

西藏贡觉粉砂质泥岩工程地质特性与蠕变强度研究

郭长宝, 王磊, 李任杰, 吉锋, 王炆, 严孝海, 刘贵

Engineering geology properties and creeping strength characteristics of the silty mudstone in Gongjue County in Tibet of China

GUO Changbao, WANG Lei, LI Renjie, JI Feng, WANG Yang, YAN Xiaohai, and LIU Gui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制

Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area

卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 李滨, 贺凯, 唐俊刚, 张天贵 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 73-81

某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究

A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel

刘超, 袁伟, 路军富, 张钊 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 108-115

水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型

Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions

李安润, 邓辉, 王红娟, 郑瀚, 苟晓峰, 潘远阳 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 106-113

湘西陈溪峪滑坡变形机理及稳定性评价

A study of deformation mechanism and stability evaluation of the Chenxiyu landslide in western Hunan

刘磊, 徐勇, 李远耀, 连志鹏, 王宁涛, 董仲岳 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 21-21

含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting

张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79-79

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107012

西藏贡觉粉砂质泥岩工程地质特性与蠕变强度研究

郭长宝^{1,2}, 王磊³, 李任杰³, 吉锋³, 王炆^{1,2}, 严孝海¹, 刘贵^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081; 3. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 川藏铁路在穿越西藏贡觉地区时遇到三叠系粉砂质泥岩, 在高地应力条件下容易发生大变形等危害。文章开展了不同围压下的岩石三轴压缩和三轴蠕变试验, 结合 PFC 数值模拟, 研究了粉砂质泥岩在不同围压下的蠕变特性和长期强度研究, 结果表明: 贡觉粉砂质泥岩流变具有西原蠕变模型特征, 蠕变与常规三轴试验条件下, 随着围压不断增大, 粉砂质泥岩试样均由拉-剪破坏向单剪破坏过渡, 剪切破裂面与水平线的夹角逐渐减小, 微裂纹数量减少; 蠕变试验相较于常规三轴试验, 由拉应力引起的压碎带影响范围更广; 在高围压条件下, 粉砂质泥岩更容易发生流变, 随着围压的增大, 轴向应变、侧向应变和体积应变均增大, 微裂纹数量呈下降趋势; 瞬时弹性模量及黏弹性系数与围压呈线性递增关系, 黏弹性模量与围压呈对数型增长关系, 黏塑性系数与围压呈指数型增长关系。在荷载长期作用下, 岩石长期强度低于瞬时强度。

关键词: 川藏铁路; 粉砂质泥岩; 三轴压缩蠕变试验; 变形机理; 数值模拟

中图分类号: TU458^{+.3}

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0054-11

Engineering geology properties and creeping strength characteristics of the silty mudstone in Gongjue County in Tibet of China

GUO Changbao^{1,2}, WANG Lei³, LI Renjie³, JI Feng³, WANG Yang^{1,2}, YAN Xiaohai¹, LIU Gui^{1,2}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The Triassic silty mudstone is encountered in the Sichuan-Tibet Railway, when it passes through Gongjue County in Tibet of China, and the rock is prone to cause large deformation under the condition of high geo-stress. In this study, we carried out the triaxial rock compression and triaxial creep tests under different confining pressures. Combined with the PFC numerical simulation, we have also studied the creeping characteristics and long-term strength of the silty mudstone under different confining pressures. The results show that the rheology of the Gongjue silty mudstone is characterized by the Nishihara creep model. With the continuous increase of the confining pressure, under the conditions of the creep and conventional triaxial tests, the silty mudstone specimens all undergo transition from tensile-shear failure to single-shear failure. The angle between the shear fracture surface and the horizontal line gradually decreases, and the number of microcracks

收稿日期: 2021-06-20; 修订日期: 2021-07-30

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190319; 20190505); 国家自然科学基金项目(41877279; 41731287; 41941017); 自然资源部杰出青年科技人才项目(12110600000018003911)

第一作者: 郭长宝(1980-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事工程地质与地质灾害调查研究。E-mail: guochangbao@163.com

decreases. Compared with the conventional triaxial test, the creep test has a wider range of influence on the crush zone caused by tensile stress. Under the conditions of high confining pressure, the silty mudstone is more prone to rheology. The numerical simulation results show that when the confining pressure increases, the axial strain, lateral strain and volumetric strain will increase, while the number of microcracks decrease. There is a linear increasing relationship between the instantaneous elastic modulus and the viscoelastic coefficient with the confining pressure, the viscoelastic modulus has a logarithmic growth relationship with the confining pressure, and the viscoplastic coefficient has an exponential growth relationship with the confining pressure. Under long-term loading, the long-term strength phase of the rock is lower than the instantaneous strength.

Keywords: Sichuan-Tibet Railway; silty mudstone; triaxial compression creeping test; deformation mechanism; numerical simulation

川藏铁路东起成都,向西经雅安、康定、理塘、贡觉、昌都、波密、林芝、山南,终至拉萨,铁路沿线地形地貌和地质构造复杂,桥隧占比超过 80%,以深埋长大隧道为主,部分特长深埋隧道长度超过 40 km,局部埋深超过 2 000 m^[1-4]。由于川藏铁路沿线构造应力场复杂,且以水平构造应力为主,铁路沿线深埋隧道岩体围压变化梯度大,深埋隧道面临岩爆和大变形的危害^[5-6]。其中,软弱围岩由于强度和变形的各向异性容易发生显著的蠕变变形^[7-8],不仅影响隧道围岩的稳定性,还影响支护措施的长期稳定性。如受高地应力影响,成渝高铁木寨岭隧道在施工开挖后即产生强烈的变形及破坏,岩石的长期强度直接影响地下工程的稳定性和安全性^[9-10];川藏铁路拉萨至林芝段藏噶隧道 DK169+090 处隧道围岩累计最大变形达 1.5 m,初期支护钢架被剪断,严重影响了隧道施工安全^[11]。

隧道工程的长期稳定性对于重大工程的安全运营具有重要意义,目前针对岩石加载速率对岩体力学强度及隧道稳定性的影响已经进行了大量研究^[12-13]。野外调查表明,川藏铁路在穿越西藏贡觉地区时,遇到了砂质泥岩及其不良工程地质特性的影响,该套岩体具有分布广泛、流变特性显著的特征。由于该区交通条件差、以往工程建设未涉及相关蠕变岩体特性的内容,目前关于该套砂质泥岩的岩体力学强度,特别是岩石蠕变强度特性及其对重大工程的影响研究较少,因此开展在不同围压条件下隧道围岩变形与强度的时间效应研究具有重要的工程意义。本文基于现场采取的岩石力学样品,开展了常规三轴试验和三轴压缩蠕变试验,研究了围压对粉砂质泥岩常规力学特性和流变力学特性的影响,为铁路隧道工程设计及灾害防治研究提供参考。

