

文章编号:1007-9629(2022)10-1047-08

超高含水率泥炭土的固化机理及强度特性

王 荣¹, 董俊全², 范衍琦³, 史江伟^{2,*}, 陈永辉²

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 2. 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; 3. 江苏省水利科学研究院 材料结构研究所, 江苏 扬州 225000)

摘要:通过开展无侧限抗压强度(UCS)和扫描电子显微镜试验,研究了水泥掺量、有机质含量和pH值对超高含水率泥炭土固化强度的影响。结果表明:随着水泥掺量的增加,固化泥炭土的破坏模式从塑性破坏转为脆性破坏;水泥掺量从10%增加到30%后,固化泥炭土的28 d UCS值增加了161%~485%;泥炭土含水率增加1倍后,固化泥炭土的28 d UCS值降低了42%~79%;相比于pH值为5.5的固化泥炭土,pH值为3.5和7.0固化泥炭土的UCS值降幅、增幅分别为10%~46%和8%~38%;基于固化泥炭土的UCS值,提出了超高含水率泥炭土的水泥固化配比,可以为类似工程提供一定的理论指导。

关键词:泥炭土;含水率;有机质;pH值;水泥掺量;强度

中图分类号:TU449

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.10.008

Solidification Mechanism and Strength Characteristics of Peat with Ultra-high Water Content

WANG Rong¹, DONG Junquan², FAN Yanqi³, SHI Jiangwei^{2,*}, CHEN Yonghui²

(1. China Harbour Engineering Company Limited, Beijing 100027, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Material and Structural Engineering Department, Jiangsu Water Research Institute, Yangzhou 225000, China)

Abstract: By conducting unconfined compressive strength(UCS) and scanning electronic microscope tests, effects of cement content, organic content and pH value on strength of solidified peats with ultra-high water content were investigated. The results show that the solidified peat damages from plastic mode to brittle mode when the cement content increases. As cement content increases from 10% to 30%, the UCS value of solidified peat at a curing age of 28 d increases by 161%–485%. By increasing water content by 100%, the UCS value of solidified peat at a curing age of 28 d decreases by 42%–79%. Compared with that of solidified peat at pH value of 5.5, the UCS value of peat at pH value of 3.5 decreases by 10%–46%, while the strength of peat at pH value of 7.0 increases by 8%–38%. Cement content of solidified peat with ultra-high water content is proposed based on the UCS value of solidified peat, which can provide guidance for similar projects.

Key words: peat; water content; organic matter; pH value; cement content; strength

泥炭土为有机残体、腐殖质和矿物质组成的特殊土,具有高含水率、大孔隙比和低剪切强度等特点。泥炭土分布广泛,占总陆地面积的5%~8%^[1]。因此,

道路工程在遭遇泥炭土地基时,常用化学固化来解决其承载力不足或变形过大等问题^[2]。

固化泥炭土的力学特性主要受固化剂类型、养护

收稿日期:2021-08-14; 修订日期:2021-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178327);江苏省水利科学研究院自主科研经费专项资金项目(2020Z027)

第一作者:王 荣(1983—),男,江西南昌人,中国港湾工程有限责任公司高级工程师,硕士。E-mail:wangrong@chec.bj.cn

通讯作者:史江伟(1984—),男,江苏镇江人,河海大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:ceshijiangwei@163.com

龄期、含水率、有机质含量和pH值的影响.通过开展含水率为82.5%泥炭土的固化试验,李琴等^[3]发现水泥对泥炭土的加固效果最好.Kolay等^[4]研究发现,水泥为加固泥炭土的最优固化剂,泥炭土含水率介于360%~600%时,建议的水泥掺量为150~250 kg/m³.桂跃等^[5]研究了微生物分解及其各向异性对含水率为64%~400%泥炭土强度的影响规律.Hobbs^[6]研究发现,泥炭土的含水率取决于有机物的分解程度,低分解度的纤维状泥炭土比高分解度的非晶质泥炭土含水率更高.通过开展含水率为400%泥炭土的固化试验,Hebib等^[7]研究发现水泥固化能明显降低泥炭土的压缩变形.王志良等^[8]研究发现,对于含水率为227.8%的泥炭土,红黏土的置换作用能使泥炭土结构变得紧密,提升其固化强度.张帆等^[9]研究了泥炭土埋置深度、水泥强度等级和搅拌桩施工工艺对固化泥炭土强度的影响规律.

