花岗岩蚀变程度对隧洞稳定性影响研究[1]

张婧[1,2]，吴彤[3]，闫晓石[3]，董金玉[4]，石尚[4]

（1.河南省自然资源监测和国土整治院，河南 郑州 450016；2.河南省地质灾害防治重点实验室，河南 郑州 450016；3.中水北方勘测设计研究有限责任公司，天津 300222；4.华北水利水电大学，河南 郑州 450046）

摘　要：花岗岩地区隧洞工程建设时常遇到蚀变岩体，严重制约着工程的建设与安全运营。以新疆北部某深埋长输水隧洞蚀变花岗岩为研究对象，从宏观调查、现场测试和室内微观试验三个方面，以宏观和微观分析相结合的方式研究了岩石蚀变程度对其表观特征、回弹值、点荷载强度、纵波波速的降低值以及蚀变矿物含量的影响规律，建立了定性和定量相结合的花岗岩蚀变程度分级判别方法，将花岗岩蚀变程度划分为轻微蚀变、中等蚀变和强蚀变三个等级。基于隧洞围岩岩石蚀变程度等级，利用 FLAC3D 软件进行了数值模拟，计算了输水隧洞无支护和支护后开挖过程中围岩位移场的变化，发现洞室侧壁的位移变化较大。其中轻微蚀变和中等蚀变隧洞段围岩变形量较小，而强蚀变隧洞段出现高达 212.23 cm 的围岩大变形现象；采取支护措施后，轻微蚀变和中等蚀变隧洞段围岩变形量控制在 1 cm 以内，强蚀变隧洞段围岩变形量降低至 1.91 cm，围岩变形现象得到了有效控制。

关键词：花岗岩；蚀变程度分级；蚀变矿物含量；深埋长隧洞；围岩稳定性

中图分类号：P642　　**文献标识码**：A

Study on the Influence of Granite Alteration Degree on Tunnel Stability

ZHANG Jing[1,2], WU Tong[3], YAN Xiaoshi[3], DONG Jinyu[4], SHI Shang[4]

(1. Henan Provincial Natural Resources Monitoring and Land Improvement Institute, Zhengzhou 450016, China; 2. Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Control in Henan Province, Zhengzhou 450016, China; 3. China Water Resources Beifang Investigation, Design, and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 4. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Altered rock mass is often encountered in tunnel construction in granite area, which seriously restricts the construction and safe operation of the project. The altered granite of a deep buried long water conveyance tunnel in northern Xinjiang is taken as the research object. From three aspects of macro investigation, field test and indoor micro test, the influence of rock alteration degree on its apparent characteristics, rebound reduce value, point load strength reduce value, longitudinal wave velocity reduce value and altered mineral content was studied by means of macro and micro analysis. The classification method of granite alteration degree was established by combining qualitative and quantitative methods. The alteration degree of granite was divided into three grades: slight alteration, medium alteration and strong alteration. Based on the degree of rock alteration of the surrounding rock of the tunnel, numerical simulation was carried out by using FLAC3D software to calculate the changes in the displacement field of the surrounding rock during the excavation of the water conveyance tunnel without and after support, and it was found that the displacement change of the side wall of the chamber was the largest. The total deformation of surrounding rock in the slightly and moderately altered tunnel section was small, while the large deformation of surrounding rock in the strongly altered tunnel section was as high as 212.23 cm; after support measures were taken, the total deformation of surrounding rock in the slightly and moderately altered tunnel section was controlled to less than 1 cm, while the total deformation of surrounding rock in the strongly

收稿日期:2024-02-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1509704);国家自然科学基金项目(U1704243, 41741019, 41977249, 42090052)。

第一作者:张婧(1984—),女,高级工程师,硕士,从事地质灾害方面的研究。E-mail：29521298@qq.com。

通信作者:董金玉(1977—),男,教授,博士,从事工程地质与地质灾害方面的研究。E-mail: dongjinyu@ncwu.edu.cn。

altered tunnel section was reduced to 1.91 cm, and the deformation phenomenon of surrounding rock was under effective control.
Keywords: granite; classification of alteration degree; alteration mineral content; deep buried long tunnel; stability of the surrounding rock

花岗岩是一种地壳表层分布非常广泛的岩石,由于其质地坚硬,强度高,抗风化能力强,通常被认为是地下工程的理想岩石[1-3]。但是,在长期的地质构造演化过程中,由于遭受热液流体和构造运动的长期侵蚀,导致原岩内部结构破碎,矿物元素发生转移和置换,影响岩石的基本性质,从而会给该地区水利水电、道路交通等基础工程的建设带来许多困扰[4]。

