山东农业大学学报(自然科学版),2026,57(4):699-707 VOL.57 NO.4 2026
Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition) doi:10.3969/j.issn.1000-2324.2026.04.011

压力型等直径笼芯囊锚杆承载特性试验研究

袁 浩[1],孙 淦[1],闫 楠[1],张启军[1,2],白晓宇[1*]
1. 青岛理工大学土木工程学院，山东 青岛 266520
2. 青岛业高建设工程有限公司，山东 青岛 266022

摘 要：依托青岛某抗浮锚固工程,通过现场拉拔试验对6组压力型等直径笼芯囊锚杆在循环荷载作用下的力学响应与变形特性进行研究。旨在探究不同囊袋注浆压力对其承载特性与荷载传递机制的影响规律。研究结果表明,在多循环荷载作用下,锚杆的荷载-位移曲线因锚杆对灌浆体产生的压密效应而在初始阶段斜率较大,且整体呈现典型的“滞回”特征。研究表明,囊袋注浆压力是影响此类锚杆受力变形性能的关键因素。随着囊袋注浆压力由1.0 MPa提升至1.5 MPa,相同循环荷载作用下锚杆的塑性位移减小10.70%,可承受的极限加载量平均提升6.79%,抗塑性变形能力增强,承载性能显著提升,弹性工作阶段特征更为明显。研究结果可为压力型等直径笼芯囊锚杆的优化设计与性能评估提供重要理论依据和实践参考。

关键词：笼芯囊锚杆；循环加载；囊袋注浆压力；承载特性；荷载传递机制
中图法分类号：TU473.1 **文献标识码：A** **文章编号：**1000-2324（2026）04-0699-09

Experimental Study on Bearing Characteristics of Pressure-type Equal-diameter Cage Core Capsule Anchors

YUAN Hao[1], SUN Gan[1], YAN Nan[1], ZHANG Qi-jun[1,2], BAI Xiao-yu[1*]
1. *School of Civil Engineering/Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China*
2. *Qingdao Yegao Construction Engineering Co., Ltd., Qingdao 266022, China*

Abstract: Based on an anti-floating anchorage project in Qingdao, this study investigates the mechanical response and deformation characteristics of six sets of pressure-type equal-diameter cage core capsule anchors under cyclic loading through field pull-out tests. It aims to explore the influence patterns of different capsule grouting pressures on their bearing characteristics and load transfer mechanisms. The results reveal that under multi-cyclic loading, the load-displacement curve of the anchor exhibits a steeper slope in the initial stage due to the compaction effect of the anchor on the grout, and overall demonstrates typical hysteretic characteristics. The study indicates that the capsule grouting pressure is a crucial factor influencing the mechanical deformation performance of such anchors. As the capsule grouting pressure increases from 1.0 MPa to 1.5 MPa, the plastic displacement of the anchor under the same cyclic load decreases by 10.70%, the average ultimate load increases by 6.79%, the resistance to plastic deformation enhances, the bearing performance significantly improves, and the features of the elastic working stage become more distinct. The research findings offer a significant theoretical foundation and practical guidance for the optimized design and performance assessment of pressure-type equal-diameter cage core capsule anchors.

Keywords: Cage core capsule anchor; cyclic loading; capsule grouting pressure; bearing characteristic; load transfer mechanism

在当前基础埋深不断增加,边坡加固工程愈发陡高的工程背景下,锚杆所需承担的荷载要求日益提高[1-3]。传统单筋锚杆因其承载力有限,已难以满足实际工程对性能的需求。虽然单孔多筋布置可有效提高抗浮锚杆的承载力,但钢筋强度未得到充分利用,导致材料利用率偏低,造成资源浪费[4]。而压力型抗浮锚杆通过在基础底板施工前对锚筋施加预应力,可显著抑制基础上浮。

近年来,压力型精轧螺纹钢筋（Prestressing Screw-thread PSB）抗浮锚杆作为一种新型抗浮技术,逐渐受到学者与工程师的关注[5-7]。区别

收稿日期：2025-09-09 **修回日期：**2026-06-18
基金项目：国家自然科学基金（52478348，52578415）；青岛市自然科学基金原创探索项目（24-4-4-zrjj-180-jch）；山东省泰山学者项目（tsqn202306234）
第1作者简介：袁 浩（2001-），男，硕士研究生，研究方向：滨海岩土。 E-mail：17658122363@163.com
***通讯作者：**Author for correspondence. E-mail：baixiaoyu538@163.com

于一般的预应力抗浮锚杆，压力型PSB抗浮锚杆采用全锚固段耐腐蚀处理，可在极大程度上提高抗浮锚杆的耐久性，提高工程的安全系数[8,9]。PSB锚筋作为抗浮锚杆的主要承力构件，兼具优异的抗拉与抗剪性能[10,11]，在深基坑工程和地下结构中具有广阔的应用前景[12]。此外，在实际应用中，压力型PSB抗浮锚杆需承受静态与循环两种荷载。在滨海等高腐蚀环境中，循环荷载对其耐久性构成严峻挑战。尽管压力型PSB抗浮锚杆短期静载承载力较高，但其长期承载性能在循环荷载下会出现显著退化[13]。这种退化主要表现为灌浆体-岩土体黏结界面处的滑移与脱黏，从而严重制约其长期承载性能[14-17]。于是，耐腐蚀性能更强，在循环荷载作用下，承载性能更优的压力型等直径笼芯囊锚杆应运而生。

