

# 固化海相土抗拉强度特性研究

黄根民,刘华强,朱红军,陆明志,夏祥林

(江苏省水利科学研究院,江苏扬州 225002)

**摘要:** 试验分析了固化剂掺量、养护龄期和含水率对固化海相软土的抗拉强度影响规律。结果表明,水泥和石灰混掺的固化效果明显优于水泥和粉煤灰混掺。水泥+石灰混掺的固化土各龄期抗拉强度均比水泥+粉煤灰的高,前者是后者的1.3~2.9倍。海相软土的初始含水率为60%时,28 d固化土抗拉强度较7 d龄期提升了14%~27%。初始含水率增至80%后,28 d固化土抗拉强度较7 d龄期提升了120%~170%。相同固化剂掺量下,海相软土的初始含水率对固化土抗拉强度影响显著。固化土无侧限抗压强度和抗拉强度呈正相关,水泥+石灰混掺固化土的28 d龄期抗拉强度是其无侧限抗压强度的9%~16%。指出影响固化海相软土抗拉强度的因素依次为初始含水率、养护龄期、固化剂掺量。固化剂掺量中水泥掺量的影响最大,粉煤灰掺量次之,石灰掺量影响最小。实际工程中,降低土体初始含水率,保证充足的养护时间以及选择合适的固化剂掺量能提高固化土的抗拉强度。

**关键词:** 海相土; 抗拉强度; 固化剂; 含水率

中图分类号:TV42+3

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2023)06-0001-0004

## Study on tensile strength characteristics of marine solidified soil

HUANG Genmin, LIU Huaqiang, ZHU Hongjun, LU Mingzhi, XIA Xianglin

(Jiangsu Hydraulic Research Institute, Yangzhou 225002, China)

**Abstract:** The effects of curing agent content, curing age and moisture content on the tensile strength of marine solidified soft soil were analyzed by the experiments. As a result, the curing effect of cement and lime mixture was significantly better than that of cement and flyash mixture. The tensile strength of cement and lime mixed with solidified soil at all ages is higher than that of cement and fly ash, and the former is 1.3 to 2.9 times more than the latter. When the initial moisture content of marine soft soil is 60%, the tensile strength of 28 d solidified soil is increased by 14%~27% compared with the 7 d-aged. After the initial moisture content increased to 80%, the tensile strength of 28d solidified soil increased by 120%~170% compared with the 7d-aged. Under the same amount of curing agent, the initial moisture content of marine soft soil has a significant effect on the tensile strength of solidified soil. The unconfined compressive strength and tensile strength of solidified soil were positively correlated, and the 28d-aged tensile strength of cement and lime mixed with solidified soil was 9%~16% of its unconfined compressive strength. It was pointed out that the factors affecting the tensile strength of solidified marine soft soil were initial moisture content, curing age and curing agent content. Among the curing agent content, the influence of cement content is the largest, followed by flyash content and lime content is the smallest. In actual engineering, the tensile strength of cured soil can be improved by reducing the initial moisture content of the soil, ensuring sufficient curing time and selecting the appropriate amount of curing agent.

**Key words:** marine soil; tensile strength; curing agent; moisture content

收稿日期: 2023-04-21

基金项目: 江苏省科技厅省属公益类科研院所自主科研经费项目(BM2018028)

作者简介: 黄根民(1966—),男,高级工程师,主要从事水利工程检测与研究。E-mail:1653881832@qq.com

海相软土在我国东部沿海地区广泛分布,具有高含水率、高液限、低强度、高压缩性等特点,东部沿海地区的工程建设需要对海相软土地基进行固化处理。软土固化通常在软土中加入水泥、粉煤灰等固化掺料,最常见的就是水泥土搅拌桩或者水泥土换填。本文通过试验对水泥土的强度特性进行了研究。

## 1 试验方案

### 1.1 试验设备

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》,进行劈裂试验来研究固化土的抗拉特性。劈裂试验机见图1。

