

文章编号:1007-9629(2024)05-0439-07

无机填料对水泥固化泥炭土强度的影响

史江伟^{1,*}, 朱浩¹, 陈永辉¹, 王荣²

(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. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要:通过无侧限抗压强度和扫描电镜试验,研究了无机填料种类和粒径对水泥固化泥炭土强度的影响.结果表明:水泥固化泥炭土强度随着石英砂掺量的增加呈先增加后降低的趋势,20%石英砂掺量下水泥固化泥炭土强度最高;当石英砂粒径 $d > 1.0$ mm时,水泥固化泥炭土强度提升有限,而当 $d < 0.5$ mm时,水泥固化泥炭土强度提升明显;高岭土颗粒可有效填充泥炭土孔隙,有利于水泥联结无机填料和泥炭土颗粒,且水泥联合高岭土固化泥炭土的强度明显优于水泥联合石英砂;当泥炭土含水率为600%,高岭土掺量从5%增至30%时,28d龄期水泥固化泥炭土强度的增幅为58.5%~116.6%.

关键词:高含水率;泥炭土;无机填料;粒径;强度

中图分类号:TU449

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.05.008

Effect of Inorganic Filler on Strength of Cement-Stabilized Peat

SHI Jiangwei^{1,*}, ZHU Hao¹, CHEN Yonghui¹, WANG Rong²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: Through unconfined compressive strength and scanning electron microscope tests, the effects of inorganic filler type and particle size on the strength of cement-stabilized peat were investigated. The results indicate that the strength of cement-stabilized peat initially increases and then decreases with the addition of quartz sand, reaching its peak at a 20% sand content. When the particle size of quartz sand is greater than 1.0 mm, the increase in cement-stabilized peat strength is limited, whereas it is significantly enhanced when the sand particle size is less than 0.5 mm. Kaolin particles effectively fill the voids in peat, facilitating the bonding of cement with inorganic filler and peat particles. The strength of cement-stabilized peat combined with kaolin is notably higher than that with sand. When the moisture content of peat is 600%, with an increase in kaolin content from 5% to 30%, the strength of the cement-stabilized peat at 28 days of curing period shows an increase ranging from 58.5% to 116.6%.

Key words: high water content; peat; inorganic filler; particle size; strength

化学固化生成的水化硅酸钙(C-S-H)能有效填充土体孔隙,此方法被广泛用于提升软土地基的强度^[1].Axelsson等^[2]发现水泥是固化泥炭土的最优固化剂,当泥炭土含水率为442%~1413%时,最优水泥掺量为150~250 kg/m³.王荣等^[3]发现当泥炭土含水率为600%时,水泥掺量高于300 kg/m³才能确保泥炭土的强度满足工程要求.Timoney等^[4]发现固化

泥炭土强度与含水率、固化剂掺量密切相关,建议固化剂掺量为100~300 kg/m³.由此可见,高含水率泥炭土需要掺入大剂量固化剂才能满足强度要求^[5-6].

国内外学者开展了大量利用无机填料提升固化土强度的研究.Timoney等^[4]发现石英砂颗粒之间能形成点对点的胶结体,填充泥炭土孔隙,提高泥炭土强度.Wang等^[7]发现水泥联合石英砂固化土的强度

收稿日期:2023-07-02;修订日期:2023-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178327)

第一作者(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

比纯水泥固化工况大2.33倍.Wang等^[8]发现泥炭土含水率为228%时掺入40%黏土,水泥用量降低了12%.Leong等^[9]研究了石英砂掺量对水泥固化泥炭土强度的影响,发现泥炭土含水率为668%时掺入460 kg/m³石英砂,才能确保固化土强度满足要求.现有研究侧重于不同无机填料掺量下泥炭土的固化特性,无机填料粒径对水泥固化泥炭土强度特性影响研究较少,且高含水率、高有机质含量泥炭土直接固化需要大量的水泥等固化剂.因此,亟需开展水泥联合无机填料固化高含水率、高有机质含量泥炭土的适用性研究.

本文通过无侧限抗压强度和扫描电镜(SEM)试验,研究了无机填料种类和粒径对水泥固化泥炭土(后文简称固化泥炭土)强度的影响.

1 试验

1.1 原材料

综合考虑固化泥炭土强度的提升效果和经济性,选取的无机填料为石英砂和细粒土(高岭土和火山灰).石英砂的中值粒径 D_{50} 、最大孔隙比、最小孔隙比、比重和有效内摩擦角分别为0.85 mm、0.73、0.38、2.65、30.7°.高岭土的直径、比重、压缩指数、回弹指数和有效内摩擦角分别为40 μm (1250目)、2.65、0.25、0.05和23.0°.

