

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221124002

干湿循环作用下吹填固化轻质土蠕变特性研究*

杨少朋^{1,2}, 杨爱武¹, 郎瑞卿²

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620;
2. 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)

摘要: 采用新型固化技术对高含水率吹填土进行固化处理, 通过三轴流变仪, 考虑干湿循环次数、围压和初始静偏应力等因素研究其对吹填固化轻质土蠕变变形和抗剪强度指标的影响规律。试验结果表明: 吹填固化轻质土具有密度小、质量轻及强度高优点。在一定程度上, 增大围压可有效缓解吹填固化轻质土的蠕变变形, 而初始静偏应力对其影响较小, 前7次干湿循环对土体破坏应力的影响最大, 而后基本保持不变。抗剪强度指标 c 、 φ 值均随初始静偏应力的增加而逐渐降低, 随干湿循环次数的增加呈现出先减小而后逐渐稳定的趋势, 且前7次干湿循环, 二者均呈指数函数降低; 7次以后, 变化均较小并逐渐稳定。基于 c 、 φ 值与时间关系曲线, 分别构建了不同偏应力作用下吹填固化轻质土 c 、 φ 值的预测公式。根据蠕变曲线发展态势, 通过回归分析, 引入围压、初始静偏应力和干湿循环次数等因素, 建立了吹填固化轻质土蠕变变形预测模型, 并验证了其可行性。研究结果可为实际工程场地提供理论依据。

关键词: 吹填固化轻质土; 干湿循环; 蠕变特性; 抗剪强度指标; 本构模型

中图分类号: TU447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0478-10

Research on Creep Characteristics of Blow-filled Cured Lightweight Soils under the Action of Wet-dry Cycles

YANG Shaopeng^{1,2}, YANG Aiwu¹, LANG Ruiqing²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620;
2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384)

Abstract: A new curing technique was used to treat blow-filled soils with high moisture content. The influence of this technique on creep deformation and shear strength indices of cured lightweight blow-filled soils was studied using triaxial rheometer, considering the number of wet-dry cycles, confining pressure, and initial static deflection stress. The test results showed that the blow-filled cured lightweight soils featured the advantages of low density, light mass, and high strength. Increasing the confining pressure, to some extent, could effectively alleviate the creep deformation of the soil, whereas the initial static deflection stress had less effect on it. The first seven wet-dry cycles had the greatest ef-

* 收稿日期: 2022-11-24; 修回日期: 2023-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978440, 42177119)、中央高校基本科研业务费专项资金(2232021A-07)资助

作者简介: 杨少朋(1994—), 男, 博士研究生。主要从事软土力学性质及地基处理方面的研究。

E-mail: yangsp_tjcj@163.com

通讯作者: 杨爱武(1971—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事软黏土力学特性及土体微观结构方面的研究。

E-mail: tulilab@163.com

fect on the soil's damage stress, after which it remained basically stable. The shear strength indices, c and φ , decreased gradually with the increase in initial static deflection stress, and showed a pattern of initial decrease followed by a gradual stabilization with the increase of wet-dry cycle numbers. Both indices decreased exponentially over the first seven wet-dry cycles, and after that, the changes were smaller and gradually formed stability. Based on the relationship curves between c , φ values, and time, predictive equations for c and φ values of blow-filled cured lightweight soils under different deflection stresses were constructed, respectively. By examining the development of creep curves and using regression analysis with confining pressure, initial static deflection stress, and wet-dry cycle numbers as variables, a predictive model for the creep deformation of blow-filled cured lightweight soils was established, and its feasibility was verified. The results can provide a theoretical basis for practical engineering applications.

Keywords: blow-filled cured lightweight soil; wet-dry cycle; creep characteristics; shear strength parameters; constitutive model

0 引言

随着我国经济的迅速发展,沿海城市和地区土地资源紧缺现象日益突出,利用港口建设及疏浚航道所废弃的大量海底淤泥进行吹填造陆,是解决这一问题的重要举措。由于吹填土中粘土矿物含量较高,力学性质较差^[1],无法直接应用于工程实践中,导致天津滨海新区目前仍有大量的吹填场地处于空置状态。因此,如何合理、绿色、高效地利用吹填场地一直以来都是学者们研究的重点和难点。

鉴于吹填场地传统处理方式存在施工周期长、耗费能源大且效果不佳等问题^[2-4],许多学者开始通过固化处理技术来改良吹填土,并取得一定的研究成果。如:C. M. Chan等^[5]利用粉煤灰和水泥对吹填土进行固化处理,并对固化土的物理化学特性展开大量数据分析;杨爱武等^[6]和A. Nur等^[7]认为石灰等固化材料能够较好的增大吹填土强度,且随着养护龄期的增长,其强度也会逐渐增大,同时,添加多种固化剂要比单独加入某一固化剂的效果更好。

固化土作为路基填料应用于工程实际中,多变的自然气候环境(雨水渗透和太阳曝晒)和长期的静力荷载均会导致土体力学特性劣化,甚至整体破坏^[8]。近年来,学者们关于土体在干湿循环和蠕变特性方面进行了大量研究,硕果累累。李磊等^[9]研究表明干湿循环会对固化土的强度造成衰减影响,但对其体积变化的影响相对较小;A. Aldaood等^[10]探讨了石膏土中石灰含量对干湿循环作用的影响,表示石灰掺量应大于3%,可以增强石膏土干湿循