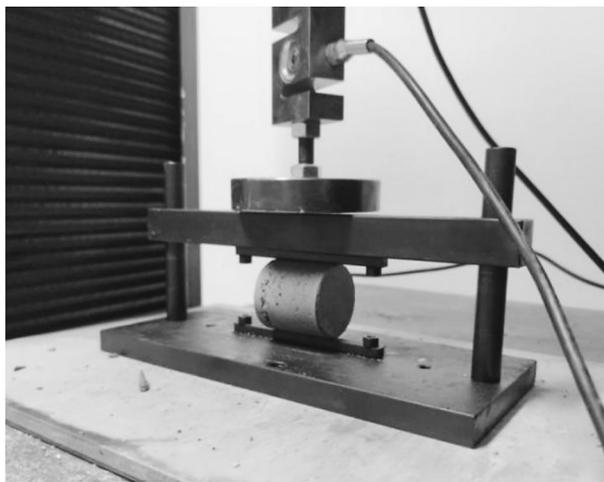


图1 劈裂试验机

### 1.2 试验材料

试验用海相软土取自连云港新区,初始含水率58.7%~78.7%、液限49%~56%,徐圩港区海相软土的初始含水率大于其液限,具有高压缩性,整体处于流塑~软塑状态。

固化材料为水泥、石灰和粉煤灰,其中PO42.5水泥为主固化剂,石灰和粉煤灰作为辅助固化剂。初始含水率设置60%、80%两种。固化剂掺比分别为4%水泥+2%石灰、5%水泥+3%石灰、4%水泥+2%粉煤灰和5%水泥+3%粉煤灰。试样养护7、14、28 d后,测量固化土的抗拉强度。

## 2 试验结果分析

### 2.1 破坏形式

不同配比、含水率和养护龄下固化土的破坏特征类似。水泥、石灰混掺的固化土压力-位移曲线,见图2。水泥和石灰的掺料分别为5%和3%,固化

土的养护龄期为28 d。随着竖向压力的增加,固化土的竖向位移快速增长。两种初始含水率下,固化土试样均呈现出脆性破坏。竖向压力达到固化土的极限劈裂拉力时,固化土试样沿其直径方向劈裂,见图3,试样承受的竖向压力迅速下降。固化土的初始含水率越低,固化后的抗拉强度越高。

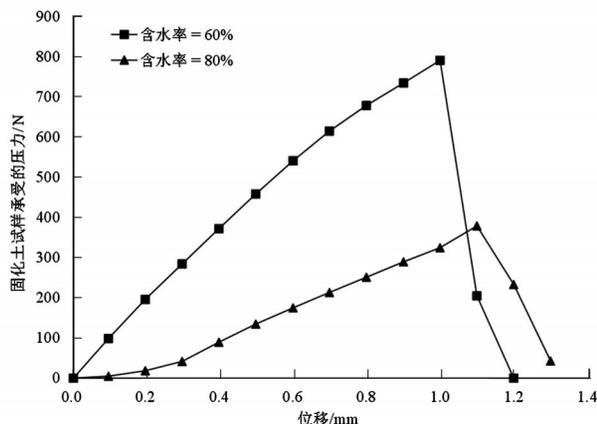


图2 压力位移曲线

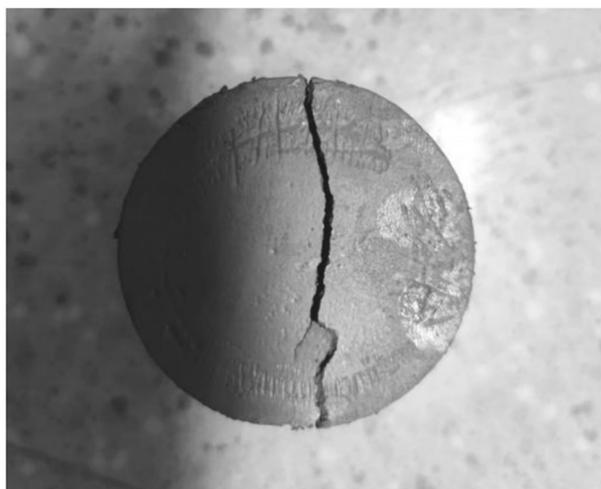


图3 破坏试样

### 2.2 抗拉强度分析

图4为60%含水率试样抗拉强度随龄期变化规律。随着养护龄期的增加,固化土抗拉强度的增幅缓慢,抗拉强度主要来自7 d养护龄期。4%水泥+2%石灰混掺固化土7 d龄期抗拉强度为95 kPa,经过28 d养护后抗拉强度为120 kPa,强度提升了24%;4%水泥+2%粉煤灰混掺固化土7 d龄期抗拉强度为37 kPa,经过28 d养护后抗拉强度为42 kPa,强度提升了14%。固化剂为5%水泥+3%石灰、5%水泥+3%粉煤灰时,龄期从7 d增至28 d后固化土的抗拉强度分别提升了27%和20%。相同的固化剂掺量和养护龄期下,水泥+石灰混掺的固化土抗

