

循环荷载下可回收锚杆承载性能退化特性试验与理论研究

陈昌富^{1,2†}, 田涛^{1,2}, 付宏松^{1,2}, 陈彬枫^{1,2}, 陈孝奇^{1,2}, 张根宝³

[1. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082;
2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082;
3. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南益阳 413000]

摘要:可回收锚杆因其具有低碳环保等优势已在城市基坑支护工程中得到推广应用,但其承载性能在交通循环荷载作用下的变化规律尚缺乏深入的研究.本研究通过开展不同循环荷载参数条件下的锚-岩界面力学性能单元体试验,得到了循环荷载作用下锚-岩界面的剪应力-剪切位移全过程曲线(即 τ - s 曲线);基于试验结果建立了能同时考虑基准荷载比和荷载循环次数影响的锚-岩界面抗剪强度退化统一模型;根据锚-岩界面 τ - s 曲线的形态特征,建立了由直线和骤降曲线构成的组合型锚-岩界面 τ - s 曲线模型;还进一步建立了能同时考虑基准荷载比和荷载循环次数影响的锚-岩界面 τ - s 曲线退化统一模型,其预测效果良好;最后,建立了可考虑泊松效应的循环荷载作用下可回收锚杆荷载传递理论分析框架,探讨了循环荷载对工程锚杆极限承载力的影响.研究成果可为可回收锚杆的工程应用提供可靠的理论基础.

关键词:锚杆;循环荷载;锚-岩界面强度;退化模型;荷载传递分析

中图分类号:TU455.7 **文献标志码:**A

Experimental and theoretical studies on the degradation characteristics of the bearing capacity of recoverable anchors under cyclic loading

CHEN Changfu^{1,2†}, TIAN Tao^{1,2}, FU Hongsong^{1,2}, CHEN Bin Feng^{1,2},
CHEN Xiaoqi^{1,2}, ZHANG Genbao³

[1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China]

Abstract: Recoverable anchors, characterized by low carbon footprint and environmental friendliness, have been increasingly applied in urban foundation pit support projects. However, the evolution of their bearing performance under cyclic traffic loading has not been thoroughly studied. In this study, element-scale tests were conducted to examine the mechanical characteristics of the anchor-rock interface under different cyclic loading parameters. These tests captured the complete shear stress-shear displacement curve (i.e., τ - s curve) of the anchor-

* 收稿日期:2025-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278349), National Natural Science Foundation of China(52278349)

作者简介:陈昌富(1963—),男,湖南祁东人,湖南大学教授,博士生导师

† 通信联系人, E-mail: cfchen@163.com

rock interface under cyclic loading. Based on the experimental results, a unified model was developed to describe the degradation of shear strength at the anchor-rock interface, accounting for the effects of the reference load ratio and the number of load cycles. Based on the morphological characteristics of the $\tau-s$ curve at the anchor-rock interface, a composite $\tau-s$ curve model for the anchor-rock interface was established, consisting of a linear segment and a sudden drop curve. Furthermore, a unified degradation model for the $\tau-s$ curve of the anchor-rock interface was developed, accounting for the effects of the reference load ratio and the number of load cycles. The model demonstrates good predictive performance. Finally, a theoretical framework of load transfer of recoverable anchors under cyclic loading considering the Poisson effect was established, and the influence of cyclic loading on the ultimate bearing capacity of engineering anchors was investigated. The research results can provide a reliable theoretical basis for the engineering application of recyclable anchors.

Key words: anchor; cyclic loading; anchor-rock interface strength; degradation model; load transfer analysis

我国每年用于基坑临时支护的锚杆总长度超过100亿米,其中95%以上为不可回收的拉力型锚杆^[1],其金属锚筋废弃于地下,造成资源浪费,严重影响城市地下空间后续开发利用.因此,低碳环保的可回收锚杆技术快速发展,并在各种土层和风化软岩地层的基坑支护工程中得到应用^[2].目前,工程中可回收锚杆大多采用压力型锚杆,其锚固段通常由筒状锚固体、金属锚筋和承压板构成,外部荷载依次通过金属锚筋、承压板、筒状锚固体传递至周围岩土体,锚固体始终处于受压状态.因此,无论是结构构造、荷载传递路径,还是承载特性,可回收锚杆均与传统的拉力型锚杆存在显著差异.为确保可回收锚杆能在复杂荷载(如地面道路交通循环荷载引起的锚杆循环拉拔荷载)工况下安全可靠地应用,对其承载性能退化特性展开深入的试验与理论研究,具有重要的理论和实际意义.

近年来,许多学者通过理论分析^[3-5]、室内模型试验^[6-7]和数值模拟^[8-9]等方法,研究了压力型可回收锚杆的受力变形特性,加深了对可回收锚杆的承载性能的理解,明晰了其与传统拉力型锚杆的荷载传递特性的差异.

在对压力型可回收锚杆进行荷载传递分析时,理论与数值分析方法均需依赖锚-土/岩界面的剪应力-剪切位移关系模型(即 $\tau-s$ 曲线模型),为此,吕晓玺等^[10-11]基于锚杆微段单元体试验方法^[12],对湿陷性黄土地层中可回收锚杆,开展了锚-土界面力学特性的室内拉拔试验研究,得到了全过程的 $\tau-s$ 曲线模

型和抗剪强度参数.

然而,目前针对循环荷载作用下锚-土/岩界面的受力变形特性,尚缺乏针对性试验研究.相比之下,桩-土界面在该方面已积累了一定的研究成果.刘俊伟等^[13-14]通过循环荷载作用下的桩-土界面直剪试验发现,桩-土界面抗剪强度随荷载循环次数增加而逐渐退化(即存在劣化效应),并据此建立了相应的退化方程.然而,已有研究结果表明^[15-18]:由于锚孔的直径通常远小于桩径,约为后者的1/10甚至更小,锚孔成孔后孔壁应力释放以及土拱效应等原因,直剪试验无法模拟锚-土/岩界面的受力状态,而基于微段锚杆单元体试验则可很好地模拟其受力状态.但是,目前针对压力型可回收锚杆中锚-岩界面在循环荷载作用下的试验研究,尚未见文献报道.

为此,本文首先开展不同循环荷载参数(即基准荷载比 R 、荷载循环次数 N 等)下的锚-岩界面力学性能单元体试验,测得循环荷载作用下锚-岩界面的剪应力 τ -剪切位移 s 全过程曲线(即 $\tau-s$ 曲线),并基于试验结果,建立能同时考虑 R 和 N 的锚-岩界面抗剪强度退化统一模型;然后,根据锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线形态特征,构建分段函数形式的锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线模型,并根据不同循环荷载参数下锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线的试验结果,进一步建立能同时考虑 R 和 N 的锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线退化统一模型;最后,基于上述模型,提出考虑泊松效应的循环荷载作用下可回收锚杆荷载传递分析方法,并结合工程案例分析循环荷载对工程锚杆极限承载力的影响.

