文章编号： 中图分类号： 文献标识码：

**甘孜-玉树深大活动断裂对海子山隧道**

**围岩改造作用分析探讨**

胡国斌,廖琪斌

（1.四川省交通运输厅交通勘察设计研究院，成都，610017；）

**摘要：**海子山隧道是四川省甘孜州省道217线石渠至马尼干戈段公路改建工程中全线关键控制性工程，隧道南端的甘孜—玉树全新世区域性深大活动断裂及其次级断裂控制了隧址区海子山地形地貌、地质构造、地下水系及不良地质等，对全隧的围岩改造作用十分显著。本文基于甘孜—玉树断裂的活动性及隧道在施工中各种病害现象，在分析断裂对全隧围岩岩性、节理裂隙发育特征、地下水发育特征及围岩应力状态等因素影响的基础上，探讨了该活动断裂对隧道围岩的改造作用。从工程地质角度，探讨隧道在施工中发生较多塌方、大段落支护变形、突泥灾害、围岩级别大幅调整等现象的地质原因。为项目合理定位和修正围岩分级，完善隧道结构设计，确定有效施工方案，评判隧道施工风险，控制工程投资，指导运营提供借鉴和参考。

关键词：海子山隧道；活动断裂；围岩；改造作用

**1概述**

随着国家西部大开发战略的持续落实，为从根本上改善川西高原偏远地区公路交通落后的现状，大幅提高当地现有等级公路通行能力，彻底改观行车条件，国家投入资金对该地区的等级公路越岭路段进行隧道化改扩建。川西高原地处横断山脉，因该区域持续向青藏高原爬升,海拔高度越来越高，区域地质条件愈加复杂，地区愈加偏远。这些区域的隧道是典型的“三高”隧道，具有高寒、高烈度、高应力隧道修筑特征，建设过程也愈加困难。甘孜州S217线海子山隧道属于高海拔长隧道，建设过程耗时费力。隧道南口发育有甘孜—玉树深大活动断裂，隧道位于主断裂带的强烈影响区内，使得该隧道具有高寒高海拔、软岩大变形隧道特征，建设过程困难重重。一度被评估为川西地区围岩最差、施工最困难的三高地区公路隧道。施工期间，隧道塌方、软岩大变形、突泥等特殊工程地质问题较为突出。笔者结合参与的西高原软岩隧道的勘察设计及建设管理的工作经验，以海子山隧道为研究对象，以该隧道工程地质条件为出发点，进一步分析探讨了隧道口发育的甘孜—玉树深大活动断裂对隧道围岩的改造作用。

受路线走廊带唯一性影响，同时为了实现高寒高海拔地区公路的全天候通行能力，S217线在海子山越岭路段选择以隧道形式穿越。海子山隧道全长2522m，是S217线改建工程中的关键性控制工程。隧道采用二级公路技术标准，设计速度为40公里/小时，建筑限界10 米×5米，隧道最大埋深213米，隧道北口海拔高程4361米，南端南口海拔高程4371米，隧址区地震烈度为Ⅷ度。隧道按新奥法施工原理进行洞身结构设计，隧道二衬为C30砼，喷射砼采用C25砼。该隧道是典型的高寒、高海拔、高应力、软弱围岩长隧道。

在隧道南口通过的甘孜—玉树深大断裂为全新世活动断裂，隧道轴线走向与断裂带呈小角度共向展布，断裂历经了多期构造活动，沿断裂带历史上发生过多次中强地震，对区内地形地貌、水系及地质构造起控制作用。本文通过分析断裂影响下围岩岩性特征、围岩结构裂隙发育特征、地下水发育特征及围岩应力状态等，总结了断裂对围岩的改造作用，探讨了隧道在施工中发生较多塌方、大段落支护变形、突泥灾害等不良工程地质问题的地质原因。并在施工期动态调整了隧道围岩等级，便于指导隧道设计和施工，为类似项目的建设提供借鉴和参考。

**2区域工程地质环境特征**

**2.1自然地理特征**

隧址区为构造剥蚀中高山地貌，最高点为海子山，海拔4634米，呈东-西向梁状展布，为两侧沟道发源山脊，以山脊线为界，北坡至坡底平均坡度9°-10°，南坡至坡底平均坡度7°-8°。山脊延伸方向甘孜—玉树深大断裂构造线大角度斜交，海子山隧道自近N-S方向穿越海子山，隧道轴线走向与断裂带迹线呈小角度共向展布。区内最低点为隧道南端出口外侧的丹日沟，海拔4283m，相对高差351m，切割剧烈。

**2.2项目所处的区域地质构造格架及总体特征**

隧址区总体位于青藏高原的东南部，在大地构造上位于青、藏、滇、缅、印、尼“歹”字型构造体系头部向中部转折端的东北缘，区内主要构造线走向多作北北西、北西向展布，且北东突出作弧形弯转，地质构造复杂。

隧址区发育甘孜-玉树断裂带。甘孜-玉树断裂带位于鲜水河-小江断裂系的西北段，它与该断裂系中的其他断裂( 如鲜水河断裂、安宁河断裂、则木河断裂、大凉山断裂和小江断裂) 一起构成了顺时针旋转的青藏高原南东地块的北边界[1]，是构成了巴颜喀拉地块和羌塘地块、川滇菱形地块的边界断裂[2]。断裂起自四川甘孜,向北西经过青海玉树后继续向西北方向延伸，断裂总体走向 310° ～ 330°。东南端起于甘孜县南侧，由生康乡、错阿乡、马尼干戈乡，翻越海子山（隧址区），经竹庆、俄支、邓柯、巴塘盆地、玉树等地，向西与风火山断裂相连，总长近 500km[2]。该断裂带是在前第四纪基岩断裂带的基础上发展起来的一条全新世强烈活动的断裂，老的基岩断裂破碎带一般宽数十米至百余米，局部地段达数百米[1]。

|  |
| --- |
| 断裂区位图 |
| 图1 甘孜一玉树断裂及其近代地震破裂分段图  （闻学泽，2003）[3]  其中:①示羌塘地块,②示川滇地块 |
| 海子山隧道区域地质图 |
| 图2 海子山隧道区域地质图 |

