

*Jiubao Tuidao Fushui Duancengdai
Anquan Shigong Jishu*

旧堡隧道富水断层带 安全施工技术

和万春 雷 军 著
韩现民 李五红

旧堡隧道



人民交通出版社
China Communications Press

Jiubao Suidao Fushui Duancengdai

Anquan Shigong Jishu

旧堡隧道富水断层带 安全施工技术

和万春 雷 军 韩现民 李五红 著



人民交通出版社

内 容 提 要

本书理论与实践相结合,从理论分析、数值试验、室内试验和现场试验等方面系统论述旧堡隧道富水断层特点和施工技术。书中介绍了旧堡隧道构造交汇区断层特征和施工难点,提出了隧道施工围岩级别的综合评定方法,阐述了构造交汇区破碎围岩变形特征,揭示了构造交汇区富水破碎围岩涌突水灾害机理,详细论述了富水破碎围岩灾害控制技术和突泥、涌水后塌穴处理技术。

本书可供从事隧道设计、施工的技术人员参考,亦适合相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

旧堡隧道富水断层带安全技术/和万春等著
—北京:人民交通出版社,2012.9
ISBN 978-7-114-09990-8

I. ①旧… II. ①和… III. ①富水性—断裂带—铁路
隧道—隧道施工—安全技术 IV. ①U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 180195 号

书 名: 旧堡隧道富水断层带安全技术

著 作 者: 和万春 雷 军 韩现民 李五红

责任编辑: 付宇斌

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969,59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 8

字 数: 130 千

版 次: 2012 年 9 月 第 1 版

印 次: 2012 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09990-8

定 价: 50.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

张集铁路旧堡隧道位于河北省张家口市万全县境内,隧道全长 9 585m,为单洞双线。旧堡隧道地处区域性构造交汇部位,在多期构造运动和岩浆侵入的作用下,其断裂构造极为发育,隧道穿越 1 条大断裂和 12 条较大断裂,围岩十分破碎;隧道地下水发育,承压水水压高,施工涌水量大,是张集铁路地质条件最复杂、施工风险最高的隧道,在国内隧道建设领域备受关注。

由于前期对隧道穿越区域变质岩特性认识不足,施工中围岩出现了严重大变形,最大下沉量达到 525mm,最大水平位移 642mm,钢架扭曲、混凝土开裂、支护侵限;伴随围岩较大变形,产生围岩渗水和涌水,导致掌子面坍塌和已支护段垮塌;施工十分困难,施工安全问题突出。

为应对不良地质和施工的高风险性,我们结合工程建设开展了构造交汇区富水破碎围岩隧道施工灾害控制技术研究,攻克了多项技术难题。项目研究中的主要技术成果有:

(1) 针对旧堡隧道围岩特点,采用岩石膨胀性测试、X 射线衍射测试、岩石水理性试验、岩石室内力学试验、岩体完整性系数和结构特征测试、岩体力学参数反演等手段,得到了隧道构造交汇区围岩的矿物组成、岩体结构特征以及强度和变形指标。

(2) 通过掌子面地质素描、TSP 物理探测和超前钻孔探测等综合手段,应用 Q 法、RMR 法、BQ 法和现行铁路设计规范等方法,对复杂地质条件下隧道施工阶段围岩级别进行了动态、快速、综合认定,提出了复杂地质条件下施工围岩级别综合评定方法。

(3) 通过流固耦合理论分析、围岩变形监测、松动圈声波测试、围岩压力和支护应力测试等手段,描述了构造交汇区破碎围岩在高地应力和地下水作用下的非均匀、持续时间长和灾变性大变形特征。

(4) 采用有效应力理论、剪切破坏理论揭示了含断层泥的构造挤压破碎带在施工扰动、高地应力和地下水软化作用下,导致水腔防突岩层破坏和施工涌水

的灾害发生机理。

(5) 无承压水时,采用径向小导管注浆加固地层并堵水;有承压水时,采用“探—泄—堵—排—堵”的施工技术及方法。

(6) 总结了突泥、涌水后塌穴处理技术。

本书是旧堡隧道工程建设和科学研究成果的总结,由和万春、雷军、韩现民、李五红撰写成文,朱永全审稿,参加撰写的还有唐国荣、赵西民、孙福军、张民庆、田四明、赵香萍、梅志荣、马士伟、田晓峰、乔志斌、高占英等。