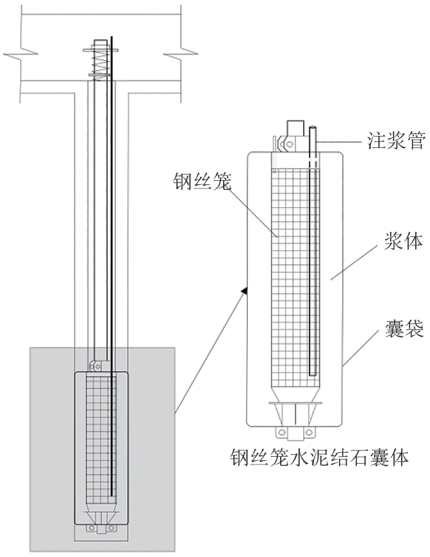


图 1 压力型等直径笼芯囊锚杆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pressure-type equal-diameter cage core capsule anchor

压力型等直径笼芯囊锚杆是指杆体拉力通过承载体转化为压力作用于杆体底部钢丝笼水泥结石囊体且注浆体直径全长相等的锚杆。其结构主要包括钢丝笼水泥结石囊体、普通锚固段水泥混凝土锚固体和锚杆杆体。锚杆杆体采用无黏结设计，其与水泥浆体隔离，可自由伸缩。杆体荷载直接传递至底部承载体，进而通过承载体将压力扩散至囊体。承载体在受力时轴对称地均匀向上推压囊体，压胀作用使囊体轴对称地均匀径向挤压锚孔孔壁岩土体，实现局部增阻效应。该过程不仅使锚杆应力分布更为合理，且其内置的钢丝笼确保了整体结构韧性。

从宏观层面看，压力型等直径笼芯囊锚杆与压力型PSB抗浮锚杆均采用等直径锚孔设计，两者在工作原理与受力特性上也高度相似。二者锚筋在锚固段通过注浆技术形成高密度、高强度的浆体-土体复合材料，通过“压力扩体效应”显著提高锚固段与岩土体的界面摩擦力和端部承载力[18,19]。压力型等直径笼芯囊锚杆构建了新型锚固受力体系，该体系以钢丝笼水泥结石囊体为关键锚固单元，与岩体黏结形成特殊锚固段，能减少岩土体与锚固体间的界面损伤。通过调控钢丝笼水泥结石囊体的几何尺寸或优化囊袋注浆压力等参数，可实现对锚杆承载能力的精准提升。上述特性是该技术突破压力型PSB抗浮锚杆性能瓶颈的关键。相较于传统扩体锚杆，笼芯囊在压力注浆后形成高强度、高密实度的钢丝笼水泥结石囊体，其三维约束效应显著提升灌浆体轴向抗压与径向抗剪能力。等直径的设计也避免了孔颈应力集中，施工简便、成孔质量易控，同时在压力注浆条件下仍能通过囊体膨胀实现局部增阻效应，兼具均匀受力与施工可控性双重优势。

工程应用优势方面，其在目标抗拔力需求一致的场景中，可有效缩短锚杆设计长度，降低材料消耗与施工成本[20]。这种“高承载-短长度”的特性，使其在抗浮工程、边坡加固等领域具有显著技术优势，为岩土锚固技术提供了兼具创新性、可靠性与经济性的新型解决方案。该新型锚杆凭借上述优势，自问世以来，已在宜宾临港新区大学科技园等众多工程项目中获得了广泛应用[21]，对其承载性能的研究也逐渐展开。现阶段对于笼芯囊锚杆的研究主要集中于扩大头笼芯囊锚杆（即囊式扩体锚杆），刘钟等[22]介绍了囊式扩体锚固技术发展历程以及囊式扩体锚杆的承载特性和破坏模式，结合一些典型的承压型囊式扩体锚杆应用案例，总结了该种锚杆目前在中国的推广应用现状。然而目前关于压力型等直径笼芯囊锚杆的研究仍比较匮乏，理论认知远落后于工程应用。因此，有必要对该新型锚杆继续展开深入研究。

本研究以青岛某抗浮工程为背景，该工程采用压力型等直径笼芯囊锚杆作为主要抗浮构件

并成功实施,在此基础上通过6根压力型等直径笼芯囊锚杆在多循环荷载条件下的现场拉拔试验,阐明中风化花岗岩地层中囊袋注浆压力变化对该类锚杆受力性能与变形行为的影响。通过试验,重点研究了杆体在循环加卸载过程中的荷载-位移关系,旨在揭示其弹塑性发展特征。基于杆体的及荷载-位移曲线和弹塑性变形规律分析,为该新型锚杆在抗浮锚固结构中的优化设计与性能评价提供了理论参考。

