

# 九圩港闸站枢纽工程场地 粉砂土静、动力特性试验研究

沈春林<sup>1</sup>, 王 伟<sup>1</sup>, 钟 建<sup>1</sup>, 吴建伟<sup>2</sup>

(1. 南通市九圩港水利工程管理所, 江苏 南通 226003; 2. 南通市通吕运河水利工程管理所, 江苏 南通 226000)

**摘要:** 为研究九圩港闸站枢纽工程场地含化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  的粉砂土承载能力, 设计开展了三轴静力测试与循环动荷载加卸试验。试验数据分析表明: 围压对粉砂土试样应变特征影响高于化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量, 而化学污染物会削弱试样承载能力, 且削弱效应逐步增强; 在动荷载循环加卸过程, 不同强度的围压作用, 试样内部孔隙结构演化路径各有区别; 当化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量增大, 则孔压分布愈低, 而随着循环振次进程加快, 则各  $\text{Cu}^{2+}$  含量试样之间的孔压差幅更大; 在各国围压作用下, 动弹性模量随应变均为“递减-稳定”变化特征, 围压作用还会影响化学污染物含量对动弹性模量参数影响效应。

**关键词:** 九圩港闸站枢纽工程; 粉砂土; 三轴剪切; 动力特性

中图分类号: TU521 文献标识码: A 文章编号: 1007-7839(2024)07-0047-0006

## Experimental study on static and dynamic characteristics of silty soil in the site of Jiuwei Port Sluice Station Hub Project

SHEN Chunlin<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, ZHONG Jian<sup>1</sup>, WU Jianwei<sup>2</sup>

(1. Nantong Jiuwei Port Water Conservancy Engineering Management Office, Nantong 226003, China;

2. Nantong-Lusi Canal Water Conservancy Engineering Management Office, Nantong 226000, China)

**Abstract:** To study the bearing capacity of silty soil containing chemical pollutant  $\text{Cu}^{2+}$  in the Jiuwei Port Sluice Station Hub Project site, triaxial static tests and cyclic dynamic load loading and unloading tests were designed and carried out. Based on experimental data analysis, it is shown that the influence of confining pressure on the strain characteristics of silty soil samples is higher than that of chemical pollutant  $\text{Cu}^{2+}$  content, and chemical pollutants weaken the bearing capacity of the samples, and the weakening effect gradually strengthens. During the process of cyclic loading and unloading under dynamic loads, the evolution paths of the internal pore structure of the specimen vary with different intensities of confining pressure. When the content of chemical pollutant  $\text{Cu}^{2+}$  increases, the pore pressure distribution becomes lower, and as the cyclic vibration process accelerates, the pore pressure difference between samples with different  $\text{Cu}^{2+}$  contents become larger. Under various confining pressures, the dynamic elastic modulus exhibits a “decreasing stable” variation characteristic with strain, and the confining pressure also affects the effect of chemical pollutant content on the dynamic elastic modulus parameters.

**Key words:** Jiuwei Port Sluice Station Hub Project; silty soil; triaxial shear; dynamic characteristics

收稿日期: 2024-03-26

作者简介: 沈春林(1990—), 男, 工程师, 本科, 主要从事泵站、水闸运行管理工作。E-mail: pk5603@163.com

水工建筑的安全稳定离不开地基稳定性,而地基稳定性又与场地土层特性密切相关。研究工程场地土体的承载能力,对推动地基治理以及提高工程基础设计水平有一定参考价值<sup>[1-2]</sup>。土体的承载能力一方面与静荷载有关,但同时又需要关注场地土体的动力特性,为工程抗震设计提供参照。李丽华等<sup>[3]</sup>、荣帆等<sup>[4]</sup>为研究土体静荷载下剪切力学水平,依托工程背景,开展了含污染成分的土体剪切力学试验,分析了污染成分对土体剪切应力应变的影响。何忠明等<sup>[5]</sup>、郑言林<sup>[6]</sup>为探讨土体动力水平,采用了动荷载力学试验装置开展了土体应力状态、剪胀性研究,并探讨了土样孔压变化趋势的影响因素。依托九圩港闸站枢纽工程,本研究开展了该工程场地含化学污染物 $\text{Cu}^{2+}$ 的粉砂土静力学、动力学测试,并分析了粉砂土试样的三轴剪切应力应变特征与动力特性,旨在为工程建设提供了试验依据。

