

[文章编号] 1003-4684(2023)05-0095-05

# EPS 颗粒改良膨胀土强度试验研究

赵奕杨, 庄心善, 聂去尘, 文 武

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘 要]** 选取湖北某边坡工程膨胀土为试验对象, 在保持最大干密度和最优含水率的条件下, 通过全自动三轴仪对不同掺量的 EPS 颗粒改良膨胀土进行三轴试验, 探究了不同掺量的 EPS 颗粒与膨胀土抗剪强度间的关系。结果表明: 土样主应力差值先快速增加后缓慢增加达到峰值后下降并稳定; 素土样峰值强度最大; 随着 EPS 颗粒掺量增加, 土样的强度、黏聚力和内摩擦角都有变小的趋势; 当掺量超过 10% 时, 改良膨胀土的强度变化不明显; 对比黏聚力、内摩擦角和掺量关系曲线表明黏聚力变化比内摩擦角更明显, 说明黏聚力受掺量变化影响较大; 通过拟合可得到黏聚力、内摩擦角与掺量的关系式。

**[关键词]** EPS 颗粒; 膨胀土; 三轴试验; 抗剪强度

**[中图分类号]** TU 411 **[文献标识码]** A

膨胀土是一种主要由蒙脱石、伊利石等亲水性矿物构成的特殊高塑性黏土, 在干湿交替的环境下会发生胀缩变形, 引起公路、边坡等构筑物基础发生不均匀形变, 对工程建设危害极大, 因此对膨胀土进行改良刻不容缓。土性改良法是膨胀土地区地基处理的主要方法之一。由于成本低、较便捷等优点, 改良法在工程中受到广泛应用,

土性改良法分为生物改良、化学改良和物理改良。陈永青等<sup>[1]</sup>研究不同生物酶掺量下改良土力学性能以及屈服面形状变化规律, 发现生物酶对膨胀土力学性能改善效果明显, 并且土体本构关系可以由修正殷宗泽模型进行描述; 梁埔源等<sup>[2]</sup>研究了 NaCl 溶液浓度对膨胀土强度指标的影响, 发现 NaCl 溶液会降低土样的黏聚力和内摩擦角以及液限、塑限指数; 庄心善等<sup>[3]</sup>通过掺入不同质量比的磷尾矿改良膨胀土, 并进行室内试验得到磷尾矿掺量和膨胀土强度的关系, 从而确定其最佳掺量; 孙孝海等<sup>[4]</sup>采用工业碱渣水泥改良膨胀土, 显著提高膨胀土各项强度指标, 并确定工业碱渣和水泥的最佳掺量。其中物理改良法是用性质较稳定的非膨胀物质替换膨胀土颗粒以改变土的颗粒级配和结构, 膨胀土的固有性质不发生改变。如王欢等<sup>[5]</sup>开展大量的室内试验并进行数值模拟分析, 研究了粉砂土改良弱膨胀土的物理力学性质, 根据实验结果, 提出粉砂土掺量的最优值; 鄢黎明<sup>[6]</sup>通过粉煤灰对膨胀土

进行改良, 试验结果表明膨胀土的膨胀特性可以通过掺入粉煤灰得到有效抑制, 且膨胀土强度改良与养护龄期和掺量都相关; 邓友生等<sup>[7]</sup>使用聚丙烯纤维改良膨胀土, 有效增强了膨胀土的强度; 雷胜友等<sup>[8]</sup>采用了固化液改良膨胀土方法, 发现固化液膨胀土性质优于膨胀土, 浸水后强度改善效果显著; 刘宇翼<sup>[9]</sup>等通过将不同配比 EPS 颗粒与不同膨胀潜势膨胀土制成的混合料分别进行无荷和有荷膨胀率试验, 并设置纯膨胀土作为对照组, 结果发现 EPS 颗粒可以显著改良膨胀土的膨胀性, 考虑其改良效益, 得出不同膨胀潜势膨胀土的最优掺量。