环耐久性;何中江等^[11]认为固化污染土的抗压强度随干湿循环次数的增加而增强;Z. Wang等^[12]根据固化土的干湿循环耐久性和无侧限抗压强度,估算出适宜的粉煤灰掺量;雷华阳等^[13]研究了软黏土在不同因素影响下,其蠕变变形及强度变化规律,在试验数据的基础上,提出蠕变变形或长期强度的变形公式;陈琼等^[14]探讨了不同试验条件下黄土的蠕变变形规律,并推出一系列蠕变变形预测公式。

综上所述,目前学者们对吹填土改良的研究主要集中在固化技术及相应机理方面,考虑干湿循环作用时仅通过无侧限抗压强度和三轴剪切等常规试验来讨论固化土力学特性变化规律。然而,现有技术配制而成的吹填固化土,虽然其强度符合工程要求,但容重较大,作为工程填料等进行大范围使用时容易产生较大的附加应力,对工程造成不良影响,此外,现有研究对于干湿循环作用下吹填固化轻质土长期工程性质变化缺乏深入探讨,对有初始荷载和干湿循环耦合作用下土体长期力学性质劣化的研究更是鲜有提及。基于此,本文采用新型固化技术对高含水率吹填土进行固化处理,在提高固化土强度的同时降低其容重,并在此基础上,引入干湿循环次数、初始静偏应力和围压等因素探讨其对吹填固化轻质土蠕变特性的影响规律,为改善吹填固化轻质土长期工程性质提供理论依据。

1 试样制备与试验方案

试验所用吹填土,取自天津滨海某工业区吹填

场地,其基本物性指标见表1。所用固化剂为自主研发,包括主剂和辅剂两部分,其中主剂为普通硅酸盐水泥,与干土和水混合容易发生一系列复杂的水化反应,生成大量的胶结物质,这些胶结物质增加了土颗粒间的黏结力,从而提高了土体的强度;辅剂为白色粉末状物质,易与混合料中的水分发生剧烈的化学反应,并释放大量的热,促进水分的挥

发,同时也提供了良好的碱性环境,有利于土体内部胶结物质的生成,进而加快土体强度增长速度和最终强度;发泡剂是采用复配技术研发而成,与混合料发生化学反应,在固化土内部产生大量均匀细密的气泡,从而降低了固化土的密度,具有发泡迅速、成型快等特点,同时满足试验实用性及成本经济性的要求。

表1 天津滨海吹填土基本物性指标

Table 1 Basic physical indices of blow-filled soils in Tianjin Binhai

孔隙比 e	含水量 ω / %	密度 ρ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比重 G_s	液限 ω_L / %	塑限 ω_p / %	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩模量 E_s / MPa
1.279	46.1	1.74	2.73	43.1	25.4	17.9	1.16	2.618

试样制备的具体步骤如下:为保证试验材料在制备过程中的统一及均匀性,先将取回的原状土进行大面积晾晒,去除水分和杂质,并将其捣碎成小块,便于放置在烘箱内,持续烘干12 h,然后利用球磨机研磨,并过直径为1 mm的标准筛,最后得到粉末干土。将自制的模具(直径39.1 mm、高度80 mm)清理干净,并在有机玻璃管内壁涂抹凡士林,同时在底部绑扎土工布,按照正交试验最优配比方案(表2),将干土、固化剂、发泡剂和水进行混合,搅拌均匀,为保证试样均匀且无大空隙,混合土料分两次加入,并对其进行多次振动,待装至预定高度,将试样密封养护在恒温恒湿箱内,养护2 d试样成型,再进行脱模处理,并将试样使用保鲜膜包裹,放置在密闭的恒温恒湿箱内继续养护28 d后取出,测得其密度为1.28 g/cm^3 ,比天津滨海吹填土的密度减少26%,这充分体现出吹填固化轻质土密度小、质量轻的特点。

表2 吹填固化轻质土制备方案

Table 2 Preparation method for blow-filled cured lightweight soils

固化材料	干土:水	固化剂主剂	固化剂辅剂	发泡剂
含量/%	1:8	9	4	0.08

注:1.水与干土的质量比之和为100%;2.固化剂主剂、辅剂和发泡剂均按与水与干土总质量的百分比添加

干湿循环试验具体操作步骤:首先,将试样用保鲜薄膜包紧,放在透水石上,然后将其放入自制模具中,模具中事先注入一部分水,大约1 cm的高度,由于吹填固化轻质土存在毛细作用,试样会慢慢吸入水份。为方便水份分布均匀,在试样的上

部,采用自制的滴水瓶滴水,水头与试样上部贴近,直至试样完全湿化,随后放入恒温恒湿箱内,静置2 h,然后取出,将其放入烘箱中低温烘干12 h,最后去除保鲜膜,试样在室温下放置2 h,此为一个循环。此外,在每次湿化与干化后,对试样进行称重,保证每个试样的质量相差小于1%,方可进行下一步操作。