**2.3地层岩性及特征**

隧址区地层以三叠纪砂岩、板岩沉积岩地层为主，出露基岩为三叠纪曲嘎寺组（T3q）的炭质板岩、变质砂岩等浅变质岩石，地表沉积第四系松散堆积层。隧道段主要分布的板岩岩石薄片鉴定显示，板岩岩石具变余砂状结构，原岩为泥质长石石英杂砂岩，受应力作用发生浅变质，部分矿物重结晶，岩石具定向分布特征，原岩细粒砂状结构尚能辨认，碎屑约占80%，填隙物约占20%，碎屑粒度多为0.06-0.25mm，少部分小于0.06mm或大于0.25mm，分选好，碎屑多呈次园-次棱角状，磨园中等。碎屑组成：石英：以单晶石英为主，部分为多晶石英及硅质岩屑，部分重结晶形成镶嵌粒状集合体，部分被压扁，拉长并沿长轴延伸方向定向分布，分布广泛，约占碎屑总量93%。长石：有斜长石和钾长石，分布不均，约占碎屑总量5%-6%。白云石：呈片状，多呈定向分布，分布不均，约占碎屑总量1%。偶见电气石和锆石。填隙物：主要为绢云母，为原岩中站务杂基重结晶形成，呈定向分布，分布不均，只有少部分白云石，多呈镶嵌粒状，分布不均，此外还有少量不透明矿物胶结物。支撑及胶结类型：杂基支搓、基底式胶结。

受强烈的区域动力地质构造影响，岩石中石英矿物颗粒被定向压扁、拉长，原岩杂基粘土矿物在区域构造应力作用下变质重结晶形成绢云母新生特征变质矿物，显示地层岩石具有浅变质特点。同时受多期断裂构造作用影响，隧址区地层岩体较破碎，构造复杂，岩体多具“碎裂岩化、糜棱岩化、片理化”特征，裂隙发育，完整性差，多破碎，多有薄层泥化物拌生。

|  |  |
| --- | --- |
| 地层岩性1 | 地层岩性2 |
| 图3 受构造影响强烈扭曲  的炭质板岩 | 图4 开挖扰动呈渣状  炭质板岩 |

**2.4水文地质特征**

地表水赋存分布特点。隧址区海拔4300m以上，一年之内积雪期长达5～6个月之久，冬期长低温期长，大气降水及融化冰雪是该区内地表水及地下水的主要来源。山体地层主要由板岩及变质砂岩组成，山体基岩零星出露。地表覆盖层多为冰碛层圆砾土和砾石土，普遍分布于隧址区地表，厚度变化较大。地面为高原草垫所覆盖，具备较好的地表水储藏下渗条件，是第四系松散堆积层孔隙水的主要来源。因场区海拔较高，常年温度较低，水可以固态形式长期保存于覆盖层孔隙内，孔隙中多可见冰晶，温度回暖时易融化。地表水易汇集于坡体凹槽、负地形部位，形成第四系覆盖层泉点集中汇入沟槽排放。地表水易汇集于局部坡地负地形，形成草垫沼泽洼地，据水量大小或渗流溢出。

地下水分布及地层的富水特点。隧址区地层、构造较复杂，局部地段岩层较陡，节理裂隙密集发育，加之山体内次级断裂发育，存在构造垂直向控水的地质条件，即浅表部位受断裂带本身结构的不均匀性，局部岩体风化程度较高，片理、层理形成密集发育段，富水性也就不均匀,存在断裂富水性的分段特性，且含水层易在垂向上接受地表水体的就近补给。在地表溪沟流经地段，地形控水显著，溪沟负地形其下基岩含水层受风化裂隙影响，裂隙连通性相对较好，富水性相对较好，相对应的隧道穿越地表溪沟流经地段的围岩区富水性相对较好，对地层的软化特性也较明显。

**3 甘孜-玉树深大活动断裂特征**

**3.1活动性特征**

甘孜－玉树断裂是一条全新世强烈活动的左旋走滑断裂带。总体倾向NE,倾角在60°～ 80°之间,是一条高角度走滑逆冲断裂。大致以错阿和俄支为界,根据断裂带几何组合、结构特征及活动性的差异,可分为北西、中部和南东三个不同结构的段落。与隧址区密切相关的中段，断裂由错阿向西北进入马尼干戈盆地,经日阿、海子湖跨越海子山,经竹庆盆地进入俄支盆地,长约130km,形成一系列与断层活动相关的断陷盆地[4]。断裂主要表现为走滑兼逆冲性质，总体倾向 SW，断裂在该段分为较多分支段落，呈羽列、分叉等形态展布[2]。区调报告显示，断裂带宽0.5～1.0km左右，带内岩体极破碎，大多数具有粉末状、粒状特征，糜棱岩、断层泥发育，整体倾向NE，倾角60°～80°，是一条高角度走滑左旋逆冲断裂，沿主断裂两侧次级断裂发育，本项目海子山隧道隧址区则位于竹庆-海子湖段。



根据相关文献[1]资料研究，甘孜－玉树断裂在隧址区海子山一带估计断层平均左旋滑动最大速率可达（12.8±1.7）mm/a，最大垂直滑动速率可达（1.7±1.6）mm/a。

