

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240825001

## 静压压实工艺对工程渣土固化土强度影响的 试验研究\*

王欣正<sup>1</sup>, 孔纲强<sup>1</sup>, 陈永辉<sup>1</sup>, 唐叶新<sup>2</sup>, 姚冬雷<sup>3</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 江阴市城乡规划设计院有限公司, 江苏 江阴 214400; 3. 江阴市市政建设工程有限公司, 江苏 江阴 214411)

**摘要:** 工程渣土和工业固废资源化利用, 是解决无废城市建设的重要举措之一; 以改性硅藻土、磷石膏和电石渣为环保低碳固废基固化剂, 对苏州市基坑开挖工程渣土进行固化资源化试验; 以改性硅藻土: 电石渣: 磷石膏=0.39: 0.23: 0.38 的配比为固化剂(掺量8%), 探讨压实工艺中初始含水率和压实压力等因素对固化土压实度和无侧限抗压强度的影响规律, 以压实压力与压实时间作为控制压实度进一步影响强度的变量, 细化压实工艺对固化土强度提升的最优参数。研究表明, 试验条件下, 当工程渣土初始含水率为液限, 其最佳压实工艺参数压实压力约为 0.92 MPa、压实时间约为 20 min, 固化土 28 d 强度可达 2.39 MPa; 当初始含水率 < 20% 时, 固化剂在土颗粒间水化不充足, 提高压实压力促进固化剂在土颗粒间反应, 对强度提升影响相对较大; 当初始含水率超过液限时, 土颗粒与固化剂间形成了水膜, 隔离了接触, 影响了胶结能力导致强度降低。

**关键词:** 工程渣土; 压实工艺; 固化剂; 无侧限抗压强度

**中图分类号:** TU502 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0375-09

### Experimental Study on Effect of Static Compaction Technology on Strength of Stabilized Engineering Residual Soil

WANG Xinzheng<sup>1</sup>, KONG Gangqiang<sup>1</sup>, CHEN Yonghui<sup>1</sup>, TANG Yexin<sup>2</sup>, YAO Donglei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Jiangyin Urban and Rural Planning and Design Institute Co., Ltd., Jiangyin 214400, China; 3. Jiangyin Municipal Construction Engineering Co., Ltd., Jiangyin 214411, China)

**Abstract:** The resource utilization of engineering residual soil and industrial solid waste is one of the key measures for advancing the development of "zero-waste cities". Using modified diatomite, phosphogypsum, and carbide slag as eco-friendly and low-carbon solid waste-based stabilizers, stabilization and resource utilization tests were conducted on excavated residual soil from Suzhou foundation pit projects. With a stabilizer mix ratio of modified diatomite: carbide slag : phosphogypsum=0.39: 0.23 : 0.38 (8% dosage), the effects of initial moisture content and compaction pressure on the com-

\* 收稿日期: 2024-08-25; 修回日期: 2024-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(52178327)资助

作者简介: 王欣正(2000—), 男, 硕士研究生。主要从事废弃土资源化利用方面的研究。E-mail: 2456438520@qq.com

通信作者: 孔纲强(1982—), 男, 教授、博导, 博士。主要从事能源地下结构与工程方面的教学与科研工作。

E-mail: gqkong1@163.com

paction degree and unconfined compressive strength (UCS) of stabilized soil were investigated. Taking compaction pressure and duration as variables controlling compaction degree and subsequent strength, the optimal parameters of compaction technology for strength enhancement were refined. The results showed that under test conditions in this study, when the initial moisture content reached the liquid limit, the optimal compaction parameters were 0.92 MPa for 20 minutes, achieving 2.39 MPa UCS on day 28. When the initial moisture content fell below 20%, the hydration of the stabilizers among soil particles was insufficient. Increasing the compaction pressure significantly promoted the reaction of stabilizers among soil particles, resulting in a relatively significant influence on strength enhancement. When the initial water content exceeded the liquid limit, a water film was formed between soil particles and the stabilizers that isolated their contact, reducing cementation capacity and strength.

**Keywords:** engineering residual soil; compaction technology; stabilizer; unconfined compressive strength

## 0 引言

工程渣土的资源化利用是建筑业减碳的一个新抓手,采用活性固废通过碱激发固化工程渣土是未来发展趋势<sup>[1]</sup>。闭东民等<sup>[2]</sup>将口罩废弃物作为加筋材料,以水泥为固化剂,固化高含水率淤泥并作为路基填料。徐杨等<sup>[3]</sup>采用水泥、石灰和废石膏等作为固化剂固化城市河道淤泥,其效果优于水泥固化效果。刘青云等<sup>[4]</sup>以工业废料钢渣的复合系基材对浅层软土固化,并将室内试验最优配比应用于现场试验。王颖等<sup>[5]</sup>采用聚氨酯型固化剂对砂土进行固化改良,表明高分子固化剂能在砂粒间形成高分子膜包裹,改良了砂土的渗透特性。我国硅藻土资源储备量大,但综合利用率低,其内含大量的SiO<sub>2</sub>可应用于水泥等胶凝材料充当硅源,并配合磷石膏在碱性环境下,能有效提高淤泥固化土强度<sup>[6-8]</sup>。全昭熹等<sup>[9]</sup>基于生命周期评价方法,表明渣土改良用于路基填筑全过程碳排放影响最大的是渣土的运输距离。在此背景下,就地固化技术近年来在浅层软土处理中逐渐得到开发应用,适用于我国东南地区较多的软土路基。南京横江大道河塘路基处理工程中,对原位固化技术在城市快速路清淤填塘项目中进行了应用研究,且满足了工程需求<sup>[10]</sup>。物理压实是提高渣土工程性质的常见手段,当满足一定的压实度与强度分别可以用做道路的底基层与基层填料。邵吉成等<sup>[11]</sup>系统地研究了不同初始含水率淤泥在不同压力下的固化,且在工程中采用先将