泥炭土含水率变化范围广,最高能达到1400%^[6].然而,现有的化学固化大都针对较低含水率(<300%)的泥炭土.本文针对高含水率(>300%)、高有机质含量的泥炭土,开展了无侧限抗压强度(UCS)和扫描电子显微镜(SEM)试验,研究高含水率泥炭土水泥直接固化的宏观机理以及泥炭土物理化学性质(含水率、有机质含量、pH值)、水泥掺量和养护龄期对水泥固化泥炭土强度的影响,以期为类似工程提供一定的理论指导.

1 试验方案及方法

1.1 试验方案

试验重点研究泥炭土自身物理指标和固化剂掺量(质量分数,文中涉及的掺量、含水率、含量等均为质量分数)对固化泥炭土强度的影响,试验方案如表1所示.其中: K_w 为泥炭土的初始含水率, K_o 为有机质含量, K_c 为水泥掺量(水泥与湿土的质量比).

1.2 试验土料

1.2.1 泥炭土

基于云南泥炭土、四川泥炭土、长白山草炭土和苔藓泥炭土的基本物理特性试验,采用灼烧法测得云南泥炭土、四川泥炭土的有机质含量低于10%;苔藓泥炭土的有机质含量为94.3%,pH值为5.56,且高含水率试样固化后的保水性更好.因此,选取苔藓泥炭土作为研究对象,如图1所示.基于ASTM STP 820—1983《Testing of peats and organic soils》的分类方法,此泥炭土属于低分解度(H_{2-3})、低含水率(B_2)、高纤维含量(F_3)、极微量粗纤维(R_0)和木质残余(W_0)的泥炭土($H_{2-3}B_2F_3R_0W_0$).

表1 泥炭土固化的试验方案

Table 1 Test plan of solidified peat

$K_w/\%$	$K_o/\%$	pH value	$K_c/\%$	Curing age/d
200		3.5/5.5/7.0		
300	40	5.5	10/20/30	7/14/28
400		3.5/5.5/7.0		
300		3.5/5.5/7.0		
400	60	5.5	10/20/30	7/14/28
500		5.5		
600		3.5/5.5/7.0		
400		3.5/5.5/7.0		
600	80	5.5	10/20/30	7/14/28
800		3.5/5.5/7.0		



图1 苔藓泥炭土

Fig. 1 Peat

1.2.2 水洗高岭土

泥炭土的矿物组成主要为石英和伊利石.为研究不同有机质含量下固化泥炭土的强度特性,需要往苔藓泥炭土中加入无机矿物,配置有机质含量为40%、60%和80%的泥炭土.试验添加水洗高岭土,为典型的无机土,其化学组成见表2.

表2 高岭土的化学组成

Table 2 Chemical composition of kaolin

$w/\%$						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	Na ₂ O
55.17	38.06	4.24	1.41	0.53	0.25	0.07

1.2.3 固化剂

基于现有的研究,水泥对泥炭土的加固效果最好^[3-4].试验选取P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其基本物理性能如表3所示.

表3 水泥的基本物理性能

Table 3 Basic physical properties of cement

Setting time/min		Bending strength/MPa		Compressive strength/MPa	
Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
172	234	5.5	7.4	27.2	45.1

1.3 试样制备

试样制备主要步骤如下:

(1)按照设计的含水率和有机质含量,将苔藓泥炭土、水洗高岭土加水拌和均匀,泥炭土的pH值采用NaOH和HNO₃溶液来配制.配置好的泥炭土装入密封袋中闷料3 d,以确保水分均匀.闷料结束后,测定配置泥炭土的含水率和有机质含量是否达到设计值.

(2)按照设计的水泥掺量,将水泥均匀拌入泥炭土中.固化泥炭土试样的尺寸为 $\phi 50 \times 50$ mm.为了确保试样的均匀性,分5次将拌和均匀的泥炭土-水泥混合液倒入圆柱状模具中.为了降低试验误差,每个试样制作2个平行试样,结果取其平均值.

(3)将制备的泥炭土试样放入恒温((20±2)℃)、恒湿((95±2)%)的标准箱中,养护至7、14、28 d后采用YSH-2型无侧限压力仪测量固化泥炭土的无侧限抗压强度.

