

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.01.013

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:杨林,朱训国,夏洪春,杨帅.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, YANG Shuai. 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.

拉压复合型锚杆锚固机理的数值及模型试验应用研究

杨林¹, 朱训国^{1,2}, 夏洪春^{1,2}, 杨帅¹

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622;

2. 大连大学 复杂结构系统灾害预测防治重点实验室, 辽宁 大连 116622)

摘要: 针对全长注浆锚杆在深部隧洞中支护作用的局限性,为有效控制隧洞围岩变形、增强锚杆承载性能,本文采用有限元数值模拟法深入研究拉压复合型锚杆支护结构在岩石隧道加固过程中受到拉拔荷载作用下的界面失效特征及力学传递机制,并将锚杆应用在超载模型试验中,探究锚杆的支护性能。研究表明:锚固体与围岩相互作用接触界面的力学演化共经历了弹性阶段、塑性软化阶段、完全滑移阶段的渐进式失效过程。界面剪切力的传递也是从拉拔荷载较小时出现在承载板处,随拉拔荷载增大,向锚固段两侧转移,呈现双峰趋势。根据锚杆界面剪切力分布规律,提出了复合锚杆在低荷载和高荷载拉拔作用下的剪切力分布模型,此模型具有普遍性,进行的室内超载模型试验得出复合锚杆支护效果优于普通锚杆的结论,此研究可为复合锚杆在深埋隧洞等地下工程中的应用提供一定的参考价值。

关键词: 拉压复合型锚杆; 渐进失效; 界面力学演化; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TD350 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2024)01-0132-11

Numerical and model experimental application study on the anchoring mechanism of tensile and compression composite anchor rods

YANG Lin¹, ZHU Xunguo^{1,2}, XIA Hongchun^{1,2}, YANG Shuai¹

(1. College of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prediction and Control of Complex Structure System, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: In view of the limitation of the supporting effect of the full-length grouting anchor in the deep tunnel, in order to effectively control the deformation of the surrounding rock of the tunnel and enhance the bearing capacity of the anchor, this paper uses the finite element numerical simulation method to study the interface failure characteristics and mechanical transmission mechanism of the tension-compression composite anchor support structure under the pull-out load the reinforcement of the rock tunnel, and applies the anchor to the overload model test to explore the supporting performance of the anchor. The results show that the mechanical evolution of the

收稿日期: 2022-10-06; **网络首发日期:** 2023-03-15

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20230314.1255.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374045); 辽宁振兴人才计划资助项目(XLYC1807219); 大连大学省重点实验室平台基金资助项目(202101ZD02); 大连大学科研创新创业团队资助项目(XQN202002)

第一作者: 杨林,女,硕士生,研究方向为隧道支护稳定性。E-mail:1317501500@qq.com

通信作者: 朱训国,男,博士,副教授,研究方向为岩土工程及隧道工程支护结构力学机制。E-mail:zhuxunguo@dlu.edu.cn

contact interface between anchorage body and surrounding rock has experienced the progressive failure process of elastic stage, plastic softening stage and slip stage. The transfer of shear force at the interface also appears at the bearing plate from the small drawing load, and transfers to both sides of the anchorage section with the increase of the drawing load, showing a bimodal trend. According to the shear stress distribution law of the bolt interface, the shear stress distribution model of composite bolt at low load and high load drawing is put forward. This model is universal. The indoor overloading model test shows that the supporting effect of composite bolt is better than that of ordinary bolt. This study can value for the application of composite bolt in underground engineering such as deep tunnel.

Key words: tension-compression composite anchor; progressive failure; interface mechanical evolution; numerical simulation; model test

锚杆锚固技术是应对隧道工程围岩变形破坏问题的主要支护措施^[1-4]。然而,随着隧道埋深增大、地应力升高,围岩变形量值和破坏深度均大幅增加,导致传统刚性注浆锚杆破坏失效^[5-7]。其原因在于这种锚杆刚度太大,不能承受高地应力条件下的围岩大变形,在剪应力传递中存在明显的应力集中现象,一旦砂浆-杆体界面上剪应力超过其抗剪强度,就会发生软化脱黏破坏^[8],导致锚杆锚固性能降低,灾害防治效果变差。

李宁^[9]研究复合岩体穿层锚杆应力分布特征及锚固机理,基于不同属性岩体拉拔荷载得到锚固界面应力分布力学方程和解析解,但是并未考虑到实际工程中深部隧洞围岩所处的高地应力环境对锚杆支护稳定性的影响。文竞舟^[10]考虑锚固界面层传递剪应力机理,建立了全长锚杆界面剪应力以体积力形式引入隧道围岩弹塑性分析的受力模型,并通过现场监测锚杆轴力对所提出的模型计算结果进行对比验证,但尚未分析全长锚杆在支护隧道中服役全生命周期的受力变化特性和界面失效模式。陶文斌等^[11]为提高锚杆支护巷道承载能力,采用拉拔正交试验分析不同影响因素作用效果,研发了预应力全长锚固锚杆,发现锚杆拉拔失效首先发生在锚固体与试块粘结界面,整个失效过程经历了弹性-塑性-破坏的动态阶段,但缺乏对锚杆-围岩协同承载支护的剪切力理论解。陈峰^[12]通过数值模拟研究了各种工况下恒阻大变形锚杆支护机理,得出锚杆的吸能方程,具有竹节效应的锚杆在岩土工程动静荷载作用下服役时表面产生大量的剪切模式的声发射,具有很大的恒阻作用,可有效提高锚杆锚固作用。但是受限于岩土工程复杂的地质环境,数值模拟的相关参数难以获取,需对锚杆结构参数进行更深入的优化改进。

吴学震等^[13]提出了拉压耦合大变形锚杆,锚杆特殊的拉压锚固结构结合了拉力型和压力型锚杆的

优点,在提高锚固结构的同时,也避免了锚固界面由于剪应力集中导致的界面渐进式破坏问题,可有效抑制硬岩岩爆和软岩大变形。本文作者及科研团队基于文献^[13]的基础上,改进并提出了具有吸能作用承压环的拉压复合型锚杆,此锚杆由于在力学传递机制和界面剪切力分布规律的研究尚为缺乏,只在基坑工程中得到应用,而在深埋隧洞等地下工程中的应用鲜有,需待进一步完善。为扩展锚杆在地下工程,尤其是在高地应力围岩下深部隧洞的应用,本文作者及科研团队综合以上文献的不足之处,做了大量的研究工作^[14-16],如通过有限元方法计算得出当拉压复合型锚杆承压段和受拉段的比例为4:3时,承载性能最优的结论^[17]。本文基于前期的研究成果,将锚杆承压锚固段和受拉锚固段长度确定为4:3,利用有限元方法研究锚杆在深埋隧洞中服役全历程的界面剪切力分布规律,提出了复合型锚杆在低荷载和高荷载拉拔作用下的剪切力分布模型,并将锚杆应用在室内超载模型试验中,探讨锚固性能,完善拉压复合型锚杆力学机制,为锚杆在深埋隧洞等地下工程中的应用提供一定的参考价值。

