

不同类型锚杆冻融效应与损伤机制分析

谢天*,李聪,张新宙,吴亮亮,赵凯艺
(武汉轻工大学土木工程与建筑学院,湖北武汉 430023)

摘要:寒区边坡支护中不同类型锚杆受到季节性冻融作用后损伤效应与机制不同,为深入了解冻融循环作用对不同锚杆产生的冻融损伤效应,从锚杆的结构形式、锚杆材料两个方面对锚杆进行区分,总结了非预应力锚杆与预应力锚杆、FRP锚杆与钢锚杆已有研究成果之间的差异,分析了不同类型锚杆冻融损伤机制之间的差异,指出开展不同类型锚杆冻融损伤研究时应选择不同的研究方法和侧重点,并区分不同类型给出了锚杆冻融损伤有价值的研究方向。

关键词:不同类型;锚杆;冻融循环;损伤机制

中图分类号:TD353 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5716(2025)04-0005-03

近些年来,我国经济飞速发展,西部与华北寒区基础设施建设的投入增加,寒区边坡的失稳滑塌现象也逐渐增多,锚杆支护技术大量应用于寒区的边坡加固工程中,因此存在锚杆冻融损伤问题。实际上,不同类型的锚杆冻融损伤机制与效应不同,如预应力锚杆和非预应力锚杆、金属材料锚杆和复合材料锚杆等,为了系统地探索并研究锚杆冻融损伤机制与效应,进行不同锚杆冻融效应分析具有重要意义。本文按照有、无预应力和制作材料进行区分,开展了不同类型锚杆冻融效应与损伤分析。

1 非预应力锚杆与预应力锚杆冻融损伤

从锚杆的结构形式来看,主要分为全长黏结非预应力锚杆和非全长黏结预应力锚杆两种,在边坡加固中也主要采取这两种方式进行锚固,寒区边坡锚杆受季节性体变作用会产生冻融损伤。

1.1 非预应力锚杆冻融损伤

非预应力锚杆是指锚固后不施加外力,被动受力的一种锚杆。对于非预应力锚杆的冻融损伤已有部分学者开展过研究。孙奇^[1]对GFRP锚杆进行冻融循环后,进行拉拔试验研究了黏结强度的变化规律。张伟丽等^[2]通过拉拔试验研究了不同冻融循环周期下锚杆位移和锚固力的大小,以及锚杆应力、锚杆和砂浆胶结面剪应力的变化。Yuan等^[3]研究了冻融后砂浆锚杆锚固力、位移、锚固应力以及锚杆与水泥砂浆的黏结强

度。朴昇昊等^[4]通过加载试验研究了注浆GFRP锚杆在冻融后锚杆应力和承载力的变化规律。

可见对于非预应力锚杆的冻融研究,主要是通过拉拔试验研究冻融循环对锚筋锚固性能的影响,利用拉拔曲线分析锚杆应力分布与承载力变化规律。但试验中的试件大部分使用类岩石材料模拟岩体,没有反映实际岩体的含裂隙特征,故开展冻融循环后含裂隙的锚固岩体拉拔试验与疲劳损伤试验具有价值。

1.2 预应力锚杆冻融损伤

预应力锚杆工作原理是通过锚头产生的锚固力对围岩施加一定的预应力来主动加固围岩。国内外有部分学者对预应力锚杆冻融损伤进行探索研究。葛琦等^[5]建立温度和锚索预应力的自回归分布滞后模型,模拟锚索预应力波动变化的过程,分析讨论预应力随季节性温度变化的长期过程。董建华等^[6]研制了边坡支护结构冻融模型模拟系统并开展试验,分析了不同位置处的锚杆应变在冻融循环作用下的规律。建立水热力耦合计算模型,采用有限元法计算冻融周期内锚杆轴力的变化。王宝^[7]对预应力钢锚杆试件进行拉拔试验,发现随着冻融循环次数增加,预应力锚杆的拉拔承载力逐渐降低,另外提高预应力可以减小锚杆的预应力损失。杨栋等^[8]提出可双向调节预应力的锚索新结构,可实现冻胀时可抵消锚索预应力增长与融缩时可抵消预应力损失的目的。