1 循环荷载下锚-岩界面力学性能试验

1.1 试验目的与试验方案

1.1.1 试验目的

基准荷载比 $R(R=T_v/T_0, T_v$ 为循环荷载的基准值, T_0 为未受循环荷载作用的锚-岩界面抗拔承载力极限值) 和荷载循环次数 N 是交通循环荷载中的重要参数, 分别控制循环荷载大小与循环加载时间, 它们对可回收锚杆中锚固体-岩体界面的强度具有重要影响. 因此本文采用锚杆微段单元体试验开展系统研究, 目的是:

1) 通过开展不同基准荷载比和荷载循环次数下的锚杆微段单元体拉拔试验, 获得不同循环荷载参数下锚-岩界面的剪应力-剪切位移全过程曲线.

2) 基于不同循环荷载参数下锚-岩界面抗剪强度测试结果, 获得循环荷载作用下锚-岩界面抗剪强度随基准荷载比和荷载循环次数的退化规律, 并建立相应的退化模型方程.

3) 基于测得的不同循环参数下锚-岩界面的剪应力-剪切位移全过程试验曲线, 研究得到可回收锚杆锚-岩界面的剪应力-剪切位移关系方程随荷载循

环次数及基准荷载比的退化规律, 为循环荷载作用下工程锚杆的荷载传递分析和长期承载性能评估提供可靠的计算模型.

1.1.2 试验方案

为系统研究基准荷载比 R 和荷载循环次数 N 对锚-岩界面力学性能退化的影响, 本文根据这两个因素的不同水平的全面组合, 在室内开展 20 组锚-岩界面单元体拉拔试验, 其中, 基准荷载比 R 分为 4 个水平, 各水平的对应值依次为 0.3、0.4、0.5 和 0.6; 荷载循环次数 N 分为 5 个水平, 各水平的对应值依次为 100、266、708、1 884 和 5 012. 循环荷载的波形为三角波 (图 1), 幅值为 $0.2T_0$, 频率则按照常见交通荷载频率取值范围^[19] 取为 0.5 Hz. 具体试验方案如表 1 所示.

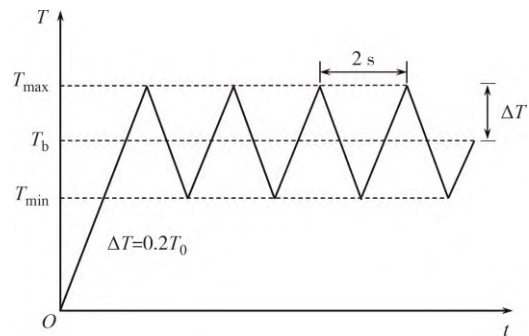


图 1 循环荷载示意图

Fig.1 Diagram of cyclic load

表 1 循环荷载下锚-岩界面单元体试验方案

Tab.1 Anchor-rock interface test plan under cyclic loading

试样编号	基准荷载比 R 水平(水平值)	循环次数 N 水平(水平值)	试样编号	基准荷载比 R 水平(水平值)	循环次数 N 水平(水平值)
R1N1	1(0.3)	1(100)	R3N1	3(0.5)	1(100)
R1N2	1(0.3)	2(266)	R3N2	3(0.5)	2(266)
R1N3	1(0.3)	3(708)	R3N3	3(0.5)	3(708)
R1N4	1(0.3)	4(1 884)	R3N4	3(0.5)	4(1 884)
R1N5	1(0.3)	5(5 012)	R3N5	3(0.5)	5(5 012)
R2N1	2(0.4)	1(100)	R4N1	4(0.6)	1(100)
R2N2	2(0.4)	2(266)	R4N2	4(0.6)	2(266)
R2N3	2(0.4)	3(708)	R4N3	4(0.6)	3(708)
R2N4	2(0.4)	4(1 884)	R4N4	4(0.6)	4(1 884)
R2N5	2(0.4)	5(5 012)	R4N5	4(0.6)	5(5 012)

除对表 1 中 20 组试样在经循环荷载作用后开展拉拔试验外, 本文还增加了 1 组未受循环荷载作用试样的拉拔试验, 用来确定循环荷载参数.

1.2 试验方法

锚-土界面力学性能测试采用基于微元段思想开发的单元体试验方法^[12,18,20], 试验原理图见图 2,

试验流程(图 3)如下.

1) 确定试样尺寸. 基于单元体试验原理, 试样高度应为微元段^[12,18], 为满足此要求且便于试验, 本研究取锚固段高度为 10 cm, 试样高度为 12 cm, 其中顶部预留 2 cm 高的空间, 使锚固体在加载时能向上位移并与岩土体保持接触. 锚固体直径设定为

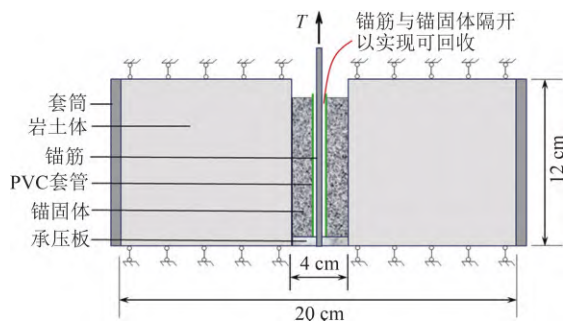


图 2 可回收锚杆单元体试验原理图

Fig.2 Recoverable anchor unit test device diagram

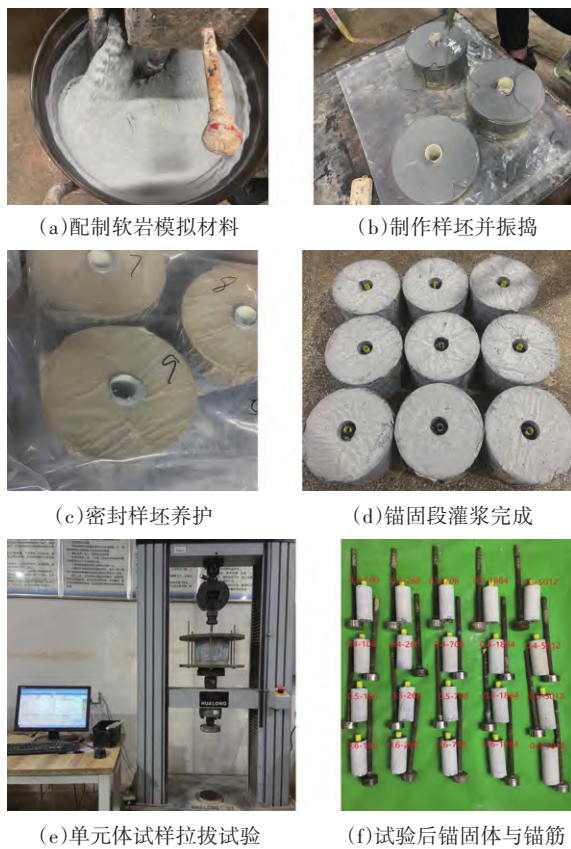


图 3 试验流程

Fig.3 Test process

4 cm,为消除边界效应,试样直径应达到锚固体直径的 5 倍^[18],则试样直径为 20 cm.此外,锚固体与锚筋之间通过套管隔开,以模拟可回收锚杆的结构形式.试验所用可回收锚杆的筋体为 M12 钢螺杆,其高度为 250 mm;承压板厚 20 mm,直径为 30 mm,钢螺杆筋体位于承压板中心并与其以螺纹连接,当螺杆承受拉拔荷载时,会带动承压板对锚固体产生推力,以模拟压力型锚杆锚固体受压情况.

