

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0043-12

引用格式: 袁坤, 张玉芳, 万军利. 内锚头预制长度对锚索锚固效果的影响规律[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 43-54.

Citation: Yuan Kun, Zhang Yufang, Wan Junli. Influence laws of precast inner anchorage head length on anchoring performance of anchor cables[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 43-54.

内锚头预制长度对锚索锚固效果的影响规律

袁 坤^{1,2}, 张玉芳^{1,2}, 万军利^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081;
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 高速铁路轨道系统全国重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 为深入探究山区铁路边坡锚索内锚头预制长度对锚索锚固效果的影响规律, 采用室内试验和数值模拟的方法, 分析内锚头预制长度对锚索注浆体轴向应力分布、注浆体与孔壁间接触面的应力分布及预制锚头极限承载力的影响。结果表明: 在相同地层条件下, 增加内锚头预制长度能够提升锚索承载力, 但整体提升幅度有限, 内锚头预制长度 50 cm 时锚索承载力提升效果最为显著; 通过高强水泥浆预制内锚头, 可有效改善锚索受力机制, 将传统承压板集中力转化为由预制锚头与孔壁黏结力、锚头尾部注浆体正应力共同承载, 从而提升锚索承载力; 内锚头预制长度增大, 预制内锚头尾部与注浆体接触面的最大压应变逐渐减小, 内锚头预制长度由 25 cm 增至 50 cm 时最大压应变减小幅度最大; 内锚头预制长度增大, 锚头位移减小, 注浆体与孔壁间接触面上剪切滑移区段缩短, 剪应力和法向应力峰值减小、分布范围增大, 预制内锚头前部注浆体的屈服范围减小, 内部剪切屈服区域增大, 屈服程度降低, 应力集中现象相对减弱, 改善了预制锚头锚索锚固系统受力状态。研究结果可为预制内锚头锚索设计提供技术支撑。

关键词: 山区铁路; 边坡; 预制内锚头锚索; 锚固效果; 室内试验; 数值分析

中图分类号: U416.1⁺4

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.03

随着交通基础建设的快速发展, 穿越复杂艰险山区的交通基础设施建设日益增多, 随之出现的深挖高填路段增多, 由此产生的边坡加固问题十分突出, 甚至成为制约交通工程建设的“瓶颈”^[1-3]。预应力锚固技术因其对岩土体扰动小、施工速度快等优点, 拓宽了其在岩土锚固技术的应用前景^[4-6]。作为深埋地下的锚固结构, 其工作环境条件复杂, 锚索结构的耐久性难以保障, 导致锚索(杆)失效的事故时有发生, 因此, 锚索(杆)耐久性研究刻不容缓^[7-14]。

国外 20 世纪 90 年代开始研究非金属锚杆, 试图从根本上解决金属锚杆在锚固工程中的耐久性问题^[15-20]。与国外相比, 我国非金属锚杆的研究于 21 世纪初开始, 如 2006 年研制的自由式单孔多锚头防腐型锚索^[21]。袁坤等^[22]和万军利^[23]提出了

一种预制内锚头新型耐久性锚索。该技术将传统压力集中型锚索锚头中的钢绞线、挤压套和承压板采用高强度材料整体浇筑成型, 有效解决了锚索承压板与挤压套接触部位注浆体填筑不密实、安装过程中承压板与孔壁之间裹入泥土、钢绞线施加预应力时承压板应力集中位置处注浆体开裂及地下水渗入腐蚀钢绞线等影响锚固段耐久性的难题。然而, 目前有关预制内锚头锚索的预制长度对其锚固性能影响的研究尚未开展, 例如预制内锚头的长度对其承载力、锚固段传力机制的影响。

本文通过室内试验、数值模拟相结合的方法, 研究内锚头预制长度对锚索极限承载力、锚索注浆体轴向应力分布、注浆体与孔壁间接触面的应力分布及注浆体间接触面的法向应力分布的影响。

收稿日期: 2025-08-18; 修订日期: 2026-02-25

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题(2023YJ305)

第一作者: 袁 坤(1989—), 男, 河南信阳人, 高级工程师。E-mail: yuankun0616@163.com

通讯作者: 张玉芳(1965—), 男, 河北石家庄人, 研究员, 博士研究生导师。E-mail: zyfl6898@126.com

1 预制内锚头锚索受力机理

预制内锚头锚索是在传统压力集中型锚索的基础上进行改进而成的,主要是将承压板、钢绞线及

挤压套3者的接触位置采用箍筋、高强混凝土在孔外预制;待预制体养护至设计龄期、锚索钻孔完成后,再将预制内锚头锚索安装至钻孔中。图1和图2分别为预制内锚头锚索结构示意图和预制内锚头结构图。

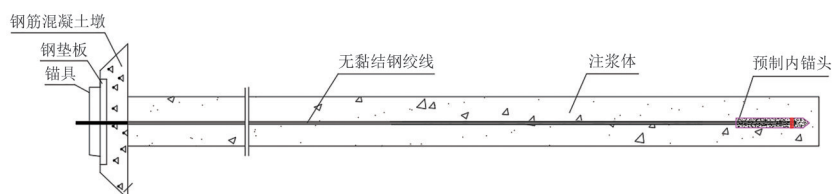


图1 预制内锚头锚索结构示意图

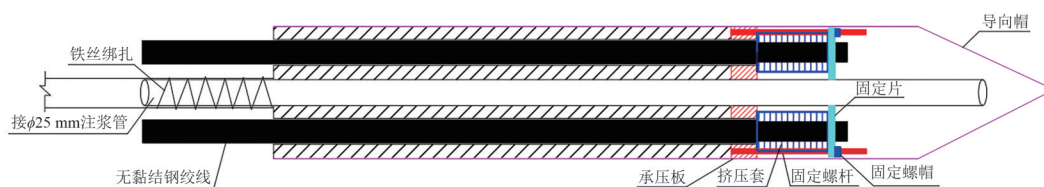


图2 预制内锚头结构

根据预制内锚头的受力传递机制,其主要存在以下2种破坏模式:预制锚头末端将注浆体压碎破坏;预制锚头沿着钻孔壁产生滑移破坏。图3为预制内锚头锚索破坏时受力示意图。图中: P 为施加预应力, kN; f_1 为注浆体与孔壁间粘结力, kN; f_2 为预制内锚头末端沿着钻孔壁与注浆体间黏结力, kN; F 为预制内锚头末端锚索注浆体承受的正压力, kN; L_{a1} 为预制内锚头末端注浆体与钻孔孔壁间的黏结长度, m; L_{a2} 为内锚头预制长度, m; d_1 为预制内锚头直径, mm; d 为钻孔直径, mm; b 为预制内锚头与钻孔孔壁间的距离, m。