拉强度是水泥+粉煤灰混掺工况的2.1~2.9倍,表明水泥+石灰的固化效果明显优于水泥+粉煤灰。

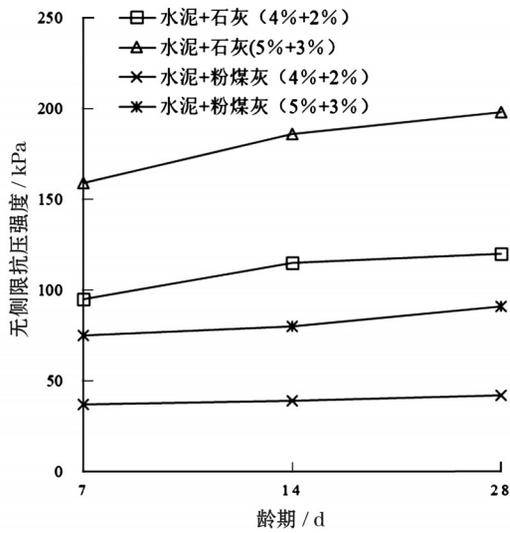


图4 60%含水率试样抗拉强度随龄期变化规律

图5为80%含水率试样抗拉强度随龄期变化规律。固化土的抗拉强度随着龄期的增长较为迅速。配比为4%水泥+2%水泥混掺的固化土,养护龄期7 d、14 d和28 d的抗拉强度分别为24 kPa、40 kPa和53 kPa;配比为4%水泥+2%水泥混掺的固化土,养护龄期7 d、14 d和28 d的抗拉强度分别为13 kPa、25 kPa和32 kPa。养护龄期从7 d增至28 d后,不同配比的固化土抗拉强度增幅介于120%~170%。相同的固化剂掺量和养护龄期下,采用水泥+石灰混掺固化土抗拉强度是水泥+粉煤灰混掺工况的1.3~1.8倍,再次表明水泥+石灰是海相软土的适宜固化剂。

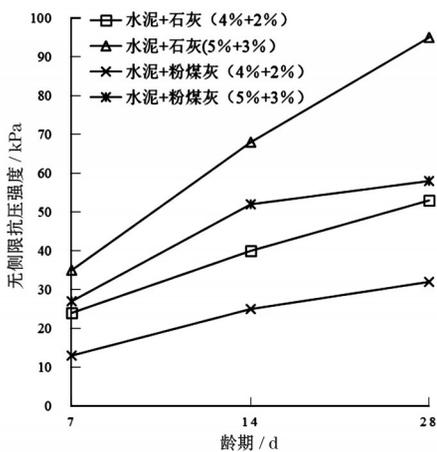
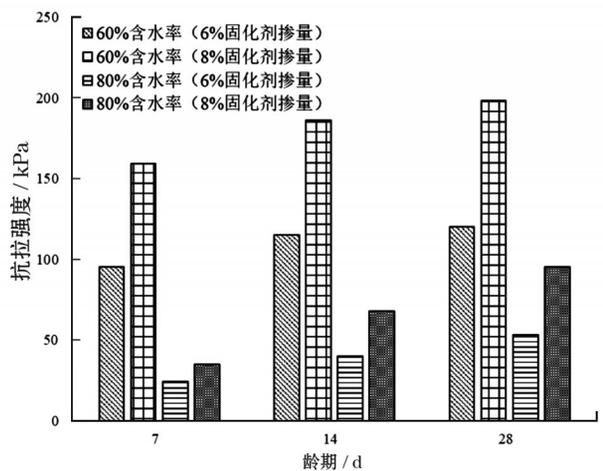


图5 80%含水率试样抗拉强度随龄期变化规律

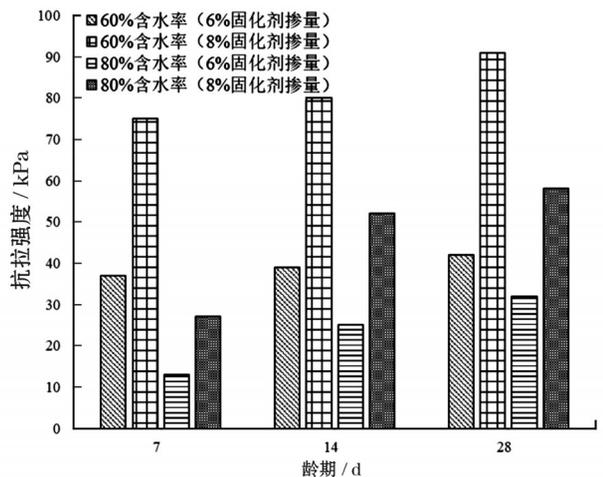
随着养护龄期增长,80%初始含水率固化土强度增速高于含水率为60%工况,但其抗拉强度远远