2) 制作软岩样坯.本研究按照石英砂含量 11%、重晶石含量 13%、水泥含量 10%、蒙脱土含量

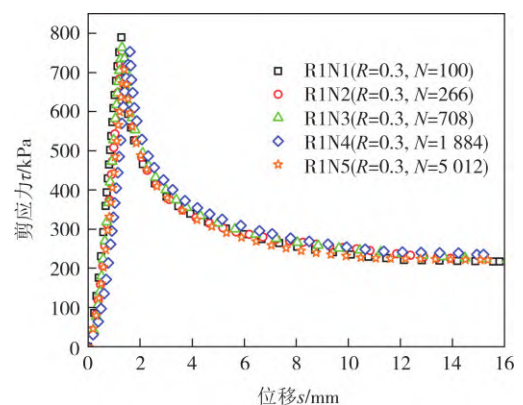
31%、水含量 35% 配制风化软岩室内模型材料,其抗压强度为 0.8 MPa,抗拉强度为 0.035 MPa,弹性模量为 72.94 MPa,密度为 1.74 g/cm³.样坯制作步骤为:首先将称量好的各组分材料倒入搅拌桶内干拌 60 s [图 3(a)];再加水充分搅拌 300 s;然后将混合料倒入模具中(模具中心放置一根外径 4 cm 的 PVC 管作为锚固段预留孔^[21]),并于振动台上振捣 30 s [图 3(b)],使软岩样坯均匀、密实、无气泡;最后,将样坯置于密封袋内常温养护.

3) 锚固段灌浆及试样养护.样坯养护 7 d 初凝后,先拔出中心的 PVC 管,露出锚孔;再在锚孔中安装好锚筋、套管和承压板(图 2);然后将配好的自密实混凝土锚浆倒入套管与锚孔之间的环状空间,并用铁丝振捣密实以形成锚固体(注意锚固体高度应比试样高度低 2 cm);最后将制作好的试样置于密封袋内在室内常温环境下养护 14 d [图 3(c)].

4) 循环加载.将养护好的试样 [图 3(d)] 放入微机控制的万能试验机中,并用特制的夹具固定 [图 3(e)].试样安装好后,根据 1.1.2 节试验方案设定的三角波形、频率(0.5 Hz)、基准荷载比 R 和循环次数 N (表 1) 对试样施加循环荷载.加载完毕后,再采用位移加载方式(位移速率为 1 mm/min)对试样进行拉拔试验,并量测得到锚-岩界面的剪应力 τ -剪切位移 s 曲线,其中界面剪应力 τ 为拉拔力 T 与锚固体外表面积之比.

1.3 锚-岩界面剪应力-剪切位移曲线及破坏形态

根据表 1 方案,基于上述试验方法可测得不同基准荷载比 R 和荷载循环次数 N 下 20 组锚-岩界面单元体试样在经受循环荷载作用后的剪应力 τ -剪切位移 s 全过程曲线(即 τ - s 曲线),如图 4 所示.



(a) 基准荷载比 $R=0.3$

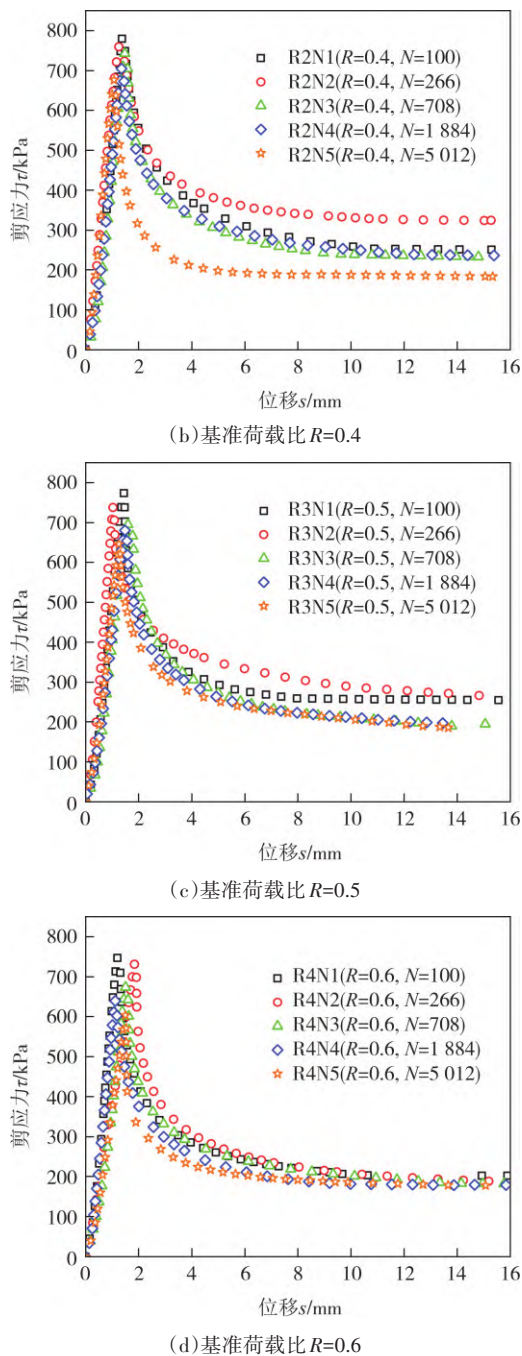
图4 不同循环荷载参数下锚-岩界面 τ - s 曲线Fig.4 τ - s curves of anchor-rock interface under various cyclic loading parameters

图4表明,不同循环荷载参数(R 和 N)下锚-岩界面 τ - s 曲线的形态相似,即界面的剪应力随剪切位移增大,先快速增大到峰值(极限强度),再急剧降低,此后变化很小,而且残余强度与峰值强度之比(简称为残峰比)在0.25~0.5之间.因此,循环荷载作用下典型的锚-岩界面 τ - s 曲线可分为线弹性变形段、脆性破坏陡降段和残余剪切滑移段三个阶段,其残余强度值可作为锚杆的极限强度标准值.

2 循环荷载下锚-岩界面承载性能退化规律

2.1 锚-岩界面抗剪强度退化规律及退化模型

目前,尚无针对循环荷载作用下锚-岩界面抗剪强度退化规律的研究,但与此相关的研究成果有:刘俊伟等^[13-14]基于直剪试验结果,建立了桩-土界面抗剪强度随循环荷载次数的退化模型:

$$\frac{\tau_u}{\tau_0} = \alpha_1 - \alpha_2 \ln(N + \alpha_3) \quad (1)$$

$$\frac{\tau_u}{\tau_0} = 1 - v_d \ln N \quad (2)$$

式中: τ_u 为经循环荷载作用 N 次后桩-土界面抗剪强度; τ_0 为未经循环荷载作用的桩-土界面抗剪强度; α_1 、 α_2 、 α_3 、 v_d 为模型参数.