1 拉拔荷载作用下拉压复合锚杆的分析模型

1.1 拉压复合型锚杆锚固结构

锚杆是当代地下工程支护系统最基本的组成部分,能够将地下工程如隧道的围岩加固在一起,一端与工程构筑物连接,另一端深入地层,将拉力传递到稳定的岩土体。拉压复合型锚杆是在传统拉力型锚杆的基础上改进,将拉力型和压力型锚杆相结合,通过在锚杆相应部位设置钢质承载板将锚固段一分为二成有粘结钢绞线的拉力锚固区和外部设有塑料套管、可以让压伸长的无粘结钢绞线的压力锚固区。当锚杆受力时,承载板被拉动后挤压前部的锚固体,同时拉动后部的锚固体,两者共同承担外荷载。在

锚头处设置承压环,用来吸收因岩土体应力重新调整所释放的能量^[17]。复合锚杆结构见图 1。

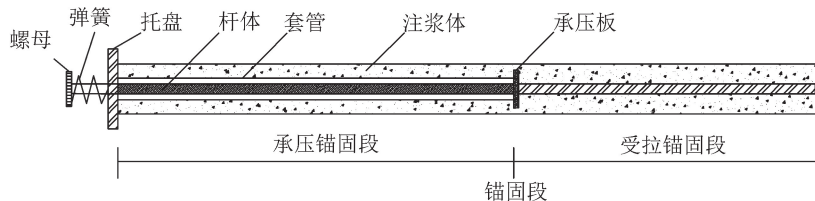


图 1 拉压复合型锚杆结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of tension-compression composite bolt

在锚固系统中,当锚杆受到拉拔力作用时,锚杆-注浆体界面产生界面剪切力,促使注浆体对周围岩体产生相对形变,由于岩体的约束作用,会在注浆体和围岩接触面产生剪切力。整个作用过程力的传递是拉拔力-锚杆-注浆体-围岩。随着拉拔力的增大,锚杆与注浆体、注浆体与围岩的接触面发生滑移,当粘结界面的剪切力超过粘结强度时,锚固系统产生破坏,直到锚杆完全脱黏。

1.2 拉压复合型锚杆锚固界面分析

在现场原位拉拔试验中,常规岩石锚杆锚固失效模式主要包括 5 种:锚杆杆体的断裂、注浆体材料失效、围岩破碎、锚杆-注浆体界面失效、注浆体-围岩界面失效。

对于岩石锚杆,岩体强度远大于注浆体强度,锚杆的破坏失效通常都发生在锚杆杆体与注浆体接触界面,此时界面强度取决于注浆体的力学特性^[18]。对于弹性模量较小的软岩或土层,锚杆的破坏失效主要发生在注浆体和软岩或土体接触界面,此时界面强度取决于土体或软岩的力学特性。为了方便分析复合型锚杆结构的破坏失效,建立如图 2 所示的计算模型,图中的界面 1 为注浆体与围岩之间的界面,界面 2 为锚杆杆体与注浆体之间的界面。

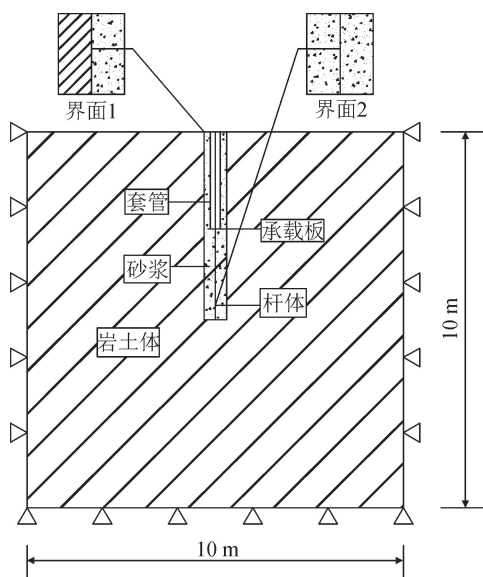


图 2 界面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the interface

接触面的破坏模式符合 Mohr-Coulomb 强度屈服准则,其表达式为:

$$f = \frac{1}{3}I_1 \sin\varphi - c \cos\varphi + \sqrt{J_2} \left(c \cos\theta_\sigma + \frac{\sin\theta_\sigma \sin\varphi}{\sqrt{3}} \right) = 0 \quad (1)$$

式中: I_1 、 J_2 分别为应力张量第 1 不变量和应力偏量第 2 不变量; θ_σ 为应力 Lode 角; c 、 φ 分别为粘聚力和内摩擦角。

2 拉压复合型锚杆锚固界面的数值模拟

2.1 计算假定

本文采用有限元数值方法开展计算,假定条件如下:

- 1) 建立的岩体模型为均质、连续、各向同性的材料;
- 2) 锚杆材料选用螺纹钢筋,为线弹性材料;
- 3) 注浆体-围岩接触界面(界面 1)符合 Mohr-Coulomb 强度屈服准则,锚杆-注浆体接触界面(界面 2)采用弹性模型。

2.2 物理参数的选取

在数值模拟中,为了最大程度地符合实际,锚杆材料采用 HRB400、 $\varnothing 22$ 钢筋,长度为 5 m;注浆体采用 M30 水泥砂浆,岩体主要为 V 级强风化岩,其物理力学参数参照中老铁路北端的沙嫩山 2 号隧道^[19]和《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)选取。锚固系统及锚固界面涉及的物理参数选取见表 1。

2.3 计算模型的建立

围岩体的计算模型选取 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的正方体实体单元,注浆体直径为 40 mm,注浆体-围岩界面(界面 1)采用界面单元模拟,服从 Mohr-Coulomb 屈服准则。锚杆杆体直径 22 mm,长 5 m,采用植入式桁架单元,布置在模型的中心,以锚杆轴线为中心的模型剖面结构见图 3。在模型下表面施加所有方向的约束,左右、前后表面施加沿法线方向