1 地质背景

1.1 地形地貌

川藏铁路贡觉县段位于横断山脉中部,印度板块与欧亚板块大规模碰撞的青藏高原强烈隆升地带,自东向西穿过东达山和贡觉盆地等高山与盆地(图 1),区内地质构造复杂、地形起伏大,地形坡度一般在 30°~40°,部分区域大于 60°,属典型的高山峡谷地貌。铁路沿线及邻区新构造运动强烈,发育有金沙江断裂带、洛纳—布虚断裂等大型区域性活动断裂带,区域构造应力场复杂且以水平构造应力为主导,隧道走向与最大主应力方向小角度相交^[8]。同时该区高原冰山地貌发育显著,地质灾害频发,铁路建设面临极大挑战。

受地形地貌和区域地质灾害的影响,川藏铁路在该区主要采用隧道工程,其中规划中的贡觉某隧道长约 26.21 km,穿越超过 4 000 m 的高山,隧道最大埋深约 850 m,属于深埋长大隧道。

1.2 地层岩性

西藏贡觉地区内出露地层从老至新分别有元古界、奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系及第四系地层。贡觉某隧道主要穿越上三叠统夺盖拉组(T_3d)、甲丕拉组(T_3j)等地层,主要由灰绿色长石岩屑砂岩、含泥质粉砂岩、炭质页岩及煤线组成,岩体力学强度较弱。受高地应力等地质条件的影响,在铁路建设穿越软质岩段时,容易产生铁路隧道围岩大变形以及铁路运营过程中的隧道围岩长期蠕变变形等危害。

2 岩石蠕变试验与强度研究方法

粉砂质泥岩属于软质岩中的较软岩,容易发生失

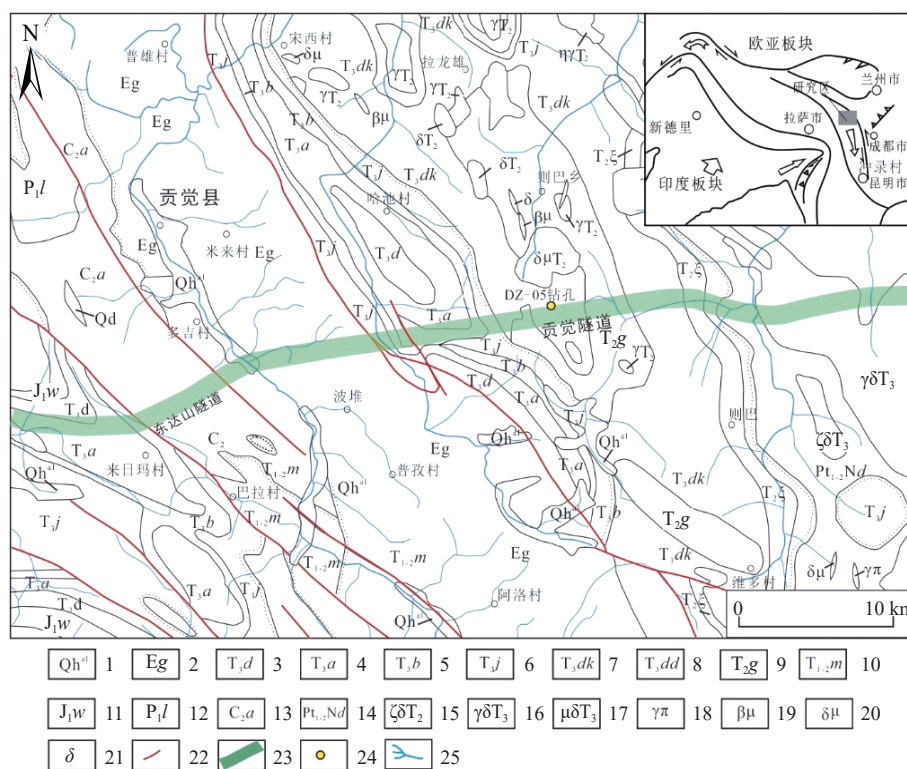


图 1 贡觉某隧道段地层岩性分布图 (线路为示意图, 据文献 [1] 修编)

Fig. 1 Lithology distribution of the Gongjue Section along the Sichuan-Tibet Railway(modified from Ref. [1])

- 1—全新世冲积物; 2—古近系贡觉组; 3—上三叠统夺盖拉组; 4—上三叠统阿塔拉组; 5—上三叠统波里拉组; 6—上三叠统甲丕拉组; 7—上三叠统洞卡组;
8—上三叠统东独组; 9—上三叠统公也弄组; 10—中下三叠统马拉松多组; 11—下侏罗统汪布组; 12—下二叠统里查组; 13—中石炭统鹭曲组;
14—宁多岩群; 15—晚三叠世正长花岗岩; 16—晚三叠世花岗闪长岩; 17—晚三叠世闪长玢岩; 18—花岗斑岩脉; 19—辉绿玢岩脉; 20—闪长玢岩脉;
21—闪长岩脉; 22—断裂; 23—拟建铁路走向示意图; 24—钻孔; 25—水系

水收缩开裂、遇水膨胀软化等工程地质问题^[14], 其力学强度特性, 特别是长期蠕变条件下的力学强度, 对于隧道施工建设和安全运营具有极强的指导意义。岩体蠕变试验是研究其蠕变规律和长期强度的有效手段, 范庆忠等^[15]采用重力加载式的三轴流变仪对龙口矿区含油泥岩进行三轴蠕变压缩试验, 发现蠕变破坏起始蠕变应力阈值随围压的增大呈线性关系, 蠕变破坏时的应力与围压也成比例关系。徐慧宁等^[16]对粉砂质泥岩开展了三轴蠕变试验, 通过绘制等时应力-应变曲线获得了长期强度及抗剪强度参数, 认为围压对这些强度参数具有较强的影响。杨振伟等^[17]通过控制变量法分析了伯格流变模型各细观参数对瞬时强度及流变特性的影响。本次试验测试基于三轴蠕变试验机, 通过开展不同围压下的三轴蠕变力学试验, 结合 PFC 数值模拟, 分析研究粉砂质泥岩不同围压条件下的蠕变强度特性。