* 收稿日期:2024-06-15 修回日期:2024-07-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目“冻融循环作用下陡倾节理边坡锚固岩体力学响应与疲劳损伤研究”(No.52179110);武汉轻工大学博士科研启动项目“HMC耦合作用下预应力锚固结构局部腐蚀行为与机理”(2021RZ028)。

第一作者简介:谢天(1999-),男(汉族),湖北嘉鱼人,武汉轻工大学在读硕士研究生,研究方向:锚杆冻融损伤。

可见,已有研究指出了冻融循环对预应力锚固结构锚杆产生的影响主要是造成预应力损失,但对其形成的力学机制并未开展深入研究,尤其是含裂隙的预应力锚固岩体中锚杆冻融损伤的力学机制不够清晰。

1.3 非预应力锚杆与预应力锚杆冻融疲劳损伤区别

基于以上已有的研究现状,发现非预应力锚杆冻融损伤研究主要是通过拉拔试验研究冻融循环对锚筋锚固性能的影响,损伤特征主要体现为黏结强度、黏结滑移及锚杆轴力的变化,而预应力锚杆冻融损伤主要体现为锚杆预应力损失与拉拔承载力下降。

从力学损伤机制方面来看,图1(a)中非预应力锚固体系的锚固岩土受冻胀力作用,表现为岩土裂隙扩

张,由于锚杆与锚固岩体直接黏结,锚固岩体因冻胀力作用发生冻胀变形,裂隙冻胀变形使得锚杆上产生黏结切应力,裂隙冻胀变形使得锚杆在裂隙处产生明显的应力集中,即裂隙处的锚杆受力可看作两边对这一点作用集中力(图中大箭头表示),集中力的大小等效于黏结切应力的合力。

图1(b)中预应力锚固体系由于自由段锚杆没有与锚固岩体直接黏结,锚固裂隙因冻胀力作用发生冻胀变形后,使得锁定端点和锚固端点发生位移,此时锚杆自由段发生变形,此情况下锚固裂隙岩体冻胀后锚杆的受力可以看成作用在分别锁定端点和锚固端点的一对相互平衡的集中力。

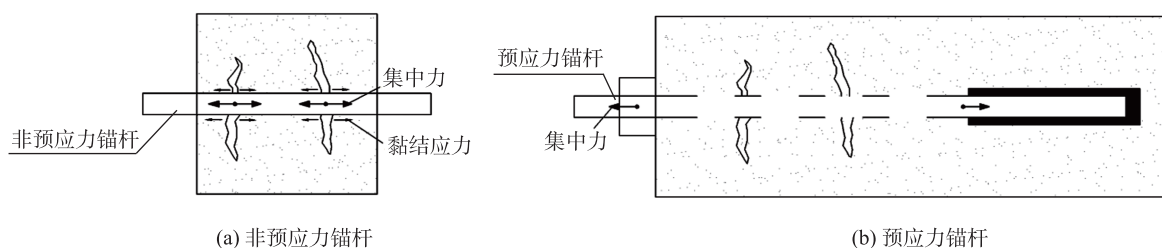


图1 非预应力锚杆与预应力锚杆冻胀受力图

从上述分析可以看出,在冻融循环作用下,非预应力锚杆会在黏结处产生周期性的黏结应力,在裂隙处产生低幅值的周期性张拉力;预应力锚杆则是在自由段两端形成周期性的较高幅值的周期性张力,在锚固段产生周期性的拉拔力。所以,冻融作用下,非应力锚杆会产生显著的黏结性能疲劳损伤退化,而预应力锚杆会发生自由段锚杆材料的疲劳损伤和锚固段的拉拔损伤。