的约束,在锚杆端部施加竖向拉拔荷载,初级荷载为 10 kN,之后每级加载增量为 10 kN。

表 1 基本力学参数表

Tab.1 Table of basic mechanical parameters

材料类型	弹性模量/GPa	Poisson 比	容重/(kN·m ⁻³)	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗剪强度/MPa
岩体	3.7	0.45	20	1.50	25	—
注浆体	13.8	0.22	18	1.26	32	—
钢筋	210	0.30	28	—	—	—
界面 1	—	0.26	—	0.77	26	0.86
界面 2	—	0.25	—	1.76	18	—

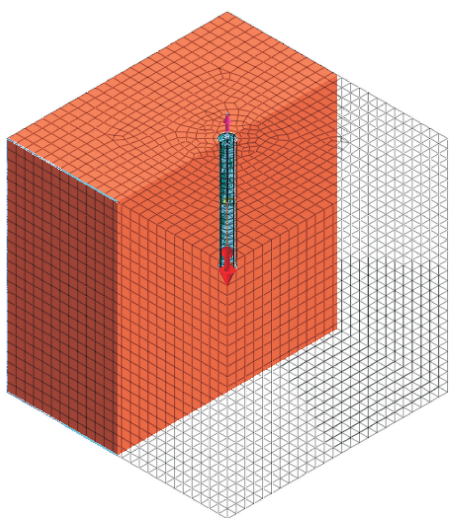


图 3 模型剖面结构图

Fig.3 Model section structure diagram

3 界面 1 剪切力分布分析

3.1 剪切力分布规律

1) 弹性阶段

图 4 为界面 1 弹性阶段剪切力沿锚杆轴向分布图,可见沿锚杆轴线剪切力分布不均,且分布形式区别于传统的压力或拉力型锚杆(传统锚杆在弹性阶段以峰值剪切力沿锚杆轴线单向指数性递减分布)。当荷载小于 70 kN 时,界面 1 未发生破坏,属于弹性变形阶段,拉拔力从锚头传递到承载板的位置,峰值剪切力出现在承载板处,再向两侧呈指数性递减趋势,整体呈现中间大、两头小的单峰分布形态。

2) 塑性软化阶段

当荷载超过 70 kN 时,界面失效首次发生(80 kN),其位置为靠近承载板两侧一定范围的粘结界面,该处界面将首先从弹性阶段转化为塑性软化阶段,而承载板两侧剩余长度范围内的粘结界面仍保持在完好弹性粘结状态。随着荷载持续的增

加,锚固效果进一步恶化,前一阶段的塑性区将发展为滑移区,表现为粘结界面的脱开,界面剪切力由于界面破坏迅速减小为零,前一阶段中的界面完整弹性区,则部分演化为新生的塑性区,峰值剪切力从初始的承载板处向两侧转移呈双峰趋势(图 5),整个界面的状态变化为:弹性区减小、塑性区转化、滑移区出现(图 6)。

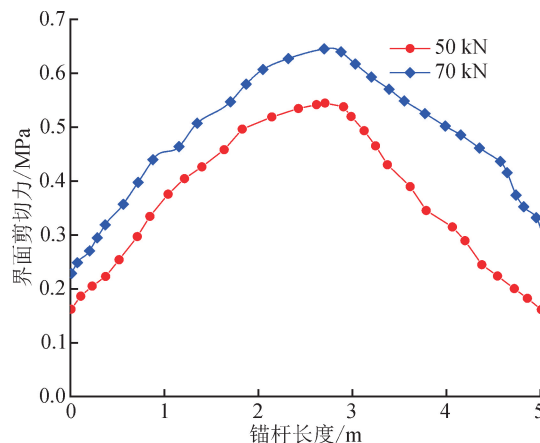


图 4 界面 1 弹性阶段剪切力分布图

Fig.4 Shear force distribution at interface 1 during elastic stage

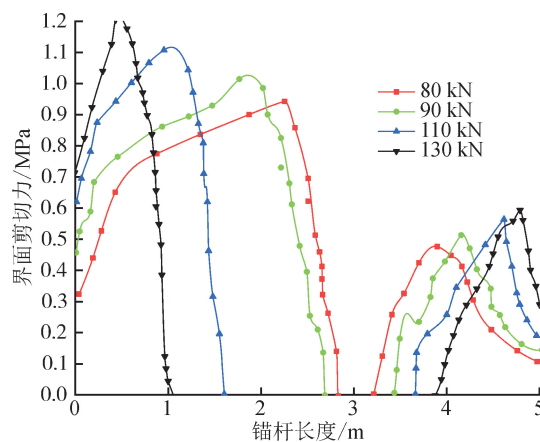
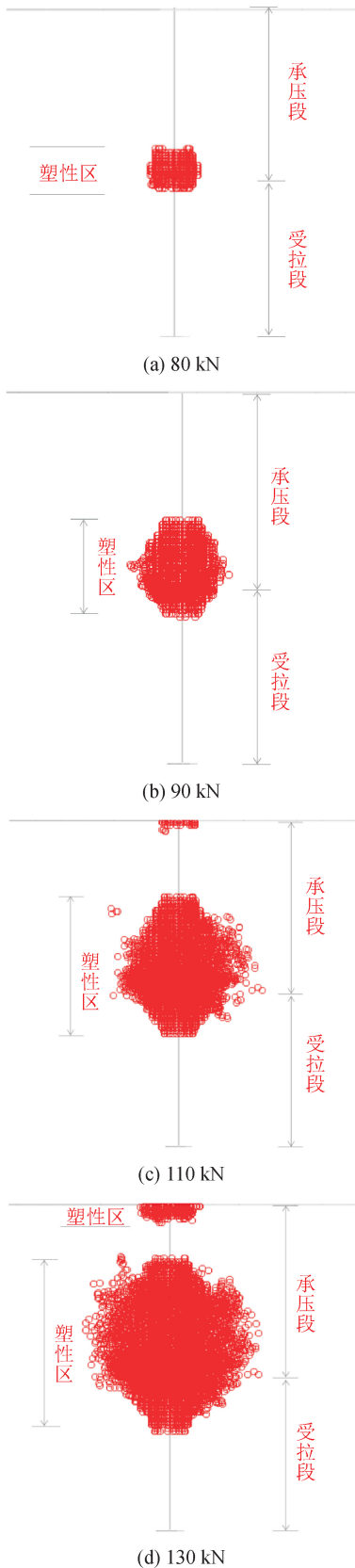