由于时间仓促、作者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请有关专家和读者给予批评指正。

作 者

二〇一二年七月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 构造交汇区一般性地质特征及灾害类型	1
1.2 旧堡隧道工程概况	2
1.3 旧堡隧道工程地质和水文地质特征	3
1.4 旧堡隧道施工中的技术问题	14
第 2 章 旧堡隧道围岩物理力学性质及宏观应力场特征	17
2.1 岩石力学性能室内试验	17
2.2 岩体结构特征现场测试	22
2.3 地下水特征	29
2.4 区域地应力场及围岩力学参数	29
第 3 章 隧道施工阶段围岩级别的综合评定及动态设计	35
3.1 隧道围岩分级方法综述	35
3.2 施工过程中隧道围岩级别综合修定	36
第 4 章 构造交汇区破碎围岩变形特征	44
4.1 前期隧道施工中主要问题	44
4.2 基于三维流固耦合数值分析的隧道变形特征研究	47
4.3 围岩松动圈测试	56
4.4 隧道围岩变形特征现场测试	57
4.5 隧道裂隙水对围岩变形的影响分析	62
4.6 隧道支护结构受力特征现场试验	63
4.7 构造交汇区破碎围岩大变形机理研究	68
第 5 章 构造交汇区富水破碎围岩涌突水灾害机理研究	73
5.1 隧道突水发生的特点	73
5.2 地下水对破碎围岩防突岩层裂隙强度的影响分析	75

5.3 富水破碎围岩防突岩层断裂破坏突水机理·····	83
第6章 构造交汇区富水破碎围岩灾害及支护措施 ·····	91
6.1 旧堡隧道围岩特征·····	91
6.2 施工过程风险管理技术·····	91
6.3 无水压富水段隧道支护参数、支护措施及施工方法 ·····	94
6.4 承压水段隧道支护参数、支护措施及施工方法 ·····	96
第7章 构造涌突水带“探—泄—堵—排—堵”施工技术 ·····	99
7.1 构造涌突水带前期施工难题·····	99
7.2 构造涌突水带“探—泄—堵—排—堵”施工技术原理 ·····	103
7.3 超前探水和排水降压 ·····	104
7.4 超前注浆加固 ·····	107
7.5 超前支护 ·····	113
7.6 径向钻孔排水 ·····	114
7.7 径向注浆再加固、堵水·····	114
7.8 双层支护 ·····	114
第8章 突泥、涌水后塌穴处理技术 ·····	115
8.1 突泥、涌水塌穴形成过程·····	115
8.2 突泥、涌水原因·····	116
8.3 塌穴处理技术方法 ·····	116
8.4 塌穴处理施工工艺 ·····	117
8.5 邻近塌穴段施工技术 ·····	119
参考文献 ·····	120



第1章 绪论

1.1 构造交汇区一般性地质特征及灾害类型

地质构造交汇区地层由于受多期地质构造运动的交切、穿插和叠加作用,其地质构造极其复杂且构造形态多变,断裂、褶皱发育,岩体遭受强烈的挤压作用,节理、裂隙发育,岩体破碎;由于受多次构造应力场的叠加影响,区域构造应力场特征较复杂;在雨量丰沛区域,水文地质条件复杂,构造裂隙水发育,地层富水性较强。

因此,构造交汇区关键地质问题多,综合评价难度大,不良地质发育、地质勘探的难度和成本增加。在构造交汇区修建地下工程易诱发大变形、塌方和突涌水等施工地质灾害。

隧道穿越断层破碎带时常会诱发围岩大变形地质灾害。台湾的木栅隧道在通过潭湾大断层时,发生了大变形,拱顶下沉 1 500mm 以上,边墙内挤 700mm^[1];乌鞘岭隧道在通过 F7 断层时,左线隧道最大拱顶下沉 1 053mm,一般在 500~600mm 之间,且呈现出变形时间长(一般在 300d)的特点^[2];国道 212 线(兰州—重庆)木寨岭隧道在通过断层带时,最大累计下沉量达 1 712mm,最大水平位移达 1 081mm^[3]。

