

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.02.010

动力作用对复合固化淤泥土力学性能的影响

田宗坤, 彭成*, 谭毓清

(南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:利用GDS(global digital system)动三轴仪对固化淤泥土开展动三轴UU试验,研究其轴向累积应变、动强度、动应力-动应变滞回曲线和动弹性模量等参数的变化规律。研究表明:固化土轴向应变随振动次数呈阶梯状分布,轴向应力较小时,固化土轴向应变先随振动次数增加而增大,随后趋于稳定,且固化掺量越高,轴向累积应变越小。固化土的动应力-动应变曲线呈应变硬化型,试样发生剪胀破坏,固化剂掺量越大,曲线越陡。复合固化剂掺量和围压越大,滞回圈的面积越小,其位置越靠近竖轴;滞回圈的面积先随振动次数的增加逐渐增大,当振动次数超过1 000次后,其面积逐渐维持稳定。经复合固化改良后,淤泥土的初始动弹性模量有显著提高,且围压越高,动弹性模量越大,但在动力作用下变化显著,当应变超过1.0%后,固化土的动弹性模量与素土变化一致。

关键词:固化淤泥;动荷载;轴线累积应变;动应力-动应变曲线;动弹性模量

中图分类号:TU447 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-0062(2020)02-0062-07

Effect of Dynamic Action on Mechanical Properties of Composite Solidified Silt Soil

TIAN Zongkun, PENG Cheng*, TAN Yuqing

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: A dynamic triaxial UU test was performed on the solidified sludge using GDS dynamic triaxial instrument. Axial cumulative strain, dynamic strength, dynamic stress-dynamic strain hysteresis curve, and dynamic elastic modulus were studied. The results show that the cumulative axial strain of the solidified soil is distributed stepwise with the number of vibrations. When the axial stress is small, the axial strain of the solidified soil first increases with the number of vibrations and then stabilizes. And the higher the curing

收稿日期:2019-12-11

基金项目:湖南省教育厅项目(16C1380);水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目(YK319008)

作者简介:田宗坤(1996-),男,硕士研究生,主要从事环境岩土方面的研究。E-mail:tzk_96@163.com。*通信作者:彭成(1983-),男,讲师,博士,主要从事土石坝的数值模拟和本构模型方面的研究。E-mail:uscemonk@126.com

amount, the smaller the cumulative axial strain. The dynamic stress-strain curve of the solidified soil is strain hardened, and the sample undergoes dilatation failure. The larger the curing agent content, the steeper the stress-strain curve. The greater the amount of compound curing agent and the confining pressure, the smaller the area of the hysteresis loop, and the closer it is to the vertical axis. The area of the hysteresis loop gradually increases with the increase of the number of vibrations. When the number of vibrations exceeds 1 000 times, its area gradually maintains stability. After the composite curing improvement, the initial dynamic elastic modulus of the silt soil is significantly increased, and the higher the confining pressure is, the larger the dynamic elastic modulus is, but it decreases rapidly under dynamic loading. When the strain exceeds 1.0%, the dynamic elastic modulus of the solidified soil is consistent with that of the plain soil.

key words: solidified sludge; dynamic load; cumulative axial strain; dynamic stress-dynamic strain curve; dynamic elastic modulus

0 引言

随着我国环境整治工程的进一步推进,很多地区已经开始对河道和湖泊淤泥进行清理和处置,如武汉东湖清淤和杭州西湖治理等^[1-2]。河道治理过程中产生的大量疏浚淤泥会占用耕地,造成土地资源的浪费,只有将其资源化利用才能有效解决这一问题。目前,固化技术被广泛用于淤泥土的处置,既能有效解决淤泥的二次污染,又能为市政、道路和堤坝等工程项目提供填料。固化淤泥土受干湿循环、冻融作用和循环荷载等不良条件的影响,使其物理力学性能逐渐劣化,为工程项目带来安全隐患,从而限制其规模化应用^[3]。现阶段,固化淤泥土在道路工程中应用较为广泛,长时间承受循环荷载作用,所以研究研究复合固化土在动力荷载作用下的动力特性具有重要的意义。