1　试验概况

1.1　试验场地工程地质概况

据钻探揭示,场区基岩主要为燕山晚期粗粒花岗岩,局部穿插后期侵入煌斑岩脉。基岩顶面标高0.48~−7.75 m,整体由南向北倾斜,平均坡率约为4%,最大坡率约为22%。其中,花岗岩中等风化带广泛分布于整个试验场区,其揭露厚度0.60~6.40 m,揭露层顶标高−21.80~0.45 m。浅肉红~肉红色,岩石组织结构部分破坏,矿物蚀变中等,岩体构造节理发育,岩芯呈碎块~短柱状,敲击声哑,锤击可碎。该层地基承载力特征值f_a=2 200~2 500 kPa。试验锚杆完全锚固于花岗岩中风化带中,此岩层主要物理力学指标如表1所示。

1.2　试验锚杆设计参数

本试验共设置了6根压力型等直径笼芯囊锚杆,其锚孔直径为200 mm,锚杆间距为2.4 m。锚杆锚固于中风化花岗岩中,有效长度为5.5 m(不含超挖回填段及上部预应力筒),其中特殊锚固段长度为1.5 m。锚杆杆体采用PSB930预应力螺纹钢筋,直径为40 mm,总长度为7.2 m。材料弹性模量为200 GPa,极限强度标准值为1 080 MPa,屈服强度设计值为930 MPa。该锚杆设计抗拔承载力特征值为420 kN,张拉锁定荷载为465 kN。水泥采用普通硅酸盐水泥,水泥浆强度不低于35 MPa,内掺钢筋阻锈剂。试验锚杆实物图如图2所示,设计参数如表2所示。



图2 压力型等直径笼芯囊锚杆实物图
Fig. 2 Actual photo of pressure-type equal-diameter cage core capsule anchor

表1 锚固岩层主要物理力学指标
Table 1 Main physical and mechanical indexes of anchored rock formations

岩层 Rock layers	地基承载力特征值/kPa Characteristic value of bearing capacity of foundation	弹性模量/MPa Elastic modulus	容重/(kN·m^{-3}) Bulk density	浆-岩界面极限黏结强度标准值/kPa Standard value of the ultimate bond strength at the slurry-rock interface	内摩擦角/° Internal friction angle	岩石抗压强度标准值/MPa Standard value of rock compressive strength
中风化花岗岩 Moderately weathered granite	2 500	8 000	24.0	600	55	28.5

1.3　试验过程及加载装置

试验锚杆的施工按以下流程进行:首先对锚杆进行统一编号,随后测量人员依据控制点与平面图确定孔位。孔位确定后,采用潜孔钻机进行钻孔,钻孔深度6.3 m。成孔并清孔后,立即进行注浆,使浆液充分充填锚孔并渗入周围地层。下锚前,在现场按设计要求组装锚杆,随后吊装并安放至锚孔内。下锚完成后,随即进行囊内注浆

表2 试验锚杆参数
Table 2 Test anchor parameters

锚杆编号 Anchor number	锚孔直径/mm Diameter of the anchor hole	杆体直径/mm Diameter of the rod body	杆体长度/m Length of the rod body	有效锚固长度/m Effective anchoring length	特殊锚固长度/m Special anchoring length	外伸段长度/m Length of the extended section	囊袋注浆压力/MPa Capsule grouting pressure
NMG-1-S1	200	40	7.2	5.5	1.5	0.7	1.5
NMG-1-S2	200	40	7.2	5.5	1.5	0.7	1.5
NMG-1-S3	200	40	7.2	5.5	1.5	0.7	1.5
NMG-2-S1	200	40	7.2	5.5	1.5	0.7	1.0
NMG-2-S2	200	40	7.2	5.5	1.5	0.7	1.0
NMG-2-S3	200	40	7.2	5.5	1.5	0.7	1.0

这一关键工序[23]。囊袋注浆压力为恒压注浆过程中的指定保持压力，该压力由液压注浆泵自带的精密压力表（精度为0.01 MPa）实时监测，并通过手动调节予以稳定。注浆压力达到设计值后，应持压3 min，目的在于确保囊体得以充分扩张，并与孔壁紧密贴合。现场囊内注浆工序如图3所示。

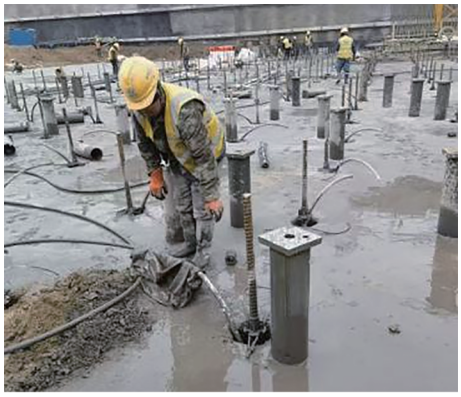


图3 现场囊袋注浆图
Fig. 3 On-site capsule grouting diagram

待水泥浆液从排气管均匀流出，证明囊袋张开直径达到设计要求，停止注浆。锚杆孔注浆完成后，应立即安装直径180 mm、长度600 mm的预应力筒。预应力筒内注入水泥浆并应及时补浆，保证浆体饱满，施工完成后试验锚杆主要构造如图4所示。待浆体满28天龄期或经实验室检验的同条件养护试块强度达到试验标准后进行现场抗拔试验。

