

Rock Mass Rating)则考虑了岩石单轴抗压强度(UCS)、RQD、不连续面间距及状态和方向、地下水条件等 6 个参数^[13], Hoek 等的地质强度指标分级(GSI, Geological Strength Index)则更进一步地把岩体结构与岩体强度结合起来^[14]。

同时,在隧道结构稳定性计算中,围岩既是地下工程承载结构的主体也是结构荷载的主要来源,岩体结构对隧道开挖后二次应力场分布特征、塑性区和松动圈大小、支护结构与围岩间相互作用力等均有重大影响^[15]。因此,在实际施工中正确认识围岩的岩体结构特征并进行归纳分类,是隧道围岩分级、施工方法选择和支护结构参数确定的前提和基础。

张集线旧堡隧道施工揭露地质条件与原设计相差较大,围岩变更率高,且常出现塌方、大变形等施工地质灾害,为了更好地认识其原因,本文在详细分析旧堡隧道 DK30+520~DK30+910 洞段围岩主要工程地质条件的基础上,研究了其岩体结构特征,特别是控制性软弱结构面特性、岩块物理力学特性及其组合,总结了隧道施工中可能遇到的几种岩体结构类型,指出围岩级别变更率高主要与设计时对隧道围岩的基本岩体结构认识不够有关。

2 工程概况

新建张家口至集宁铁路是我国铁路网“八纵八横”京兰大通道的重要组成部分,旧堡隧道是张集线上第一长隧道,位于河北省万全县旧堡乡与尚义县土禾村之间。该隧道全长 9585m,埋深大于 350m 的洞段占隧道全长的 36%(最大埋深达 493m),单洞双线,断面面积 138m²,是一条“深埋长大隧道”。

旧堡隧道按新奥法原理组织施工,原设计 II、III 级围岩占 71.8%,全断面开挖,复合式衬砌;但是在实际施工中,围岩级别变更率高达 80.3%,全部采用三台阶法开挖,其中, V 级围岩采用三台阶留核心土法开挖。

截止 2009 年 7 月底,旧堡深埋长隧道尚余 2300 多米洞段没有开挖。已施工洞段在掘进过程中多次出现围岩大变形、塌方和突涌水等施工地质灾害,共处理大塌方段 8 处小塌方 21 处计 130m,处理大变形 18 段计 550m,造成工期严重滞后,成本大幅增加。

3 旧堡隧道围岩主要工程地质条件

3.1 地层岩性

旧堡隧道穿越地层岩性相对较简单,主要为晚太古代马市口组(Arm)麻粒岩和黑云母斜长片麻岩^[16]。这是一套来自下地壳并经受了 NE 向强烈的韧性剪切作用的高级变质岩建造^[17],发育 NE 向片麻理,构成似层状构造,原岩分别为中酸性浅成岩和闪长岩。图 1 和图 2 分别展示了旧堡隧道围岩在地表和隧道掌子面上形态和表现。



图 1 旧堡隧道地表产出的麻粒岩(左)和黑云斜长片麻岩(右)

Fig. 1 Outcrop of granulite(left) and biotite gneiss(right) in alignment of Jiubao Tunnel.



图 2 旧堡隧道 Dk30+520-910 段施工揭露的麻粒岩(左)和黑云斜长片麻岩(右)

Fig. 2 Granulite(left) and biotite gneiss(right) disclosed in Jiubao tunnel face in section of Dk30+520-910.