小于60%含水率固化土。养护龄期为7 d和28 d时,80%含水率固化土抗拉强度分别为60%含水率固化土抗拉强度25%~36%和44%~76%。很明显,初始含水率是影响固化土抗拉强度重要因素。固化土初始含水率越高,固化土抗拉强度尤其是固化土早期强度越低。

图6为固化剂掺量对固化土抗拉强度的影响。固化剂掺量越大,水泥水化反应生成的水化硅酸钙凝胶越多,固化土的抗拉强度便越高。水泥和石灰的总掺量增加2%后,初始含水率为60%和80%固化土的抗拉强度增幅分别为62%~67%和46%~79%。固化剂为水泥和粉煤灰时,固化剂总掺量增加2%后60%含水率的固化土抗拉强度增幅为103%~117%;80%含水率的固化土抗拉强度增幅为82%~108%。相较于水泥+石灰,当固化剂总掺量变化时,水泥+粉煤灰的配比强度变化更明显,但是强度一直低于水泥+石灰的配比。



(a) 水泥+石灰



(b) 水泥+粉煤灰

图6 固化剂掺量对抗拉强度的影响

水泥土的抗压强度与抗拉强度,两者虽然属于两个不同的力学参数,但两者也存在着某种关联。不同配比下固化土抗压强度和抗拉强度的结果见表1。

表1 不同配比下固化土抗拉强度及抗压强度

含水率	固化剂配比	抗压强度 $R_c/kPa$	抗拉强度 $R_t/kPa$	$R_t/R_c$
60%	4%水泥+2%石灰	746	120	0.16
	5%水泥+3%石灰	1 480	198	0.14
80%	4%水泥+2%石灰	573	53	0.09
	5%水泥+3%石灰	1 016	95	0.09

固化土抗拉强度与抗压强度呈正相关关系,抗压强度高的固化土抗拉强度也高。然而,水泥+石灰混掺固化土28 d龄期抗拉强度约是其无侧限抗压强度的9%~16%,表明固化土抗拉强度还是远低于其抗压强度的。固化土抗拉强度与抗压强度关系的研究结果,可以给实际的工程提供一定的参考。

### 2.3 抗拉强度影响因素相关性分析

基于灰色关联理论,探讨各因素对其抗拉强度的影响程度。不同种类固化剂(水泥、石灰、粉煤灰)掺量、固化剂总掺量、含水率和养护龄期构成6个参考数列 $X$ ,固化海相软土的抗拉强度为比较数列 $Y$ 。由于系统中各因素的物理意义不同,导致数据的量纲不相同,采用初值化进行无量纲化的数据处理。固化剂掺量对抗拉强度的影响见图7。

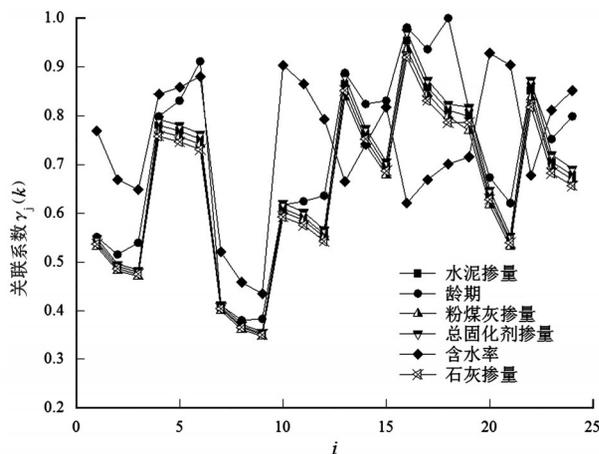


图7 固化剂掺量对抗拉强度的影响

关联度是各工况下关联系数的均值,其大小可以综合反映各影响因素与抗拉强度的关联性。3种

固化剂(水泥、石灰和粉煤灰)掺量、固化剂总掺量、含水率和养护龄期对于抗拉强度的关联度按降序排列,见表2。

表2 关联度结果

评价项	关联度	排序
含水率	0.739	1
龄期	0.716	2
总固化剂掺量	0.672	3
水泥掺量	0.661	4
粉煤灰掺量	0.648	5
石灰掺量	0.646	6