**4 断裂对隧道围岩的改造作用**

**4.1对岩性及其力学性质的影响**

隧址区出露基岩主要为三叠系曲嘎寺组（T3q）的变质砂岩、板岩。隧道穿越主要围岩为炭质板岩，岩体总体呈灰黑色。炭质板岩作为一种典型的软岩，其岩体构造呈薄层、薄片状扭曲状，层间胶结差、岩层整体强度低，开挖扰动易呈碎渣状，遇水扰动易软化、泥化，围岩的流变特性明显。

1. 炭质板岩具有断裂破碎带断层岩矿物成分特性。隧址区地层，受区域大断裂动力地质作用及隧道内数条次级断裂构造挤压影响，隧道地层围岩显得碎裂化、片理化，呈现碎、散体结构。同时受构造运动影响，岩石矿物在动力变质作用下，矿物成分和结构发生变化。据研究，断层岩具有分带性，黏土矿物含量在同震新断层泥中最高，从老断层泥、断层角砾岩到围岩，黏土矿物含量逐渐降低[5]。类比断层岩的成分特征，经对海子山隧道散碎炭质板岩取样测试，全岩X射线粉晶衍射分析报告显示，围岩矿物组成成分以石英（15%-22%）和黏土矿物（78%-85%）为主，粘土矿物伊利石、高岭石、绿泥石等粘土矿物整体含量占比大，其岩性矿物特征更加接近断层泥、断层角砾岩等破碎带围岩矿物成分特征[5]。

2、炭质板岩围岩强度低，软化特性显著。岩石的软化性取决于岩石的矿物组成与孔隙性[6]。据岩石含矿物成分分析，因含有较多的亲水性粘土矿物，抗水软化能力差，且含大开孔隙较多,岩石的软化性较强,软化系数较小，岩石的软化性较强，岩石单轴饱和抗压强度小于1MPa。导致围岩开挖扰动后呈泥状,强度损失大,强度更低。由表2中数据可以看出,炭质板岩软化系数较小，具有较强的软化性能。同时其饱水系数较大，反映岩石中大开孔隙相对较多，而小开孔隙较少。因此隧道围岩岩石力学性质整体偏，施工抗扰动能力弱，自稳能力弱，工程地质性质差。







3、围岩具有弱膨胀性。由表4可知,岩石中主要矿物成分为伊利石、高岭石、绿泥石等矿物。研究表明膨胀岩土能够膨胀与收缩的物质基础是其含有的粘土类矿物,它既包含蒙脱石、伊利石、高岭石、皂石、绿泥石等单晶矿物,又包含伊利一蒙脱石、绿泥一蒙脱石、高岭一蒙脱石等混合矿物[7]。不同的粘土矿物表现出不同的亲水特性，伊利石、高岭石仅是一般的亲水矿物,其亲水性分别只有蒙脱石的十分之一和六十分乏一左右，因此膨胀土的胀缩性主要由蒙脱石含量控制[7]。

表4试验数据可知，炭质板岩中基本无蒙脱石矿物，但是岩石中均含有膨胀矿物伊利石，其最高含量可达62% ，高岭石最高含量可达20% 。根据有关文献[8]，为定量分析炭质板岩中黏土矿物含量及膨胀性，将伊利石含量的1/10与高岭石含量的1/60折算为等效蒙脱石含量进行分析，折算结果如表4所示，围岩等效蒙脱石含量最高含量为6.2% 。

结合海子山隧道围岩测定指标，对隧道围岩膨胀性进行探讨。一般情况下，工程界多将膨胀岩分为强、中、弱三种情况，但分级标准并不统一[9-11]。综合文献研究成果，按照规范给出的膨胀岩分级标准,围岩中蒙脱石含量低于规范中7% 的判别标准，且自由膨胀量低于40%，按照规范判定属于非膨胀岩。但同时也有研究成果表明：当蒙脱石含量达 7 %以上或伊利石含量达 20 %以上时，软岩即具有明显的胀缩特性[10,12]。对于膨胀软岩来讲，其发生膨胀的最本质的原因就是膨胀岩中含有大量的亲水性粘土矿物。因此，对于膨胀岩的分级指标，必须要考虑亲水性矿物成分的含量问题。

因此结合等效蒙脱石含量及实际伊利石含量，认为虽然海子山隧道炭质板岩围岩矿物中占主导作用的蒙脱石含量不高，但经分析测定数据，本隧道围岩的干燥饱和吸水率14.25%，岩石天然抗压强度2.56MPa,等效蒙脱石含量6.2%,岩石中主要矿物成分伊利石含量52%-62%。结合围岩在开挖支护过程中的迹象，即隧道在开挖初期易开裂产生变形，随着时间推移，围岩将大量向隧道内塑性挤出或造成底板隆起，对隧道内的初期支护或衬砌产生巨大破坏。综合判定，认为本隧道围岩膨胀性弱，遇水软化及浸泡后会表现出微弱的膨胀性，综合判定本隧道炭质板岩属于弱膨胀岩。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 表5 建筑/铁路工程膨胀土详判指标[13-14] | | |
| 指标 | 膨胀潜势 | |
| 无膨胀 | 弱膨胀性 |
| 自由膨胀率*FS/%* | *FS*＜40 | 40≤*FS*＜65（60） |
| 阳离子交换CEC/(mmol·kg-1) | *CEC*＜170 | 170≤*CEC*＜260 |
| 蒙脱石含量*M/%* | *M*＜7 | 7≤*M*＜14 |
| 备注：括号数据为铁路规范 | | |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 表6 膨胀岩分类[9] | | | |
| 围岩类别 | 干燥饱和吸水率（%） | 极限膨胀量（%） | 自由膨胀率（%） |
| 强膨胀岩 | ＞50 | ＞30 | *FS*≥70 |
| 中膨胀岩 | 30～50 | 15～30 | 50≤*FS*＜70 |
| 弱膨胀岩 | 10～30 | 3～15 | 30≤*FS*＜50 |
| 非膨胀岩 | ＜10 | ＜3 | *FS*＜30 |