试验利用自主研发的设备进行加载，主要包括：穿心液压千斤顶、电动液压泵站、位移百分表、反力梁、钢垫板、预应力螺母。试验装置由下往上依次安装，加载装置依次安装完成后，进行

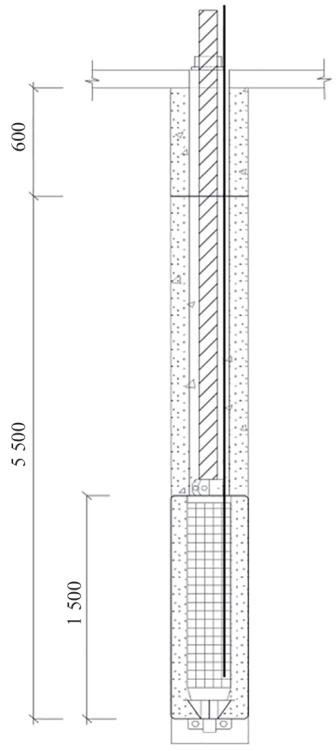


图4 试验锚杆构造示意图（单位：mm）
Fig. 4 Test anchor structure diagram (Unit: mm)

预加载，调试设备是否满足加载要求，调试完成后校准位移百分表和电动液压泵站。现场加载装置示意图如图5所示。

1.4 加载方式

试验采用多循环加卸载方式，其核心目的在于更为科学与系统地评估锚杆体系的长期工作性能及安全可靠性。这一方法的必要性源于地下水位并非恒定不变，而是随水文周期产生动态波动，致使锚杆在实际服役过程中承受周期性变化的浮力作用。多循环加卸载试验正是为了模

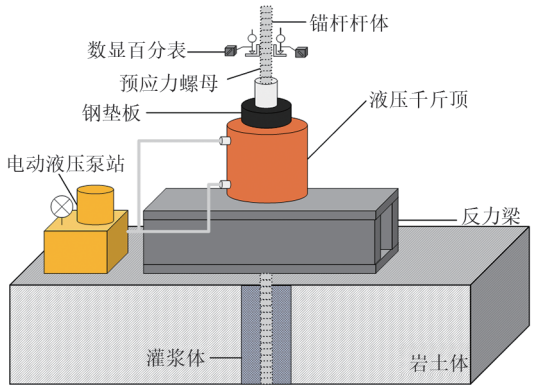


图5 现场加载装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of on-site loading device

拟这一实际受力环境,借此检验锚杆在长期交变荷载作用下可能出现的疲劳累积效应、锚固界面黏结性能的弱化或退化行为。

《笼芯囊锚杆技术规程》(T/CECS 889-2021)[24]中规定,永久性笼芯囊锚杆最大试验荷载不应小于锚杆抗拔力特征值的1.5倍,临时性笼芯囊锚杆的最大试验荷载不应小于锚杆抗拔力特征值的1.2倍。在实际操作中,本试验采取极限拉拔破坏试验,且试验最大荷载值取特征值3倍,即1 260 kN。循环加卸载等级与位移观测间隔时间如表3所示。并且为了具体研究压力型等直径笼芯囊锚杆的破坏形态及特性,本次试验在完成预估最大荷载值的加载后,继续进行了两个循环加载直至锚杆破坏。

表3 循环加卸载等级与位移观测间隔时间

Table 3 Cyclic loading and unloading grades and displacement observation interval time

加荷标准循环数 Loading standard cyclic number	试验荷载值与最大试验荷载预估值的比例/% The ratio of the test load value to the estimated maximum test load value											
	初始荷载 Initial load	加载过程 Loading process						卸载过程 Uninstallation process				
第一循环 First cyclic	10	30	/	/	/	/	/	50	/	/	30	10
第二循环 Second cyclic	10	30	50	/	/	/	/	60	/	/	30	10
第三循环 Third cyclic	10	30	50	/	/	/	60	70	/	50	30	10
第四循环 Fourth cyclic	10	30	50	/	/	60	70	80	/	50	30	10
第五循环 Fifth cyclic	10	30	50	/	60	70	80	90	70	50	30	10
第六循环 Sixth cyclic	10	30	50	60	70	80	90	100	70	50	30	10
观测时间/min Observation time		5	5	5	5	5	≥10	5	5	5	5	5

