

干湿循环作用下污泥固化土三维力学特性研究

徐 健, 赵 绪, 马锐敏, 杨爱武, 杨少坤

Research on 3D mechanical properties of sludge solidified soil under the action of drying and wetting cycles

XU Jian, ZHAO Xu, MA Ruimin, YANG Aiwu, and YANG Shaokun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007063>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

固化轻质土在干湿循环及大变形条件下力学特性研究

A study of the mechanical properties of curing light soil under the condition of drying -wetting circles and large deformation

杨爱武, 姜帅, 封安坤, 陈立杰, 赵梦生 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 93-100

初始固结应力对平面应变黄土剪切破坏特性影响

Effect of initial solidification stress on shear failure characteristics of loess under the plane strain condition

李宝平, 杨倩, 张玉, 平高权, 王智 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 92-99

基于主应力旋转的黏性填土挡墙土压力

The earth pressure of retaining wall with cohesive fill based on principal stress rotation

王恒利, 邹正盛, 刘京敏, 王新宇 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 64-71

高含水量冻粉黏土应力-应变曲线特性的试验研究

An experimental study of the stress-strain characteristics of frozen silty clay with high moisture content

张遂, 匡航, 靳占英, 徐国方 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 116-124

考虑竖向附加应力作用的一维垂直土柱仪研制与应用

Research and application of stress-controllable soil column instrument

张林, 张登飞, 陈存礼, 庞腾腾, 孙佩娜 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 112-119

基于等速线模型的一维黄土动荷载响应分析

Dynamic load response analysis of 1-D loess based on the equal speed line model

王文丽, 王兰民 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 113-119



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007063

干湿循环作用下污泥固化土三维力学特性研究

徐 健¹, 赵 绪¹, 马锐敏¹, 杨爱武², 杨少坤²

(1. 天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;

2. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 采用自主研发的新型固化剂对天津城市污泥进行固化处理, 通过 GCTS 真三轴仪对污泥固化土进行不固结不排水试验, 探讨其在干湿循环作用下的应力-应变特征和强度指标变化规律。试验结果表明: 污泥固化土应力-应变曲线在初始阶段近似表现为线性关系, 同等条件下, 破坏应力随中主应力比 b 的增大而增大; 相同 b 值下, 破坏应力随干湿循环次数的增大而逐渐减小。经过干湿循环 1, 3, 5, 7, 10 次之后, 不同围压下污泥固化土的破坏应力值均呈现下降趋势。当循环次数超过 5 次后, 其降低幅度趋于平缓。在 b 值较小、循环次数小于 3 时, 应力-应变曲线产生应变软化现象, 随着围压和 b 值的增大表现为硬化型。污泥固化土 c 、 φ 值随干湿循环次数的增大呈现出降低趋势, 并最终趋于稳定。在此基础上, 对不同中主应力比条件下的 c 、 φ 值变化规律进行分析, 分别建立其与干湿循环次数和中主应力比之间的关系式, 并构建出能够考虑不同围压及中主应力比影响的初始弹性模量 E_i 和中主应力差渐近值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 预测公式。

关键词: 污泥固化土; 干湿循环; 中主应力比; 应力-应变曲线; 初始弹性模量; 中主应力差渐近值

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0110-09

Research on 3D mechanical properties of sludge solidified soil under the action of drying and wetting cycles

XU Jian¹, ZHAO Xu¹, MA Ruimin¹, YANG Aiwu², YANG Shaokun²

(1. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian

University, Tianjin 300384, China; 2. College of Environmental Science and Engineering,

Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: A novel curing agent produced by our independent research and development is used to solidify the municipal sludge taken from Tianjin. GCTS true triaxial apparatus is used to conduct unconsolidated and undrained tests on the sludge solidified soil under different drying-wetting cycles. The stress-strain characteristics and strength index variation of the sludge solidified soil under drying-wetting cycles are investigated. The test results indicate that the stress-strain curve of the sludge solidified soil is approximately linear in the initial stage, and the failure stress increases with the increasing medium principal stress ratio b under the same conditions. At the same value of b , the failure stress decreases with the increasing number of drying-wetting cycles. After 1, 3, 5, 7 and 10 cycles, the failure stress values of the sludge solidified soil under different confining pressures all show the downward tendency. When the cycles are over 5 times, the reduction in the failure stress tends to be flat. When the value of b is small and the number of cycles is less than 3, strain softening occurs in the stress-strain curve, which appears as hardening with the increase of the confining pressure and the value of b . The values of c and φ of

收稿日期: 2020-07-25; 修订日期: 2020-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978440); 天津市科技计划项目(19JCZDJC39700; 2016CJ01)

第一作者: 徐健(1993-), 男, 硕士研究生, 从事软土工程理论及技术研究。E-mail: jianxuchn@163.com

通讯作者: 杨爱武(1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事软黏土力学特性及土体微观结构研究。E-mail: tulilab@163.com

the sludge solidified soil show a decreasing trend with the increasing number of drying-wetting cycles, and finally tend to be stable. On this basis, the variation of values of c and ϕ under different principal stress ratios are analyzed, and the relationships between the values of c and ϕ and the number of drying-wetting cycles and the principal stress ratio are established respectively. Moreover, the prediction formula for the initial elastic modulus E_i and the asymptotic value of deviator stress $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ulti}}$ which considers the influence of different confining pressures and the principal stress ratio is constructed.