模型(1)和模型(2)在荷载循环次数 N 趋近于无穷大时,界面抗剪强度 τ_u 趋近于负无穷大,并且模型(2)在荷载循环次数 N 趋于0时,界面抗剪强度 τ_u 趋于正无穷大,这显然不符合物理常识.

因此,本文在深入分析锚-岩界面受力变形特性的基础上,提出如下既符合物理常识,又简单实用的退化模型函数式:

$$\frac{\tau_u}{\tau_0} = \frac{1}{a \cdot N^b + 1} \quad (3)$$

式中: τ_u 为经循环荷载作用 N 次后锚-岩界面抗剪强度; τ_0 为未经循环荷载作用的锚-岩界面抗剪强度,试验测得 $\tau_0=843$ kPa; a 、 b 为模型参数.

本文提出的退化模型(3),当循环荷载作用次数 N 为0时, $\tau_u=\tau_0$;当循环荷载作用次数 N 趋于无穷大时, τ_u 值趋于0.这与实际工程中锚-岩界面抗剪强度退化规律基本相符.

采用本文模型(3)对前文试验结果(图4)进行回归分析,可得各基准荷载比 R 对应的锚-岩界面抗剪强度退化模型拟合曲线,如图5中各虚线所示,相应的模型参数 a 和 b 值如表2所示.

经对表2所示模型参数回归分析发现,模型参数 a 、 b 与 R 呈现如下指数函数关系:

$$a = 0.01056e^{1.97367R} - 0.01048 \quad (4)$$

$$b = 0.25201e^{-7.54364R} + 0.32608 \quad (5)$$

将 a 和 b 的表达式(4)和(5)代入模型式(3),即可得到能同时考虑基准荷载比 R 和荷载循环次数 N 影响的锚-岩界面强度退化统一模型:

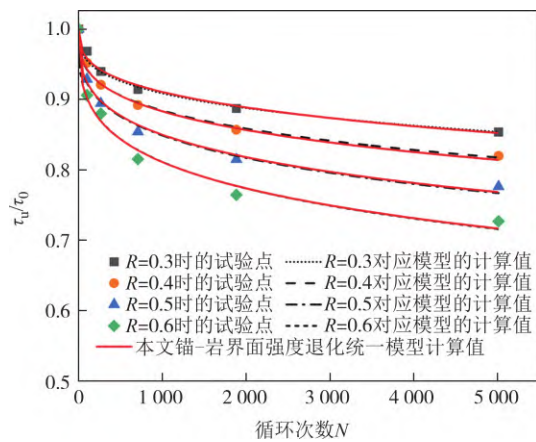


图 5 退化模型计算值与试验点值的对比

Fig.5 The comparison between the calculated value of the degradation model and the value of the test point

表 2 锚-岩界面抗剪强度退化模型参数值

Tab.2 Parameter values of the shear strength degradation model for the anchor-rock interface

基准荷载比 R	模型参数		可决系数 R^2
	a	b	
0.3	0.009	0.35	0.96
0.4	0.013	0.34	0.97
0.5	0.018	0.33	0.95
0.6	0.024	0.33	0.98

$$\frac{\tau_u}{\tau_0} = \frac{1}{(0.01056e^{1.97367R} - 0.01048) \cdot N^{0.25201e^{-7.54364R} + 0.32608} + 1} \quad (6)$$

由式(6)模型可以很方便地计算出任意给定的基准荷载比下锚-岩界面抗剪强度随荷载循环次数 N 的退化曲线,如图 5 中实线所示.显然,式(6)模型所示锚-岩界面强度退化统一模型的计算曲线(图 5 中实线)与试验值和不同基准荷载比 R 下拟合的单个退化模型曲线(图 5 中各个虚线)均吻合良好,表明本文建立的可同时考虑基准荷载比 R 和荷载循环次数 N 影响的锚-岩界面抗剪强度退化统一模型准确可靠.

2.2 锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线退化统一模型

2.2.1 确定建模数据集和预测验证数据集

考虑到循环荷载影响的锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线模型是分析循环荷载作用下岩层锚杆荷载传递规律的理论基础,本节基于上述单元体拉拔试验结果,研究建立考虑循环荷载影响的锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线表达式及其退化统一模型,具体建模步骤如下.

将表 1 中 4 个基准荷载比 R 下荷载循环次数 N

分别为 100、708、1 884 和 5 012 所对应的 16 个试样(即 R1N1、R1N3、R1N4 和 R1N5; R2N1、R2N3、R2N4 和 R2N5; R3N1、R3N3、R3N4 和 R3N5; R4N1、R4N3、R4N4 和 R4N5)的 $\tau-s$ 曲线试验结果(图 4)组成 16 个建模数据集,而将 4 个 R 值下 $N=266$ 所对应的 4 个试样(R1N2、R2N2、R3N2 和 R4N2)的 $\tau-s$ 曲线试验结果组成 4 个预测验证数据集.

2.2.2 建立锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线模型

鉴于锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线的形态特征(图 4),本文选用如下分段函数作为锚-岩界面的 $\tau-s$ 曲线模型:

$$\tau = \begin{cases} k \cdot s, & s < s_u \\ \frac{\tau_u}{g \cdot \ln[1 + (s - s_u)gf] + 1}, & s \geq s_u \end{cases} \quad (7)$$

式中: k 、 g 、 f 为模型参数; τ_u 为经循环加载后各试样的界面剪应力峰值(抗剪强度); s_u 为界面剪应力峰值点(抗剪强度)对应的剪切位移.

采用式(7)模型对上述 16 个建模数据集(即图 4 中 $\tau-s$ 曲线试验结果)进行回归分析,可得到这 16 个试样的锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线模型,相应的模型参数 k 、 g 和 f 值如表 3 所示.

表 3 锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线模型中参数值

Tab.3 Parameter values in the $\tau-s$ curve model for the anchor-rock interface

基准荷载比 R	荷载循环次数 N	模型参数		
		k	g	f
0.3	100	599.07	0.69	0.32
	708	549.21	0.77	0.54
	1 884	530.83	0.82	0.64
	5 012	515.05	0.87	0.75
0.4	100	568.33	0.68	0.31
	708	514.37	0.76	0.51
	1 884	497.86	0.81	0.57
	5 012	475.84	0.86	0.64
0.5	100	533.82	0.66	0.28
	708	477.42	0.74	0.47
	1 884	454.57	0.78	0.5
	5 012	430.69	0.82	0.58
0.6	100	509.22	0.63	0.26
	708	450.43	0.72	0.42
	1 884	428.01	0.75	0.49
	5 012	402.31	0.77	0.52