3.2 地质构造

旧堡隧道区域上位于内蒙地轴与燕山准地槽的分界处,自上震旦纪褶皱隆起后至今未接受任何沉积;在地质历史时期经历了前震旦纪、中生代和新生代等 3 期较明显的构造运动,以中生代构造最为显著^[16]。

隧道工程区内构造形迹以断裂为主(图 3),发育 F_3 、 F_{54} 、 F_{12-1} 及水泉沟断层等 4 条中生代 NE 向主干逆冲推覆断层,构成“后展式叠瓦状构造”(注:一系列倾向相同的近等距排列的逆冲断层);同时隧道沿线还发育 10 多条与上述主干断裂近平行的次级逆断层。因此,旧堡隧道所赋存的山体可能是一个被数量众多的、主干及次级逆断层分割的“岩片”地质体。

其中, F_3 断层走向 $10^\circ \sim 25^\circ$,倾向 $100^\circ \sim 115^\circ$,倾角 $35^\circ \sim 75^\circ$,长约 12km,受多期构造运动叠加影响,断裂构造兼具压扭性及张扭性断裂特征;隧道

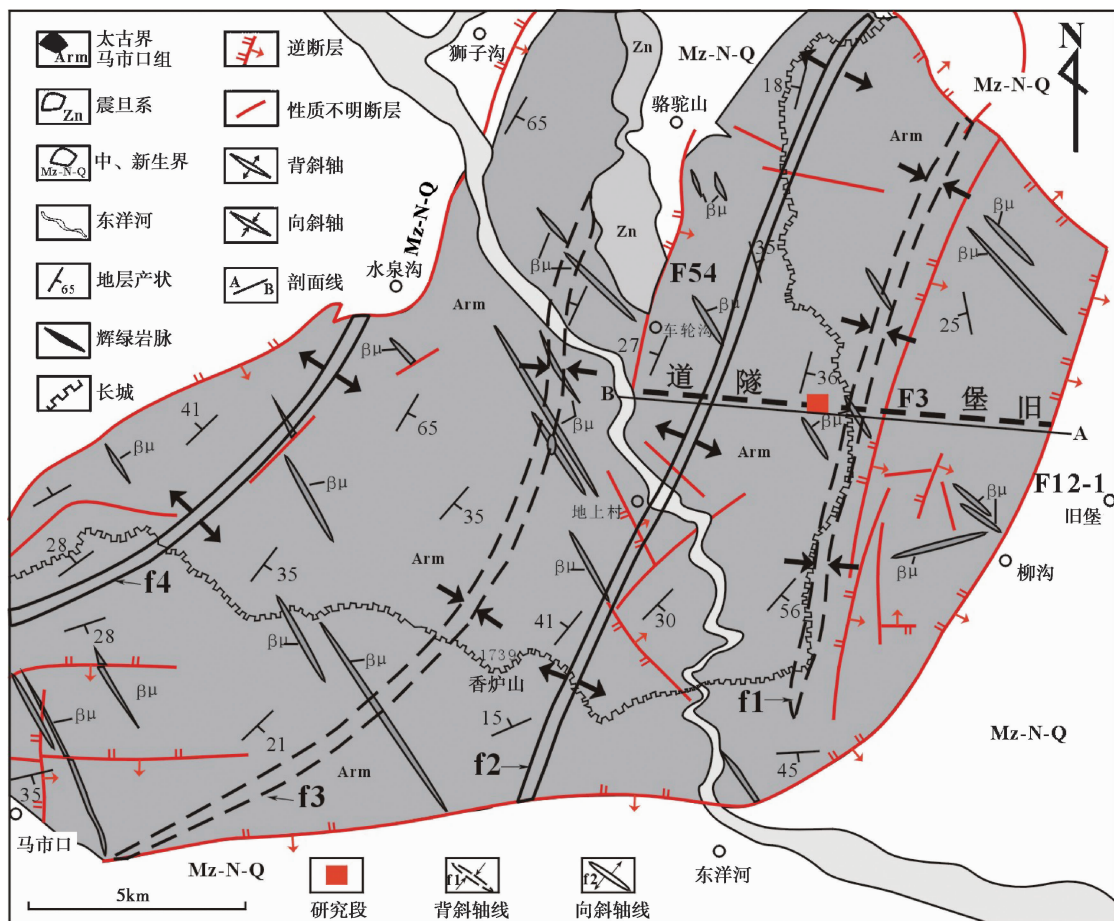


图3 张集线旧堡隧道工程区地质图[改自文献17]