Keywords: sludge solidified soil; drying-wetting cycle; medium principal stress ratio; stress-strain curve; initial elastic modulus; asymptotic value of deviator stress

随着工业化程度和城市化水平的提高,我国污水排放量日益增加,加之长期以来污水处理厂存在着严重的“重水轻泥”现象^[1-2],造成城市污泥利用率低下。污泥含水率高,力学性质差,且含有大量的病原体、微生物和重金属等有害物质,若处理不当将造成严重的二次污染和生态问题^[3]。通过对污泥进行固化处理,可生成一种拥有完整结构且具备一定强度的固化体^[4-5]。固化处理后的污泥物理力学指标明显提高,有机质和重金属浸出含量大幅降低,且比原污泥更易于处理和运输,从而能够将城市污泥转化为稳定的路基填垫料使用,以满足工程需求和环境需要^[6]。

近些年,国内外学者在城市污泥固化以及土体三维力学特性等方面进行了大量的试验研究并取得了诸多成果。Sun 等^[7]发现仅采用水泥固化污泥时,固化体的强度增长较为缓慢,很难达到资源化利用或填埋的要求;Xin 等^[8]通过将不同种类的混合水泥黏结剂掺入高有机含量活性污泥中,并对污泥固化土的无侧限抗压强度和重金属浸出率进行了研究;Cheilas 等^[9]通过在水泥固化污泥土中添加一定比例的黄钾铁矾和明矾石,发现两者的掺入对土体强度有显著降低作用,而浸出重金属含量明显减少;林城^[10]利用钙基膨润土作为添加剂辅助水泥固化处理污泥,并对处理后污泥的基本力学性质和污泥中污染物稳定性控制的效果展开研究;李磊等^[11]以水泥和膨润土为固化材料处理的污泥为研究对象,对其质量、体积、含水率及强度等参数进行测定,发现一定掺入量的水泥可以明显提高固化体的物理稳定性,膨润土对固化体的干湿耐久性影响呈现出两面性;易进翔等^[12]通过对不同水泥掺量和不同初始孔隙比的污泥固化土进行压缩试验发现,水泥掺量大于 30% 时,压缩指数减小的幅度不大,压缩指数随着初始孔隙比的增加而增大;吴炎等^[13]采用纸浆渣烧结灰(PS 灰)和水泥对污泥进行固化,结果表明固化污泥的无侧限抗压强度与

PS 灰和水泥含量呈“阶梯形”分布;Callisto 等^[14]对比萨斜塔下的原状软土进行真三轴试验后,发现土体的抗剪强度指标较普通三轴试验明显增大;Kirkgard 等^[15]对旧金山湾淤泥分别进行不排水条件下的常规三轴试验和真三轴试验,对比分析了中主应力变化对淤泥应力-应变关系产生的影响;杨利国^[16]通过压实黄土在不同中主应力系数和不同围压下的真三轴试验发现,中主应力对黄土强度有一定的加固作用;而相对于常规三轴试验结果,土体在三维应力状态下的变形性状和强度指标明显互异^[17-19]。

综上所述,针对城市污泥的试验成果多集中在污泥固化以及固化体常规力学特性等方面,对于污泥固化土三维力学特性的研究极为少见。而污泥固化土处于自然环境条件下不可避免地会受到环境气候变化引起的干湿循环作用,其力学特性是否满足工程需求尚需进一步探讨。基于此,本文对处理后的污泥固化土开展不固结不排水条件下的真三轴试验,探讨其在干湿循环作用下的应力-应变特征和强度指标变化规律,并构建能够考虑不同围压及中主应力比影响的初始弹性模量和主应力差渐近值预测公式,为固化土应用于相关工程实践提供理论支撑。

1 试验简介

1.1 试验土样及制备

试样取自天津滨海新区某污泥填埋厂,呈固态且有浓烈腐臭气味,取回后装入塑料盒中进行密封、遮光保存,保持温度在 20 ℃ 左右,防止污泥水分流失和有机质降解。其基本物理性质为:含水率 385.5%,有机质 58.2%,密度 1.1 g/cm³,比重 1.6, pH 值 7.1。

城市污泥含水率高并含有大量难降解有机物,直接进行固化需要投入大量固化材料,且影响固化效果,因此在污泥固化前,先添加 20% 的生石灰静置 9 d 进行消化处理,以达到降低含水率和分解有机质的效

果,满足消化作用的技术性和经济性^[4]。干土原材料为天津滨海新区海积性软黏土,将其置于烘箱 24 h 以保证足够干燥,再用球磨机粉碎过 1 mm 筛。试验所用固化剂为自主研发,已申请专利^[20]。固化剂主剂即普通硅酸盐水泥,对污泥固化土强度的发挥起主要作用;固化剂辅剂分为辅剂 1 和辅剂 2 两种,起催化作用,加快强度增长速率和增大最终强度。

在污泥固化土制备过程中,分别考虑 A(污泥:干土)、B(水)、C(固化剂主剂)、D(固化剂辅剂 1)及 E(固化剂辅剂 2)共 5 种因素对土体力学特性的影响,各因素及水平设置见表 1。以固化土 7 d 无侧限抗压强度为评判指标,进行正交试验,结果见表 2。

表 1 正交试验因素和水平

Table 1 Factors and levels of the orthogonal test

水平	影响因素				
	A	B	C	D	E
1	20%:80%	25%	5%	0.2%	0.1%
2	25%:75%	30%	10%	0.3%	0.2%
3	30%:70%	35%	15%	0.4%	0.3%
4	35%:65%	40%	20%	0.5%	0.4%
5	40%:60%	45%	25%	0.6%	0.5%

