

夏洪春,严滑钧,朱训国,等.深埋隧洞中黏结型锚固系统的黏结性能研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(2): 175-185.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240113
XIA Hongchun, YAN Huajun, ZHU Xunguo, et al. Study of the bonding performance of bonded anchorage systems in deep-buried tunnels[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(2): 175-185. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240113

深埋隧洞中黏结型锚固系统的黏结性能研究

夏洪春^{1,2}, 严滑钧¹, 朱训国^{1,2*}, 张传庆³, 郭利军⁴, 薛子钊¹

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622; 2. 大连大学 辽宁省复杂结构灾害预测与防治重点实验室, 辽宁 大连 116622; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430064; 4. 内蒙古能源发电投资集团有限公司 乌斯太 热电厂, 内蒙古 阿拉善盟 750336)

摘要: 为研究深埋隧洞中黏结型锚固系统的黏结性能, 保证深部隧道开挖安全, 以锦屏二级水电站2#引水深埋隧洞的高应力条件为研究背景, 采用数值模拟、试验和监测相结合的方法, 研究隧洞开挖与锚杆拉拔过程中的黏结性能。研究表明: 开挖后围岩应力会发生重分布, 围压总体上随开挖深度的增大而增大, 围岩应力呈不均匀性, 出现局部失稳现象; 当围岩的强度增大时, 黏结型锚杆的剪应力峰值随之增大, 达到峰值后, 剪应力的衰减幅度变大; 锚杆的受力过程可分为弹性、塑性软化和完全滑移3个阶段, 最终完全失效; 当锚杆体-注浆体直径差为6~9 mm时, 黏结性能最优。研究结果可为黏结型锚杆在深埋隧洞等地下工程中的应用提供参考。

关键词: 锚固系统; 围岩; 剪切应力; 直径差; 黏结性能; 深埋隧洞

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)02-0175-11

Study of the bonding performance of bonded anchorage systems in deep-buried tunnels

XIA Hongchun^{1,2}, YAN Huajun¹, ZHU Xunguo^{1,2*}, ZHANG Chuanqing³, GUO Lijun⁴, XUE Ziqian¹

(1. School of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Complex Structure Disaster Prediction and Prevention, Dalian University, Dalian 116622, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430064, China; 4. Inner Mongolia Guodian Energy Investment Company Limited, Alxa 750336, China)

Abstract: In order to investigate the bonding performance of bonded anchorage systems in deep-buried tunnels and ensure the safety during the excavation of deep tunnels, this study takes the high-stress conditions of the No. 2 diversion deep-buried tunnel at Jinping Second Hydropower Station as a research background. The bonding performance during tunnel excavation and anchor pull-out processes was studied by combining numerical simulation, experiment and monitoring. The study analyzed the variation patterns of stress states in surrounding rock at different depths. Based on the stress conditions obtained, a physical model of the anchorage system was constructed to analyze the load-displacement evolution characteristics at the interface between the anchor rod and grouting body during the pull-out process. The research results show that after excavation, the stress of the surrounding rock is redistributed, with the confining pressure generally increasing with depth, and the inhomogeneity and local instability of the surrounding rock stress occurring. As the resistance of surrounding rock increases, the peak shear stress of the bonded anchors rises. After reaching the peak value, the shear stress decreases more rapidly. The force process of the anchor can be categorized into three phases: the elastic phase, the plastic softening phase, and the complete sliding phase, culminating in complete failure. When the diameter difference between the anchor rod and grouting body is about 6~9 mm, the bonding performance is optimal. The model precision was confirmed through the integration of lab testing and on-site monitoring data. This study can

收稿日期: 2024-04-30 修回日期: 2024-06-20 接受日期: 2024-07-12 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279116); 辽宁省复杂结构灾害预测与防治重点实验室平台重点项目(202101ZD02)

作者简介: 夏洪春(1978-), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 主要从事煤矿安全高效开采方面的研究。E-mail: xhch@dlu.edu.cn

通信作者: 朱训国(1974-), 男, 山东淄博人, 博士, 副教授, 主要从事地下能源结构稳定控制方面的研究。E-mail: zhuxunguo@dlu.edu.cn

provide a reference for the application of bonded anchors in deep-buried tunnels and other underground engineering projects.

Keywords: anchor system; surrounding rock; shear stress; diameter difference; bonding performance; deep-buried tunnel

0 引言

中国岩体工程建设规模位居世界第一。重大岩体工程建设面临高能地质环境和复杂工程条件,技术难度较大。锚杆锚固技术是隧道、边坡、地质灾害等领域中应用最为广泛的支护形式,支护效果较好,获得普遍认可。锚杆植于岩体之中,随岩体变形而发挥作用,工作机理较复杂。学者们在锚固系统的工作机理和力学模型方面开展了大量研究,采用试验、数值模拟和理论推导等多种方法,取得许多有价值的研究成果。

康红普等^[1-2]、胡滨等^[3-4]、胡伟等^[5]、赵象卓^[6]、吴泽坤等^[7]和林健等^[8-9]通过套筒拉拔试验,较为系统地研究了影响树脂锚杆锚固性能的因素。研究表明,树脂锚杆的黏结性能与钻孔孔径、锚杆在钻孔中的居中度、锚固剂的物理力学性质、围岩强度等多种因素有关,其中,锚杆杆体形状和周围岩体状况对锚固性能影响显著。同时,学者们建议应深入研究锚杆与锚固剂、锚固剂与围岩界面的力学特性,从宏观和微观层面研究接触面力学性质对力的传递的影响。张传庆等^[10-12]、邓亮等^[13]研究了恒定法向载荷、恒定法向刚度条件下横肋参数及法向应力水平对锚杆体-砂浆、锚杆体-树脂界面剪切力学性能、法向变形能力及破坏机制的影响。王军等^[14]利用自主研发的自平衡抗浮锚杆-旋喷体模型试验设备,对地下水浮力与基坑土方卸荷共同作用下锚杆-旋喷体的工作性能开展研究,揭示其载荷传递机制,分析锚杆的极限承载力与旋喷体厚度及锚杆间距的关系,并提出锚杆-旋喷体结构优化参数,使抗拔力达到最优。

目前,对于锚杆支护结构的研究,大部分理论分析仍基于弹塑性力学原理,将围岩假定为小变形,甚至将锚杆的约束作用简化为对半无限弹性体的作用。此外,高能地质环境下岩体非线性非连续力学行为突出,经验积累有限,传统的支护设计理论与方法已无法满足高能地质环境下岩体的支护设计要求,常需结合软件来开展数值模拟。为扩展锚杆在岩土工程,特别是在高应力围岩条件下深埋隧洞中的应用,本文研究团队在前期开展了大量研究工作^[15-18],并得出如下结论:建