隧道穿越断层破碎围岩时,塌方事故也屡见不鲜。福建漳龙高速公路乌石山隧道在施工至 F11 断裂带时,发生塌方,坍塌体高达 12m,体积约 200m³^[4];诸永高速公路乌竹岭隧道右洞受断层破碎带 F8 影响,施工时发生了特大塌方事故^[5];大竹水电站引水隧洞在穿越宽 23m 的断层破碎带时发生塌方,在地表形成一处长 4.5m、宽 3.0m、深 5.0m 的塌陷坑^[6];龙江水电站导流洞在穿越断层带(51m)时发生了冒顶塌方事故^[7]。

宜万线齐岳山隧道在修建过程中穿越暗河、溶洞、断层破碎带,隧道突涌水

地质灾害频繁发生,成为影响隧道施工和安全的主要障碍。例如隧道施工至 PDK365+335 时,掌子面多处发生股状涌水,总涌水量达到 $150 \sim 400 \text{ m}^3/\text{h}$ ^[8]。厦门翔安海底隧道 F1 风化槽位置最大水压力为 $0.3 \sim 0.5 \text{ MPa}$,钻探表明,单孔最大涌水量为 50 m^3 ,开挖时极易发生涌水、突泥现象,施工风险极高^[9]。

总之,在构造交汇区修建隧道过程中,几种地质灾害可能单独或相伴发生,轻则影响施工进度,重则造成人员伤亡的重大事故,必须要引起施工单位重视,依据“预防为主、及时处置”的原则进行安全施工。

1.2 旧堡隧道工程概况

新建张家口至集宁铁路是我国铁路网“八纵八横”中京兰大通道的重要组成部分,线路东端始自河北省张家口南站,经万全县、尚义县进入内蒙古自治区兴和县、察哈尔右翼前旗,并行既有京包线,引入集宁南站结束,全长 178.08km。线路原设计为 I 级铁路、单线、预留双线,2006 年 9 月变更为一次建成复线,旅客列车设计行车速度目标值为 160 km/h ,预留 200 km/h 条件。旧堡隧道是全线最长的隧道,也是重点控制工程,位于河北省万全县旧堡乡与尚义县土夭沟村之间,起讫里程 DK25+270~DK34+855,全长 9 585m,埋深大于 270m 的洞段占隧道全长的 51% (最大埋深达 493m),单洞双线,断面面积为 138 m^2 。单线旧堡隧道于 2006 年 5 月开工,9 月 10 日因改一次复线停工,10 月 10 日恢复施工。在距进口 2 652m 处设 1 号斜井,长度 999.2m。2007 年 10 月,为缓解工期压力,在距出口 4 083m 处增设 2 号斜井,长度 1 728m。旧堡隧道平面位置见图 1-1,隧道斜井平面布置见图 1-2。



图 1-1 旧堡隧道平面位置图

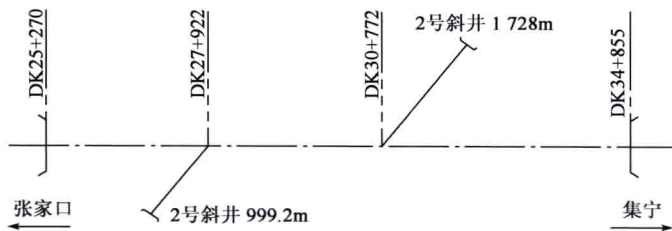


图 1-2 隧道斜井平面布置图

1.3 旧堡隧道工程地质和水文地质特征

1.3.1 自然地理概况

旧堡隧道地处洋河断陷盆地西缘之冀北低中山区。区内山体基岩裸露,植被稀疏,仅个别沟谷中有人工林发育。隧道范围内地势总体西北高、东南低,隧道顶部山势雄伟,地形崎岖复杂,沟谷切割强烈。隧道所经山地海拔高程一般在 900 ~ 1 500m 之间,最高点(里程为 DK30 + 416)位于外长城附近的东洋河与洗马林河分水岭上,海拔高程 1 458m,最大高差大于 500m,见图 1-3 和图 1-4。



图 1-3 旧堡隧道地形地貌图

隧道所在张家口地区为东亚中温带亚干旱大陆性季风气候区,终年干旱少雨,降水量多集中在 7、8 月份,蒸发量远远大于降水量。

隧道附近河流主要有洗马林河、东洋河,主要流向为自北向南,均汇入洋河。进口端为洗马林河,出口端为东洋河,沿线河流均属海河流域洋河水系。



图 1-4 旧堡隧道 DK30+280~DK30+416 段地形地貌(镜像 S)