在加载初期,所有荷载均设定为最大荷载Q_{max}的10%。首次加载循环中,荷载逐步提升至Q_{max}的一半后卸载,加荷速度为0.1 kN/min,卸荷速度为加荷速度的2倍。随后的加载循环,最大荷载依次递增至Q_{max}的50%、60%、70%、80%、90%,并最终达到满载状态。在每一循环的非最大荷载作用下,每级荷载加载或卸载完成后持荷5 min,并在第0、5 min测读位移。在每一循环的最大荷载作用下,加载完成后,应每间隔持荷5 min测读一次位移;当位移达到相对稳定标准时(即0~30 min观测时间内,当相邻两次锚头位移增量不大于0.05 mm时,可视为稳定;当30 min内锚头位移仍不稳定时,延长观测时间,当锚杆出现1 h内锚头位移增量不大于0.50 mm时,可视为稳定)方可卸载。试验加卸载终止条件严格按照《锚杆检测和监测技术规程》(JGJ/T401-2017)[25]的有关规定执行。

2　试验结果及分析

2.1　破坏性试验结果及分析

现场6根压力型等直径笼芯囊锚杆在分级

循环加荷卸荷条件下，达到极限破坏，其拉拔试验结果汇总见表4，锚杆杆体的荷载-位移曲线及弹塑性位移变化曲线见图6、7。

如表4所示，6根试验锚杆试验结果最终表现为持续拔升岩土体破坏，锚头位移不收敛。对比NMG-1组和NMG-2组数据可以发现，随着囊袋注浆压力的增大，锚杆的承载性能有所提高，这与张世轩[26]的研究结果相近。囊袋注浆压力由1.0 MPa提高至1.5 MPa时，NMG-2组锚杆可承受的极限加载量平均提升6.79%。经分析，在相同锚孔孔径条件下，囊袋注浆压力增大促使囊袋膨胀后对孔壁产生的挤压应力增强，进而强化

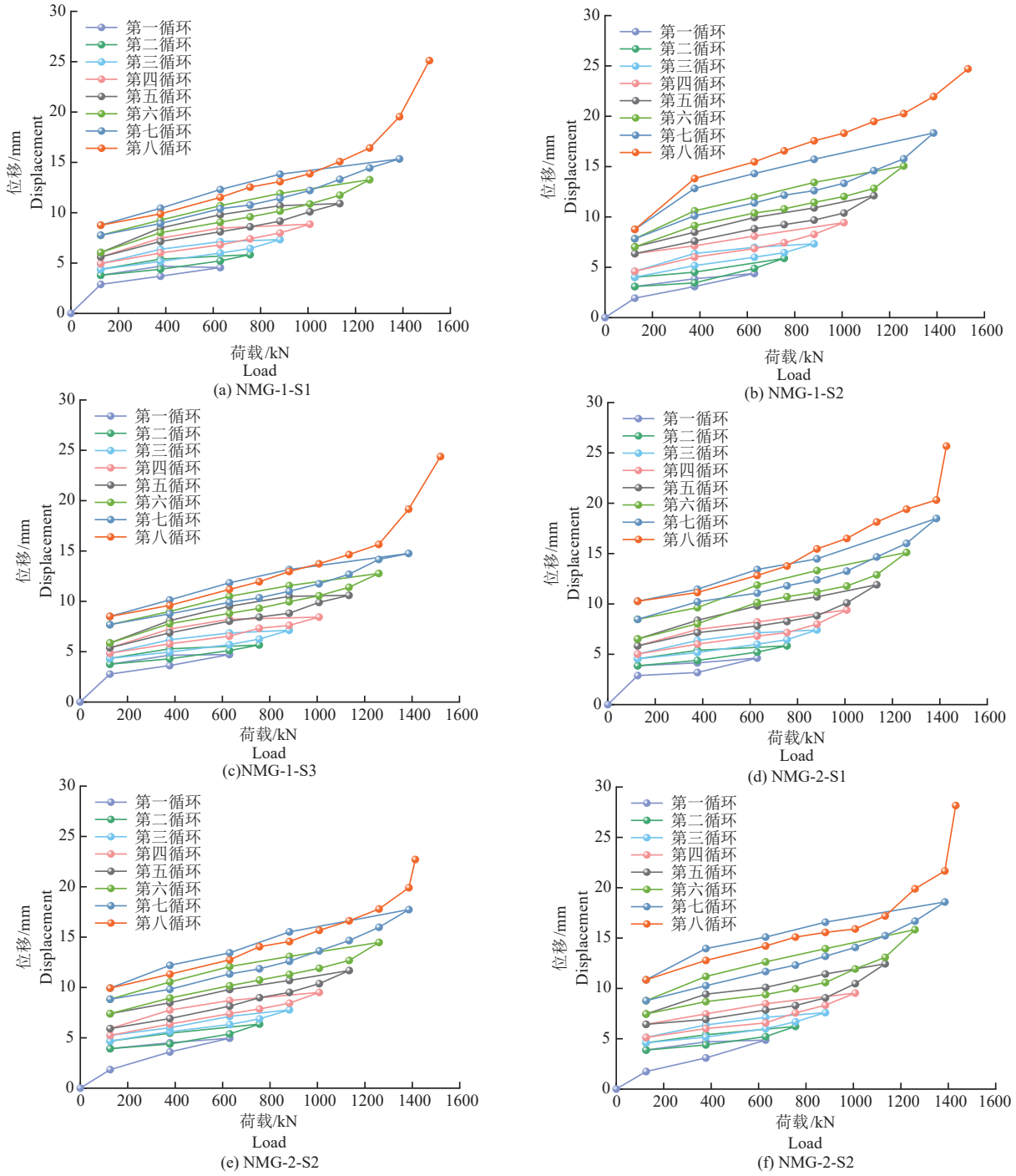


图6 循环荷载下荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves under cyclic loading