预固化土开挖翻晒,再将固化剂与土混合均匀后压实的原位就地固化方法,并与室内试验相验证。

目前已有学者对混凝土分层受压浇筑的压缩工艺开展了相关研究,细化了压缩压力、受压时间、分层高度、水泥掺量、水灰比等参数对强度的影响,并对不同绿色骨料掺量的混凝土做了压缩工艺的对比<sup>[12]</sup>。类比混凝土受压浇筑,压实固化土从而提高工程性能更为常见,但少有研究细化压实工艺对固化土强度的提升效果。为此,本文探讨压实压力、压实时间和初始含水率对工程渣土的固化效果,研究在压实工艺后,不同龄期固化土的强度,以期作为压实固化技术在软基处理领域的应用提供参考。

## 1 试验方案与工况设计

### 1.1 试验原料和固化剂

试验所用工程渣土来自于苏州市阳澄湖风力发电站基坑开挖工程场地废弃渣土,外观呈深褐色,质地松散,为粉质黏土,按成因类型为淤积土。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)<sup>[13]</sup>检测渣土的基本工程性质见表1。借助XRF分析,测得工程渣土的具体化学成分见表2。

表1 土样的工程特性参数

Table 1 Engineering parameters of soil samples

土样	含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	最优含 水率/%	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
渣土	21	26	10	16	13.2	1.77

表2 土样的化学成分组成

Table 2 Chemical composition of soil samples

土样	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	CuO
渣土	64.85	19.39	5.51	1.98	2.67	0.27	0.01

单位: %

试验采用改性硅藻土、电石渣和磷石膏为固化剂材料<sup>[14]</sup>;将低品位硅藻土机械粉磨 15 min、500 °C 热活化 2 h 作为改性硅藻土,提高其结合水率并清除覆盖在圆盘孔隙通道上的杂质与有机质;基于先前研究,固化剂为改性硅藻土:电石渣:磷石膏=0.39:0.23:0.38 的最优配比,固化材料均过 200 目筛网,固化剂掺量 8%,固化土的液塑限均有一定的提升<sup>[15]</sup>,后续试验初始含水率以土样液限为主。经活化改性的硅藻土主要提供水化反应生成胶凝物所需的 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;磷石膏主要提供促进钙矾石生成的硫酸根离子,而电石渣主要提供火山灰反应所需要的碱性环境,固化剂材料的主要化学成分见表 3。

表3 固化剂的主要化学成分

Table 3 Main chemical composition of stabilizers

固化材料	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	CuO
硅藻土	70.10	18.10	6.45	0.72	0.08	0.40	0.02
磷石膏	9.24	0.29	0.77	33.36	0.38	55.03	0.02
电石渣	3.77	0.37	0.20	94.44	0.27	0.33	0.02

单位: %

## 1.2 试样制备与工况设计

### 1.2.1 试样制备

试验流程如图 1 所示。先将场地土样放入烘箱在 65 °C 以下烘干至恒重后过 1 mm 筛,按照干土质量的 8% 添加固化剂;根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JGT 3441-2024)<sup>[16]</sup> 中细粒土的试验规程,按设计含水率添加水后放置于水泥砂浆搅拌机中以低档速搅拌 10 min;采用直径为 50 mm,高 50 mm 的圆柱状试模进行制样,将搅拌均匀的固化土样分三次填入模具中,每层从边缘向中心插捣 15 次,然后采用固结仪按照设定工况进行压实制样;脱模后立即放入自封袋中,置于恒温(20 ± 1 °C)、恒湿(95% ± 1%)的养护箱中进行养护。

### 1.2.2 工况设计

场地加压器参考《固定式压力容器安全技术监察规程》(TSG 21-2016)<sup>[17]</sup> 中低压 0.1~1.6 MPa,试验设置了 0.15~1.53 MPa 下的压实压力梯度,探究以静压成型的固化方式对不同含水率工程渣土的固化效果;设置了在均匀混料后 5~240 min 的受压时间,探究压实时间对固化土强度以及压实度的提升效果;在实际工程中,一般在土样为最优含水率时进行压实,而淤泥固化土在土样液限附近时,固化土强度达到最高<sup>[11]</sup>,按照最优含水率与液限为基准均分成四个初始含水率,分别为 13.2%(w<sub>1</sub>)、19.6%(w<sub>2</sub>)、26%(w<sub>3</sub>)以及 32.4%(w<sub>4</sub>),具体试验工况见表 4。