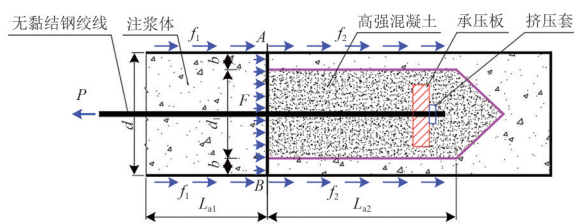


图3 预制内锚头锚索破坏时受力示意图

1) 预制锚头末端压碎注浆体的破坏模式

预制内锚头锚索施加的预应力 P 通过钢绞线传递至前端挤压套,挤压套作用于承压板,承压板作用于高强混凝土(通过高强混凝土添加箍筋提高承载力,解决传统压力集中型锚索承压板前注浆体易被压碎的问题),高强钢筋混凝土的受力由预制内锚头末端沿着钻孔壁与注浆体间的黏结力 f_2 及预制内锚头末端锚索注浆体承受的正压力 F 共同承担。预应力 P 计算式为

$$P = F + f_2 = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - 4d_g^2) R \eta + \pi d L_{a2} f_{r2} \xi_2 \quad (1)$$

式中: d_g 为钢绞线直径, mm; R 为注浆体抗压强度, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; η 为注浆体抗压强度增大系数; f_{r2} 为预制内锚头末端沿着钻孔壁与注浆体间的黏结系数, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; ξ_2 为预制内锚头段黏结强度影响系数。

2) 预制内锚头末端沿钻孔壁的滑移破坏模式

预应力 P 通过钢绞线传递至前端挤压套,挤压套作用于承压板,承压板作用于高强混凝土(通过高强混凝土添加箍筋提高承载力,解决传统压力集中型锚索承压板前注浆体易被压碎的问题),高强钢筋混凝土的受力传递至注浆体与孔壁间的黏结力 f_1 及预制内锚头末端沿着钻孔壁与注浆体间的黏结力 f_2 。预应力 P 计算式为

$$P = f_1 + f_2 = \pi d L_{a1} f_{r1} \xi_1 + \pi d L_{a2} f_{r2} \xi_2 \quad (2)$$

式中: f_{r1} 为注浆体与孔壁间的黏结系数, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; ξ_1 为预制内锚头末端注浆体段黏结强度影响系数。

2 室内模型试验

由上述受力计算式可知,内锚头预制长度与注浆体的抗压强度对锚索锚固性能存在一定的影响。因此,为进一步分析内锚头预制长度对锚索锚固性能的影响,开展内锚头预制长度对锚索锚固性能影响的室内模型试验研究。

2.1 试验方案

为研究内锚头预制长度对锚索锚固性能的影响,开展内锚头预制长度为0(普通压力集中型锚索,后文简称普通锚索),25,50和100 cm共4组锚索拉拔室内模型试验,如图4所示。通过混凝土模拟围岩体,预留 $\phi 13$ cm钻孔,钻孔内注水泥浆,所有试验的模型围岩尺寸、材料及试验条件完全相同。



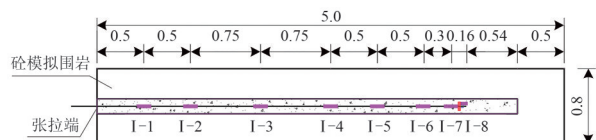
(a) 浇筑



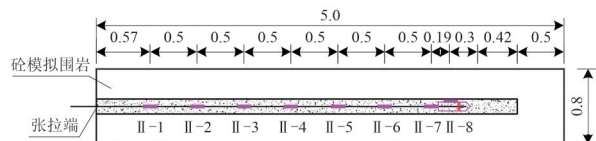
(b) 养护

图4 锚固试验模型准备

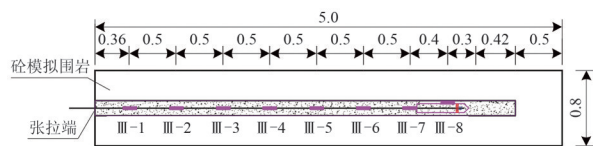
在4组试验不同位置布设应变计,如图5所示。图中:应变片长12 cm、宽2.5 cm,I-1中I表示第1组试验(内锚头预制长度为0 cm),1表示混凝土应变计编号;承压板直径为98 mm,厚度为20 mm;预制内锚头直径为102 mm;钻孔直径为150 mm。应变计安装现场如图6所示。



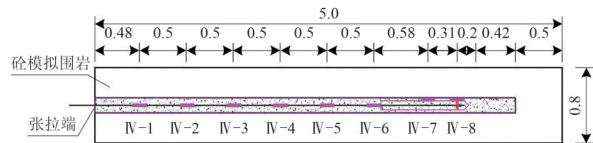
(a) 内锚头预制长度0 cm (普通锚索)



(b) 内锚头预制长度25 cm



(c) 内锚头预制长度50 cm



(d) 内锚头预制长度100 cm

— 砧应变计 — 承压板 — 预制锚头 — 钢绞线 — 注浆体

图5 室内模型试验锚索应变计布置(单位:m)



(a) 应变计固定在钢绞线上



(b) 应变计全部安装至钢绞线现场

图6 应变计现场安装

试验锚索采用 $4\phi 15.2$ mm高强度低松弛预应力钢绞线,拉拔荷载按不大于钢绞线极限承载力的90%控制。采用千斤顶、锚索测力计、千分表等仪器,按最大拉拔荷载900 kN进行循环加、卸荷载锚索基本拉拔试验。加载方式采用分级加载,分级荷载为100 kN,每次加载后读取锚索测力计拉力、千斤顶位移等监测数据。锚索基本拉拔试验如图7所示。

2.2 试验结果

内锚头预制长度为0 cm(普通压力集中型锚索)时,锚索基本拉拔试验结果如图8所示。由图8可知,锚索破坏荷载为796.4 kN。根据T/CECS



图7 锚索拉拔加载试验

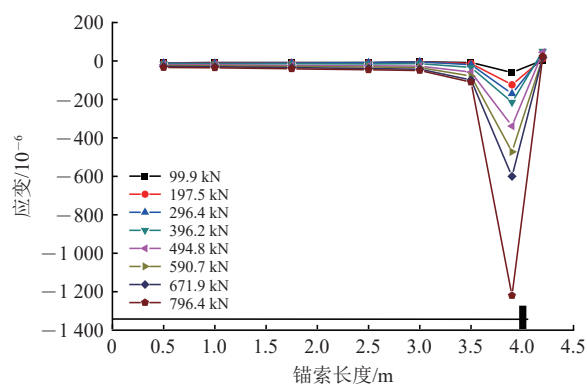
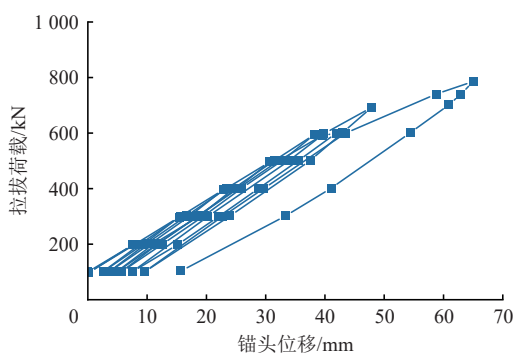
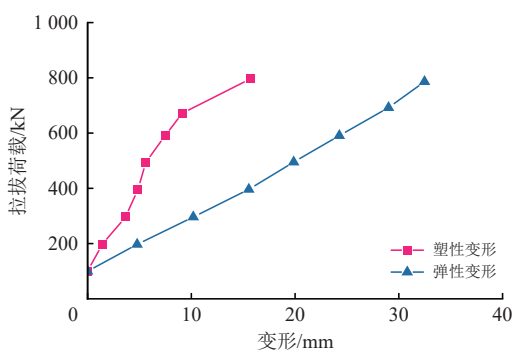