由于构造运动和热液活动期次的不同使得各区域内的花岗岩存在不同程度的蚀变现象。对于岩石蚀变程度的划分,学者们从不同角度开展了相关研究。就地球化学而言,NESBITT H W 和 YOUNG G M[5]以蚀变矿物中主要氧化物(Al_2O_3、CaO、K_2O、Na_2O)的含量变化提出了化学蚀变指数,用于研究岩石的风化及蚀变特征;FEDO C M 等[6]将斜长石矿物在蚀变过程中转变为黏土矿物的变化量作为蚀变程度的判别指标,定义为斜长石蚀变指数;LADYGIN V 等[7]利用蚀变矿物成分中 MgO 和 FeO 的增加量和 Na_2O、K_2O 的降低量估算了热液蚀变的程度;后续学者们以此为基础延续并拓展了基于不同蚀变类型以蚀变矿物含量为依据的蚀变程度识判方法[8]。从物理力学性质角度出发,KILIC R 等[9-10]以土耳其某地区的斜长角山岩、花岗闪长岩等为例,根据蚀变岩石的纵波波速、单轴抗压强度和吸水率,把蚀变岩的蚀变程度划分为 5 级:新鲜、微蚀变、中等蚀变、强蚀变和完全蚀变,并提出了统一蚀变指标(UAI: unified alteration index)的概念;ZHANG Y 等[11]分别依据蒙脱石含量、岩块干燥饱和吸水率与岩粉干燥饱和吸水率比值的蚀变系数将蒙脱石化蚀变岩的蚀变程度划分为弱势变、中蚀变、强蚀变。杨雪[12]利用蚀变指数来代表岩石蚀变程度,蚀变指数利用对地层电阻率和补偿中子值两个敏感性较强的因素来表征,蚀变指数能定性的反映蚀变程度,蚀变作用越强烈,蚀变指数越高,黏土含量越大。王锐等[13]通过岩石完整性和力学参数等将蚀变岩划分为弱蚀变和强蚀变。梅稚平等[14]利用回弹值、点荷载与抗压强度建立相关联系,并通过强度降低率和黏土岩化蚀变占比将复合型蚀变岩石划分为 S1—S4 4 个等级。王帅[15]采用化学蚀变指数、密度、回弹值、点荷载、纵波波速和微观结构等化学、物理力学定量指标和其他定性指标对构造型花岗蚀变岩蚀变程度进行划分。此外,从特殊地质构造和表观特征等方面也可以进行简要分类。周扬等[16]利用岩体结构、结构面特征和含水情况将其划分为轻度蚀变、中等蚀变和强蚀变;苗朝等[17]按照破碎程度和动力蚀变岩的结构特征,划分了大岗山坝区辉绿岩的蚀变程度:块状-次块状辉绿岩、碎裂化辉绿岩、碎块状辉绿岩、片理化辉绿岩和泥化蚀变岩。尽管以上研究为花岗岩蚀变程度的划分提供了一定的参考和依据,但此类方法在具体实施过程中较为繁琐,在实际工程现场应用中具有一定的局限性。

蚀变花岗岩地区工程在施工过程中存在围岩大变形、涌水、塌方等工程地质问题的隐患[18-21],因此需要利用数值模拟手段计算岩体力学行为和变形特征以研究围岩稳定性。王振等[22]指出蚀变岩所占围岩百分比的增加是导致天池抽水蓄能电站地下厂房顶拱及上下游边墙的位移增大的原因;段伟锋等[23]和钟谷良等[24]通过三维有限元分析计算验证了杨房沟水电站左岸坝基处蚀变带处理方案的可行性;徐德军[25]、聂林[26]对洛湛线清水隧道蚀变岩段进行模拟和反演,指出渗流和蚀变岩软化对隧道稳定性起决定性作用;郭少华[27]对三山岛尾矿库边坡模拟计算后提出渗流作用会使蚀变带附近边坡整体稳定性呈现明显的降低趋势;张启源[28]、王浪[29]发现班达水电站坝址区含蚀变带发育边坡中蚀变带的存在放大了坡体浅表层发生的差异剪切错动,造成坡体局部卸荷深度异常,并在二级开挖后发生整体失稳。

事实上,在蚀变岩地区进行工程施工时,由于缺乏对岩石蚀变程度作出快速、准确的判别,从而造成由现场支护不当、应对不周所导致的施工困难、工期延误,甚至安全威胁的现象已经屡见不鲜,特别是在深埋隧道工程中,蚀变作用对岩石力学性质损伤往往超出我们原本的预测。因此,对花岗岩蚀变程度进行分级快速判别,分析蚀变作用下隧洞开挖围岩的应力、变形破坏特征对蚀变岩地区工程的设计和施工具有重要的理论意义和工程实践意义。本文结合新疆北部某深埋长输水隧洞蚀变花岗岩,从宏观特点(表观特征)、现场测试(回弹测试、点荷载试验和纵波波速测试)等多个方面进行综合分析,建立花岗岩蚀变程度分级快速判别方法;并对典型蚀变岩隧洞段天然状态和支护后两种工况下开挖进行数值模拟,分析不同程度蚀变作用下围岩的应力、变形破坏特征,揭示蚀变作用对围岩稳定性的实际影响,为支护方案的优化提供理论依据。研究成果对蚀变花岗岩地区隧洞工程的设计和施工具有较强的指导意

义和适用价值。

1　工程背景

1.1 工程概述

输水隧洞从喀什河引水,穿越北天山将水引入其他流域。输水隧洞长 41.82 km,最大埋深 2 268 m。隧洞设计为无压洞,采用钻爆法和全断面掘进机联合施工方案。

输水隧洞属深埋长隧洞,其中 38%洞段埋深超过 1 000 m,最大埋深 2 260 m。隧洞大部分处于博罗科努山复背斜,南端属于巩乃斯坳褶,受多期构造运动影响,地层多被强烈褶皱化,地层岩性复杂,断层破碎带发育,工程存在突涌水、高外水压力、岩爆、围岩大变形及高地温等问题,隧洞工程地质条件极为复杂。

1.2 地质条件

隧洞工程区位于天山构造带中的北天山单元,在区域上属于印度洋板块与亚欧板块之间的造山带。南北两侧分别与伊利地块和准葛尔地块相邻,北侧以北天山构造区为界,南侧以伊利盆地断层为界,如图 1 所示。隧洞围岩岩性复杂多变,沉积岩、火山岩、变质岩均有分布,主要包括志留系、泥盆系、石炭系砂岩、变质砂岩、凝灰岩、凝灰质砂岩以及华力西期花岗岩,少量为奥陶系灰岩和第三系泥岩。

花岗岩隧洞段长 9.81 km,以二长花岗岩、花岗闪长岩和钾长花岗岩为主,由晚古生代的地壳运动与华里西期多次的岩浆活动共同作用所形成,后经漫长复杂的构造-热液叠加改造,使得研究区内花岗岩普遍遭受蚀变作用影响,以黑云母的绿泥石化和长石矿物的黏土化为主要蚀变类型。此外,工程区在构造应力的作用下,形成大量不同规模的结构面。工程区内所揭露的花岗岩中分布有多条蚀变破碎带,破碎带厚度变化大,勘探揭露宽度从 0.1 m 至 74.2 m 不等,蚀变程度不均匀,规律性差。地表处、勘探平硐和隧洞的破碎带内蚀变岩多为灰白色、浅肉红色和肉红色中粗粒花岗结构,与未蚀变的花岗岩相比岩石内部各矿物晶粒蚀变性状明显,表面失去原有的光泽,晶粒边缘棱角不明,晶粒胶结较弱。