## 1 研究思路

### 1.1 工程介绍

作为南通市重要提水、引水、防洪、排涝枢纽,九圩港闸站枢纽对南通市水利安全、水资源调度具有重要作用,如通过九圩港闸站枢纽,可向南通市海安地区、如东地区以及沿海工业开发方提供农业用水、工业用水等,同时也可兼顾南通市区河道的水生态整治以及河道治污等。九圩港闸站工程包括了九圩港提水泵站、节制闸、拦污栅等水工设施,其中九圩港提水泵站取水来源于上游九圩港河,该河道最高控制水位为2.8 m,实际运营正常水位控制在1.8~2.5 m,而九圩港提水泵站的下游通过引河与长江相连,整个泵站建设有进水前池、出水池以及消力池等附属水利设施,是九圩港闸站的核心工程。除此之外,九圩港闸站工程的节制闸承担了控水、泄洪的功能,其闸室底板与九圩港提水泵站处于同一水平面,且按照水利信息化施工运营标准,全闸室结构均安装有监测传感器,可实时监测获得闸站的运营状况,获取闸室结构应力与应变特征,同时也可对闸室内渗流状态进行反馈。图1为九圩港闸站枢纽工程所属的拦污栅结构,采用直径为1.6 m的闸墩作为栅体结构的支撑构件,所有墩体均依托九圩港闸站所在粉砂土地作为直接载体。据水文资料得知,九圩港闸站枢纽目前在营时间超过了2 000 h,而且在部分拦污栅体处出现了混凝土开裂、支撑墩脚受潮较为严重,且根据监测传感器反馈数据得知,栅体所在工程场地出现了较为严重

的沉陷,局部栅体最大沉陷厚度可达6~8 mm。不仅如此,九圩港闸站枢纽在多轮次洪峰工况过境下,均能够有效完成泄洪、排涝任务,但是在2023年的极端台风天气中,南通市区局部道路出现了较为严重的内涝,此时九圩港闸站枢纽在受上游九圩港河洪水动力势能冲击作用下,泵站进水前池所在场地泥沙淤积厚度超过了30 cm,导致前池承载能力不够,局部挡水墙出现了塌陷,整个闸站枢纽处于半瘫痪状态。为此,九圩港闸站枢纽管理部门考虑对该水工设施进行改扩建,同时对场地承载能力、安全允许沉降值进行重设,保障闸站枢纽安全可靠运行。



图1 九圩港闸站枢纽工程所属拦污栅结构

### 1.2 研究方法

为确保试验结果可靠性,同时也确保试验结果与工程设计需求相对应,本试验设计为两部分,其中一部分为粉砂土的静力学试验,另一部分为粉砂土动力特性测试。根据工程需要,粉砂土静力学测试是为了获取粉砂土地基实际承载能力,动力学测试是为了对粉砂土地基的抗震能力、抗动水冲击作用进行分析。基于此,所采用的试验设备尽量匹配静力学、动力学耦合测试两种功能,所选用的试验设备为国产ATS土体三轴力学剪切装置,如图2所示,该试验装置配备了精密的力学传感器,即使在荷载波动5 Hz范畴内仍能监测到荷载值。变形监测设备为LCDT传感器,量程为-20~20 mm,可面向大变形土体。同时,ATS试验设备可更换不同振动频率的加载平台,完成动力学测试改装,试验动荷载频率设定为-5~5 Hz,并采用循环加卸载方式测试<sup>[7-8]</sup>,并采用LCDT轴向变形控制加载,速率为0.01 mm/min,卸载过程同样也采用变形控制,速率为0.01 mm/min,轴向荷载加载过程中按照正弦函数