目前国内外学者对软土和固化淤泥土在循环作用下的力学特性进行了研究,并取得了一些成果。曾向军等^[4]以洞庭湖区沉积软土为对象进行循环振动三轴试验,研究不同动应力幅值、振动频率和围压下湖相软土的动力特性。王启叶楠等^[5]采用 DDS-70 型动三轴试验系统和 GZZ-50 型共振柱试验系统,对不同配合比的淤泥海砂混合料进行动力特性试验研究,得出淤泥海砂混合料的动强度和最大动剪切模量。李普等^[6]基于地震荷载下水泥土桩复合地基的破坏机制,采用 GDS 动单剪仪对水泥土进行动力循环剪切试验,研究水泥掺入比与循环应力比对水泥土动变形、动强度以及软化特性的影响。王国林等^[7]探究固化河道疏浚淤泥在不同应力路径下的力学行

为,研究了常规单轴,常规三轴,定轴卸围压,卸围升轴 4 种不同应力路径下的强度及变形特征。刘增祥等^[8]利用室内动三轴实验研究了振动频率与龄期对河道淤泥气泡混合轻质土动力特性的影响。

现有的研究中,更多的是集中在固化剂的选择、固化机理和静力学特性的研究^[9-15]。因此,本文在现有研究基础上,利用水泥、石灰和粉煤灰等固化剂,对疏浚淤泥进行联合固化改良,设置动力试验,研究固化淤泥土在循环荷载作用下动力学参数的变化规律,为固化土在道路工程中的应用提供数据参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用淤泥取自湖南某河道底泥,其基本物理性质如表 1 所示。试验前采用堆载预压法将土样含水率降低至 50%,当含水量降至指定百分比后除去杂质备用。固化剂采用普通硅酸盐水泥、钙质石灰和二级粉煤灰。

表 1 疏浚淤泥土物理性质指标

Table 1 Physical parameters of dredged silt

含水率/%	密度 /(g · cm ⁻³)	相对密度	液限/%	塑限/%
111.4	1.45	2.54	45	23

1.2 试验设备

本试验采用英国研制生产的 GDS 振动三轴仪,主要由压力室、轴向加压设备、围压施加系统和计算机控制与分析系统所构成,具体如图 1 所

示。本实验根据土样粒径选择试样尺寸为 50 mm×100 mm,传感器型号为 2 Hz-2 kN,加载控制方式为应力加载控制。根据机械波频率范围,将循环荷载等效为单向正弦波,取振动频率为 $f=2$ Hz,加载波形如图 2 所示。