综上，通过分析隧道围岩物性指标及其水理性质,并测定其矿物成分，认为受活动断裂区的动力挤压作用，断层破碎带造成围岩矿物成分蚀变，使得炭质板岩围岩具有断裂破碎带断层岩特性。围岩含有大量的粘土矿物，造成隧道围岩抗剪强度和岩石饱和强度大幅降低，场地整体强度弱化，岩土体强度偏低。隧道内间隔分布的断层破碎带由内而外分割影响到整个隧道围岩体，造成整体洞身段围岩级别特别低、自稳性特别差。经分析，隧道炭质板岩围岩的软岩特征明显，且具有软岩弱膨胀性，是隧道围岩容易产生大变形、支护开裂与坍塌的基本原因，与临近甘孜－玉树断裂的构造影响有莫大干系的。

**4.2对岩体结构及裂隙的影响**

事实上，所有岩体均是裂隙化的或结构面化的。结构面广义上包含了断裂、层理、节理及夹层面等结构面，岩体被这些结构面切割成了块状结构、层状结构、碎裂结构和散体结构。大量隧道围岩的失稳破坏与岩体裂隙化程度或结构面发育情况密切相关。经过分析总结，受隧址区域大断裂的影响，海子山隧道围岩的结构面化特征主要体现在以下几个方面：

1. 隧址区次级断裂穿插发育，断裂切割使得隧道围岩轴向整体完整性差。甘孜－玉树断裂带对区域构造起着控制作用,是区域内的巨型地质结构面,破碎带宽度达数百米到一千米，影响范围广,直接控制着工程区域的稳定性,以及控制区内的褶皱、断层、次级结构面的展布规律。甘孜－玉树断裂主断裂线在平面上并未直接与海子山隧道直接相交，隧道南北口分别距离距主断裂约1.1km和2.5km。但受其影响，与主断裂伴生的次级断裂在隧址区隐伏发育。施工中揭示并发生重大灾害的断裂至少有7处（见表7）。断裂结构由破碎带和破碎影响带构成[15]，即断裂的分带性。根据调查，在这些灾害点，围岩具有一定的断裂结构特征。破碎带内岩体以断层角砾岩及断层泥、泥化团块为主,以及它们之间所夹杂原岩碎裂物质组成,构成断裂的破碎带，挤压、褶皱、揉搓、方解石脉穿插现象明显，软弱、渗水易塌方，塌方后的渣土遇水易在施工扰动后成含角砾的泥状，脚踩易陷。而破碎影响带内围岩以极度破碎的炭质板岩和变质砂岩为主，炭质板岩呈碎片岩状，少量的砂质板岩呈碎裂、碎块状，以破碎为主，泥化物质较少，相应段落围岩易碎散掉块，初变形大不易控制，往往是大变形严重区段。通过EH4大地电磁测深物探对全隧道做贯通性探测，发现隧道洞身围岩视电阻率低阻带（ρ＜100Ωm）和相对高阻带（ρ=200～600Ωmm）呈现间隔穿插特征。在低阻带向相对高阻带过渡区域（ρ=80～150Ωmm），开挖揭示发育较大的断裂数条。结合施工病害统计，过渡区域极易发生塌方等地质灾害。分析认为，因为断裂的发育及其结构的分带特性，导致岩体破碎程度和含水程度的不同，使得全隧围岩视电阻率存在明显的分区、分带特征。



|  |
| --- |
| 海子山物探纵断面成果图（彩色）6F |
| 图5 海子山隧道电阻率断面图及断层分布 |



2、受区域构造及洞内次级断裂影响，围岩整体碎裂作用显著，局部碎散化严重。隧道围岩以炭质板岩为主,受断裂构造挤压作用影响，以及围岩发育的各种规模的断层破碎带切割影响较大。同时受构造挤压作用，导致板理化、片理化严重，围岩产状的凌乱、扭曲变形。而已经板理化、片理化发育的岩体中节理、裂隙更加密集发育、切割层理，使得围岩以碎裂状、碎片状为主，围岩极易失稳。根据EH4大地电磁测深物探资料，洞身围岩视电阻率为ρ= 50～100Ωm区段占比65%；洞身围岩视电阻率为ρ= 100～200Ωm区段占比24%；洞身围岩视电阻率为ρ= 200～600Ωm区段占比11%。可以看出，隧道剖面整体电阻率极低且不均，除主要受岩性的决定因素外，也是因为岩体破碎含水的因素。受围岩破碎影响，隧道开挖过程中极易在拱顶拱腰位置发生散碎围岩的松散遛塌。开挖时一旦发生松散体的遛塌，不易进行控制，递进渐次破坏，直至将一定深度范围的松散围岩遛塌完，发展形成自稳的塌落拱为止，结果是形成一定规模的塌腔，增加处治难度和措施。

受围岩碎散化影响全隧道几乎全部用挖机、铣挖头等机械开挖为主，几无爆破开挖。而弃渣观察发现也具有粒度小碎散严重特征，对全隧道弃渣渣土粒度进行分析，粒级＜20㎜成分占比约80%，粒级20㎜～200㎜约占10～15%，大块状的仅仅占不足5%。另外据统计，全隧道在开挖过程中，受围岩碎散影响，平均每30-40米发生一次拱顶遛塌。

