

[文章编号] 1003—4684(2022)02-0090-04

不同条件下磷尾矿改良膨胀土的滞回曲线研究

高 森, 庄心善, 林万峰, 寇 强

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 滞回曲线反应结构在反复受力过程中的变形特点、刚度变化及能量损耗,是确定应变回弹模型的基础。通过 GDS 动三轴试验,研究不同围压、加载频率、动应力幅值下磷尾矿改良膨胀土滞回曲线变化规律。采用滞回曲线中单个滞回圈面积 S 、滞回圈近似椭圆的长轴斜率 k 、滞回圈短轴与长轴之比 α 及单次循环的残余应变 ϵ_p ,结合循环荷载产生的应变进行定量研究。研究表明:膨胀土在循环荷载作用下的滞回曲线呈倾斜椭圆形, S 和 ϵ_p 随动应变增大而增大,围压、频率增大使 S 和 ϵ_p 减小; k 随围压、频率的增大而增大,而动应变的增加使 k 值减小; α 随围压、频率的增大而减小。磷尾矿改良膨胀土较未改良膨胀土的 S 、 α 、 ϵ_p 值均增大, k 值减小。

[关键词] 磷尾矿; 膨胀土; 动三轴试验; 滞回曲线; 弹性性能

[中图分类号] TU43 [文献标识码] A

在循环荷载往复作用下得到的应力—应变关系曲线称为滞回曲线,其主要反映反复受力过程中的能量损耗、变形特征及刚度退化。滞回曲线体现荷载进行加载—卸载—加载的循环过程,是进行地基抗震分析的基础^[1]。许多关于土体应力及动应变的研究均基于对滞回曲线模型的构建,例如:罗飞等^[2]控制负温条件,对冻结黏土进行了动三轴试验,研究土体残余塑性应变、土体损坏水平、能量损耗和刚度随动应变发生的变化;刘超等^[3]通过改变围压、固结比、频率,对泥炭质土滞回曲线形态特征进行定量描述;魏新江等^[4]基于冻融作用后土体滞回曲线及阻尼比特性会发生改变,对冻融土进行动三轴试验,深入分析反复受力过程中土体滞回曲线及阻尼比的演变规律。黄娟等^[5]通过分级加载动三轴试验,将泥炭质土与其他土进行对比,定量分析土体滞回曲线的形态特征、影响因素及其演化规律。

目前关于土体滞回曲线的研究主要围绕黏土、冻融土及泥炭质土展开,而膨胀土及改良膨胀土的滞回曲线研究少有报道,直到 20 世纪人们才开始重视膨胀土所引发的工程问题^[6]。人们将膨胀土作为一种特殊土进行研究,在国际上开展了广泛学术交流。以膨胀土为主要非饱和土类的“非饱和土力学”成为“土力学”的重要分支学科。张国宝^[7]通过分析干湿循环条件下应力和路径湿度对膨胀性能的影响,得出了膨胀土胀缩变形规律;张锐^[8]从形成原

因、分布特征及微观结构方面分析了膨胀土特征,总结了膨胀土路堑边坡破坏规律和形成因素;庄心善等^[9]通过控制不同掺量进行试验,得出结论:对膨胀土掺入 6% 磷尾矿进行处理,能有效降低土体膨胀率,强化其抗压性能。

综上所述,目前磷尾矿改良膨胀土的静力特性已有相关研究,但对于磷尾矿改良膨胀土滞回曲线的研究尚未见报道。本文利用 GDS 真动三轴仪,通过改变围压、频率以及动应力幅值,研究不同条件下磷尾矿改良膨胀土的滞回曲线规律。

1 试验方案

1.1 试验仪器

本试验所用仪器为英国 GDS 真动三轴仪,仪器见图 1。



图 1 GDS 真动三轴仪

GDS 真动三轴仪装配的动三轴试验系统可以在动态试验中非常精确地控制轴向位移和轴向力的大小,并准确测量试验过程中的围压、反压、轴向变形以及体积变化。

[收稿日期] 2021—04—27

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51708190)