图9 普通锚索拉拔荷载-注浆体应变分布

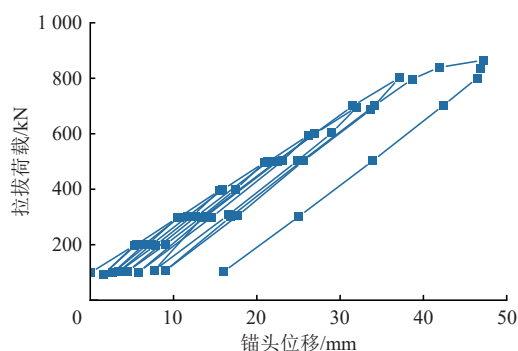


(a) 拉拔荷载-锚头位移曲线

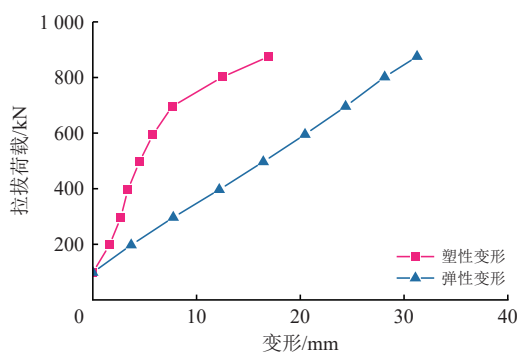


(b) 拉拔荷载-变形曲线

图8 普通压力集中型锚索拉拔试验结果



(a) 拉拔荷载-锚头位移曲线



(b) 拉拔荷载-变形曲线

图10 内锚头预制长度25 cm 锚索拉拔试验结果

22—2024《岩土锚杆技术规程》，锚索极限抗拔承载力应取破坏荷载的前一级荷载。因此，锚索极限抗拔承载力为671.9 kN。

图9为普通锚索拉拔荷载-注浆体应变分布，本文均以拉应变为正。由图9可知，承压板位置处注浆体出现压应力集中现象，预应力 P 为796.4 kN时，承压板前的压应变达到 $-1\,219.7 \times 10^{-6}$ 。

内锚头预制长度为25 cm时，锚索基本拉拔试验结果如图10所示。由图10可知：锚索破坏荷载为865.5 kN，极限抗拔承载力为695.9 kN；锚索预应力 P 在98.9~695.9 kN区间符合胡克定律的变形规律，在695.9~865.5 kN区间时塑性变形曲

线斜率趋于平缓，塑性位移持续增长，承载力增长趋缓，荷载难以继续提升。

图11为内锚头预制长度25 cm锚索拉拔荷载-注浆体应变分布。由图11可知：内锚头尾部至锚索钻孔孔口间的注浆体表现为受压，压应变峰值位于注浆体与预制内锚头尾部交界位置处，且该处的压应变随着施加预应力 P 增加而增大，当预应力 P 为865.5 kN时，交界位置处的最大压应变为 $1\,051.7 \times 10^{-6}$ 。与普通压力集中型锚索相比，内锚头预制长度25 cm的预应力锚索将应力集中位置转移到内锚头尾端与注浆体的交界面处，且有效减小了应力集中现象，应变减小了 168×10^{-6} 。

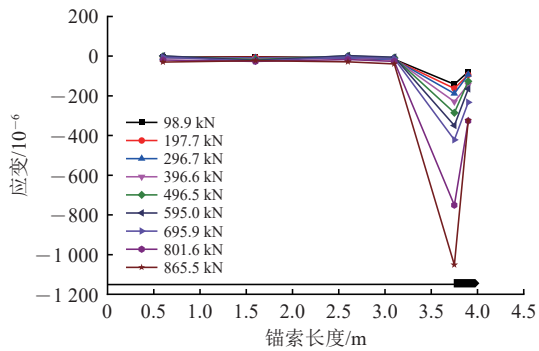


图11 内锚头预制长度25 cm锚索拉拔荷载-注浆体应变分布

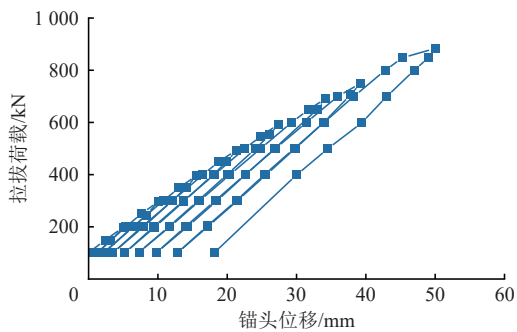
根据材料力学中的正应力计算式及胡克定律, 预制内锚头末端锚索注浆体承受的正压力 F 为

$$F = EA\varepsilon \quad (3)$$

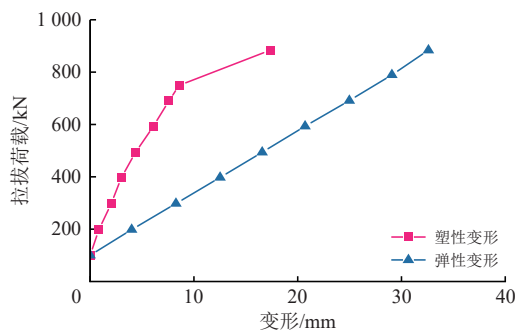
式中: E 为注浆体的弹性模量, MPa; ε 为线应变; A 为预制内锚头截面面积, mm^2 。

试验预制内锚头直径为102 mm, 注浆体为M30水泥砂浆, 取 $E=30$ GPa。与普通压力型锚索相比, 内锚头预制长度25 cm锚索的应变减小量为 168×10^{-6} , 计算得 $F=41.18$ kN, 即预制内锚头末端注浆体所受的轴力减小41.18 kN, 该部分由预制内锚头与钻孔孔壁间的黏结力分担。

内锚头预制长度为50 cm时, 锚索基本拉拔试验结果如图12所示。由图12可知: 内锚头预制长



(a) 拉拔荷载-锚头位移曲线



(b) 拉拔荷载-变形曲线

图12 内锚头预制长度50 cm锚索拉拔试验结果

度为50 cm时, 锚索破坏荷载为883.6 kN, 极限抗拔承载力为749.7 kN; 锚索预应力 P 在100.3~749.7 kN区间符合胡克定律, 在749.7~883.6 kN区间内位移持续增加, 无法收敛。

图13为内锚头预制长度50 cm锚索拉拔荷载-注浆体应变分布。由图13可知: 其应变分布规律与内锚头预制长度25 cm的锚索应变分布规律相同, 当预应力 P 为883.6 kN时, 交界位置处最大压应变为 591.6×10^{-6} ; 与内锚头预制长度为25 cm时相比, 注浆体最大压应变减小43.75%, 即减小了 460.1×10^{-6} , 采用式(3)计算可知预制内锚头尾端注浆体轴力减小了112.78 kN, 即预制内锚头与钻孔孔壁间注浆体黏结力分担约112.78 kN。