不同初始静偏应力作用下吹填固化轻质土的三轴剪切峰值强度与干湿循环次数的关系曲线,如图1所示。由图1可知,吹填固化轻质土的三轴剪切峰值强度随干湿次数的增加而先减小,后逐渐趋于稳定,且不同初始静偏应力作用下变化趋势大体一致。吹填固化轻质土的强度衰减主要发生在前5次干湿循环,其强度衰减量占14次干湿循环后强度衰减量的75%,循环7次之后逐渐稳定,10次之后,强度不再变化。因此,选择0、1、3、5、7、10次干湿循环作为影响次数研究较为合适。

试验所采用仪器是型号为TSS10型的三轴流变仪。考虑吹填固化轻质土作为路基填料,施工固

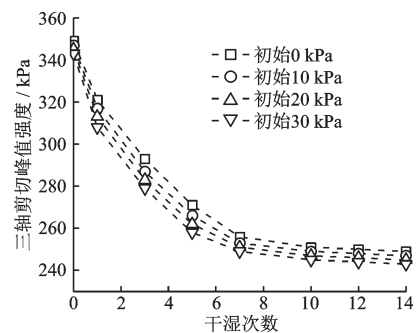


图1 三轴剪切峰值强度与干湿循环次数关系

Fig.1 Relationship between triaxial shear peak strength and number of wet-dry cycles

化期间无需固结,且实际施工场地排水条件较差,因此试验条件为不固结不排水;为模拟填料不同深度的埋深,围压选择20、40、60、80 kPa,初始静偏应力选择0、10、20、30 kPa;偏应力幅值的选取参考常规三轴剪切试验时,吹填固化轻质土的峰值破坏强度。试验稳定判定标准为,土样在24 h内变形量小于0.01 mm时,方可进入下一级应力水平试验^[15],最终确定加载时长为96 h。具体试验方案见表3。由于试验所考虑因素较多,逐一描述和分析试验结果篇幅较长,为重点突出所选因素的有效性,故采用控制单一变量法,即每个影响因素,仅选择其中一种进行阐述剖析,其方案见表4。

表3 蠕变试验方案
Table 3 Creep test scheme

围压/ kPa	加载 方式	试验 条件	初始静偏 应力/kPa	干湿循 环次数	加载 时间/h
20/40/ 60/80	分级 加载	不固结 不排水	0/10/20/ 30	0/1/3/ 5/7/10	1/2/4/8/ 12/24/96

表4 具体试验方案
Table 4 Specific test schemes

围压/ kPa	初始 静偏 应力/kPa	干湿 循环 次数	偏应力幅值/s/kPa
20	10	3	50、100、150、190、220、250、280
40			50、100、150、190、220、250、290
60			50、100、150、190、230、260、300
80			50、100、150、200、240、270、310
40	0	3	50、100、150、200、230、270、310
	10		50、100、150、190、220、250、290
	20		50、100、150、190、220、250、280
	30		50、100、150、190、220、240、270
40	10	0	50、100、150、200、250、300、350
		1	50、100、150、190、240、270、310
		3	50、100、150、190、220、250、290
		5	50、100、150、180、210、240、270
40	10	7	50、100、150、170、200、230、250
		10	50、100、150、170、190、220、240

2 试验成果与分析

2.1 应变—时间关系曲线

图2为初始静偏应力10 kPa、干湿循环3次的不同

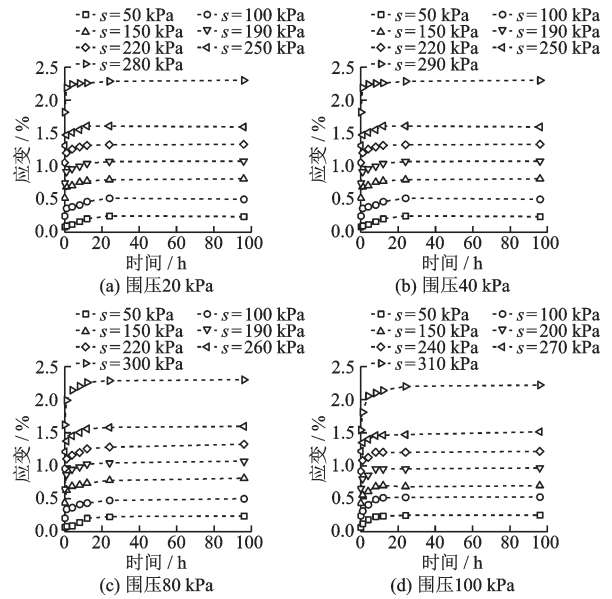


图2 不同围压下吹填固化轻质土的应变—时间关系曲线
Fig.2 Strain-time relationship curves for blow-filled cured lightweight soils under different confining pressures