|  |  |
| --- | --- |
| 围岩1 | 弃渣3 |
| 图6 围岩破碎机械开挖 | 图7 渣土多为细粒 |

3、不利的裂隙组合，使得薄层单斜板状岩体在开挖中拱顶的弯曲溃曲塌方严重。受隧道近南北轴线（N17°W）和岩层产状的相互组合关系影响（见图8）,掌子面开挖时表现出薄层单斜板状岩体的偏压破坏行为。体现为拱顶一侧岩层弯曲碎散、塌落，另一侧拱顶围岩掉快滑移。受断裂构造影响伴生的X共轭节理，其中一组(J2组)走向和隧道轴向近平行，该组节理裂隙的密集发育，使得薄层板岩层面的切割更加剧烈。加之围岩层较薄、板理发育、产状扭曲变形，使得开挖中隧道西侧拱顶的弯曲溃曲变形塌方要重于东侧拱顶的剪切滑移变形。以上现象导致围岩与支护体系受力和变形的不对称分布，结构受力和变形量的最大值位于岩层层面和隧道轮廓线的切线部位即西侧拱顶。在施工中，隧道拱部初期支护沿纵向的压溃剥落,初期支护钢拱架严重变形、偏压,印证了薄层板状地层结构具有引起偏压的效应。据统计，隧道在施工中，南段出口方向80%的遛塌、塌方发生的左侧拱顶，而北段进口方向80%的遛塌、塌方发生在右侧拱顶，与不利裂隙发育规律及板岩产状和隧道轴线组合关系较为吻合。

隧址区优势结构面发育如：地层主导产状为222°∠33°；①J1组节理走向N70～80°E，倾向NE，倾角70°～80°，节理面较粗糙，延伸长度0.3～1m，线密度3～5条/m；②J2组节理走向N10～20°W，倾向SE，倾角80°～近直立，节理面较粗糙，延伸长度1m左右，线密度3～8条/m。①与②是隧址区的主控裂隙，岩体体积节理数为Jv=5～8条/m3。

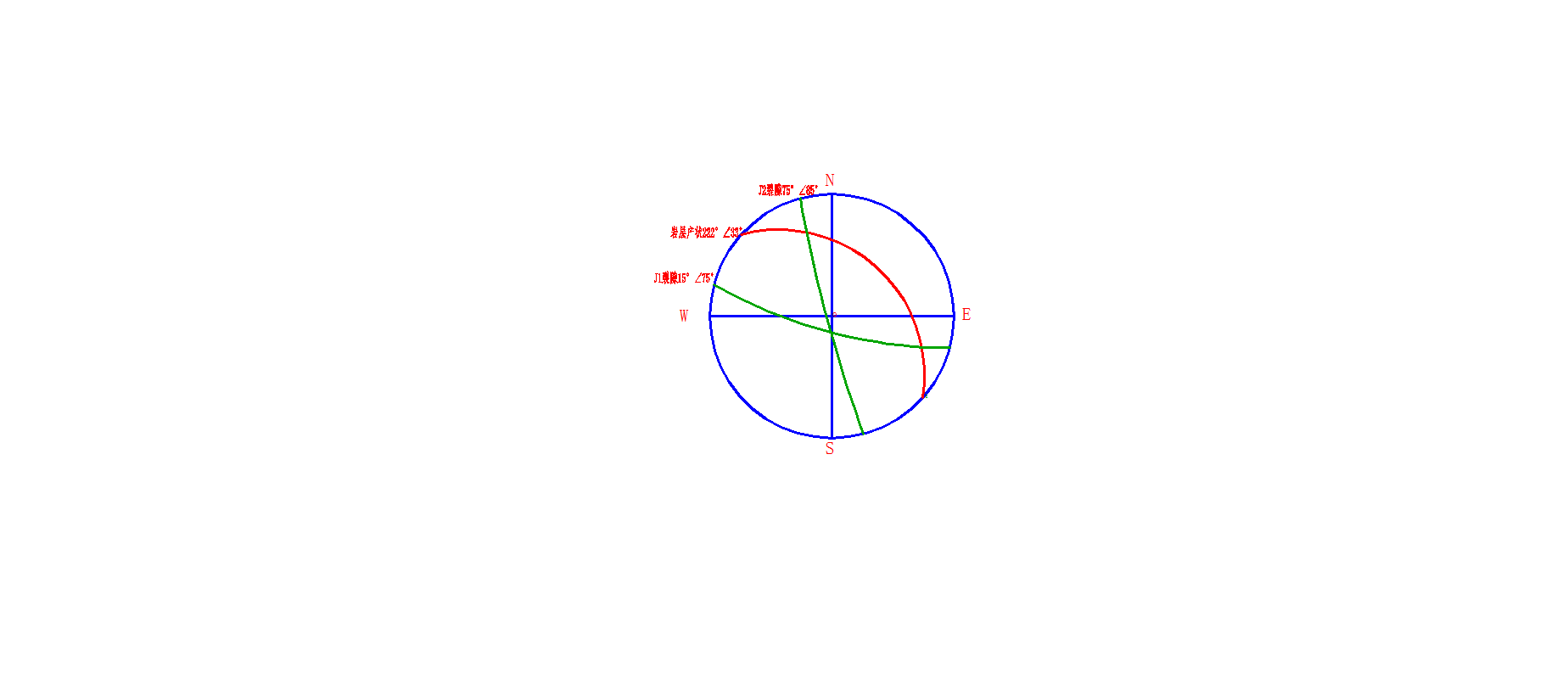


图8 结构面赤平投影图

总之，受区域断裂构造影响，隧道内次级断裂发育，围岩轴向整体完整性差。破碎带发育、围岩碎散化严重。加之板理严重的单斜岩层，被受断裂构造影响发育的多级各样的次生结构面切割成各类型的空间密集块体。这些极度碎裂化的块体在原始状态下处于静态平衡状态，但伴随着隧道开挖块体的移除,围岩原始的平衡状态被打破,而更加破碎、散体的围岩对应力重分布造成不利，形成隧道开挖更易塌方、溜塌及支护偏压失稳。

**4.3对地下水活动的控制**

受隧道南口发育的甘孜玉树区域断裂影响，隧道山体内发育多条与区域大断裂平行、伴生的次级断裂，因此海子山隧道地下水分布具有断层控水特征。断层控水是由许多因素决定的,除与断层的力学性质有关外,还与组成断裂的岩性、断裂规模、断裂活动性,断层岩胶结程度、裂隙、岩溶充填程度,地下水的运移潜蚀作用,地下水的补给条件等有关[16]。