Fig. 3 The geological map of Jiubao engineering area(modified after reference 17)

于 DK28+380 ~ DK29+630 穿过该断裂破碎带及其影响带,其中于 DK29+000 ~ DK29+305 穿过断裂破碎带。研究洞段 DK30+520 ~ DK30+910 位于主干逆断层 F_3 的下盘,距离 F_3 断层尚有 1215m,但可能受到牵引褶皱的影响(图3)。

3.3 构造应力场

旧堡隧道工程区位于现代构造应力场之汾渭断陷应力区,区域最大主压应力方向为 NE-NEE 向^[18];同时根据邻区震源机制解^[19]及浅部地应力实测资料,推定旧堡隧道工程区区域最大主压应力优势方向为 82° ,与隧道轴线(95°)呈小角度相交,对隧道建设有利。同时,旧堡隧道埋深超过 270m 的洞段占隧道总长度的 51%,存在较大的自重应力。作者根据对隧道正洞 DK30+882 处(埋深约 360m)围岩收敛变形和支护结构受力监测资料,进行了岩体初始地应力的数值反分析,得到隧道横截面上最大水平主应力为 15.34MPa,最小水平主应力为 11.25MPa,垂直应力为 9.4MPa 且是最小主应

力。

3.4 地下水

旧堡隧道地下水类型主要为裂隙水,包括基岩裂隙水和构造裂隙水,渗透系数 K 可达 $0.06\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。因软弱构造破碎带中含有断层泥或构造夹泥层,对地下水运移形成切割阻隔作用,局部地段的地下水具有承压性。在钻孔 ZD241 处,承压水自钻孔中喷出,高约 3m(图4a),后逐渐停止。隧道施工中多次出现股状涌水,并夹杂岩块碎屑涌出,钻孔注浆后停止(图4b)。

4 岩体结构特征

4.1 结构体及其强度特性

洞身范围内围岩岩性由麻粒岩和黑云斜长片麻岩构成,其中:

麻粒岩地表为全风化~强风化,呈碎石状及砂



图4 旧堡隧道 ZD241 孔承压水及 2#斜井施工中的突发涌水

Fig. 4 The confined water in exploration borehole ZD241 (left) and the sudden water inflow during the construction of No. 2 adit.

砾状(图 1a); 隧道断面上表现为弱风化~微风化, 岩块坚硬, 节理裂隙发育, 呈碎块状(图 2a)。现场采样并经实验室测试得到麻粒岩岩块饱和单轴抗压强度平均为 67.3MPa, 属极硬岩。

而黑云母斜长片麻岩地表风化程度较麻粒岩强烈, 岩石干单轴抗压强度大部分低于 60MPa, 属硬岩(图 1b); 隧道断面上呈块状, 经历过混合岩化作用, 天然含水率高, 天然单轴抗压强度小, 可用风镐挖, 手掰即碎, 属极软岩(图 2b)。

麻粒岩与黑云母斜长片麻岩一般相间产出, 构造挤压断层接触(图 5)。

4.2 结构面及其特性

根据野外和洞内地质详查, 研究段围岩有 3 种主要软弱结构面类型, 即节理、构造挤压破碎带和岩

脉接触破碎或蚀变带。

4.2.1 节理裂隙

通过地表及研究洞段的节理裂隙统计, 发现主要有 4 组: 产状分别为① $130^{\circ} \sim 150^{\circ} \angle 34^{\circ} \sim 55^{\circ}$, ② $200^{\circ} \sim 225^{\circ} \angle 57^{\circ} \sim 84^{\circ}$, ③ $280^{\circ} \sim 300^{\circ} \angle 30^{\circ} \sim 45^{\circ}$, ④ $40^{\circ} \sim 65^{\circ} \angle 70^{\circ} \sim 82^{\circ}$ 。走向上可分为 NW 和 NE 两类, NW 向又可分为两组, 一组走向 290° 左右, 另一组 $310^{\circ} \sim 330^{\circ}$; NE 向也可分为两组, 一组走向 15° 左右, 另一组 50° (似层状的片麻理)。