在工程中 EPS 颗粒常被用来改善地基土膨胀特性问题。虽然 EPS 颗粒对膨胀性有改良作用<sup>[9]</sup>, 但也应关注其对强度的降低效应。其次, 由于 EPS 具有质轻、压缩性高、稳定性好、耐久性长、吸湿性低、隔热保温效果好等优点, 是一种理想的膨胀土改良材料。且相对化学生物等其他方式更符合环保要求, 而目前关于 EPS 颗粒改良膨胀土强度的研究鲜有报道, 因此本文对不同掺量下 EPS 颗粒改良膨胀土的强度变化研究有重要工程意义。

## 1 试验材料

### 1.1 膨胀土

本试验采用的土样为湖北某边坡的膨胀土, 呈棕色, 自由膨胀率为 44%, 依据膨胀潜势分级, 属于

[收稿日期] 2022-01-05

[基金项目] 国家自然科学基金 (51708190)

[第一作者] 赵奕杨 (1995-), 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。

弱膨胀土。主要成分是蒙脱石、伊利石和些许高岭土,其基本物理力学指标见表 1。

表 1 膨胀土物理力学指标						%
天然含	自由膨	液限	塑限	粒组含量/mm		
水率	胀率	$W_L$	$W_P$	$<0.005$	$<0.002$	
21.64	44	72	30	33.6	21.6	

1.2 EPS 颗粒(聚苯乙烯泡沫颗粒)

EPS 颗粒来源于浙江某泡沫生产厂家,颗粒粒径为 1~2 mm<sup>[10]</sup>,纯颗粒密度为 0.035 g/cm,压实密度为 0.05 g/cm<sup>3</sup>(图 1)。



图 1 聚苯乙烯泡沫颗粒

2 试验方案

参照《土工试验方法标准》通过击实试验测得膨胀土的最大干密度为 1.7 g/cm<sup>3</sup>,最优含水率为 17%。

制作 EPS 改良膨胀土土样有按照体积比或者质量比掺入这两种方法,为了确保所制备的土样相对均一,且不同配比的膨胀土样之间可以进行对照,试验选用体积比。为探究不同条件下 EPS 颗粒改良膨胀土土体强度的变化规律,对不同掺量及围压的 EPS 颗粒改良膨胀土进行固结不排水三轴试验。试验开始前,先将未处理的膨胀土用碎土机捣碎,通过 2 mm 孔径筛进行筛选,再放入烘箱,设置温度 105 ℃,烘烤 24 h 后取出,待其在环境温度下冷却后封袋存放于阴凉处。

将膨胀土按照最大干密度和最优含水率分四组掺入体积比 0、5%、10%、15% 的 EPS 颗粒,通过制样器和击实器制作直径 39.1 mm,高度 80 mm 的 EPS 改良土样,制备时分 4 层进行压实,然后进行刮毛处理。完成制备工作后,将试样放入真空饱和器中进行抽气饱和,饱和完毕即可放入 TSZ-2 型全自动三轴仪进行固结不排水试验。若试验过程中出现试样软化现象,峰值强度取曲线最高点,试样出现硬化现象,则峰值强度取轴线应变为 15% 的点。为模拟不同地基深度环境下土体受压状态,分别选取 50 kPa、100 kPa、150 kPa 作为试验围压,剪切速率为 0.05 mm/min,实验方案见表 2。