2.1 岩石力学试样

取样地点位于川藏铁路贡觉某隧道段, 钻孔内揭示的地层岩性主要为上三叠统甲丕拉组 (T_j) 砂岩、

砾岩夹泥岩、粉砂质泥岩等, 取样深度主要分布在 34.30 ~ 63.75 m, 为粉砂质泥岩, 密度约 2.64 g/cm^3 , 天然含水率约 0.94%, 呈灰绿色、泥晶细粒结构, 完整性较好。根据岩石力学试验标准和测试要求, 将现场采取的岩样加工成 $\Phi 50 \times 100$ 的标准圆柱试样。

2.2 试验设备及方案

(1) 试验设备

本次试验所用设备为地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室的 YSJ-01 岩石三轴蠕变试验机, 该试验机的最大加载力为 1 000 kN, 围压允许工作范围为 0 ~ 30 MPa, 围压和轴向荷载精度皆为 0.5%。轴向荷载控制速率 6 ~ 600 kN/min, 轴向位移控制速率 2 ~ 100 mm/min, 轴向荷载和围压稳定时间可维持在 6 个月以上, 可满足本次试验的需求。

(2) 试验方案

针对粉砂质泥岩的蠕变强度与变形特性进行了常规三轴压缩试验和三轴压缩蠕变试验。每种试验各选取 5, 10, 15 MPa 围压条件, 分别代表在 200, 400, 600 m 的隧道埋深条件。试验方案如表 1 所示。

表 1 岩石力学实验加载方式

Table 1 Experimental loading method

试验类别	试样编号	围压/MPa	加载方式
常规三轴	GJ-1	5	先以 1 MPa/min 的速率施加围压, 待围压达到设定围压并稳定后, 轴向荷载以 5 MPa/min 速率加载至试样产生破坏
	GJ-2	10	
	GJ-3	15	
三轴蠕变	GJ-4	5	以 1 MPa/min 的速率施加围压, 待围压达到设定围压并稳定后 分级施加轴向荷载, 轴向荷载以 5 MPa/min 速率加载, 每一级应力恒定时间为 24 h
	GJ-5	10	
	GJ-4	15	

2.3 基于 PFC 的岩石蠕变特性数值模拟

近年来 PFC 数值模拟软件在岩石力学试验强度研究中发挥了重要作用^[18-19], 并取得较好的效果, 如王俊光等^[20]通过室内试验与二次开发的二维颗粒流程序(PFC^{2D})分级加载蠕变模拟相对比分析, 研究泥岩在不同加卸载围压速率下的蠕变破裂特性, 认为在加卸载围压条件下泥岩蠕变微裂纹数量相较于单轴压缩试验微裂纹数量有所增加, 随加载速率增加泥岩蠕变破裂形式由剪切破坏转向张拉破坏。丛宇等^[19]基于颗粒流原理研究了岩石材料宏观力学特征与细观参数之间的定量相关性, 从细观角度分析了岩石卸荷破坏机理。因此, 本文在对岩石三轴蠕变岩石力学强度分析的基础上, 采用颗粒流 PFC^{2D} 软件, 分析不同围压对粉砂质泥岩破坏的影响, 建立其地质力学模型。

3 贡觉粉砂质泥岩力学试验结果与分析

3.1 常规三轴试验

由图 2(a)可以看出, 当围压为 5, 10 MPa 时, 试样破坏模式主要为拉-剪复合破坏, 试样上下两端和底部因局部拉张应力集中而产生掉块。当围压增大到 15 MPa 时, 试样发生明显的剪切破坏, 剪切面较为平滑。说明随围压的增大, 试样由拉-剪复合破坏逐渐向剪切破坏过渡, 并且宏观上裂纹数量有所减少。由图 2(b)可得粉砂质泥岩的黏聚力为 6.47 MPa, 内摩擦角为 37.47°。试验得到的各围压条件下的峰值破坏强度特征见表 2, 可以发现随着围压增大, 岩石的破坏强度也随着增加。

3.2 三轴压缩蠕变试验

根据表 2 的试验结果, 围压为 5 MPa 时, 其破坏轴压 σ_1 为 40.95 MPa, 在三轴压缩蠕变试验中选取常规三轴破坏轴压最大值的 20% 进行分级加载, 即 7.7 MPa。对 10 MPa 和 15 MPa 围压的三轴蠕变试样采用相同的方法进行分级加载, 其分级加载压力分别为 14.3 MPa 和 18.4 MPa。根据试验结果分别绘制不

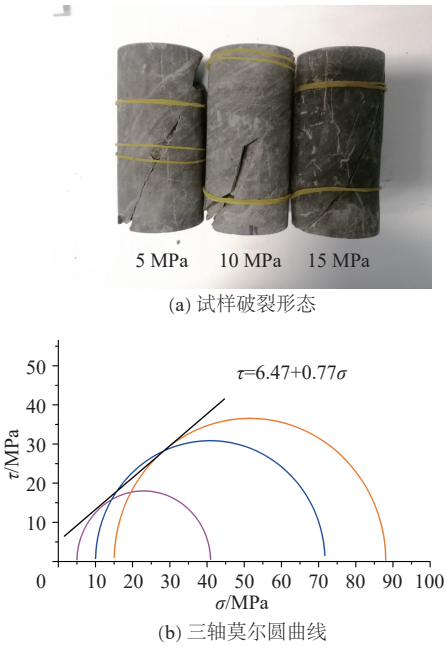


图 2 粉砂质泥岩试样常规三轴试验结果

Fig. 2 Photo of the sample failure and Mohr's circle under conventional triaxial test conditions

表 2 贡觉粉砂质泥岩室内试验基本力学参数

Table 2 Basic mechanical parameters of the laboratory tests

试样编号	密度/ (g·cm ⁻³)	围压 σ_3 /MPa	轴向压力 σ_1 /MPa	偏应力峰值 q_f /MPa	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
1	2.64	5	40.95	35.95		
2	2.61	10	71.71	61.71	6.47	37.47
3	2.67	15	88.09	73.09		

同围岩条件下轴向应变与时间的关系曲线(图 3、图 4)。其中图 3 为轴向应变与全过程时间的关系, 图 4 为基于 Boltzman 叠加原理绘制的轴向应变叠加曲线与时间的变化关系曲线。

当施加轴向荷载时, 粉砂质泥岩首先发生瞬时弹性变形, 表现为蠕变叠加曲线与轴向应变轴的截距。由图 3、图 4 可知, 在各围压条件下, 第一级荷载施加后往往产生较大的轴向应变增量, 表现为曲线较陡, 5 MPa 围压条件下的轴向应变增量最小, 10 MPa 围压条件下的增量稍大, 15 MPa 围压条件下的增量最大。在初始蠕变阶段, 轴向应变速率随荷载的增加而增大, 最终到加速蠕变阶段发生破坏。