图 5 界面 1 塑性软化阶段剪切力分布图

Fig.5 Shear force distribution at interface 1 during plastic softening stage

3) 完全滑移阶段

当荷载达到 150 kN 时,界面 1 进入完全滑移阶段(图 7),滑移区将占据界面较大的长度范围,而完整粘结区只占据较小的一部分长度范围(图 8),锚杆的承压锚固段完全脱黏开裂,已经失去了锚固效果,界面 1 发生大面积破坏,界面剪切力主要是受拉锚固段末端的接触界面提供,峰值剪切力在靠近锚杆末端处,呈先增大后减小的趋势,可以认为锚杆已经完全脱黏失效。



红色圆圈代表进入塑性软化状态区域，在红色塑性区中的界面围岩稳定性较差，产生了较大的变形破坏。
图 6 界面 1 塑性软化阶段力学状态分布
Fig. 6 Mechanical state distribution at interface 1 during plastic softening stage

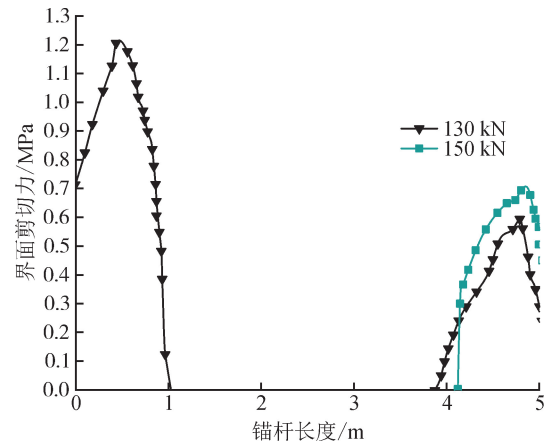


图 7 界面 1 滑移阶段界面剪切力分布图
Fig. 7 Shear force distribution at interface 1 during the slip phase

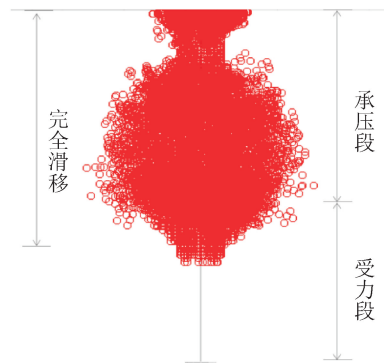


图 8 界面 1 滑移阶段力学状态分布
Fig. 8 Mechanical state distribution at interface 1 during the slip phase

这个过程的破坏模式为锚固体-围岩界面脱黏破坏，锚杆与注浆体一起被拔出(图 9)，属于渐进式破坏过程。

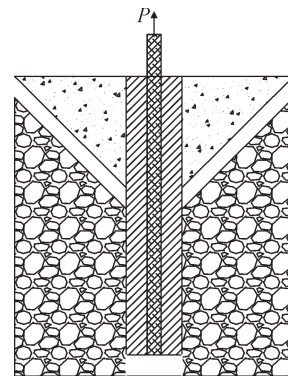


图 9 锚固体-围岩界面脱黏破坏模式
Fig. 9 Anchor solid-surrounding rock interface debonding failure mode

3.2 界面破坏机理

根据上述界面剪切力分布规律的分析，可以构建两种不同大小拉拔荷载作用下的受力模型。

1) 在拉拔荷载较小时，锚杆处于弹性状态，剪

切力峰值 τ_c 出现在承载板处,以指数性减小向两侧传递(图 10);

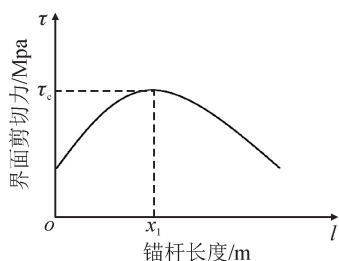


图 10 拉拔荷载较小时的界面剪切力分布模型
Fig. 10 Interfacial shear force distribution model with small pull-out loads

2) 随着拉拔荷载的增大,承载板处的剪切力超过界面容许值,锚固体产生了剪切破坏。在承载板处界面脱黏开裂,导致峰值剪切力向两侧转移(图 11)。此时,锚杆的受力特征发生了明显的变化。根据受力情况沿锚固段轴向划分为 3 个区域,见表 2。

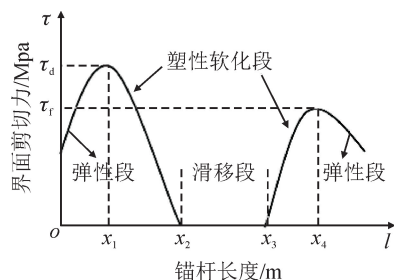


图 11 拉拔荷载较大时的界面剪切力分布模型
Fig. 11 Interface shear force distribution model with large pull-out loads

表 2 锚杆锚固段轴向受力分布
Tab. 2 Axial force distribution of the anchoring section of the bolt

受力阶段	受力范围	受力特征
完全滑移段	$x_2 < l < x_3$	滑移段在承载板的两侧,随拉拔荷载逐步扩大,视为承载板附近完全剪切破坏的情况,此段锚固段完全失去承载能力
塑性软化段	$x_1 < l < x_2$, $x_3 < l < x_4$	塑性软化接着滑移段,出现在承载板的两侧,该区域的剪切力由存在的残余剪切强度来提供
弹性段	$0 < l < x_1$, $l > x_4$	弹性段表示该区域锚杆依然保持着破坏前的弹性状态,受力状态与之前相似,锚杆依然在发挥着锚固效能

根据不同大小拉拔荷载作用下的界面破坏机理

模型,可见,拉压复合型锚杆承压锚固段和受拉锚固段共同承担外荷载,剪切力分布更加均匀,应力集中现象小,界面粘结强度得到了充分的发挥,能够发挥大变形岩石锚杆支护的优越性。