同围压下吹填固化轻质土的应变—时间关系曲线。

由图2可以看出,不同围压和偏应力作用下吹填固化轻质土的应变—时间关系曲线变化规律大致相同,应变随着时间增加,呈现出在1 h前先快速增大,随后缓慢增加至24 h,之后基本稳定的趋势。原因在于加载1 h时,对初始土体变形产生的影响较大,土体会发生瞬时、弹性以及弹塑性阶段的变形,时间较短,而且变形量较大。随着加载时间增加,土体内部结构不断调整,颗粒间的联结和排列逐渐稳定,抵抗变形的能力不再变化,因此宏观上表现为土体的应变随时间先增大后稳定的态势。还可以看出,同一应变下,随着围压的增大,施加在吹填固化轻质土上的偏应力在逐渐增大,最大偏应力由280 kPa增大至310 kPa,增长率为11%,最大蠕变量降低4.1%。这是因为围压的增大,对土体变形产生“紧箍”作用,增强了土体结构的稳定性,土颗粒间的联结与咬合能力变得紧密,土体强度变大,从而增大了土体抵抗变形的能力。可见在实际工程中增大土体的固结压力,在一定程度上能有效缓解土体的蠕变效应。

图3为围压40 kPa、干湿循环3次的不同初始静偏应力下吹填固化轻质土的应变—时间关系曲线。由图可知,随着初始静偏应力的增加,同一偏应力下土体的蠕变量在逐渐减小,其中,在偏应力小于190 kPa时,蠕变现象不太明显,蠕变增长率均小于2.8%,而当偏应力大于190 kPa时,蠕变现象显著,

蠕变增长率均大于10.8%。究其原因,虽然初始静偏应力的施加会破坏土体结构,减弱土颗粒间的联结和咬合能力,但吹填固化轻质土具有较强的结构性,且试验施加的初始静偏应力远小于土体的结构屈服应力,因此,初始静偏应力对吹填固化轻质土蠕变变形的影响较小,而当初始静偏应力和偏应力组成的合力大于土体的结构屈服应力时,土体结构大量损伤,土颗粒间的联结破坏严重,土体抵抗变形的能力大幅度下降,故宏观上吹填固化轻质土的蠕变效应显著。

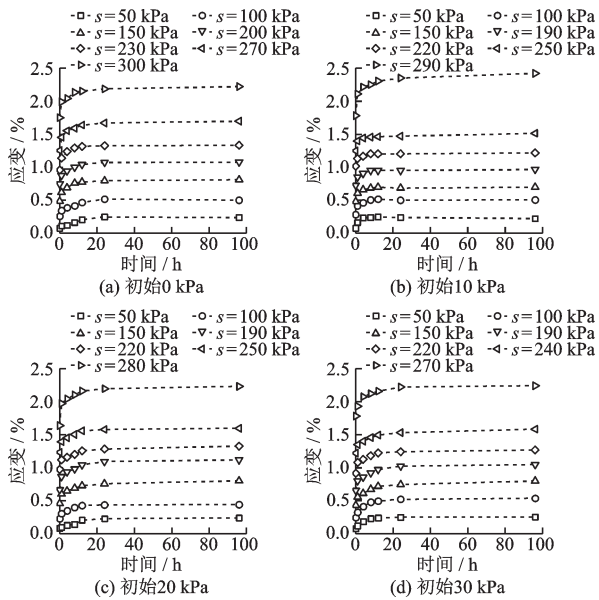


图3 不同初始静偏应力下吹填固化轻质土的应变—时间关系曲线

Fig.3 Strain-time relationship curves for blow-filled cured lightweight soils under different initial static deflection stresses

图4为围压40 kPa、初始静偏应力10 kPa的不同干湿循环次数下吹填固化轻质土的应变—时间关系曲线。由图可以看出,干湿循环对土体破坏应力的影响较大,随着干湿循环次数的增多,土体达到破坏应变时的偏应力在逐渐减小,其中,前7次干湿循环对土体破坏应力的影响最大,最大破坏应力从350 kPa减小到250 kPa,而后3次干湿循环,最大破坏应力仅减小了10 kPa,这与三轴剪切试验现象一致。原因在于吹填固化轻质土强度主要来源于混合料中土颗粒间复杂的接触联结及相互咬合、滑动所产生的黏聚力和内摩擦力,在经过前7次干湿循环后,发生失水干缩与吸水湿胀等现象,导致土体内部出现了较多裂缝,水份过多的出入裂缝,致

使颗粒间的联结弱化,改变了原有的滑动现象,从而降低了土体的黏聚力和内摩擦力,其宏观表现为土体的强度明显下降;但在经过更多次的干湿循环后,土体中发生失水干缩与吸水湿胀等现象不再明显,裂缝不再继续扩大或增多,颗粒间的接触与咬合达到稳定状态,强度也就逐渐趋于稳定。