关系进行设定参照值,频率为0.25 Hz,应力比CSR按照地震动作用强度设定为0.15。

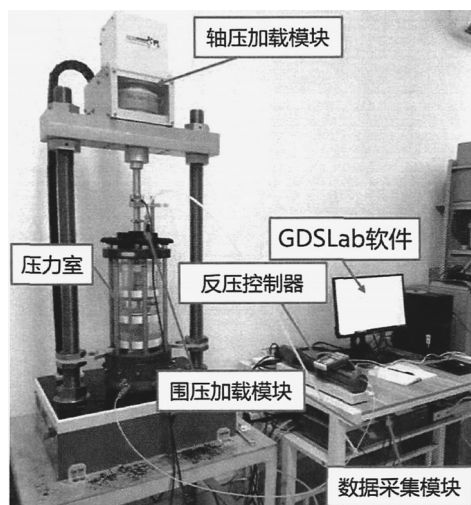


图2 国产ATS土体三轴力学剪切装置

从九圩港闸站枢纽工程扩建现场,采用大口径钻孔进行取样,所获得的样品深度分布在3.6~4.2 m,室内进行物理属性测试,获得了该粉砂土样品的颗

粒级配特征,如图3(a),土样中值粒径为0.03 mm,颗粒粒径占比最多为0.2 mm,整体级配属不良,颗粒松散性较大。通过进行击实试验获得了土样的最优含水率,如图3(b)所示,土样最大干密度为1.39 g/cm<sup>3</sup>,在工程现场测试中,土样含水率分布于12.6%~17.8%,不同钻孔间土样含水率差异较小。在进行土样化学成分测定时发现,除了存在于常规碳酸类、钙类化学矿物成分外,在部分钻孔内的土样检测出硫酸盐类、金属类化学污染物成分,主要以硫酸铜化学物为主,且分布密度存在差异化,土样有机物含量分布为0.72 mg/kg,按照土样每米进尺,化学污染物含量为10.5 μg/m。基于上述工程现场土样分析,在室内实验室采用环刀法取样,获得了直径、高度分别为50 mm和100 mm试样,如图4所示,所有室内制作的试样覆盖所有现场钻孔,确保试验结果的全面性,每种样品制备数量均需按照静力学、动力学测试要求准备。在进行静力学、动力三轴测试前,所有试验样品均已完成了二次固结,并在真空饱和箱内完成抽气饱和。

考虑到九圩港闸站枢纽工程改扩建分布区范

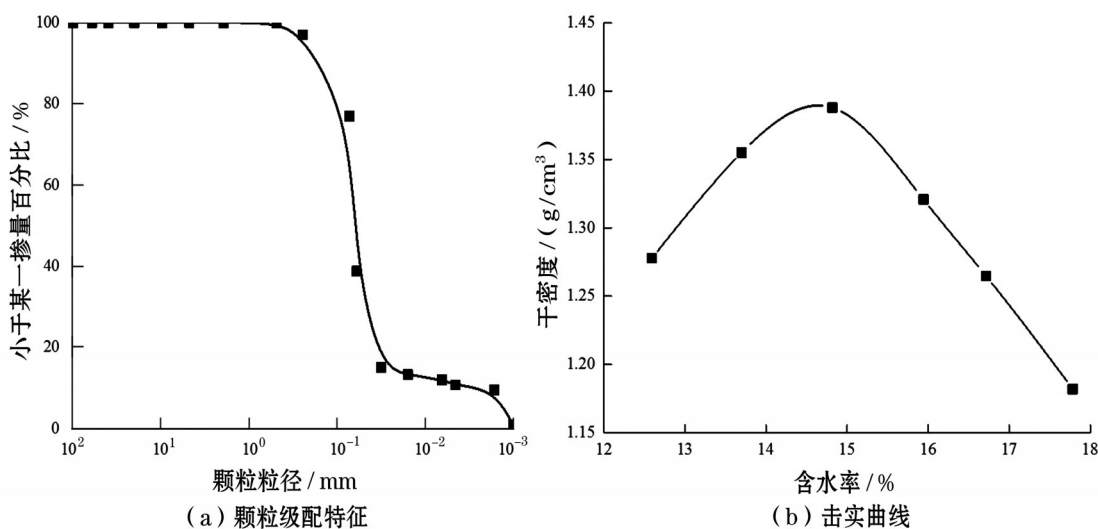


图3 土样颗粒物理特征

围,以化学污染物含量作为土样对比指标,探讨场地粉砂土的静力学承载能力以及动力特性。试验围压根据钻孔深度,静、动力测试均设定为40 kPa、120 Pa、300 kPa,土样化学污染物以Cu<sup>2+</sup>为衡量指标,分别设计有污染物浓度0、10、20、30、40、50 g/L含量的试样组,各组试验参数如表1所示。基于不同组试样静、动力测试结果,探讨粉砂土地场的静、动力特性,以作为场地治污、强基设计的参照。