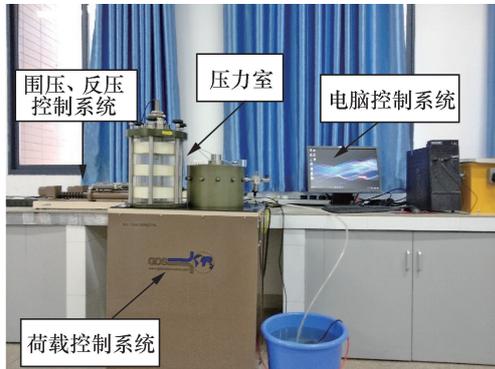


图 1 GDS 三轴仪控制系统

Fig. 1 GDS triaxial control system

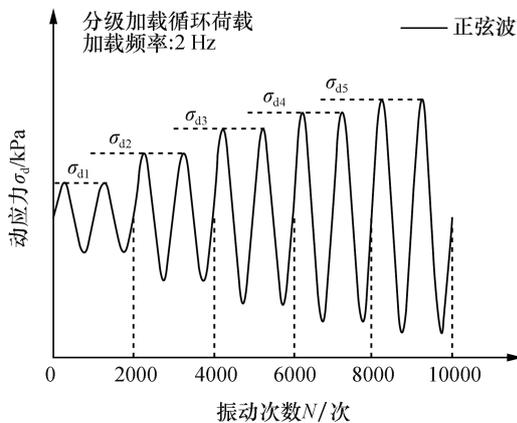


图 2 动力加载波形

Fig. 2 Dynamic loading waveform

1.3 试验方案

本文意在探究工业废渣粉煤灰对水泥-石灰固化土的物理力学性质进一步改善,通过固定水泥、石灰的掺量,测定粉煤灰掺量对淤泥改善效果,实现以废治废的目的。从固化淤泥土的研究中可以发现^[16-17],水泥掺量为 5%~10%,石灰掺量为 8%~12%时改良淤泥土的效果较好,适用性强,因此本文固定水泥掺量 6%和石灰掺量 9%,探究不同粉煤灰掺量下复合固化淤泥土的动力特性,固化剂混合料配合比如表 2 所示。

按表 2 掺量比配制混合料,通过砂浆搅拌机充分拌匀,以密度为控制标准将混合料分 3 层静压至直径为 50 mm,高为 100 mm 的三瓣模中静置

24 h 后脱模,脱模后用塑料保鲜膜将试样密封放置于标况下养护 28 d 进行动力加载试验。试验采用分级加载的方式探究不同掺量和围压对混合固化土的动力影响规律,具体方案如表 3 所示。每级荷载循环 2 000 次,测算动应力作用下应力-应变关系曲线、轴向累积应变、动弹性模量等参数。由于单次循环动荷载作用时间极短,饱和固化土中的空隙水来不及排出,故试验采取不固结不排水试验方式(UU 试验)。

表 2 固化土混合料配合比(质量比)

Table 2 Mixing ratio of solidified soil mixture (mass ratio) %

试样编号	淤泥干质量	水泥	石灰	粉煤灰
S1	100	0	0	0
S2	85	6	9	0
S3	80	6	9	5
S4	75	6	9	10
S5	70	6	9	15

表 3 动三轴 UU 试验方案

Table 3 Dynamic triaxial undrained shear test plan

试样编号	围压 /kPa	频率 /Hz	初始幅值 /kPa	轴向力增值 /kPa	加载数 /级	循环数 /次
S1	100	2.0	20	10	3	2 000
S2	100		60		5	2 000
S3	100		60	50、	5	2 000
S4-1	30		60	40、	5	2 000
S4-2	50		60	30、	5	2 000
S4-3	100	60	20、	5	2 000	
S4-4	200	60	10	5	2 000	
S5	100	60		5	2 000	

2 动荷载下轴向累积应变的分析

图 3 为不同固化剂掺量下试样轴向应变随振动次数和动应力幅值的变化规律。由图 3(a)可知,固化土轴向累积应变随加载等级呈阶梯型变化,总体呈上升趋势。在同一个加载级下,试样轴向应变随振动次数的增加而增大,其变化率逐渐降低,主要表现为前 500 次循环变化幅度明显,超过 500 次循环,轴向累积应变增长放缓,且固化剂掺量越高,试样的轴向应变越小。相比于固化土,素土的强度更低,两级加载后($\sigma_d=30$ kPa),试样便发生了变形破坏。说明试样在动力荷载作用初

期,会产生较大的形变,随着加载的持续,土颗粒逐渐被压实挤密,抵抗变形的能力增强,变形减小,且高掺量的固化土在制样时含水率更低,颗粒胶效果更好,静压越密实,所以在相同振动次数下,试样变形越小。由图 4(b)可看出,素土的动强度为 30 kPa,只有固化土的 1/6 左右;低应力水平,固化土的轴向累积应变较低,随着荷载等级的增加,试样的轴向累积应变逐渐加大,且固化剂掺量越大,变形越小。固化土整体性较好,颗粒间的胶结能力较强,未达到固化土极限状态之前,试样不会随振动次数的增加而产生变形破坏,能在一定荷载范围内维持稳定,不发生较大变形。