表 4 抗浮锚杆试验参数

Table 4 Anti-floating anchor test parameters

锚杆编号 Anchor number	杆体长度/m Length of the rod body	杆体直径/mm Diameter of the rod body	锚孔直径/mm Diameter of the anchor hole	囊袋注浆压力/MPa Capsule grouting pressure	极限加载量/Kn Limit loading capacity	最大位移量/mm Maximum displacement	破坏形式 Form of destruction
NMG-1-S1	7.2	40	200	1.5	1 512	25.11	持续拔升土体破坏
NMG-1-S2	7.2	40	200	1.5	1 531	24.70	持续拔升土体破坏
NMG-1-S3	7.2	40	200	1.5	1 520	24.38	持续拔升土体破坏
NMG-2-S1	7.2	40	200	1.0	1 428	25.61	持续拔升土体破坏
NMG-2-S2	7.2	40	200	1.0	1 413	22.71	持续拔升土体破坏
NMG-2-S3	7.2	40	200	1.0	1 432	28.17	持续拔升土体破坏

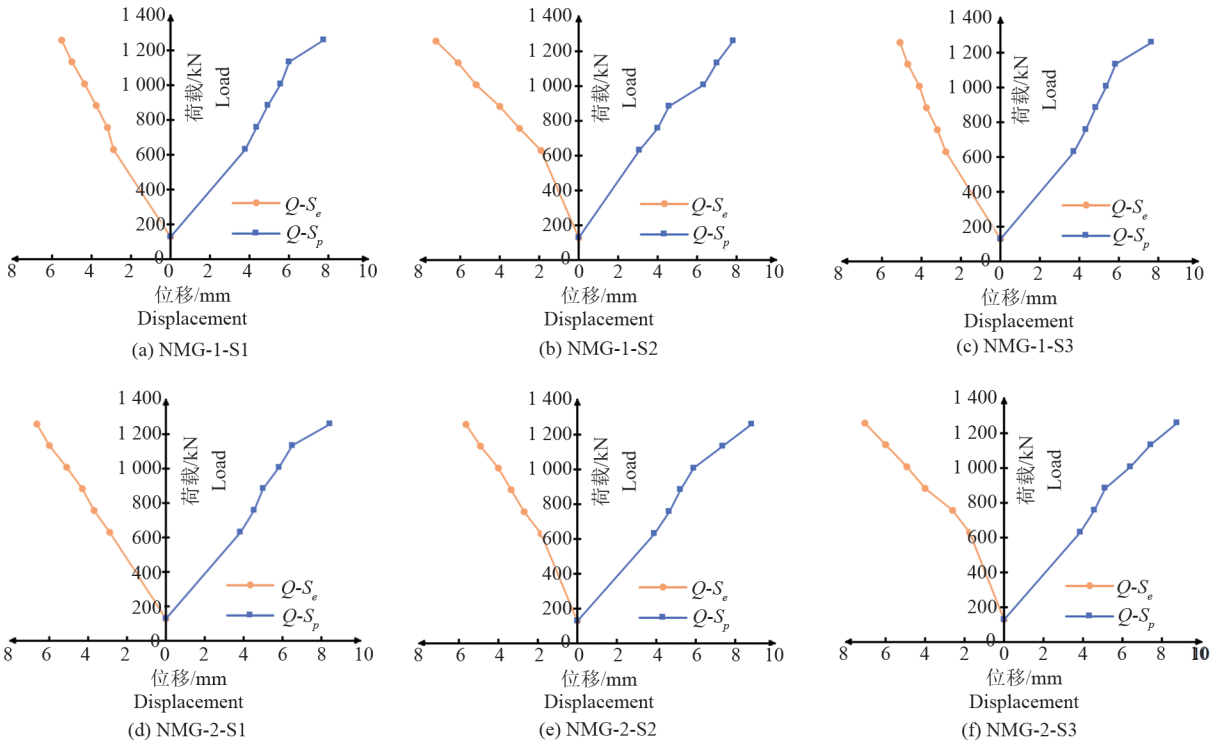


图 7 循环荷载下荷载-弹性位移(Q-S_e)及荷载-塑性位移(Q-S_p)曲线

Fig. 7 Load-elastic displacement (Q-S_e) and load-plastic displacement (Q-S_p) curves under cyclic loading