综上所述,针对非预应力锚杆和预应力锚杆进行冻融损伤研究时应选择不同的研究方法和侧重点。结合已有的研究现状可以总结出,针对非预应力锚杆开展经历冻融循环后锚固岩体拉拔试验、针对预应力锚杆开展温度和力学荷载耦合作用下锚筋力学性能试验研究具有意义。

2 FRP锚杆与钢锚杆冻融损伤

从锚杆的制作材料来看,主要有FRP锚杆与钢锚杆两类。相应的冻融损伤研究主要是分析冻融作用后锚杆的材料性能损伤。

2.1 FRP锚杆冻融损伤

FRP(纤维增强复合材料)锚杆是由纤维材料+基体材料(树脂)按一定的比例混合后形成的高性能型材料锚杆,能有效提升锚固结构的耐久性能。作为复合

材料锚杆,其受冻融作用可能发生材料性能劣化。

Chen等^[9]开展了纤维增强聚合物(FRP)筋耐久性研究,测试了水溶液、KOH+NaCl溶液环境冻融作用下GFRP筋拉伸强度、剪切强度。孙奇^[1]测试了冻融循环作用下GFRP锚杆拉伸强度和弹性模量,并采用多项式函数非线性拟合,分析GFRP锚杆性能变化规律。刘文娟等^[10]试验发现GFRP锚杆冻融循环后弹性模量增大,拉伸强度下降。王宝^[7]通过微观试验发现FRP锚杆的树脂保护层在冻融作用下会劣化,露出内部纤维材料,影响锚杆长期性能。林明安等^[11]对冻融循环作用后的BFRP锚杆进行拉伸试验,发现BFRP锚杆抗拉强度有所下降,弹性模量变化不大。

由此可见,已有研究主要对冻融后的FRP锚杆材料开展拉伸试验,研究在冻融作用后FRP锚杆力学性能劣化规律。发现经历冻融作用后,锚杆拉伸强度、剪切强度等力学参数有一定程度的劣化。冻融后的剪切强度损失率明显大于轴向拉伸强度,在冻融循环作用后剪切强度可降低14%,且冻融循环次数多、赋存环境含有Cl⁻时,力学性能劣化程度可能更显著。

2.2 钢锚杆冻融损伤

第1节中论述了钢锚杆冻融后锚固段性能退化规律,本节主要分析钢锚杆自由段冻融损伤。钢锚杆自

由段的疲劳损伤研究针对的是钢材受到疲劳荷载的结果,调研表明,少有专门研究钢锚杆在冻融循环作用后的材料疲劳损伤特征。

2.3 FRP锚杆与钢锚杆冻融损伤区别

FRP锚杆与钢锚杆作为不同材料锚杆,其材料性能不同,冻融损伤亦有不同。已有研究发现FRP锚杆经历冻融后,锚杆材料性能会发生劣化。而钢筋的冻融引起的材料性能退化研究较少,可能是因为钢材在冻融循环作用下材料性能不会发生明显改变。

分析表明,产生FRP锚杆冻融性能劣化现象的原因是,FRP锚杆是由纤维材料+树脂材料复合而成,不同材料热膨胀系数不同。例如常见碳纤维材料热膨胀系数是 $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,常见树脂热膨胀系数约 $80 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,可以看出常见树脂材料热膨胀系数约是碳纤维的160倍。故在冻融过程中,温度发生变化,碳纤维和树脂会发生一定程度的不协调变形,所以冻融循环后会发生明显的材料损伤。在温变引起复合材料不均匀变形后,纤维材料与树脂材料界面发生劣化,故力学性能降低。黏结性能降低后复合材料的抗剪切性能显著下降,轴向拉伸性能一定程度下降。而钢锚杆属于均质材料,不会在冻融作用后产生显著的材料冻融损伤。