1.3.2 地层岩性

旧堡隧道穿越地层进口附近为第四系上更新统坡洪积(Q_3^{dl+pl})新黄土夹砂砾石,山涧沟谷底部多有第四系全新统冲洪积层(Q_3^{dl+pl})堆积,洞身范围主要为太古界马市口组(Arm)麻粒岩(或称二辉斜长片麻岩)和黑云母斜长片麻岩。图 1-5 为旧堡隧道工程区区域地质图。

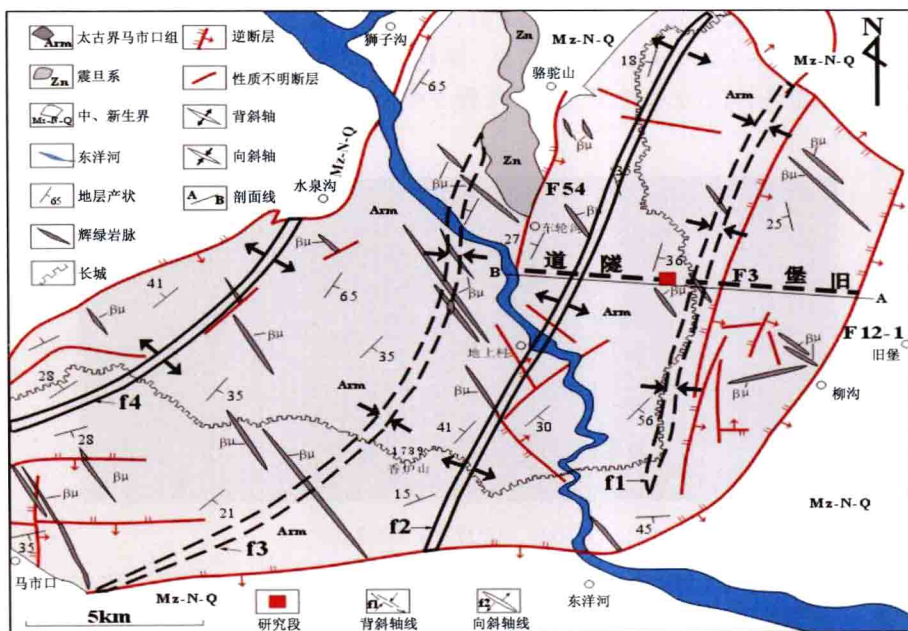


图 1-5 旧堡隧道工程区区域地质图(改自《1:20 万张家口幅地质图》)

注:f1-席家窑向斜;f2-车轮沟背斜;f3-双落沟向斜;f4-城窑沟背斜;F12-1-怀安盆地西北缘断裂;F3-腊醋坪—小赐沟断层;F54-红庄科断层

(1) 第四系上更新统坡洪积层(Q_3^{dl+pl})

第四系上更新统坡洪积层主要分布于隧道进口端的洋河断陷盆地西缘山麓,上部以黄褐色新黄土为主,山麓边缘含少量砂砾石,底部夹数层层状或透镜状砂或角砾土,钻探揭露本组厚度大于36m,各岩性分述如下。

新黄土:黄褐色~褐色,硬塑~坚硬,含少量碎石、砾石及砂,具垂直节理,可见大孔隙,表层及上部地层具湿陷性 $\delta_s=0.027\sim0.111$,为Ⅱ级(中等)自重湿陷性场地。仅分布于隧道进口附近。

砾砂:黄褐色,密实,稍湿~潮湿,含大量碎石、砾石及黏性土,碎石及砾石成分以麻粒岩、石英岩为主,因其黏粒含量较高,具有较好的直立性。仅分布于隧道进口附近。

细角砾土:黄褐色,密实,稍湿~潮湿,砾石直径5~15mm,钻探揭露最大粒径80mm,根据区域资料及野外调查可知粒径最大可达0.5m,砾石成分以麻粒岩、石英岩为主。

(2) 太古界马市口组(Arm)

太古界马市口组(Arm)为一套深变质、浅色麻粒岩相变质岩,具花岗变晶结构,弱片麻状构造。该套变质岩系属正片麻岩,即由中酸性浅层岩变质而成。以紫苏斜长麻粒岩、二辉斜长麻粒岩为主,夹深色二辉斜长麻粒岩、角闪二辉斜长麻粒岩(因工程性质基本相同,将上述暗色麻粒岩系统一简称为麻粒岩),顶部夹二辉磁铁石英岩透镜体(统一简称为磁铁石英岩)。本组麻粒岩遭受轻微混合岩化作用,局部可见条带状混合岩,由于变质分异作用,形成许多辉石较集中的条痕条带。各岩性分述如下。