图4 制备试样



表1 各组试样试验参数

试样编号	围压/kPa	化学污染物 $\text{Cu}^{2+}$ 含量/(g/L)	含水率/%
JFS 40-1~JFS40-6(静力学)	40	0、10、20、30、40、50	15.5
DFS 40-1~DFS40-6(动力学)			
JFS 120-1~JFS120-6(静力学)	120	0、10、20、30、40、50	15.5
DFS 120-1~DFS120-6(动力学)			
JFS 300-1~JFS300-6(静力学)	300	0、10、20、30、40、50	15.5
DFS 300-1~DFS300-6(动力学)			

## 2 粉砂土静力学特征

基于不同围压下试样三轴剪切静力学测试,获得了化学污染物含量对试样应力应变影响特征,见图5。从图5中两个典型围压组下试验数据表现来看,不论化学污染物 $\text{Cu}^{2+}$ 含量为何值,只要是处于同一围压下,则试样应力应变特征具有一致性,即化学污染物含量变化,不会从本质上改变试样应变发展特征,但围压不同,试样应变特征具有明显区别。因此,围压对粉砂土试样应变破坏效应影响超过化学污染物含量因素。当围压为40 kPa时,各个含污染物的试样峰值应变分布离散性较明显,但主要集中于4.75%~4.85%,经峰值应变后,试样的应力发生大幅下降,直至出现残余应力,承载应力降幅均超过了65%。与前者围压下应变特征相反的是,在围压300 kPa下,并不可见明显的承载应力降幅段,应力随应变持续递增,但在应变4.3%后,进入了应变增长快速、应力增长缓慢的阶段。对比之下可知,不同围压下,试样应变主导作用不同,控制围压有助于限制土样的应变特征。

虽然化学污染物 $\text{Cu}^{2+}$ 含量对试样应变发展态势影响较小,但当 $\text{Cu}^{2+}$ 含量愈大,试样承载应力水平总体是减弱的,且减弱趋势是逐步由慢到快。在围压40 kPa下,当化学污染物 $\text{Cu}^{2+}$ 含量为10 g/L时,试样峰值应力为393.3 kPa,而在 $\text{Cu}^{2+}$ 含量为20~30 g/L时,试样峰值应力较之前者分别减少了16.9%、35.4%,但在 $\text{Cu}^{2+}$ 含量为40~50 g/L时,其峰值应力分别为188.8 kPa、132.9 kPa,较之0~30 g/L下,峰值应力发生了大幅度下降。同样的现象在围压300 kPa亦是如此,该围压下 $\text{Cu}^{2+}$ 含量0~50 g/L各试样峰值应力分布于1363.2~407.3 kPa,其中在 $\text{Cu}^{2+}$ 含量30~50 g/L下,峰值应力平均降幅为26.5%。由此分析得知,化学污染物 $\text{Cu}^{2+}$ 的存在,会削弱土样承载应力<sup>[9]</sup>,且 $\text{Cu}^{2+}$ 含量愈大,则对承载应力的削弱效应更为显著。