由图 5 可知, 瞬时应变增量随轴向应力增大而变小。由于荷载是等量增大, 故可知该粉砂质泥岩在轴向上的瞬时弹性模量是不断增大的, 表现为弹性硬化现象。在单轴压缩蠕变试验中也有类似现象^[21]。围压对瞬时应变增量也有较大影响, 从图 5 可以看出, 随着围压的增加, 瞬时应变增量增加。

如图 6 所示, 在 5, 10 MPa 围压条件下, 试样主要

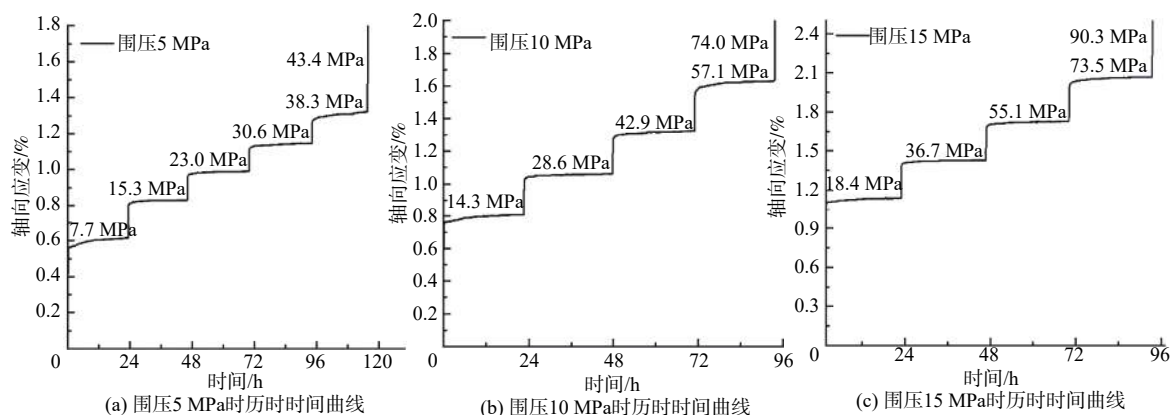


图 3 不同围压下试样三轴压缩轴向应变蠕变历时时间曲线

Fig. 3 Specimen triaxial compression creep test time curve under different confining pressures

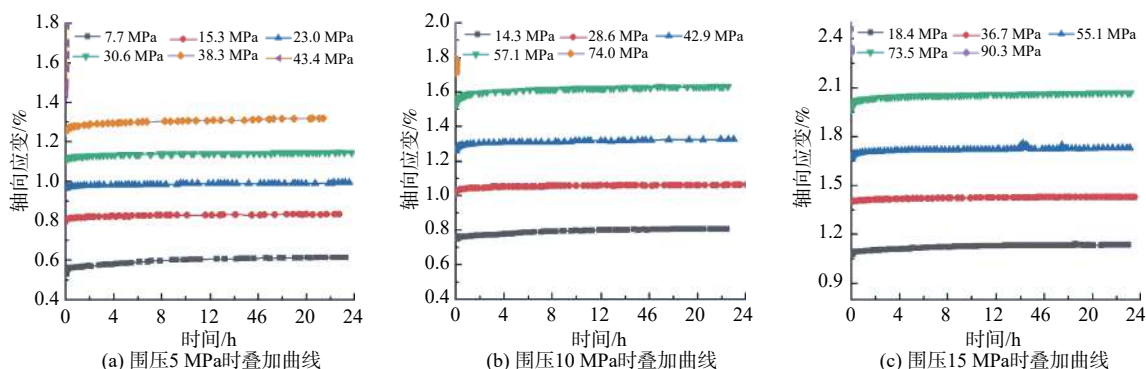


图 4 不同围压下试样三轴压缩轴向应变蠕变叠加曲线

Fig. 4 Specimen triaxial compression creep test superposition curve under different confining pressures

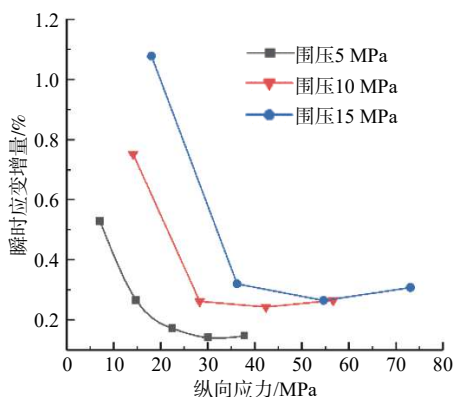


图 5 各围压条件下瞬时应变增量-应力曲线

Fig. 5 Instantaneous strain increment - stress curve under various confining pressures

发生拉-剪复合破坏, 试样上下两端及中部因局部拉应力集中而产生压碎带; 围压为 15 MPa 时, 试样主要发生剪切破坏。

4 不同围压条件下的岩石破坏特征分析

4.1 粉砂质泥岩破裂特征

在三轴试验中, 即便是完整岩石, 内部也会随机



图 6 三轴压缩蠕变试验条件下试样破裂形态

Fig. 6 Fracture morphology of specimens under the creep test condition

分布微裂纹, 试样破坏时的剪切面往往会沿着内部微裂纹发展。试样进入稳定破裂阶段后, 随着剪切位移的不断增大而产生拉张分支裂隙, 其裂隙方向向主应力方向偏转, 当与第一主应力方向平行时停止扩展; 当裂隙发展到不稳定阶段时, 由于主应力向裂隙方向偏转, 此时拉应力方向可与主应力方向相垂直, 进而形成与裂隙方向近垂直的压碎带, 与 5, 10 MPa 围压条件下试样破坏形态相符。当剪切带有一定厚度时, 表现为单剪; 在 15 MPa 围压条件下, 试样发生张性雁

裂,张性雁裂发展的方向与剪动方向的夹角小于 45° 。

图7为试样拉剪裂纹示意图,图中红色线条为剪切裂纹形成的剪切面,蓝色实线条为张性雁裂,蓝色虚线框内存在由拉应力形成的压碎带。当围压为5 MPa时,常规三轴试验与三轴压缩蠕变试验中试样均发生拉剪破坏,各自有1条剪切破坏面,在试样两端均出现由拉应力引起的压碎带。试样中部有张性雁裂出现,但在蠕变试样中,还产生了1条近平行于轴向的拉张裂纹。当围压为10 MPa时,常规三轴与蠕变试验岩样各自有1条贯穿试样的剪切破裂面。不同的是常规三轴试样的张性雁裂更明显,蠕变试样压碎带的体积较大。当围压为15 MPa时,常规三轴试验中试样张拉应力作用不明显,表现为单剪,但在蠕变试样中,剪切面较为粗糙,形成有一定厚度的剪切影响带。总体来说,随围压的增大,试样由拉-剪复合破坏向剪切破坏过渡,剪切面与水平方向的夹角变小,微裂纹数量有所减少。在相同的围压条件下,蠕变试验的剪切面与水平方向的夹角要大于常规三轴试验,且蠕变试验形成的剪切影响带厚度要大于常规三轴试验。