议采用圆形截面作为掘进截面,采用锚杆支护方法将高强度岩石固定在一起^[18]。本文基于前期研究成果,考虑锚固系统“三体两面”的相互作用,运用MIDAS有限元软件,建立黏结型锚固系统的隧道开挖及拉拔模型,研究不同深度下围岩应力的变化规律,以及开挖过程中锚杆体-注浆体界面载荷-位移的演化特征,为进一步揭示深埋隧洞中锚固系统的作用机理提供参考。

1 工程概况

锦屏二级水电站位于四川省内,是一座超深埋、长隧洞的大型水电站。根据地质勘探资料^[19],锦屏二级水电站距锦屏一级坝址7.5 km,年均发电量高达 $2.423 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。含4条引水隧洞,其中,2#洞门采用台阶法施工,全长采用钢筋混凝土衬砌结构,隧道沿线穿越的岩层结构有大理岩、绿片岩和砂板岩等,2#隧洞引(2)12+100-9+800对应的埋深为1 900~2 400 m。锦屏二级水电站位置及隧洞穿越地层剖面见图1。

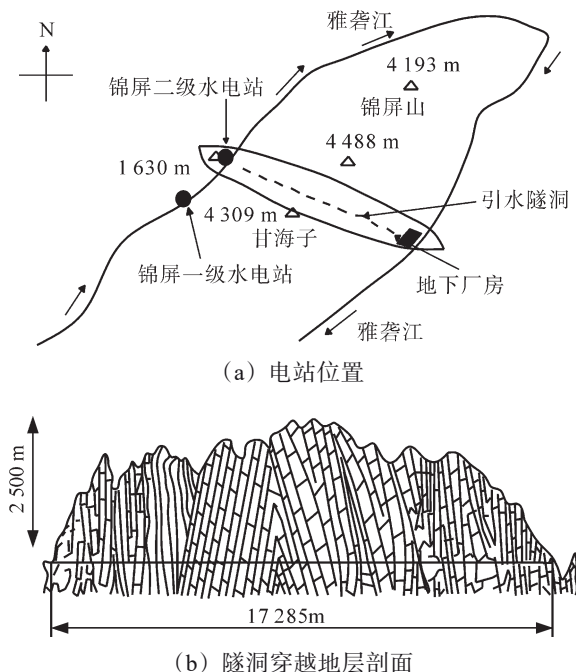


图1 锦屏二级水电站位置及隧洞穿越地层剖面

Fig.1 overall location of Jinping II hydropower station and the tunnel passes through the stratum section

2 不同深度围岩应力的变化规律

2.1 参数的选取

根据结构面抗剪强度参数测定方法与测试结果, 选取模型参数^[20]。锚杆材料采用直径为 25 mm 的 HRB500 钢筋, 长为 6 m; 注浆体材料采用 M35

高强度水泥砂浆; 岩体主要由Ⅲ级大理岩构成。根据《深埋硬岩隧洞动态设计方法》^[19]和《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB50086—2015) 确定物理参数。隧道结构参数见表 1, 材料物理参数见表 2。

表 1 隧道结构参数

Tab.1 tunnel structure parameters

结构类型	单元类型	本构模型	材料	截面类型	截面尺寸/m
喷混	2D 板单元	弹性	C20	板	0.150(厚)
锚杆	1D 植入式桁架单元	弹性	HRB500	圆	0.025(直径); 6.000(长)
注浆体	3D 实体单元	摩尔库伦	砂浆	圆柱体	0.040(直径)
大理岩	3D 实体单元	摩尔库伦			
绿片岩	3D 实体单元	摩尔库伦			
砂板岩	3D 实体单元	摩尔库伦			
锚固剂-围岩	界面单元	摩尔库伦			
锚固剂-锚杆	界面单元	弹性			

表 2 材料物理参数

Tab.2 material physical parameters

材料类型	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	抗剪强度 τ/MPa
大理岩	55	0.25	25.0	0.82	35	
绿片岩	42	0.22	21.0	0.54	27	
砂板岩	21	0.29	18.0	0.18	21	
C20	25	0.20	24.0			
砂浆	1	0.30	22.0	0.86	30	
HRB500	200	0.30	78.5			
锚固剂-围岩		0.26		0.80	20	0.85
锚固剂-锚杆		0.26		1.72	24	

2.2 模型边界及载荷设置

采用 MIDAS 有限元软件建立模型。隧道开挖

剖面及模型网格见图 2。隧道开挖洞径为 11.5 m, 模型尺寸为 65 m (X) $\times$ 30 m (Y) $\times$ 100 m (Z)。

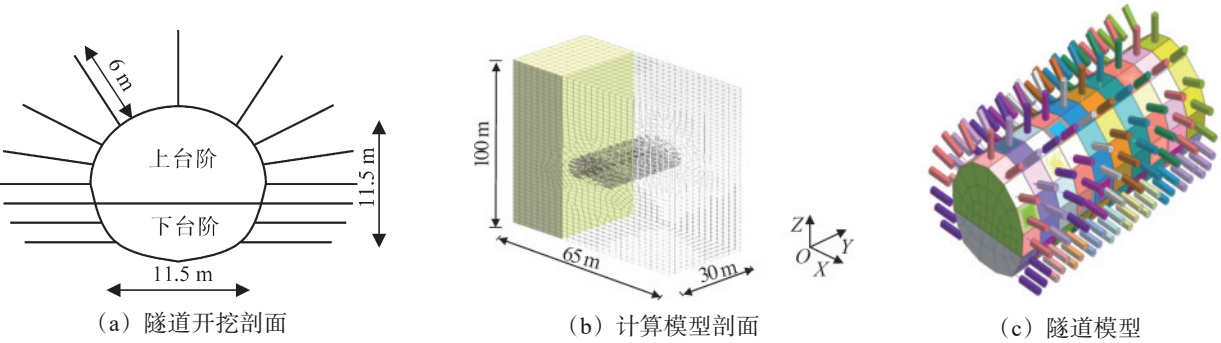


图 2 隧道开挖剖面及模型网格

Fig.2 tunnel excavation profile and model grid

在黏结型锚固系统隧道开挖模型上添加自动约束, 使模型前后、左右及上方受到法向约束, 下表面受到各个方向约束。测量模型顶面到底面的距离, 根据岩体容重计算模型顶面位置的地应

力值, 并通过 MIDAS 软件的“初始平衡力”, 将地应力加在模型上。MIDAS 软件可根据设置的岩体参数自动计算构造应力等深埋应力, 实现深埋载荷的施加。边界条件施加剖面见图 3。