注:固化剂主剂、固化剂辅剂和水的量均按照污泥和干土总质量的百分比添加。

表 2 正交试验结果分析

Table 2 Analysis of the orthogonal test results

指标	影响因素				
	A	B	C	D	E
S1	1 039.40	803.90	387.30	768.70	771.60
S2	893.20	837.80	513.20	773.70	593.90
S3	805.40	876.40	805.40	902.70	840.70
S4	737.20	781.90	1 159.10	838.70	795.70
S5	639.10	998.70	875.60	891.90	897.80
M1	207.88	160.78	77.46	153.74	154.32
M2	178.64	167.56	102.64	154.74	118.78
M3	161.08	175.28	161.08	180.54	168.14
M4	147.44	156.38	231.82	167.74	159.14
M5	127.82	199.74	175.12	178.38	179.56
极差 R	80.06	43.36	154.36	26.80	60.78

表 2 中, A、B、C、D、E 代表各影响因素, S 代表某一因素在不同水平下无侧限抗压强度之和, M 代表对应 S 的平均值, 极差 R 为某一因素在不同水平下 M 的最大值和最小值之差。由表 2 可以得到污泥固化土的最佳配比为 A1 B5 C4 D3 E5。工程实践中, 在考虑固化土强度要求和材料造价的同时, 应尽可能多地消耗污泥, 故选择 A2(25%:75%)、B4(40%)、C2(10%)、D5(0.6%)、E3(0.3%)作为污泥固化土制备的最终配比方案。最终配比下养护龄期 28 d 污泥固化土试样的含水率 41.7%, 密度 1.75 g/cm³, 干密度

1.24 g/cm³, 无侧限抗压强度 360.7 kPa。可见含水率大幅降低, 无侧限抗压强度增长明显, 且能达到养护龄期 60 d 强度的 90% 以上, 因此后续试验均选择养护龄期 28 d 的固化土试样。

1.2 干湿循环次数的确定

制作 7 组试样(每组 3 个平行样), 在恒温恒湿条件下养护 28 d 后, 包裹保鲜膜防止水分流失, 常温环境中湿化 24 h, 再置于恒温恒湿箱中(35 ℃)干化 12 h, 如此完成 1 次干湿循环过程。每次干湿循环结束后取 1 组试样进行无侧限抗压强度试验, 得到无侧限抗压强度与干湿循环次数(N)之间的关系曲线(图 1)。

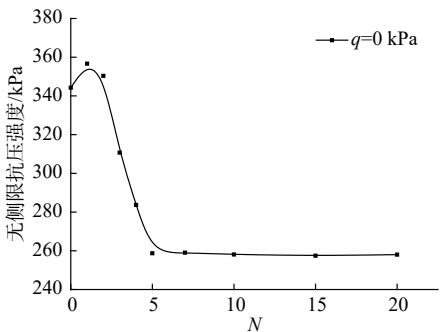


图 1 无侧限抗压强度与干湿循环次数间关系

Fig. 1 Relationship between the unconfined compressive strength and drying-wetting cycles

由图 1 可知, 2 次干湿循环之前, 污泥固化土无侧限抗压强度会有所增长, 超过 2 次后, 无侧限抗压强度迅速降低。当循环次数超过 5 次之后, 固化土强度衰减量随干湿循环次数增加而显著减小, 曲线渐趋平缓。循环次数达到 7 次以后, 干湿循环对无侧限抗压强度的影响甚微, 强度趋于稳定状态。这与固化剂同土颗粒和水之间发生一系列水化反应所产生的胶结物质以及固化土中影响强度的重金属物质相关。这些胶结物质增加了各种颗粒之间的黏结力, 使土体具备了一定的抵抗干湿效应能力, 土体在经过最初几次干湿循环作用后, 其内部重金属部分失去, 颗粒间重组, 致使土体强度有增长趋势。随着干湿循环次数的增加, 重金属离子运动趋于稳定, 同时土体内部由于失水干缩与吸水湿胀出现较多裂缝, 导致土体强度急剧下降。而在经过一定次数(5 次)的干湿循环作用后, 裂缝不再继续扩大, 表现为强度降低幅度明显变缓。此外, 污泥固化土是一种结构性很强的土体^[21], 当循环次数较少时, 土体内部较松散、易破坏的不稳定粒群在干湿循环作用下迅速遭到破坏, 导致土体强

度降低。而当循环次数增加到一定次数后,土体内部不稳定粒群及松散体已完全破坏,此时土体强度将由内部稳定结构提供,土颗粒之间的黏结力和干湿循环作用产生的应力逐渐趋于平衡,因此随干湿循环次数的继续增加,污泥固化土的无侧限抗压强度不再继续降低而渐趋稳定状态。据此选择 0, 1, 3, 5, 7, 10 次干湿循环次数作为试验条件较为合适。

1.3 真三轴试验方案

为研究污泥固化土作为路基填料的强度和变形特性,采用美国 GCTS 公司生产的 SPAX-2000 真三轴试验仪,通过应力控制式加载。试样尺寸为长×宽×高=75 mm×75 mm×150 mm,围压选用 20, 40, 60 kPa,中主应力比 b 取为 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 干湿循环温度取 35, 20℃, 干湿循环次数取 0, 1, 3, 5, 7, 10 次,采用不固结不排水剪切方式。试验过程中,先对养护好的试样进行不等次数的干湿循环作用,再对其进行三维应力状态下的加载,即让土样处于三相初始应力状态,然后保持水压不变,也即小主应力 σ_3 不变,同时增加竖向大主应力 σ_1 和水平向中主应力 σ_2 ,并控制 σ_1 和 σ_2 的增量比 $\Delta\sigma_2/\Delta\sigma_1=b$ (中主应力比) 不变,直到试验结束。