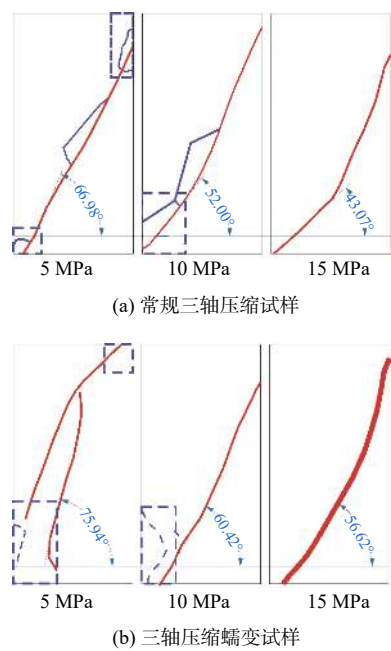


图7 粉砂质泥岩的拉、剪裂纹示意图

Fig. 7 Diagram of tensile and shear cracks in rock

4.2 不同围压下破裂机理分析

(1) 细观参数确定

根据上述粉砂质泥岩蠕变特性研究,基于PFC软件建立了数值模拟模型,数值模型高100 mm、宽

50 mm,模型中最小颗粒半径取0.45 mm,与粉砂质泥岩颗粒粒径处于同一个数量级,颗粒半径比为1.67。模型孔隙率0.16,颗粒密度取 2.64 g/cm^3 。颗粒接触采用平行黏结模型,半径乘子1.0。采用5, 10, 15 MPa围压条件下的常规三轴数值试验,对粉砂质泥岩进行参数标定,通过试算确定粉砂质泥岩细观参数,结果见表3。

表3 用于PFC数值模拟的粉砂质泥岩细观参数		
Table 3 PFC microscopic parameters of silty mudstone		
细观参数	参数类型	参数值
颗粒参数	颗粒模量/GPa	1.486
	刚度比	1.4
	摩擦系数	0.5
平行粘结参数	粘结模量/GPa	27.5
	刚度比	1.4
	抗拉强度/MPa	105
	黏聚力/MPa	275
	内摩擦角/($^{\circ}$)	42

图8为试样在15 MPa条件下常规三轴压缩试验的应力-应变曲线,数值模拟试验与室内试验的曲线吻合较好,2种试验曲线的弹性变形阶段、屈服阶段、峰值和峰后破坏阶段都比较一致。由此可见,表2中的颗粒流细观参数可用于川藏铁路贡觉地区粉砂质泥岩的力学参数模拟。

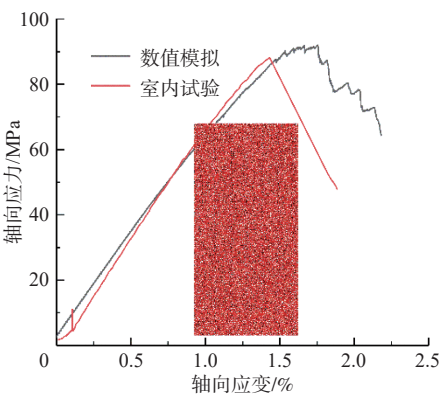


图8 室内试验与数值模拟试验应力-应变曲线

Fig. 8 Laboratory test and curve of stress - strain of the numerical simulation test

(2) 破坏特性分析

由图9(a)可以看出,围压5 MPa时试样破坏程度较高,试样右下部位形成以拉张裂纹为主的贯通破坏面,且破坏面较起伏。由图9(b)可以看出,围压10 MPa时试样出现共轭剪切破坏,破坏面较平直,且破坏条带较窄。相比于围压5 MPa时的破坏试样,拉张裂纹

数量明显减少,剪切裂纹数量稍有增多。由图 9(c)可以看出,围压 15 MPa 时试样内部产生数条共轭剪切破裂带,但均没有贯穿试样,试样表现出一定的塑

性破坏特征。从试验数据及图 10 可以看出,轴向应变、侧向应变及体积应变都有随围压的增大而增大的趋势。

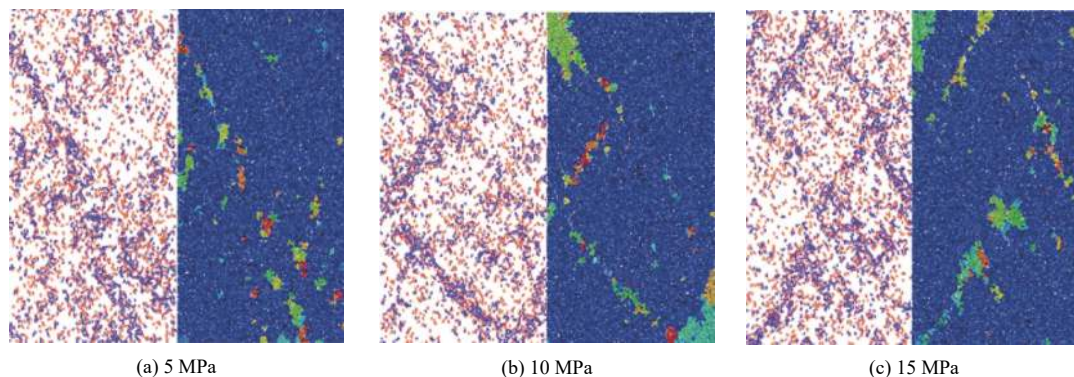


图 9 不同围压下数值模拟试验裂纹分布及破坏模式图(红色为剪切裂纹,蓝色为拉张裂纹)

Fig. 9 Crack distribution and failure mode diagram of the numerical simulation test under different confining pressures