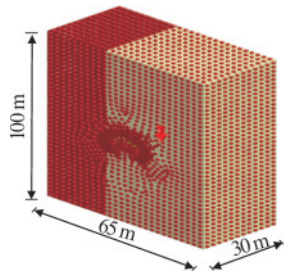


图3 边界条件施加剖面

Fig.3 boundary conditions apply profile graphs

深埋载荷为

$$Q=A\gamma h, \quad (1)$$

式中: A 为地基底面积, m^2 ; γ 为围岩容重, kN/m^3 ; h 为埋深, m 。

2.3 施工步骤模拟

隧道开挖及衬砌支护施工步骤见图4。采用上下台阶法开挖隧道,沿 Y 向每3 m开挖一步。开挖上台阶隧道后,初次喷射上台阶混凝土,打入上台阶锚杆,随即注入上台阶注浆体,然后开挖下台阶隧道,初次喷射下台阶混凝土,打入下台阶锚杆,注入下台阶注浆体。1个开挖环包含2个施工阶段,共20个施工阶段。在初始阶段,激活上下台阶隧道、上下台阶注浆体、大理岩、自重、深埋应力、边界约束,并进行位移清零,模拟开挖前工况。建模时取最不利工况,为方便研究,本文二次衬砌仅作为安全储备,不予模拟。

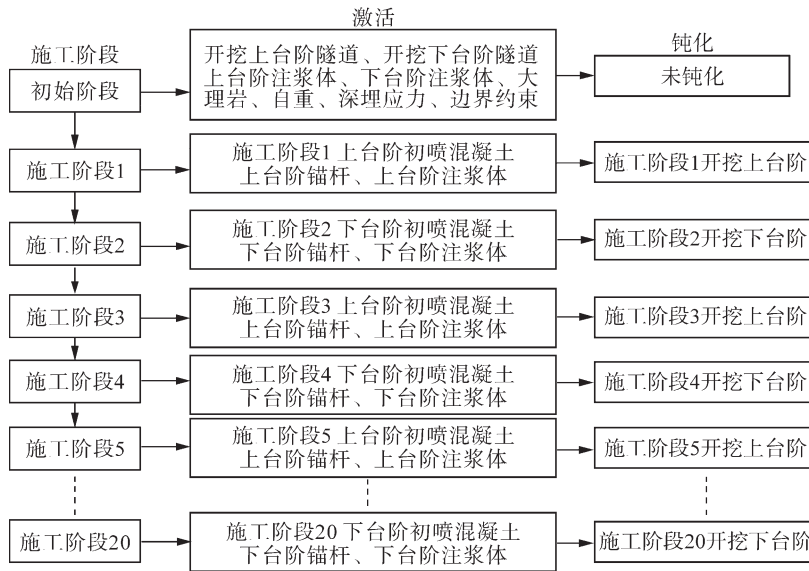


图4 隧道开挖及衬砌支护施工步骤

Fig.4 tunnel excavation and lining support construction steps

2.4 计算结果与分析

隧道开挖施工阶段掌子面进尺见图5。

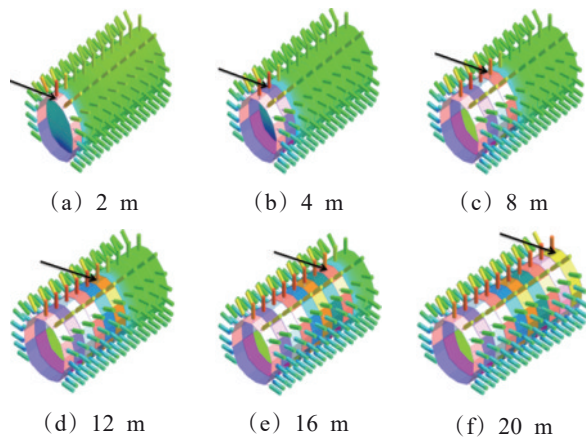


图5 隧道开挖施工阶段掌子面进尺

Fig.5 tunnel face footage in tunnel excavation construction stage

隧道的初始应力场分布见图6。由图6可知,隧道开挖前,最大围岩应力出现在模型顶部,约为 -0.599 MPa ,最小围岩应力出现在模型底部,约为 -3.037 MPa 。在垂直于地表方向及重力方向,浅部地层的围岩应力较接近,地应力呈“层状”分布。

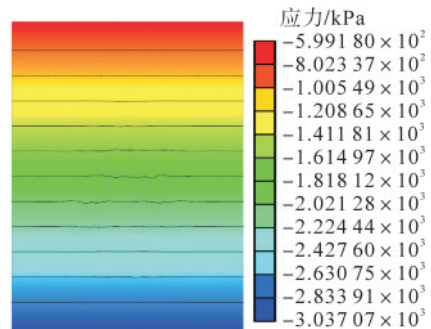


Fig.6 initial stress field distribution

隧道开挖完成后应力场分布见图7。由图7可知,隧道开挖完成后,最大围岩应力出现在拱顶,约为0.146 MPa,与开挖前相比,增大了124.4%;最小围岩应力出现在拱腰,约为-4.09 MPa,与开挖前相比,减小了34.7%。受扰动影响,洞周应力场逐渐向垂直于隧道开挖方向转变,这是由于台阶法施工会改变初始应力场,应力发生重分布,集中在隧道周围,隧道拱顶和拱底处于应力增高区,拱腰处于应力降低区,远离隧道的围岩仍受初始应力作用。

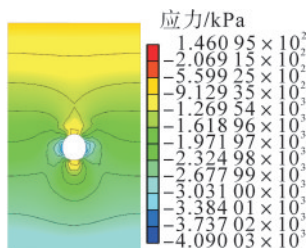
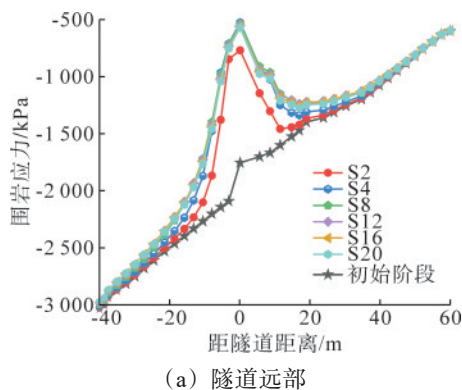
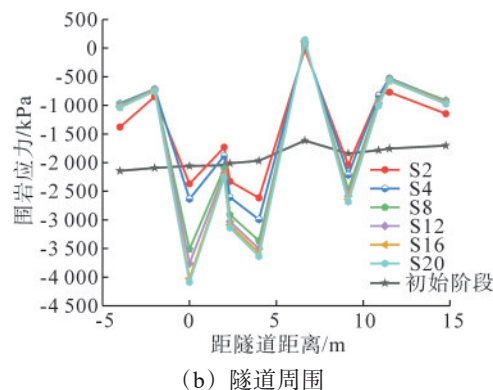