2 固化泥炭土的强度特性分析

2.1 固化泥炭土的应力-应变关系

图2为不同水泥掺量固化泥炭土的应力-应变(σ - ϵ)曲线.固化泥炭土的含水率为400%、有机质含量为40%,养护时间为7 d.由图2可见:当水泥掺量为10%时,固化泥炭土的应力-应变关系为硬化型,即应力随着应变的增长不断发展,试样呈现出塑性破坏模式;随着水泥掺量的增加,破坏时固化泥炭土的抗压强度显著增加,但峰值应力对应的轴线应变逐渐降低;在水泥掺量增加后,应力随着应变的增长出现回落的现象,应力-应变曲线由硬化型向软化型转变,固化泥炭土的破坏模式由塑性破坏转为脆性破坏;当水泥掺量较低时,固化泥炭土的力学性质受泥炭土的特性控制;在水泥掺量增加后,固化泥炭土的力学性质向水泥土破坏模式发展,但未见峰值应力迅速回落.

图3为不同养护龄期固化泥炭土的应力-应变关系曲线.固化泥炭土的含水率、有机质含量和水泥掺量分别为400%、80%和20%.由图3可见:养护龄期从7 d增至28 d后,固化泥炭土破坏时的峰值应力稳步增长;养护龄期为7、14 d时,固化泥炭土的应力-应变关系为硬化型,在轴向应变达到19%时应力仍未出现峰值;养护龄期增至28 d后,其应力-应变关系为软化型,破坏形式由塑性破坏转为脆性破坏;硬化型和软化型应力-应变曲线分别取15%轴向应变对应的应力和峰值应力为固化泥炭土的破坏应力.

2.2 固化泥炭土的无侧限抗压强度

2.2.1 养护龄期的影响

不同有机质含量和pH值下养护龄期对固化泥炭土强度的影响类似.因此,选取有机质含量为

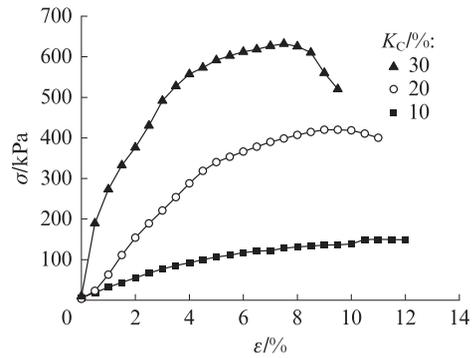


图2 不同水泥掺量固化泥炭土的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of solidified peats under different cement contents

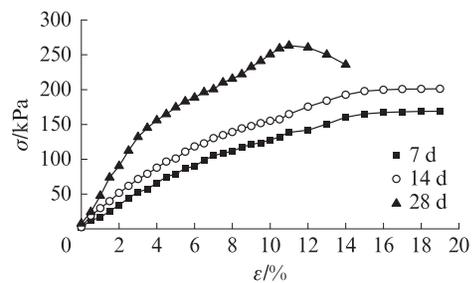


图3 不同养护龄期固化泥炭土的应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of solidified peats under different curing ages

40%、pH值为5.5的试验结果分析固化泥炭土强度随养护龄期的变化规律.表4为不同养护龄期固化泥炭土的UCS值.由表4可见:

(1)当水泥掺量为10%、20%、30%时,固化泥炭土的7 d UCS值快速增长,14、28 d UCS值增长速率放缓.初始含水率为200%的泥炭土,在掺入10%、20%和30%水泥后,固化泥炭土的7 d UCS值分别为196.4、436.9、640.7 kPa,14 d UCS值分别为254.7、486.1、733.8 kPa,28 d UCS值增至322.2、563.6、867.2 kPa.相比于7 d UCS值,固化泥炭土14、28 d UCS值的增幅分别为9%~29%和29%~64%.

(2)当泥炭土有机质含量为40%、初始含水率为300%时,固化泥炭土的14、28 d UCS值比7 d UCS值分别大11%~12%和17%~36%.当泥炭土初始含水率增至400%时,固化泥炭土14、28 d UCS值的增幅分别为8%~15%和23%~26%.固化泥炭土的UCS值与养护龄期密切相关,养护龄期越长,UCS值越大.综合所有试验结果,固化泥炭土的14、28 d UCS值比7 d UCS值分别增长了8%~29%和17%~64%.