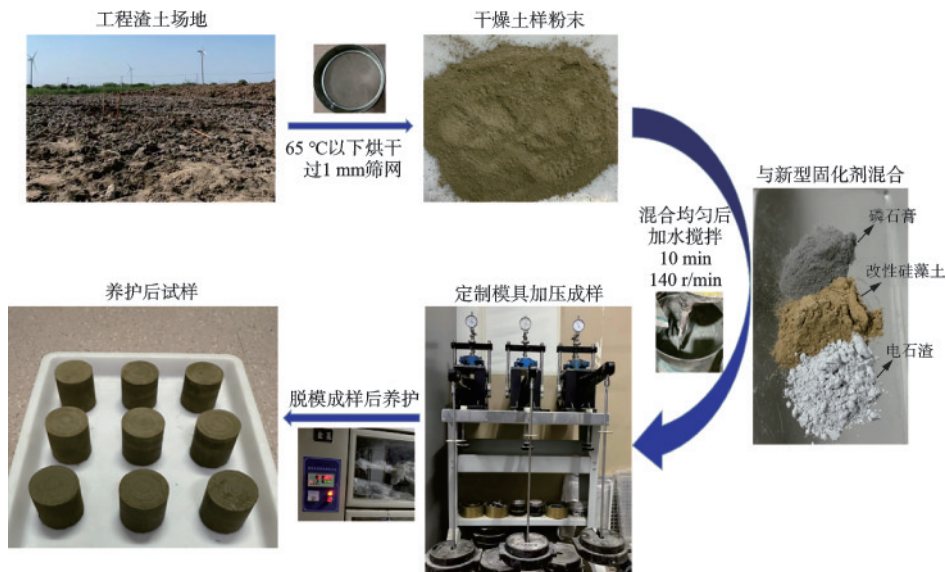


图1 制样流程

Fig.1 Procedure of sample preparation

表4 试验工况

Table 4 Test conditions

组别	固化剂 掺量/%	压实 压力/MPa	受压 时间/min	初始含 水率/%	龄期/d
A-1			5		
A-2	8	0.92	20	26.0	3、7、28
A-3			60		
A-4			240		
B-1		0.15			
B-2	8	0.61	20	26.0	3、7、28
B-3		0.92			
B-4		1.53			
C-1				13.2	
C-2	8	0.61、1.53	20	19.6	3、7、28
C-3				26.0	
C-4				32.4	

## 2 试验结果与分析

### 2.1 压实压力对强度的影响

#### 2.1.1 压实度影响分析

压实压力对固化土样压实度的影响如图2所示;  $w_1$  含水率下增大压实压力后, 压实度提升了10.5%, 而  $w_4$  含水率下仅提升1.1%, 随着含水率的增大, 压实压力对压实度的提升效果逐渐减小; 当压实压力为1.53 MPa, 土体含水率为液限时, 压实度达到99%。在固化土样压实过程中, 其不同行为特征几乎完全是由其建立的不同结构导致; 当存在聚集体时, 可以将孔隙大小分布分为大孔和微孔<sup>[18]</sup>。当固化土样在低含水率时难形成团聚体, 且团聚体之间的孔隙较大, 通过压实能够将这些大孔

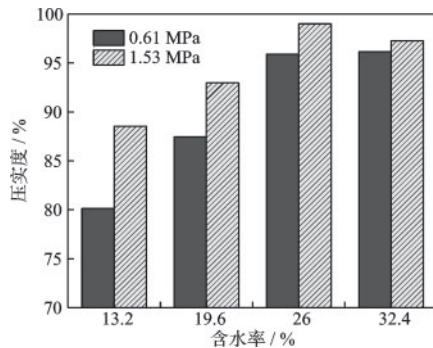


图2 不同含水率下压力对压实度的影响

Fig.2 Effect of pressure on compaction degree at different moisture contents

变得更紧密, 从而提高压实度, 此时需相对更大的压实压力, 即屈服压力, 才能将土样团聚体间的孔隙压至一个稳定的状态。随着含水率增加, 屈服压力降低, 团聚体内部的微孔对压力的敏感程度也随之降低, 增大压实压力难以进一步提高压实度<sup>[19]</sup>。当含水率超过液限时, 增大压实压力会在土样边界造成泌水孔隙, 降低压实度(图3)。

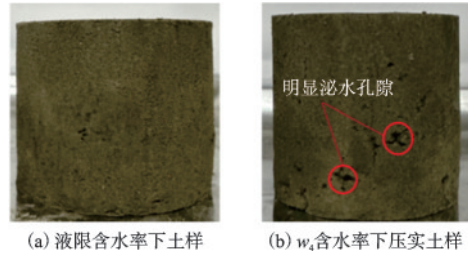


图3 不同含水率下压实土样

Fig.3 Compacted soil samples at different moisture contents

固化土样在液限含水率时压实压力对压实度的影响如图4所示; 压实压力在小于0.92 MPa时, 压实度基本呈线性增长, 当压力超过该值时, 增长减缓。提高压实压力能够使得固化土样更快达到紧密和稳定的状态, 但当达到屈服压力后, 继续增大压力对固化土样的压实效果弱化, 本文试验条件下的屈服压力为0.92 MPa。