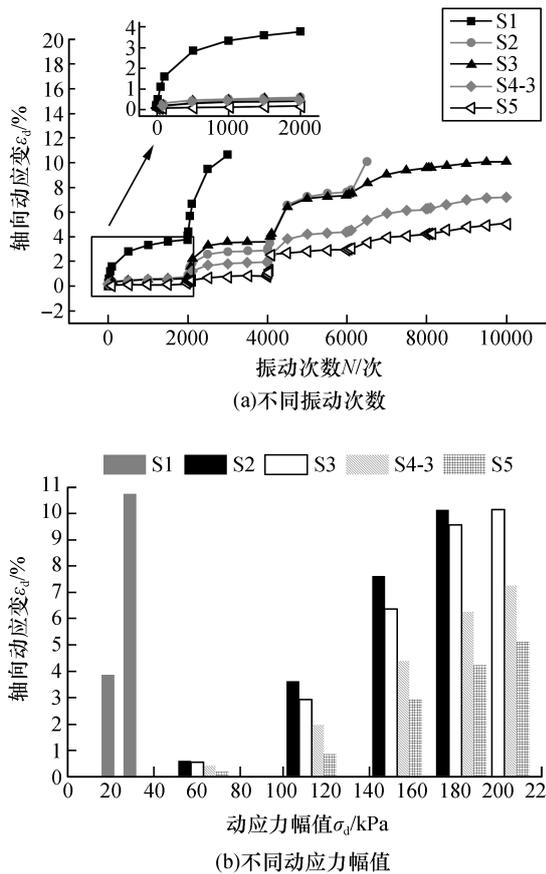


图 3 掺量对动应变的影响规律
Fig.3 Effect of dosage on dynamic strain

图 4 为试样在不同的围压下轴向累积应变随振动次数和动应力幅值的变化规律。由图 4(a)所示,试样的轴向累积应变随振动次数的增加而增大,围压越大,变形越小;低围压下轴向应变变化规律相同。这可能是因为围压越大,产生的径向压力阻止发生形变,固化土的侧向变形减小,在此过程中试样被挤压密实,轴向变形更小。由图