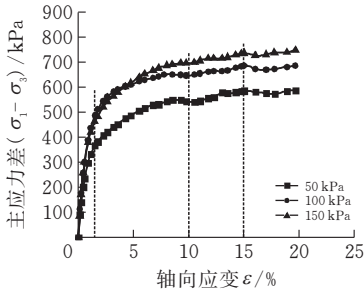
表 2 试验方案

组别	EPS 掺量/%	围压/kPa
1	0	50、100、150
2	5	50、100、150
3	10	50、100、150
4	15	50、100、150

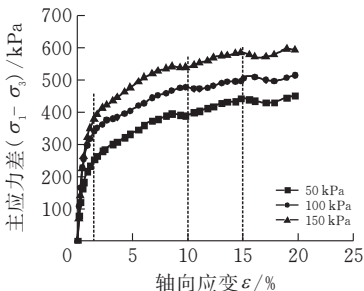
3 三轴试验结果与分析

3.1 应力-应变关系曲线

由图 2 可知,在掺量不变时,随着围压增加土样的应力-应变关系曲线逐渐上移,这是因为土样受围压作用变得更加密实,不易发生侧向形变,土样强度增加。当围压为 150 kPa 时,体积掺量为 0、5%、10%、15% 的改良土样的峰值强度最大,依次为:735.9 kPa、584.4 kPa、431 kPa、412.7 kPa 呈明显降低趋势,表明 EPS 颗粒的掺入降低了土样的强度。分析应力-应变关系曲线易知,土样变形经历以下阶段:微裂缝压密阶段,当轴向应变  $\epsilon$  小于 1.5% 时主应力差值上升迅速且斜率为常数,即表现为线性关系,从微观分析这是由于土样内部的空腔和微小缝隙在轴向压力作用下密实从而导致单位应变的主应力差值快速升高;弹塑性变形阶段,当轴向应变  $\epsilon$  处于 1.5% 至 10% 这个区间时,应力-应变曲线斜率逐渐减小,在轴向应变  $\epsilon$  处于 10% 处,曲线短暂下降;然后是强化阶段,当轴向应变  $\epsilon$  处于 10% 至 15% 这个区间时,强度继续上升,这是因为土样内部裂缝闭合且未产生新的裂缝;破坏阶段,当轴向应变  $\epsilon$  处于 15% 时,应力-应变曲线达到最大值后迅速下降,此时曲线斜率为 0,土样强度为峰值