断裂发育区中地下水的分布极不均匀,这是由于断裂本身结构的不均匀性造成的。断裂的各个部位一般受力不均匀,所以其各部位发育的裂隙性、岩体的碎散性也不相同,导水性、富水性也就不均匀，这就存在断裂富水性的分段特性。从这个角度来说，断裂富水性具有水平分带性。断裂带的宽度为断裂破碎带宽度与断裂影响带宽度之和，沿断裂两侧岩体的结构（裂隙发育特征）和断层岩的类型呈现明显的分带性。各带的宽度随断裂性质、断裂周围岩体的性质和规模的不同而变化。这种岩体结构和岩石类型的分带性决定了地下水在断裂带内与之相应的分布上的分带性[17]。

海子山隧道埋深较浅，因此浅部地下水发育受隧址区断层和地表水共同作用均较显著。

1、地下水在水平方向的渗透能力分带性。对于海子山隧道，前面已经分析过，其围岩受洞身多条断裂影响，使得全隧道的地下水运营环境较为复杂，但从大的规律上是符合断裂地下水运动的水平分带性的。断裂结构分带一般可分为断裂破碎带和断裂破碎影响带。破碎带岩石受力最大,应力最集中,岩石形变剧烈并发生了变化,显现出岩石颗粒、矿物成分、岩石碎块等特殊结合形态,组成破碎带主要物质为断层角砾岩、片理化岩、断层泥等,物质性质相对致密、泥化情况较严重，体现出相对较好的隔水性能。而断裂破碎影响带岩石受力和牵引作用而产生的机械破碎剧烈,节理发育,尤其是构成羽状节理更为发育,裂隙断续延伸更远,深度大，范围也相较破碎带宽度大，相对更加具有富水条件，只要地下水有足够的补给来源，一般相对富水。在隧道开挖过程中，发生重大灾害的断裂有4条（F1、F2、F4、F6）。根据纵向开挖过程的观察，在断层影响带内，开挖后围岩的渗水相对要点多面广些，呈现淋雨或局部线状，渗水点相对要稳定一些；而在接近断裂破碎带时，地下水的渗水情况总体要稍好转，呈现潮湿、点滴出水情况，但软化情况严重。前文物探资料显示因断裂结构的分带特性，导致岩体破碎程度和含水程度的不同，使得围岩视电阻率存在明显的分区、分带特征，印证了地下水在水平方向的渗透能力分带性。

1. 地下水具有较好的垂向上的补给运动条件。一般垂向上分入渗带、径流带、滞流带。入渗带:地面以下浅部,水量不大,水质浑浊,易被污染。径流带:一般地面以下50～60m至150～200m深度不等,在此范围内,水量丰富,水质好,不易污染。滞流带:径流带以下,裂隙中含水很少,水的运动性很差[17]。海子山隧道最大埋深仅为213米，长度却是2522米，最大埋深仅是长度的1/10。隧道山体地表有厚度普遍在3-10米的冰碛层圆砾土和砾石土覆盖层，其覆盖层成分及地形地貌条件，使得地表浅部的入渗带总体具有较好的地表水补给、入渗特性。且受埋深限制，隧道围岩上覆山体大部分位于径流带深度范围区内，因而在海子山隧道整体埋深不大的情况下，地下水经山体径流带易下渗。尤其是在雨季，地表充沛的降水加之较好的地下水下渗条件，更是隧道变形量突增的罪魁祸首。前文物探资料显示，受断裂结构垂向发育影响，围岩低阻、破碎、含水的破碎影响带可达地面下400米以上，也为地下水垂直运移提供了良好通道。

3、地表负地形在垂向上对隧道局部开挖区段的地下水补给效应较显著。受高角度的断层产状影响，裂隙垂直密集发育，导致地表裂隙密集发育区在地表形成软弱区段，经风化剥蚀，逐渐形成地表沟槽。地表水较多的汇集负地形、沟槽，经垂直裂隙密集带下渗，对断裂破碎带和破碎影响带进行补给，软化破碎带。在隧道开挖过程中，地表为负地形或溪沟处对应的洞内围岩发生数次塌方，充分印证了在浅埋深隧道中逢沟易塌的现象， F4断层破碎带甚至发生的突泥地质灾害。究其原因，其一是因为该段位于断裂破碎带区域内，其岩体基本呈现散体状结构，角砾、碎颗粒及泥质含量较高。此种岩体强度极低，孔隙率大，具有一定的渗透性，且岩石的粒径不均匀分布，细小颗粒充填物填充于各个岩块间存在微小的裂纹中，形成发生突水突泥的物质基础。其二是散体结构岩体中发生类似管涌的细小填充物随水流的迁移流失，导致骨架颗粒在扰动和应力重新分布下发生了大的变形，最终导致了承力体系的瓦解，使得骨架颗粒随水流大体积迁移形成突泥。因此散体结构中的细小颗粒的流失是骨架结构破坏的诱因，细小颗粒起粘结骨架颗粒的作用，颗粒流失最终导致了岩体体系的破坏和突泥的发生，是地下水和特殊岩土体相互作用导致的结果[18]。

|  |  |
| --- | --- |
| 突泥1 | 突泥2 |
| 图9 断层破碎带突泥淹没隧道 | 图10 骨架颗粒随水流迁移形成突泥 |

**4.4对隧道围岩应力影响**

在断层附近进行的地应力测量结果表明，活动断层附近的应力量值变化是十分复杂的。活动断裂上有剪应力低的段，也有剪应力高的段，且同一条活动断裂不同部位的应力状态可能也不同[19]。活动断裂及其附近的应力量值也是较为复杂，既有应力增大地段，也有应力降低的地段。是断层的活动、断层不同段的几何形态的差异等因素造成应力量值分布的复杂性。但总的活动断裂带附近的应力状态还是有规律可循的，活断层附近大量的应力测量结果表明，逆断层的应力状态为σHmax>σHmin>σV，走向滑动断层的应力状态为σHmax>σV>σHmin，正断层的应力状态为σV > σHmax >σHmin[19]。