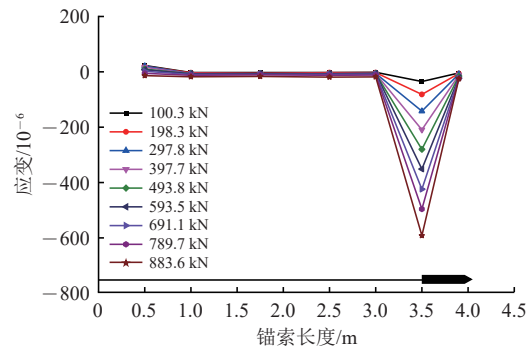
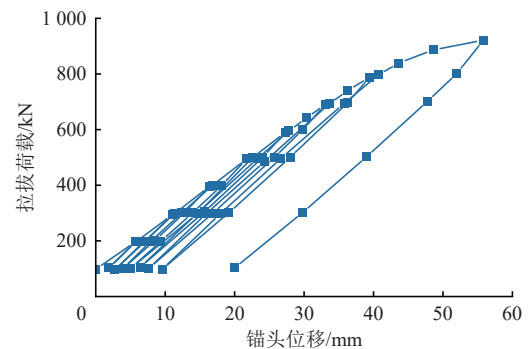


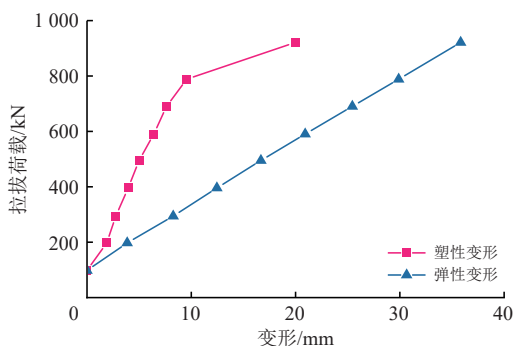
图13 内锚头预制长度50 cm锚索拉拔荷载-注浆体应变分布

内锚头预制长度为100 cm时, 锚索基本拉拔试验结果如图14所示。由图14可知: 内锚头预制长度为100 cm时, 锚索破坏荷载为921.2 kN, 极限抗拔承载力为788.4 kN。锚索施加预应力 P 在97.8~788.4 kN区间符合胡克定律的变形规律, 在788.4~921.2 kN区间内位移持续增加, 无法收敛。

图15为内锚头预制长度100 cm锚索拉拔荷载-注浆体应变分布。由图15可知: 其应变分布规律与内锚头预制长度25 cm的锚索应变分布规律相同, 当预应力 P 为921.2 kN时, 交界位置处最大



(a) 拉拔荷载-锚头位移曲线



(b) 拉拔荷载-变形曲线

图14 锚头预制长度100 cm 锚索拉拔试验结果

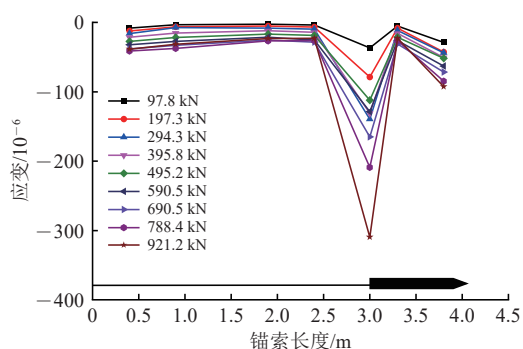


图15 锚头预制长度100 cm 荷载-注浆体应变分布

压应变为 309.5×10^{-6} ；与内锚头预制长度为50 cm时相比，注浆体最大压应变减小了47.68%，即减小了 282.1×10^{-6} ，采用式(3)计算可得，预制内锚头尾部注浆体轴力减小了69.15 kN，预制内锚头与钻孔孔壁间注浆体黏结力分担约69.15 kN。

图16为极限抗拔承载力与内锚头预制长度的关系曲线。由图16可知：在相同地层条件下，增加内锚头预制长度能够提高锚索承载力，但承载力提高幅度有限，试验中内锚头预制长度从0 cm增加至100 cm，承载力提高约17.39%，从承载力提高趋势来看，在内锚头预制长度为0~50 cm时，承载力提高的趋势呈上升趋势，内锚头预制长度为50~100 cm时，承载力提高的趋势减缓。以上结果

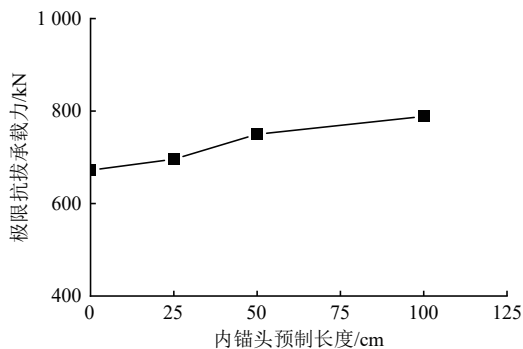


图16 极限抗拔承载力与内锚头预制长度关系曲线

表明，内锚头预制长度50 cm时锚索承载力提升效果最显著。预制内锚头锚索承载力提升的机理为：高强水泥浆预制内锚头将承压板的集中荷载转化为预制内锚头周围与孔壁之间的黏结力及预制内锚头尾部注浆体的正应力，进而提高锚索承载力。

图17为内锚头尾部与注浆体交界位置处最大压应变与内锚头预制长度的关系曲线。由图17可知：随着内锚头预制长度减小，预制内锚头尾部与注浆体接触面的最大压应变逐渐增大，内锚头预制长度为0 cm时最大压应变为内锚头预制长度为100 cm时的3.94倍，从应变减小幅度来看，内锚头预制长度在0~25 cm，最大压应变减小幅度小，内锚头预制长度在25~50 cm时，最大压应变减小幅度增大，内锚头预制长度在50~100 cm时，最大压应变减小幅度趋缓。试验数据表明，在内锚头预制长度为50 cm时，最大压应变减小幅度最大。

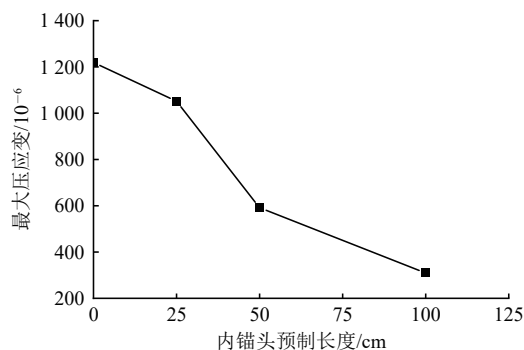


图17 交界位置处最大压应变与内锚头预制长度关系曲线

3 数值模拟

3.1 数值模型

预制内锚头锚索计算模型几何尺寸为 $500 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ ，注浆体长度为450 cm，钻孔直径为15 cm。考虑模型对称性，综合考虑模型的计算效率和计算速度，采用1/4模型进行计算，共计15 732个单元，18 287个节点。数值模型如图18所示。