2.2.2 水泥掺量的影响

限于篇幅,仅给出7、28 d龄期固化泥炭土的UCS值随水泥掺量的变化(见图4).由图4可见:随

表4 不同养护龄期固化泥炭土的 UCS 值
Table 4 UCS values of solidified peats under different curing age

$K_o/\%$	$K_w/\%$	$K_c/\%$	Curing age/d		
			7	14	28
	200	10/20/30	196.4/436.9/640.7	254.7/486.1/733.8	332.2/563.6/867.2
40	300	10/20/30	85.2/222.0/374.0	94.3/248.8/445.9	116.2/278.8/523.6
	400	10/20/30	56.5/173.9/288.6	61.1/195.0/132.9	69.5/215.2/393.7

随着水泥掺量的增加,固化泥炭土的 UCS 值呈线性增长;泥炭土的初始含水率越小,固化泥炭土 UCS 值的增长速率越大,表明低含水率泥炭土的 UCS 值对水泥掺量更加敏感;当泥炭土有机质含量为 40%、初始含水率为 200% 时,掺入 10% 水泥后固化泥炭土的 7 d UCS 值为 196.4 kPa,水泥掺量增至 20% 后,固化泥炭土的 7 d UCS 值为 436.9 kPa;当泥炭土的初始

含水率和水泥掺量同时增加 1 倍后(即 400% 含水率、20% 水泥掺量),固化泥炭土的 7 d UCS 值仅为 173.9 kPa,表明固化泥炭土强度与水泥掺量和含水率密切相关;在不同初始含水率、不同有机质含量下,当水泥掺量从 10% 增加到 30% 后,固化泥炭土的 7、14、28 d UCS 值分别增加了 226%~796%、188%~504% 和 161%~485%.

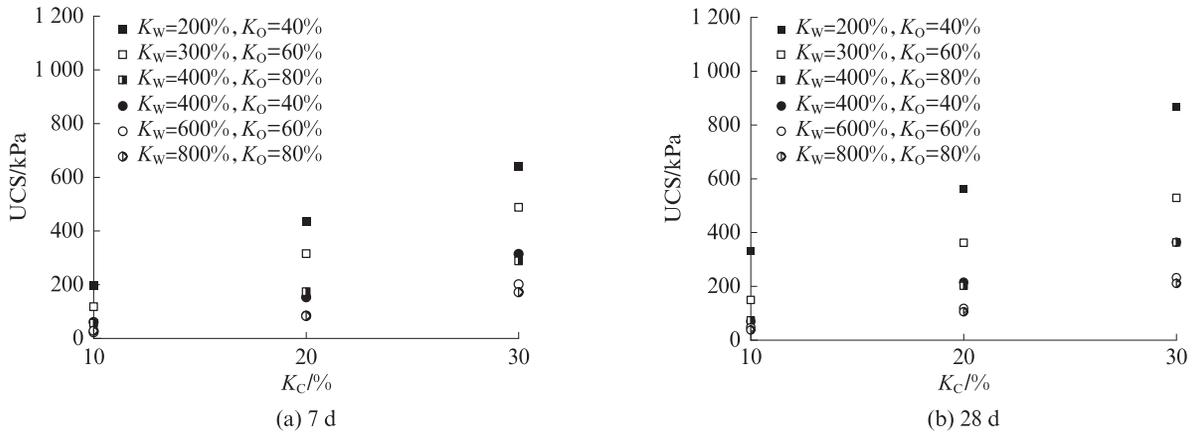


图4 不同水泥掺量固化泥炭土的 UCS 值
Fig. 4 UCS of solidified peats under different cement contents

2.2.3 含水率的影响

限于篇幅,仅给出有机质含量为 60% 时固化泥炭土 UCS 值随含水率的变化(见图 5)。由图 5 可见:随着含水率的增加,固化泥炭土的 UCS 值逐步降低;当泥炭土的初始含水率从 300% 增加到 400% 时,固

化泥炭土的 UCS 值迅速降低;在泥炭土初始含水率大于 400% 后,固化泥炭土 UCS 值的降幅放缓;当水泥掺量为 10%、20% 和 30% 时,泥炭土含水率增加 1 倍后,固化泥炭土的 28 d UCS 值分别降低了 49%~79%、48%~67% 和 42%~58%.