## 3 粉砂土动力学特征

### 3.1 孔压发展特征

在土样循环加卸载动力循环过程中,粉砂土试样内部孔隙水压力会出现增大、跌落等现象,孔隙

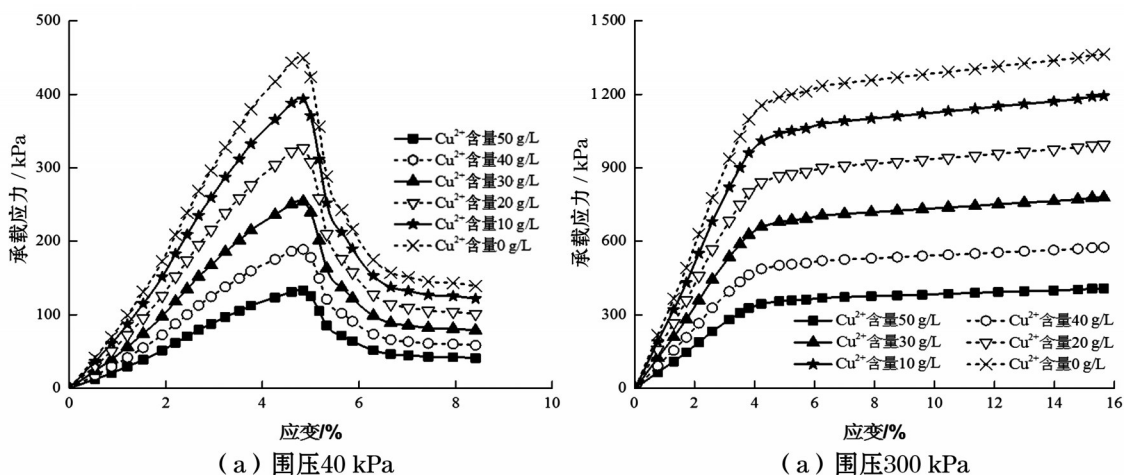


图5 化学污染物含量对试样应力应变影响

水压的变化,反映了土样内部孔隙结构的演变,也指征了土样抗动力特性的变化。为此,根据试验过程中含水率监测,获得了粉砂土试样孔压随循环加卸载次数变化特征,见图6。分析图中孔压特征可知,在不同围压条件下,孔压随加卸载循环振次变化特征各有区别,同一围压下孔压变化具有相似性。在围压 40 kPa 下,孔压变化可分为“缓增-递增-缓增”3个阶段,前、后两个缓增阶段的孔压增幅较为接近;围压 120 kPa 下试样孔压变化呈“缓增-陡增”特点,在缓增与陡增两个阶段内,孔压增幅差

距较为明显;围压 300 kPa 下,试样孔压呈“递增-稳定-递减”的三阶段特征,也只有该围压下出现了孔压递减段,即颗粒结构受到了较大不可逆变形破坏。从孔压量值水平来看,当围压增大,整体上孔压分布水平都会减小,此与围压对土样束缚作用有关,较强的约束效应限制了内部水分的活动空间,因而产生了孔压水平减小的现象<sup>[10]</sup>。综合围压对孔压特征影响可知,围压会改变试样在循环动荷载加卸载过程中孔隙结构的演化路径,造成内部孔压变化朝着差异化方向发展,且围压愈大,则孔压愈低。

另一方面,当处于同一围压下,化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量愈大,则孔压分布水平愈低,化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量会减少土样内部水分子的活动,降低水分子活性,从而造成孔压水平降低。从宏观试验数据对比可知,在围压 120 kPa 下,各个不同  $\text{Cu}^{2+}$  含量试样的孔压在“缓增-陡增”分界点大多位于循环振次 65~70 次,相对应的孔压差距也较小,但在循环振次愈往后增大的阶段,不同  $\text{Cu}^{2+}$  含量试样之间孔压差幅逐步增大。分析表明,化学污染物成分的存在,会限制水分流动,且当加卸载循环过程愈接近破坏极限,则化学污染物含量产生的孔隙水压力差异愈大。

### 3.2 动力特征参数演化

循环加卸载动荷载条件下,粉砂土试样动力特性演变直接关乎着土样抗动力破坏能力,因此,本文以动弹性模量为动力特征参数开展动力特性分析。动弹性模量定义及计算式如式(1)所示<sup>[11]</sup>:

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \quad (1)$$

式中:  $E_d$  为动弹性模量;  $\sigma_d$  为动应力;  $\varepsilon_d$  为应变;  $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  分别为一个加载周期内的最大、最小应力值;  $\varepsilon_{\max}$ 、 $\varepsilon_{\min}$  分别为一个加载周期内的最大、最小应变值。