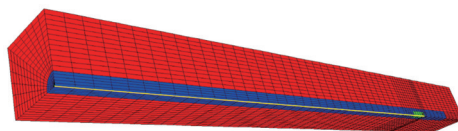


图18 数值模型

内锚头直径为10.2 cm，其预制长度分别为0，25，50和100 cm，共4种规格。围岩选用较硬岩，数值模拟计算参数见表1。

表 1 数值模拟计算参数

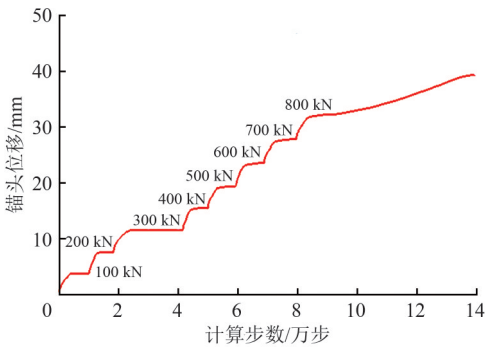
构件	单元类型	本构模型	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	等效黏聚力/MPa	等效内摩擦角/($^{\circ}$)	接触面黏聚力/MPa	接触面内摩擦角/($^{\circ}$)
围岩(较硬岩)	实体单元	摩尔库伦模型	22.0	0.28	2 380	2.02	42.95		
注浆体	实体单元	摩尔库伦模型	25.0	0.25	2 550	7.14	49.96		
承载板	实体单元	摩尔库伦模型	210.0	0.28	7 800				
预制锚头	实体单元	摩尔库伦模型	34.5	0.16	2 450	7.00	51.99		
围岩与注浆体间界面	接触面单元							1.00	49.00
预制锚头与注浆体间界面	接触面单元							1.00	49.00
钢绞线与注浆体间界面	接触面单元							0.16	35.00

进行锚索拉拔试验模拟时，对锚索端部依次施加 100，200，300，400，500，600，700，800，900 和 1 000 kN 的拉拔荷载。若某级荷载作用下锚索端部位移持续增加，无法到达稳定，则此级荷载作用下锚索已经破坏。

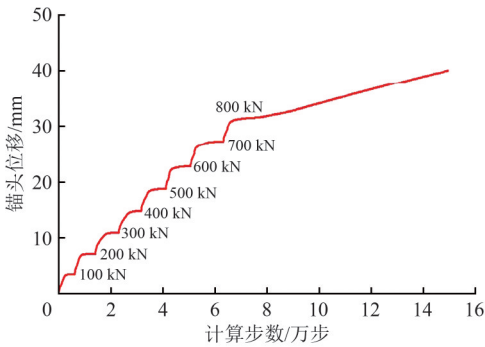
3.2 计算结果

3.2.1 锚头位移

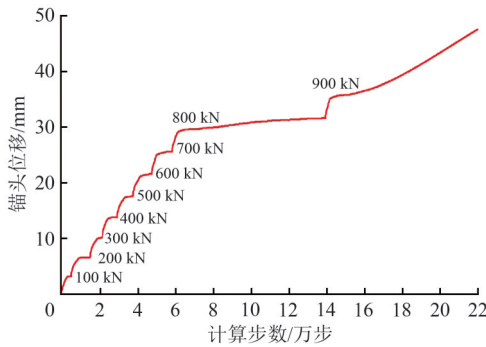
不同内锚头预制长度锚索的锚头位移随计算步数的变化曲线如图 19 所示。由图 19 可知：在相同试验条件下，锚索的极限承载力随着内锚头预制长度增加而增大；内锚头预制长度为 0 和 25 cm 时，拉拔荷载从 100 kN 增至 700 kN，内锚头位移随拉拔荷载增大呈线性增长，当拉拔荷载提高至 800 kN 时，位移持续增加无法收敛，表明内锚头发生滑移破坏；内锚头预制长度为 50 和 100 cm 时，拉



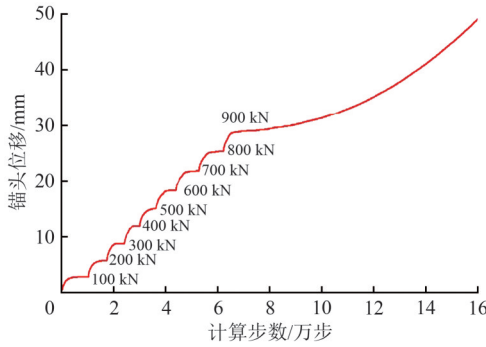
(a) 内锚头预制长度 0 cm



(b) 内锚头预制长度 25 cm



(c) 内锚头预制长度 50 cm



(d) 内锚头预制长度 100 cm

图 19 锚头位移随计算步数变化曲线

拔荷载从 100 kN 增至 800 kN，内锚头位移随拉拔荷载增大呈线性增长，当拉拔荷载提高至 900 kN 时，内锚头发生滑移破坏。

内锚头位移随拉拔荷载变化曲线如图 20 所示。由图 20 可知：在相同荷载作用下，内锚头预制长

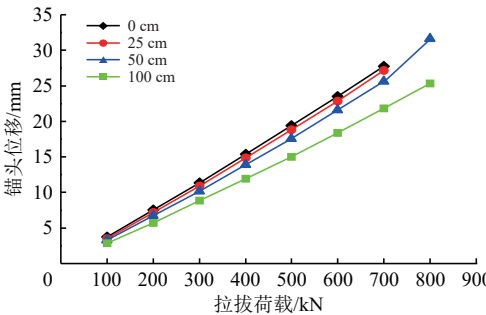


图 20 锚头位移随拉拔荷载变化曲线

度增大、锚头位移量减小,即预制内锚头可有效降低内锚头位移。

3.2.2 注浆体轴向应力

拉拔荷载为700 kN时,不同内锚头预制长度锚索注浆体轴向应力分布曲线如图21所示。由图21可知:内锚头预制长度为0 cm时,注浆体轴向应力在承压板前应力集中非常严重;内锚头预制长度大于0 cm时,锚索的轴向应力峰值分布在预制内锚头尾部与注浆体交界位置,内锚头预制长度为0 cm时的轴向应力峰值约为内锚头预制长度为100 cm时的3.5倍。

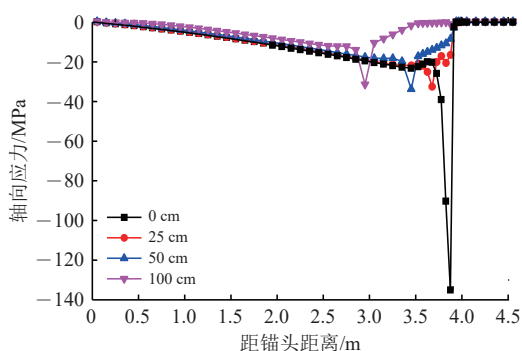


图21 不同内锚头预制长度锚索注浆体轴向应力分布曲线

3.2.3 注浆体与孔壁间接触面应力

拉拔荷载为700 kN时,不同内锚头预制长度锚索注浆体与孔壁间接触面剪应力云图如图22所示。由图22可知:注浆体与内锚头交界位置的剪应力最大;随着内锚头预制长度增大,注浆体与内锚头交界位置的剪应力逐渐减小,且注浆体与孔壁间接触面剪应力分布更为均匀,即应力集中现象得到缓解,说明增大内锚头预制长度可有效改善压力型锚索的受力特性。