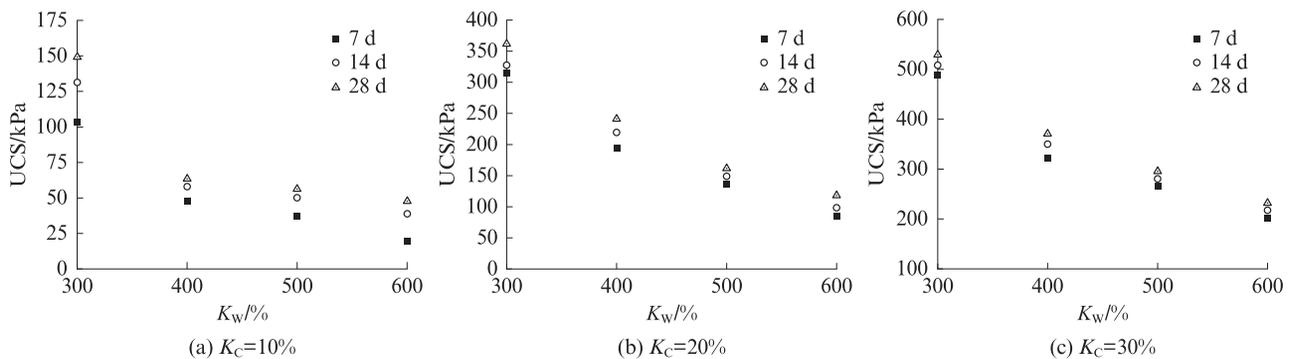


图5 不同含水率下固化泥炭土的 UCS 值
Fig. 5 UCS values of solidified peats under different water contents

路基工程要求7、28 d龄期水泥固化土的 UCS 值分别为 200、300 kPa^[10]. 当泥炭土有机质含量为 60%、初始含水率为 300%~600% 时,掺入 10% 水泥后 7 d 龄期固化泥炭土的 UCS 值均不满足要求. 当泥炭土初始含水率为 400% 和 600% 时,分别掺入 20% 和 30% 水泥后,7 d 龄期固化泥炭土的 UCS 值方能满足要求. 如图 4 所示,泥炭土初始含水率为 200%、有机质含量为 40% 时,掺入 10% 水泥后的 7 d UCS 值基本满足要求. 因此,泥炭土初始含水率是决定水泥等固化剂用量的关键因素. 当泥炭土初始

含水率低于 200% 时,采用水泥直接固化;当泥炭土初始含水率大于 200% 时,直接固化需要大量的固化剂,经济性很差.

2.2.4 有机质含量的影响

图 6 为不同有机质含量固化泥炭土的 UCS 值. 限于篇幅,仅给出初始含水率为 400% 固化泥炭土的 UCS 值. 由图 6 可见:当有机质含量增加时,固化泥炭土的 UCS 值稍有降低;当水泥掺量为 30% 时,有机质含量从 40% 增加到 80% 后,固化泥炭土的 28 d UCS 值降幅为 6%.

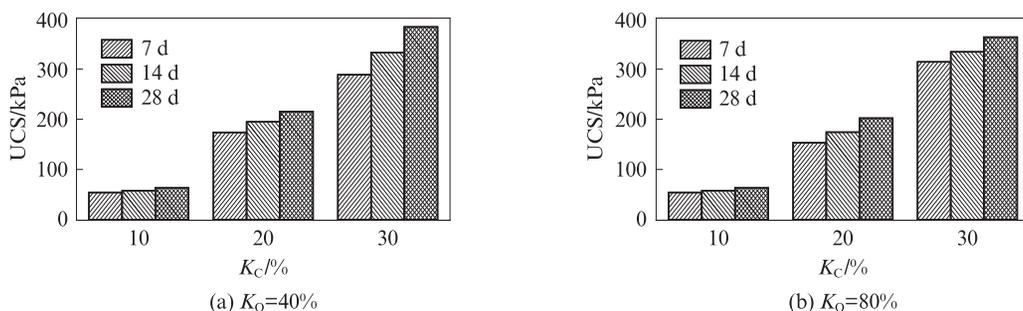


图 6 不同有机质含量固化泥炭土的 UCS 值

Fig. 6 UCS values of solidified peats under different organic contents

2.2.5 pH 值的影响

限于篇幅,仅给出泥炭土初始含水率为 200% 和 400%、有机质含量为 40% 时固化泥炭土的 UCS 值,如表 5 所示. 由表 5 可见:当泥炭土初始含水率为 200%、有机质含量为 40% 时,掺入 10% 水泥后 pH 值为 3.5、5.5 和 7.0 的固化泥炭土的 7 d UCS 值分别为 154.8、196.4、223.3 kPa; 泥炭土的

pH 值越低,即 H^+ 浓度越高,固化泥炭土的 UCS 值越低;相比于 pH 值为 7.0 的固化泥炭土, pH 值为 3.5 和 5.5 固化泥炭土的 UCS 值分别降低了 30% 和 12%; pH 值为 3.5 固化泥炭土的 UCS 值比 pH 值为 5.5 的固化泥炭土低 10%~46%; pH 值为 7.0 固化泥炭土的 UCS 值比 pH 值为 5.5 的固化泥炭土高 8%~38%.