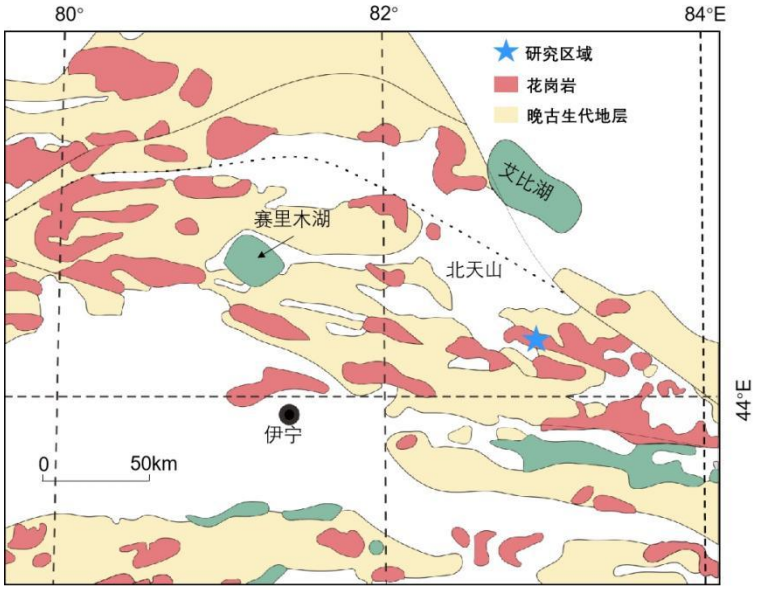


图 1　隧洞工程位置图（引自 Wu et al. 2023[4]）

2　花岗岩蚀变程度判别方法

花岗岩产生蚀变后,其颜色、破碎程度、晶体形状、强度以及矿物成分等都发生了改变。本文从宏观特点(表观特征)、现场测试(回弹值、点荷载、纵波波速等)和室内微观试验(蚀变矿物含量)等多个方面进行综合分析,建立花岗岩蚀变程度工程分级判别方法。

2.1　表观特征

通过野外调查及现场测试等工作,发现隧洞内蚀变花岗岩存在明显的分带性,而不同蚀变程度花岗岩在岩体结构、破碎程度、锤击响应和浸水反应等表观特征有着显著差异。以桩号 38+535—38+080 段为例,该段内存在不同蚀变程度的华里西中期侵入的二长花岗岩,如图 2 所示。

2.1.1　38+535—38+485 段

该段隧洞内花岗岩的蚀变程度较为严重,花岗岩的组织结构完全破坏或残留少量心石,可见原始结构痕迹。除石英外,其余矿物大部分或全部蚀变为次生矿物。干燥状态呈密实状,岩体裂隙不明显,手捏

即碎,在拱顶位置多有碎屑或小岩块塌落,塌落的岩块无明显棱角,易形成较大的空腔,且在护盾边缘常有大量的砂状碎屑流出。潮湿时呈松散土状或砂状,并且易潮解,遇水很快崩解。蚀变花岗岩在洞底积水的作用下出现明显的软化,用铁锹可以铲动,软化深度一般在 0.5 m 以上,在顶拱位置表现出明显的塑性变形,出现岩石将钢筋排包围的现象,如图 2(a)所示。

取部分蚀变岩块在浸入水中时,边缘的细小颗粒迅速与岩块脱离,岩块周围出现类似“烟雾”状的混浊。在浸水 20 s 后,岩块上有较多的砂粒与其脱离,出现明显的开裂。在浸水 45 s 后,岩块中的颗粒还不断的脱落,岩块体积残余量不到浸水前的一半,残余的岩块也已经软化。在浸水 1 min 以后,轻轻的晃动岩块,岩块基本完全消失,形同倒入水中的砂土,如图 2(b)所示。

2.1.2　38+419—38+517 段

该段隧洞内存在部分蚀变花岗岩,仅局部洞壁较为完整。花岗岩的组织结构部分或大部分破坏,部分岩石呈不连续的骨架或心石。石英以外的矿物部分蚀变为次生矿物。锤击声闷。蚀变岩体多发育在在完整洞壁的裂隙附近。顶拱位置塌块较多,岩块块度较大,有棱角,易形成空腔,如图 2(c)所示。

该段蚀变岩块在浸入水中后,仅有附在岩块表面的细小颗粒与岩块分离。在浸入水中 1 min 以后不再有细小颗粒与岩块脱离,岩块的形状基本没有改变,如图 2(d)所示。浸水 2 min 后岩块不再发生变化,强度降低明显,且出现部分崩解现象,将岩块拿出用手可将岩块掰开。

2.1.3　38+274—38+080 段

该段隧洞内蚀变岩体的洞壁形状比较完整,其组织结构也基本完整,锤击声较为清脆,岩石断口的矿物色泽较未蚀变岩体略显暗淡,仅在裂隙面附近呈现出明显的蚀变现象,如图 2(e)所示。洞顶岩块塌落现象较少,局部有塌落,岩块的块度也较大。

取该段岩块浸入水中时,基本没有岩屑或细小颗粒从岩块上脱落,如图 2(f)所示。在浸水 2 min 后,岩块无法用手掰断,而在用金属器物敲击时,也仅有碎屑脱落,岩块却未发生破坏。