4(b)可看出,动应力幅值为 60 kPa 时,不同围压下的试样轴向应变相当,动应力幅值超过 110 kPa 时,试样的轴向应变受围压的影响显著。

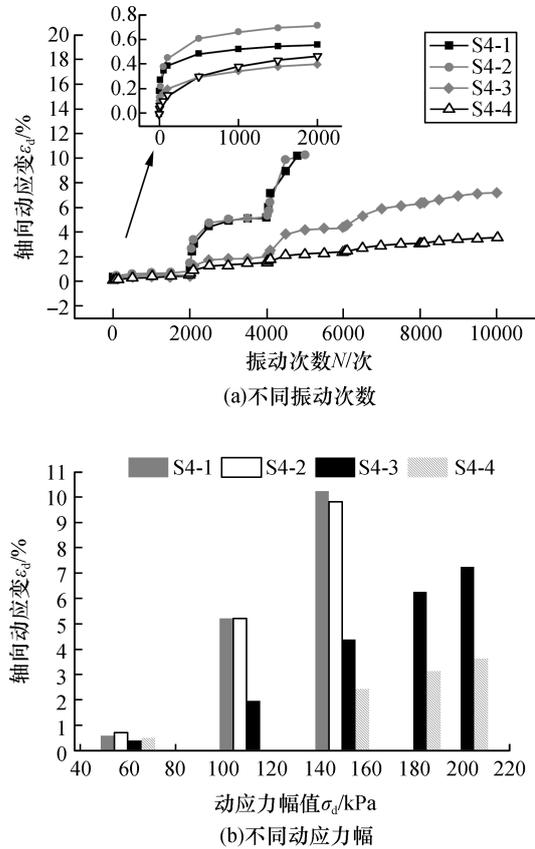


图 4 围压对动应变的影响规律
Fig.4 Effect of radial pressure on dynamic strain

3 固化土的动应力-动应变曲线

固化土的动应力-动应变曲线能较好的反应循环荷载作用下固化淤泥土的强度与变形特性,取每级加载第 2 000 个周期滞回圈为研究对象,连接滞回曲线顶点绘制动应力-动应变曲线,如图 5 所示。从图 5(a)可以看出不同固化剂掺量下固化土的动应力-动应变关系,素土的应力-应变关系变化平缓,应力幅值不变,应变急剧增加;固化改良土在应变低于 2% 时曲线趋势陡峭,动应力-动应变呈线性变化,继续提升动应力水平,轴向累计应变急剧增加,动应力-应变关系呈现明显的非线性,曲线一直处于上升阶段,展现应变硬化型破坏形态,且固化剂掺量越大,同一应变对应的动应力幅值越大,承受的荷载水平更大。这可能是因为混合固化剂会与淤泥土和水发生一系列水

化反应,降低淤泥土的含水量,粘结土颗粒并形成固化体,增强土体强度,在一定掺量范围内,掺量越高,固化效果越好。图4(b)为不同围压下试样的应力-应变曲线,由图4(b)可知,围压越大,试样的弹性变形区更大。因此,合理的选取固化土的填埋深度,能很好的应用于工程实际。

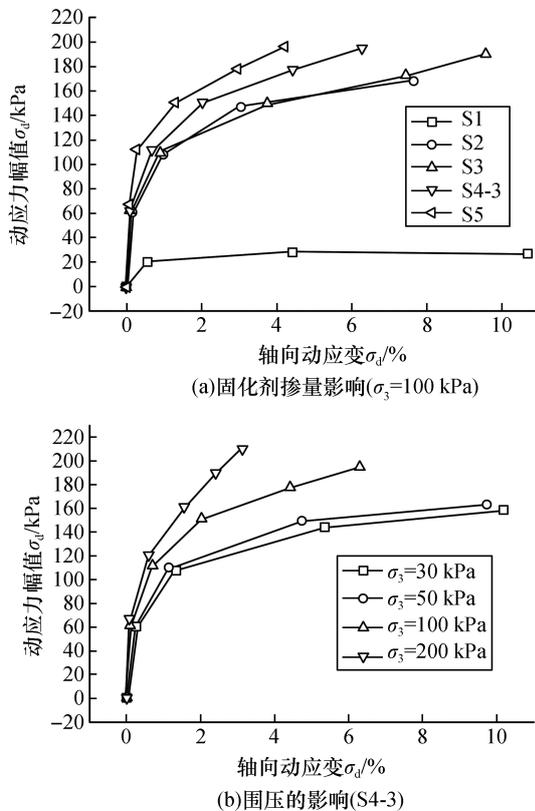


图5 动应力幅值与动应变的变化规律

Fig. 5 Variation law of dynamic stress amplitude and dynamic strain

为更好的观察固化剂掺量、动应力幅值、围压和振动次数对应力-应变关系演化的影响,分别取特定条件下的动应力-动应变滞回圈,如图6所示。复合固化剂掺量对试样滞回曲线有很大的影响,如图6(a)所示,掺量越低,滞回曲线的面积越大,塑性变形量越大,当固化剂掺量达到S5(水泥6%、石灰9%、粉煤灰15%)时,试样几乎呈弹性变形。从图6(b)可以看出动应力幅值越大,固化土的应力-应变滞回曲线的倾斜程度越大,轴线累积应变越大。由动应力-动应变关系的分析中可知该固化土属应变硬化型,随非线性(加载幅值之间的差值逐渐减小)增加动荷载,试样在前期循环加载逐渐趋于密实,试样抵抗荷载的能力有