我国《岩土工程勘察规范》中利用岩石或岩体的强度应力比，即岩石单轴抗压强度 (Ｒb)与最大主应力 (σmax)的比值，岩石强度应力比Ｒb/σmax大小来划分地应力状态，Ｒb/ σmax＞ 7 为一般地应力，Ｒb/ σmax= 4～7 属于高地应力，而Ｒb/σmax＜4即为极高地应力。可以看出，围岩应力大小受岩石饱和抗压强度Rc的影响很大。而海子山隧道炭质板岩岩石强度低，软化特性显著，岩石单轴抗压强度小于2.56MPa，饱和抗压强度仅仅是0.63MPa。即使以埋深产生的自重应力作为初始应力的铅直向应力，水平主应力的量级参照其大小来测算，隧道在极小埋深情况下的炭质板岩区段即处于高地应力-极高地应力状态。而根据勘察资料，隧道90%的区段为连续的炭质板岩区段，也就是说极高和高地应力的情况几乎占到全部隧道的90%。因此对于海子山隧道而言，软弱围岩造成的大变形是围岩处于高应力状态引发的主要地质问题。

分析围岩大变形机理，在隧道开挖前，岩体在高围压的作用下，处于平衡状态，隧道开挖后，原有的平衡状态被打破，应力发生重分布，导致径向应力急剧降低，洞壁附近的围岩发生大变形，使其不能发挥自承能力。围岩压力非常大并直接作用于支护结构上，并随着时间的推移，软弱围岩产生一定的塑性流动，初期支护承受的荷载持续增大，当难以承受塑性区内作用于其上的围岩压力时，支护结构将产生变形破坏，即隧道围岩发生大变形[20]。

|  |  |
| --- | --- |
| 掌子面塌方 | 支护变形沉降 |
| 图11 掌子面拱顶溜塌 | 图12 支护沉降大变形 |

综上，受区域断裂影响，导致炭质板岩软岩岩性、强度弱化特性更加明显，软化流变特性加剧。软弱围岩在较低的应力阀值下即处于高地应力-极高地应力状态，在高（极高）应力条件下。地下工程开挖和初期支护形成的低围压、高应力差环境使围岩及支护结构的稳定性极差，突出表现为挤压流变破坏，使得初期支护的稳定性及耐久性不断劣化。

**5考虑断裂改造作用的围岩级别调整**

**5.1勘察设计阶段围岩特征认识**

勘察设计阶段认为，隧道区周边断裂均远离隧址区，对海子山隧道无直接影响。根据钻孔揭露及调查，洞身段岩体节理裂隙发育，岩体呈镶嵌碎裂结构，围岩级别为Ⅳ级，开挖易形成坍塌，水文地质条件简单。隧道开挖时的出水形式以潮湿、滴水为主。板岩，薄层状构造，岩体节理裂隙发育，因板岩抗剪强度低，对震动非常敏感，易失稳、易变形坍塌，围岩级别为Ⅳ～Ⅴ级，预计Ⅴ级围岩占整个洞深长度的15～20%，水文地质条件简单。部分勘察结果显示，部分钻孔的板岩岩芯暴露一天后开始沿板理面剥离呈薄片状，风化作用对岩体的强度及完整性有一定影响，但影响深度有限，只影响隧道进出口浅埋地段。同时认为，海子山隧道最大埋深仅213m，埋深不大，板岩属于软岩，但由于应力较小，岩体结构相对较为破碎，围岩发生大变形的可能性较小。隧道围岩级别以Ⅳ级为主，次为Ⅴ级。隧道穿越的Ⅳ级围岩，洞长为2197m、占总长的87%；隧道穿越的Ⅴ级围岩，洞长323m、占总长的13%。

**5.2断裂改造围岩特征分析**

施工中对区域地质再度跟踪分析认为，甘孜-玉树断裂在海子山段的隐伏通过，对隧址区山体的影响较大。从地形地貌、次级断裂构造发育、围岩岩性、裂隙组合、地下水发育规律及围岩的应力状态等方面都产生改造，设计阶段对隧道围岩受区域断裂影响的研究程度尚需要加深。考虑到改造作用，对海子山隧道围岩级别及支护参数在施工阶段重新进行了梳理和调整。据统计，隧道全长2522米，V级围岩段达2222米，累计占88.1%，Ⅳ级围岩段仅300米；在所有用V级围岩段，用一般V级支护措施支护的有1489米，占全长59%，用超强支护措施加强支护区段733米，占全长59%。较勘察阶段比较，围岩的级别调整比例较大。经开挖统计，整个隧道山体地层的炭质板岩比例达到88%，且洞身段揭露有7条次级断裂穿过，小断层无数，断层破碎带主要由断层泥和碎裂岩组成,其原岩以板岩夹炭质板岩为主,岩性较差,岩质软弱,岩体破碎,属极软岩。而整个隧道围岩的强片理化、碎裂岩化、泥化夹层化均较显著。且越接近主断裂的隧道南段，围岩的三化程度更加剧烈。通过施工揭示及施工动态设计，调整后的围岩级别基本符合开挖现状。上述情况综合反映了甘孜-玉树断裂对海子山隧道围岩的强烈改造作用。