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线

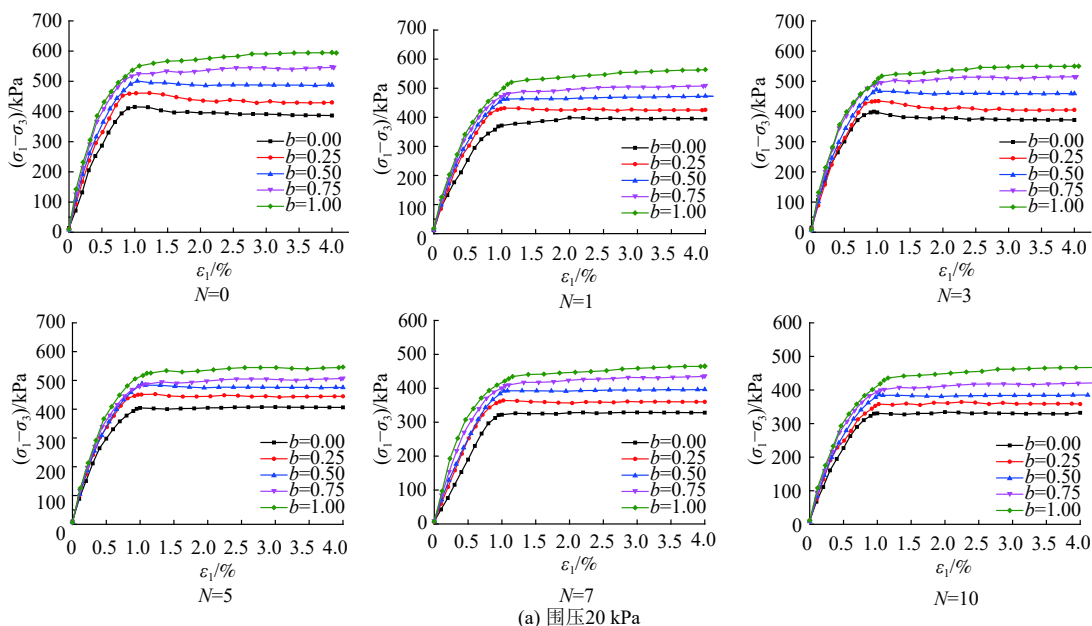
图 2 为污泥固化土在围压为 20, 40, 60 kPa 时,不同中主应力比状态下经过不同干湿循环次数后的应力-应变曲线。由图 2 可以发现以下规律:

(1) 相同围压条件下,曲线初始阶段都近似表现为线性关系,同一干湿循环次数下,曲线斜率随着 b 值增大而越来越陡,破坏应力即出现转折点的偏应力逐渐增大。相同 b 值下,破坏应力随循环次数增大逐渐减小。当循环次数大于 5 时,转折点对应的值趋于平缓。其他条件相同时,破坏应力随围压的增大总体呈现出增大趋势。这主要是因为三维应力状态下,随着 b 值的增大,侧向约束力增加,从而提高了土体抵抗变形的能力;而保持 b 值不变时,随干湿循环次数的增加,土体内部结构受水分子的影响,土颗粒进行重组,土体结构性变差,因此其破坏应力在干湿循环初始阶段显著下降。循环次数大于 5 次后,土体结构性受水分子的影响逐渐变弱,土体内部颗粒基本稳定,破坏应力降低幅度渐趋稳定。

(2) 相同干湿循环次数下,破坏应变值随 b 值和围压的增加而增大。围压为 20, 40, 60 kPa 时的平均破坏应变值分别为 1.05%、1.15%、1.31%,土体破坏形式呈脆性破坏。

(3) 在 b 值较小、循环次数小于 3 时,曲线产生应变软化现象,随着围压和 b 值的增大,试样应变软化现象逐渐消失,表现为硬化现象。这是由于土体本身存在一定的结构性,在外力足够小时,试样处于稳定状态,此时应力不变,应变仍然处于上升状态。此后,外力逐渐增大,土体结构性破坏,试样出现脆性破坏,也即应变随应力增大而呈现缓慢增长趋势。