所增加。围压对固化土的应力-应变滞回圈的影响明显,如图6(c)所示,滞回圈的面积随围压的增加而减小,当围压 $\sigma_3=200$ kPa时,滞回圈近乎重合,围压越大,滞回圈的位置越靠近竖轴,轴向累积应变越小。从图6(d)可知,滞回圈的面积随着振动次数的增加而增大,前500次循环的变化明显,当振动次数超过1000次,滞回圈的形状几乎保持不变,试样的变形趋于稳定。可能是因为淤泥含有大量黏粒,加之有复合固化剂的胶结作用,在循环荷载作用下,土体逐渐被挤密压实,一定振动次数过后,土体变不会继续发生形变。

4 固化土动弹性模量的变化规律

根据GDS动三轴试验所得动应力-动应变滞回曲线可计算各等级的动弹性模量,取每级荷载3~7次循环应力的动弹性模量的平均值和应变作为该级荷载的动弹性模量和动应变。

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} \quad (1)$$

图7为不同混合固化剂掺量下动弹性模量与动应变的关系曲线。由图7可知,固化剂掺量对固化土的初始弹性模量影响较大,素土的动弹性模量在4 MPa左右,随着固化剂掺量加大,初始动弹性模量也逐渐增加,最大可至100 MPa,随着动应变的增加,动弹性模量逐渐降低,其变化率逐渐减小,最终动弹性模量趋于稳定,主要表现在动应变 $\varepsilon_d < 0.5\%$ 时变化显著,之后逐渐平缓。主要可能是因为固化剂掺量越高,固化土中的水化产物含量越高,试样越密实,使土颗粒间胶结力增强,同时固化体结构能一定程度抵抗变形,当荷载等级增加后,试样的固化体结构被破坏,弹性变形减小,塑性变形增加,引起动弹性模量降低。

图8为不同围压下固化土动弹性模量与动应变的关系曲线。由图8可知,当动应变 ε_d 小于1.0%时,围压对动弹性模量的影响显著,围压越大,动弹性模量越大,动应变超过1.0%后,固化土的动弹性模量的变化趋势和变化值均相当。这可能是因为高围压下,土体颗粒不断被压实挤密,土体凭借固化体结构及其咬合力抑制土颗粒发生形变,小应变所承受的荷载水平也相对较低,固化土尚未破坏;当荷载等级的提升,固化体结构产生裂痕,之间的粘结力趋于零,进入塑性变形阶段,不同围压下的情况一致,便出现大应变下动弹性模量与动应变规律一致的情况。