这几组节理贯通性强, 将岩体切割成菱形块状, 节理面充填薄层黑色、墨绿色泥膜或构造夹泥层, 擦痕镜面明显(图 1a, 图 2a)。对这些构造夹泥层的全岩和黏土矿物成分测试表明(表 1, 表 2): 黏土矿物总含量为 17.3%, 主要黏土矿物成分为绿泥石/蒙脱石混层矿物、绿泥石及高岭石。同时, 构造夹泥

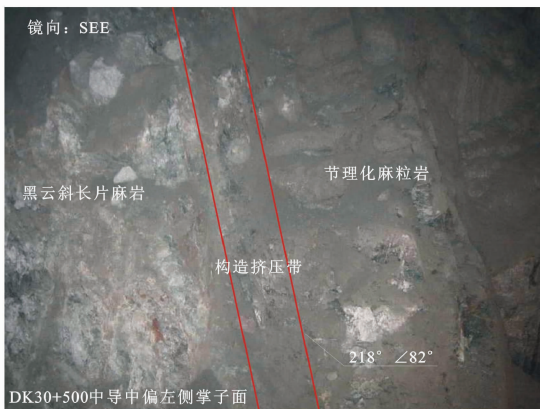


图5 掌子面上发育的构造挤压破碎带

Fig. 5 The structural shear fractured zone developed in tunnel face
左. 麻粒岩与黑云斜长片麻岩间的构造挤压带; 右. 麻粒岩体间的构造挤压带

表1 构造夹泥层(JB-03)和构造挤压带(JB-02)全岩分析

Table 1

样品编号	矿物种类和含量/(%)						粘土矿物总量/(%)
	石英	钾长石	钠长石	方解石	白云石	非晶质	
JB-02	15.8	12.9	41.5				29.8
JB-03	22.2		60.5				17.3

表2 构造夹泥层(JB-03)和构造挤压带(JB-02)X衍射测试结果

Table 2

样品编号	粘土矿物相对含量/(%)						混层比/(%)	
	S	I/S	I	K	C	C/S	I/S	C/S
JB-02			2	8	11	79		50
JB-03			1	9	10	80		45

注:K.高岭石;C.绿泥石;I.伊利石;S.蒙脱石;C/S.绿泥石/蒙脱石混层矿物;I/S.伊利石/蒙脱石混层矿物

层的天然含水率为18.25%,非常接近其塑限(19.7%)。这说明构造夹泥层极易吸水软化而表现出塑性。

4.2.2 NWW向构造挤压破碎带

构造挤压破碎带在整条线路上非常发育,走向NWW,陡倾,且与隧道轴线以 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 小角度相交。构造挤压破碎带是麻粒岩体与黑云母斜长片麻岩体的接触带(图5a)或麻粒岩体之间的软弱带(图5b),是控制性结构面。

麻粒岩体与黑云母斜长片麻岩之间的构造挤压破碎带由断层泥或构造泥质夹层、压碎岩构成,且往往是多层重复出现,一般厚度达20~30cm(图5a)。其中,断层泥厚度不均,延展性差,薄的1~3mm,厚

的达4~5cm,包裹着被压碎的岩屑透镜体(图6)。实验室测试结果表明(表1,表2):压碎的岩屑透镜体黏土矿物总含量接近30%,黏土矿物成分与构造夹泥层类似,主要为伊利石/蒙脱石混层矿物以及绿泥石、高岭土等,同时其干燥时有一定的强度,但遇水后迅速崩解,具有中弱膨胀性。构造挤压透镜体被暗绿色断层泥或泥质夹层分隔,结构面上极发育擦痕及摩擦镜面,表现出明显的挤压错动痕迹(图6a)。