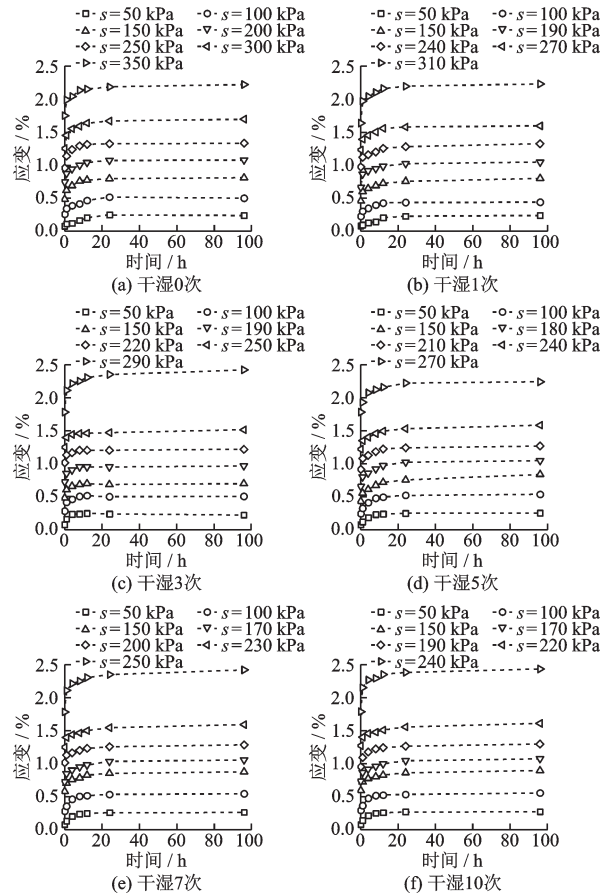


图4 不同干湿循环次数下吹填固化轻质土的应变—时间关系曲线

Fig.4 Strain-time relationship curves for blow-filled cured lightweight soils under different numbers of wet-dry cycles

2.2 抗剪强度指标

依据蠕变试验中的应变—时间关系曲线,采用沈明荣等^[16]的方法可求得吹填固化轻质土的长期强度,根据每组试样的围压和长期强度值,并结合莫尔-库伦强度理论,可得莫尔强度包络线,进而得到吹填固化轻质土抗剪强度指标 c 、 φ 值与初始静偏应力及干湿循环次数的关系曲线。

图5为抗剪强度指标 c 、 φ 值与初始静偏应力的关系曲线。

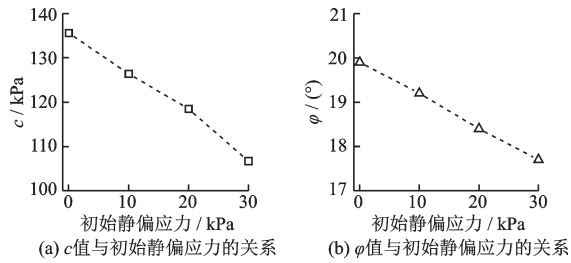


图5 抗剪强度指标 c 、 φ 值与初始静偏应力的关系曲线
Fig.5 Relationship curves between shear strength indices and initial static deflection stresses

由图5可以看出,吹填固化轻质土的抗剪强度指标 c 、 φ 值均随初始静偏应力的增加而逐渐降低。原因在于,初始静偏应力的施加在一定程度上对土体结构造成不可逆的损伤,固化轻质土颗粒间的胶结物质及静电引力作用受损,使得固化轻质土的黏结力下降,同时,由于胶结物质破碎,细小颗粒填补裂缝或孔隙,增加了土颗粒间的滑动能力,降低了因凹凸面间的镶嵌作用所产生的摩阻力,致使固化轻质土的内摩擦角减小。

图6为抗剪强度指标 c 、 φ 值与干湿循环次数的关系曲线。

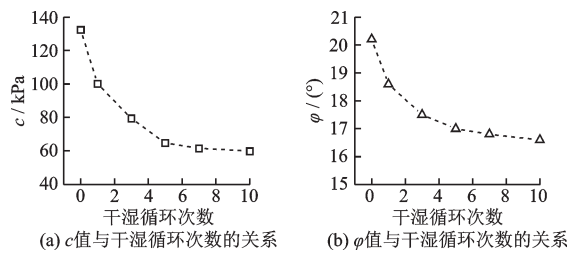


图6 抗剪强度指标 c 、 φ 值与干湿循环次数的关系曲线
Fig.6 Relationship curves between shear strength indices and numbers of wet-dry cycles

由图6可以看出,吹填固化轻质土的抗剪强度指标 c 、 φ 值均随着干湿循环次数的增加呈现出先减小而后逐渐稳定的趋势,前7次干湿循环,二者均呈指数函数降低,7次以后均变化不大,逐渐形成稳定。这是因为吹填固化轻质土在少次干湿循环作用下,土体内部结构发生扰动,土颗粒间的胶结物质变得不太稳定,容易遭到大量破坏,使得颗粒间的黏结力大大降低,但多次干湿循环后,土体不稳定结构破坏完全,颗粒间的联结重新排列组合,恢复相对稳定的态势,进而干湿循环影响越来越小,黏聚力变化趋于稳定。同时,在少次干湿循环作用下土体内部由于胶结物质的脆化,土体结构发生破坏,产生较多的裂缝或孔隙,颗粒间距离增加,颗粒

会变得松散,相互之间的咬合与“自锁”作用降低,表现为内摩擦角快速减小,但是多次干湿过程中所形成的基质吸力以及颗粒排列组合稳定凹凸面间的镶嵌作用所产生的摩阻力,一定程度上使得颗粒内部的孔隙减小,颗粒发生相对位移的阻力相对增大,因此在多次干湿循环过程后,内摩擦角的变化相对稳定。