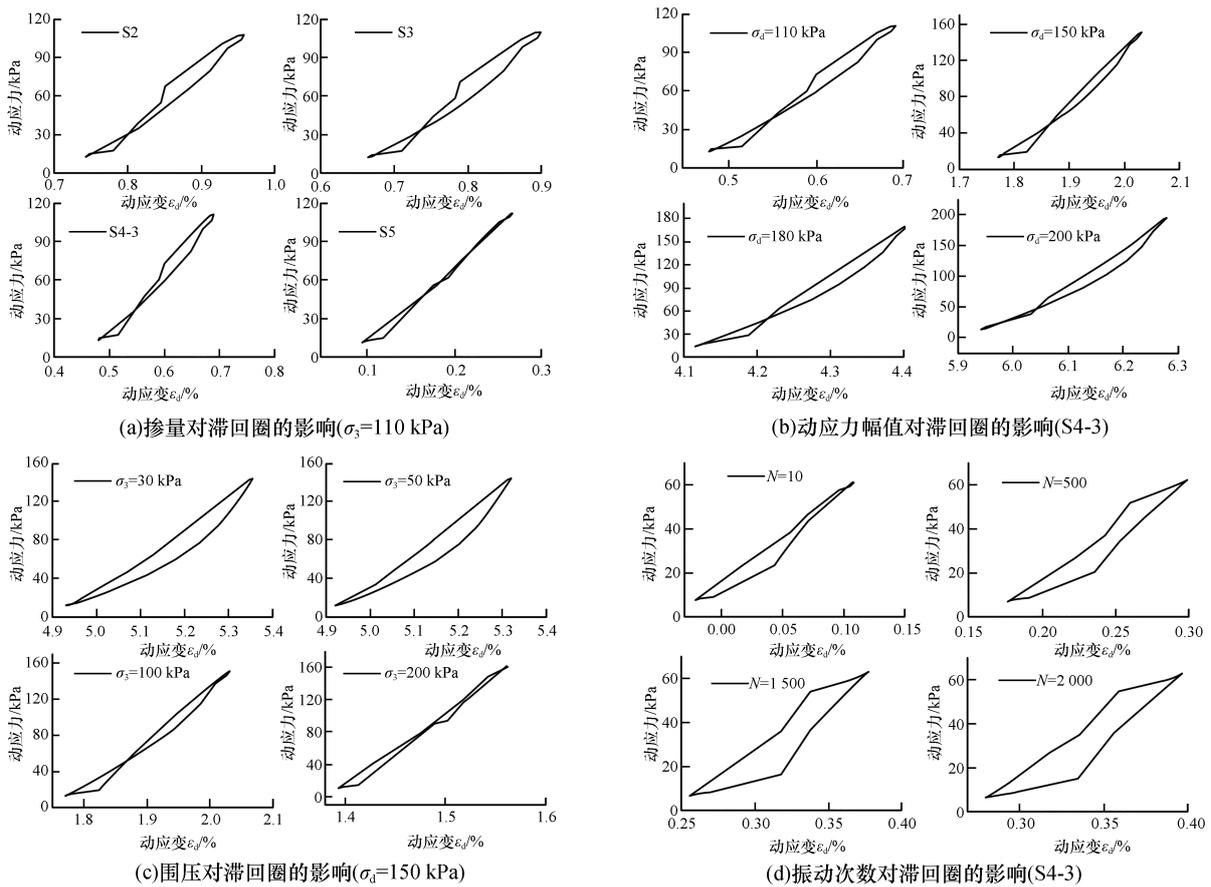


图 6 应力-应变滞回圈变化规律

Fig. 6 Change law of stress-strain hysteresis loop

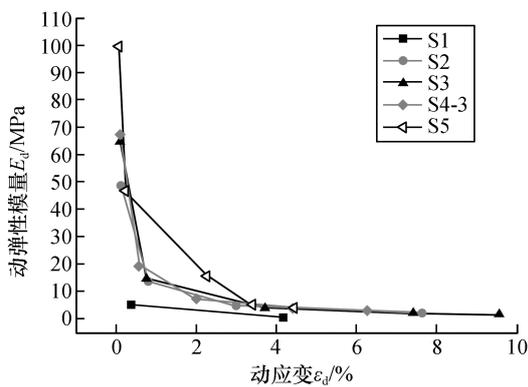


图 7 掺量对动弹性模量的影响

Fig. 7 Effect of dosage on dynamic elastic modulus

5 结论

通过对不同掺量的混合固化疏浚淤泥土进行 GDS 动力三轴试验,分析固化剂掺量、动应力幅值、围压和振动次数等因素对土体变形、动应力-动应变滞回曲线和弹性模量的影响,得出以下主要结论。

1) 固化土轴向累积应变随振动次数和动应

力幅值的增加而增大,应力水平较低时,振动次数超过 500 次后,轴向应变基本维持不变;当轴向应力超过 140 kPa,动应变随振动次数持续增长。固化剂掺量和围压对轴向累积应变影响显著,复合固化剂掺量和围压越高,轴向应变越小。

