

[文章编号] 1003—4684(2023)04-0101-04

# EPS 颗粒粒径对水泥土静动弹性模量影响试验研究

耿凯旋, 庄心善, 周睦凯, 周 荣

(湖北工业大学土木建筑与环境学院 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 以大冶黏土为研究对象,将 EPS 颗粒掺入水泥黏土中分别进行静三轴与动三轴试验,研究在不同围压与 EPS 颗粒粒径的条件下,改良土体的静、动弹性模量变化规律。试验结果表明:在围压相同、EPS 颗粒粒径不同条件下,随着 EPS 颗粒粒径的增大,其静、动弹性模量逐渐减小;在 EPS 颗粒粒径相同、围压不同条件下,随着围压的增大,其静、动弹性模量逐渐增大;在围压和 EPS 颗粒粒径都相同的条件下,静弹性模量与动弹性模量变化趋势均一致。该试验结果可为相关工程提供参考依据。

[关键词] 土力学; EPS 水泥黏土; 静弹性模量; 动弹性模量; 动三轴试验

[中图分类号] TU411 [文献标识码] A

EPS 水泥轻质土属于混合轻质土的一种,通过掺加 EPS 颗粒来达到减重的目的,通过掺加水泥来增强其黏聚力。当前,相关领域学者对 EPS 水泥轻质土的力学特性进行了大量试验研究。高玉峰等<sup>[1]</sup>选用 EPS 颗粒与水泥掺入黏土中,得到了水泥含量和围压对动强度的变化规律;谢书萌等<sup>[2]</sup>采用静三轴试验研究 EPS 粒径对轻量土的变形强度特性的影响;梅利芳<sup>[3]</sup>研究了 EPS 颗粒掺量对轻质土力学性能的影响,研究表明:当 EPS 掺量增加到 4% 及以上时,密度减少幅度变缓,而且 EPS 颗粒过多会导致颗粒之间粘结不够。冯志密等<sup>[4]</sup>通过改变 EPS 颗粒的掺量及温度条件,发现了 EPS 轻质土强度特性的变化规律。庄心善等<sup>[5]</sup>选用磷尾矿与 EPS 复合掺入膨胀土中,得出轻质土的强度及膨胀性的变化规律。王静等<sup>[6]</sup>通过三轴试验,研究了围压、冻融循环次数对季冻区路基土静、动弹性模量的影响规律;申雁鹏<sup>[7]</sup>研究了火灾环境下对混凝土动、静弹性模量的影响。游林阳<sup>[8]</sup>对原淤泥质土试样进行了一系列常规土工试验和静、动三轴试验,得到了该土体的静动力参数变化规律;王桂萱等<sup>[9]</sup>研究了我国东南沿海核电海工工程地基土的静动力特性规律。

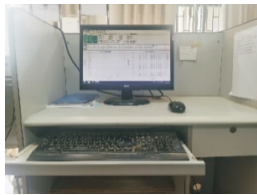
综上所述,尽管许多学者对 EPS 水泥轻质土的强度特性做了大量研究,但是对于 EPS 水泥轻质土的静动参数研究较少。目前土的动力试验仪器操作复杂,数据处理相对土的静力试验困难,因此研究 EPS 掺入对水泥黏土的静动弹性模量影响非常有

工程意义。

## 1 土样制备及试验方案

### 1.1 试验仪器

静三轴试验采用全自动三轴仪,如图 1 所示,该仪器可分别进行土体的标准饱和、固结及标准三轴试验,本次试验由该仪器标准三轴测试模块对试样进行加载。



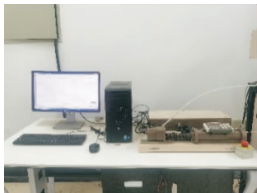
(a) 电子操控台



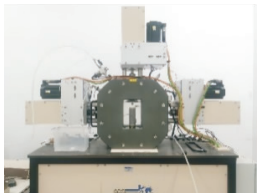
(b) 全自动三轴仪

图 1 全自动三轴仪

动三轴试验采用 GDS 真/动三轴仪,如图 2 所示,该仪器可通过设置正弦波频率模拟土体在受到地震作用下的变形环境,第一个水平方向最大能达到 5 Hz,第二个水平方向最大能达到 10 Hz。



(a) 电子操控台



(b) GDS 真三轴仪

图 2 GDS 真三轴仪

[收稿日期] 2021-12-13

[第一作者] 耿凯旋(1996—),男,湖北黄冈人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土工程。

[通信作者] 庄心善(1964—),男,河南周口人,湖北工业大学教授,研究方向为岩土工程及边坡工程。

1.2 试验材料

1.2.1 黏土 黏土取自湖北省黄石市大冶市某施工段深挖土层,为次生黏土,色深且耐火度较低。通过击实试验可得,其最优含水率为 20%,最大干密度为 1.8 g/cm<sup>3</sup>,其物理力学指标见表 1。