基于不同化学污染物含量试样进行的动弹性模量特征参数计算,获得了试样循环加卸载变形破坏过程动弹性模量参数随应变变化特征,见图7。由图7可看出,不论围压为何值,动弹性模量实质上均呈“递减-稳定”特征,但是不同围压下两阶段的转折点应变各有区别,如围压 40 kPa 下为应变 7.23%,而围压 300 kPa 下为 9.75%。不仅如此,围压不同,则试样在动弹性模量的递减阶段降幅也有差异,围压 40 kPa 下含  $\text{Cu}^{2+}$  含量 5 个试样的动弹性模量平均降幅分布于 8.5%~9.7%,而围压 300 kPa 下分布于 12.5%~14.2%。

在同一围压下,当化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量越大,则

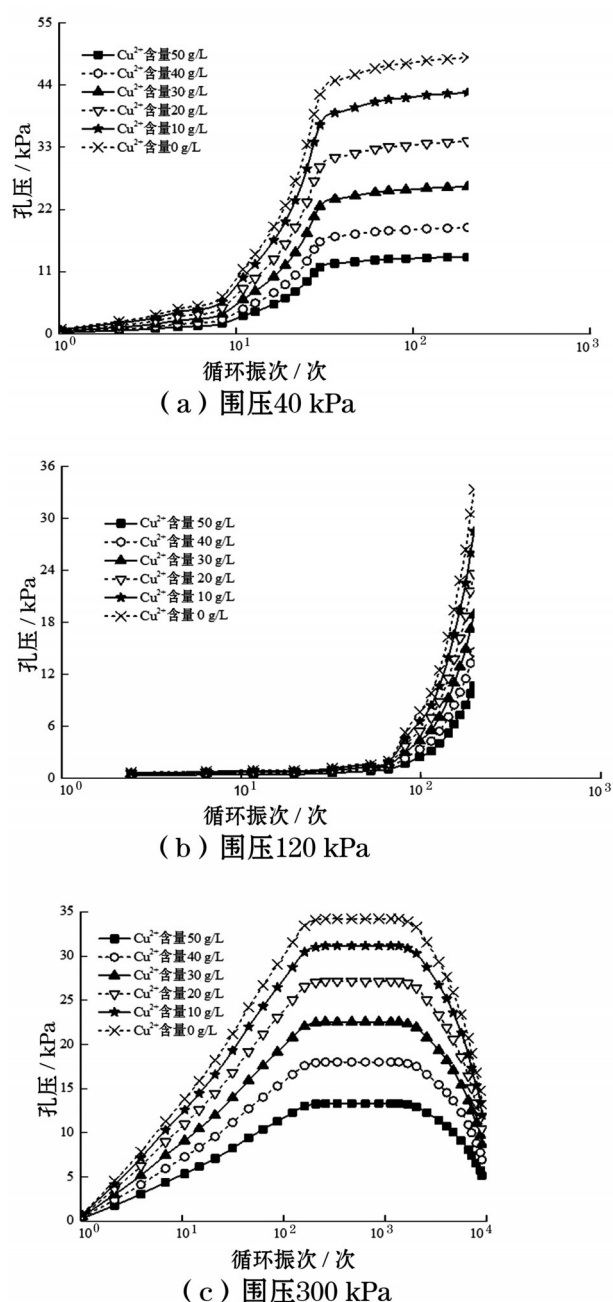


图6 粉砂土试样孔压随循环加卸载次数变化特征

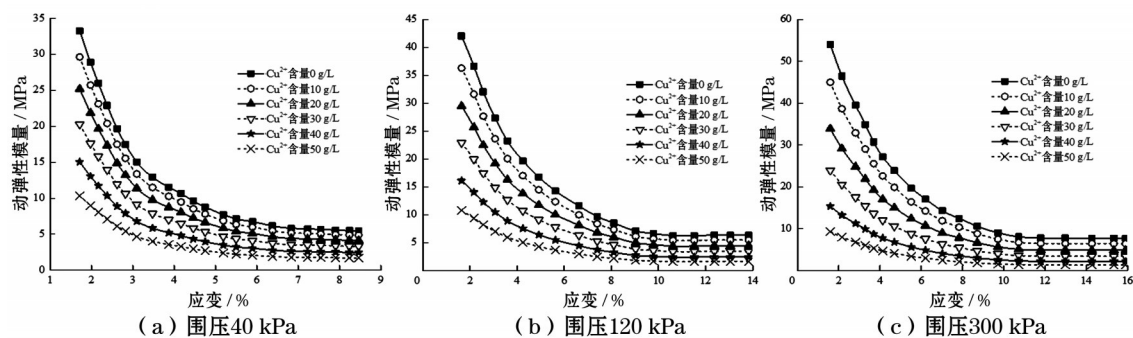


图7 试样动弹性模量参数随应变变化特征

试样动弹性模量越低。在围压 40 kPa 下,化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量 10 g/L 试样在动弹性模量的稳定段为 4.95 MPa,随着  $\text{Cu}^{2+}$  含量梯次递增,平稳段动弹性模量值平均降幅为 22.9%,当围压增大至 120 kPa 后,化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量对动弹性模量参数影响作用增大,不同  $\text{Cu}^{2+}$  含量试样之间动弹性模量差幅也增大。综上分析可知,围压作用不会改变试样动弹性模量变化趋势,但会影响动弹性模量值,也会促进不同化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量试样之间动弹性模量差距。针对九圩港闸站枢纽工程,其场地粉砂土应重点考虑控制土层覆盖深度,同时减少外来化学污染物对土层的渗流侵蚀。

## 4 结 论

(1) 化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量不会改变试样应变破坏特征,围压对试样应变影响作用高于化学污染物含量;当化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量递增,试样承载能力减弱,且减弱趋势由慢到快。