表 5 不同 pH 值下固化泥炭土的 UCS 值

Table 5 UCS values of solidified peats under different pH values

$K_o/\%$	$K_w/\%$	$K_c/\%$	pH value	Curing age/d		
				7	14	28
40	200	10	3.5/5.5/7.0	154.8/196.4/223.3	353.1/436.9/453.3	514.8/640.7/688.4
		20	3.5/5.5/7.0	208.9/254.7/273.6	428.5/486.1/511.7	655.3/733.8/783.7
		30	3.5/5.5/7.0	261.1/332.2/355.1	489.0/563.6/584.9	752.4/867.2/918.4
	400	10	3.5/5.5/7.0	30.5/56.5/69.4	94.8/173.9/195.0	249.9/288.6/306.4
		20	3.5/5.5/7.0	40.6/61.1/71.6	128.9/195.0/227.3	277.1/332.9/350.7
		30	3.5/5.5/7.0	53.8/69.5/82.9	155.9/215.2/242.0	314.2/363.7/392.4

2.3 固化泥炭土微观结构分析

2.3.1 有机质含量的影响

图 7 为不同有机质含量固化泥炭土的微观结构. 由图 7 可见:固化泥炭土内部的高岭土颗粒呈书页状、蠕虫状或手风琴状,晶间结构比较松;泥炭土为长条形纤维结构. 水泥固化生成水化硅酸钙(C-S-H)

凝胶,提高了固化泥炭土的强度. C-S-H 凝胶一般生长成弯曲状、扭曲的薄片状或条带状,新的生长点主要出现在薄片状产物的边缘或条带状产物的两端^[10],凝胶形态符合水泥水化产物 C-S-H 凝胶的生长方式. 进入加速期后, C-S-H 凝胶呈树枝分叉状高速增长,附着在高岭土颗粒表面形成网状形貌的产物,而

颗粒间的孔隙里形成近球状产物,吕鹏等^[11]对此现象进行了相应的解释.此外,在Kolay等^[4]对水泥固化泥炭土的研究结果中,凝胶形态也与本文相似.有机质含量较低时,书页状的高岭土颗粒较多,纤维状泥炭土较少,C-S-H凝胶主要附着在高岭土上生长.有机质含量较高时,书页状的高岭土颗粒含量较少,纤维状结构比

较多,C-S-H凝胶主要附着在纤维状结构上生长.随着养护龄期的不断延长,C-S-H凝胶也不断生长,最终连成骨架.当固化泥炭土受到外力作用时,纤维状结构多的土体由于孔隙较多,水化产物无法充分填充,更易于被压缩,宏观表现为强度低.因此,有机质含量越高,固化泥炭土的无侧限抗压强度越低.

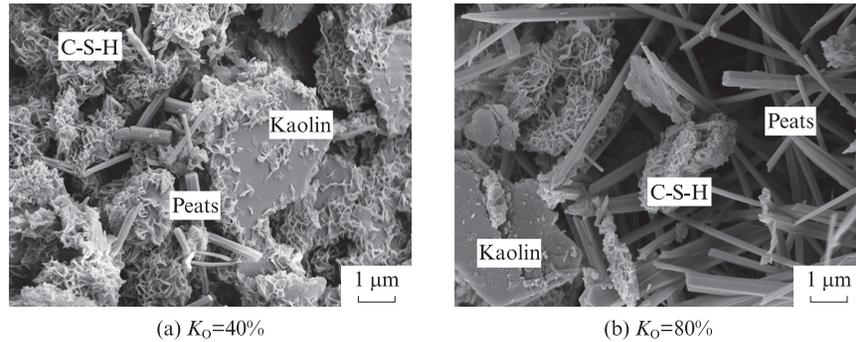


图7 不同有机质含量固化泥炭土的微观结构

Fig. 7 Microstructure of solidified peats under different organic contents

2.3.2 pH值的影响

泥炭土掺入水泥后,固化泥炭土的强度增长主要依赖于水泥水化反应产生的C-S-H凝胶等水化产物的胶结作用.宁建国等^[12]发现,水泥固化土中土样的pH值会影响固化土孔隙液中 Ca^{2+} 和 OH^- 的浓度,进而影响固化土中水化物的生成量,最终影响固化土强度的增长.式(1)为生成C-S-H凝胶的热力学方程式.