了特殊锚固段灌浆体与岩土体间的黏结应力,整体提高了压力型等直径笼芯囊锚杆侧摩阻力。

2.2　荷载 - 位移曲线分析

如图 6 所示,第一循环 0~126 kN 荷载提升初始阶段,6 根压力型等直径笼芯囊锚杆的荷载-位移曲线呈现出一种斜率较大且与试验加载初期的曲线斜率存在差异的显著特征。这一现象主要归因于,当锚杆首次承受荷载时,作为压力型抗浮锚杆所固有的力学特性发挥作用,致使锚杆对灌浆体产生了一定程度的压密效应。该效应进一步使得灌浆体中的气泡、裂缝等工程缺陷得以消除,从而有效避免了后续因施工缺陷而引发的位移误差。

继续关注循环荷载下荷载-位移曲线变化,两组锚杆杆体的荷载-位移曲线在每级荷载作用下的变化趋势基本相同,加荷时单调递增,卸载时单调递减。相较于 NMG-1 组,NMG-2 组在后四个循环中的各荷载-位移曲线之间呈现出更为稀疏的特征。具体而言,在锚杆 NMG-2 第七循环结束时以及第八循环的三个起始点位,位移均超过了 10 mm。上述差异清晰表明,NMG-2 组

的位移增长速率相较于NMG-1组更为迅速。当荷载达到试验设定的最大荷载值1 260 kN时，NMG-1组的最大杆体位移为15.06 mm，平均值为13.70 mm，NMG-2组的最大杆体位移为15.83 mm，平均值为15.14 mm，NMG-2组锚杆的杆体位移相较NMG-1组锚杆的杆体位移增大10.51%。内在机理在于，囊袋注浆压力直接制约了特殊锚固段的密实度与成型质量。NMG-2组较低的注浆压力导致囊体结构强度与完整性相对不足，削弱了其与周围岩土体的协同工作性能。因此，其在相同时间内表现出更大的塑性变形与更显著的界面损伤累积。

在循环加载过程中，荷载-位移曲线表现出典型的“滞回”效应，具体表现为加载路径与卸载路径之间的非重合现象。分析表明，锚杆在承受荷载向承载体传递过程中，普通锚固段和特殊锚固段的灌浆体-岩土体界面在循环荷载作用下逐步脱黏，导致界面黏结力逐渐降低。随着循环次数的累积，锚杆塑性位移占比持续升高，每级卸载终点与初始荷载下的位移差值逐渐增大，表明每次循环都产生一定量的残余位移量，在多循环荷载下锚杆体系出现疲劳性损伤，界面损伤的不可逆性进一步加剧位移的非线性增长，这与吴泽坤等[27]研究结果相近。

2.3 弹塑性变形分析

在拉拔荷载作用下，抗浮锚杆的变形呈现明显的阶段性特征，其变形过程依次经历弹性阶段、弹塑性阶段，最终达到塑性破坏状态。每次循环的弹塑性位移量如表5所示。

表5 最大试验荷载下循环弹塑性位移量

Table 5 The cyclic elastic and plastic displacement under the maximum test load

锚杆编号 Anchor number	最大加载值/kN Maximum load value	最大位移量/mm Maximum displacement	塑性位移/mm Plastic displacement	弹性位移/mm Elastic displacement	回弹率/% Bounce rate
NMG-1-S1	1 260	13.28	7.76	5.52	41.57
NMG-1-S2	1 260	15.06	7.83	7.23	48.00
NMG-1-S3	1 260	12.77	7.68	5.09	39.86
NMG-2-S1	1 260	15.11	8.46	6.65	44.01
NMG-2-S2	1 260	14.47	8.83	5.64	38.98
NMG-2-S3	1 260	15.83	8.78	7.05	44.54

根据表5测试结果，锚杆回弹率范围为38.98%~48.00%。从最大试验荷载下循环弹性位移与塑性位移比值（0.66~1）看，塑性变形占主导地位，表明锚杆在荷载作用下以塑性变形为主要特征，同时其平均回弹率仍保持在较高水平。

基于试验所得数据进一步构建锚杆的荷载与弹塑性位移之间的关系曲线，如图7所示。对比两组锚杆循环荷载下荷载-弹性位移（Q-S_e）及荷载-塑性位移（Q-S_p）曲线，可以看出囊袋注浆压力对压力型等直径笼芯囊锚杆受力变形都有一定影响。随着荷载水平的不断提升，NMG-1组、NMG-2组弹性位移变化相对平稳，呈现出一种近似的线性增长趋势。郭钢[28]指出在锚杆受拉拔力产生的变形中，弹性变形是锚杆杆体和岩土体产生的可恢复的变形。在锚杆变形性能分析中，最重要的是塑性变形在总位移量中所占比例。随着荷载水平升高，NMG-1组与NMG-2组锚杆的塑性位移总体呈近似线性增长，但部分试件（如NMG-1-S1、NMG-1-S3、NMG-2-S1）在第6次循环临近破坏时塑性位移突增。该循环结束时，与NMG-1组相比，NMG-2组的塑性位移平均提升了11.20%。相同循环荷载下锚杆NMG-1在各个循环的平均塑性位移均小于NMG-2，表明随着囊袋注浆压力的增大，相同循环荷载下锚杆的塑性位移相应减小。分析认为，囊袋注浆压力的提高虽在短期内增强特殊锚固段对孔壁的挤压及黏结作用，但其最直接的影响在于使得钢丝笼水泥结石囊体内灌浆体更为密实，进而提升锚固体整体刚性。