图7 隧道开挖完成后应力场分布

Fig.7 stress field distribution after tunnel excavation is completed



(a) 隧道远部



(b) 隧道周围

图8 不同施工阶段围岩应力变化

Fig.8 change of surrounding rock stress in different construction stages

通过以上分析可知,在高应力围岩中,建议在隧道周围拱顶、拱腰及拱底处,采取增加锚杆密度和分层锚固等技术措施来增加锚固力,进一步提高隧道支护的稳定性。

3 载荷-位移演化特征

3.1 物理参数的选取

为便于分析黏结型锚固系统“三体两面”(锚杆体-围岩体、注浆体、注浆体-围岩体界面、锚杆体-注浆体界面)的相互作用,建立黏结型锚固系统结构计算模型,见图9。

不同施工阶段围岩应力变化见图8,其中,S2表示施工阶段2(开挖第1环),S4表示施工阶段4(开挖第2环),以此类推。图8(a)以隧道整体作为“0”深度,图8(b)以隧道内部中心线作为“0”深度。对每个施工阶段不同深度处的围岩应力进行分析,由图8(a)可知,整体上围岩应力随开挖深度的增大而增大。图8(b)中,靠近隧道拱顶和拱底处,围岩应力呈先减小后增大的变化趋势。与初始状态相比,开挖深度为-4 m、-2 m、0 m、2 m、4 m处,不同施工阶段围岩应力的最大变化率分别为54.9%、65.9%、98.6%、15.4%和84.9%,隧道拱腰处受围岩应力的影响最大。随着开挖深度的增大,隧道周围的围岩应力变化显著,应力的非均匀性逐渐增大,在隧道拱顶和拱底处形成高应力区,最大拉应力出现在拱顶处,约为0.146 MPa,拱腰处侧壁受土体挤压形成低应力区,最大压应力约为-4.090 MPa,导致局部失稳。

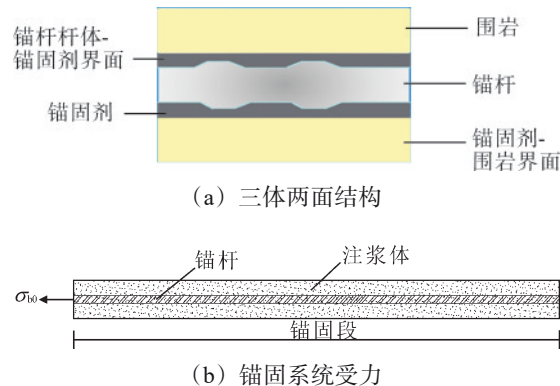


图9 黏结型锚固系统结构计算模型

Fig.9 structural calculation model of bonded anchorage system

接触面的破坏模式遵循 M-C 屈服强度准则^[21-22], 计算式^[23]为

$$\tau_b = \frac{\alpha}{2} \sigma_{b0} e^{-\frac{2\alpha x}{d_b}}, \quad (2)$$

式中: τ_b 为锚杆杆体剪应力, MPa; σ_{b0} 为锚杆杆体拉应力, MPa; x 为距锚固初始点的距离, m; $\alpha = \left\{ 2G_r G_g E_b^{-1} \left[G_r \ln(d_g/d_b) + G_g \ln(d_0/d_g) \right] \right\}^{-1/2}$, 可用于描述锚杆与围岩体之间的相互作用特性, 其中, G_r 为围岩体的剪切模量, MPa, $G_r = E_r/2(1+\mu_r)$, G_g 为锚固剂的剪切模量, MPa, $G_g = E_g/2(1+\mu_g)$; E_b 、 E_r 、 E_g 分别为锚杆杆体、围岩体及锚固剂的弹性模量, MPa; μ_r 、 μ_g 分别为围岩体、锚固剂的泊松比; d_g 、 d_b 、 d_0 分别为钻孔直径、锚杆杆体直径、锚杆所受影响范围的直径, m。

在进行锚杆拉拔试验时, 施加逐渐增大的拉拔力, 记录锚杆在不同拉拔力作用下的位移变化, 得到载荷-位移曲线, 见图 10。

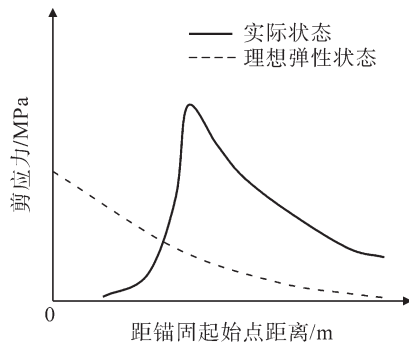


图 10 拉拔状态下锚杆的载荷-位移曲线

Fig.10 load-displacement curve in the anchor rod pullout state

由图 10 可知, 在达到一定拉拔力时, 剪应力从锚固段开始逐渐增大, 在距锚固段一定范围内剪应力达到峰值, 即为剪切强度。达到材料的剪切强度极限时, 锚杆与围岩接触面或锚杆本身发生剪切破坏。此时, 剪应力较小, 甚至可能趋近于 0。

锚杆最大拉拔力^[23]为

$$P_{\max} = \pi d_b s_p \left[\omega \left(L + \frac{d_b}{2\alpha} \ln \omega - \Delta - x_0 \right) + \frac{1}{2} \Delta (1 + \omega) + \frac{d_b}{2\alpha} (1 - \omega) \right], \quad (3)$$

式中: ω 为强度比值, $\omega = s_r/s_p$, s_r 、 s_p 分别为残余剪切强度、峰值剪切强度, MPa; L 为锚固长度, m; x_0 为剪应力从零开始线性增长的点对应的位置, m; Δ 为位移差, $\Delta = x_2 - x_1$, 其中, x_1 为剪应力达到峰值剪切强度点时所对应的位置, m; x_2 为

剪应力从峰值减小至残余剪切强度的点所对应的位置, m。

由式 (2)、式 (3) 可知, 锚杆杆体的拉拔力主要受如下因素影响: 锚杆杆体的直径和弹性模量; 锚固剂的弹性模量、泊松比、剪切强度、残余剪切强度、环形厚度和锚固长度; 岩体的弹性模量和泊松比。

采用 MIDAS 有限元软件进行数值模拟, 物理参数见表 1 和表 2, 围岩体的计算模型采用 10 m×10 m×10 m 的立方体实体单元。通过界面单元模拟锚杆体-注浆体界面和注浆体-围岩体界面。锚杆体-注浆体界面采用弹性本构模型, 注浆体-围岩体界面服从 M-C 屈服强度准则。锚固系统拉拔模型网格见图 11。