(a)　38+535—38+485 段干燥状态下蚀变岩体

(b)　38+535—38+485 段浸水状态下蚀变岩块

(c)　38+419—38+517 段干燥状态下蚀变岩体

(d)　38+419—38+517 段浸水状态下蚀变岩块

(e) 38+274—38+080 段干燥状态下蚀变岩体

(f) 38+274—38+080 段浸水状态下蚀变岩块

图 2 不同蚀变程度的花岗岩

2.2 现场测试

2.2.1 回弹测试

采用回弹仪对洞室中的岩石进行了回弹测试。图 3 为洞室内花岗岩的回弹测试结果,从中可以看出,不同洞段处的回弹值差异较大。洞口附近岩石破碎程度高,蚀变程度严重,回弹值低。随着距洞口距离的增加,回弹值逐渐上升。在距洞口距离 36~50 m 的区间范围内为断层破碎带,岩体的蚀变程度较深,部分岩体手抓即碎,回弹值在该深度范围内呈急剧下降变化。在距洞口距离达到 50 m 以后时,岩体的回弹值较距洞口距离 36~50 m 的有所增加,且表现出较大的波动变化。同时,在 84~97 m 处再次出现蚀变带,该处洞壁岩体覆盖有明显的“绿化”层。结合对花岗岩的敲击记录结果可知,在采用地质锤对回弹值较高的花岗岩敲击时,产生的击打声音清脆;对回弹值较低的花岗岩敲击时,击打声音沉闷,部分花岗岩直接破碎,并伴有大面积颗粒碎屑掉落。由此可见,回弹值与蚀变程度呈负相关关系。

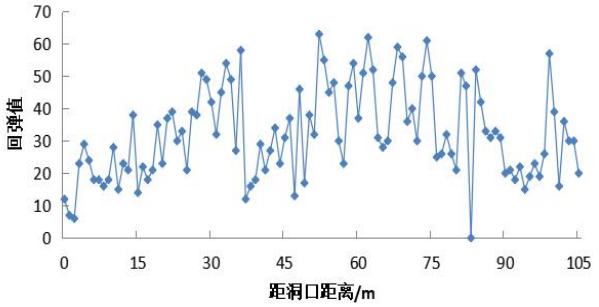


图 3 花岗岩回弹测试结果

2.2.2 点荷载试验

根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266)对洞室内的花岗岩进行点荷载测试,洞室内的点荷载测试结果如图 4 所示。从试验结果可以看出,不同洞段处的点荷载强度差异较大。与回弹值随距洞口距离增加的变化规律相同,随着距洞口距离的增加,点荷载强度逐渐上升。在距洞口距离 36~50 m 处,点荷载强度出现降低,最小点荷载强度指数为 0.19 MPa。在距洞口距离达到 50 m 以后时,岩体的点荷载强度值较距洞口距离 36~50 m 的也有所增加,且也表现出较大的波动变化。同时,在 84~97 m 处再次出现低点荷载强度指数带,仅存在个别岩石保留有较高的强度。结合回弹值测试结果可以看出,蚀变带处岩石回弹值与点荷载强度指数变化特征大致相同,同样是随蚀变程度的加深,点荷载强度指数呈降低趋势。

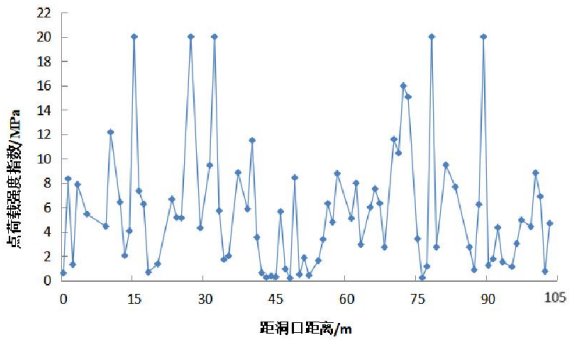


图 4 花岗岩点荷载试验结果

2.2.3 纵波波速测试

根据输水隧洞内蚀变岩体的表观特征,选取桩号 38+553—38+525 段洞壁不同蚀变程度的岩体进行纵波波速测试,以了解不同程度蚀变岩的物性参数特征,测试时采用岩体表面平透法,结果如图 5 所示。在桩号 38+525—38+530 段、桩号 38+535 处岩体的纵波波速为 860~1 080 m/s,桩号 38+530—38+534 段岩体的纵波波速为 1 600~2 320 m/s,桩号 38+536—38+539 段岩体的地震纵波速度为 4 060 m/s,桩号 38+549—38+553 段岩体的纵波波速为 5 400 m/s。结合该段岩体的表观特征发现,纵波波速随蚀变程度的加深呈阶梯式显著降低。岩体纵波波速指标在桩号 38+525—38+539 段整体较低,造成这一

现象的主要原因在于该段岩体蚀变破碎、裂隙相对密集等特征。

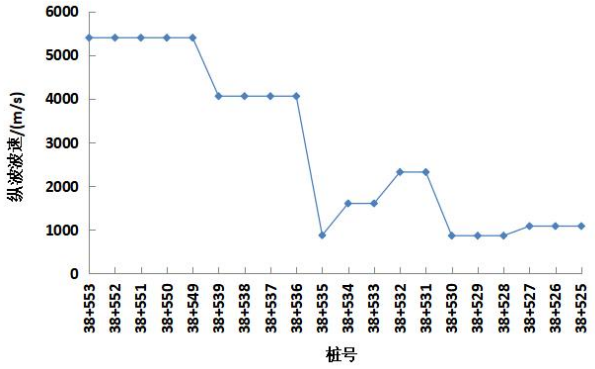


图 5　输水隧洞桩号 38+553—38+525 段岩体纵波波速

2.3 室内微观试验

前文中提及部分学者将蚀变矿物含量作为确定蚀变程度的判别手段。因此,通过对花岗岩样品进行X射线衍射鉴定,确定其内部各类矿物成分及其含量,分析各个样品中由于蚀变作用而产生的蚀变矿物成分及含量,以作为参考依据。在研究区所取得的蚀变花岗岩样品中,除斜长石、钾长石和石英外,以绿泥石、蒙脱石和伊利石等黏土矿物作为主要蚀变产物,仅在个别样品中出现一定含量的沸石。蚀变矿物成分及含量见表 1。该地区内新鲜花岗岩样品中主要以斜长石、钾长石、石英和黑云母为主,只有少量绿泥石和伊利石（<5%）[30]。对比发现,研究样品中绿泥石、黏土矿物和沸石总量均大于 10%,在部分蚀变程度较强的样品达到 25%、30%、40%。由此可以看出,把花岗岩中蚀变矿物含量作为一种判别该地区岩石蚀变程度的指标具有一定的可行性。并且,蚀变岩的工程性质在很大程度上取决于黏土矿物成分。因此,在岩石类别较为均一的情况下,绿泥石、黏土矿物和沸石的含量反映着岩石的蚀变程度,蚀变矿物含量越高,蚀变程度越严重。