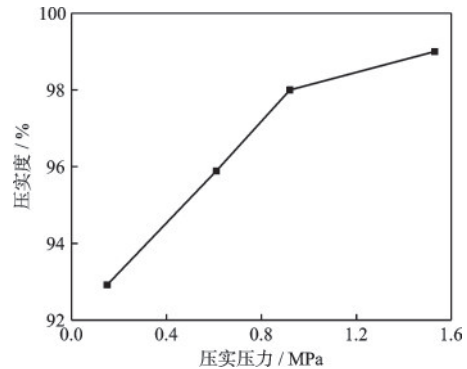


图4 液限下压实压力对压实度的影响

Fig.4 Effect of compaction pressure on compaction degree at liquid limit

#### 2.1.2 不同含水率土样强度影响分析

图5为两个压实压力下不同含水率对强度影响的对比图; 固化土的整体强度在最优含水率  $w_1$  到  $w_2$  区间内发展相对缓慢, 28 d 强度在0.61 MPa下增长了6.3%, 1.53 MPa下增长了15.3%; 在  $w_2$  到液限  $w_3$  区间内, 固化土的强度相对增长迅速, 28 d 强度在

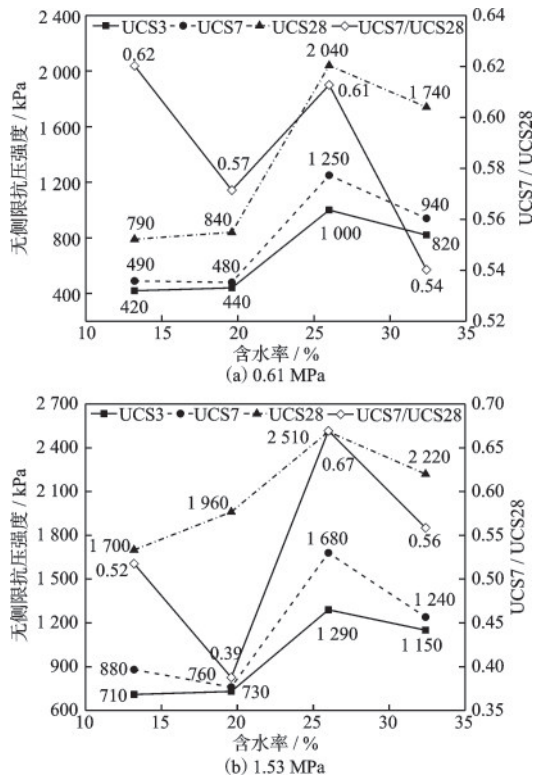


图5 不同含水率下强度

Fig.5 Strength at different moisture contents

0.61 MPa下增长了142.9%，1.53 MPa下增长了28.1%，并且在液限时固化土各龄期强度均达到峰值，28 d强度最高达到2.51 MPa；在 $w_3$ 到 $w_4$ 的含水率区间内，固化土强度呈下降趋势。在最优含水率至 $w_2$ 时，缺少自由水使得土样整体产生较少水化产物，强度的提高主要由压实消除土体内部部分孔隙，提高整体压实度，从而改善水化物的生成与分布；随着含水率增大至 $w_2$ 到液限间，水化产物得以充分发展，对比低含水率时，提高压实压力对强度提升效果降低；随着含水率的进一步增加，土样颗粒间隙被填充饱和，压力作用下，多余的自由水在土体颗粒间形成了向外的排水通道，降低了土样压实度的同时也增加了土体的薄弱点，造成强度衰减。试验表明了固化土的抗压强度是由固化剂的水化产物在土颗粒间相互胶结和压实工艺对土样整体压实后消除孔隙的两部分构成，彼此相互影响发展，随含水率的上升，压实压力对固化土强度提升效益渐弱。

将无侧限抗压强度记为 UCS，UCS7/UCS28 则是 7 d 抗压强度与 28 d 抗压强度的比值，其曲线能一定程度上反映出固化剂的早强性能；本文试验条件下，UCS7/UCS28 先减小后增大再减小，

0.61 MPa 的压实压力下，其数值在 0.54~0.62 内波动；1.53 MPa 的压实压力下，其数值在 0.39~0.67 内波动；整体基本在含水率达到液限时，强度达到峰值。土样在最佳含水率时，由于自由水的缺乏导致了进程缓慢及不充分，强度随龄期发展不明显。当含水率增加到 $w_2$ 时，加剧了固化剂在土样内部反应的不均匀性，使得 UCS7/UCS28 降低，所以 $w_2$ 含水率点可认为是压实固化工序下土样的不均匀点，且随着压实压力的增大，对该含水率下固化土样的扰动影响增大；随着含水率增加到液限，固化剂早期水化作用充分，早强性能最佳。当继续增大含水率，过多的自由水会降低静电吸引力，从而减少胶凝产物粘接的黏土与黏土接触面数量，导致固化土强度降低<sup>[20]</sup>。

图 6 为不同含水率下固化土强度随龄期发展规律的细化柱状图；试验中四个含水率的固化土样强度在 0.61 MPa 的压实压力下，28 d 强度较 3 d 强度分别增长了 88.1%，90.9%，104%，112.2%；在 1.53 MPa 的压实压力下，28 d 强度较 3 d 强度增长率分别为 139.4%，168.5%，94.6%，93%；随着压实压力的增大，较低含水率的固化土内部孔隙被挤密，强度随龄期发展更为显著；表明低压实度固化土样