拉拔荷载为700 kN时,不同内锚头预制长度锚索注浆体与孔壁间接触面的滑移状态如图23所示。

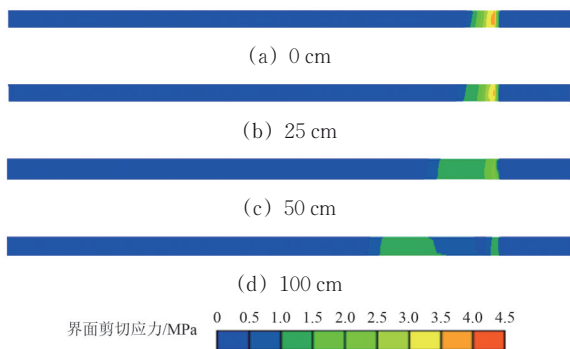


图22 不同内锚头预制长度锚索注浆体与孔壁间接触面剪应力云图

示。由图23可知:随着内锚头预制长度增大,注浆体与孔壁间接触面的剪切滑移范围逐渐减小;与传统压力集中型锚索相比,内锚头预制长度为100 cm锚索接触面的剪切滑移范围减小15.3%,表明增大内锚头预制长度可有效提高锚索注浆体与孔壁间抗剪切滑移的能力。

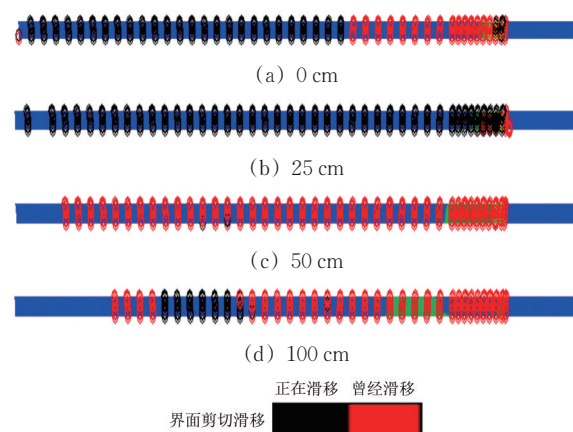
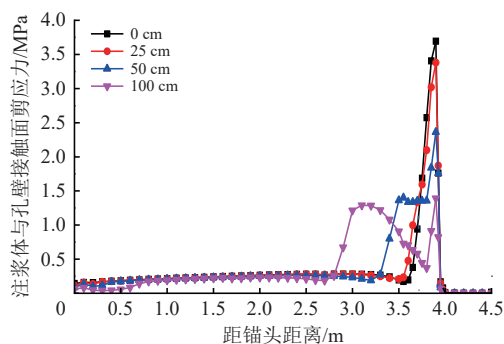
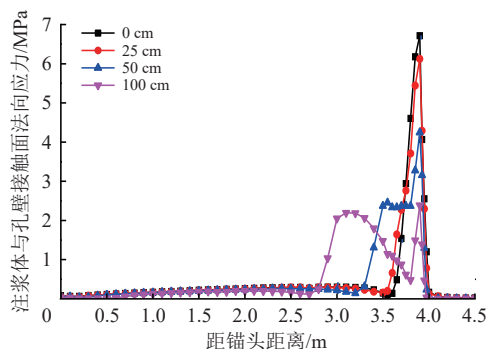


图23 不同内锚头预制长度锚索注浆体与孔壁间接触面滑移状态

拉拔荷载为700 kN时,锚索注浆体与孔壁间接触面剪应力与法向应力分布曲线如图24所示。由图24可知:内锚头预制长度越小,注浆体与孔壁间接触面剪应力和法向应力峰值越大,且应力集



(a) 接触面剪应力



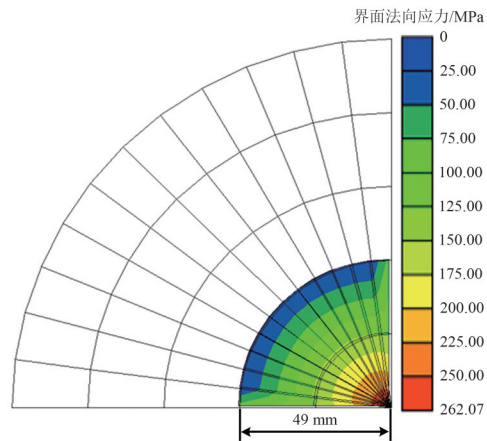
(b) 接触面法向应力

图24 注浆体与孔壁间接触面剪应力和法向应力分布曲线

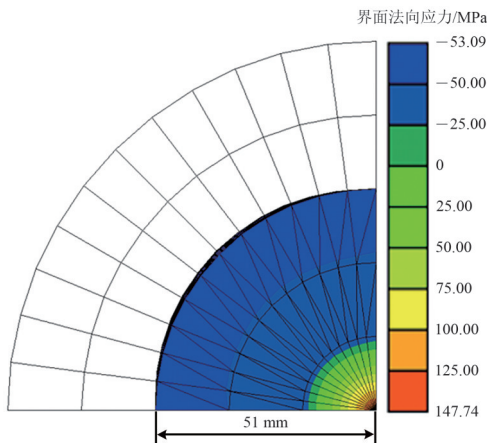
中现象越明显，表明预制内锚头锚索改善了锚固系统的受力状态。

3.2.4 预制内锚头与注浆体接触面法向应力

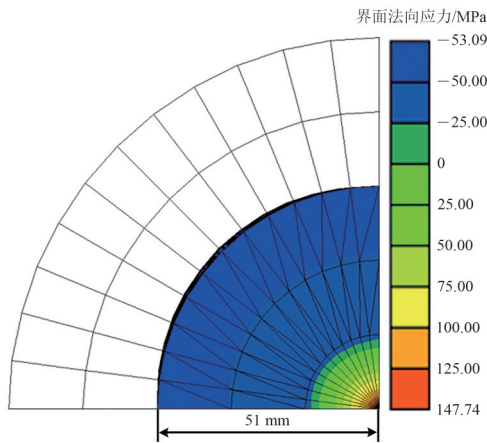
拉拔荷载为 700 kN 时，承压板或预制内锚头与注浆体接触面的法向应力云图如图 25 所示。由图 25 可知：内锚头预制长度越小，内锚头与注浆体接触面的法向应力分布范围越大，法向应力集中现象越显著，越易导致材料屈服。