麻粒岩:灰褐色、浅灰色~青灰色,等粒镶嵌及花岗变晶镶嵌结构,均粒状、块状构造。浅色矿物以石英、长石为主,暗色矿物以角闪石、辉石为主。地表风化强烈,全风化~强风化,一般厚度5~20m,呈碎石角砾及砂砾状,随埋深的增加,渐变为弱风化~微风化,岩质坚硬,节理裂隙不甚发育,呈块状或大块状,单轴饱和抗压强度多大于60MPa,为极硬岩,广泛分布于隧道的洞身,特别是小里程端分布更广。

磁铁石英岩:浅灰色~青灰色,等粒镶嵌及花岗变晶镶嵌结构,均粒状、块状构造。浅色矿物以石英为主,暗色矿物以角闪石辉石为主,局部磁铁矿含量较高。地表弱风化,呈碎石、块石状,随埋深的增加,渐变为微风化,岩质坚硬,节理裂隙不甚发育,呈块状或大块状,单轴饱和抗压强度多大于60MPa,为极硬岩。磁铁石英岩于进、出口附近呈透镜状分布。

根据中科院地质所翟明国等(1996),北京大学李江海等(1998)对涵盖旧堡

隧道工程区的冀西北—晋北高角闪岩相—麻粒岩相变质岩区(即灰色片麻岩—花岗质片麻岩杂岩区)的研究,旧堡隧道工程区地层是来自下地壳的麻粒岩,工程区岩层均经受了 NE 向强烈的韧性剪切。图 1-5 中所标示的产状实际为韧性剪切作用所形成的似层状结构面,因为由中酸性浅层岩变质而成的麻粒岩本质是不存在层理的。

(3) 太古界下白窑组(Arx)

太古界下白窑组(Arx)为岩性中深变质的含砂线石榴二长浅粒岩、石榴二长浅粒岩、砂线石榴钾长浅粒岩(因工程性质基本相同,将上述浅粒岩系统一简称为浅粒岩),局部夹含黑云母石榴变粒岩及富石榴石变斑晶的石墨透镜体(地表调查未见)。本组浅粒岩混合岩化作用轻微,局部有长英质脉体及伟晶岩脉注入,未形成混合岩。浅粒岩岩性详述如下。

粒岩:黄褐色、灰褐色及浅灰色,不等粒~等粒花岗变晶、纤状不等粒花岗变晶结构,粒状、条带状及串珠状、块状构造。以浅色矿物石英、长石为主,暗色矿物角闪石、辉石含量较少。地表风化强烈,全风化~强风化,一般厚度 10~20m,多呈砂砾状,随埋深的增加,渐变为弱风化~微风化,岩质坚硬,节理裂隙不甚发育,呈块状或大块状,单轴饱和抗压强度多大于 60MPa,为极硬岩。多分布于出口端 DK33+850 以后。

(4) 侵入岩

隧道范围内出露的侵入岩以元古~太古代旋回的基性辉绿岩脉及酸性花岗伟晶岩脉为主,走向主要为北西向,形成多期岩脉相互穿插切割,岩脉厚度 0.1m 至数米不等,产状多近于直立。隧道进口端分布较为集中,其余地段呈岩脉方式侵入于变质岩中。

1.3.3 区域及工程区地质构造

旧堡隧道位于内蒙地轴与燕山准地槽的过渡带,构造单元上属骆驼山隆起带,基底为前震旦纪结晶岩类,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 3 期较明显的构造运动,即前震旦纪、中生代和新构造运动,中生代构造比较发育。构造形迹以断裂为主,褶皱较微弱,岩浆活动较强烈,多期构造运动的叠加造成地质构造极其复杂。