表 1　蚀变矿物成分及含量

样品编号	矿物含量/%				
	绿泥	蒙脱	伊利	沸石	合计
ZDK34+214	11	2	8	—	21
ZDK34+214.5	17	—	8	—	25
ZDK34+220	11	6	1	—	18
ZDK34+221	16	5	—	—	21
ZDK34+224	15	9	—	—	24
ZDK34+660	6	—	13	—	19
ZDK34+664	19	—	3	—	22
ZDK34+669	22	—	1	—	23
ZDK34+675	19	—	2	1	22
ZDK34+681	13	—	2	—	15
ZDK34+689	41	—	—	—	41
ZDK35+837	10	2	2	1	15
ZDK35+840	6	18	6	—	30
ZDK35+841	9	8	3	10	30
ZDK35+845-1	10	7	2	13	32
ZDK35+845-2	9	6	1	—	16
PD33	7	—	8	—	15
PD84	5	—	7	—	12
PD105	6	22	3	—	31
CG03	17	—	9	—	26
CG06	9	—	2	—	11
CG10	7	—	4	—	11
SF29	3	—	31	—	34

2.4 蚀变程度工程分级判别方法

岩石蚀变程度的准确划分是岩体质量评价的主要依据,这对于大型工程建基面的选择以及洞室围岩和边坡稳定性评价具有重要意义。通过现场观察和统计,新鲜未蚀变花岗岩回弹均值为 60,点荷载均值为 18 MPa,纵波波速均值为 5 400 m/s。蚀变作用对岩石部分矿物组成、内部结构构造所造成的影响,导致岩石回弹值、纵波波速、点荷载强度降低,降低的值越大,蚀变程度越严重。秉承快速、简单、实用的原则,以蚀变花岗岩的表观特征为基础,通过对现场样品表观特征的宏观判别指标,利用现场测试的回弹、点荷载和纵波波速的降低值指标,并参考室内X射线衍射实验的蚀变矿物含量指标,综合确定花岗岩的蚀变程度建立花岗岩蚀变程度工程分级方法,将蚀变岩划分为 3 个等级：轻微蚀变、中等蚀变、强蚀变，见表 2。由于不同地区的构造演化历史、地层岩性等地质条件的不同,导致不同地区蚀变岩岩矿特性有所差异,因此可根据具体情况选择与其合适的判别指标。

轻微蚀变岩强度较高,岩体较为完整,多呈镶嵌、次块状结构,工程性质较好,隧洞开挖后顶拱处存在少量掉块,并且掉落块度较大;中等蚀变岩强度明显降低,岩体完整度差,结构较为破碎,工程性质较差,隧道开挖后顶拱处掉块较多,且块度较小,因其仍存在一定的强度,工程中可考虑实际情况判断是否需要采取支护措施;强蚀变岩石强度低,岩体破碎,呈碎裂/碎屑状结构,工程性质极差,围岩不能自稳,易出现挤

压变形、塌方,顶拱普遍掉块,塌落物多呈碎块、碎屑状,对工程的稳定性最不利,实际工程中应采用加强支护措辞进行防护。此外,值得关注的还有地下水发育情况。蚀变岩具有亲水性,轻微蚀变岩遇水后影响较小;中等蚀变岩体在地下水活跃处强度和结构完整性大大劣化,可能会出现失稳现象;强蚀变岩在地下水活跃处会转化为泥状,从而导致突水突泥、围岩大变形、塌方等地质问题的发生。

表 2　花岗岩蚀变程度工程分级判据

评价指标	蚀变程度		
	轻微蚀变	中等蚀变	强蚀变
表观特征	结构完整;锤击有回弹;岩块塌落现象较少,岩块的块度也较大;遇水后,无崩解现象	结构部分破坏,部分呈不连续的骨架或心石;锤击声哑,易碎,用钢钎可撬动;遇水后强度降低,部分崩解	结构完全破坏或残留少量心石;干燥状态呈密实状,潮湿时呈松散土状或砂状;锤击有松软感,出现凹坑,手捏即碎,用钢钎可插入;易潮解,遇水快速崩解
回弹降低值	10~30	30~50	＞50
点荷载降低值/MPa	3~6	6~12	＞12
纵波波速降低值/（m/s）	900~2 400	2 400~3 900	＞3 900
蚀变矿物含量/%	5~15	15~25	＞25

3 蚀变花岗岩隧洞稳定性分析

基于以上分类方法,选取输水隧洞内已施工隧洞段(桩号 32+105—32+705 段)进行数值分析,并结合现场观测,以验证本文所提出的蚀变程度快速判别方法的可行性。

3.1 计算模型

根据桩号 32+105—32+705 段内的现场调查和地质资料,对该段进行地质概化并建立数值计算模型,如图 6 所示,图中: a 为上部低阻覆盖岩层; b 为输水隧洞; c 为轻微蚀变岩石带; d 为中等蚀变岩石带; e 为强蚀变岩石带。计算模型在垂直方向上高约 1 313 m (*Z* 轴方向),隧洞宽度方向上为 200 m (*X* 轴方向),隧洞中心线两侧各取 100 m,隧洞延伸方向上为 600 m (*Y* 轴方向),隧洞埋深 786~1 093 m。其中,桩号 32+105—32+355 段岩体较完整,岩石强度较高,洞内干燥,测得该段岩体回弹降低值为 10.2~24.0,纵波波速降低值为 1 340 m/s,综合判定为轻微蚀变段;桩号 32+355—32+555 段中岩体较为破碎,存在发育相对集中分布的断层带,延断层带发育部分不连续的强蚀变岩,洞内干燥无水,测得该段岩体回弹降低值为 39.2~49.2,纵波波速降低值为 2 080~2 900 m/s,综合判定为中等蚀变段;桩号 32+555—32+705 段岩体破碎,岩石强度极低,并发生不同程度的塌落现象,测得该段岩体回弹降低值大于 50,纵波波速降低值为 4 320~4 540 m/s,综合判定为为强蚀变段。隧道附近模型边界条件为顺隧洞延伸方向边界施加 *X* 向位移约束、垂直隧洞方向边界施加 *Y* 向位移约束,底部边界施加固定约束。计算工况为未支护状态下开挖和支护后开挖。根据开挖设计方案,隧洞开挖后 TBM 护盾后方及时初喷 C20 混凝土,并采用锚杆、工字钢钢拱架和钢筋网等支护手段。