探讨吹填固化轻质土的长期力学性能,必然要考虑时间效应。限于篇幅,仅选择初始静偏应力为10 kPa、干湿循环3次的试样,深入探讨吹填固化轻质土的长期抗剪强度指标变化规律。图7为不同偏应力下吹填固化轻质土抗剪强度指标 c 、 φ 值随偏应力加载时间的变化关系曲线。

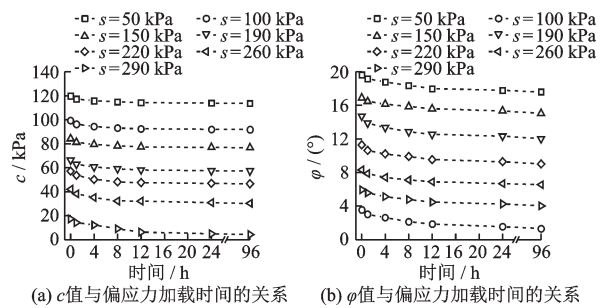


图7 抗剪强度指标 c 、 φ 值与偏应力加载时间的关系曲线
Fig.7 Relationship curves between shear strength indices and deflection stress loading time

由图7可知,吹填固化轻质土的抗剪强度指标 c 、 φ 值均随加载时间的增加而逐渐降低,其中加载12 h时,固化轻质土的抗剪强度指标衰弱很大,占96 h衰减量的70%以上,可见固化轻质土在加压12 h后,其抗剪强度指标的变化相对稳定,在长期静力加载中,其抗剪强度变得相对平稳,蠕变效果不再明显。同时也可以看出,偏应力越大,固化轻质土的 c 、 φ 值越小。主要因为偏应力越大,对土体结构的损伤越大,土体抵抗外荷载作用的能力减弱,颗粒间的咬合联结以及颗粒滑动所产生摩阻力大大降低,表现为固化轻质土的抗剪强度指标 c 、 φ 值越来越小。

通过对不同偏应力下吹填固化轻质土抗剪强度指标 c 、 φ 值与偏应力加载时间的变化关系进行分析,发现二者分别可用公式1和公式2表示:

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

$$\varphi = He^{-\frac{t}{I}} + G \quad (2)$$

式中, A 、 B 、 D 、 H 、 I 、 G 均为相关参数,其具体数值见表5。

表5 具体参数值

Table 5 Specific parameters

抗剪强度指标	参数	偏应力/kPa						
		50	100	150	190	220	260	290
c	A	5.290 2	6.694 6	6.694 6	8.039 2	9.742 0	10.680 6	12.479 0
	B	3.525 2	3.475 9	3.475 9	3.840 9	3.520 0	4.139 3	7.762 4
	D	113.885	91.996 7	76.997	57.508	46.881	30.728 6	4.145 4
φ	H	1.887 0	2.038 3	1.646 5	2.310 01	1.978 2	1.613 2	1.769 8
	I	7.731 6	8.155 0	10.011 4	6.108 0	7.722 5	6.379 5	7.983 1
	G	17.629 3	1.375 8	15.087 5	12.165 1	9.102 4	6.606 4	4.089 3

为了验证抗剪强度指标公式(1)与公式(2)的准确性,选择偏应力为200 kPa的吹填固化轻质土进行试验,试验结果与公式计算结果如图8所示。

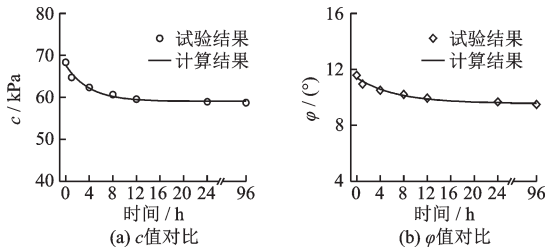


图8 试验结果与计算结果对比

Fig.8 Comparison between experimental and calculation results

由图8可以看出,计算曲线与试验结果的吻合度较高,说明本文给出的吹填固化轻质土抗剪强度指标c、φ值的预测公式,可以较好地描述固化轻质土在不同偏应力作用下抗剪强度指标c、φ值与加载时间的关系,并验证了其可行性。

3 吹填固化轻质土蠕变变形预测模型

根据吹填固化轻质土的应变—时间关系曲线变化趋势,并对其中1条蠕变曲线进行拟合,发现应变—时间关系可用幂函数表述。考虑到蠕变曲线影响因素较多,综合分析较为复杂,因此,在有限的试验条件下,优先选择试验数据较多的偏应力150 kPa的蠕变曲线进行分析,得到经验模型为:

$$\epsilon_{150} = L * e^{-\frac{t}{M}} + N \quad (3)$$

式中,ε₁₅₀为偏应力150 kPa时的应变变量;e为自然对数;L、M、N均为关于围压、初始静偏应力及干湿循环次数的参数值。

将不同围压下吹填固化轻质土的应变—时间曲线利用公式(3)进行计算,得到其参数见表6。

表6 不同围压参数表

Table 6 Parameters under different confining pressures

围压/ kPa	参数			相关系数 R ²
	L	M	N	
20	-0.252 7	3.125 9	0.773 4	0.999 5
40	-0.278 5	3.763 2	0.763 4	0.998 4
60	-0.293 2	4.392 6	0.754 8	0.993 4
80	-0.324 5	4.870 6	0.744 5	0.999 1