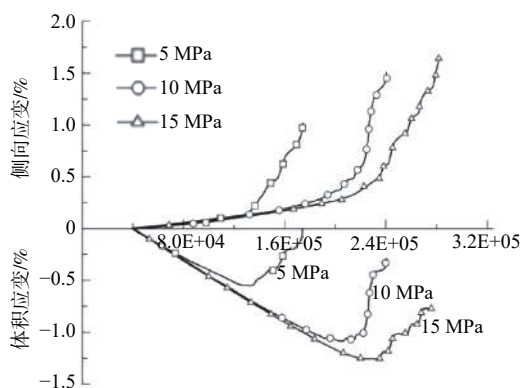


图 10 试样侧向应变和体积应变-时间步曲线

Fig. 10 Lateral strain and volumetric strain-time step curves of the sample

5 粉砂质泥岩长期强度及西原模型流变参数的围压效应

已有研究者开展了大量蠕变理论模型研究工作, Motta 等^[22]提出一个新的包含三个蠕变阶段的经验模型,该模型能够再现瞬态蠕变阶段和稳态蠕变阶段。Cao 等^[23]基于岩石的非线性损伤蠕变特性和损伤变量,将改进的 Burgers 模型、Hooke 模型和 St. Venant 模型串联起来,定义了一种新的高应力软岩非线性损伤蠕变本构模型。Hu 等^[24]提出在各个加载阶段,裂隙的轴向和侧向发生瞬时应变和蠕变应变。随着轴向应力的增大,侧向应变与轴向应变的关系由线性增加的趋势转变为指数增加的趋势。Yang 等^[25]利用西原模型进行了单元替换、级联和参数替换,得到了岩石的非线性变参数蠕变模型,并用白垩纪冻结软岩的蠕

变试验数据对改进后的模型进行了验证。Zhang 等^[26]采用非定常黏性体对西原模型进行了修正,结合 Lade-Duncan 准则,分析了隧道围岩处于黏弹塑性阶段的变形全过程,对隧道的变形与预测发挥了重要作用。因此,结合试验测试,建立合理的蠕变模型,可以更好地指导工程实践和防灾减灾。

5.1 粉砂质泥岩长期强度的确定

将试验获得的蠕变历时曲线及蠕变叠加曲线绘制等时应力-应变曲线(图 11),当轴向应力达到某一值时,曲线簇将变缓并存在一个显著拐点,将该拐点对应的轴向应力值作为在各级围压条件下的长期流动极限(σ_s),并根据莫尔-库仑理论绘制莫尔圆计算出长期强度参数 c 、 φ 值(表 4)。各级围压条件下长期流动极限和长期强度参数如表 4 所示,对比表 1 可以发现:在 5, 10, 15 MPa 围压条件下,长期强度与瞬时强度相比分别下降了 30.9%、40.1% 和 35.8%,黏聚力降低了 35.8%,内摩擦角降低了 23.1%。结果表明在高围压条件下,粉砂质泥岩更容易发生流变。试样的长期流动极限 σ_s 随围压的增大而增大,呈线性关系(图 12),其关系式为:

$$\sigma_s = 2.86\sigma_3 + 13.97, R^2 = 0.9995$$

在荷载长期作用下,岩石长期强度相低于瞬时强度,因此在工程施工时所采取的支持设计应适量提高安全等级,采取安全的支持措施。

5.2 基于西原模型的一维蠕变方程

岩石力学试验结果表明,粉砂质泥岩这种软黏土岩具有瞬时弹性变形、蠕变变形、应力松弛效应、弹

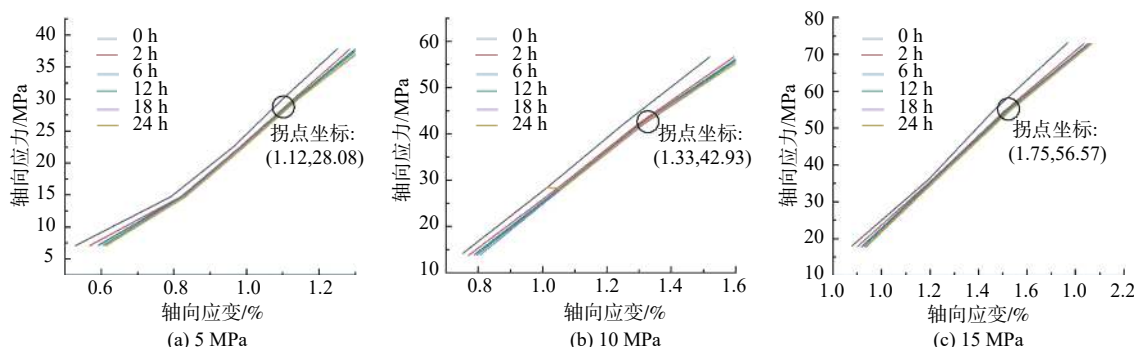


图 11 不同围压条件下轴向等时-应力应变曲线

Fig. 11 Axial isochronous-stress-strain curves under different confining pressures

表 4 长期强度参数

Table 4 Long-term strength parameter

围压 σ_3/MPa	长期流动极限 σ_s/MPa	σ_s/σ_0	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
5	28.08	0.71		
10	42.93	0.60	4.11	28.81
15	56.57	0.64		

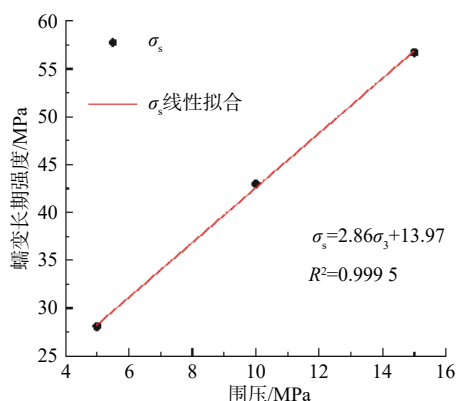


图 12 长期流动极限线性拟合

Fig. 12 Linear fitting of the long term flow limit

后效应及黏性流动特性,在几种经典的流变模型中,与西原模型的流变特征相近(图 13)。假设施加的轴向应力不变,通过解方程的方式求出西原模型各流变力学参数,进而分析围压效应,过程如下:

当 $\sigma < \sigma_s$ 时,

$$\frac{\eta_1}{E_0 + E_1} \dot{\sigma} + \sigma = \frac{E_0 + \eta_1}{E_0 + E_1} \dot{\varepsilon} + \frac{E_0 + \eta_1}{E_0 + E_1} \varepsilon \quad (1)$$

当 $\sigma > \sigma_s$ 时,

$$\ddot{\sigma} + \left(\frac{E_0}{\eta_1} + \frac{E_0}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} \right) \dot{\sigma} + \frac{E_0 E_1}{\eta_2 \eta_1} (\sigma - \sigma_s) = E_0 \ddot{\varepsilon} + \frac{E_0 E_1}{\eta_1} \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: E_0 ——试样每级应力施加后的瞬时弹性模量;

E_1 ——黏弹性模量;

η_1 ——黏塑性系数;