表 1 黏土物理力学指标	
天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.6
比重/d	2.7
塑限 W <sub>P</sub> /%	19.45
液限 W <sub>L</sub> /%	39.44
塑性指数/I <sub>p</sub>	19.99

1.2.2 EPS 颗粒 聚苯乙烯(EPS)颗粒取自湖北某化工厂,压实密度最大分别可达 0.060 g/cm<sup>3</sup>、0.050 g/cm<sup>3</sup>、0.035 g/cm<sup>3</sup>,如表 2 所示。

表 2 EPS 物理参数			
	堆积密度	纯颗粒密度	压实密度
0.5~1 mm	0.030	0.044	0.060
1~2 mm	0.026	0.038	0.050
2~3 mm	0.017	0.026	0.035

1.2.3 水泥 本次试验水泥采用普通硅酸盐水泥,其强度等级为 C32.5。

1.3 试样制备及试验方案

将黏土磨碎过筛后,用干燥箱持续烘干 24 h。在保持该干密度条件下,掺入占干土质量 5% 的水泥粉末,占干土质量 4% 的 EPS 颗粒,水总质量为满足干土达到最优含水率和水灰比 0.44 两部分之和。用分层击实法,分 5 层均匀压实,分别制作直径为 39.1 mm、高度为 80 mm 和直径为 50 mm、高度为 100 mm 的 EPS 改良土样,在标准养护箱中分阶段进行养护,第一阶段带模具养护 24 h,第二阶段脱模养护至预定龄期结束。取养护后试样抽真空饱和后,注水浸泡 24 h 进行静、动三轴试验。静三轴试验在剪切速率为 0.05 mm/min 的条件下进行;动三轴试验设定 1 Hz 的正弦波进行单级加载,将水中浸泡 24 h 后的试样装入动三轴仪内进行反压饱和,在 50 kPa、100 kPa、150 kPa 围压的条件下,进行动力试验。试验方案见表 3,静、动三轴试样各 9 个。

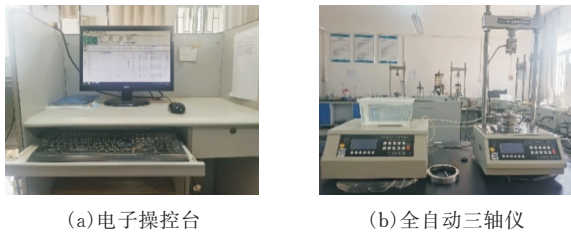


图 3 试验试样

表 3 试验方案

水泥掺入量/%	养护龄期/d	EPS 掺入量/%	EPS 颗粒粒径/mm	围压/kPa
5	14	4	0.5—1	50
5	14	4	0.5—1	100
5	14	4	0.5—1	150
5	14	4	1—2	50
5	14	4	1—2	100
5	14	4	1—2	150
5	14	4	2—3	50
5	14	4	2—3	100
5	14	4	2—3	150

2 试验结果与分析

2.1 静弹性模量变化规律

由试验数据得,在小应变范围内,应力—应变曲线可看作线性变化,取近似线性阶段的曲线拟合,所得的直线斜率为静弹性模量,如图 4 所示。

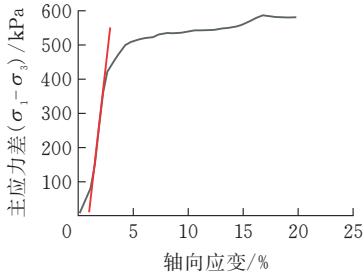
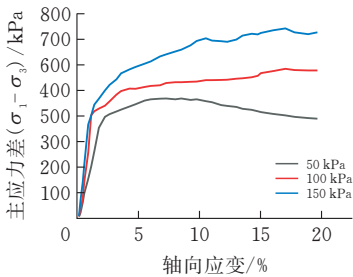
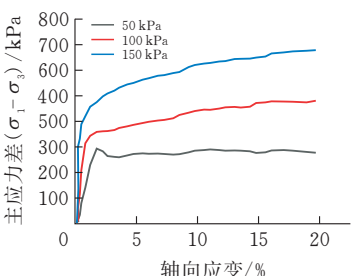


图 4 静弹性模量取值示意图

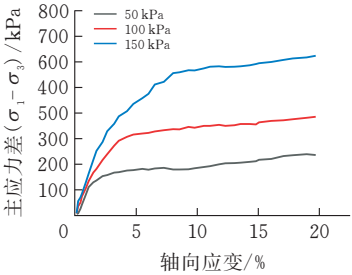
由图 5 可得知在不同围压影响下的主应力差与轴向应变之间的关系,随着主应力差的增大,表现为应力—应变关系线性变化阶段越持久,即弹性变形越大。