(4) 经过干湿循环 1, 3, 5, 7, 10 次之后,不同围压下污泥固化土的破坏应力值均呈现出下降趋势,与



(a) 围压 20 kPa

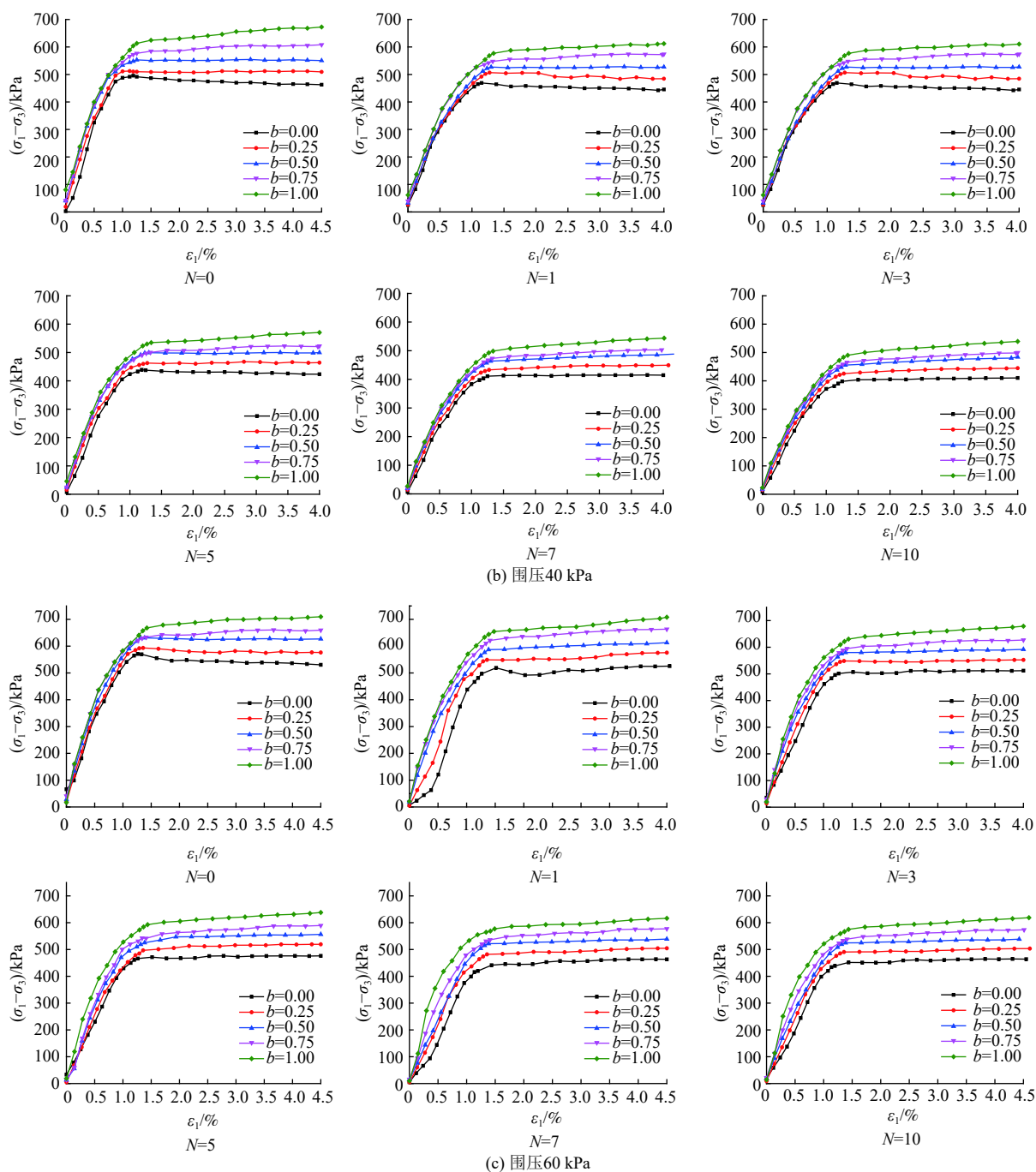


图 2 不同围压时的应力-应变曲线

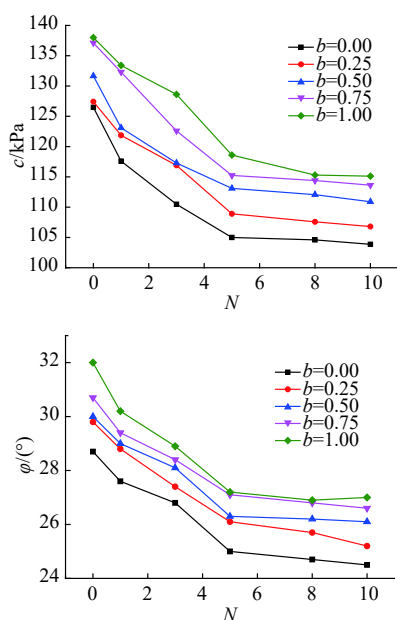
Fig. 2 Stress-strain curves under different confining pressures

0 次循环相比,破坏应力下降值分别为 6.71%、12.7%、4.29%、1.21%、0.27%。可见,破坏应力在干湿循环作用初始阶段下降比率较大,以循环次数第 3 次时达到最高,超过 5 次以后降低幅度趋于平缓。分析可知,土体内部较松散、易破坏的不稳定粒群在最初几次干湿循环作用下迅速遭到破坏,致使土体强度急剧降低。而当循环次数增加到一定次数后,土体内部不稳

定结构已彻底破坏,此时土体强度由内部稳定结构提供,从而受干湿循环作用的影响大幅减弱。

2.2 考虑中主应力比影响的 c 、 φ 值变化

根据摩尔库伦破坏理论对污泥固化土应力-应变曲线进行研究,得到其在不同干湿循环次数时 3 组围压下的抗剪强度包线,分析可得固化土在不同中主应力比下 c 、 φ 值随干湿循环次数的变化曲线(图 3)。

图3 不同干湿循环次数下 c 、 φ 值变化曲线Fig. 3 Changes of c and φ under different drying-wetting cycles

从图3可看出, 3种围压作用下污泥固化土 c 、 φ 值均随干湿循环次数的增大呈现降低趋势, 并最终渐趋稳定。不同中主应力比条件下的 c 值变化趋势可采用式(1)对其进行描述:

$$c = Ae^{-\frac{N}{B}} + D \quad (1)$$

式中: c ——黏聚力;

A 、 B 、 D ——试验参数;

R^2 ——拟合度, 具体参数值见表3。

表3 不同中主应力比下的参数值

Table 3 Parameter values under different medium principal stress ratios

参数	$b=0.00$	$b=0.25$	$b=0.50$	$b=0.75$	$b=1.00$
A	4.298	4.412	4.803	5.067	5.278
B	2.808	3.389	3.818	4.261	4.430
D	23.165	23.896	25.637	26.350	26.677
R^2	0.951	0.990	0.959	0.980	0.971
P	0.022 5	0.027 2	0.028 3	0.031 4	0.032 3
S	1.108 7	1.392 9	1.634 5	1.906 4	2.054 6
T	0.199 2	0.193 2	0.186 2	0.172 0	0.157 6
R^2	0.974 4	0.996 7	0.981 5	0.965 4	0.994 2