1.2 试验方案

马来西亚沙捞越第二干道项目,位于马来西亚东岛沙捞越州西南部,新建道路的设计时速为100 km/h,要求7 a后沉降不超过25 cm.场地泥炭土富含植物根系,厚度普遍在3 m以上,最深可达11 m;泥炭土含水率 w_H (质量分数,文中涉及的含量、掺量等除特殊说明外均为质量分数)和有机质含量 w_O 分别为400%~1100%和40%~95%.以水泥掺量 w_C 、石英砂掺量 w_S 、石英砂粒径 d 、 w_O 为变量,在给定泥炭土含水率 w (400%、600%和800%)下,水泥联合石英砂固化泥炭土试验方案见表1.针对表1中所有工况开展无填料(石英砂掺量为0%)的固化泥炭土试验,并根据 w_O 将其分别记为NF-40、NF-60和NF-80.基于DB 33/T 904—2013《公路软土地基路堤设计规范》,要求室内水泥固化泥炭土的7、28 d无侧限抗压强度分别大于200、300 kPa,因此选用水泥作为泥炭土的固化剂,固化养护至龄期 t 为7、14、28 d.在 $w_H=400\%$ 、 $w_O=90\%$ 、 $w_C=30\%$ 、 $d<1.0$ mm的条件下,设置 w_S 为0%、10%、15%、20%、25%、30%,进行最优石英砂掺量试验.水泥联合高岭土固化泥炭土的配合比见表2(表中 w_K 为高岭土掺量).

表1 水泥联合石英砂固化泥炭土试验方案

Table 1 Orthogonal test plan for cement-stabilized peat with quartz sand

| Level | $w_C/\%$ | $w_S/\%$ | d/mm | $w_O/\%$ |
|-------|----------|----------|---------------|----------|
| 1 | 10 | 10 | <0.5 | 40 |
| 2 | 20 | 15 | 0.5-1.0 | 60 |
| 3 | 30 | 20 | >1.0 | 80 |

表2 水泥联合高岭土泥炭土配合比

Table 2 Mix proportion (by mass) of cement-stabilized peat with kaolin

| Unit: % | | | |
|----------|-------|--------------------|-------------------|
| w_H | w_O | w_C | w_K |
| 400, 600 | 60 | 15, 18, 20, 25, 28 | 5, 10, 15, 20, 30 |

1.3 试验步骤

首先按设计含水率配制泥炭土,装入密封袋中闷料3 d,确保水分均匀;接着将无机填料均匀拌入泥炭土并测定混合料含水率;然后将水泥均匀拌入泥炭土制备泥炭土-无机填料-水泥混合液,分5次将混合液倒入直径和高度均为5 cm的圆柱状模具中;再将制备的泥炭土试样放入(20 \pm 2) °C、相对湿度为(95 \pm 2)%的恒温恒湿标准箱中养护至龄期 t 为7、14、28 d后,测试固化泥炭土的无侧限抗压强度.

2 结果与讨论

2.1 石英砂掺量和粒径对固化泥炭土强度的影响

当 $w_H=800\%$ 时,固化泥炭土的无侧限抗压强度见图1(图中S-(<0.5)-10-80为 $d<0.5$ mm、 $w_S=10\%$ 、 $w_O=80\%$ 的固化泥炭土;其他类推).由图1可见:当 $w_C=10\%$ 时,水泥联合石英砂固化泥炭土的强度均小于无填料工况,这是因为高含水率泥炭土缺少连续土骨架,10%水泥掺量的固化效果很弱,加入石英砂后,不仅没有起到提升固化泥炭土强度的作用,反而更利于裂缝形成,降低了固化泥炭土强度^[10];当 w_C 增至20%时,0.5 mm $\leq d \leq$ 1.0 mm和 $d<0.5$ mm的水泥联合石英砂固化泥炭土强度均大于无填料工况,而掺入 $d>1.0$ mm石英砂后固化泥炭土的强度略小于无填料工况,这是因为石英砂粒径越大,单颗粒重量越大且颗粒数量越小,不能与泥炭土颗粒形成连续结构,不利于水泥水化产物的附着;当 w_C 继续增至30%时,水泥水化反应能产生足够的C-S-H凝胶,石英砂和泥炭土共同受力,水泥联合石英砂固化泥炭土的强度均大于无填料工况.