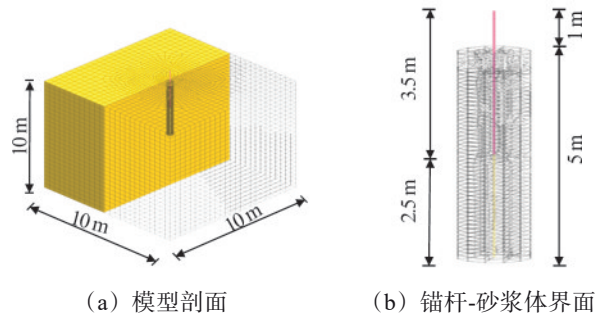


图 11 锚固系统拉拔模型网格

Fig.11 anchorage system pull-out model grid

3.2 边界及载荷布置

锚固系统拉拔模型采用自动约束, 模型前后、左右方向受到法向约束, 下表面受到各个方向的约束。在锚杆自由段顶部施加竖向拉拔力, 初级载荷为 10 kN, 每级增加 10 kN。模型边界及拉拔载荷布置见图 12。

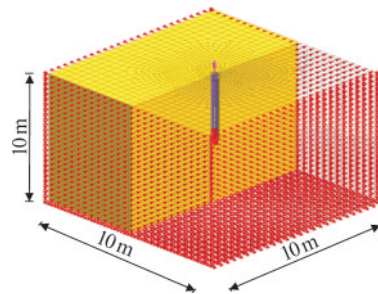


图 12 模型边界及拉拔载荷布置

Fig.12 model boundary and pull-out load arrangement

3.3 各阶段施工步骤模拟

各阶段施工步骤模拟见图 13。其中, 施工阶段 n 以锚固系统拉拔载荷的锚杆塑性区发生破坏为准。

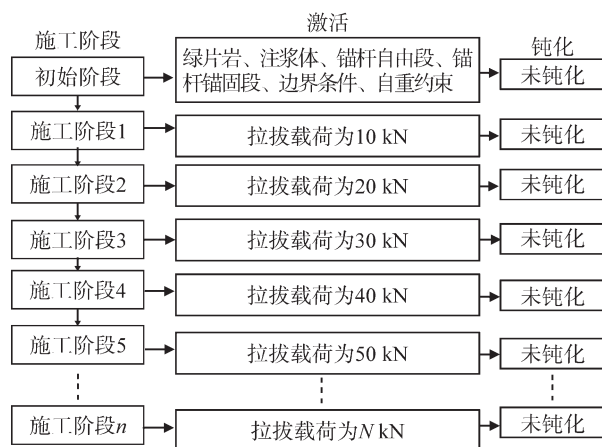


图13 各阶段施工步骤模拟

Fig.13 simulation of construction steps in each stage

3.4 计算结果分析

根据塑性区破坏现象来区分锚杆体-注浆体界面的各个阶段^[17], 锚杆体与注浆体界面的变形特性常通过剪应力-剪切位移曲线来描述。不同拉拔载荷下界面弹性阶段剪应力分布见图14。

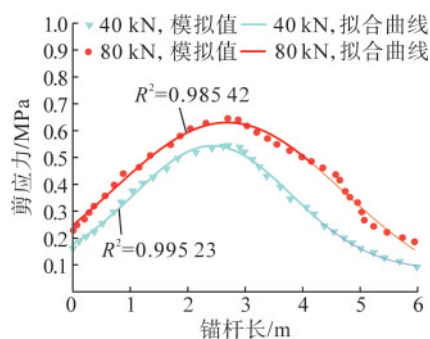


图14 不同拉拔载荷下界面弹性阶段剪应力分布

Fig.14 shear stress distribution at the elastic stage of the interface under different drawing loads

由图14可知, 当拉拔载荷小于等于80 kN时, 锚杆体-注浆体界面未发生破坏, 处于弹性变形阶段。剪应力沿锚杆轴线分布不均匀, 近似呈高斯曲线。随着剪应力的增大, 剪切位移迅速增大, 曲线呈“上凸”形。拉拔载荷从锚杆的端部传递至中部, 最大剪应力出现在自由段与锚固段交界处, 并向两侧呈指数型递减, 呈中间高、两端低的单峰分布状态。初期拉拔载荷较小时, 锚杆体-注浆体处于全长弹性黏结状态。界面弹性力学状态见图15。

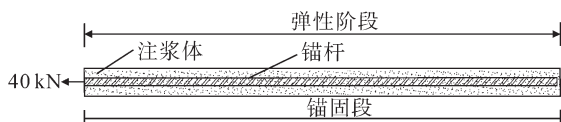


图15 界面弹性力学状态

Fig.15 interface elastic mechanical state

对拉拔载荷为40 kN、80 kN时, 锚杆体-注浆体界面剪应力的测量值进行拟合, 得到不同位置 z 处的界面剪应力为

$$\tau(z) = A + Be^{-\frac{1}{2}[(x-C)/D]^2}, \quad (4)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为拟合参数; x 为沿锚杆段长度最先出现脱黏开裂的位置, m 。

不同拉拔载荷下界面塑性软化阶段剪应力分布见图16。由图16可知, 拉拔载荷为90 kN时, 界面开始失效, 失效位置临近中间段特定黏结界面区域, 该处界面变形从弹性阶段转化为塑性软化阶段。随着拉拔载荷的持续增大, 锚固效果变差, 界面的黏结效应部分失效, 整个界面状态发生改变, 表现为弹性区域缩小、初期出现的塑性变形区域扩大, 逐渐向滑移区转变, 界面脱黏松动导致滑移区的剪应力一直为0。峰值剪应力从自由段和锚固段交接处向两侧移动, 呈双峰分布。界面塑性软化力学状态见图17。

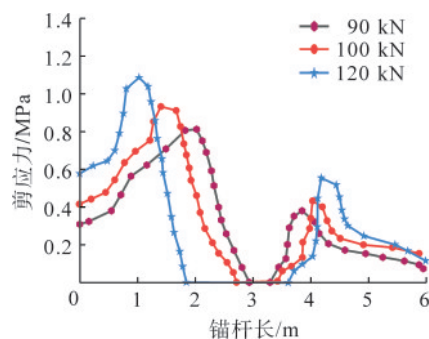


图16 不同拉拔载荷下界面塑性软化阶段剪应力分布

Fig.16 shear stress distribution at the plastic softening stage of the interface under different pull-out loads