4.2.3 岩脉接触破碎或蚀变带

地表和洞内发育较多的辉绿岩脉和花岗伟晶岩脉(图7),其走向大部分为NW向,主要沿NW向破碎带或节理发育,产状陡立。这两类岩脉与其两侧地层的接触带也常常构成软弱结构面,其中辉绿岩脉通常为蚀变带接触,而花岗伟晶岩脉则表现为破碎带接触。

沿隧道轴线上岩脉规模大小不等,但由于其走向与隧道轴线小角度相交,因此施工中可能在某侧先揭露,然后在另一侧消失。花岗伟晶岩脉呈肉红色,岩质坚硬,完整性较好,呈块状结构,自稳能力强。

4.3 旧堡隧道岩体结构特征和类型

4.3.1 旧堡隧道岩体结构特征

通过前述对旧堡隧道围岩主要工程地质条件的调查、测试和分析,认为该隧道围岩的岩体结构比一般隧道的岩体结构特殊和复杂:特殊性在于围岩主要和控制性NWW向软弱结构面与隧道轴线以 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 小角度斜交,这对岩体稳定不利;复杂性在于隧道横断面上地层岩性可能是非单一的,并在纵断面上岩性及其岩体结构不断变化,开挖和支护设计需要实时变更。

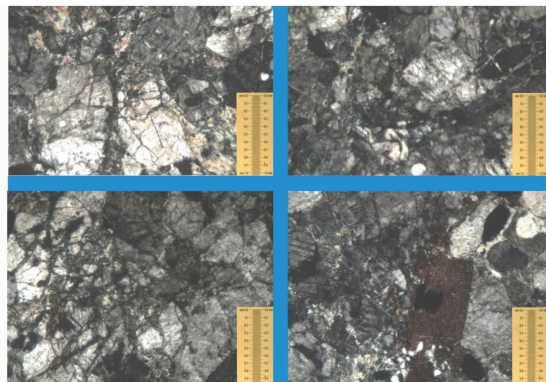


图6 麻粒岩与黑云斜长片麻岩之间的构造挤压破碎带

Fig. 6 Sample from the shear zone between granulite and biotite gneiss

a. 黑云斜长片麻岩透镜体; b. 正交偏光下构造挤压透镜体影像(标尺长1mm)



图7 隧道正洞地表出露的辉绿岩脉(左)和花岗伟晶岩脉(右)

Fig. 7 The diabase(left) and granite-pegmatite(right) veins outcropped in tunnel alignment.

同时,组成围岩的工程地质岩组及其物理力学特性复杂。旧堡隧道洞身施工揭露的岩组主要包括麻粒岩岩组,黑云斜长片麻岩岩组及少量花岗伟晶岩脉。麻粒岩岩块虽然强度高(平均 67.3MPa),但结构面发育且普遍被厚度不等的构造夹泥层所填充,形成所谓的“泥包石”,岩体强度小于 5MPa;黑云斜长片麻岩虽干单轴抗压强度较高,结构面欠发育,但隧道内却表现为天然含水量高,强度急剧降低;黑云斜长片麻岩与麻粒岩以构造挤压带接触,呈互层或夹层状产出。两种岩组间构造挤压带产状陡倾且走向与隧道轴线呈小角度斜交。

4.3.2 旧堡隧道岩体结构分类

根据旧堡隧道主要工程地质条件及其岩体结构特征,可把旧堡隧道围岩岩体结构归纳为以下类型:

(1) 单一岩体结构类型

根据掌子面上岩组和软弱结构面发育情况,又可以细分为:

①松散碎裂结构(图 8a):指麻粒岩体主要发育似层理(产状: $130^{\circ} \sim 150^{\circ} \angle 34^{\circ} \sim 55^{\circ}$)和 NWW 向节理,两者将掌子面麻粒岩切割成碎裂化岩体,掌子面可能包括 1 条或多条 NWW 向挤压构造带,也可能不发育 NWW 向挤压构造带;一般可划分为 IV 或 V 级围岩。