当 $w_H=600\%$ 时,固化泥炭土的无侧限抗压强度见图2(图中S-(<0.5)-10-40为 $d<0.5$ mm、 $w_S=$

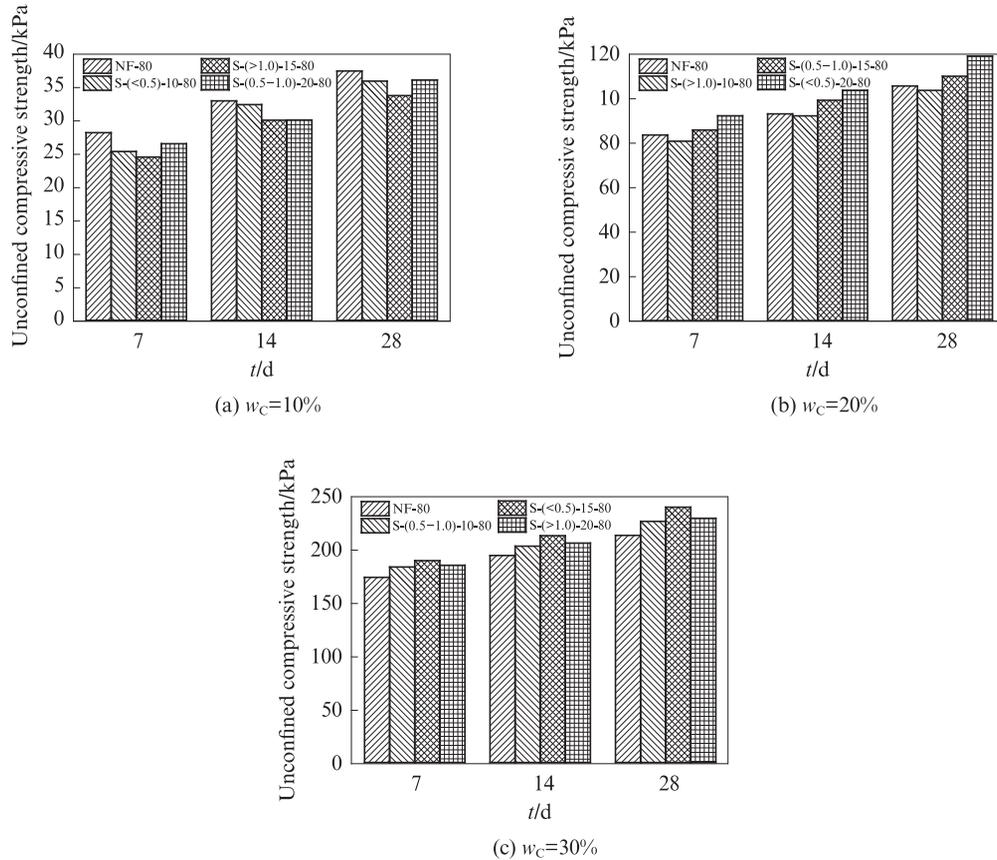


图1 $w_H=80\%$ 固化泥炭土无侧限抗压强度

Fig. 1 Unconfined compressive strength of solidified peat with $w_H=80\%$

10%、 $w_o=40\%$ 的固化泥炭土;其他类推)。由图2可见:随着 w_c 的增加,水泥联合石英砂及无填料固化泥炭土的强度均快速增大;7、28 d龄期下,水泥联合石英砂固化泥炭土的强度均高于无填料工况,即较低含水率下水泥联合石英砂能提升固化泥炭土的强度,当石英砂粒径较小时,水泥联合石英砂的固化效果更好;当 $w_c=30\%$ 时,10%、15%和20%石英砂掺

量下,固化泥炭土7 d龄期的强度分别为261.7、275.5、208.2 kPa,28 d龄期的强度分别为302.2、310.4、230.9 kPa。综上,虽然小粒径石英砂掺量低于大粒径工况,但水泥联合小粒径石英砂($d<0.5\text{ mm}$)的固化泥炭土强度比大粒径工况($d>1.0\text{ mm}$)高32.3%~34.4%,表明水泥联合小粒径石英砂能更好地提升固化泥炭土的强度。