2.2.3 循环荷载下锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线退化模型

分析表 3 中各基准荷载比 R 下模型参数 k 、 g 和 f 随荷载循环次数 N 的变化趋势发现,模型参数 k 、 g 、 f

与 N 之间符合以下函数关系:

$$k = \frac{k_0}{c \ln\left(1 + \frac{N}{d}\right) + 1} \quad (8)$$

$$g = \alpha_g \cdot \ln N + \beta_g \quad (9)$$

$$f = \alpha_f \cdot \ln N + \beta_f \quad (10)$$

式中: k_0 为循环次数为 0 时锚-岩界面的初始刚度, 由本文试验结果可得 $k_0=668$ MPa; c 、 d 为模型参数 k 表达式中的系数; α_g 、 β_g 为模型参数 g 表达式中的系数; α_f 、 β_f 为模型参数 f 表达式中的系数。

分别采用式(8)、式(9)和式(10)对表 3 中相应的模型参数值进行回归分析, 可得到不同基准荷载比 R 下模型参数 k 、 g 和 f 随荷载循环次数 N 变化的经验表达式, 这些经验表达式中各系数(c 、 d 、 α_g 、 β_g 、 α_f 、 β_f)的回归值见表 4。

表 4 模型参数表达式中各系数的回归值

Tab.4 The regression values of each coefficient in the expressions of the model parameters

基准荷载比 R	系数					
	c	d	α_g	β_g	α_f	β_f
0.3	0.041	2.703	0.046 0	0.480	0.109	-0.175
0.4	0.064	2.700	0.045 6	0.465	0.085	-0.075
0.5	0.085	2.695	0.041 2	0.472	0.077	-0.059
0.6	0.099	2.701	0.038 0	0.462	0.071	-0.058

对模型参数 k 、 g 和 f 的经验表达式中各系数(表 4)分析发现, 它们随基准荷载比 R 变化而变化, 但 d 和 β_g 值随 R 变化很小, 分别在 2.700 和 0.470 附近轻微波动, 因此可将其取定值, 即 $d=2.700$ 、 $\beta_g=0.470$ 。系数 c 、 α_g 、 α_f 、 β_f 则由回归分析得到其与基准荷载比 R 的关系式为:

$$c = 0.172\ 43R - 0.003\ 16 \quad (11)$$

$$\alpha_g = -19.625R^2 + 17.569R - 3.455 \quad (12)$$

$$\alpha_f = \frac{R}{-2.936\ 6 + 18.997R} \quad (13)$$

$$\beta_f = \frac{R}{8.191 - 33.019R} \quad (14)$$

将系数 c 、 α_g 、 α_f 、 β_f 的表达式(11)~(14)以及 d 和 β_g 值代入模型参数 k 、 g 和 f 的表达式(8)~(10)中, 之后代入式(7)所示的锚-岩界面 τ - s 曲线模型, 并同时注意 τ - s 曲线峰值点对应的位移 $s_u = \tau_u/k$, 整理后可得能同时考虑基准荷载比 R 和荷载循环次数 N 影响的

锚-岩界面 τ - s 曲线退化统一模型为:

$$\tau = \begin{cases} k \cdot s, & s < \tau_u/k \\ \frac{\tau_u}{g \cdot \ln\left[1 + \left(s - \tau_u/k\right)/f\right] + 1}, & s \geq \tau_u/k \end{cases}$$

$$k = \frac{668}{(0.172\ 43R - 0.003\ 16) \cdot \ln(1 + N/2.7) + 1}$$

$$g = (-19.625R^2 + 17.569R - 3.455) \cdot \ln N + 0.47$$

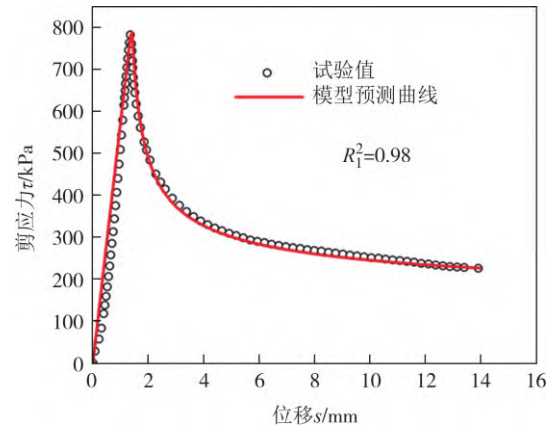
$$f = \frac{R}{-2.936\ 6 + 18.997R} \cdot \ln N + \frac{R}{8.191 - 33.019R}$$

$$\tau_u = \frac{843}{(0.010\ 56e^{1.973\ 67R} - 0.010\ 48) \cdot N^{0.252\ 01e^{-7.543\ 64R} + 0.326\ 08} + 1}$$

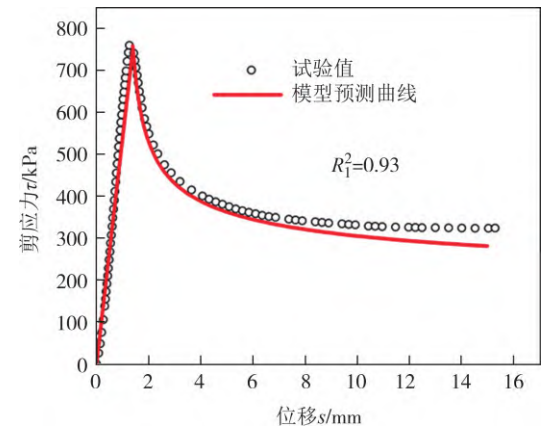
(15)

2.2.4 模型预测验证

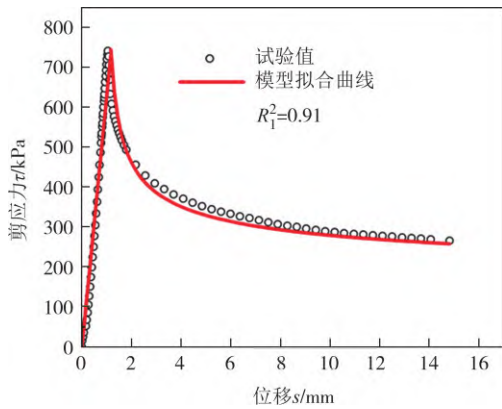
采用建立的锚-岩界面 τ - s 曲线退化统一模型(15)对 4 个预测验证数据集中数据点进行计算, 结果如图 6 所示。由图 6 可以看出, 本文建立的统一模型的预测效果良好, 峰值点相对误差仅为 0.3%~3.1%, 说明本文建立的锚-岩界面 τ - s 曲线退化统一模型准确可靠。



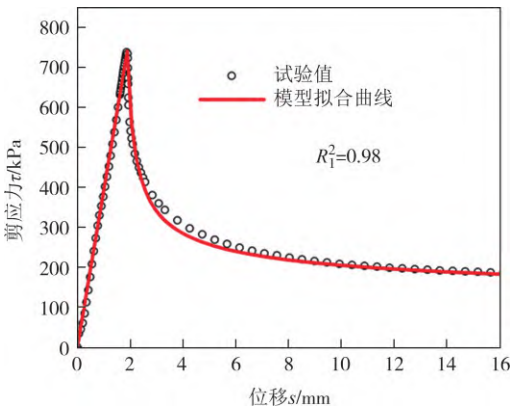
(a) R1N2 (R=0.3, N=266)



(b) R2N2 (R=0.4, N=266)



(c) R3N2 (R=0.5, N=266)