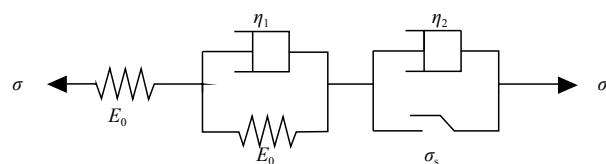


图 13 西原模型示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the Xiyuan model

η_2 ——黏弹性系数。

当蠕变的应力条件为 $\sigma = \sigma_c$, σ_c 为一定值,则可以求出:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{d\sigma}{dt} \right) = \frac{d\sigma}{dt} = 0 \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)(2),可求出化简后的西原模型蠕变方程:

$$\text{当 } \sigma < \sigma_s \text{ 时, } \varepsilon = \frac{\sigma_c}{E_0} + \frac{\sigma_c}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right) \quad (4)$$

$$\text{当 } \sigma > \sigma_s \text{ 时, } \varepsilon = \frac{\sigma_c}{E_0} + \frac{\sigma_c}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right) + \frac{\sigma_c - \sigma_s}{\eta_2} \quad (5)$$

5.3 蠕变参数及其围压效应

由图 2、图 3 和图 4 的轴向应变蠕变叠加曲线可知,当 $\sigma < \sigma_s$ 且 $t=0$ 时,试样发生瞬时蠕变,发生的瞬时应变为 ε_0 ,根据式(4)可得:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E_0} + \frac{\sigma_c}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right) = 0 \quad (6)$$

$$\text{则有: } 1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} = 0 \quad (7)$$

所以式(4)可表达为: $\varepsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E_0}$

$$\text{即 } E_0 = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_0} \quad (8)$$

当 t 增大,当试样开始发生稳态蠕变,此时的西原模型流变特征为黏弹性的,当 $t \rightarrow \infty$ 时,根据式(4)则有:

$$e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} = 0 \quad (9)$$

代入式(4)可得:

$$E_1 = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_t - (\sigma_c/E_0)} = \frac{\sigma_c}{\sigma_c - \sigma_0} \quad (10)$$

当 t 为任意时刻时, 由式(3)及式(10)结果可得:

$$\eta_1 = \frac{E_1 t}{\varepsilon_t - \varepsilon_0 - \frac{\sigma_c}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}\right)} \quad (11)$$

当 $\sigma > \sigma_s$ 时, 在任意时刻 t 根据式(5)可得:

$$\eta_2 = \frac{(\sigma_c - \sigma_s)t}{\varepsilon_t - \varepsilon_0 - \frac{\sigma_c}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}\right)} \quad (12)$$

将试验数据代入西原模型, 可得各流变参数, 如表 5 所示。

表 5 西原模型各流变参数
Table 5 Rheological parameters of the visco-elastoplastic creep model

σ_3 /MPa	σ_s /MPa	E_0 /GPa	E_1 /GPa	η_2 / (GPa·h)	η_1 / (GPa·h)
5	28.08	1.35	4.85	14.76	20.54
10	42.93	1.88	9.16	111.75	49.60
15	56.57	1.67	10.31	291.25	63.88

从表 5 可以看出各参数随着围岩增大表现出增大趋势, 表明围压对于各流变参数的变化具有影响。通过拟合可知各流变参数与围压有以下关系: 瞬时弹性模量 E_0 及黏弹性系数 η_2 与围压 σ_3 整体上呈线性关系递增, 其中黏弹性系数 η_2 与围压 σ_3 的拟合度 R^2 可达 0.97。黏弹性模量 E_1 与围压 σ_3 呈对数性增长, 拟合度 R^2 可达到 0.97。黏塑性系数 η_1 与围压 σ_3 呈指数型增长, 拟合度 R^2 可达到 0.96。

5.4 粉砂质泥岩蠕变强度及其对铁路工程的影响

贡觉某隧道围岩大变形破坏与岩石的蠕变特性密切相关, 铁路工程穿越区处于高地应力地区, 相对周围岩体环境, 粉砂质泥岩呈现出软岩的特性, 在开挖后围岩体极易出现蠕变破坏现象。根据试验结果可知岩石蠕变破坏需经历衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变三个阶段。粉砂质泥岩总变形量、长期强度及瞬时应变增量随围压增加而增加, 当应力水平较低时, 粉砂质泥岩的蠕变量较小, 当应力水平较大时, 岩石的蠕变量迅速增加。隧道开挖导致岩体中应力发生二次分布, 围岩应力差逐渐增大, 结构面张开或滑移, 围岩整体强度和瞬时弹性模量降低, 岩体表现出显著的结构蠕变特点。因此, 在该地区修建深埋长大隧道时要密切关注围岩体蠕变产生的大变形现象。同时试验结果表明粉砂质泥岩的长期强度受围压的影响较大, 围压越大, 越容易产生蠕变破坏。因此, 应加强

对已建隧道围岩在高地应力影响下的长期强度及变形监测, 确保隧道的长期安全运营。

6 结论

(1) 在常规三轴压缩试验与三轴压缩蠕变试验中, 随着围压的增大, 粉砂质泥岩由拉-剪破坏逐渐向剪切破坏过渡, 压碎带影响范围变小, 宏观上裂纹数量变少, 破裂面与水平方向的夹角变小。

(2) 基于二维颗粒流数值模拟软件 PFC^{2D} 对常规条件下三轴压缩试验进行了数值模拟, 结果表明: 随围压的增大, 裂纹数量减少, 轴向应变以及侧向应变、体积应变均随围压的增大而增大。与室内试验结果相一致, 也验证了数值模拟的可靠性。

(3) 贡觉地区粉砂质泥岩长期强度随围压的增大而增大。与常规三轴试验瞬时强度对比, 三轴压缩蠕变长期强度在围压 5, 10, 15 MPa 条件下分别下降了 30.9%、40.1% 和 35.8%, 黏聚力降低了 35.8%, 内摩擦角降低了 23.1%。瞬时弹性模量及黏弹性系数与围压整体上呈线性递增, 黏弹性模量与围压呈对数型增长, 黏塑性系数与围压呈指数型增长。

通过常规试验和三轴压缩蠕变试验得到的岩石力学参数及蠕变力学特性, 可为川藏铁路深埋隧道设计、施工和灾害防治提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 徐正宣, 张利国, 蒋良文, 等. 川藏铁路雅安至林芝段工程地质环境及主要工程地质问题[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 29 - 42. [XU Zhengxuan, ZHANG Ligu, JIANG Liangwen, et al. Engineering Geological Environment and Main Engineering Geological Problems of Ya'an-Linzhi Section of the Sichuan-Tibet Railway[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 29 - 42. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 郭长宝, 吴瑞安, 蒋良文, 等. 川藏铁路雅安—林芝段典型地质灾害与工程地质问题[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 1 - 17. [GUO Changbao, WU Rui'an, JIANG Liangwen, et al. Typical geohazards and engineering geological problems along the Ya'an-Linzhi section of the Sichuan-Tibet Railway, China[J]. Geoscience, 2021, 35(1): 1 - 17. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张永双, 郭长宝, 李向全, 等. 川藏铁路廊道关键水工环地质问题: 现状与发展方向[J/OL]. 水文地质工程地质, 2021-06-17 [2021-07-27]. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104001> [ZHANG Yong