由表3可以看出, R^2 均在 0.95 以上, 说明采用式(1)能较好地描述污泥固化土 c 值的变化情况。由表3还可以发现, 参数 A 、 B 、 D 值与中主应力比 b 之间具备良好的线性关系:

$$A = 1.046 2b + 4.249 0 \quad (2)$$

$$B = 1.646 6b + 2.918 1 \quad (3)$$

$$D = 3.792 2b + 23.249 4 \quad (4)$$

将式(2)~(4)代入式(1), 得到污泥固化土 c 值与干湿循环次数 N 、中主应力比 b 之间的关系式:

$$c = 1.046 2b + 4.249 0e^{-\frac{N}{(1.646 6b + 2.918 1)}} + 3.792 2b + 23.249 4 \quad (5)$$

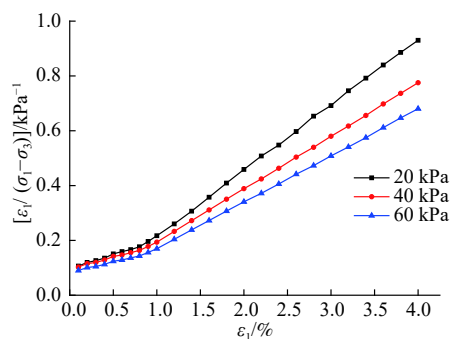
同理, 可以建立 φ 与干湿循环次数 N 以及中主应力比 b 之间的关系式:

$$\varphi = (5.158 1b + 1.989 8)e^{-\frac{N}{(11.529b + 19.503)}} + 12.060 8b + 100.473 \quad (6)$$

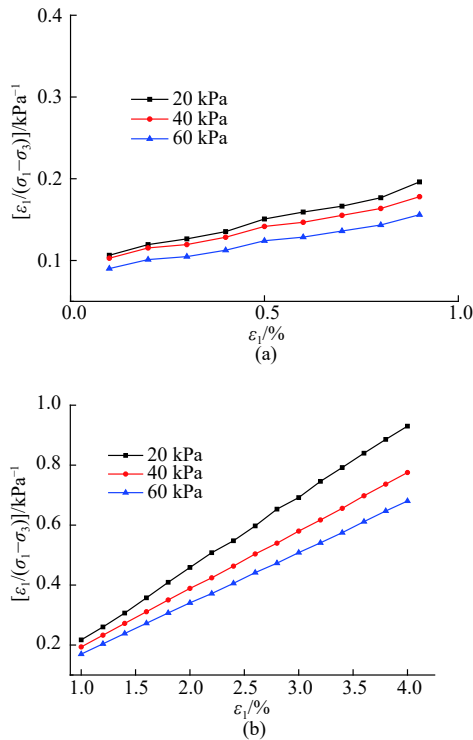
采用式(5)、式(6)对考虑中主应力影响下污泥固化土的 c 、 φ 值进行计算, 并与常规三轴试验得到的 c 、 φ 值进行比较, 发现常规三轴下的数据值低出 6%~10%, 表明将常规三轴试验数据应用于工程会偏于保守, 考虑中主应力影响后固化土强度值将增大 6%~10%, 因此应用真三轴试验参数可充分利用土体力学指标, 对于节省工程造价具有重要的应用价值。

2.3 考虑中主应力比影响的 E_i 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}$ 值变化

由图3可以看出, 其变化趋势基本一致, 因此, 取干湿循环次数 $N=0$ 、中主应力比 $b=0.25$ 条件下, 对其应力-应变关系进行变换, 得到 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ε_1 之间的关系曲线(图4)。由图4可知, 曲线并不具备良好的线性关系, 而在邓肯-张模型中, 应力-应变均呈现线性关系。因此考虑对图4在 $\varepsilon_1=1.0$ 处进行分段研究, 分段曲线变化情况如图5所示。

图4 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ε_1 间关系曲线Fig. 4 Relationship between $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ and ε_1

由图5得到2段应力-应变曲线趋势线, 见表4。由表4可知, R^2 均在 0.98 以上, 说明2段应力-应变曲线均具有良好的线性关系。可以看出, 围压为 20, 40, 60 kPa 时各曲线的变化趋势基本相同, 限于篇幅, 本文仅选取围压 40 kPa 时的 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_1$ 的关系曲线来研究污泥固化土在不同中主应力比 b 条件下的初始弹性模量 E_i 和主应力差渐近值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}$ 变化情况, 结果如图6所示。

图 5 $\varepsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_1$ 关系曲线的第一段 (a) 和第二段 (b)Fig. 5 Relationships of $\varepsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3)$ and ε_1 of (a) the first segment and (b) the second segment表 4 $\varepsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3) \sim \varepsilon_1$ 关系曲线趋势线Table 4 Tendency lines of the relationship between $\varepsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3)$ and ε_1

应力-应变曲线	围压/kPa	趋势线	R^2
第一段	20	$y=0.105x+0.095$	0.986
	40	$y=0.089x+0.094$	0.989
	60	$y=0.078x+0.082$	0.991
第二段	20	$y=0.23x-0.02$	0.994
	40	$y=0.19x+0.01$	0.999
	60	$y=0.17x+0.01$	0.999