(d) R4N2 (R=0.6, N=266)

图 6 统一模型预测效果

Fig.6 Prediction performance of the unified model

3 循环荷载作用下可回收锚杆的荷载传递分析

本节依据前文基于微段单元体试验建立的锚-岩界面剪切模型,即式(15)所示锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线退化统一模型,结合实际工程案例,采用荷载传递法对可回收锚杆在交通循环荷载作用下的承载性能退化特性进行分析研究。

3.1 锚杆荷载传递控制方程建立及求解

由于可回收锚杆属于压力型锚杆(图7),故它在承受拉拔荷载时,锚固体处于三向受压状态.由于泊松效应,锚固体会产生径向膨胀,挤压周围岩体,锚-岩界面法向应力增加.因此,与常规拉力型锚杆相比,压力型可回收锚杆的受力变形分析过程更加复杂.为此,笔者课题组考虑泊松效应导出静载作用下可回收锚杆荷载传递控制方程^[3]为:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} + \frac{u_p k_2}{A_g} \tau(x) = 0 \quad (16)$$

式中: $s(x)$ 为 x 处锚固体位移; $\tau(x)$ 为 x 处锚-岩界面

剪应力; $k_2 = (2k_1\nu_g - 1)/E_g$,其中 $k_1 = \nu_g E_s / [E_s(1 - \nu_g) + E_g(1 + \nu_s)]$, E_g 和 ν_g 为锚固体的弹性模量和泊松比, E_s 和 ν_s 为锚杆周围岩土体的弹性模量和泊松比; A_g 为锚固体截面面积.

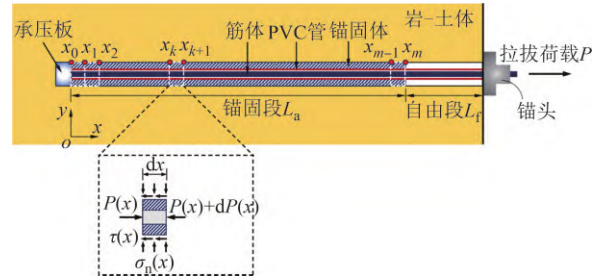


图 7 可回收锚杆荷载传递分析

Fig.7 Load-transfer analysis of recoverable anchor

将上文建立的锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线退化统一模型(15)代入式(16),便可建立考虑循环荷载作用的可回收锚杆荷载传递控制方程.该微分方程既包含界面剪切位移 s ,还包含循环荷载参数(即基准荷载比 R 和荷载循环次数 N),难以获得解析解答,因此本文采用离散递推法进行求解,其具体步骤如下.

1)将锚固段沿轴向均分为 m 个单元(图7),对应的 $m+1$ 个节点从承压板处到靠近锚头处依次编号为: x_0, x_1, \dots, x_m .

2)先假设所有节点处界面基准剪切荷载比的初始值为 $R^{(0)}(x_k)$ ($k=0, 1, \dots, m$),将其代入式(15),得到荷载循环次数为 N 时各节点处锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线模型;然后由文献[3]方法计算锚杆在其工作荷载(可视为锚杆的基准荷载)作用时锚固段界面剪应力分布;再将计算得到的各节点处界面剪应力 $\tau^{(i)}(x_k)$ 除以未经循环荷载作用的界面抗剪强度 $\tau_0(x_k)$,可得新的各节点处基准荷载比 $R^{(i)}(x_k)$ (i 为迭代次数);重新计算,直到不同节点处基准荷载比 $R(x_k)$ 全部收敛至设定精度.

3)在节点 x_m 处,锚固体轴力 $P(x_m)$ 、轴向应力 $\sigma_x(x_m)$ 及界面法向应力 $\sigma_n(x_m)$ 均为零,给定一个界面剪切位移 $s(x_m)=s_L$,将 $s(x_m)$ 、 $R(x_m)$ 和 N 代入式(15),可计算出界面剪应力 $\tau(x_m)$.

4)在节点 x_{m-1} 处,锚固体轴力 $P(x_{m-1})$ 为:

$$P(x_{m-1}) = P(x_m) + \tau(x_m)u_a\Delta L \quad (17)$$

式中: ΔL 为计算长度, $\Delta L=L_a/m$; u_a 为锚固体周长.

界面法向应力 $\sigma_n(x_{m-1})$ 为:

$$\sigma_n(x_{m-1}) = k_1\sigma_x(x_{m-1}) = k_1\frac{P(x_{m-1})}{A_g} \quad (18)$$

根据锚固单元体变形位移关系,节点 x_m 和 x_{m-1} 处界面剪切位移和轴向应变应满足:

$$s(x_{m-1}) - s(x_m) \approx \varepsilon(x_m)\Delta L = \frac{P(x_m)}{E_g A_g} \Delta L = 0 \quad (19)$$

根据上式计算出界面剪切位移 $s(x_{m-1})$,将 $s(x_{m-1})$ 、 $R(x_{m-1})$ 和 N 代入式(15),可计算出界面剪应力 $\tau(x_{m-1})$.

5) 将式(16)改写为差分形式:

$$\frac{s(x_{m-2}) - 2s(x_{m-1}) + s(x_m)}{\Delta L^2} + \frac{u_a k_2}{A_g} \tau(x_{m-1}) = 0 \quad (20)$$

式(20)给出了节点 x_m 、 x_{m-1} 和 x_{m-2} 处界面剪切位移之间的关系,据此可计算出 $s(x_{m-2})$:

$$s(x_{m-2}) = 2s(x_{m-1}) - s(x_m) - \frac{u_a k_2}{A_g} \tau(x_{m-1}) \Delta L^2 \quad (21)$$

这样,节点 x_{m-2} 处锚固体轴力 $P(x_{m-2})$ 、界面法向应力 $\sigma_n(x_{m-2})$ 和界面剪应力 $\tau(x_{m-2})$ 依次分别可由式(17)、式(18)和式(15)计算得到.

类似地,重复该步骤,便可依次计算出其他节点的界面剪切位移 $s(x_k)$ 、锚固体轴力 $P(x_k)$ 、界面法向应力 $\sigma_n(x_k)$ 和界面剪应力 $\tau(x_k)$ ($k=0, 1, \dots, m-3$),由此便可获得锚固段轴力和界面剪应力分布,而锚头处锚杆的拉拔位移 S_0 则为:

$$S_0 = s(x_0) + \frac{P(x_0)}{E_b A_b} (L_a + L_f) \quad (22)$$

6) 重新给定节点 x_m 处界面剪切位移 s_L ,重复步骤3~5,即可得到不同荷载下锚固段轴力和界面剪应力分布,以及锚头拉拔力-拉拔位移曲线.

3.2 可回收锚杆荷载传递分析方法模型试验验证

通过分析文献[21]的室内模型试验,验证本文所建立的锚-岩界面模型和压力型可回收锚杆荷载传递分析方法.文献[21]给出了4组岩层中压力型锚杆的拉拔试验结果.其中锚筋为8.8级M18螺丝杆,杆长500 mm,弹性模量为200 GPa;锚孔采用预埋PVC管制作,锚孔直径为50 mm;锚固体长度为360 mm,采用强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥浇注,其弹性模量为30 GPa,泊松比为0.22;采用自密实C30商品混凝土浇筑试件模拟岩石,其弹性模量为30 GPa,泊松比取0.22.