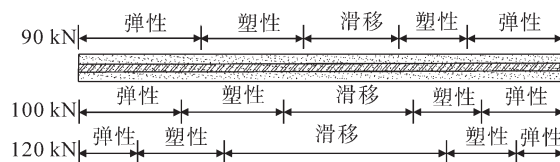


图17 界面塑性软化力学状态

Fig.17 interface plastic softening mechanical state

对拉拔载荷为90 kN、100 kN、120 kN时, 锚杆体-注浆体界面剪应力的测量值进行拟合, 得到式(5), 拟合式相关参数见表3。

$$\tau(z) = \begin{cases} A + B \left(1 - e^{-\frac{z-x}{t_1}} \right) & z < x \\ A + B \left(1 - e^{-\frac{z-x}{t_2}} \right) + C \left(1 - e^{-\frac{z-x}{t_2}} \right) & z \geq x \end{cases}, \quad (5)$$

式中, t_1 、 t_2 为拟合参数。

表3 塑性软化阶段拟合式的相关参数
Tab.3 correlation coefficient of plastic softening stage fitting formula

拉拔 载荷/kN	A	B	t_1	C	t_2
90	0.154 6	2.746 5	7.163 4	-0.510 4	0.362 1
100	0.284 9	2.794 8	8.547 1	-1.310 4	0.524 7
120	1.342 6	3.264 7	8.947 1	-1.784 5	0.547 4

不同拉拔载荷下界面滑移阶段剪应力分布见图18。由图18可知,拉拔载荷达到160 kN时,锚杆体-注浆体完全进入滑移阶段,滑移区基本覆盖整个锚固段,仅在自由段末端保留了有限的完整黏结区。此时,锚杆的锚固段完全脱黏并出现裂痕,已基本失去锚固能力。界面剪应力主要由自由段末端的接触界面提供,峰值剪应力在锚杆末端附近呈先增大后减小的变化趋势,界面破坏严重。界面滑移阶段力学状态见图19。

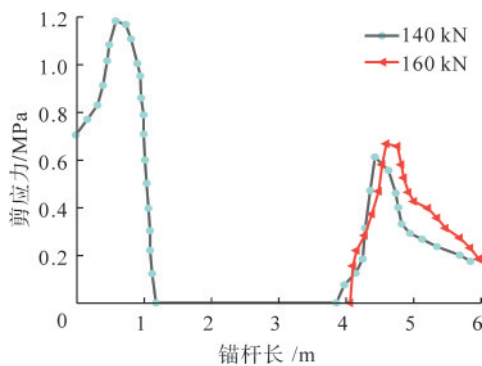


图18 不同拉拔载荷下界面滑移阶段剪应力分布
Fig.18 shear stress distribution at the interface slip stage under different pull-out loads

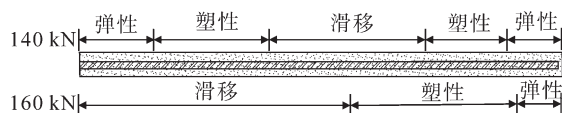


图19 界面滑移阶段力学状态
Fig.19 interface slipping phase mechanical state

不同类型围岩的数值模拟物理参数见表4。不同类型围岩下锚杆的剪应力分布见图20。

表4 不同类型围岩的数值模拟物理参数

Tab.4 numerical simulation physical parameters of different types of surrounding rock

围岩 类型	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	抗拉强度 σ /MPa
大理岩	8.5	6.4	0.82	35	5.2
绿片岩	6.2	3.1	0.54	27	2.6
砂板岩	3.5	1.5	0.18	21	1.5

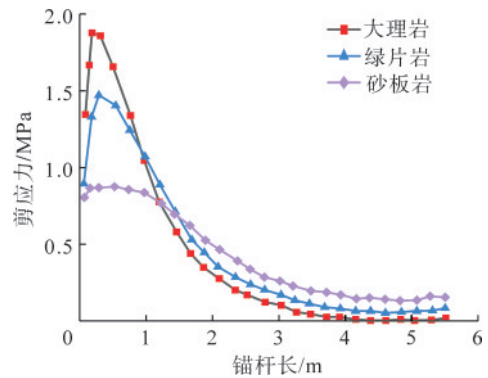


图20 不同类型围岩下锚杆的剪应力分布
Fig.20 shear stress distribution of bolt under different types of surrounding rock

由图20可知,由于不同类型的围岩强度存在差异,注浆体-围岩的剪应力分布也有所不同。在注浆体孔口附近,随着围岩强度的增大,最大剪应力也不断增大。大理岩的最大剪应力为1.7 MPa,约为砂板岩最大剪应力的2倍。在距孔口约1.5 m位置处,3条曲线交汇。交汇点附近,剪应力出现明显的重分布和应力集中现象,导致不同类型围岩下锚杆的应力传递路径发生改变,局部区域承受更大的应力。其他条件相同的条件下,若要达到相同的锚固效果,大理岩锚固长度最短,砂板岩锚固长度最长。随着围岩强度的递减,围岩的应力逐渐降低,与此同时,塑性区逐渐扩展。大理岩、绿片岩主要表现为拉伸破坏,砂板岩既有拉伸破坏,又伴随剪切破坏。

锚杆端部所承受的拉拔载荷取150 kN,锚杆杆体的直径取25 mm,注浆体钻孔直径分别取28 mm、31 mm、34 mm、37 mm和40 mm,即锚杆体-注浆体直径差分别为3 mm、6 mm、9 mm、12 mm和15 mm。不同直径差下剪应力分布见图21。

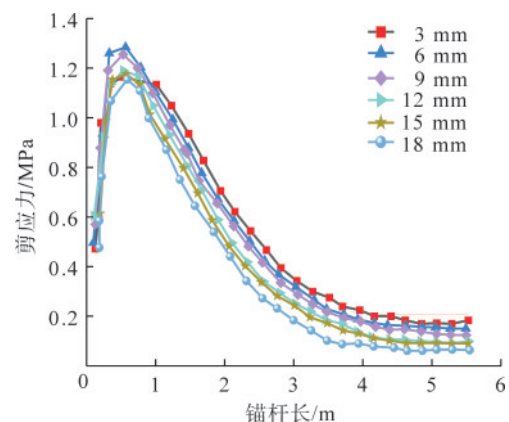


图21 不同直径差下剪应力分布
Fig.21 shear stress distribution under different diameter difference

由图21可知,锚杆体-注浆体直径差为3 mm时,注浆体的塑性区约占锚固段的25%,且在孔口附近存在明显的塑性滑移变形,与直径差为12 mm、15 mm的工况相比,其峰值剪应力略有减小。直径差增大至6 mm时,注浆体的剪应力明显呈高斯曲线分布,锚固效果更优。不同直径差下,按照峰值剪应力由大到小排序为:6 mm、9 mm、12 mm、3 mm、15 mm和18 mm。锚杆体-注浆体的直径差小于6 mm或超过15 mm时,无法达到预期锚固效果,这是由于直径差过小时,注浆体的环形厚度较小,在高拉拔载荷下,锚杆体-注浆体界面可能会发生滑移变形和破坏,注浆体黏结力下降,影响锚固效果;直径差过大时,注浆体的环形厚度较大,会削弱注浆体对锚杆轴向力变化的敏感性,导致锚杆体-注浆体界面的黏结强度降低,无法抵抗拉拔应力,变形能力减弱。为达到良好的锚固效果,建议锚杆体-注浆体直径差取6~9 mm。