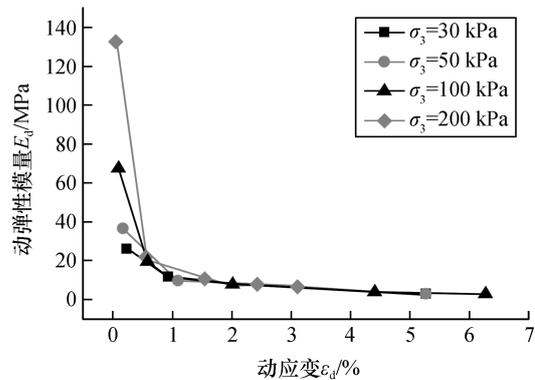


图 8 围压对动弹性模量的影响

Fig. 8 Effect of confining pressure on dynamic elastic modulus

2) 固化改良土的动应力-动应曲线呈应变硬

化型,固化剂掺量越高,相同应变承受的荷载越大。

3) 固化淤泥土应力-应变滞回曲线受多种因素影响,一定应力范围内,增加混合固化剂掺量和围压,能降低滞回曲线的面积;相同应力状态下,高掺量与高围压能使滞回圈距竖轴的距离越近。动应力幅值低于 140 kPa,动应力-动应变滞回曲线随振动次数的增加而逐渐增大,当振动次数超过 1 000 次,基本维持不变。

4) 固化剂掺量和围压都能显著影响改良土的初始动弹性模量,初始动弹性模量随固化剂掺量和围压的增加而加大。掺量为 S5 时,动弹性模量达到 100 MPa,比素土提高了近 25 倍;动应变 ε_d 超过 1.0%,不同条件下固化土的动弹性模量变化趋势一致。

参考文献:

- [1] 朱广伟,李静,朱梦圆,等. 锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果[J]. 环境科学,2017,38(4):1451-1459.
- [2] 程福周,雷学文,孟庆山,等. 水泥及其外加剂固化淤泥的试验研究[J]. 建筑科学,2014,30(9):51-55.
- [3] WANG L, KWOK J S H, TSANG D C W, et al. Mixture design and treatment methods for recycling contaminated sediment[J]. Journal of hazardous materials, 2015, 283(10):623-632.
- [4] 曾向军,邓宗伟,高乾丰,等. 循环荷载下湖相软土动力特性研究[J]. 工业建筑,2015,45(3):109-114.
- [5] 王启叶楠,丰土根,宋健,等. 淤泥海砂混合料动力特性试验研究[J]. 水运工程,2017,2017(10):96-100.
- [6] 李普,樊恒辉,史祥,等. 地震荷载下水泥土循环剪切特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):4227-4234.
- [7] 王国林,周雷,余能海. 不同应力路径下固化河道疏浚淤泥力学特性探究[J]. 水利规划与设计,2017,11(11):135-137;173.
- [8] 刘增祥,顾欢达,章培培,等. 振动频率与龄期对河道淤泥气泡混合轻质土动力特性影响及机理[J]. 环境工程学报,2017,11(2):1153-1158.
- [9] JONGPRADIST P, JUMLONGRACH N, YOUWAI S, et al. Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content[J]. Journal of materials in civil engineering, 2010, 22(1):49-58.
- [10] 张赟. 固化土的力学性质及微观结构[D]. 天津:天津大学,2014:15-21.
- [11] 丁建文,张帅,洪振舜,等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9):2817-2822.
- [12] 王东星,徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12):3659-3664.
- [13] 邢伟,王东星. 石灰改性淤泥的抗压和抗剪强度试验研究[J]. 人民长江, 2016, 47(24):84-87;97.
- [14] 朱伟,张春雷,高玉峰,等. 海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(10):1561-1565.
- [15] 杨瑞敏,刘铁平,曹玉鹏,等. 高含水率疏浚淤泥固化土的抗压试验与强度预测[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2):55-60.
- [16] 畅帅,徐日庆,李雪刚,等. 基于响应面法的淤泥质土固化配方优化研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1):105-110.
- [17] 黄英豪,朱伟,周宣兆,等. 固化淤泥压缩特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10):2923-2928.

(责任编辑:周泉)