②块状碎裂结构:指由花岗伟晶岩脉构成的岩体。这种岩体虽然节理裂隙较发育,施工时洞周也常发生大面积串珠或雨滴状淋水,但岩石坚硬且结构较完整,隧道开挖后较稳定,一般可确定为 II 或 III

级围岩。

③块裂结构:指由黑云斜长片麻岩构成的岩体,除自身片麻理外,节理裂隙一般发育。掌子面上黑云斜长片麻岩天然含水量高,蒙脱石等黏土矿物含量达 30%,岩体强度低,可视为软岩;深埋条件下可按照 IV 加强或 V 级围岩进行支护。

④层状碎裂结构(图 8b):指 NWW 向小型挤压构造面虽非常发育但间距较大(通常 10 ~ 20cm)、主要以节理($130^{\circ} \sim 150^{\circ} \angle 34^{\circ} \sim 55^{\circ}$)为控制性结构面的麻粒岩体,构造面通常为薄层构造夹泥所填充。一般可按照 IV 级围岩进行支护。

(2) 复合岩体结构类型

复合岩体结构也可按照掌子面上岩组组合及 NWW 向挤压构造带的发育情况进一步细分为单复合结构和多复合结构:

①单复合结构:主要指隧道断面上一侧为麻粒岩岩体另一侧为黑云斜长片麻岩(图 8c,图 5a),或一侧为麻粒岩岩体另一侧为花岗伟晶岩脉构成的岩体。第一种结构比较常见,但麻粒岩和黑云斜长片麻岩在隧道断面上的比例及位置可能有多种组合且随着掘进而连续变化;