4 模型试验验证及现场监测对比

4.1 模型试验验证

为验证所构建模型的可靠性,开展室内全长黏结型锚杆拉拔试验。根据前文数值模拟物理参数,构建2组模型并进行数值模拟,与室内拉拔试验结果进行对比分析。

采用中国科学院武汉岩土力学研究所研发的RBPT-176型套筒锚固系统拉拔试验仪,以及江苏泰斯特公司制造的TST5910N动态信号测试分析系统,采集应变数据。拉拔试验系统见图22。拉拔试验采用直径为25 mm的钢筋作为锚杆,锚固长度分别为600 mm和500 mm,基体材料为大理岩,锚固剂为水泥砂浆。拉拔试验材料力学参数的选取参照表1和表2。

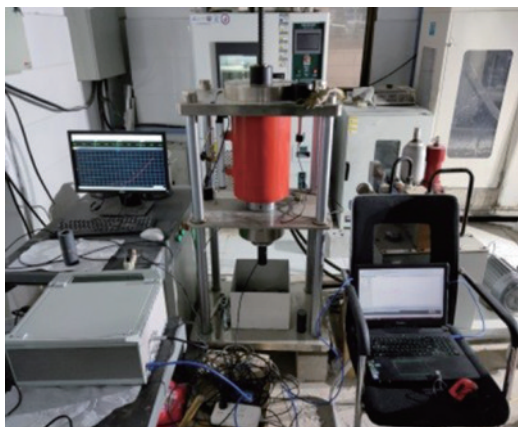


图22 拉拔试验系统

Fig.22 pull-out test system

拉拔试验与数值模拟结果对比见图23。对比第1组曲线可知,当载荷超过锚杆的屈服强度时,锚杆的轴向力随着变形的增大逐渐增大,在初始阶段载荷-位移呈线性关系。载荷达到131.9 kN,位移达到7.1 mm时,载荷呈平缓增长的变化趋势。载荷继续增大至173.2 kN,位移达到52.5 mm时,载荷突降至0 kN,锚杆失效。锚杆破坏载荷的数值模拟值为173.2 kN,与试验测得的破坏载荷170.3 kN比较接近,误差为1.7%。对比第2组曲线可知,当锚固力超过锚杆的屈服强度时,锚杆的轴向力同样随着变形的增大逐渐增大,在初始阶段载荷-位移也呈线性关系。载荷达到132.2 kN,位移达到10.5 mm时,载荷的增长趋势逐渐变缓。载荷继续增大至146.7 kN,位移达到40.2 mm时,载荷突然降至0 kN,锚杆失效。锚杆破坏载荷的数值模拟值为148.7 kN,室内试验所得破坏载荷为146.7 kN,二者非常接近,误差仅为1.4%。整体来看,数值模拟与室内拉拔试验结果吻合度较高,误差在可接受范围内,表明模型能较好地预测锚杆在拉拔过程中的性能变化,所建模型较准确可靠。

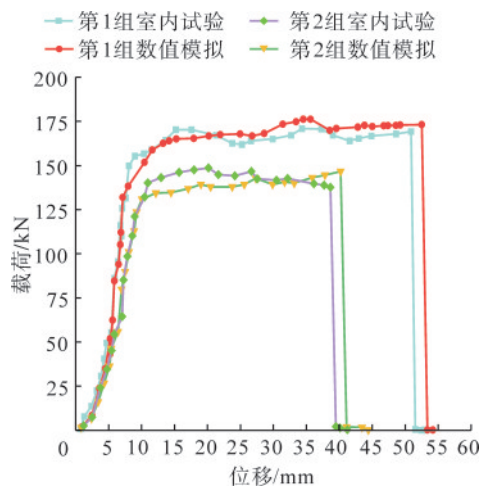


图23 拉拔试验与数值模拟结果对比

Fig.23 comparison of drawing test and numerical simulation results

4.2 现场监测对比

在锦屏二级水电站引(2)14+450断面处埋置多点位移计进行现场监测,监测断面位于岩体受力较好的洞段内,属于II类围岩,埋深为1 720 m。利用锚杆测力计监测部分测点处的锚杆变形及受力,监测位置包括拱顶2.5 m处、右侧拱肩2.5 m处及右侧边墙2.9 m处。

数值模拟与监测曲线对比见图24。由图24可知,锚杆在实际工程中分别经历了弹性变形、塑

性软化变形和滑移阶段。当轴向位移达到 53 mm 时,锚杆支护失效,载荷降至 0 kN。将 3 组监测数据与数值模拟结果对比可知,模型能准确地反映锚固系统失效情况,可用于评估隧道的稳定性。

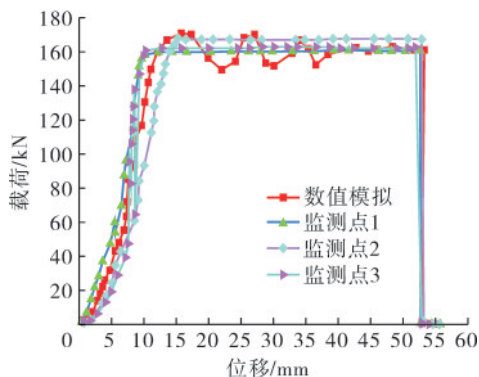


图 24 数值模拟与监测曲线对比

Fig.24 comparison of numerical simulation and monitoring curves

5 结论

本文以锦屏二级 2[#]引水隧洞为研究背景,建立数值模型并开展模拟分析,研究隧道开挖过程中黏结型锚固系统围岩应力的分布规律,以及锚杆体-注浆体界面载荷-位移的演化特征,得出如下结论。

(1) 开挖过程中,隧道周围会出现强烈的能量积累,由于锚杆的支护作用,围岩不会产生大变形。开挖后,总体上围岩围压随着开挖深度的增大而增大,同时,围岩应力发生重分布,拱顶和拱底处迅速形成高应力区,拱腰处形成应力降低区,围岩应力呈非均匀性分布。建议在隧道拱顶、拱腰和拱底位置处增加锚杆密度、分层锚固,以提高隧道支护的稳定性。

(2) 黏结型锚固系统的界面力学演化过程包括弹性阶段、塑性软化阶段和完全滑移阶段,其界面抗剪强度逐渐降低。根据锚杆界面剪应力分布规律,拟合得到弹性阶段和塑性软化阶段曲线的公式,拟合效果较好。