对图 6 曲线进行分析,可以得到不同中主应力比下污泥固化土 $1/E_i$ 、 $1/(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}}$ 变化曲线随干湿循环次数 N 变化的函数关系。基于试验数据,建立初始弹性模量 E_i 与循环次数 N 之间的关系式:

$$E_i = \frac{1}{-Pe^{-\frac{N}{S}} + T} \quad (7)$$

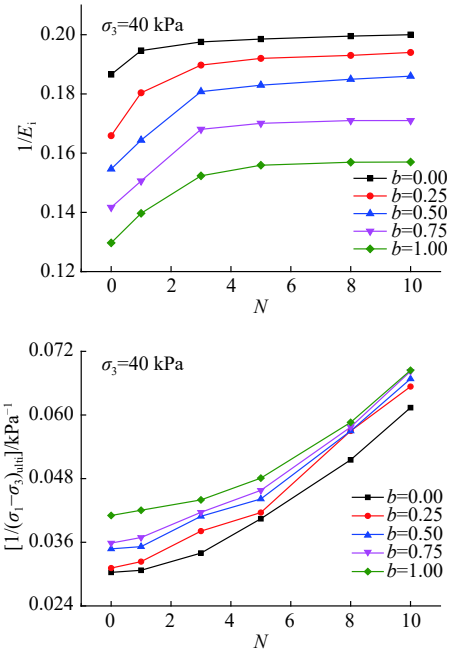
式中: P 、 S 、 T ——试验参数,见表 3。

对各参数 P 、 S 、 T 与中主应力比 b 间的关系继续进行线性分析,得到参数 P 、 S 、 T 的表达式如下:

$$P = 0.0095b + 0.0236 \quad (8)$$

$$S = 0.9621b + 1.1384 \quad (9)$$

$$T = -0.0418b + 0.2025 \quad (10)$$

图 6 不同中主应力比下 $1/E_i$ 和 $1/(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}}$ 值变化曲线Fig. 6 Change of $1/E_i$ and $1/(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}}$ under different medium principal stress ratios

将式(8)~(10)代入式(7),得到初始弹性模量 E_i 与干湿循环次数 N 以及中主应力比 b 之间的关系式:

$$E_i = \frac{1}{-(0.0095b + 0.0236)e^{-\frac{N}{(0.9621b + 1.1384)}} + (-0.0418b + 0.2025)} \quad (11)$$

同理,可以建立主应力差渐近值 $(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}}$ 与干湿循环次数 N 以及中主应力比 b 之间的关系式:

$$(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}} = \frac{1}{(-0.0102b + 0.0149)e^{-\frac{N}{(-3.2962b + 8.4269)}} + 0.0151b + 0.0155} \quad (12)$$

对不同围压下的试验数据进行分析,综合得出不同围压下考虑中主应力比和干湿循环次数的初始弹性模量 E_i 和主应力差渐近值 $(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}}$ 的关系式:

$$E_i = \frac{1}{e^{-\frac{\sigma_3}{(1.9353N + 0.9952)}} - (0.0050b + 0.0102)e^{-\frac{N}{(1.9353b + 0.9952)}} + (-0.0341b + 0.1669)} \quad (13)$$

$$(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}} = \frac{(0.9124e^{2N} + 3.5812)e^{0.6391\sigma_3}}{(-0.0031b + 0.0049)e^{-\frac{N}{(-2.4005b + 6.3614)}} + 0.0049b + 0.0328} \quad (14)$$

为了验证式(13)和式(14)的准确性,取围压 20 kPa、

$b=0.00$ 、 $b=0.50$ 和围压 60 kPa、 $b=0.00$ 、 $b=1.00$, 分别得到 E_i 和 $(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}}$ 在不同干湿循环次数下的预测值与试验值, 对比结果如图 7 所示。

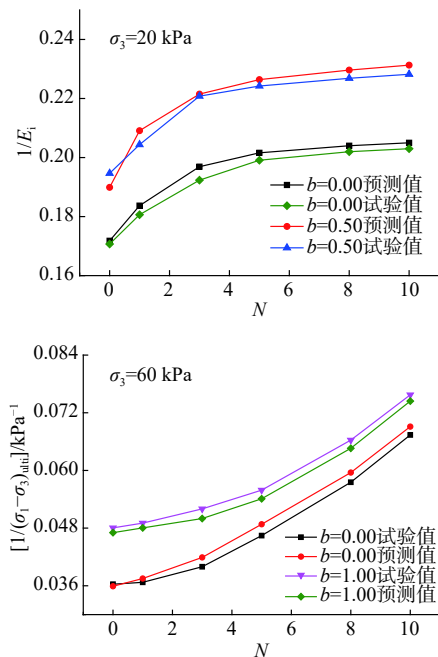


图 7 $1/E_i$ 和 $1/(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}}$ 试验值与预测值对比结果

Fig. 7 Comparison of the test values and predicted values of $1/E_i$ and $1/(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}}$

图 7 表明预测值与试验值整体上较为接近, 说明上述公式可以有效预测污泥固化土在不同围压下考虑中主应力比和干湿循环次数影响的 E_i 和 $(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}}$ 变化情况。

3 结论

(1) 污泥固化土应力-应变曲线初始阶段均近似表现为线性关系, 同等条件下, 破坏应力随中主应力比 b 的增大而增大。相同 b 值下, 破坏应力随循环次数增大而逐渐减小。经过干湿循环 1, 3, 5, 7, 10 次之后, 不同围压下污泥固化土的破坏应力值均呈现下降趋势, 破坏应力在干湿循环作用初始阶段下降比率较大, 当循环次数超过 5 次以后降低幅度趋于平缓。

(2) 相同干湿循环次数下, 破坏应变值随 b 值和围压的增加而增大。在 b 值较小、循环次数小于 3 时, 应力-应变曲线产生应变软化现象, 随着围压和 b 值的增大表现为硬化型。

(3) 污泥固化土 c 、 φ 值随干湿循环次数的增大呈现出降低趋势, 最终渐趋稳定。对不同中主应力比条件下的 c 、 φ 值变化趋势进行分析, 分别构建出其与干