各评价项的关联度均大于0.6,表明3种固化剂(水泥、石灰和粉煤灰)掺量、固化剂总掺量、含水率和养护龄期与固化海相软土的抗拉强度之间存在良好的相关性。影响最明显的是含水率和养护龄期;固化剂掺量中水泥掺量的影响最大,粉煤灰掺量的关联度大于石灰掺量的关联度。相较于石灰掺量,粉煤灰掺量的变化对抗拉强度的影响更明显。因此,实际工程中通过降低土体初始含水率,保证充足的养护时间以及选择合适的水泥掺量可以提高固化土的抗拉强度,保证施工质量。

## 3 结语

通过开展海相软土的劈裂抗压试验,分析了固化剂掺量、养护龄期和含水率对固化海相软土的抗拉强度影响规律。取得的主要结论如下:

(1)基于固化土的劈裂抗拉强度,水泥和石灰混掺的固化效果明显优于水泥和粉煤灰混掺。水泥+石灰混掺的固化土各龄期抗拉强度均比水泥+粉煤灰混掺的工况高,前者是后者的1.3~2.9倍。

(2)海相软土的初始含水率为60%时,固化土抗拉强度随龄期增长缓慢,养护28 d后抗拉强度提升了14%~27%。初始含水率增至80%后,固化土抗拉强度随龄期增长较快,养护28 d后抗拉强度提升了120%~170%。

(3)相同固化剂掺量下,海相软土的初始含水率对固化土抗拉强度影响显著。养护龄期为7 d和28 d时,80%含水率固化土的抗拉强度分别为60%含水率固化土抗拉强度的25%~36%和44%~76%。

(4)基于固化土无侧限抗压强度试验,发现固化土无侧限抗压强度和抗拉强度呈正相关,水泥+

(下转第10页)

表2 组合生态桩的外观质量要求与检验方法

序号	项目	质量要求	检查方法
1	露筋	主筋	不应有
		箍筋	外露总长度不超过500 mm
2	孔洞	任何部位	不应有
3	裂缝	影响结构性能和使用的少量裂缝	不应有
		不影响结构性能的少量裂缝	不宜有,龟裂和水裂纹不在此列
4	桩端缺陷	端头混凝土松动	不应有
5	外形缺陷	缺棱掉角局部磕损	局部磕损深度不应大于5 mm,每处面积不得大于5 000 mm <sup>2</sup>
6	平整度	桩端面	预应力钢筋不得露出桩端面

体,值得在全省乃至全国范围内推广应用,也值得类似工程借鉴,对于推动水利工程的可持续高质量发展具有十分重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] 段青梅,陈小丹.生态护岸技术在北海仔河堤岸整治工程中的应用[J].广东水利水电,2021(6):21-25,35.
- [2] 张东艳,宗永臣.高原城镇河道演变与生态护岸措施[J].水资源保护,2021,37(6):157-161.
- [3] 王一航,张金凤,张娜,等.生态护岸在水利工程中的研究及应用进展[J].水道港口,2020,41(2):210-217,230.
- [4] 桂青.新孟河延伸拓浚工程对长江水环境影响研究[J].人民长江,2016,47(19):20-25.
- [5] 吴健.组合式透水型生态护岸[P].江苏省:CN209891154U,2020-01-03.
- [6] 王彦武.宋汤河护坡塌陷处理项目工程设计方案[J].长江技术经济,2022,6(增刊1):107-109.

(上接第4页)

石灰混掺固化土的28 d龄期抗拉强度是其无侧限抗压强度的9%~16%。

(5)基于灰色关联理论,影响固化海相软土抗拉强度的因素依次为初始含水率、养护龄期、固化剂掺量。固化剂掺量中水泥掺量的影响最大,粉煤灰掺量次之,石灰掺量最小。实际工程中,降低土体初始含水率,保证充足的养护时间以及选择合适的固化剂掺量,能提高固化土的抗拉强度

#### 参考文献:

- [1] 聂年圣,牛瑞森.海相软土成因及其工程特性的研究[J].工程建设与设计,2010(12):72-74.
- [2] 邓永锋,吴燕开,刘松玉,等.连云港浅层海相软土沉积环境及物理力学性质研究[J].工程地质学报,2005(1):29-33.
- [3] 李军霞,王常明,张先伟,等.两种滨海相软土固结特性的试验研究[J].水文地质工程地质,2009,36(5):35-39,52.
- [4] 王东星,徐卫亚.固化淤泥长期强度和变形特性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(1):332-339.
- [5] 徐超,董天林,叶观宝.水泥土搅拌桩法在连云港海相软土地基中的应用[J].岩土力学,2006(3):495-498.