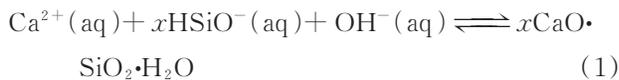


图8为不同pH值固化泥炭土的微观结构.固化

泥炭土的pH值越大,即 H^+ 浓度越低,高岭土和纤维状泥炭土表面能附着越多的水化硅酸钙凝胶(C-S-H),宏观表现出更高的无侧限抗压强度.土体pH值从7.0降低到3.5时,土体内孔隙液 H^+ 浓度逐渐增加,将消耗相当量的水泥水化产生的 OH^- .固化过程中, OH^- 损耗与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 形成都发生在孔隙液中,2个过程是同步进行的.低pH值的泥炭土导致 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 无法处于饱和状态,抑制了C-S-H凝胶产生;泥炭土的pH值越低,C-S-H凝胶的数量越少.因此,相同土体骨架下,pH值越低的固化泥炭土,其无侧限抗压强度也越低.

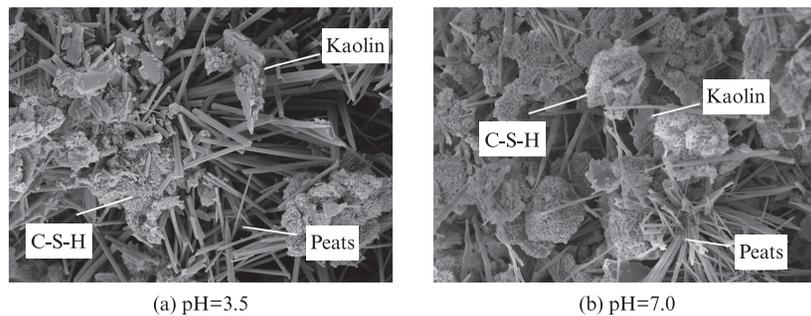


图8 不同pH值固化土的微观结构

Fig. 8 Microstructure of solidified peats under different pH values

3 水泥固化超高含水率泥炭土的配合比

基于DB33/T 904—2013《公路软土地基路堤设计规范》,要求室内水泥固化土的28 d UCS值大于300 kPa.表6为固化泥炭土28 d UCS值为300 kPa时的水泥掺量.由表6可见:泥炭土初始含水率为

200%时,掺入8.4%~11.7%水泥后固化泥炭土的UCS值满足要求.泥炭土含水率低于200%时,所需的水泥掺量不是很高,可采用水泥对其直接进行固化;一旦泥炭土的初始含水率超过300%,低pH值下需要大量的固化剂才能满足强度要求;泥炭土含水率为300%、pH值为3.5时,28 d UCS值达到300 kPa

所需的水泥掺量高达19.9%。建议在高含水率泥炭土中加入掺料,即掺入砂土或者低含水率的黏土,利用水泥水化反应产生的凝胶连接泥炭土颗粒和掺料,以达到降低水泥等固化剂用量的目的。

表6 固化泥炭土28 d UCS值为300 kPa时的水泥掺量
Table 6 Cement contents of UCS value of 300 kPa of solidified peats at curing age of 28 d

$K_w/\%$	pH value	$K_0/\%$	$K_c/\%$	Note
200	3.5	40	11.7	Direct solidification with cement
	5.5	40	90.0	
	7.0	40	84.0	
300	3.5	60	19.9	
	5.5	40/60	21.3/17.1	
	7.0	60	16.3	
400	3.5	40/80	29.1/26.1	
	5.5	40/60/80	25.7/24.5/23.8	
	7.0	40/80	23.8/23.0	
600	3.5	60	37.5	Solidification with cement and fillers
	5.5	60/80	36.0	
	7.0	60	33.8	
800	3.5	80	37.4	
	5.5	80	37.0	
	7.0	80	31.7	