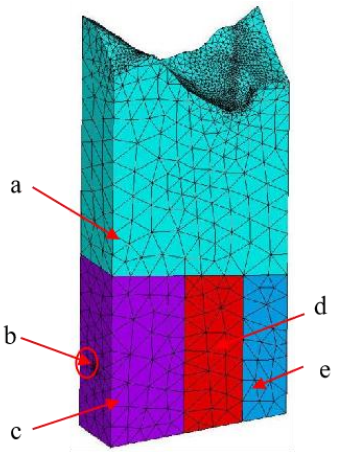


图 6　32+105~32+705 段网格剖分图

3.2 地应力的施加及计算参数选取

为准确获取隧洞地应力场的分布情况,对花岗岩段钻孔岩芯进行了 6 组声发射 Kaiser 效应地应力测试分析,实测结果如表 3 所示。测试结果表明：钻孔的实测主应力值随深度增加而增加,最大主压应力σ_1近于水平,倾角 a_1 在±10° 以内,优势方向为 NNW,与区域构造应力场的方向较为吻合;中间主应力σ_2倾角平缓,倾角 a_2 在±28° 范围内变化;最小主应力倾角 a_3 均在 64°以上。

根据表 3 数据对花岗岩洞段地应力进行推算,其结果如表 4 所示。在数值计算中,将σ_1、σ_2和σ_3沿 *X* 方向(水平垂直隧洞轴线方向)、*Y* 方向(隧洞轴线方向)和竖直方向进行转换,对模型施加 *S*xx、*S*yy 和 *S*zz

应力。

计算采用弹塑性模型,强度准则采用摩尔-库仑强度准则。围岩参数是依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266-2013)和国际岩石力学学会标准(ISRM,2007)在中国水利部海河水利委员会基本建设工程质量检测中心和华北水利水电大学地球科学与工程学院进行测试后,参考工程岩体质量分级标准 GB/T50218-2015,考虑岩体蚀变程度后综合确定,见表 5 所示。

表 3　地应力测试结果

组号	深度/m	主应力值/MPa			主应力倾角/(º)			主应力方向/(º)		
		σ_1	σ_2	σ_3	a_1	a_2	a_3	β_1	β_2	β_3
1	470~500	25.9	17.9	10.9	1.1	-25.4	64.6	18.5	-32.2	-73.9
2	580~610	28.7	18.4	13.9	9.6	-27.5	-60.6	13.8	-61.7	86.4
3	650~680	28.8	20.4	16.8	-2.6	-9.9	79.8	1.5	-70.8	-74.1
4	823~829	31.5	24.4	20.5	-8.6	23.6	64.7	11.8	-63.9	83.6
5	848~855	33.2	24.9	22.9	4.5	-16.2	-73.1	8.6	-86.8	83.6
6	883~886	35.2	26.5	23.9	2.7	6.8	82.6	5.2	64.7	63.5

注：σ_1、σ_2、σ_3 分别为最大主压应力、中间主应力和最小主应力;a_1、a_2、a_3 分别代表最大主压应力、中间主应力和最小主应力与水平面的夹角(倾角),正值为仰角,负值为俯角;β_1、β_2、β_3 分别为三个主应力在 oxy 平面上的投影与 x 轴的夹角,正值逆时针向转,负值顺时针向转。

表 4　隧洞计算段地应力推算值

主要岩性	埋深 H/m			密度/(g/cm^3)	最大主应力σ_1/MPa			中间主应力σ_2/MPa			最小主应力σ_3/MPa		
	最小	最大	平均		最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均
二长花岗岩	594	1078	858	2.67	27.1	43.0	35.8	18.1	29.8	24.5	15.9	28.8	22.9

表 5　隧洞围岩主要地质参数建议值

围岩蚀变程度	岩石密度/	弹性模量	变形模量	泊松比	抗剪断强度	
	(g/cm^3)	E/GPa	E_0/GPa	μ	C'/MPa	φ'/（°）
新鲜	2.60~2.70	16.0~20.0	11.0~13.0	0.21~0.23	1.60~1.80	46~52
轻微蚀变	2.45~2.60	12.0~15.0	9.0~11.0	0.25~0.28	1.00~1.20	38~44
中等蚀变	2.40~2.45	5.0~8.0	4.0~6.0	0.31~0.34	0.30~0.50	30~35
强蚀变	2.30~2.40	0.2~1.0	0.1~0.4	0.36~0.38	0.05~0.10	22~26

3.3 隧洞围岩稳定性分析

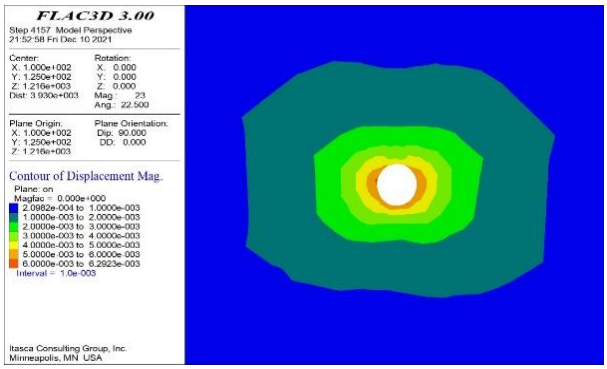
隧洞开挖后围岩岩体整体向洞内临空面变形,顶拱下沉,底板隆起,侧壁向内移动。不同类型围岩在开挖支护后的变形区域形状有所差别,轻微蚀变段洞室开挖引起的围岩变形区域呈“圆饼型”,而中等蚀变段和强蚀变段围岩变形区域却呈“蝴蝶型”。开挖支护后侧壁处的位移和影响深度较大,而顶拱和底板处的位移和影响深度较小。