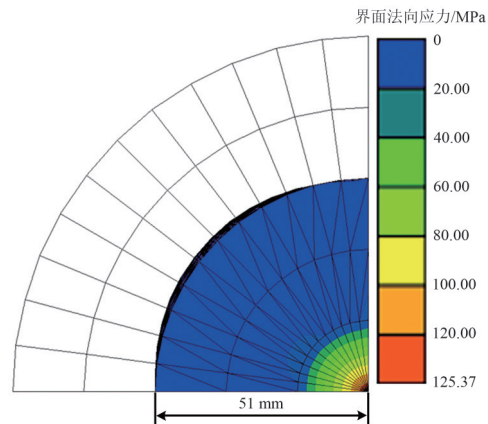
(a) 内锚头预制长度 0 cm



(b) 内锚头预制长度 25 cm



(c) 内锚头预制长度 50 cm



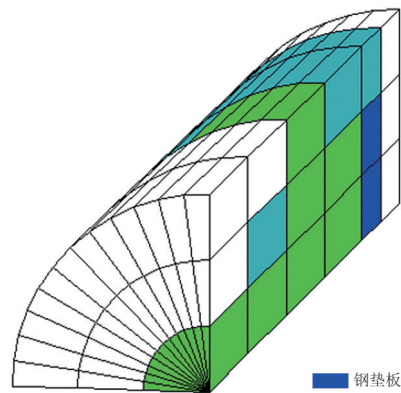
(d) 内锚头预制长度 100 cm

图 25 700 kN 荷载时预制内锚头与注浆体接触面法向应力云图

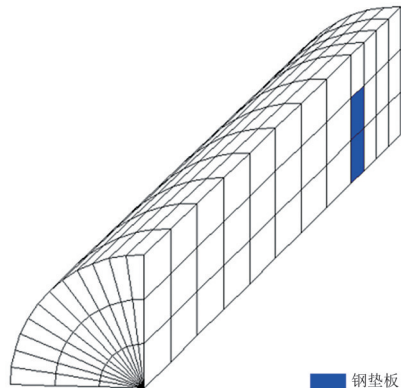
3.2.5 预制内锚头屈服状态

拉拔荷载为 700 kN 时，不同预制长度内锚头剪切屈服状态如图 26 所示。由图 26 可知：内锚头预制长度越小，其内部发生剪切屈服的区域减小，发生屈服的程度增大，应力集中程度越显著。

在相同试验条件下，内锚头预制长度对注浆体与孔壁间接触面的应力分布及预制锚头极限承载力的影响模拟结果总结如下。



(a) 内锚头预制长度 25 cm



(b) 内锚头预制长度 50 cm

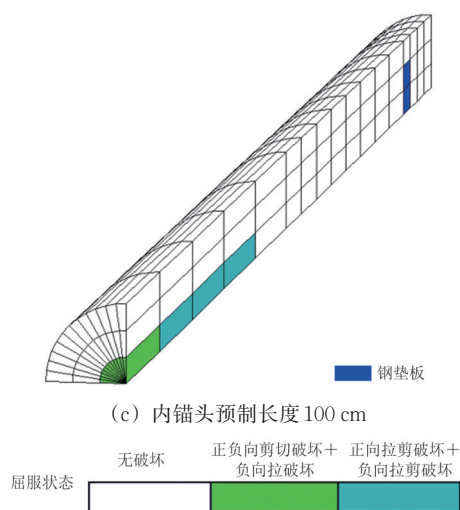


图26 预制内锚头的剪切屈服状态

(1) 内锚头预制长度越大, 锚索的极限承载力越大, 锚头位移越小, 表明增加内锚头预制长度可以提高锚索整体的变形刚度。

(2) 普通锚索注浆体在承压板前应力集中非常严重, 预制内锚头锚索的注浆体应力峰值分布在预制内锚头尾部与注浆体交界面位置, 普通锚索注浆体应力峰值约为预制内锚头锚索的3.5倍。

(3) 在内锚头预制长度不同的情况下, 注浆体与孔壁间接触面剪应力分布范围不同。注浆体与内锚头交界位置的剪切应力最大, 且随着内锚头预制长度增大, 注浆体与内锚头交界位置的剪应力较小, 且注浆体与孔壁间接触面剪应力分布相对较为均匀, 应力集中的现象减轻, 可以改善压力型锚索的受力特性。

(4) 预制内锚头锚索可以有效减小承压板前注浆体的屈服范围。

4 结 论

本文基于新型预制内锚头锚索的结构设计特点, 明确其受力模式与计算方法, 综合采用理论分析、室内模型试验与数值模拟手段, 系统研究了内锚头预制长度对锚索锚固系统受力特性、变形规律及锚固效果的影响, 通过试验与模拟结果相互印证, 验证了试验规律的准确性, 最终得到主要结论如下。

(1) 在相同地层条件下, 增加内锚头预制长度能够提高锚索承载力, 但承载力提高幅度有限, 本次试验数据表明, 内锚头预制长度50 cm时锚索承载力提升效果最显著, 同时, 预制内锚头可有效改善锚索受力机制, 将传统承压板集中力, 转化为预制锚头与孔壁黏结力、锚头尾部注浆体正应力共同承载, 从而提升锚索承载力。

(2) 在相同地层条件下, 随着内锚头预制长度增大, 预制内锚头尾部与注浆体接触面的最大压应变逐渐减小, 通过室内试验与数值模拟对比分析, 预制内锚头可以成倍减小最大压应变, 且在内锚头预制长度为50 cm时, 最大压应变减小幅度最大。

(3) 在试验条件相同情况下, 内锚头预制长度增大, 锚头位移减小, 注浆体与孔壁间接触面上出现剪切滑移状态的区段长度缩短; 注浆体与孔壁间接触面剪应力和法向应力峰值减小, 且分布范围增大, 预制内锚头前部注浆体的屈服范围减小; 预制内锚头内部发生剪切屈服的区域增大, 发生屈服的程度减轻, 应力集中现象相对减弱, 改善了预制锚头锚索锚固系统受力状态。

参 考 文 献

- [1] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7-12, 34.
Cheng Liangkui. Present status and development of ground anchorages[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 7-12, 34.
- [2] 喻晓, 曹秀丽. 锚杆耐久性研究回顾与探讨[J]. 中国勘察设计, 2012(7): 64-67.
Yu Xiao, Cao Xiuli. Review and discussion on anchor durability research[J]. China Investigation & Design, 2012(7): 64-67.
- [3] 张思峰, 宋修广, 李艳梅, 等. 边坡预应力单锚索耐久性分析及其失效特性研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(9): 22-29.
Zhang Sifeng, Song Xiuguang, Li Yanmei, et al. Study on durability and failure characteristics of single prestressing cable for slope engineering[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(9): 22-29.
- [4] 曾宪明, 雷志梁, 张文巾, 等. 关于锚杆“定时炸弹”问题的讨论—答郭映忠教授[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 143-147.
Zeng Xianming, Lei Zhiliang, Zhang Wenjin, et al. Discussion about “time bomb” question for bolt—an answer to professor Guo Yingzhong[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 143-147.