湿循环次数以及中主应力比 b 之间的关系式。

(4) 根据不同中主应力比条件下污泥固化土的初始弹性模量 E_i 和主应力差渐近值 $(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}}$ 变化趋势, 建立了不同围压下考虑中主应力比和干湿循环次数影响的 E_i 、 $(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{ulti}}$ 关系式。

参考文献 (References) :

- [1] 唐菠. 城市生活污水处理厂运行效能评价指标体系研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014. [TANG Bo. Study on the evaluation index system of city sewage treatment plant operation efficiency [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 姜光辉, 李红春, 郭芳. 地下水污染场地水质空间相关性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 137 - 143. [JIANG Guanghui, LI Hongchun, GUO Fang. Spatial variability of multi-tracers in groundwater contamination sites [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(2): 137 - 143. (in Chinese with English abstract)]
- [3] VIEIRA R F, MORICONI W, PAZIANOTTO R A A. Residual and cumulative effects of soil application of sewage sludge on corn productivity [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(10): 6472 - 6481.
- [4] 杨爱武, 胡垚, 杨少坤. 城市污泥新型固化技术及其力学特性 [J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4439 - 4449. [YANG Aiwu, HU Yao, YANG Shaokun. New solidification technology and mechanical properties of municipal sludge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4439 - 4449. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李紫叶. 污泥固化剂的优化配制及其对污泥固化效果研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. [LI Ziyue. Study of optimized distribution of sludge curing agent and solidification effect of sludge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [6] ZHEN G, LU X, CHENG X, et al. Hydration process of the aluminate $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ -assisted Portland cement-based solidification/stabilization of sewage sludge [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30: 675 - 681.
- [7] SUN X, ZHU W, QIAN X, et al. Exploring cementitious additives for pretreatment of high-early-strength sewage sludge from the perspective of the rapid generation of nonevaporable water [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(5): 878 - 885.

- [8] XIN D, CHAI X, ZHAO W. Hybrid cement-assisted dewatering, solidification and stabilization of sewage sludge with high organic content[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2016, 18(2): 356 – 365.
- [9] CHEILAS A, KATSIOTI M, GEORGIADIS A, et al. Impact of hardening conditions on to stabilized/solidified products of cement –sewage sludge –jarosite/alunite[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(4): 263 – 269.
- [10] 林城. 以膨润土为辅助添加剂固化/稳定化污泥的试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007. [LIN Cheng. Study on cement-based solidification/stabilization of sludge using calcium-bentonite as additive [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李磊, 朱伟, 林城, 等. 干湿循环条件下固化污泥的物理稳定性研究 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(10): 3001 – 3004. [LI Lei, ZHU Wei, LIN Cheng, et al. Study of wet and dry properties of solidified sludge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 3001 – 3004. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 易进翔, 王佩, 薛飞, 等. 市政污泥固化土填埋处置中的压缩特性研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2016, 24(1): 139 – 147. [YI Jinxiang, WANG Pei, XUE Fei, et al. Study on compression properties of solidified municipal sludge in landfill disposal[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, 24(1): 139 – 147. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 吴炎, 夏雄, 朱春鹏, 等. 纸浆渣烧结灰(PS灰)和水泥固化污泥水力试验研究 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(4): 753 – 759. [WU Yan, XIA Xiong, ZHU Chunpeng, et al. Experimental study on hydraulic test of sludge solidified with paper sludge ash (PS ash) and cement[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(4): 753 – 759. (in Chinese with English abstract)]
- [14] CALLISTO L, CALABRESI G. Mechanical behaviour of a natural soft clay[J]. *Géotechnique*, 1998, 48(4): 495 – 513.
- [15] KIRKGARD M M, LADE P V. Anisotropic three-dimensional behavior of a normally consolidated clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30(5): 848 – 858.
- [16] 杨利国, 骆亚生, 王瑞瑞. 不同中主应力下压实黄土变形特性的真三轴试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(5): 76 – 80. [YANG Ligu, LUO Yasheng, WANG Ruirui. True triaxial tests on the deformation characteristics of compacted loess with different intermediate principal stress[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(5): 76 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 左永振, 姜景山, 潘家军, 等. 粗粒料变形特性的大型真三轴试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(增刊2): 37 – 40. [ZUO Yongzhen, JIANG Jingshan, PAN Jiajun, et al. Deformation characteristics of coarse granular materials in large-scale true triaxial tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(Sup 2): 37 – 40. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 邓国华, 邵生俊. 基于真三轴试验的黄土结构性变化规律研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(3): 679 – 684. [DENG Guohua, SHAO Shengjun. Research on change structural characteristics of loess based on true triaxial tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(3): 679 – 684. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王云飞, 闫芙蓉, 焦华喆, 等. 重塑黏土真三轴试验强度特性及本构模型研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(6): 1674 – 1679. [WANG Yunfei, YAN Furong, JIAO Huazhe, et al. Experimental investigation on strength and constitutive model of remolded clay under true triaxial test[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(6): 1674 – 1679. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 杨爱武, 胡焱, 王韬, 等. 污泥固化剂及其应用、污泥固化土: 天津, CN106277663A [P]. 2017-01-04. [YANG Aiwu, HU Yao, WANG Tao, et al. Sludge curing agent, application thereof and sludge curing soil: Tianjin, CN106277663A [P]. 2017-01-04. (in Chinese)]
- [21] 杨爱武, 姜帅, 封安坤, 等. 固化轻质土在干湿循环及大变形条件下力学特性研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 93 – 100. [YANG Aiwu, JIANG Shuai, FENG Ankun, et al. A study of the mechanical properties of curing light soil under the condition of drying-wetting circles and large deformation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 93 – 100. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