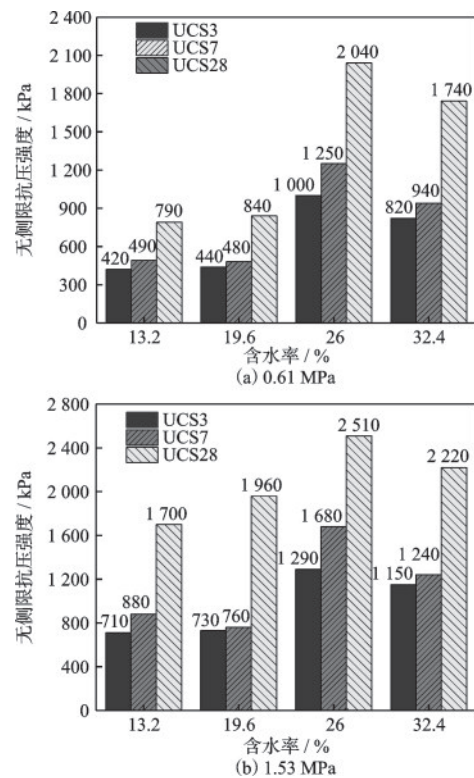


图6 龄期强度发展对比

Fig.6 Comparison of strength development with curing time

在自由水不充足的情况下,只有部分在土颗粒与固化剂之间形成胶结固化通道,而通过提升压实压力增大压实度可以促进低含水率下固化土样内部土颗粒与固化剂的联结,随龄期强度增长更为显著,即在不同含水率下,分别存在一个最佳压实压力,在该压力下使得固化土样达到一定压实度并发展强度的效益最大。

压实压力对液限下固化土样强度影响曲线如图7所示;随着压实压力的增加,固化土的各龄期强度随之增长,早强性能得以改善,当压实压力超过0.92 MPa后,提高压实压力对强度提升收益明显呈下降趋势。在定含水率下,压实压力主要影响土样中的颗粒排列以及固化剂水化后胶凝物充斥在土颗粒孔隙间的有效途径。随着压力的不断增大,土样虽逐渐达到致密状态,但孔隙相对保持稳定,更大的压力只能引起孔隙的微小变化,所以存在一个由土壤性质以及内部结构控制的最佳压实阈值<sup>[21]</sup>。

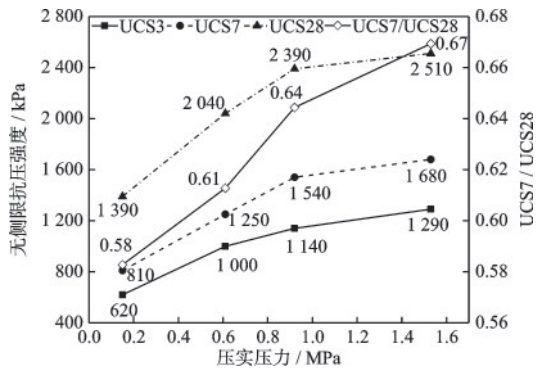
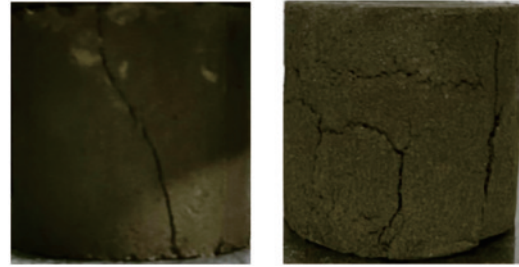


图7 液限下压缩压力对强度的影响

Fig.7 Effect of compressive pressure on strength at liquid limit

压实土样的宏观破坏形态一定程度上由其力学性能决定;当含水率为液限,0.92 MPa压实压力下,固化土样发生了整体的剪切破坏,如图8(a)所示;当含水率在 $w_2$ 左右时,部分自由水与固化剂结合发生反应,但此时的固化土内部形成了短期不均匀不稳定的胶凝体结构,使得土样在未与固化剂反应的薄弱区发生破坏,如图8(b)所示。对于压实固化土样,在通过压实或增添固化剂使其水化反应充分,抗压强度高时,破坏形态呈土样整体发生剪切破坏,表现出脆性破坏特征;当固化土未达到一定压实度或未充分水化,固化土的抗压强度较低时,此时破坏形态呈从土样固化的薄弱面开始剥离破坏,其延性破坏特征更为明显。



(a) 整体剪切破坏 (b) 表层剥离破坏

图8 土样破坏形式

Fig.8 Failure modes of soil samples

## 2.2 压实时间对强度的影响

在工程实际中,固化改良以及压实时间一般较长,本文探究在一定的压实压力下,延长压实时间对固化土压实度以及强度的收益效果,同时也可以作为固化土在达到一定压实度后,其为了保持固化土稳定性和提高早期性能所需压实时间的参考,以期对工程施工效率的提高提供一定的借鉴。