- [5] 李英勇,张顶立,张宏博,等.边坡加固中预应力锚索失效机制与失效效应研究[J].岩土力学,2010,31(1):144-150,157.
Li Yingyong, Zhang Dingli, Zhang Hongbo, et al. Research on failure mechanism and effects of prestressed anchor cables for reinforcing slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 144-150, 157.
- [6] 曾宪明,陈肇元,王靖涛,等.锚固类结构安全性与耐久性问题探讨[J].岩石力学与工程学报,2004,23(13):2235-2242.
Zeng Xianming, Chen Zhaoyuan, Wang Jingtao, et al. Research on safety and durability of bolt and cable-supported structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2235-2242.
- [7] 刘永奎.基于颗粒流法的预应力端头树脂锚杆支护力学特性研究[J].中国铁道科学,2025,46(2):140-153.
Liu Yongkui. Study on mechanical properties of prestressed resin-end anchored bolts support based on particle flow method[J]. China Railway Science, 2025, 46(2): 140-153.
- [8] 冷伍明,邓志龙,徐方.基于路基土蠕变效应的路基预应力损失模型研究[J].岩土力学,2022,43(6):1671-1682.
Leng Wuming, Deng Zhilong, Xu Fang. A prestress loss model for subgrade considering creep effect of subgrade soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(6): 1671-1682.
- [9] 万军利,冯文林.预应力钢锚管注浆锚索边坡加固力学特性[J].科学技术与工程,2024,24(14):6012-6021.
Wan Junli, Feng Wenlin. Mechanical properties of pre-stressed steel anchor pipe grouting anchor cable slope reinforcement[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(14): 6012-6021.
- [10] 王玉杰,尹韬,孙兴松,等.丰满老坝加固预应力锚索服役近30年后性能评价研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):62-69.
Wang Yujie, Yin Tao, Sun Xingsong, et al. Performance evaluation of prestressed anchors embedded in old Fengman Dam after nearly 30 years service[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 62-69.
- [11] 李剑.预应力锚索失效因素的试验和数值研究[D].重庆:重庆大学,2007.
Li Jian. Experimental research and numerical simulation on failure factor of prestressed cable[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [12] 郑静,曾辉辉,朱本珍.腐蚀对锚索力学性能影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2469-2474.
Zheng Jing, Zeng Huihui, Zhu Benzhen. Test study of influence of erosion on mechanical behavior of anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2469-2474.
- [13] 程良奎,韩军,张培文.岩土锚固工程的长期性能与安全评价[J].岩石力学与工程学报,2008,27(5):865-872.
Cheng Liangkui, Han Jun, Zhang Peiwen. Long-term performance and safety assessment of anchorage in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 865-872.
- [14] 赵健,冀文政,曾宪明,等.应力腐蚀对锚杆使用寿命影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊1):3427-3431.
Zhao Jian, Ji Wenzheng, Zeng Xianming, et al. Experimental study of the influence on durableness of anchor with stress corrosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3427-3431.
- [15] Sentry M, Bouazza A, et al. Advancements in ground anchors: carbon fibre reinforced polymer (CFRP) strands[C]// International Conference on Ground Anchorages and Anchored Structures in Service, November 26-27, 2007, London, UK. Leeds, Emerald Publishing, 2007: 321-330.
- [16] Berthet J F, Ferrier E, Hamelin P, et al. Modelling of the creep behavior of FRP-confined short concrete columns under compressive loading[J]. Materials and Structures, 2007, 39(1): 53-62.
- [17] Li Jianzhi, Wang Chen, Zhao Yiyao. A Long-term monitoring method of corrosion damage of prestressed anchor cable[J]. Micromachines, 2023, 14(4): 799.
- [18] Fu Yukai, Wu Yongzheng, He Sifeng, et al. Investigation of the mechanical properties of shear in an experimental setting of prestressed anchor cable in mines[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(10): 8179-8192.
- [19] Bian Wenhui, Yang Jun, Wang Kexue, et al. Analysis of non-uniform force distribution characteristics among tendons of prestressed anchor cable and experimental study on equal stress tensioning[J]. Engineering Structures, 2025(329): 119869.
- [20] Wang Xiaogang, Sun Xingsong, Wang Yujie, et al. Service life prediction of prestressed anchor cable exposed to a dry-wet cycling corrosion environment[J]. Construction and Building Materials, 2023, 406: 133365.
- [21] 李世民,徐宝,郭彦明.新型锚杆、锚索的发展现状及展望[J].预应力技术,2015(2):12-19.
Li Shimin, Xu Bao, Guo Yanming. The development status and prospect of the new bolt anchor cable[J]. Prestress Technology, 2015(2): 12-19.

- [22] 袁坤, 张玉芳, 李健, 等. 预制内锚头新型锚索锚固性能研究及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 77-86.
Yuan Kun, Zhang Yufang, Li Jian, et al. Performance and application of anchor with a new pressure-type of anchor cable with precast anchor head[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 77-86.
- [23] 万军利. 预制内锚头新型锚索锚固效果试验研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(12): 92-96.
Wan Junli. Experimental study on anchorage effect of new anchor cable with prefabricated inner anchor head[J]. Railway Engineering, 2017, 57(12): 92-96.

Influence laws of precast inner anchorage head length on anchoring performance of anchor cables

Yuan Kun^{1,2}, Zhang Yufang^{1,2}, Wan Junli^{1,2}

- (1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. State Key Laboratory for Track Systems of High-Speed Railway, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: To investigate the influence laws of precast inner anchorage head length in mountain-area railway slope anchoring cables on the anchoring performance, laboratory tests and numerical simulation are adopted to analyze the effects of precast inner anchorage head length on the axial stress distribution of anchor cable grout, the stress distribution at the interface between grout and borehole wall, and the ultimate bearing capacity of precast anchorage heads. The results indicate that under identical stratum conditions, extending the precast length of the inner anchorage head can enhance the bearing capacity of the anchor cable with limited overall improvement. The optimal improvement in bearing capacity is achieved when the precast length of the inner anchorage head reaches 50 cm. Precasting the inner anchorage head with high-strength cement grout can effectively optimize the load-bearing mechanism of anchor cables. It transforms the concentrated load borne by conventional bearing plates into a combined resistance provided by the bond strength between the precast anchorage head and borehole wall and the normal stress of grout at the anchorage head tail, thus improving the ultimate bearing capacity of anchor cables. As the precast length of the inner anchorage head increases, the maximum compressive strain at the contact surface between the tail of the precast inner anchorage head and surrounding grout gradually decreases. The precast inner anchorage head can significantly reduce the maximum compressive strain, and the reduction is the greatest as the precast inner anchorage head length increases from 25 cm to 50 cm. With an increase in precast inner anchorage head length, the displacement of the anchorage head decreases, the shear slip zone at the interface between grout and borehole wall shortens, the peak values of shear stress and normal stress drop while their distribution range expands. Meanwhile, the yielding range of grout in front of the precast inner anchorage head shrinks, the internal shear yielding area expands with a lower yielding degree, and stress concentration is mitigated, which optimizes the stress state of the anchoring system with precast inner anchorage heads. The research findings can provide technical support for the design of anchor cables with precast inner anchorage heads.

Key words: Mountain railway; Slope; Precast inner anchorage head anchor cable; Anchoring effect; Laboratory test; Numerical analysis

(责任编辑 王蕴嘉)