[第一作者] 高 森(1997—),男,湖北武汉人,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 试验土样

试验土样取自合肥某高速公路,土样呈黄色,其基本物理性质见表 1。试样最大干密度为 1.7 g/cm³,最优含水率为 17%。将 6% 的磷尾矿掺入土样中拌匀,用内掺方式制作土样。土样制成高 100 mm,直径 50 mm 的标准圆柱体。

表 1 膨胀土基本物理力学参数

最大干密度 $\rho/(g \cdot cm^3)$	1.7
最优含水率/%	17
液限 $W_l/\%$	65
塑限 $W_p/\%$	30
塑性指数	35
自由膨胀率/%	44

1.3 试验方案

鉴于前人通过静三轴试验测得 6% 掺量的磷尾矿对膨胀土有最佳改良效果^[9],本文在此基础上进一步探究此掺量下土样在循环荷载过程中滞回曲线的变化规律。将土样放入烘箱烘干后取出,按照最大干密度、最优含水率以及磷尾矿最佳掺量制作土样。将制备好的土样放入饱和抽气机中进行抽气饱和,再将试样从模具中取出,放入 GDS 压力室内,线性施加指定围压进行固结。固结完成后,在不排水条件下分 10 级施加动应力 σ_d ,每级荷载循环 10 次,每组试验动应力幅值等差递增,当试样达到 5% 破坏应变或达到循环次数时,试验停止。试验结束后土样如图 2 所示。试验使用围压 100 kPa、150 kPa、200 kPa,频率 1 Hz、2 Hz、3 Hz 分别研究不同围压、频率下磷尾矿改良膨胀土的滞回曲线变化规律,详细试验方案如表 2 所示。



图 2 试验结束后土样

表 2 试验方案

试验编号	围压/kPa	频率/Hz	动应力幅值/kPa
1-1	100	1	10~100
1-2		2	
1-3		3	
2-1	150	1	15~150
2-2		2	
2-3		3	
3-1	200	1	20~200
3-2		2	
3-3		3	

表 2 中磷尾矿掺量均为 6%

2 试验结果与分析

2.1 特征描述

为了对每级循环荷载产生的滞回曲线进行比较,以每级施加荷载的初始静应力 σ_0 为起点,得到滞回圈见图 3,滞回圈形状近似为封闭椭圆形。动荷载从 C 点出发,到 D 点结束,若 C、D 点不重合,说明试验过程中有塑性变形产生。A、B 分别为该次循环下最大动应力和最小动应力。连接 AB 两点线段长度为椭圆长轴 a ,取线段 AB 中点 E 作垂直于 AB 的直线,直线与椭圆交点为 F、G,取线段 FG 为椭圆短轴 b 。

本文针对滞回曲线研究的特征参量有:滞回曲线面积 S 、滞回圈长轴 AB 的斜率 k 、滞回圈短轴与长轴之比 α 及残余应变 ϵ_p 。

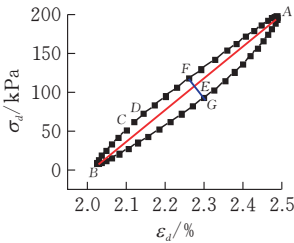


图 3 单次循环荷载下的滞回曲线

2.2 滞回圈面积

由图 3 可知滞回圈为封闭图形,滞回圈面积 S 与土体因阻尼产生的能量损耗有关^[10], S 越大,说明能量损耗越多。为方便计算,将一次循环荷载内滞回圈形状近似为椭圆进行线性变换,得到的计算图形符合椭圆标准方程式。由此可得椭圆面积为:

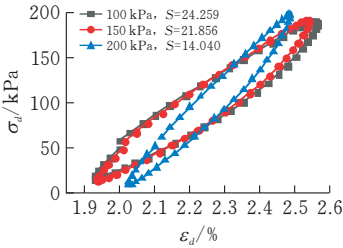
$$S = \pi ab/4 \tag{1}$$

随着动应变增大,滞回圈起点 C 和终点 D 之间距离增大,此时将曲线每一点连起来,将滞回圈视为多边形计算^[2],由此可得滞回圈面积为:

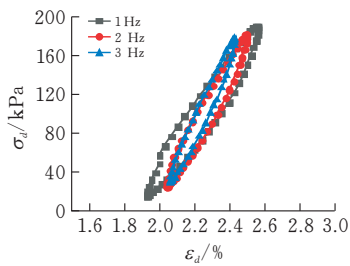
$$S = \sum_{i=1}^n S_i \tag{2}$$

式(2)中 S_i 为连接曲线相邻两点间分块多边形面积。

取每个振级第 3~8 次循环荷载的动应力-应变曲线进行分析,不同围压、频率下第 5 振级的滞回圈对比如图 4 所示。



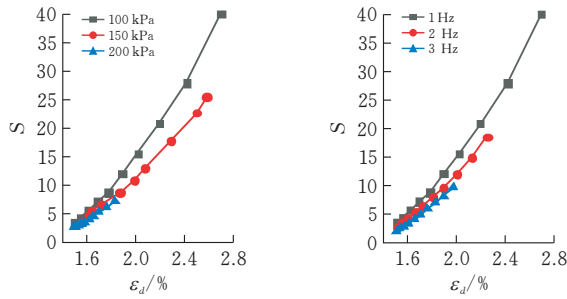
(a) $f=1\text{ Hz}$



(b) $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$

图 4 不同围压、频率下的应力-应变曲线

由图 4 可知,当频率一定时, S 与围压呈负相关;当围压一定时, S 与频率呈负相关。逐级施加动应力下 S 与动应变关系曲线见图 5。



(a) $f = 1 \text{ Hz}$

(b) $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$

图 5 滞回圈面积与动应变关系曲线

由图 5 可知 S 与动应变呈正相关。动应变发展初期,土体有恢复变形能力,滞回曲线面积较小且变化不大,土体因阻尼消耗的能量较少。随着形变增加,土体破坏程度加深,土颗粒黏聚力减弱,阻尼比增加,不同条件下土体消耗的能量出现明显差别,各曲线开始分离并呈上升趋势的指数形增长。在其他条件不变的情况下,围压或频率的增加均可使滞回曲线面积减小,土体阻尼比减小,围压和频率对能量损耗影响显著。

2.3 滞回圈倾斜程度

由图 4 可知 k 值为滞回圈最大应力点与最小应力点所连直线斜率。 k 变小表明土体软化,弹性性能变差,动弹性模量降低;反之 k 变大说明土体弹性性能更好。由图可得 k 值为:

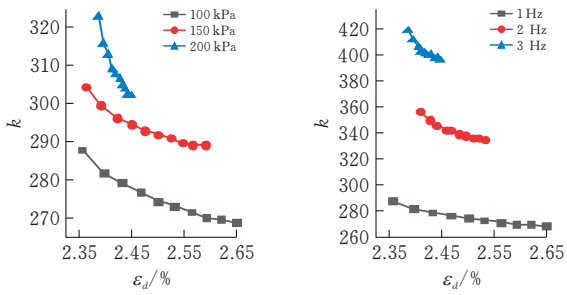
$$k = (\sigma_A - \sigma_B) / (\epsilon_A - \epsilon_B) \tag{3}$$

式(3)中, σ_A 和 σ_B 分别为单次循环内土体最大动应力和最小动应力; ϵ_A 和 ϵ_B 分别为单次循环内土体最大动应变和最小动应变。

如图 4 所示,当频率一定时, k 与围压呈正相关,滞回圈倾斜程度显著增加;当围压一定时, k 与频率呈正相关,低频加载条件较高频加载条件 k 值的变化幅度较小。

改良土 k 值与动应变关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知,不同条件下改良土 k 值与动应变呈负相关。动应变发展初期时 k 值变化显著,动应变较大