3 结论

（1）压力型等直径笼芯囊锚杆对灌浆体产生压密效应，致使荷载-位移曲线在初始阶段斜率显著增大，与后续加载阶段特性明显不同。

(2)多循环荷载作用下,锚杆荷载-位移曲线呈现明显滞回特性,变形以塑性为主,体系塑性损伤随循环次数增加而增大。

(3)随着注浆压力提高,锚杆抵抗塑性变形能力增强,承载性能显著提升。囊袋注浆压力由1.0 MPa提升至1.5 MPa,锚杆塑性位移相应减少10.70%,可承受的极限加载量平均提升了6.79%。

参考文献

[1] 白晓宇,张明义,匡 政,等.全长黏结GFRP抗浮锚杆荷载分布函数模型研究[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(07):1977-1988.

[2] 封永梅,张 楠.岩土高陡边坡锚杆加固的稳定性及抗倾覆安全系数分析[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(02):335-339.

[3] 李 晶,梁力川,邵雪停,等.考虑降雨和地震作用下的铁路边坡稳定性分析[J].山东农业大学学报:(自然科学版),2023,54(06):887-896.

[4] 白晓宇,井德胜,张明义,等.全长黏结非金属抗浮锚杆体系设计方法研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(08):3168-3177.

[5] 彭 涛,任东兴,杨宗耀,等.基于PSB钢筋的高强度锚杆精细分区抗浮及受力分析[J].地质与勘探,2024,60(02):377-387.

[6] Lin N, Zhang H, Zou J, et al. Improvements in wear and corrosion resistance of RB400 anchor rod steel by electroless Ni-P plating[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2015, 10(1): 356-372.

[7] Zhao C, Li Y, Liu G, et al. Research on the stress distribution law of fully anchored bolt and analysis of influencing factors under the condition of surrounding rock deformation[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 8818375.

[8] Du H, Chen Z, Wang X, et al. Development of a Cr-Ni-Mo alloyed stress corrosion-resistant anchor bolt steel[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2024, 71(1): 1-11.

[9] 柳建国,吴 平,尹华刚,等.压力分散型抗浮锚杆技术及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):150-155.

[10] 韩大刚.锚栓钢板加固法抗弯性能试验及设计方法[D].重庆:重庆大学,2006.

[11] 白晓宇,苏 悦,秦明光,等.PSB精轧螺纹钢筋抗浮锚杆承载性能现场试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(03):1125-1139.

[12] 滕延京,王卫东,康景文,等.基础工程技术的新进展[J].土木工程学报,2016,49(04):1-21.

[13] Liu Y, Xia K, Wang B, et al. Experimental investigation on the anchorage performance of a tension-compression-dispersed composite anti-floating anchor[J]. Applied Sciences, 2023, 13(21): 12-16.

[14] 罗东林,李欣洧,廖宏业,等.PSB精轧螺纹钢预应力扩大头抗浮锚杆的工程应用研究[J].建筑结构,2022,52(14):146-150.

[15] 白晓宇,王凤姣,桑松魁,等.抗浮锚杆在地下结构抗浮中的耐久性研究进展与发展方向[J].科学技术与工程,2022,22(19):8165-8176.

[16] Cheng X, Li Y, Wang P, et al. Model tests and finite element analysis for vertically loaded anchors subjected to cyclic loads in soft clays[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 119: 13-17.

[17] 张 勤,张 俊.地质工程概论[M].北京:中国水利水电出版社,2021:100.

[18] 郭 钢,刘 钟,邓益兵,等.砂土中扩体锚杆承载特性模型试验研究[J].岩土力学,2012,33(12):3645-3652.

[19] 杨 卓.囊压式扩体锚杆锚固机理与承载特性试验研究[D].北京:中国矿业大学,2016.

[20] 曾庆义,杨晓阳,杨昌亚.扩大头锚杆的力学机制和计算方法[J].岩土力学,2010,31(05):1359-1367.

[21] 杨 坤,许 洋,李再德,等.压力型笼芯囊锚杆在施工中常见的问题及处理[J].四川建筑,2023,43(04):237-240.

[22] 刘 钟,郭 钢,张 义,等.囊式扩体锚杆施工技术与工程应用[J].岩土工程学报,2014,36(增2):205-211.

[23] 刘 钟,张楚福,张 义,等.囊式扩体锚杆在宁波地区的现场试验研究[J].岩土力学,2018,39(增2):295-301.

[24] 中国工程建设标准化协会.TCECS889—2021笼芯囊锚杆技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2021:26.

[25] 中华人民共和国住房和城乡建设部.JGJ/T401—2017锚杆检测和监测技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2017:51.

[26] 张世轩.囊式扩体锚杆现场试验分析及承载力计算模式研究[D].郑州:郑州大学,2017.

[27] 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(09):2314-2328.

[28] 郭 钢.扩体锚杆承载机理与极限承载力研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.