选用编号C360-1压力型锚杆拉拔试验结果反演锚-岩界面的 $\tau-s$ 曲线模型参数得: $k=733$, $\tau_u=733$ kPa, $s_u=1$ mm, $g=0.68$, $f=0.45$.基于前文所述压力

型可回收锚杆的荷载传递分析方法和反演得到的界面 $\tau-s$ 曲线模型参数,对编号C360-3压力型锚杆进行荷载传递分析,其荷载-位移曲线如图8所示.图8还绘出了C360-3锚杆的试验结果.可以看出本文方法计算结果与试验结果吻合良好.

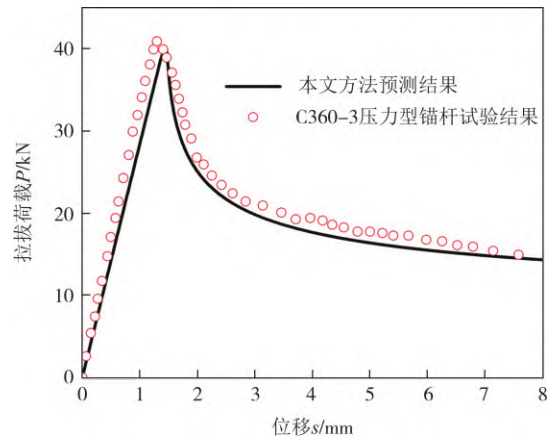


图8 试验结果与理论模型的荷载-位移曲线对比
Fig.8 Comparison of load-displacement curves from the experimental results and the theoretical modeling

3.3 工程案例分析

长沙市某基坑支护工程,基坑深度为10.8~12.8 m,周长约340 m,采用可回收预应力锚索+抗滑桩支护结构形式,其设计使用年限为支护竣工后一年.地面以下岩土层依次为:杂填土、粉质黏土、圆砾和中风化灰岩,其物理力学参数如表5所示.

表5 岩土物理力学参数

Tab.5 Physical and mechanical parameters of rock and soil

岩土层	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	锚杆极限黏结强度标准值/kPa
杂填土	10	8	18
粉质黏土	24	14	60
圆砾	10	38	160
中风化灰岩	45	50	300

该基坑AB段开挖深度11.3 m.支护桩为C30钢筋混凝土灌注桩,直径1.0 m,间距2.0 m,嵌固深度4.0 m.支护桩上设置三道国家认可专利技术的JCE式可回收锚索,倾角30°,锚孔直径150 mm,灌浆材料为42.5 MPa水泥.其中,第三道锚索的自由段长6.5 m,锚固段长10 m,且锚固段全部进入中风化灰岩层.锚索的轴向设计拉力为650 kN,锁定后设计工作荷载为390 kN.锚固体的弹性模量取30 GPa,泊松比取0.22,围岩的弹性模量取10 GPa,泊松比取

0.25, 锚-岩界面峰值抗剪强度取 682 kPa(取残峰比为 0.44, 300 kPa/0.44=682 kPa). 基于 3.1 节所述的可回收锚杆荷载传递分析流程, 计算得到不同荷载循环次数 N 对应的荷载-位移($P-s$)曲线, 如图 9 所示. 其中 $P-s$ 曲线的峰值荷载即为锚索极限承载力.

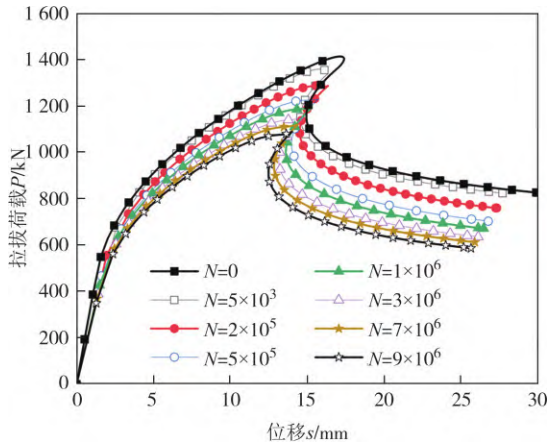


图 9 不同荷载循环次数下可回收锚杆荷载-位移曲线
Fig.9 The load-displacement curve of recoverable anchor under different load cycles

由图 9 可知, 可回收锚索的极限承载力 P_u 随荷载循环次数 N 增大而逐渐下降, 而且 $P-s$ 曲线均在峰值点后出现少量回弹, 其原因是, 锚-岩界面的抗剪能力在超过其峰值后急剧下降(图 4), 导致锚固体发生卸荷回弹^[22].

由图 9 中 $P-s$ 曲线可得不同荷载循环次数 N 下锚索极限承载力 P_u , 将其归一化值 P_u/P_0 (P_0 为未经受循环荷载作用的锚索极限承载力, $P_0=1\ 413\ \text{kN}$) 绘于图 10, 经回归分析可得其退化规律为:

$$\frac{P_u}{P_0} = \frac{1}{0.002\ 92N^{0.2847} + 1} \quad (23)$$

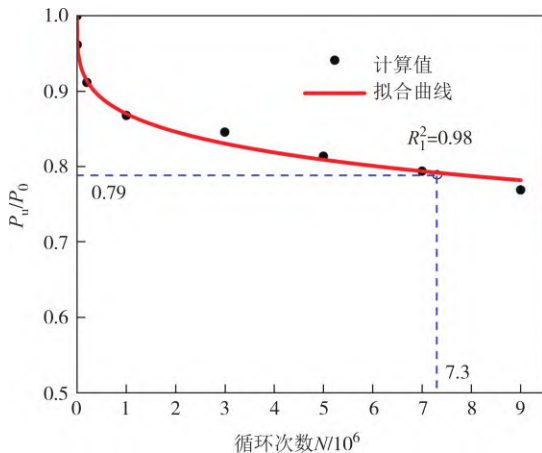


图 10 循环荷载下可回收锚杆极限承载力退化规律
Fig. 10 The degradation law of ultimate bearing capacity of recoverable anchor under cyclic load

该基坑工程地处城区, 若坑顶交通循环荷载按日均 2 万次计算, 则可回收锚杆在服役期限(支护结构竣工后 1 年)内将承受约 730 万次循环荷载. 由式(23)计算出该可回收锚杆到服役期限时的极限承载力为 1 119 kN, 下降了 21%. 所以, 该锚杆承载力退化后的安全系数变为 1 119 kN/650 kN \approx 1.72 $>$ 1.60, 仍满足规范要求.

4 结论

1) 基于锚-岩界面单元体的拉拔试验结果, 揭示了锚-岩界面抗剪强度(即剪应力峰值)随基准荷载比 R 和荷载循环次数 N 的变化规律, 建立了能同时考虑基准荷载比 R 和荷载循环次数 N 影响的锚-岩界面抗剪强度退化统一模型.