时, k 值逐渐趋于平稳。围压增加使 k 值增加,原因是增大围压使土体被压实,土体间咬合力增强,形变减少;频率增加使 k 值增加,原因是土体在应变发展后期失去充分回弹能力,对不同频率更加敏感,高频加载下土体回弹能力更好。



(a) $f = 1 \text{ Hz}$

(b) $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$

图 6 滞回圈长轴斜率与动应变关系曲线

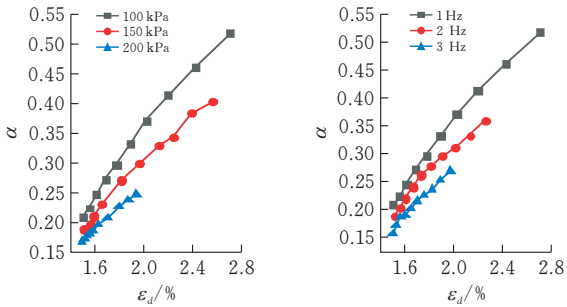
2.4 滞回圈饱满程度

滞回圈饱满程度用滞回圈近似椭圆的短轴与长轴之比 α 表示,其反映了土体黏滞程度, α 增大说明黏滞性变大,土体变厚实。由此得 α 的计算式:

$$\alpha = b/a \tag{4}$$

式(4)中, a 为椭圆长轴 AB 长度, b 为椭圆短轴 FG 长度。

图 7 为 α 随动应变变化曲线。



(a) $f = 1 \text{ Hz}$

(b) $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$

图 7 滞回圈短长轴之比与动应变关系曲线

由图 7 可知, α 值与动应变基本呈线性正相关。在频率一定的条件下, α 值随围压增大而减小,原因是围压增加导致土体被压实,土体黏滞性减小,对应图 4a 土体短轴显著减小;在围压一定的条件下, α 值随频率增大而减小。结合图 7a 和图 7b 得出结论:围压对 α 值的影响大于频率对 α 值的影响。

2.5 滞回圈不闭合程度

滞回圈不闭合程度通过用单次循环内始末动应变之差的绝对值表示,残余应变 ϵ_p 反映了循环荷载下土体的不可恢复变形,其计算式为:

$$\epsilon_p = |\epsilon_s - \epsilon_c| \tag{5}$$

式(5)中, ϵ_s 、 ϵ_c 分别为单次循环始末应变值。 ϵ_p 增加,说明土体加载始末产生的不可恢复变形变大,土体恢复能力变差;反之, ϵ_p 减小说明土体更容易恢

复变形。改良土 ϵ_p 随动应变变化如图 8 所示。

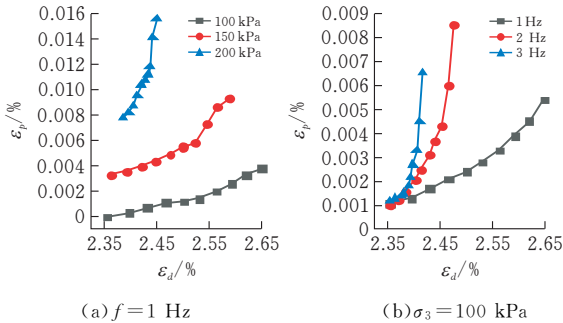


图 8 滞回圈残余应变与动应变关系曲线

由图 8 可知, ϵ_p 与动应变呈正相关。在频率一定的条件下, 围压的增大使 ϵ_p 显著增大, 且后期动应变较大时不同围压对 ϵ_p 的影响有显著差异, 围压增大使土体更密实, ϵ_p 的增长幅度变大; 在围压一定的条件下, 频率增大使 ϵ_p 增大, 频率相较于围压对 ϵ_p 影响较小。

3 素土与改良土对比分析

3.1 对比试验方案

取围压为 100 kPa, 频率为 1 Hz 的素膨胀土试样与相同围压和频率下的磷尾矿改良膨胀土进行对照试验, 滞回曲线参数 S 、 k 、 α 、 ϵ_p 随动应变变化曲线见图 9。