②多复合结构:这里主要是指隧道断面上麻粒岩岩组和黑云斜长片麻岩组多次互层或呈夹层状产出、中间同时产出多条构造挤压带(图 8d),但岩性比例和位置不确定。

在上述各种岩体结构类型中,隧道施工中最常见的是松散碎裂结构(图 8a)和单复合结构(图 8

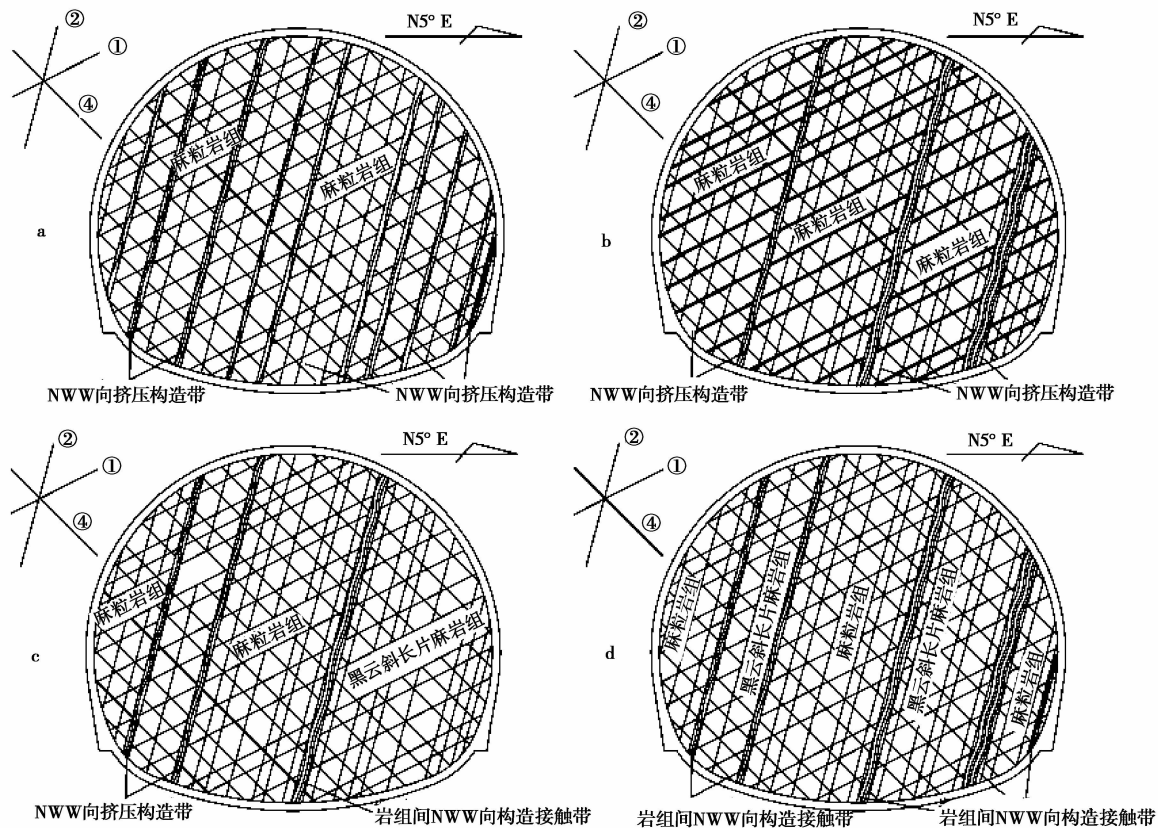


图8 旧堡隧道岩体结构示意图

Fig. 8 Schematic section of rock mass structures of Jiubao tunnel

a. 松散碎裂结构; b. 层状碎裂结构; c. 单复合结构; d. 多复合结构

c)的围岩;但是围岩级别划分比较困难,需要综合考虑各岩组的比例、位置及构造挤压带的数量。

5 结论

在详细地质调查、测试和分析基础上,认为旧堡隧道围岩的岩体结构具有特殊性和复杂性。晚太古代麻粒岩岩块坚硬但结构面发育且普遍含较厚的构造夹泥;黑云斜长片麻岩天然含水量高,蒙脱石等黏土矿物含量高,岩体强度低;两者呈挤压构造接触,接触面 NWW 走向与隧道轴线呈 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的小角度斜交;将隧道围岩岩体结构按照岩组构成和软弱构造带发育情况归纳为两大类 6 个亚类,施工中比较常见的主要是由麻粒岩构成的松散碎裂结构及一侧为麻粒岩另一侧为黑云斜长片麻岩的单复合结构。

针对这种具有特殊和复杂岩体结构的围岩,目前采取的三台阶七步开挖法及支护结构设计需要进一步优化,主要包括以下几个方面:

第一,对于单复合岩体结构围岩,研究两种岩体(黑云母斜长片麻岩与麻粒岩)的强度特性及差异、地下水状态、水岩相互作用及差异,结构偏压,深埋条件下围岩—支护结构相互作用规律,优化现有施工方法,制定经济合理的初期支护参数及支护时机,为剩余洞段的施工设计提供依据;

第二,对于松散碎裂结构围岩,研究较高地应力作用下围岩—支护结构相互作用规律,研究地下水对软弱结构面乃至岩体弱化的作用机制,制定经济合理的初期支护参数、行之有效的诸如注浆等辅助工法,以及仰拱跟进、二次衬砌施做的时机;

第三,对于块状结构的黑云斜长片麻岩围岩,由于天然状态下强度低,富含黏土矿物,较高地应力下可发生塑性挤压大变形,可通过试验制定合适的掘进循环进尺及经济合理的初期支护参数。