- shuang, GUO Changbao, LI Xiangquan, et al. Key problems on hydro-engineering-environmental geology along the Sichuan-Tibet Railway corridor: current status and development direction[J/OL]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021-06-17[2021-07-27]. (in Chinese with English abstract)] <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104001>.
- [4] LU C F, CAI C X. Challenges and countermeasures for construction safety during the Sichuan-Tibet Railway project[J]. Engineering, 2019, 5(5): 833 – 838.
- [5] 王庆武, 巨能攀, 杜玲丽, 等. 深埋长大隧道岩爆预测与工程防治研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 88 – 94. [WANG Qingwu, JU Nengpan, DU Lingli, et al. Research on rockburst prediction and engineering measures of long and deep-lying tunnels[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 88 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈仕阔, 李涵睿, 周航, 等. 基于岩爆危险性评价的川藏铁路某深埋硬岩隧道方案比选研究[J/OL]. 水文地质工程地质, 2021-06-22 [2021-07-27]. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103099> [CHEN Shikuo, LI Hanrui, ZHOU Hang, et al. Route selection of deep lying and hard rock tunnel in Sichuan-Tibet Railway based on rockburst risk assessment[J/OL]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021-06-22[2021-07-27]. (in Chinese with English abstract)] <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103099>.
- [7] 吕擎峰, 韩文峰. 金川岩体各向异性与巷道支护变形破坏关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 149 – 152. [LYU Qingfeng, HAN Wenfeng. Relationship between anisotropy of Jinchuan rockmass and deformation and failure of adit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 149 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王成虎, 高桂云, 杨树新, 等. 基于中国西部构造应力分区的川藏铁路沿线地应力的状态分析与预估[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2242 – 2253. [WANG Chenghu, GAO Guiyun, YANG Shuxin, et al. Analysis and prediction of stress fields of Sichuan-Tibet Railway area based on contemporary tectonic stress field zoning in Western China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(11): 2242 – 2253. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘新喜, 李盛南, 周炎明, 等. 高应力泥质粉砂岩蠕变特性及长期强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 138 – 146. [LIU Xinxi, LI Shengnan, ZHOU Yanming, et al. Study on creep behavior and long-term strength of argillaceous siltstone under high stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 138 – 146. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘高, 张帆宇, 李新召, 等. 木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5521 – 5526. [LIU Gao, ZHANG Fanyu, LI Xinzhaoh, et al. Research on large deformation and its mechanism of muzhailing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup2): 5521 – 5526. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 方星桦, 杨曾, 阳军生, 等. 高地应力隧道蚀变花岗岩地层围岩大变形特征及控制措施[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(5): 92 – 101. [FANG Xinghua, YANG Zeng, YANG Junsheng, et al. Large deformation characteristics and control measures of surrounding rock in altered granite stratum of high ground stress tunnel[J]. China Railway Science, 2020, 41(5): 92 – 101. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2610 – 2615. [YIN Xiaotao, GE Xiurun, LI Chunguang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup1): 2610 – 2615. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张连英, 张树娟, 茅献彪, 等. 加载速率对煤系泥岩脆-延性转变影响的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 391 – 396. [ZHANG Lianying, ZHANG Shujuan, MAO Xianbiao, et al. Experimental research of influence of loading rate on brittle-ductile transition of mudstone in coal rock strata[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(2): 391 – 396. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 陈镜丞. 湿热作用下粉砂质泥岩的渗流、力学特性及裂隙演化规律研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019 [CHEN Jingcheng. Study on seepage, mechanical properties and fracture evolution of silty mudstone under hygrothermal action[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 范庆忠, 李术才, 高延法. 软岩三轴蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1381 – 1385. [FAN Qingzhong, LI Shucai, GAO Yanfa.

- Experimental study on creep properties of soft rock under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1381 – 1385. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 徐慧宁, 庞希斌, 徐进, 等. 粉砂质泥岩的三轴蠕变试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(1): 69 – 74. [XU Huining, PANG Xibin, XU Jin, et al. Study on triaxial creep test of silty mudstone[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(1): 69 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 杨振伟, 金爱兵, 周喻, 等. 伯格斯模型参数调试与岩石蠕变特性颗粒流分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 240 – 248. [YANG Zhenwei, JIN Aibing, ZHOU Yu, et al. Parametric analysis of Burgers model and creep properties of rock with particle flow code[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(1): 240 – 248. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 徐平, 李云鹏, 丁秀丽, 等. FLAC^{3D}粘弹性模型的二次开发及其应用[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(2): 10 – 13. [XU Ping, LI Yunpeng, DING Xiuli, et al. Secondary development and application of visco-elastic constitutive model in FLAC^{3D} software[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2004, 21(2): 10 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 丛宇, 王在泉, 郑颖人, 等. 基于颗粒流原理的岩石类材料细观参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1031 – 1040. [CONG Yu, WANG Zaiquan, ZHENG Yingren, et al. Experimental study on microscopic parameters of brittle materials based on particle flow theory[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(6): 1031 – 1040. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王俊光, 杨鹏锦, 梁冰, 等. 基于颗粒流程序的不同加载条件下泥岩蠕变破裂规律研究[J]. *实验力学*, 2019, 34(5): 873 – 882. [WANG Junguang, YANG Pengjin, LIANG Bing, et al. Study on the creep fracture laws of mudstone under different loading and unloading conditions based on particle flow code[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2019, 34(5): 873 – 882. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081 – 1106. [SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(6): 1081 – 1106. (in Chinese with English abstract)]
- [22] MOTTA G E, PINTO C L L. New constitutive equation for salt rock creep[J]. *Rem: Revista Escola De Minas*, 2014, 67(4): 397 – 403.
- [23] PING C, WEN Y D, WANG Y X, et al. Study on nonlinear damage creep constitutive model for high-stress soft rock[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(10): 1 – 8.
- [24] HU K F, FENG Q, LI H, et al. Study on creep characteristics and constitutive model for thalam rock mass with fracture in tunnel[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36(2): 827 – 834.
- [25] YANG L, LI Z D. Nonlinear variation parameters creep model of rock and parametric inversion[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36(5): 2985 – 2993.
- [26] ZHANG B W, HU H, YU W, et al. Timeliness of creep deformation in the whole visco-elasto-plastic process of surrounding rocks of the tunnel[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37(2): 1007 – 1014.

编辑: 汪美华