4 拉压复合型锚杆在模型试验中的应用

4.1 试验设计

模型试验参照中老铁路北端的沙嫩山 2 号隧道,隧道跨度 8.34 m,高度 10 m,埋深 196 m,隧道地应力测试范围内的最大水平主应力为 5.5~13.3 MPa,最小水平主应力为 4.1~10.5 MPa,铅直应力为 4.3~10.3 MPa,地层结构主要为 V 级岩石,构造应力复杂,围岩挤压严重,极易发生大变形。为模拟中老铁路沙嫩山 2 号隧道^[19],根据相似原理,物理模型试验应满足下列相似判据:

$$C_\sigma = C_E = C_c = C_R = 80 \quad (2)$$

$$C_\mu = C_f = C_\gamma = 1 \quad (3)$$

$$C_l = C_\delta = 50 \quad (4)$$

式中: C_σ 为应力相似常数; C_E 为弹性模量相似常数; C_c 为粘聚力相似常数; C_R 为抗压强度相似常数; C_μ 为 Poisson 比相似常数; C_f 为摩擦系数相似常数; C_γ 为容重相似常数; C_l 为几何相似常数; C_δ 为位移相似常数。

根据几何相似常数,确定模拟洞室尺寸为 167 mm×200 mm×300 mm。

二维相似模型选取石英砂作为模型岩体的骨料,胶凝材料选取石灰和石膏,缓凝剂采用硼砂,V 级岩石砂胶比为 3:1。在 1 份胶结物中,石灰:石膏:云母为 0.40:0.40:0.20;硼砂占用水量的 1.5%;加水量为混合物的 1/9;试件干燥至含水率的 8%。原岩及模拟岩体力学参数见表 3。

表 3 原岩及模拟岩体力学参数
Tab. 3 Mechanical parameters of prototype rock mass and simulated rock mass

围岩类型	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	Poisson 比
V 级岩石	17.6	3.7	1.5	25	0.45
模拟岩体	0.22	0.046	0.018	25	0.45

复合型锚杆原型材料 $\varphi=22$ mm 螺纹钢,弹性模量 $E_a=2.0 \times 10^5$ MPa,长度为 5 m,根据模型几何相似条件和弹性模量相似常数,选取符合条件的材料相对困难,由于试验仅对隧洞周支护效果进行研究,故对锚芯的等效抗拉强度进行模拟,基于以下等效抗拉刚度公式:

$$\frac{E_P A_P}{EA} = C_E C_i^2 \quad (5)$$

式中: E_P 为原型锚杆弹性模量; A_P 为原型锚杆截面积; E 为模型锚杆弹性模量; A 为模型锚杆截面积; C_E 、 C_i 分别为弹性模量相似常数、几何相似常数。选用直径为 2 mm、长 100 mm, 弹性模量 1.21×10^2 MPa 铝丝做模型锚杆, 模型锚杆的力学参数见表 4。

表 4 模型锚杆基本力学参数

Tab. 4 Basic mechanical parameters of model anchors

材料类型	直径/mm	长度/mm	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	Poisson 比	间距/mm
模型锚杆	2.0	100	10.2	121	0.331	20

承压锚固段与受拉锚固段的长度比例为 4 : 3, 承压段的套管采用外径 4 mm, 内径 2 mm 的塑料套管模拟, 承载板采用 2 mm 厚的橡胶片用胶水固定在杆体相应部位, 利用铁质弹簧做让压结构与垫板固定, 衬砌材料选用 1 mm 厚白钢模拟。

模拟注浆体采用纯水泥灌注, 其力学参数见表 5。

表 5 模拟注浆体基本力学参数

Tab. 5 Simulation of the basic mechanical parameters of the grout

材料类型	弹性模量/MPa	Poisson 比	容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/MPa	内摩擦角/($^\circ$)
注浆体	172.5	0.22	18	0.015 75	32

本试验采用两种支护形式, 分别为复合型锚杆支护形式和普通锚杆支护形式, 将普通锚杆支护隧洞作为对照组, 对比体现复合型锚杆在深部隧洞支护的优越性, 支护模型见图 12。



(a) 复合型锚杆支护形式 (b) 普通锚杆支护形式

图 12 支护模型示意图

Fig. 12 Schematic diagram of support model

4.2 模型加载设计

模型试验装置运用二维物理相似模型试验系统进行, 见图 13, 该装置可对模型进行两个方向轴向加压, 模型试验台的尺寸为 $3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。由于隧道原型埋深 196 m, 根据几何相似常数, 模型隧道埋深大于模型试验台的尺寸, 故将隧道埋深确定为 1.5 m, 隧道上覆荷载通过试验系统加载到原始地应力。

模型制作完毕后, 为使相似模型达到预期的强度, 需静置两周方可进行操作。本试验采用“先开挖后加载”的试验方法, 通过数控液压加载装置对模型进行超载加压逐步施加荷载, 初始每级加载增量为 2 kN, 直到加载到 54 kN 后, 隧洞开始出现裂缝。为了使隧洞出现较大可见的变形, 之后将分级加载增量调整到 9 kN, 至隧道模拟岩体局部掉块破坏。为分析锚杆支护过程中的界面剪切力变化, 采集了 54 kN 后的实验数据进行分析。对模型采用 10 步进行开挖, 开挖完成后的隧洞见图 14。隧洞在开挖完成后保持稳定的状态, 具有良好的自稳能力。



图 13 二维物理相似模型试验系统
Fig. 13 Two-dimensional physical similarity model test system



(a) 复合型锚杆支护模型



(b) 普通锚杆支护模型

图 14 模型隧洞开挖完成示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the completion of the excavation of the model tunnel

4.3 试验量测

在模型锚杆表面承载板两侧粘贴 BX120-55AA 型号的应变片布置 7 个测点, 承载板左侧均匀布置 4 个测点, 右侧均匀布置 3 个测点, 用于记录试验模型受荷过程中的应变演化过程, 应变片布置和粘贴

见图 15。普通锚杆按照复合型模型锚杆表面相同的位置粘贴应变片,将应变片连接 YE2539 高速静态应变测试系统的工程型静态电阻应变仪,可直接通过 YE29005(RS-232/RS-485 转换器)与计算机的 RS-232 串口进行通讯,保证了应变数据的最佳转换速度和精度。