(a)素土



(b)5% 体积掺量

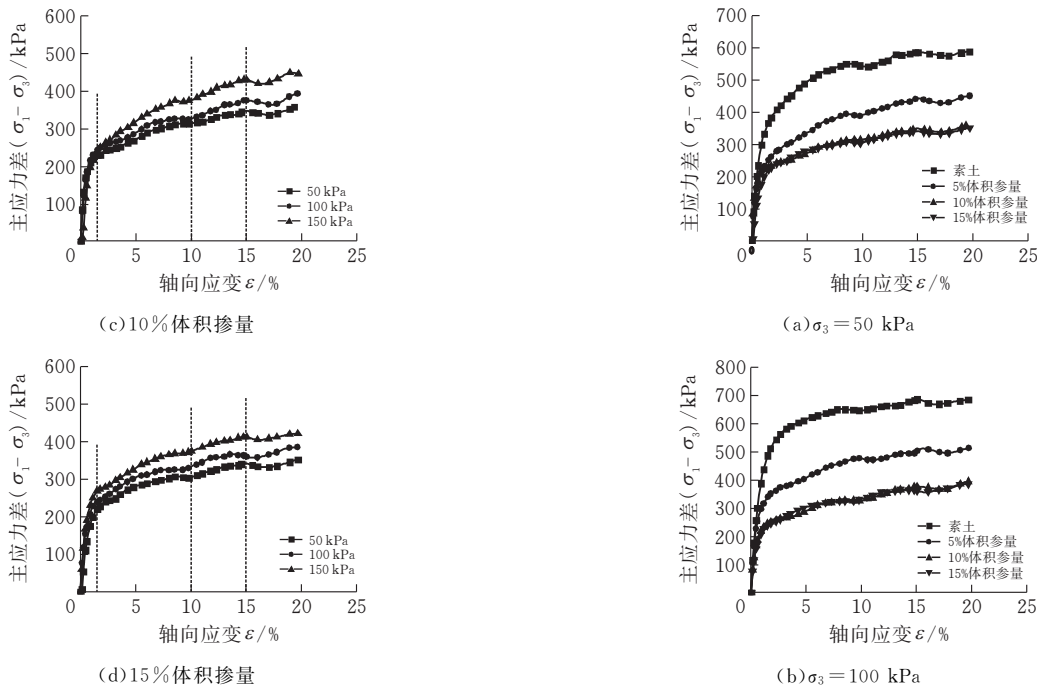


图 2 不同围压下试验土样应力-应变关系曲线

强度,由于轴向压力持续增加使土样发生破坏并产生裂缝,此时主应力差值会减小;稳定阶段,当轴向应变 $\epsilon$ 大于15%时,应力-应变曲线变动幅度很小,曲线趋于稳定。这是因为发生破坏后,受到轴向压力作用,土样密实,裂缝闭合。

由图 3 可知,当围压相同时,0%、5%、10%、15% 体积掺量的改良土样主应力差值随着轴向应变的增加先迅速上升后缓慢上升,达到峰值后趋于稳定。在 50 kPa、100 kPa、150 kPa 三种不同围压下,素土样的主应力差值都是最大的,峰值强度分别是 586.1 kPa、687.3 kPa、735.9 kPa,15% 体积掺量 EPS 改良土样的主应力差值最小,峰值强度分别是 340 kPa、366.4 kPa、412.7 kPa,表明 EPS 颗粒会降低膨胀土抗剪强度;并且 10% 体积掺量改良膨胀土和 15% 体积掺量改良膨胀土的主应力差值非常接近,不足以说明 10% 的 EPS 颗粒掺量为界限掺量,因此配制掺量为 6%、7%、8%、9% 的改良膨胀土在 150 kPa 的围压下进行三轴试验,应力-应变曲线如图 4,从图中可以看出,当掺量超过 9% 时,掺入更多的 EPS 颗粒对改良土强度变化影响不大,最终确定界限掺量为 9%。这些特征是由 EPS 颗粒的特殊性质所决定的,由于 EPS 颗粒制作时采用的发泡工艺,使得 EPS 颗粒内部产生很多空腔,因此改良土样受压过程中这些空腔被压实并破裂,产生屈服;当空腔结构在受压过程中被全部破坏时,主要表现为塑性性质;若继续施加压力,破裂的空腔继续被压密,此时应变主要表现为弹性性质<sup>[11]</sup>。

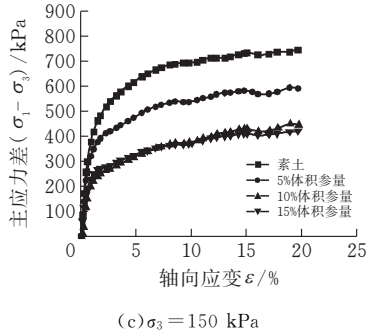


图 3 不同围压下试验土样应力-应变关系曲线

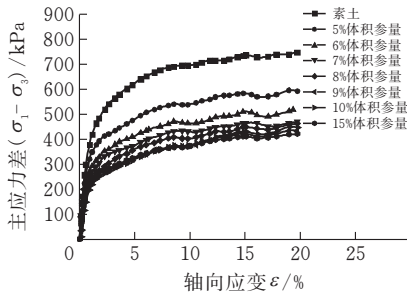


图 4 150 kPa 围压下试验土样应力-应变关系曲线

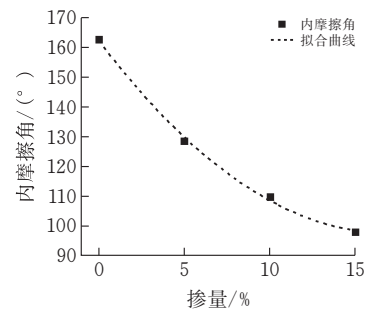
3.2 EPS 颗粒掺量对黏聚力、内摩擦角的影响

通过 3 个摩尔圆公切线,得到不同 EPS 颗粒掺量下的土样黏聚力和内摩擦角参数指标关系(表 3)。

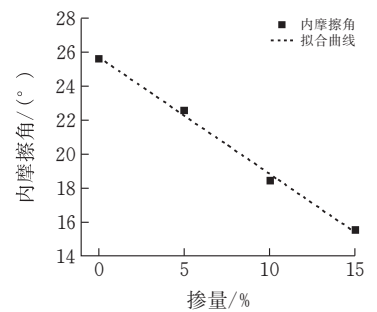
表 3 不同掺量下改良土强度指标

EPS 颗粒掺量/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	162.8	25.63
5	128.6	22.59
10	109.7	18.45
15	97.9	15.54