图9为土样在液限含水率,压实压力为0.92 MPa时,压实时间对压实度的影响;当受压时间从5 min增长至240 min,固化土压实度仅提升了0.5%左右。混合物料在水-力耦合条件下,土的可压缩性与加性骨架结构的形成有关,混合料体积变形特性很大程度取决于初始条件、添加剂含量和类型<sup>[22]</sup>,在固化土样受到恒定压实压力的瞬间,其可压缩性骨架迅速生成并稳定,随着压实时间延长其基本性质无法改变。

图10为压实时间对液限下土样强度影响曲线;提升段主要在5~20 min,在此段中,3 d强度增长25.3%,7 d强度增长17.6%,28 d强度增长3.5%;随龄期的增长,压实时间对固化土强度的提升效果明

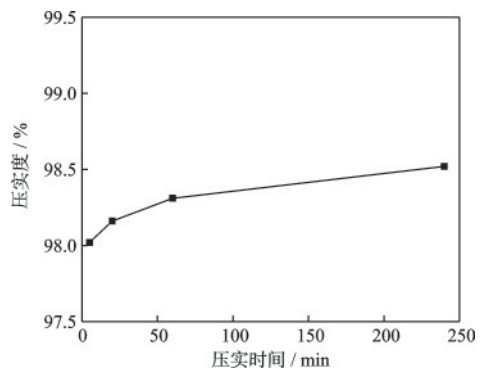


图9 压实时间对压实度的影响

Fig.9 Effect of compaction duration on compaction degree

显减弱。UCS3/UCS7的曲线表明,土样在7 d强度发展的范围中,增加受压时间能帮助固化土早期强度的发展;在固定的压实压力值下,从宏观的压实度与强度发展曲线可以看出,压实时间仅在60 min以前对压实度与强度发展有对应的提升,且提升幅度较小,所以压实时间只能起到早期的稳定作用,即在压实时间内,固化土样内部持续水-力耦合作用下,固化剂与土体颗粒的联结空间不断趋向更均匀合理的环境,促使固化剂中的活性物质能持续调整接触到自由水并反应,从而有限的提高了早期强度,而对于后期强度发展几乎没提升效果。在本试验条件下,20 min压实时间为0.92 MPa压实压力下对固化土性能提高效益最大的最佳压实时间。

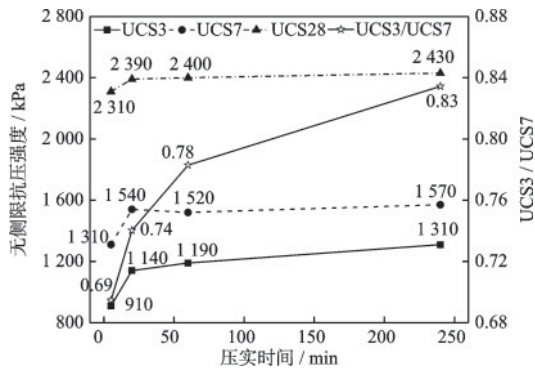
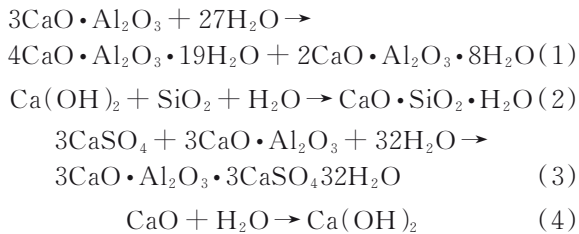


图10 液限下压实时间对强度的影响

Fig.10 Effect of compaction duration on strength at liquid limit

固化土样中的水化产物为一个不断发展与互相转化的过程,其水化反应方程式由式(1)~(4)<sup>[23-25]</sup>组成。



参考以上固化土水化反应进程的研究,在持续受压中,土颗粒与新型固化剂胶凝体系的反应表现出类似水泥诱导期时的特性。 $\text{C}_3\text{S}$ 体系在诱导期降低水化速率是由于颗粒表面快速生成了薄且连续的介稳水化硅酸钙层,阻碍了未水化的 $\text{C}_3\text{S}$ 颗粒接触水,抑制了早期水化。在诱导期结束时,介稳态C-S-H与溶液维持溶解平衡<sup>[26]</sup>,所以压实时间对固化土强度的提升效果较压实压力明显较小。

### 2.3 讨论

固化土强度主要由初始含水率以及压实工艺中的压实压力决定;压实时间对早期强度有一定的改善,但随着龄期发展至28 d,其对固化土强度的提升微弱。图11为含水率及压实度对28 d强度影响三维图;固化土在压实过程中,含水率与压实压力对强度交互影响;在初始含水率较低时,增大压实压力的固化途径能够显著提升固化土强度;在含水率达到液限附近后,增大压实压力对固化土强度的提升效果开始减弱,即不同初始含水率下对应着不同的压力阈值;实际工程中,可根据不同的施工条件,通过调节含水率、压实压力和压实时间来提升固化土地基的压实度以及承载性能。

图12为固化土液限下不同压实压力的强度发展拟合曲线;在固化土强度发展过程中,随着压实压力的增大,早期强度发展提升显著,随后趋于平缓。在各级压实压力下,虽然曲线的各项参数有区别,但整体强度与龄期都成 $\ln(t)$ 对数关系,这与