参 考 文 献

- [1] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

- Gu Dezhen. Basis of Rock Mass Engineering Geomechanics. Beijing: Science Press, 1979.
- [2] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
Sun Guangzhong. Rock Mass Structural Mechanics. Beijing: Science Press, 1988.
- [3] 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部. 工程岩体质量分级(GB50218-94)[S], 1994.
States Bureau of Technical Supervision, Ministry of Construction of P. R. C. Standard for Engineering Classification for Rock Masses (GB50218-94), 1994.
- [4] 杜时贵. 岩体结构面抗剪强度经验估算[M]. 北京: 地震出版社, 2005.
Du Shigui. Empirical Estimation on Shear Strength of Rockmass Structural Plane. Beijing: Seismological Press, 2005.
- [5] 袁宝远, 杨志法, 肖树芳. 岩体结构要素分析几何研究[J]. 工程地质学报, 1998, 6(4): 355~361.
Yuan Baoyuan, Yang Zhifa, Xiao Shufang. Study on fractal geometry of essential elements of rock mass structure. Journal of Engineering Geology. 1998, 6(4): 355~361.
- [6] 卢波, 陈剑平, 葛修润, 王水林. 节理岩体结构的分形几何研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (3): 461~467.
Lu Bo, Chen Jianping, Ge Runxiu, Wang Shuilin. Fractal geometry study on structure of jointed rock mass. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, (3): 461~467.
- [7] 柴贺军, 黄地龙, 黄润秋. 岩体结构三维可视化模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 55~59.
Chai Hejun, Huang Dilong, Huang Runqiu, Liu Haowu. New progress in the study of rock structure 3-D visualization model. Advance in Earth Sciences. 2001, 16(1): 55~59.
- [8] 钟登华, 李明超, 杨建敏. 复杂工程岩体结构三维可视化构造研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 575~580.
Zhong Denghua, Li Mingchao, Yang Jianmin. 3D visual construction of complex engineering rock mass structure and its application. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 575~580.
- [9] Hoek E. and Marinos P. Tunnelling in overstressed rock. Preprint of a Keynote address to be presented at EUROCK2009 in Dubrovnik, Croatia in October 2009. (<http://www.eurock2009.hr/>).
- [10] Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D. and Cording, E. J. 1967. Design of surface and near surface construction in rock. In Failure and breakage of rock, proc. 8th U. S. symp. rock mech., (ed. C. Fairhurst), 237~302. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.
- [11] Wickham, G. E., Tiedemann, H. R. and Skinner, E. H. 1972. Support determination based on geologic predictions. In Proc. North American rapid excav. tunneling conf., Chicago, (eds K. S. Lane and L. A. Garfield), 43~64. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.
- [12] Barton, N. R., Lien, R. and Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech. 6(4), 189~236.
- [13] Bieniawski Z. T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for Rock Engineering, Proc. of the Symp., (ed. Z. T. Bieniawski) 1, 97~106. Cape Town, Balke-ma.
- [14] Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses, ISRM News Journal, 2(2), 4~16.
- [15] 李志业, 曾艳华. 地下结构设计原理与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
Li Zhiye, Zeng Yanhua. Design Principle and Method of Underground Structure. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003.
- [16] 河北省地质局. 《1:20万张家口幅地质图及地质图说明书》. Geological Bureau of Hebei Province. Geological map and its specifications (Scale 1:200000) of Zhangjiakou Serial.
- [17] 李江海, 翟明国, 钱祥麟, 郭敬辉, 王关玉, 阎月华, 李永刚. 华北中北部晚太古代高压麻粒岩的地质产状及其出露的区域构造背景[J]. 岩石学报, 1998, 14(2): 176~189.
Li Jianghai, Zhai Mingguo, Qian Xiangling, Guo Jinghui, Wang Guanyu, Yan Yuehua, Li Yonggang. The geological occurrence, regional tectonic setting and exhumation of Late Archean high-pressure granulite within the high-grade metamorphic terrains, north to central portion of North China craton. Acta Petrologica Sinica. 1998, 14(2): 176~189.
- [18] 谢富仁, 崔效锋, 张景发. 中国大陆地壳应力环境研究[M]. 北京: 地质出版社. 2003.
Xie Furen, Cui Xiaofeng, Zhang Jingfa. Study on the crustal stress environment of Chinese main land. Beijing: Geological Press, 2003.
- [19] 宋治平, 薛艳. 华北中强地震前兆特征研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社. 2009.
Song Zhiping, Xue Yan. Study on the Characteristics of Middle and Strong Earthquake Precursors in North China. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2009.