由图5可知,黏聚力与EPS颗粒掺量呈二次函数关系,内摩擦角与EPS颗粒掺量呈一次函数关系。随着EPS颗粒掺量增加,黏聚力和内摩擦角都有变小的趋势,且黏聚力减小速率更快,这是由于黏聚力是由土颗粒间水的表面张力产生的,所以黏粒数量是黏聚力大小的决定因素,而掺入EPS颗粒会替换黏粒,使改良土的黏粒数量减少,导致黏聚力下降。这也解释了掺量的增加导致黏聚力变小。



(a)黏聚力与EPS颗粒掺量拟合关系曲线



(b)内摩擦角与EPS颗粒掺量拟合关系曲线

图5 EPS颗粒掺量与黏聚力、内摩擦角的拟合关系曲线

通过对黏聚力、内摩擦角和EPS颗粒掺量进行拟合,得到以下关系表达式:

$$c = 0.224x^2 - 7.632x + 162.4$$
$$R_1^2 = 0.9986 \tag{1}$$

$$\varphi = -0.688x + 25.71$$
$$R_2^2 = 0.9954 \tag{2}$$

式中 $c$ 是黏聚力; $\varphi$ 是内摩擦角; $x$ 是EPS颗粒掺量; $R^2$ 是拟合相关系数。

根据库仑强度理论公式:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \tag{3}$$

将式(1)、式(2)代入式(3)得到不同EPS颗粒掺量下改良土的抗剪强度计算公式:

$$\tau_f = 0.224x^2 - 7.632x + \sigma \tan(-0.688x + 25.71) + 162.4 \tag{4}$$

4 结论

1)围压相同时,不同掺量改良土样的主应差值

均表现出先迅速上升再缓慢上升,达到峰值后下降并稳定的趋势,试样的抗剪强度随EPS颗粒掺量的增加而减小,素土样抗剪强度最大,说明EPS颗粒会降低膨胀土的抗剪强度。

2)在150 kPa围压下,当掺量超过9%时,改良土样的应力-应变曲线高度重合,说明当EPS颗粒掺量超过9%时,EPS颗粒掺量对改良膨胀土的强度变化影响不大,即界限掺量为9%。

3)掺量相同时,增加围压能有效提高土样抗剪强度。

4)EPS颗粒掺量的增加会使改良土样的黏聚力和内摩擦角下降,相较于内摩擦角,黏聚力的变化更显著。

[参考文献]

[1] 陈永青,文畅平,方炫强.生物酶改良膨胀土的修正殷宗泽模型[J].岩土力学,2019,40(09):9.

[2] 梁埔源,刘玉坤,刘会强.NaCl溶液对宁夏膨胀土强度指标的影响[J].土工基础,2017,31(05):4.

[3] 庄心善,杨文博,胡其志.磷尾矿改良合肥膨胀土强度试验研究[J].科学技术与工程,2018,18(05):4.

[4] 孙孝海,谢建斌,陈伟,等.工业碱渣改良云南典型膨胀土的膨胀特性试验[J].江苏大学学报:自然科学版,2020,41(05):6.

[5] 王欢,张旭,凡超文,等.粉砂土改良弱膨胀土工程特性研究[J].河南大学学报:自然科学版,2021(01):9.

[6] 鄢黎明.粉煤灰改良膨胀土强度及膨胀特性试验研究[J].陕西水利,2017(06):4.