2) 分析试验得到的锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线发现: 锚-岩界面在峰值点之前呈线弹性, 之后呈急剧脆性破坏的受力变形特征, 据此建立了由直线和骤降曲线构成的组合型锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线模型.

3) 基于不同循环荷载参数(N 和 R)下锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线试验结果, 揭示了模型参数随 N 和 R 的变化规律, 建立了能同时考虑基准荷载比 R 和荷载循环次数 N 影响的锚-岩界面 $\tau-s$ 曲线退化统一模型. 该模型对试验结果的预测效果良好, 可为实际工程中循环荷载作用下可回收锚杆承载性能的理论分析和数值模拟分析提供可靠的计算模型.

4) 基于所建的考虑循环荷载影响的锚-岩界面剪切模型, 提出了考虑泊松效应的可回收锚杆荷载传递分析方法, 结合工程案例表明, 考虑交通荷载作用, 在设计服役期限(1 年)内, 可回收锚杆极限承载力下降 21%.

参考文献

[1] 付文光, 邹俊峰, 黄凯. 可回收锚杆技术研究综述[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊1): 512-522.
FU W G, ZOU J F, HUANG K. Summary of research on recoverable bolt technology [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(Sup.1): 512-522. (in Chinese)

[2] 俞建霖, 龚晓南, 黎红平, 等. 绿色基坑支护技术发展及展望[J]. 地基处理, 2025, 7(2): 107-115.
YU J L, GONG X N, LI H P, et al. Development and prospects of green foundation pit support technologies [J]. Journal of Ground Improvement, 2025, 7(2): 107-115. (in Chinese)

[3] ZHU S M, CHEN C F, MAO F S, et al. Application of disturbed

- state concept for load-transfer modeling of recoverable anchors in layer soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 137: 104292.
- [4] 庞有师,刘汉龙,柯结伟. 新型可回收锚杆锚固段应力分布规律[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2009(5): 461-466.
PANG Y S, LIU H L, KE J W. Stress distribution along bonded length of new-type recoverable anchor [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009(5): 461-466. (in Chinese)
- [5] 连博,董建华,马连生,等. 可回收锯齿锚杆抗拔承载力计算方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2024, 32(1): 238-257.
LIAN B, DONG J H, MA L S, et al. Calculation method of pullout capacity of recyclable sawtooth anchor [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024, 32(1): 238-257. (in Chinese)
- [6] 庞有师,刘汉龙,龚医军. 可回收式锚杆抗拔试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(6): 1813-1816.
PANG Y S, LIU H L, GONG Y J. Study of pullout tests of recoverable anchors [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(6): 1813-1816. (in Chinese)
- [7] 任非凡,满夏美,于航. 循环荷载作用下可回收锚杆抗拔机理研究[J]. *工程勘察*, 2017, 45(1): 7-11.
REN F F, MAN X M, YU H. Study on anti-pullout mechanism of recoverable anchors under cyclic loading [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2017, 45(1): 7-11. (in Chinese)
- [8] 庞有师,刘汉龙,陈育民,等. 可回收式锚杆抗拔试验的数值模拟与影响因素分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2009(2): 170-174.
PANG Y S, LIU H L, CHEN Y M, et al. Numerical simulation of removable anchor pullout test and influence factors [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009(2): 170-174. (in Chinese)
- [9] 周盛全,戴晨,冯绍童,等. 可回收桩锚支护基坑模型试验及数值模拟研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2023, 45(11): 92-98.
ZHOU S Q, DAI C, FENG S T, et al. Model test and numerical simulation of recoverable pile-anchor supported foundation pit [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2023, 45(11): 92-98. (in Chinese)
- [10] 吕晓玺,陈昌富,张嘉睿,等. 湿陷性黄土中可回收锚杆锚-土界面抗剪强度随机森林模型[J]. *中国科技论文*, 2024, 19(8): 884-894.
LÜ X X, CHEN C F, ZHANG J R, et al. Random forest model of anchor-soil interfacial shear strength of recoverable anchors in collapsibility loess [J]. *China Sciencepaper*, 2024, 19(8): 884-894. (in Chinese)
- [11] 吕晓玺. 湿陷性黄土地层中可回收锚杆锚-土界面力学特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2024.
LÜ X X. Mechanical properties study anchor-soil interface of recoverable anchors in collapsibility loess strata [D]. Changsha: Hunan University, 2024. (in Chinese)
- [12] 陈昌富,梁冠亭,汤宇,等. 锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(6): 1115-1122.
CHEN C F, LIANG G T, TANG Y, et al. Anchoring solid-soil interface behavior using a novel laboratory testing technique [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(6): 1115-1122. (in Chinese)
- [13] 刘俊伟,王明明,凌贤长,等. 桩-砂土界面循环弱化宏观机制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(2): 146-153.
LIU J W, WANG M M, LING X Z, et al. Macroscopic and microscopic mechanism of cyclic degradation behavior on pile-sand interface [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(2): 146-153. (in Chinese)
- [14] 刘俊伟,朱娜,凌贤长,等. 恒刚度桩-土界面循环弱化机制[J]. *振动. 测试与诊断*, 2022, 42(6): 1163-1169.
LIU J W, ZHU N, LING X Z, et al. Cyclic weakening mechanism in constant normal stiffness of pile-soil interface [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(6): 1163-1169. (in Chinese)
- [15] CHU L M, YIN J H. Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(9): 1097-1107.
- [16] SU L J, CHAN T C F, YIN J H, et al. Influence of overburden pressure on soil-nail pullout resistance in a compacted fill [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(9): 1339-1347.
- [17] MARTÍN L B, TIJANI M, HADJ-HASSEN F. A new analytical solution to the mechanical behaviour of fully grouted rockbolts subjected to pull-out tests [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(2): 749-755.
- [18] CHEN C F, ZHU S M. Element-scale pullout test study on the mechanical behavior of grouted anchor-soil interface subjected to ground pressure [J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(8): 5433-5447.
- [19] 赵莉. 不同荷载频率与细粒含量下路基粗粒填料动力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
ZHAO L. Experimental study on dynamic behavior of unbound granular materials with different fines contents under different frequency cyclic loadings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [20] 陈昌富,温永凯,朱世民. 考虑剪应力水平和土体干密度影响的锚-土界面剪切蠕变模型[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(9): 1-9.
CHEN C F, WEN Y K, ZHU S M. Creep model for anchor-soil interface considering shear stress and soil dry density [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(9): 1-9. (in Chinese)
- [21] 涂兵雄,俞缙,何锦芳,等. 新型拉压复合型锚杆锚固性能研究 II: 模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(3): 475-483.
TU B X, YU J, HE J F, et al. Analysis of anchorage performance on new tension-compression anchor II: model test [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(3): 475-483. (in Chinese)
- [22] 吴江斌,罗岚,刘威. 锚杆(索)荷载-位移曲线拟合及极限承载力分析[J]. *地基处理*, 2023, 5(1): 25-32.
WU J B, LUO L, LIU W. Fitting of load-displacement curve of anchor rod (line) and analysis of its ultimate bearing capacity [J]. *Journal of Ground Improvement*, 2023, 5(1): 25-32. (in Chinese)