1) 褶皱构造

研究区区域褶皱构造主要有以下内容。

(1) 前震旦纪 NE 褶皱:为一系列平行线形褶皱,包括里沟沿背斜、宣付窑向斜、城窑沟背斜和双落沟向斜。其中,双落沟向斜走向为 NE50°,枢纽波状弯曲,

宽缓,长约 18km,向北倾伏于侏罗系地层之下或被近 EW 向断层切断。

(2) 中生代侏罗纪末期 EW 向褶皱:EW 向善马群向斜和宣付窑—白家窑向斜,均为开阔平缓的倾伏向斜。

(3) 中生代白垩纪 NW 向褶皱:分布在洗马林北白垩系土井子组砂砾岩中,包括西洞背斜和半打沟向斜,走向 NW50°,两翼地层倾角 10°~20°,说明当时主要受到 NE 向区域构造应力场的作用。

旧堡隧道工程区主要发育中生代侏罗纪末期 NE 向褶皱:旧堡隧道工程区位于双落沟向斜的后期改造褶皱构造中,推测其为受 F3 等 NE 向逆冲推覆断层作用而形成的牵引褶皱。其中,隧道西段(长城以西)位于车轮沟背斜,东段(长城以东)位于位于席家窑向斜(图 1-5),研究段则位于席家窑向斜的西翼。

2) 断裂构造

根据研究区区域褶皱构造形成时代及其构造形迹走向,将区域褶皱进行以下划分。

(1) 前震旦纪断裂:研究区变质岩区广泛分布着一组 NW 向或 NNW 向辉绿岩脉。岩脉长一般 5~7km,产状直立,多被中生代 EW 向断裂所切断,代表前震旦纪张性断裂被岩脉后期充填。

(2) 中生代 NE 向断裂:主要包括本工程区内发育的 F12-1(旧堡隧道进口,沿用原工程勘察代号,下同)、F3(旧堡隧道中部偏小里程)和 F54(旧堡隧道出口)等 3 条近平行压扭性逆断层(图 1-5),走向 20°~25°,倾向 SE,倾角较陡,根据断层擦痕判断南东盘为上升盘,且向 NNE 方向扭动。由于其被 NW 向侏罗系地层内发育的断层错断,故判断为前侏罗纪断层。此外,在这 3 条主干断裂之间,也发育着一些规模较小的次级断裂,如 F2、F2-1、F2-2、F4、F6、F8、F9、F11、F12 及 F13 断层。其中,主要控制性断裂的特征如下。

① 腊醋坪—小赐沟断层(F3)

F3 中生代逆冲推覆断层,走向北北东 10°~25°,倾向 100°~115°,倾角 35°~75°[图 1-6a)]。该断裂带北起腊醋坪,向南西经席家窑,至小赐沟,长约 12km,破碎带宽 305m。隧道于 DK28+380~DK29+630 处穿过该断裂破碎带及其影响带。

据《工程地质勘察报告》EH-4 电磁测深二维反演剖面,F3 表现为倾向东的带状低阻异常。钻探表明,断层带内 ZD-240(DK29+413.4 右 5m)钻孔取出断层带岩芯为灰白色土柱状断层角砾[图 1-6b)],垂向厚度达 227.8m。断层下盘过渡带厚度达 44.2m,岩芯多呈碎块状,岩石完整性系数(RQD 值)几乎为 0[图 1-6c)];断层影响带厚度大于 48m,岩芯多呈短柱夹碎块状[图 1-6d)]。

由于多期构造运动叠加,断裂构造兼具压扭性推覆构造特征及张扭性断裂特征。早期该断裂是北北东向断裂构造组合中的一条,为压扭性推覆逆断层,断层带中可见高岭土化、褐铁矿化变质现象;后期发生脆性张扭性断裂,表现为顺断层带方向发育花岗伟晶岩脉[图 1-6a)],顺应力面片理、劈理发育,断层带附近岩体节理、裂隙发育,断层角砾多呈棱角状。