[7] 邓友生,吴鹏,赵明华,等.基于最优含水率的聚丙烯纤维增强膨胀土强度研究[J].岩土力学,2017,38(02):6.

[8] 雷胜友,惠会清.固化液改良膨胀土性能的试验研究[J].岩土工程学报,2004,26(05):612-615.

[9] 刘宇翼,周国庆,苏运河等.聚苯乙烯泡沫塑料颗粒-膨胀土混合料的胀缩特性试验研究[J].工业建筑,2017,47(05):6:90-95.

[10] 胡志平,魏雪妮,张鹏,等.EPS颗粒-黄土混合土减震层对黄土地区隧道衬砌结构的减震作用[J].建筑科学与工程学报,2017,34(03):9.

[11] 葛春兰,邹维列,夏临照,等.EPS用于膨胀土渠坡稳定的压缩与蠕变特性试验研究[J].长江科学院院报,2014,31(09):65-68.



# Experimental Study on the Strength of EPS Granular Amended Expansive Soil

ZHAO Yiyang, ZHUANG Xinshan, NIE Quchen, WEN Wu

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

**Abstract:** A slope project in Hubei expansive soil as the test object, maintaining the maximum dry density and optimum moisture content of the conditions of the fully automatic triaxial instrument, EPS particles of different amounts of modified expansive soil triaxial test, the test aims to explore the relationship between different amounts of EPS particles and expansive soil shear strength. The results showed that the difference in the main stress of the soil sample first increased rapidly and then increased slowly to reach the peak value and then decreased and stabilized; the peak strength of the pure expansive soil sample was the largest; with the increase of EPS particles, the strength, cohesion, and internal friction angle of the soil sample had a tendency to become smaller; when the doping amount exceeded 10%, the strength of the modified swelling soil did not change significantly; comparing the relationship curves of cohesion, internal friction angle, and doping amount showed that the change in cohesion was more obvious than the internal friction angle. The relationship between cohesion, internal friction angle, and doping amount shows that the change in cohesion is more obvious than that of the internal friction angle, which means that the cohesion is influenced by the change in doping amount. The relationship between cohesion, internal friction angle, and doping amount can be obtained by fitting.

**Keywords:** expanded polystyrene; expansive soil; triaxial test; the shear strength

[责任编辑：裴 琴]

(上接第 94 页)

# Application of Equivalent Strength Parameters Based on Hoek-Brown Criterion in Deep-Buried Tunnels

HU Qizhi, LIU Qian

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

**Abstract:** In order to reduce the error between the simulated value and the measured value and to fully consider the dip effect, hydrostatic pressure effect ,and Rod angle effect, the revised Hoek-Brown (HB) criterion for layered rock masses was applied to the  $I_1 - \sqrt{J_2}$  plane and Mohr-Coulomb (MC) criterion performs instantaneous equivalence, derived the equivalent strength parameter formula for layered rock mass, calculated the equivalent  $c$  and  $\varphi$  values of sandy shale under different dip angles, and then entered them to Ubiquitous-Joint model in FLAC3D. The original rock mass parameters were revised, and the stability of the layered surrounding rock of the Gonghe Tunnel of the Chongqing-Changsha Interprovincial Highway was studied. The results showed that: 1) The change law of the key point displacement obtained by the modified rock mass parameter method is the same as that before the modification, and the displacement is larger than that before the modification, but when the inclination angle is greater than  $60^\circ$ , the applicability of the method is reduced; 2)The deviator stress at the key point ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) is always greater than before correction, and the plastic zone of the two has the same tendency with the dip angle; 3) When the friction angle in the rock body is less than the internal friction angle of the joint, the plastic zone area of the surrounding rock is larger; When the friction angle in the rock body is greater than the internal friction angle of the joint, the area of the plastic zone is smaller.

**Keywords:** modified hoek-brown (h-b) criterion; layered rock mass; numerical simulation; surrounding rock stability;ubiquitous-joint model

[责任编辑：裴 琴]