应变测量仪采集到的电阻值根据式(6)换算成相应应变值。

$$\epsilon = \Delta R / (RK) \quad (6)$$

式中: ϵ 为锚杆测点的应变值; R 为工作应变片的初始电阻值; ΔR 为电阻的变化值; K 为应变片的灵敏系数。 R 、 K 值根据应变片型号获取。

假设试验过程中锚杆应力-应变关系为线性弹性关系,根据式(7)可以得出锚杆在不同上覆荷载水平下模型锚杆测点的轴向正应力。

$$\sigma = E\epsilon \quad (7)$$

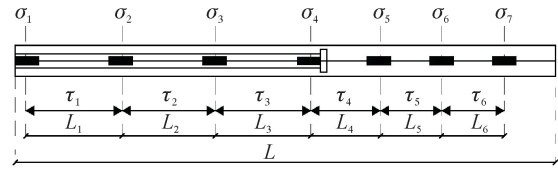
沿锚杆轴向取一段微元体,根据式(8)即可得出沿锚杆轴向两相邻测点之间模型锚杆表面的平均界面剪切力。

$$\tau_i = \frac{F_{i+1} - F_i}{\pi d L_i} = \frac{(\sigma_{i+1} - \sigma_i)A}{\pi d L_i} = \frac{(\sigma_{i+1} - \sigma_i)d}{4L_i} \quad (8)$$

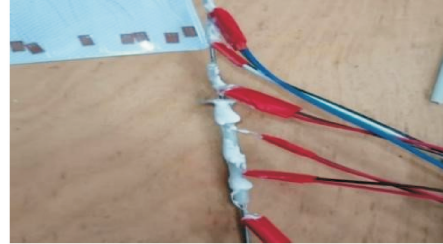
式中: L_i 为两有效测点间长度; d 为模型锚杆直径。

应力与测点对应关系见图 15(a),测点由左至右依次编号为测点 1、测点 2、...、测点 7,正应力图

中横坐标的位置与实际测点位置对应,界面剪切力符号位置为相邻两测点中心,将相邻两测点间的平均界面剪切力统计为前测点的剪切力数据。



(a) 应变片的布置



(b) 应变片的粘贴

图 15 应变片的布置和粘贴

Fig. 15 Arrangement and placement of strain gauge

4.4 模型试验结果分析

4.4.1 拉压复合型锚杆与普通锚杆界面剪切力对比分析

试验首先是完成隧道的开挖然后再逐渐增加上覆荷载直到隧道发生破坏,分析应变测量仪采集到的多组锚杆应变数据,选取具有代表性的复合型锚杆和普通锚杆,将复合型锚杆界面剪切力数据进行拟合,剪切力数据对比分布见图 16 和表 6。

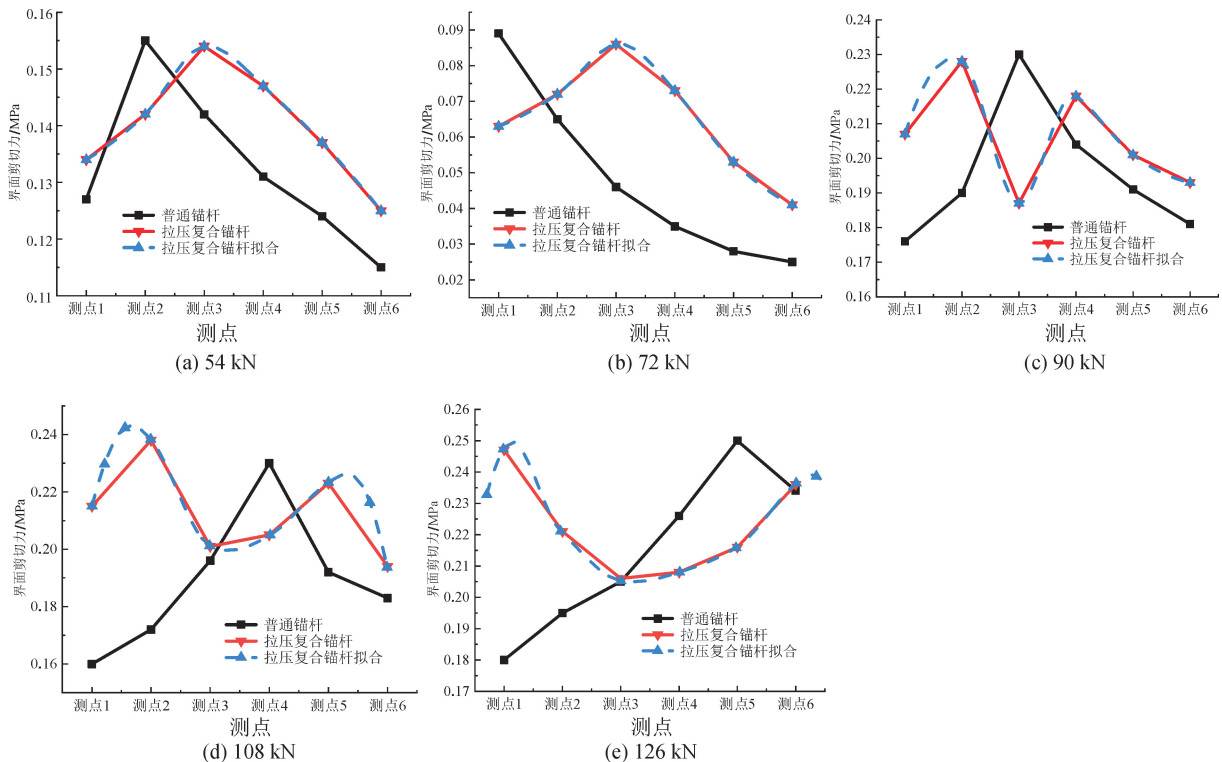


图 16 不同上覆荷载锚杆界面剪切力分布

Fig. 16 Shear force distribution at the interface of anchor rods at different overburden loads

表 6 拉压复合锚杆与普通锚杆界面剪切力数据对比

Tab. 6 Comparison of shear force data of tensile composite anchor and ordinary anchor interface

上覆荷载/kN	拉压复合型锚杆					普通锚杆		
	承压段剪切力峰值/MPa	峰值位置	受拉段剪切力峰值/MPa	峰值位置	弹塑性状态	剪切力峰值/MPa	峰值位置	弹塑性状态
54 kN	0.086	测点 3	—	—	弹性阶段	0.089	测点 1	弹性阶段
72 kN	0.154	测点 3	—	—	弹性阶段	0.155	测点 2	塑性阶段
90 kN	0.228	测点 2	0.219	测点 4	塑性阶段	0.217	测点 3	塑性阶段
108 kN	0.237	测点 2 前	0.223	测点 6 前	塑性阶段	0.232	测点 4	塑性阶段
126 kN	0.248	测点 2 前	0.235	—	塑性阶段	0.251	测点 6 前	塑性阶段