(3) 不同类型围岩下,注浆体-围岩体剪应力分布存在明显差异。围岩强度的增大会导致注浆体剪应力峰值增大。锚杆体-注浆体直径差会影响锚固性能,直径差为 6~9 mm 时,锚固系统的黏结性能最优。

(4) 数值模拟结果与现场监测值较吻合,验证了所建模型的准确性和工程适用性,可为深埋隧道锚杆支护技术的优化和应用提供科学指导。

在实际施工中,采用钻爆法开挖隧道会产生

动力响应,对开挖掌子面周围围岩的应力及开挖前的支护影响较大。今后可针对围岩动力响应对隧道周围岩体及支护效果的影响开展进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 康红普,姜鹏飞,刘畅,等.煤巷锚杆支护施工装备现状及发展趋势[J].工矿自动化,2023,49(1):1-18.
KANG Hongpu,JIANG Pengfei,LIU Chang,et al.Current situation and development trend of rock bolting construction equipment in coal roadway[J].Journal of Mine Automation,2023,49(1):1-18.
- [2] 康红普,崔千里,胡滨,等.树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J].煤炭学报,2014,39(1):1-10.
KANG Hongpu,CUI Qianli,HU Bin,et al. Analysis on anchorage performances and affecting factors of resin bolts[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(1):1-10.
- [3] 胡滨,王志超,张晓.混凝土支柱与锚杆(索)联合支护系统应用研究[J].煤炭科学技术,2022,50(4):91-98.
HU Bin,WANG Zhichao,ZHANG Xiao.Research on application of concrete pillar in conjunction with anchored bolt and cable support system[J].Coal Science and Technology,2022,50(4):91-98.
- [4] 胡滨,康红普,林健,等.温度对树脂锚杆锚固性能影响研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(5):644-649.
HU Bin,KANG Hongpu,LIN Jian,et al. Study on influence of temperature on anchorage performance of resin anchored bolt[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2012,29(5):644-649.
- [5] 胡伟,李砥柱,林志,等.双锚片螺旋锚倾斜拉拔承载特性与承载力计算方法研究[J].岩土力学,2024,45(6):1661-1674,1685.
HU Wei,LI Dizhu,LIN Zhi,et al. Bearing characteristics and calculation method for pullout capacity of double-blade screw anchors under inclined loading[J].Rock and Soil Mechanics,2024,45(6):1661-1674, 1685.
- [6] 赵象卓.锚杆锚固性能研究与巷道支护方案优化[D].阜新:辽宁工程技术大学,2019:109-110.
- [7] 吴泽坤,白晓宇,孙淦,等.多循环荷载下BFRP抗浮锚杆锚固性能现场试验[J].岩石力学与工程学报,2024,43(9):2314-2328.
WU Zekun,BAI Xiaoyu,SUN Gan,et al. Field test of anchorage performance of BFRP anti-floating anchors under multiple cyclic loads[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024, 43(9):2314-2328.
- [8] 林健,杨景贺,韩国强,等.不同杆体外形树脂锚杆锚固与安设性能对比试验研究[J].煤炭学报,2015,40(2):286-292.
LIN Jian,YANG Jinghe,HAN Guoqiang,et al. Comparable test on anchoring and setting performance of resin bolts with different rod shapes[J].Journal of China Coal Society,2015,40(2):286-292.
- [9] 林健,任硕,杨景贺.树脂全长锚固锚杆外形尺寸优化实验室研究[J].煤炭学报,2014,39(6):1009-1015.
LIN Jian,REN Shuo,YANG Jinghe. Laboratory research of resin full-length anchoring bolts dimension optimization[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(6):1009-1015.
- [10] 张传庆,崔建国,周辉,等.锚杆杆体-砂浆界面剪切力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(4):820-828.

- ZHANG Chuanqing, CUI Guojian, ZHOU Hui, et al. Experimental study on shear and deformation characteristics of the rod-grout interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 820-828.
- [11] ZHANG C Q, CUI G J, CHEN X R, et al. Effects of bolt profile and grout mixture on shearing behaviors of bolt-grout interface[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(2): 242-255.
- [12] ZHANG C Q, CUI G J, DENG L, et al. Laboratory investigation on shear behaviors of bolt-grout interface subjected to constant normal stiffness[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(3): 1333-1347.
- [13] 邓亮, 张传庆, 周丽, 等. 常法向刚度下锚杆杆体-树脂界面剪切力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2254-2263.
- DENG Liang, ZHANG Chuanqing, ZHOU Li, et al. Experimental study on shear mechanical properties of bolt-resin interfaces under constant normal stiffness[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2254-2263.
- [14] 王军, 宋雪松, 郎俊彪, 等. 无降水深基坑锚杆-旋喷体封底止水体的抗浮机理试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(3): 322-329.
- WANG Jun, SONG Xuesong, LANG Junbiao, et al. Experimental research of anti-floatage mechanism of sealing bottom anchor-jetting water stop body in deep foundation pit without dewatering[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(3): 322-329.
- [15] YANG S, ZHU X G, ZHANG G F, et al. Research on the mechanics performance of the new tension-compression rock bolt through numerical simulation[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(4): 2255-2266.
- [16] 杨林, 朱训国, 夏洪春, 等. 拉压复合型锚杆锚固机理的数值及模型试验应用研究[J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(1): 132-142.
- YANG Lin, ZHU Xunguo, XIA Hongchun, et al. Numerical and model experimental application study on the anchoring mechanism of tensile and compression composite anchor rods[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(1): 132-142.
- [17] 夏洪春, 夏清勇, 朱训国. 深基坑复合型支护结构优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 46-52.
- XIA Hongchun, XIA Qingyong, ZHU Xunguo. Optimization of composite supporting structure for deep foundation pit[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(1): 46-52.
- [18] ZHU X G, YANG S, XIA H C, et al. Joint support technology and its engineering application to deep soft rock tunnel with strong creep[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(4): 3403-3414.
- [19] 冯夏庭, 张传庆, 李邵军, 等. 深埋硬岩隧道动态设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 52-70.
- [20] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 66-112.
- [21] 朱训国, 陈卓立, 赵德深. 深埋分区破裂隧道锚杆支护力学机制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 703-709.
- ZHU Xunguo, CHEN Zhuoli, ZHAO Deshen. Rock bolt support mechanism of deep buried zonal disintegration tunnel[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37(4): 703-709.
- [22] 张国军, 张勇. 基于摩尔-库伦准则的岩石材料加(卸)载分区破坏特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1049-1058.
- ZHANG Guojun, ZHANG Yong. Partition failure characteristics of rock material loading and unloading based on Mohr-Coulomb criterion[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1049-1058.
- [23] LI C, STILLBORG B. Analytical models for rock bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(8): 1013-1029.