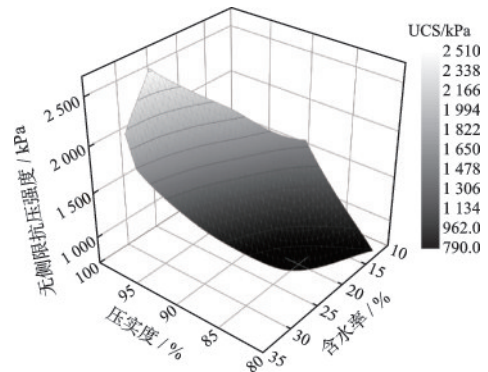


图11 含水率及压实度对28 d强度的影响

Fig.11 Effect of moisture content and compaction degree on 28-day strength

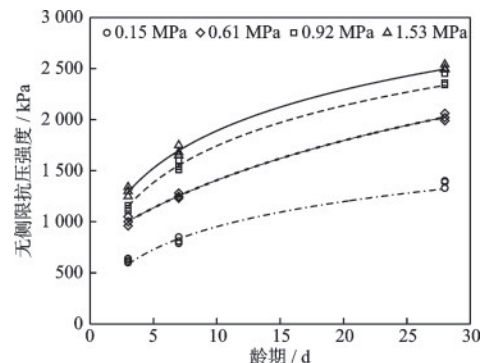


图12 液限下压实压力对强度发展的拟合曲线

Fig.12 Fitted curves of strength development under compaction pressure at liquid limit

用水泥固化黏土的强度预测模型相吻合<sup>[27-28]</sup>；试验表明通过压实固化,以硅藻土和固废为原材料的固化剂表现出类似水泥固化土的强度发展模型,在定水灰比及土灰比的情况下,通过压实工艺也能进一步优化固化土强度发展模型。

### 3 结 论

本文以改性硅藻土、电石渣、磷石膏为固化剂对工程渣土进行压实固化试验；初步探讨了压实压力、压实时间对不同初始含水率固化土的加固机理,分析了压实工艺对不同含水率固化土性能的提升效果以及强度发展规律。本文试验条件下,可以得到如下主要结论:

(1) 固化土的最佳压实成型工艺的压实压力约为 0.92 MPa,压实时间约为 20 min。当固化土初始含水率在液限时,最佳压实成型工艺下压实度可达 98.2%,28 d 无侧限抗压强度可达 2.39 MPa。

(2) 对于不同初始含水率的固化土样均对应着一个压实压力阈值,在此值下对固化土的压实度与强度提升能达到最佳效益,当含水率较低时(< 20%),此阈值较大,当含水率超过液限时,此阈值降低。

(3) 压实时间对固化土强度的提升效果随着龄期发展降低;其能起到一定的早期稳定提强作用,但由于水化胶凝体系发展的局限性,压实时间相较于压实压力对固化土强度影响明显较小。

(4) 采用 8% 的固化剂掺量,改性硅藻土:电石渣:磷石膏=0.39:0.23:0.38 的配比,表现出与水泥相近的固化黏土强度发展模型,通过改变压实工艺中的参数能够得到进一步改良的固化土强度发展模型。

### 参考文献:

[1] 肖建庄,沈剑羽,段珍华,等.工程渣土资源化基础问题与低碳技术路径.科学通报,2023,68(21):2722-2736. Xiao J Z, Shen J Y, Duan Z H, et al. Basic problems and low-carbon technical path of construction spoil recycling [J]. Science Bulletin, 2023, 68(21): 2722-2736. (in Chinese)

[2] 闭东民,孔纲强,陈庚,等.废弃口罩加筋固化土的强度特性与破坏模式[J].防灾减灾工程学报,2022,42(5):993-998,1009. Bi D M, Kong G Q, Chen G, et al. Strength character-

istics and failure mode of solidified soil reinforced by waste masks [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 993-998, 1009. (in Chinese)

[3] 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 drying-wetting durability of solidified urban river sludge [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 1028-1035. (in Chinese)

[4] 刘青云,李华安,孙信誉,等.钢渣型复合基材在浅层软土固化中的应用[J].防灾减灾工程学报,2020,40(5):811-817,827. Liu Q Y, Li H A, Sun X Y, et al. Application of steel slag composite in in-situ solidification of shallow soft soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 811-817, 827. (in Chinese)

[5] 王颖,刘瑾,王琼亚,等.高分子固化剂改良砂土的渗透特性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(2):243-250. Wang Y, Liu J, Wang Q Y, et al. Study on the permeability characteristics of sand reinforced with polymer soil stabilizers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(2): 243-250. (in Chinese)

[6] 丁建文,张帅,洪振舜,等.水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J].岩土力学,2010,31(9):2817-2822. Ding J W, Zhang S, Hong Z S, et al. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2817-2822. (in Chinese)

[7] 代楠,张育新,李凯霖,等.硅藻土在胶凝材料领域的应用进展[J].材料导报,2022,36(14):141-149. Dai N, Zhang Y X, Li K L, et al. Application of diatomite in cementitious materials [J]. Materials Reports, 2022, 36(14): 141-149. (in Chinese)