4 结论

(1)随着水泥掺量的增加和固化龄期的延长,固化泥炭土的应力-应变曲线从硬化型过渡到软化型,破坏模式从塑性破坏转为脆性破坏。固化泥炭土的7 d无侧限抗压强度(UCS)快速增长,14、28 d UCS值增长的速率放缓。相比于7 d,固化泥炭土14、28 d UCS值的增幅分别为8%~29%和17%~64%。

(2)水泥掺量增加后,固化泥炭土的UCS值呈线性增长。水泥掺量从10%增加到30%后,固化泥炭土的28 d UCS值增加了161%~485%。泥炭土的有机质含量越高,C-S-H凝胶越容易附着于纤维状结构上,UCS值越低。有机质含量从40%增加到80%时,掺入30%水泥后固化泥炭土的28 d UCS值降幅为6%。

(3)固化泥炭土的pH值越高,颗粒表面能附着越多的C-S-H凝胶,其UCS值越高。相比于pH值为5.5的固化泥炭土,pH值为3.5固化泥炭土UCS值的降幅为10%~46%,pH值为7.0固化泥炭土UCS值的增幅为8%~38%。

(4)泥炭土的初始含水率增加后,固化泥炭土的

强度快速降低。泥炭土的含水率增加1倍后,固化泥炭土的28 d UCS值降低了42%~79%。泥炭土含水率低于200%时,可采用水泥直接固化;高含水率泥炭土可加入掺料,即往泥炭土中加入砂土或者低含水率的黏土,以达到降低固化剂用量的目的。

参考文献:

- [1] HUAT B B K, KAZEMIAN S, PRASAD A, et al. State of an art review of peat: General perspective[J]. International Journal of the Physical Sciences, 2011, 6(8):1988-1996.
- [2] 俞家人, 陈永辉, 陈庚, 等. 地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2):130-137.
YU Jiaren, CHEN Yonghui, CHEN Geng, et al. Mechanical behaviour of geopolymer stabilized clay and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):130-137. (in Chinese)
- [3] 李琴, 蒋卓吟, 张春红. 固化泥炭土无侧限抗压强度试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2):686-691.
LI Qin, JIANG Zhuoyin, ZHANG Chunhong. Curing peat soil unconfined compressive strength tests[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(2):686-691. (in Chinese)
- [4] KOLAY P K, AMINUR M R, TAIB S N L. Stabilization of tropical peat soil from Sarawak with different stabilizing agents[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(6):1135-1141.
- [5] 桂跃, 方超, 徐其福, 等. 昆明泥炭土工程性质原生各向异性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4):993-1003.
GUI Yue, FANG Chao, XU Qifu, et al. Study on the engineering properties inherent anisotropy characteristics of peaty soil from Kunming[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4):993-1003. (in Chinese)
- [6] HOBBS N B. Mire morphology and the properties and behavior of some British and foreign peats[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1986, 19(1):7-80.
- [7] HEBIB S, FARRELL E R. Some experiences on the stabilization of Irish peats[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(1):107-120.
- [8] 王志良, 王竟宇, 申林方, 等. 红黏土置换作用对水泥固化泥炭土强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1):87-93.
WANG Zhiliang, WANG Jingyu, SHEN Linfang, et al. Effect of red clay replacement on strength of cement stabilized peaty soil[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1):87-93. (in Chinese)
- [9] 张帆, 李向红, 孙伟, 等. 深层搅拌桩加固昆明泥炭质土的试验研究[J]. 建筑施工, 2020, 42(6):1069-1071.
ZHANG Fan, LI Xianghong, SUN Wei, et al. Experimental study on reinforcement of Kunming peat soil by deep mixing pile[J]. Building Construction, 2020, 42(6):1069-1071. (in Chinese)
- [10] GARTNER E M. A proposed mechanism for the growth of C-S-H during the hydration of tricalcium silicate[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(5):665-672.

- [11] 吕鹏, 翟建平, 聂荣, 等. 环境扫描电镜用于硅酸盐水泥早期水化的研究[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(4):530-536.
LÜ Peng, ZHAI Jianping, NIE Rong, et al. Investigation on the early stage hydration of Portland cement using environmental scanning electron microscopy[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(4):530-536. (in Chinese)
- [12] 宁建国, 黄新, 许晟. 土样pH值对固化土抗压强度增长的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1):98-102.
NING Jianguo, HUANG Xin, XU Sheng. Effect of pH value of soil on strength increasing of the stabilized soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1):98-102. (in Chinese)