(a) EPS 颗粒粒径为 0.5~1 mm



(b) EPS 颗粒粒径为 1~2 mm



(c) EPS 颗粒粒径为 2~3 mm

图 5 不同围压影响下的静三轴试验结果

从图 6 可以看出,在围压为 150 kPa、颗粒粒径为 2~3 mm 时,静弹性模量达到 11 MPa;在围压为 150 kPa、颗粒粒径为 1~2 mm 时,静弹性模量达到 29 MPa;在围压为 150 kPa、颗粒粒径为 0.5~1 mm 时,静弹性模量达到 47 MPa。

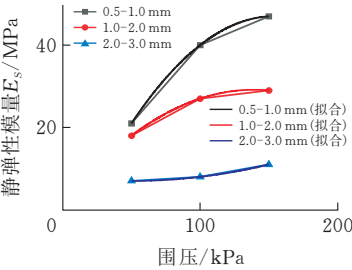


图 6 不同围压影响下的静弹性模量

2.2 动弹性模量变化规律

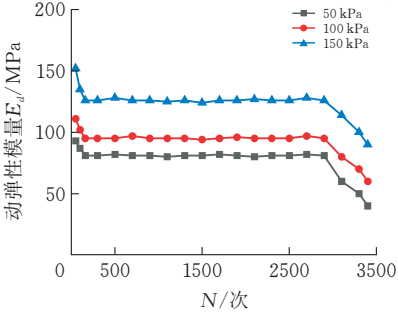
由于 EPS 水泥轻质土在施加循环荷载产生的变形过程中出现了应变回弹,因此产生滞后现象,可以得到滞回曲线:

$$E_d = \frac{\sigma_B - \sigma_A}{\varepsilon_B - \varepsilon_A}$$

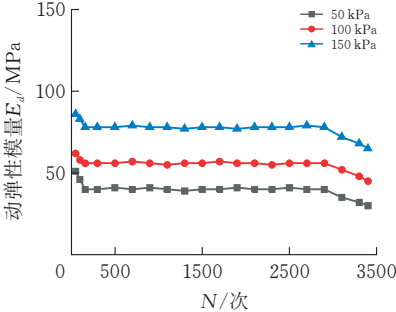
式中:  $\sigma_B$  与  $\sigma_A$  的差值表示一个滞回曲线中最大与最小动应力之差;  $\varepsilon_B$  与  $\varepsilon_A$  的差值表示一个滞回曲线中最大与最小动应变之差。

动弹性模量第一阶段出现下降趋势,约在 200 次循环荷载作用后达到第二阶段,该阶段动弹性模量趋于稳定。约在 3000 次循环荷载作用下达到第三阶段,试样开始出现特征性破坏,动弹性模量出现急剧下降。

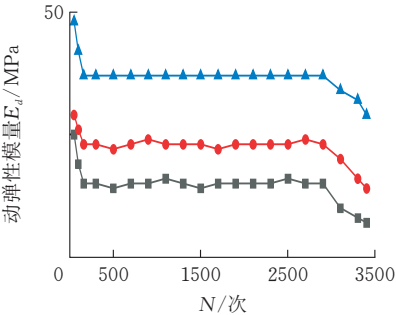
由图 7 可得,动弹性模量随着围压和 EPS 颗粒粒径的变化趋势同静弹性模量变化趋势保持一致。



(a) EPS 颗粒粒径为 0.5~1 mm



(b) EPS 颗粒粒径为 1~2 mm



(c) EPS 颗粒粒径为 2~3 mm

图 7 不同围压影响下的动三轴试验结果

从图 8 可以得出,在围压为 50 kPa、颗粒粒径为 0.5~1 mm 时,动弹性模量达到 81 MPa;在围压为 50 kPa、颗粒粒径为 1~2 mm 时,动弹性模量达到 40 MPa;在围压为 50 kPa、颗粒粒径为 2~3 mm 时,动弹性模量达到 15 MPa。

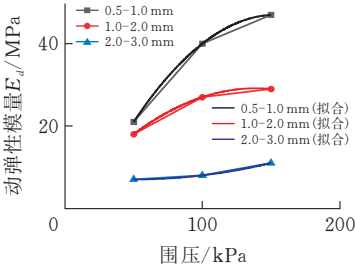


图 8 不同围压影响下的动弹性模量

3 静动弹性模量关系

通过对以上试验结果的研究我们可以得出:保持 EPS 颗粒粒径不变时,静、动弹性模量随着围压的增加而变大;保持围压不变时,静、动弹性模量随着 EPS 颗粒粒径的增加而变小。