隧洞开挖未支护和支护后位移量对比如表 6 所示。可以看出,随着蚀变程度的增加,隧洞围岩的变形量逐渐增大。轻微蚀变段围岩在开挖未支护时最大总位移量为 2.11 cm,顶板和侧壁处的位移和影响深度相对较大,而底板的位移和影响深度相对较小;中等蚀变段围岩变形量略大于轻微蚀变段,最大总位移量为 7.63 cm;强蚀变段围岩最大总位移量为 212.23 cm,底板和侧壁处位移量变化最大。由于埋深较大,受自重应力和水平构造应力的影响,洞室围岩在竖直方向(Z 方向)和垂直隧道方向(X 方向)的位移都比较大,隧道延伸方向(Y 方向)的位移较小;受岩体蚀变程度的影响,强蚀变段围岩位移量远大于轻微蚀变段围岩和中等蚀变段围岩的位移量,考虑到岩石非连续性特征,该段往往已经发生大变形破坏。

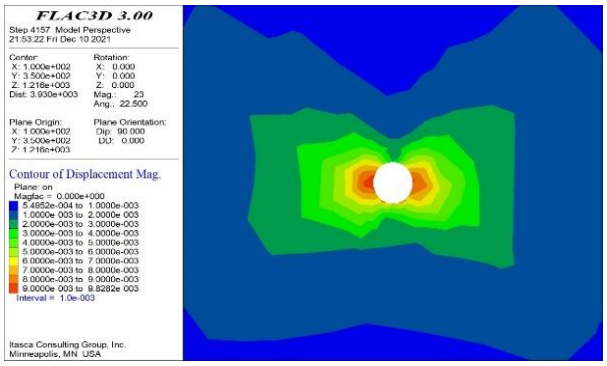
同时,采取支护措施后,围岩的位移出现减小,尤其是 V 类围岩在开挖未支护时位移量为 212.23 cm,而在支护后围岩的位移量却减小至 1.91 cm,围岩的变形得到有效的控制,如图 7 所示。由此可见,隧洞开挖后及时支护,有利于提高隧洞围岩的稳定性。同时,结合施工现场观测,发现隧洞开挖支护后洞室稳定,没有塌方和大变形,表明本文提出考虑蚀变程度等级的围岩类别划分方法可行,支护方案效果较好。

表 6　隧洞开挖未支护和支护后位移量对比

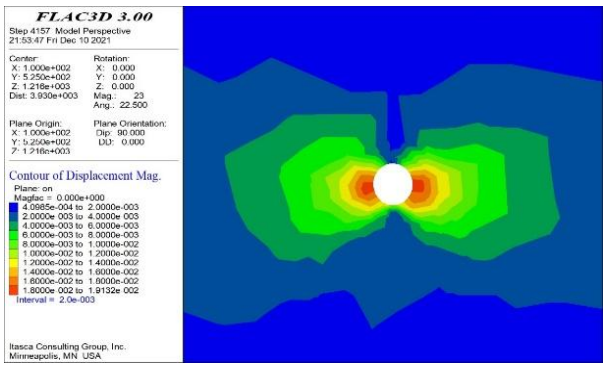
断面	总位移量/cm	
	未支护	支护后
整体	244.26	2.19
III类围岩(32+230 断面,隧洞埋深 905m)	2.11	0.62
IV类围岩(32+455 断面,隧洞埋深 860m)	7.63	0.98
V类围岩(32+630 断面,隧洞埋深 930m)	212.23	1.91



(a) 轻微蚀变段围岩



(b) 中等蚀变段围岩



(c) 强蚀变段围岩

图 7 不同蚀变程度围岩支护后总位移云图

3.4 隧洞围岩变形量复核

在隧道掘进过程中发现,钢拱架的变形主要集中发生在开挖后 24 h 内,之后逐渐趋于稳定,最终变形量与 24 h 时刻监测值差异较小。因此,在该隧洞段的监测数据中随机选择 42 个监测点(轻微、中等、强蚀变段围岩各 14 个),并采用上述支护措施对 24 h 后钢拱架的位移变化进行统计。实际监测值如图 8 所示。其中,轻微蚀变岩段钢拱架的变形范围为 0.49~0.76 cm。中等蚀变岩石段钢拱的形变范围为 0.57~1.29 cm。强蚀变岩石段钢拱变形范围为 1.73~2.27 cm。

通过与数值模拟结果的比较,发现不同程度蚀变岩隧洞段围岩变形量实际监测值与数值模拟的结果基本吻合,验证了数值模拟的有效性。同时发现,中等蚀变围岩的变形量波动幅度较大,说明中等蚀变的岩石仍具有一定的强度,在支护措施下岩石具有良好的稳定性。但是不排除中等蚀变岩段中夹杂过多强蚀变岩石而导致围岩整体强度降低的可能,因此,在实际施工过程中还应该与现场情况相结合,灵活应对。强蚀变岩石的最大变形值为 2.27 cm,与无支护状态下开挖相比明显较低。因此,围岩变形得到了有效控制。

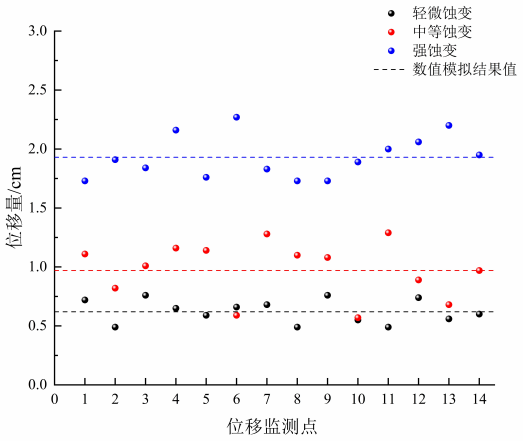


图 8 隧道围岩变形实测监测值

4 结论

1）随着花岗岩蚀变程度加强,点荷载、回弹值和纵波波速值均逐渐降低,两者呈现出明显的负相关关系。而蚀变矿物含量却随着蚀变程度的增加而逐渐增加,两者成正相关关系。

2）从地质调查、现场测试和室内微观试验三个方面,以宏观和微观分析相结合的方式研究了岩体蚀变程度对其表观特征,回弹值、点荷载强度、纵波波速降低值,以及蚀变矿物含量的影响规律,建立了定性和定量相结合的花岗岩蚀变程度工程分级判别方法,将花岗岩蚀变程度划分为轻微蚀变、中等蚀变和强蚀变三个等级。