图 16 展示了拉压复合锚杆和普通锚杆支护隧洞在不同上覆荷载作用下的界面剪切力分布趋势。

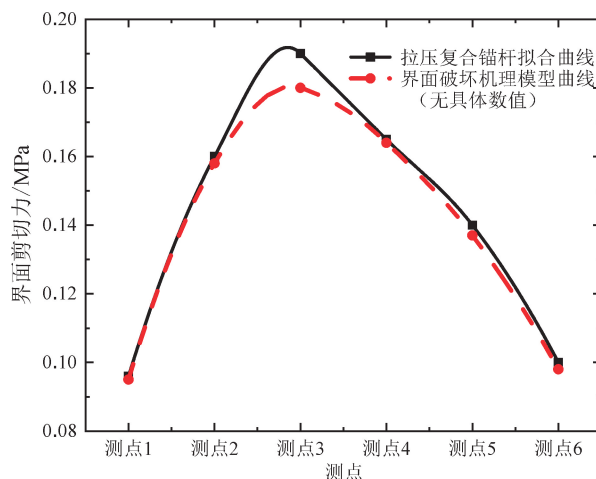
1) 普通锚杆在隧洞上覆荷载较小时处于弹性变形阶段,锚杆与隧洞同步变形协调,发挥良好的锚固效能。锚杆界面剪切力峰值出现在锚固段前端,沿锚固段长度呈指数性减小的趋势,峰值剪切力随着上覆荷载的增大而增大。随着上覆增加到 72 kN 时,锚杆发生了塑性软化现象,隧洞内部锚杆锚固支护部位出现了局部裂纹,锚杆前端部分脱黏,界面剪切力减小,峰值剪切力向锚固段远端转移,呈现中间大、两边小的单峰分布状态。继续增大上覆荷载,锚杆的峰值剪切力继续向锚杆远端转移,且大于上一级的峰值剪切力,隧洞内部裂缝范围扩大逐渐发展成裂缝。

2) 拉压复合锚杆在上覆荷载较小时处于弹性变形状态,与隧洞同步协调变形,隧洞保持良好的自稳能力,模型隧洞外观无明显变化,锚杆发挥着良好的承载性能,达到支护主动控制变形的效果。锚杆锚固界面剪切力随着上覆荷载增大而增大,剪切力曲线分布整体呈单峰趋势。对隧洞上部超载加压到 90 kN 时,锚杆的界面剪切力不同于前期的分布形式,在承载板的两侧测点出现双峰趋势,承载板左侧的峰值大于右侧的峰值,说明锚杆锚固段在承载板两侧发生了脱黏破坏,隧洞内部锚杆锚固支护部位出现了较大裂纹,加荷增大到 108 kN,锚杆脱黏范围扩大,隧洞裂纹加深。根据锚杆锚固段分布的 7 个测点,拟合出锚杆在加压过程中实际的界面剪切力分布形态,可以看出复合锚杆的峰值向两侧传递的规律,直到荷载为 126 kN 时,隧洞内部裂纹发展成较大裂缝,出现剥落掉块现象。

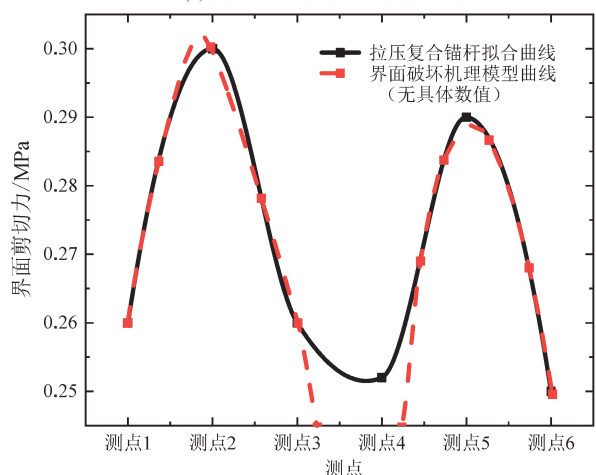
3) 对比拉压复合型锚杆和普通锚杆在同一外加荷载状态下的界面剪切力分布,普通锚杆比复合锚杆最先进入塑性软化阶段,复合型锚杆独特的拉压复合结构使其支护隧道界面剪切力呈现双峰趋势,剪切力分布更加均匀,较普通锚杆支护隧道有一定的提高,支护效果更好,更能满足隧洞支护的要求。

4.4.2 拉压复合型锚杆拟合结果与界面破坏机理模型差异分析

选取模型隧洞具有代表性的拉压复合型锚杆,提取锚杆在弹性阶段和塑性软化阶段的界面剪切力分布曲线,与数值模拟提出的界面破坏机理分布模型进行差异分析,结果见图 17。



(a) 复合型锚杆弹性阶段模型对比



(b) 复合型锚杆塑性软化阶段模型对比

图 17 拉压复合锚杆界面剪切力曲线与界面破坏机理模型对比

Fig. 17 Comparison of the interfacial shear force curve of tensile composite anchor rod and the interfacial failure mechanism model

深埋隧洞支护用拉压复合锚杆在上覆荷载较小时处于弹性变形阶段,发挥良好的锚固效能,界面剪切力分布呈单峰状态,与数值模拟提出的界面破坏机理弹性阶段剪切力分布规律基本一致。在上覆荷载较大时锚杆出现了塑性软化现象,界面剪切力由单峰趋势转换为双峰趋势,并随着荷载的增大逐渐向两侧转移,这与界面破坏机理模型的塑性软化阶段的分布也是基本一致的。由于有限元数值模拟软件模拟接触界面发生开裂脱黏后,开裂范围内的界面剪切力近似为零,而在实际工程和物理模型试验中,锚固段开裂部位还存在残余应力,界面剪切力不为零,在此基础上,模型试验的结论与数值模拟提出的界面破坏机理模型基本吻合。

5 结 论

本文以拉压复合型锚杆为研究对象,采用数值模拟法深入研究了锚杆在拉拔荷载作用下锚固段全历程应力分布的演化规律,探究锚固体-围岩界面发生渐进式破坏失效模式,将锚杆应用在模型试验中,获取锚杆剪切力分布特征,研究得到如下结论。

1) 注浆体-围岩接触界面随外部荷载的施加经历了弹性阶段、塑性软化阶段、完全滑移阶段三段渐进式的破坏过程。弹性阶段,峰值界面剪切力出现在承载板处,沿锚固段两侧呈指数性减小;塑性软化阶段,峰值剪切力从承载板处沿着锚杆两端转移呈双峰趋势,开裂部位的界面剪切力降低为零;完全滑移阶段,锚固段开裂范围扩大,承压锚固段最先完全脱黏开裂,界面剪切力由受拉锚固段末端的连接提供。整个破坏模式为锚杆与注浆体一起被拔出。