由表6可知,各参数与围压分别为:

$$L = O * \sigma_3 + Z \quad (4)$$

$$M = O * \sigma_3 + Z \quad (5)$$

$$N = O * \sigma_3 + Z \quad (6)$$

式中,O、Z均为计算参数值。具体参数见表7。

表7 O和Z参数表

Table 7 O and Z parameters

参数	O	Z	相关系数R ²
L	-4.765E-4	-0.229 7	0.999 2
M	0.029 3	2.572 2	0.999 7
N	-0.001 1	0.782 9	0.998 6

利用公式(3)对不同初始静偏应力下吹填固化轻质土的应变—时间曲线进行计算,得到其参数见表8。

对表8分析发现,各参数与初始静偏应力分别为:

$$L = Q * q + Y \quad (7)$$

$$M = Q * q + Y \quad (8)$$

$$N = Q * q + Y \quad (9)$$

式中,Q、Y均为计算参数值。具体参数见表9。

表 8 不同初始静偏应力参数表

Table 8 Parameters under different initial static deflection stresses

初始静偏 应力/kPa	参数			相关系数 R^2
	L	M	N	
0	-0.284 5	3.493 6	0.799 6	0.998 6
10	-0.296 5	3.646 8	0.814 1	0.999 4
20	-0.304 5	3.801 2	0.821 6	0.996 7
30	-0.313 6	3.972 6	0.832 4	0.999 3

表 9 Q 和 Y 参数表

Table 9 Q and Y parameters

参数	Q	Y	相关系数 R^2
L	-9.53E-4	-0.285 5	0.998 2
M	0.015 9	3.489 8	0.998 6
N	0.001 1	0.801 1	0.999 6

将不同干湿循环次数下吹填固化轻质土的应变-时间曲线利用公式(3)进行计算,得到其参数见表10。

表 10 不同干湿循环次数参数表

Table 10 Parameters under different numbers of wet-dry cycles

干湿循环 次数	参数			相关系数 R^2
	L	M	N	
0	-0.284 5	3.493 6	0.795 6	0.991 6
1	-0.287 5	3.512 6	0.817 7	0.993 5
3	-0.292 4	3.526 4	0.836 6	0.987 8
5	-0.296 6	3.532 4	0.842 6	0.995 1
7	-0.297 6	3.546 2	0.855 4	0.996 2
10	-0.302 3	3.557 8	0.868 7	0.997 1

分析表10发现,各参数与干湿循环次数分别为:

$$L = W * n + X \quad (10)$$

$$M = W * n + X \quad (11)$$

$$N = W * n + X \quad (12)$$

式中, W 、 X 均为计算参数值。具体参数见表11。

表 11 W 和 X 参数表

Table 11 W and X parameters

参数	W	X	相关系数 R^2
L	-0.001 7	-0.285 9	0.997 1
M	0.005 9	3.502 5	0.998 2
N	0.006 7	0.807 2	0.991 5

分析表7、9、11数据可发现,其参数相差较小,故将 L 、 M 、 N 的整合公式为:

$$L = \frac{1}{3}(O * \sigma_3 + Z + Q * q + Y + W * n + X) \quad (13)$$

$$M = \frac{1}{3}(O * \sigma_3 + Z + Q * q + Y + W * n + X) \quad (14)$$

$$N = \frac{1}{3}(O * \sigma_3 + Z + Q * q + Y + W * n + X) \quad (15)$$

将公式(13)~(15)与表7、9、11中参数代入公式(3),可得吹填固化轻质土在偏应力为150 kPa且不同围压、初始静偏应力及干湿循环次数下的蠕变变形预测公式。利用公式(3)计算不同偏应力下的蠕变变形,发现其变形量 ϵ_{150} 与偏应力存在线性关系,通过最小二乘法计算,得到公式(16),即:

$$\epsilon = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{150} \epsilon_{150} \quad (16)$$

式中, σ_1 为轴向压力; σ_3 为围压。

因此,将公式(13)~(15)与表7、9、11中参数代入公式(16),可得吹填固化轻质土的蠕变变形预测模型,且引入了围压、初始静偏应力及干湿循环等参数。

为了验证预测公式的准确性以及适用性,选择围压50 kPa、初始静偏应力25 kPa以及干湿循环5次的吹填固化轻质土进行蠕变试验,将试验结果与预测公式计算结果进行比对验证,验证效果如图9所示。

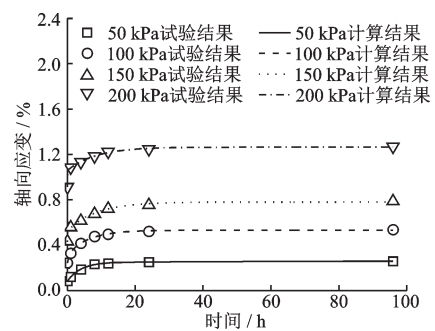


图9 验证效果

Fig.9 Validation results

从图9可以看出,试验结果与计算结果的匹配度较高,相关系数均在0.92以上,说明本文给出的经验模型可以较好的描述吹填固化轻质土在围压、初始静偏应力及干湿循环等因素影响下其蠕变变形的发展趋势。