3）通过数值模拟,结合施工现场观测,发现隧洞围岩变形量随蚀变程度加深明显增大,蚀变作用破坏了围岩体原始结构,导致其刚度和强度的减小,增大围岩的变形以致发生失稳破坏;在采用支护措施

后,隧洞变形明显减小。围岩位移实际监测值与模拟结果相符合,支护方案较为合理,为此类工程设计和施工提供了理论依据。

参 考 文 献

[1] ZHANG G H, WANG C T, JIAO Y Y, et al. Deposits sources of inrush hazards for the Liangshan Tunnel passing through deeply buried granite[J]. Tunnelling and underground space technology, 2019, 92.

[2] LEE S H, BAEK S H, WOO S I, et al. Estimation of in situ geotechnical properties on highly weathered granite using chemical weathering indices[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2020, 79(7): 3403-3415.

[3] 张翼宇,黄志全,赵菲,等.风化花岗岩矿物组成与渗透特性相关性研究[J].华北水利水电大学学报（自然科学版）,2022,43(1):103-108.

[4] WU T, SHI S, REN M H, et al. Alteration mechanism of variscan granite in a project area at the northern foot of the Tianshan Mountains, China[J]. Applied sciences. 2023, 13(22):12486.

[5] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature,1982, 299:715-717.

[6] FEDO C M, NESBITT H W, YOUNG G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. Geology, 1995, 23(10): 921-924.

[7] LADYGIN V, FROLOVA J, RYCHAGOV S. Formation of composition and petrophysical properties of hydrothermally altered rocks in geothermal reservoir[J], Proceeding of the World Geothermal Congress, 2000: 2695-2699.

[8] 董金玉,石尚,李建勇等.蚀变岩工程分级与物理力学性质研究[J].工程地质学报,2022,30(3):966-974.

[9] KILIC R, ULAMIS K, YURDAKUL M, et al. The alteration degree of the metacrystalline rocks based on UAI, Bolu (Turkey)[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2014, 73(1): 193-201.

[10] KILIC R. A Unified Alteration Index (UAI) for mafic rocks[J]. Environmental & engineering geoscience, 1999, 4: 475-483.

[11] ZHANG Y, GUO C, QU Y, et al. Engineering geological properties of altered rocks and implications for railway construction in the Sanjiang orogenic belt, Southwest China[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2011, 70(1): 143-152.

[12] 杨雪.蚀变火山熔岩储层饱和度模型及测井解释方法研究[D].长春:吉林大学, 2016.

[13] 王锐,胡坤生,张延仓,等.罗田-铁岗输水隧洞围岩蚀变花岗岩特性[J].人民长江,2021,52(增刊 2):79-82,98.

[14] 梅稚平,胡亚东,王宇航.孟底沟水电站坝区复合型蚀变岩工程地质研究[J].人民长江, 2020, 51(增刊 2): 79-83.

[15] 王帅.花岗岩蚀变特征及其对洞室围岩的影响研究[D].兰州:兰州大学,2023.

[16] 周扬,刘晓博.叶巴滩水电站尾水隧洞蚀变岩施工支护措施[J].四川水力发电, 2021, 40(3): 63-66.

[17] 苗朝,沈军辉,李文纲等.大岗山坝区花岗岩蚀变特征及工程地质特性研究[J].人民长江,2013,44(24):23-25,38.

[18] WANG H L, XU W Y, SHAO J F. Experimental researches on hydro-mechanical properties of altered rock under confining pressures[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2014, 47(2): 485-493.

[19] ZHANG G H, JIAO Y Y, WANG H, et al. On the mechanism of inrush hazards when Denghuozhai Tunnel passing through granite contact zone[J]. Tunnelling and underground space technology, 2017, 68: 174-186.

[20] ZHANG G H, JIAO Y Y, MA C X, et al. Alteration characteristics of granite contact zone and treatment measures for inrush hazards during tunnel construction - a case study[J]. Engineering geology, 2018, 235: 64-80.

[21] 王竹波,张艳艳,张红光,等.花岗岩蚀变土力学特性及其洞室围岩稳定性模糊评判[J].华北水利水电大学学报（自然科学版）,2023,44(4):76-82.

[22] 王振.天池抽水蓄能电站岩体蚀变特征及其对地下厂房围岩稳定性影响分析[D].郑州:华北水利水电学院,2012.

[23] 段伟锋,燕俊松,杨日昌,等.杨房沟水电站左岸坝基断层蚀变岩蚀变特征与工程特性研究[J].地质灾害与环境保护,2021,32(4):52-57.

[24] 钟谷良,周勇,潘兵,等.地下厂房岩体蚀变带现场调查研究与稳定控制[J].水利水电科技进展,2021,41(4): 67-74.

[25] 徐德军.清水隧道蚀变带围岩变形机理与控制技术研究[D].成都:西南交通大学,2012.

[26] 聂林.富水花岗岩蚀变带隧道大变形机理及控制技术研究[D].成都:西南交通大学,2012.

[27] 郭少华.渗流作用下蚀变带弱化及边坡稳定性分析[D].青岛:山东科技大学,2017.

[28] 张启源.班达水电站中坝址右岸坝肩边坡蚀变岩的工程地质特性及边坡稳定性研究[D].成都:成都理工大学,2019.

[29] 王浪.班达水电站坝址区韧性剪切带和蚀变带发育特征及其对边坡稳定性的影响[D].成都:成都理工大学,2018.

[30] 杜開明.中亚造山带西北天山晚古生代花岗岩成因及构造背景[D].北京:中国地质大学(北京),2021.