综上,结合已有的研究现状可以总结出,已开展了一系列FRP锚杆冻融损伤试验,FRP锚杆轴向和切向的力学性能劣化,且剪切方向的强度劣化比轴向更显著,另外当FRP锚杆赋存在 H_2O 、 NaCl 等溶液环境时表现出不同的损伤特征。钢锚杆材料在单独的冻融作用(自由伸缩)不会产生显著的损伤。总结已有研究后可以看出,针对FRP锚杆开展复杂环境下的冻融损伤研究,针对钢锚杆开展含有约束作用下冻融疲劳损伤效应具有意义。

3 结语

本文从结构形式上将锚杆分为非预应力锚杆与预应力锚杆、从制作材料上分为FRP锚杆与钢锚杆,分别总结了不同类型锚杆冻融损伤现状,分析并指出了不同类型锚杆损伤机制存在明显区别,在开展不同类型锚杆冻融损伤研究时应选择不同的研究方法和侧重点。主要结论有:

(1)冻融作用后,非预应力锚杆在黏结处产生周期性的黏结应力,在裂隙处产生低幅值的周期性张拉力,会引起显著的黏结性能疲劳损伤退化;而预应力锚杆在自由段两端形成周期性高幅值张拉力,在锚固段产生周期性拉拔力,会引起自由段锚杆材料的疲劳损伤

和锚固段的拉拔损伤。

(2)FRP锚杆由于自身不同材料热膨胀系数差异大,冻融温变导致纤维/树脂界面劣化,力学性能降低,且剪切方向的力学性能降低程度比轴向更显著;而均匀的钢锚杆在单独的自由冻融作用下不会产生显著的损伤。

针对不同类型的锚杆,可以从以下几个方面分别开展研究具有价值。

(1)针对非预应力锚杆开展经历冻融循环后锚固岩体拉拔试验,针对预应力锚杆开展温度和力学荷载耦合作用下锚筋力学性能试验研究。

(2)针对FRP锚杆开展复杂环境下的冻融损伤研究,针对钢锚杆开展含有约束作用下冻融疲劳损伤研究。

参考文献:

- [1] 孙奇.GFRP锚杆冻融循环与长期荷载作用力学性能试验研究[D].中南大学,2013.
- [2] 张伟丽,项伟,贾海梁.冻融循环对砂浆岩石锚杆锚固力影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(3):558-566.
- [3] Yuan J,Ye C,Yang J,et al.Experimental and Numerical Investigation on the Deterioration Mechanism for Grouted Rock Bolts Subjected to Freeze-thaw Cycles[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2021,80(7):5563-5574.
- [4] 朴昇昊,张伟丽,王永一,等.冻融循环对GFRP锚杆锚固性能影响的试验研究[J].地质科技通报,2022,41(6):301-307.
- [5] 葛琦,吕诚成,吴显,等.基于季节性温度变化的波动型边坡锚索预应力定量预测研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S2):4245-4251.
- [6] 董建华,吴晓磊,师利君,等.季节冻土区边坡支护结构冻融模型模拟系统研制与应用[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(2):374-386.
- [7] 王宝.岩质边坡锚固体系冻融劣化机理试验研究[D].中国矿业大学(徐州),2022.
- [8] 杨栋,王全成,姜昭群.基于屈服装置—碟簧系统的双向调节预应力锚索[J].工程地质学报,2023,31(3):916-923.
- [9] Chen Y,Davalos J F,Ray I,et al.Accelerated Aging Tests for Evaluations of Durability Performance of FRP Reinforcing Bars for Concrete Structures[J].Composite Structures,2007,78(1):101-111.
- [10] 刘文娟,田承宇,王雪莲.GFRP锚杆的综合性能与锚固机理研究[J].交通科学与工程,2016,32(4):69-74.
- [11] 林明安,林加剑.高温和冻融后玄武岩纤维筋力学性能研究[J].铁道工程学报,2023,40(8):18-22.