(2) 在动力特性测试中,围压不同,孔压随加卸载循环振次变化趋势各有不同,围压会改变动荷载作用下的试样内部孔隙结构演化路径;化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量越大,则孔压分布水平越低,且循环振次越大,则不同  $\text{Cu}^{2+}$  含量试样之间的孔压差幅越大。

(3) 围压不会改变动弹性模量参数的变化特征,但会影响动弹性模量变化转折节点,化学污染物  $\text{Cu}^{2+}$  含量越大,则试样动弹性模量越低,且围压增大,各  $\text{Cu}^{2+}$  含量试样之间动弹性模量参数差距

越大。

### 参考文献:

- [1] 袁肇彦. 基于管桩改良下水工地基软土力学试验研究[J]. 海河水利, 2023(3): 74-79.
- [2] 于建兵. 软土地基处理技术在泇河水库除险加固中的应用[J]. 中国水能及电气化, 2023(3): 39-42.
- [3] 李丽华, 李欣, 李文涛, 等. 碱渣-矿渣固化铜污染土力学及浸出特性[J]. 中国科技论文, 2023, 18(6): 687-693.
- [4] 荣帆, 王宇, 谢明星, 等. 一般工业固废复合固化重金属污染土的力学及电化学性能[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3849-3858.
- [5] 何忠明, 王盘盘, 张文周, 等. 考虑不同单次加载时长影响的循环荷载作用下软土动力特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(5): 30-39.
- [6] 郑言林. 循环荷载作用下重金属污染膨胀土动力特性试验研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2019.
- [7] 郭竞语, 汪新凯, 马雅林, 等. 孟加拉地区典型砂土抗液化特性动三轴试验研究[J]. 路基工程, 2023(3): 62-67.
- [8] 杨爱武, 王斌彬, 姜帅. 干湿冻融耦合作用下碱渣固化轻质土动力特性研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(6): 1962-1973.
- [9] 王小平, 吴炎, 谢丽文, 等. 不同浓度  $\text{CuSO}_4$  污染黏性土力学特性研究[J]. 土工基础, 2021, 35(6): 759-763.
- [10] 郭竞语, 汪新凯, 马雅林, 等. 孟加拉地区典型砂土抗液化特性动三轴试验研究[J]. 路基工程, 2023(3): 62-67.
- [11] 吴柯夫, 鲁云岗. 干湿循环条件下风化红砂岩粗粒土动弹性模量研究[J]. 湖南交通科技, 2023, 49(1): 22-27.