[8] 李志威,王鸽,李忠水,等.我国硅藻土矿利用现状及开发利用对策[J].中国非金属矿工业导刊,2021,42(3):1-5. Li Z W, Wang G, Li Z S, et al. The utilization status of diatomite mines in China and countermeasures for development and utilization [J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2021, 42(3): 1-5. (in Chinese)

[9] 全昭熹,陈湘生,陈锋,等.基于生命周期评价方法的隧道施工渣土利用减碳效果分析[J].环境工程,2023,41(10):91-98,162. Quan Z X, Chen X S, Chen F, et al. Analysis of carbon reduction of tunnel construction muck soil utilization base on life cycle assessment [J]. Environmental



- Engineering, 2023, 41(10): 91-98,162. (in Chinese)
- [10] 徐亮,唐彤芝,白兰兰,等.就地固化技术处理浅层软土的应用及机理研究[J].水利水运工程学报,2021(2):109-116.  
Xu L, Tang T Z, Bai L L, et al. Application and mechanism of in-situ solidification technology to treat shallow soft soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(2): 109-116. (in Chinese)
- [11] 邵吉成,李送根,张旺兴,等.淤泥初始含水率及压实度对固化土强度的影响[J].土木工程学报,2024, 57(11): 57-69.  
Shao J C, Li S G, Zhang W X, et al. Effect of initial moisture content and compactness of sludge on strength of solidified soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(11): 57-69. (in Chinese)
- [12] Syed M S K, Muhammad J M, Wu Y F. Application of waste tire rubber and recycled aggregates in concrete products: a new compression casting approach, Resources[J]. Conservation and Recycling, 2021, 167: 105353.
- [13] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [14] 孔纲强,姜洪亮,陈庚,等.基于固废的新型固化剂及其固化土无侧限抗压强度试验[J/OL].工程地质学报,2023:1-15.  
Kong G Q, Jiang H L, Chen G, et al. Study on new solidifying agent through solid waste and the unconfined compressive strength of its solidified soil[J/OL]. Journal of Engineering Geology, 2023: 1-15. (in Chinese)
- [15] 姜洪亮,孔纲强,邓华锋,等.盾构尾泥的一种固化改良新方法对比试验研究[J/OL].工程地质学报,2023: 1-11.  
Jiang H L, Kong G Q, Deng H F, et al. Experimental on the performances of shield slurry solidified soil through a new curing agent based on solid waste [J/OL]. Journal of Engineering Geology, 2023: 1-11. (in Chinese)
- [16] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JGT 3441—2024 [S].北京:人民交通出版社,2024.
- [17] 固定式压力容器安全技术监察规程:TSG21—2016 [S].北京:新华出版社,2016.
- [18] Casini F, Vaunat J, Romero E, et al. Consequences on water retention properties of double-porosity features in a compacted silt[J]. Acta Geotech, 2012, 7: 139-150.
- [19] 孙海超,王文军,凌道盛.低掺量水泥固化土的力学特性及微观结构[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(3): 530-538.  
Sun H C, Wang W J, Ling D S. Mechanical properties and microstructure of solidified soil with low cement content[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(3): 530-538. (in Chinese)
- [20] Glen A L, Dennes T B. Fundamental parameters of cement-admixed clay—new approach[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130: 1042-1050.
- [21] Yang Z P, Zhang K S, Li X Y, et al. Mechanical and microstructural evolution of solidified/stabilized heavy metal-contaminated soil under a hydro-chemical-mechanical coupling environment[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 32: 103438.
- [22] Chen Z G, Tang C S, Cheng Z, et al. Compression, swelling and rebound behavior of GMZ bentonite/additive mixture under coupled hydro-mechanical condition [J]. Engineering Geology, 2017, 221: 50-60.
- [23] 张洁.C3A的结构及水化过程[J].四川水泥,2014(10): 4-7.  
Zhang J. The structure and hydration process of C3A [J]. Sichuan Cement, 2014(10):4-7. (in Chinese)
- [24] Zeng L L, Bian X, Zhao L, et al. Effect of phosphogypsum on physiochemical and mechanical behaviour of cement stabilized dredged soil from Fuzhou, China[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2020, 25(8): 100195.
- [25] 武建芳,马卓慧,廖洪强.水化硅酸钙(C-S-H)的研究及应用现状[J].应用化工,2023,52(11): 3139-3143, 3147.  
Wu J F, Ma Z H, Liao H Q. Research and application status of calcium silicate hydrate (C-S-H) [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(11): 3139-3143, 3147. (in Chinese)
- [26] 官敏,胡匡艺,于涛,等.水泥矿物体系诱导期的水化进程及机理的研究进展[J].硅酸盐通报,2021,40(7): 2129-2137.  
Guan M, Hu K Y, Yu T, et al. Research progress on understanding hydration process and its mechanism of cement mineral system during induction period[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(7): 2129-2137. (in Chinese)
- [27] Chian S C, Nguyen S T, Phoon K K. Extended strength development model of cement-treated clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 142(2): 06015014.
- [28] Kang G O, Kim Y S, Kang J G. Predictive strength model of cement-treated fine-grained soils using key parameters: Consideration of the total water/cement and soil/cement ratios[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e02069.

(本文编辑:池营营)