2) 总结拉压复合型锚杆在拉拔荷载作用下界面剪切力分布规律,提出两种不同大小拉拔荷载作用下的受力模型,即弹性阶段和塑性软化阶段的界面破坏机理模型,此模型具有普遍性。

3) 将拉压复合型锚杆应用在室内超载模型试验中,获取锚杆的界面剪切力分布特征,与前期数值模拟提出的分布形态基本吻合,说明将拉压复合型锚杆用于隧洞支护的数值模拟计算方法的适用性和科学性,复合锚杆较普通锚杆的界面剪切力分布更加均匀,支护效果更优越。此研究可为拉压复合型锚杆在深埋隧洞加固支护的力学传递规律提供一定的参考价值。

参考文献:

[1] 郭小龙,谭忠盛,喻渝. 成兰铁路软岩隧道大变形控制技术及应用研究[J]. 铁道学报,2022,44(3):

86-104.

GUO Xiaolong, TAN Zhongsheng, YU Yu. Study on large deformation control technology and deformation control criteria for soft rock tunnels of Chengdu—Lanzhou railway[J]. Journal of the China Railway Society,2022,44(3):86-104.

[2] 田四明,吴克非,刘大刚,等. 软弱围岩隧道变形控制主动支护理念和技术[J]. 铁道学报,2021,43(6):158-164.

TIAN Siming, WU Kefei, LIU Dagang, et al. Study on active support technology for deformation control of tunnels in soft surrounding rock[J]. Journal of the China Railway Society,2021,43(6):158-164.

[3] 肖广智. 铁路隧道施工主动控制变形技术研究与实践[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(7):1087-1094.

XIAO Guangzhi. Study and application of active control deformation technology to railway tunnel construction[J]. Tunnel Construction,2018,38(7):1087-1094.

[4] 李术才,徐飞,李利平,等. 隧道工程大变形研究现状、问题与对策及新型支护体系应用介绍[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(7):1366-1376.

LI Shucan, XU Fei, LI Liping, et al. State of the art: challenge and methods on large deformation in tunnel engineering and introduction of a new type supporting system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(7):1366-1376.

[5] 李思. 山岭隧道支护组合形式优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.

LI Si. Study on optimization for the support combination pattern of mountain tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2019.

[6] 原先凡,刘兆勇,郑志龙. 陡立薄层岩体隧洞围岩失稳机理及支护研究[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(增刊2):828-832.

YUAN Xianfan, LIU Zhaoyong, ZHENG Zhilong. Research on the instability mechanism and supporting system of tunnel surrounding rock in steeply thin strata[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2017,13(S2):828-832.

[7] 荆升国. 高应力破碎软岩巷道棚-索协同支护围岩控制机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009.

JING Shengguo. Study on control mechanism of cooperating support of frame and anchor cable in soft fragmented surrounding rock roadway with high stress[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2009.

[8] LI C C. Performance of D-bolts under static loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(2): 183-192.

- [9] 李宁. 复合岩体穿层锚杆锚固力学机理及应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
LI Ning. Study on anchorage mechanical mechanism and application of rock bolt in composite rock mass[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [10] 文竞舟. 隧道初期支护力学分析及参数优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
WEN Jingzhou. Study on mechanical analysis of tunnel initial support and its parameters optimization [D]. Chongqing: College of Civil Engineering of Chongqing University, 2012.
- [11] 陶文斌, 吴平平, 陈铁林, 等. 基于锚杆拉拔试验优化锚固承载特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(9): 10-19.
TAO Wenbin, WU Pingping, CHEN Tielin, et al. Experimental research on optimization of anchorage bearing characteristics based on bolt pull-out test. [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(9): 10-19.
- [12] 陈峰. 恒阻大变形锚杆支护机理数值试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
CHEN Feng. Numerical experimental study on support mechanism of constant resistance and large deformation bolt [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [13] 吴学震, 王刚, 蒋宇静, 等. 拉压耦合大变形锚杆作用机理及其试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 139-147.
WU Xuezheng, WANG Gang, JIANG Yujing, et al. Mechanism of CTC-yield bolts and its experimental research[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 139-147.
- [14] ZHU Xunguo, CHEN Zhuoli, REN Yan. Numerical simulation study on the anchorage mechanism of yield supporting in deep tunnel[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(3): 2091-2102.
- [15] XIA Qingyong, ZHU Xunguo, ZHANG Guofeng, et al. The improved theory of synergetic action between anchor support system and surrounding rock-I L 4S mechanism theory and its application in tunnel support engineering[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(5): 3563-3572.
- [16] ZHU Xunguo, YANG Shuai, XIA Hongchun, 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.
- [17] YANG Shuai, ZHU Xunguo, ZHANG Guofeng, 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.
- [18] 黄炎杰. 基于双曲线模型的锚杆受力分析方法及其工程应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
HUANG Yanjie. Analysis method of bolt force based on hyperbolic model and its engineering application [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [19] 谭忠盛, 杨旻, 陈伟, 等. 中老铁路高地应力软岩隧道大变形控制技术[J]. 铁道学报, 2020, 42(12): 171-178.
TAN Zhongsheng, YANG Yang, CHEN Wei, et al. Large deformation control technology of high geostress soft rock tunnel of China-Loas railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(12): 171-178.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第131页)

- [19] 马啸, 王念秦, 李晓抗, 等. 基于 RF-FR 模型的滑坡易发性评价——以略阳县为例[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 335-344.
MA Xiao, WANG Nianqin, LI Xiaokang, et al. Assessment of landslide susceptibility based on RF-FR model: taking Lueyang County as an example [J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 335-344.
- [20] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering an Open Access Journal, 2020, 8(1): 22-34.
- [21] CHEN W, CHEN Y Z, TSANGARATOS P, et al. Combining evolutionary algorithms and machine learning models in landslide susceptibility assessments[J]. Remote Sensing, 2020, 12(23): 3854.
- [22] LEE S T, YU T T, PENG W F, et al. Incorporating the effects of topographic amplification in the analysis of earthquake-induced landslide hazards using logistic regression[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, 10(12): 2475-2488.

(责任编辑 周 蓓)