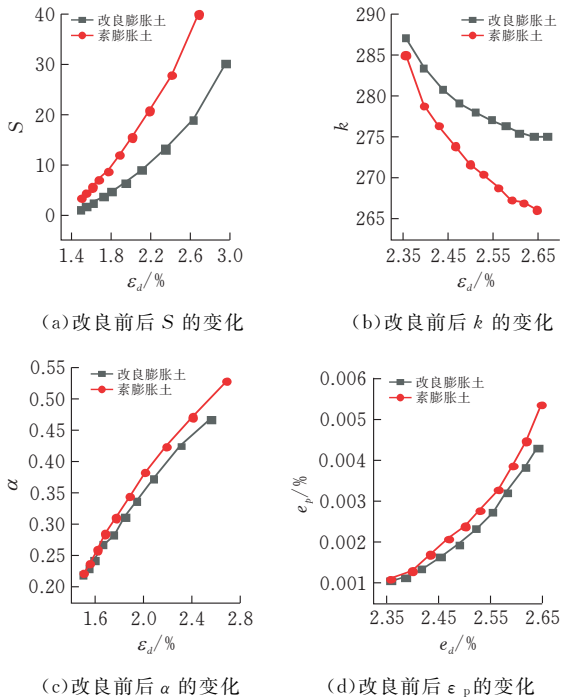


图 9 改良土与素土滞回曲线参数对比曲线

3.2 试验结论与分析

由图 9 可知, 在其他条件相同的情况下, 改良土 S 、 α 、 ϵ_p 值均小于素土, 素土仅 k 值小于改良土。原因是 6% 掺量的磷尾矿作用下膨胀土内摩擦角增大, 土颗粒间相对滑移减少^[9]。改良土相较素土抗

压强度更大, 更不容易产生形变, 因此改良后膨胀土的 S 、 α 、 ϵ_p 值均会减小。随着动应变增加, 土体形变程度增大, 素土相较改良土更快达到破坏。改良土与素土滞回曲线各参数差异会越来越显著。

4 结论

- 1) 磷尾矿改良膨胀土滞回圈面积 s 随动应变增大而增大, 动应变发展后期 s 呈指数增长, 不同条件下增长幅度有明显差别。围压和频率增大均能使 s 减小。
- 2) 改良土滞回圈斜率 k 与动应变呈负相关, k 与围压和频率呈正相关。应变发展后期, k 值趋于平稳。
- 3) α 随动应变增加呈线性增长。随着围压和频率增大, α 值减小。相较于频率对 α 值的影响, 围压对 α 值影响更大
- 4) 土体残余应变 ϵ_p 与动应变、围压和频率均呈正相关。频率较围压对 ϵ_p 的影响较小。
- 5) 6% 掺量的磷尾矿增加膨胀土抗压强度, 使改良土相较于素土 S 、 α 、 ϵ_p 值均减小。该改良土作为地基可发挥其抗震优势。

[参 考 文 献]

[1] 毛远凤, 叶庆东, 沈宇鹏. 动三轴试验滞回曲线的椭圆拟合分析[J]. 震灾防御技术, 2017, 12(4): 743-750.

[2] 罗飞, 赵淑萍, 马巍, 等. 青藏冻结黏土滞回曲线形态特征的定量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 208-215.

[3] 刘超, 屈俊童, 段自侠, 等. 洱海泥炭质土滞回曲线形态特征的定量研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 688-693.

[4] 魏新江, 庄家煌, 丁智, 等. 地铁循环荷载作用下冻融土滞回曲线及阻尼比特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2092-2102.

[5] 黄娟, 彭立敏, 袁铁映, 等. 分级加载条件下泥炭质土滞回曲线演化规律试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(7): 1753-1759.

[6] 唐朝生, 施斌, 刘春. 膨胀土收缩开裂特性研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 663-673.

[7] 张国宝. 荷载和干湿循环应力路径对压实膨胀土干湿循环胀缩变形的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.

[8] 张锐. 宁明非饱和膨胀土强度特性试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2005.

[9] 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(5): 281-284.

[10] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 102-105.