虽然静、动弹性模量变化呈一定程度的正相关,但是数值上仍然存在差别,动弹性模量始终高于静弹性模量;首先是因为静、动三轴试验分别处于不同的应力-应变条件下,静三轴试验应力-应变较小,动三轴试验应力-应变较大,根据定义我们可以得知,弹性模量为切应力与切应变的比值;其次是加载方式的不同,进行动三轴试验时试样在循环荷载的作用下,致使结构内部的 EPS 颗粒与孔隙不断被压

实,试样变得更加密实,而静三轴试验时试样的密实程度达不到与动三轴试验时一样;另外在循环荷载作用下,土体前期主要以弹性变形为主,塑性变形为辅,当进行静三轴试验时,土体始终是塑性变形。因此,动弹性模量在数值上总是大于静弹性模量。

4 结 论

控制围压和 EPS 颗粒粒径为变量分别进行了静、动三轴试验,得出围压、EPS 颗粒粒径对 EPS 水泥轻质土静弹性模量和动弹性模量的影响,以及静、动弹性模量之间的关系。试验结论如下:

1)围压的增大及 EPS 颗粒粒径的减小都会使重塑土体内部分子联接更加紧密,从而提升其键合强度,进一步提高 EPS 水泥轻质土的静、动弹性模量,宏观表现为围压最大、EPS 颗粒粒径最小时静、动弹性模量达到最大值。

2)随着围压的增大,相同 EPS 颗粒粒径的 EPS 水泥轻质土静、动弹性模量逐渐增大。

3)在围压保持一定时,EPS 水泥轻质土的静、动弹性模量随 EPS 颗粒粒径的增大而逐渐减小。EPS 水泥轻质土的静、动弹性模量随着围压与 EPS 颗粒粒径变化的趋势完全一致,验证了相同土体的静、动弹性模量并没有本质上的区别,只是在不同加载条件下的力学性质表现。

4)由于静、动三轴试验加载方式的不同,土体内部结构出现不同的变形方式,故动弹性模量宏观上

表现高于静弹性模量。

5)通过对 EPS 水泥轻质土的静动弹性模量的整理与分析,为该土体静、动弹性模量的转换提供了理论基础,以便完成静动参数的转换计算。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 高玉峰,黎冰,黏土与 EPS 颗粒混合轻质土的动强度特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增2):4277-4283.

[2] 谢书萌,徐光黎,叶三霞,等.不同 EPS 颗粒粒径下轻量子变形强度特性三轴试验研究[J].水电能源科学,2013,31(2):138-141.

[3] 梅利芳.纤维 EPS 颗粒轻质土物理力学特性研究[D].武汉:中国地质大学,2017.

[4] 冯志密,李兆宇,苏双双,等.负温条件下 EPS 轻质土强度特性试验研究[J].水利科学与寒区工程,2021,4(03):10-14.

[5] 庄心善,杨文博,王康,等.磷尾矿-EPS 改性轻质土膨胀性及强度试验研究[J].人民黄河,2020,42(06):140-147.

[6] 王静,吕祥,张云龙,等.季冻区路基土静动弹性模量关系研究[J].公路交通科技,2016,33(9):26-29.

[7] 申雁鹏.火灾环境下桥梁混凝土动、静弹性模量试验研究[J].公路工程,2021,46(2):229-233.

[8] 游林阳.广州南沙淤泥质土及其固化土静动力特性试验研究[D].广州大学,2020.

[9] 王桂萱,张虎韦,赵杰.我国东南沿海核电海工工程地基土静动力特性规律研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(05):26-31.

Experimental Study on Effect of EPS Particle Size on Static and Dynamic Elastic Modulus of Cement-soil

GEN Kaixuan, ZHUANG Xinshan, ZHOU Mukai, ZHOU Rong

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment , Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China )

**Abstract:** Taking Daye clay as the research object, the static triaxial and dynamic triaxial tests were carried out by mixing EPS particles into cement clay, respectively, to study the changes of static and dynamic elastic modulus of improved soil under different confining pressures and EPS particle sizes. The experimental results show that under the same confining pressure and different particle sizes of EPS, the static and dynamic elastic moduli of EPS decrease gradually with the increase of particle sizes of EPS. Under the conditions of the same particle size and different confining pressures, the static and dynamic elastic moduli of EPS increase gradually with the increase of confining pressures. Under the condition of the same confining pressure and EPS particle size, the static elastic modulus and dynamic elastic modulus change trend are consistent. The test results can provide reference for related projects.

**Keywords:** soil mechanics; EPS cement clay; static elastic modulus; dynamic modulus of elasticity; dynamic triaxial test

[责任编辑:裴 琴]