4 结 论

(1)吹填固化轻质土具有密度小、质量轻及强度高优点。在一定程度上,增大围压可使吹填固化轻质土的最大偏应力增长11%,最大蠕变量降低4.1%;初始静偏应力对吹填固化轻质土蠕变变形的影响较小;前7次干湿循环对土体破坏应力的影响最为显著,最大破坏应力可减小100 kPa,而后基本保持不变。

(2)吹填固化轻质土的抗剪强度指标 c 、 φ 值均随初始静偏应力的增加而逐渐降低,随干湿循环次数的增加呈现出先减小而后逐渐稳定的趋势,且前7次干湿循环,二者均呈指数函数降低,7次以后,变化均较小并逐渐形成稳定。基于 c 、 φ 值与时间关系曲线,分别构建了不同偏应力作用下吹填固化轻质土 c 、 φ 值的预测公式。

(3)根据蠕变曲线发展态势,通过回归分析,引入围压、初始静偏应力和干湿循环次数等因素,建立了吹填固化轻质土蠕变变形预测模型,并验证了其可行性。

参考文献:

- [1] 刘莹,王清,肖树芳.不同地区吹填土基本性质对比研究[J].岩土工程技术,2003(4):197-200.
Liu Y, Wang Q, Xiao S F. A comparative study on the basic properties of blown-in soils in different regions[J]. Geotechnical Engineering, 2003(4): 197-200. (in Chinese)
- [2] 杜东菊,杨爱武,刘举,等.天津滨海吹填土[M].北京:科学出版社,2010.
Du D J, Yang A W, Liu J, et al. Tianjin Binhai blowing soils [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [3] 鞠兴华,杨晓华,张莎莎.水泥粉煤灰建筑垃圾桩处理软土地基试验研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(4):723-730.
Ju X H, Yang X H, Zhang S S. Experimental study on soft soil foundation treatment by cement fly ash construction waste pile[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 723-730. (in Chinese)
- [4] 牛恒,孙德安,阮坤林.掺粉煤灰和二灰上海软土的力学特性[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):992-1000.
Niu H, Sun D A, Ruan K L. Mechanical properties of soft soil mixed with fly ash and ash in Shanghai [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 992-1000. (in Chinese)
- [5] Chan C M, Pun K H, Ahmad F. A fundamental parametric study on the solidification of Malaysian dredged marine soils [J]. World Applied Sciences, 2013, 24(6): 784-793.
- [6] 杨爱武,王韬,许再良.石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究[J].工程地质学报,2015,23(5):996-1004.
Yang A W, Wang T, Xu Z L. Experimental study of lime and its admixtures for curing soft soils in Binhai, Tianjin [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 996-1004. (in Chinese)
- [7] Nur A, Hafez M, Norbaya S. Study of bearing capacity of lime-cement columns with pulverized fuel ash for soil stabilization using laboratory model[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2011(16): 1595-1605.
- [8] 徐杨,曹磊,阎长虹,等.城市河道淤泥固化土干湿耐久性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(5):1028-1035.
Xu Y, Cao L, Yan C H, et al. Experimental study on dry and wet durability of urban river silt curing soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 1028-1035. (in Chinese)
- [9] 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 L, Zhu W, Lin C, et al. Study on the physical stability of cured sludge under dry and wet cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3001-3004. (in Chinese)
- [10] Aldaood A, Bouasker M, Al-Mukhtar M. Impact of wetting-drying cycles on the micro structure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils [J]. Engineering Geology, 2014, 174: 11-21.
- [11] 何中江,柴寿喜,李敏.干湿循环对石灰粉煤灰固化石油污染土抗压强度的影响[J].工程地质学报,2018,26(2):438-444.
He Z J, Chai S X, Li M. Effect of wet and dry cycles on the compressive strength of petroleum-contaminated soils cured by lime fly ash [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 438-444. (in Chinese)
- [12] Wang Z, Wei B, Wu X, et al. Effects of dry-wet cycles on mechanical and leaching characteristics of magnesium phosphate cement-solidified Zn-contaminated soils

- [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(14): 18111-18119.
- [13] 雷华阳, 仇王维, 贺彩峰, 等. 滨海软黏土加速蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 75-82.
Lei H Y, Qiu W W, He C F, et al. Experimental study on accelerated creep properties of soft clay soils in coastal areas [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 75-82. (in Chinese)
- [14] 陈琼, 崔德山, 王菁莪, 等. 不同固结状态下黄土坡滑坡滑带土的蠕变试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1635-1642.
Chen Q, Cui D S, Wang J E, et al. Experimental study of creep in landslide zone soils of loess slopes under different consolidation conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1635-1642. (in Chinese)
- [15] 杨爱武, 钟晓凯, 梁超, 等. 吹填泥浆固化及长期力学性能试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2589-2596.
Yang A W, Zhong X K, Liang C, et al. Experimental study on solidification and long-term mechanical properties of dredger fill [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2589-2596.
- [16] 沈明荣, 谌洪菊, 张清照. 基于蠕变试验的结构面长期强度确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 1-7.
Shen M R, Chen H J, Zhang Q Z. A creep test-based method for long-term strength determination of structural faces [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 1-7. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)