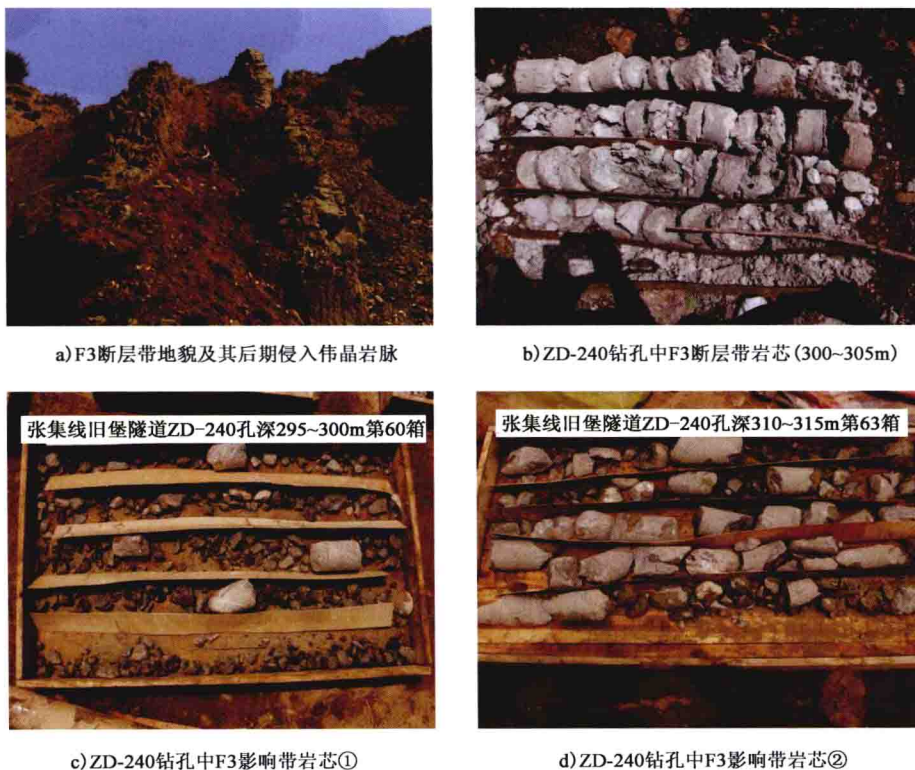


图 1-6 F3 断层带及断层带内 ZD-240 钻孔中的岩芯

②红庄科逆断层(F54)

F54 中生代逆冲推覆构造带,位于隧道出口附近,走向北东 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$,倾向南东,倾角 $35^{\circ} \sim 75^{\circ}$,长约 6km。南东盘马市口组变质岩向北西逆冲于侏罗系地层之上,断层附近岩石破碎及片理化明显,属压扭性逆断层。从地质图上判断,该断层被 NEE 向断层错段,SW 端可能倾伏在洋河新生代盆地之下。

③F12-1 断层

F12-1 断层位于旧堡隧道进口附近,为另外一条 NE 向中生代逆冲推覆断

层,是老变质岩山地与新生代万全盆地的边界断裂层。根据野外调查,该断层附近岩层产状不连续,岩石破碎;地貌上东侧较平缓,西侧突然变陡,河沟在该处突然转弯,大里程端岩石较破碎,产状较乱,小里程端岩石层位较稳定,产状基本一致。断层大致产状为 $93^{\circ}\angle 51^{\circ}$,破碎带不宽,为逆断层,位于地表 DK25+880 附近,物探大地电磁剖面显示为低阻。

需要特别指出的是,上述 F3、F54、F12-1 及水泉沟断层(图 1-5),均为中生代 NE 向逆冲推覆断层,向 NW 方向逆冲,这 4 个逆断层可能共同组成一个逆冲推覆构造带,在地壳深部可能是同一条断层,构造地质学中称一系列倾向相同的近等距排列的逆冲断层为“后展式叠瓦状构造”,介于这 3 个逆断层之间的部分,构造上称之为“构造岩片”(图 1-7)。它们是旧堡隧道工程区的控制性断裂,是非常重要的二级地质结构面。

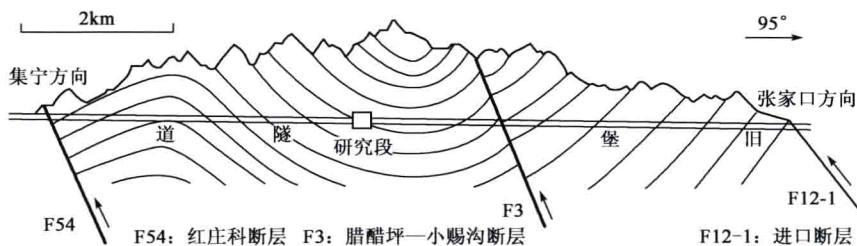


图 1-7 地质构造剖面解译图

在更大地质尺度上,在旧堡隧道洞线范围内,还有其他 10 多个可以识别的小型断层(如 F2、F2-1、F2-2、F4、F5、F8、F9、F11、F12 及 F13 断层等),均表现为逆断层性质,且走向与上述 3 个主干断裂相近。这些次级逆断层可能在深部与主干断裂复合,进一步把 3 个主干断裂之间的“岩片”分隔成规模更小的次级“岩片”(图 1-8)。此外,受 NE 向逆冲断裂系的影响,工程区内 NE 向构造节理发育,节理充填泥质夹层,且节理面上有擦痕和镜面。