**6结语**

通过对海山隧道工程地质的再分析回顾，认为活动断裂在演化过程中，对海子山地形地貌、岩性特征、岩体结构、地下水活动、围岩应力状态的影响进行了分析梳理。从工程地质角度，分析了海子山隧道施工过程中软岩大变形、支护破坏、围岩级别大幅调整的客观原因。对合理定位和修正围岩分级，完善隧道结构设计，确定有效施工方案，评判隧道施工风险，控制工程投资，规避施工运营风险有着重要意义。

众多类似隧道表明，活动断裂带尤其是区域性的大断裂工程地质问题，活动断裂的最新错动面或地表活动线只局限在很窄的地段，其断裂破碎带及断裂影响带宽度可以很大且伴生的次级断裂会较发育。活动断裂相关工程地质问题不仅体现在断裂剧烈活动产生的地表破裂问题、隧道震害问题、建筑物的避让问题上，对受走廊唯一性影响的山区生命线工程，一般都难以避免穿越或临近断裂带。因此活动断裂在破碎带及断裂影响带范围内造成的次级断裂发育、围岩岩性特征、地下水分布发育及地应力等，都是活动断裂带工程地质需要深入研究的范畴。

总之，关注临近大断裂区域的工程地质岩组的工程特性，将断裂影响带作为特殊工程地质岩组，综合运用遥感、地面调查、物探、钻探、试验测试等传统工程地质调查勘察技术，加强相关技术的综合分析能力，精确呈现活动断裂带及影响带隧道围岩工程地质岩组的特性及围岩分类，是特殊围岩隧道动态设计、动态施工的基础。

**参考文献**

[1]石峰，李安，等.甘孜—玉树断裂带东南段晚第四纪活动性研究[J]. 地震地质, 2013, 35(1): 50—63.

[2]王明明，何玉林，等.甘孜—玉树断裂东南段晚第四纪活动特征及古地震破裂行为[J]. 地震地质, 2018, 40(4): 738—752.

[3]闻学泽，徐锡伟，等. 甘孜—玉树断裂的平均滑动速率与近代大地震破裂[J]. 中旧科学(D辑), 2003, 33（S1）: 199—208.

[4]彭华，马秀敏，等. 甘孜玉树断裂带第四纪活动特征[J]. 地质力学学报, 2006, 12(3):295—304.

[5]党嘉祥,周永胜,韩亮,等. 虹口八角庙-深溪沟炭质泥岩同震断层泥的X射线衍射分析结果[J]. 地震地质, 2012, 34(1): 17-27.

[6]朱宝存，唐书恒，张佳赞. 煤岩与顶底板岩石力学性质及对煤储层压裂的影响[J]. 煤炭学报,2009, 34(6): 756—760.

[7]王林洲. 公路工程中膨胀土判别试验研究[D]. 山东大学, 2007.

[8]王冲,王起才,张戎令,等. 无砟轨道高速铁路路基上拱病害成因分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(12): 252-256.

[9]赵峰,夏永旭,贾艳领. 膨胀性围岩公路隧道设计施工研究[J]. 中外公路, 2012, 32(6): 242-246.

[10]朱训国,杨庆. 膨胀岩的判别与分类标准[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 174-177.

[11]蒲文明,陈钒,任松,等. 膨胀岩研究现状及其隧道施工技术综述[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 232-239.

[12]孙小明,武雄,何满潮,等. 强膨胀性软岩的判别与分级标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 128-132.

[13]中华人民共和国住房和城乡建设部. 膨胀土地区建筑技术规范 （GB50112-2013）[S]. 北京,中国建筑工业出版社,2012.

[14]中华人民共和国铁道部. 铁路工程特殊岩土勘察规程（TB10038-2012 J1408-2012）[S]. 北京，中国铁道出版社，2012.

[15]汪明武,罗国煜,章杨松,等. 镇扬大桥桥基断裂横向分带评价研究[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(3): 37-40.

[16]孔庆瑞，左建,等.义县地区压性断裂地下水赋存特征的研究[J].中国矿业学院学报, 1987,4: 77-80.

[17]王辉,罗国煜,李艳红,等. 断层富水性的结构分析[J]. 水文地质工程地质, 2000, 3(4):12-15.

[18]吴川. 隧洞施工突水突泥机理及影响因素研究[D].西南交通大学, 2013.

[19]苏生瑞. 断裂构造对地应力场的影响及其工程意义[D].成都理工学院, 2001.

[20]赵亢,杨其新,等.关垭子隧道软弱围岩大变形机理分析[J].铁道标准设计,2015,59(10):114-118 .

**Effects of GanZi-YuShu Large Active Fault Zone on HaizishanTunnel Surrounding Rock Alteration**

Hu Guoi-bin, Liao Qin-bin,

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co.,Ltd.，Chengdu 610017, China）

**Abstract:** Haizishan tunnel is the key control engineering project in the reconstruction of the highway from Shiqu to Manigango at 217 provincial road in ganzi prefecture, sichuan province. The Ganzi - Yushu active fault and its secondary faults control the terrain landform, geological structure, underground water system and unfavorable geology of haizishan in the tunnel site, and the surrounding rock of tunnel are significantly reformatted by it. Based on the activity of Ganzi - Yushu fault and various diseases in tunnel construction,,and analysis of the influence of the fault on the lithology of the surrounding rock, the development characteristics of joint fractures, the development characteristics of groundwater and the stress state of surrounding rock, the transformation effect of the active fault on the surrounding rock of the tunnel is discussed. From the perspective of engineering geology, this paper discusses the geological causes of many collapses occurred during construction of tunnel,the large deformation paragraphs,mud bursting geological disasters,and large adjustment of surrounding rock level in tunnel construction. In order to provide reference for the project's reasonable positioning and correction of surrounding rock classification, the improvement of tunnel structure design, the determination of effective construction program, the evaluation of tunnel construction risk, the control of engineering investment, and the guidance of operation.

**Key words:** Haizishan tunnel；Active fault；Surrounding rock；The transformation effect