3) 新构造

研究区位于 NW 向张家口—蓬莱活动断裂带和地震构造带与 NE 向山西断陷带的交叉部位,新构造活动比较强烈。1998 年 1 月 10 日发生了张北 Ms6.2 级强烈地震,距离工程区仅 70km。研究区主要活动断裂见图 1-9。

(1) NEE-NE 向怀安盆地西北缘断裂(F101)

该断裂位于怀安—宣化盆地的西北边缘,总体走向 NEE-NE-NNE,倾向 SE,倾角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$,全长 43 km,具正断层性质。其中 NNE 段现今最为活动,长约

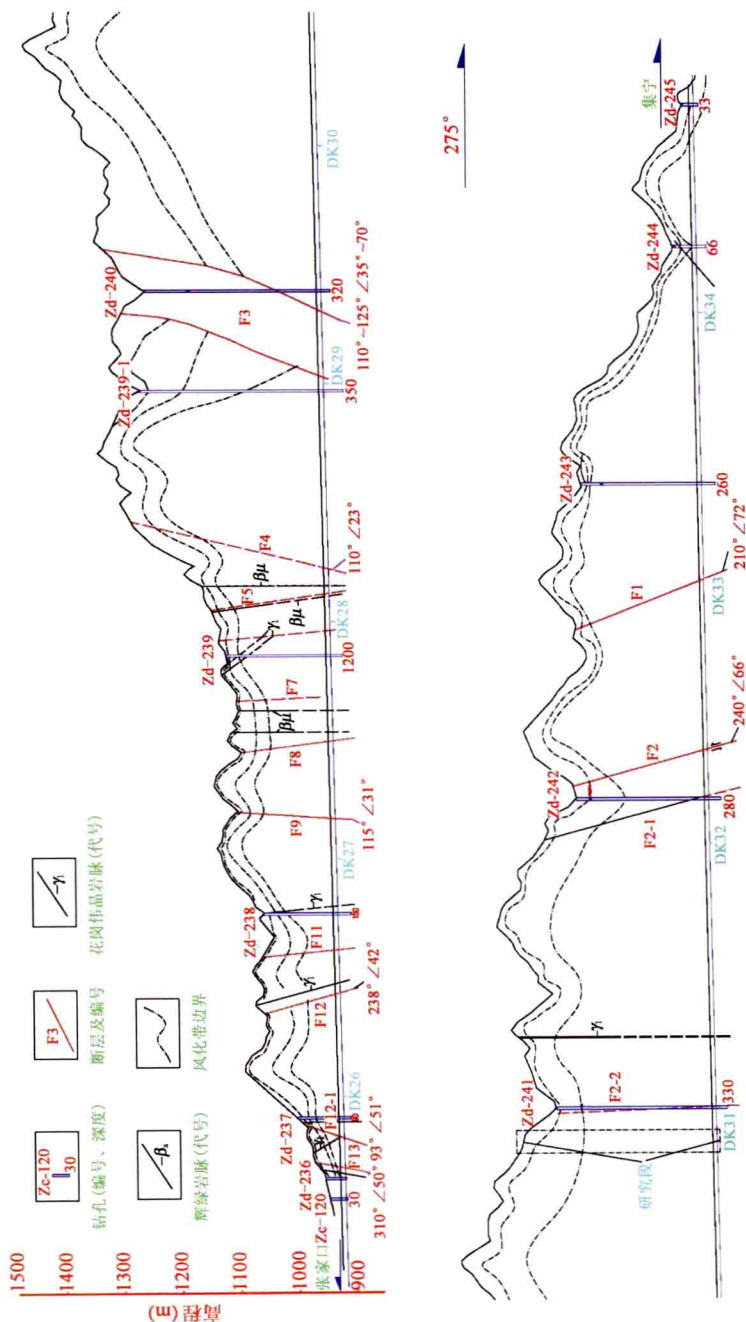


图1-8 隧道沿线断裂、钻孔、岩脉、风化带分布剖面简图