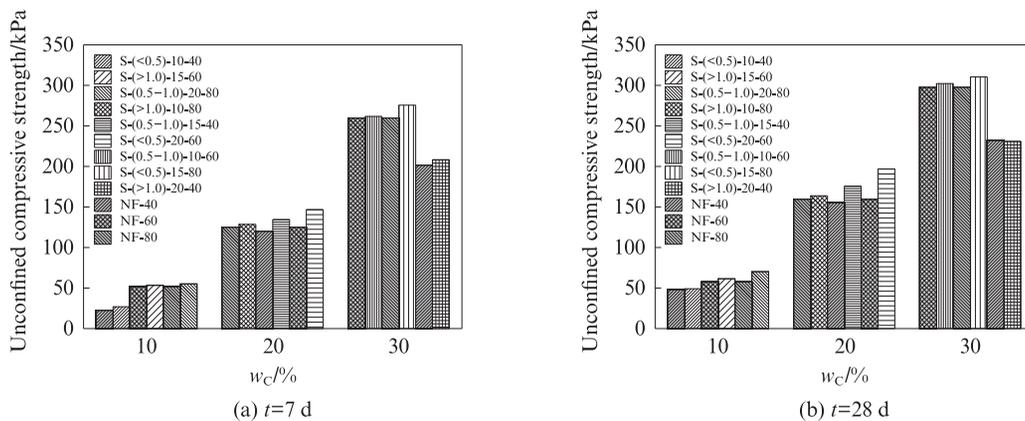


图2 $w_H=60\%$ 固化泥炭土无侧限抗压强度

Fig. 2 Unconfined compressive strength of solidified peat with $w_H=60\%$

当 $w_H=40\%$ 时,固化泥炭土的无侧限抗压强度见图3(图中S-(<0.5)-10-40为 $d<0.5\text{ mm}$ 、 $w_s=$

10%、 $w_o=40\%$ 的固化泥炭土;其他类推)。由图3可见:水泥联合石英砂固化泥炭土的强度始终高于无

填料工况,可见土体含水率较低时,内部孔隙相对较小,石英砂能有效填充土体孔隙,最大限度发挥C-S-H凝胶联结石英砂和泥炭土颗粒的作用,提升固化泥炭土强度; $w_H=400\%$ 水泥联合石英砂固化泥炭

土强度变化规律与 $w_H=600\%$ 工况一致,石英砂粒径越小,相同掺量下颗粒数目越多,能更有效地填充泥炭土孔隙,再次表明小粒径石英砂能更好地提升水泥固化泥炭土强度。

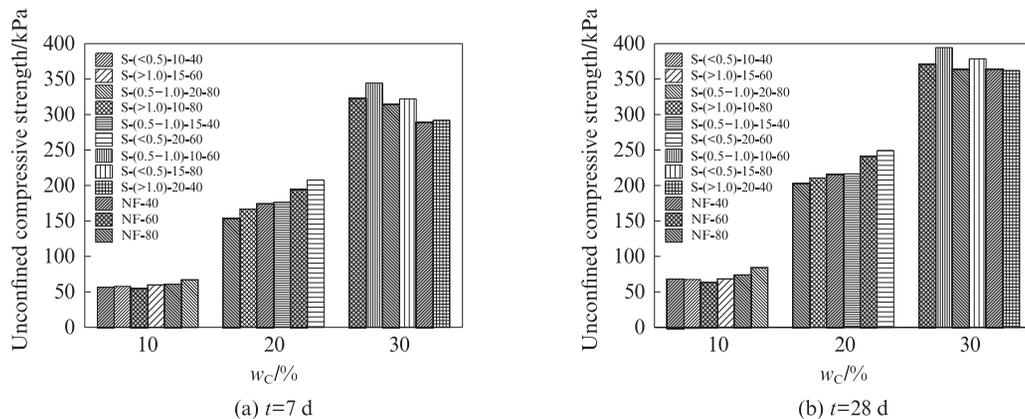


图3 $w_H=400\%$ 固化泥炭土无侧限抗压强度

Fig. 3 Unconfined compressive strength of solidified peat with $w_H=400\%$

2.2 固化泥炭土强度的影响因素

用 k_i 表示因素第 i 个水平条件下强度的平均值; R 为极差,即该列 k_i 最大与最小值的差值,且 R 值越大,该因素对固化泥炭土强度影响越大.不同含水率下水泥联合无机填料固化泥炭土强度的影响因素相同,限于篇幅,仅给出了 $w_H=600\%$ 、 $t=7$ d固化泥炭土的强度分析,结果见表3.由表3可见:水泥掺量、有机质含量、石英砂掺量和粒径的极差分别为203.34、49.91、4.63、18.38 kPa,表明控制固化泥炭土强度的影响因素依次为水泥掺量、有机质含量、石英砂粒径和石英砂掺量。

表3 $w_H=600\%$ 时7 d龄期固化泥炭土的强度分析
Table 3 Strength analysis of solidified peat with $w_H=600\%$ at 7 d

| Factor | k_1 | k_2 | k_3 | R |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| w_c | 45.17 | 129.22 | 248.51 | 203.34 |
| w_s | 139.12 | 140.03 | 143.75 | 4.63 |
| d | 153.08 | 134.72 | 135.09 | 18.38 |
| w_o | 107.86 | 157.26 | 157.77 | 49.91 |

2.3 石英砂的最优掺量

当 $d<1.0$ mm时,不同石英砂掺量下固化泥炭土的强度见图4.由图4可见:随着石英砂掺量的增加,固化泥炭土强度均呈现出先增加后降低的趋势, $w_s=20\%$ 时出现峰值,即石英砂最优掺量为20%;当 $w_s>20\%$ 时,固化泥炭土的强度逐渐降低,这是因为石英砂掺量高于最优掺量后,砂颗粒之间接触增多,导致出现新孔隙,降低固化泥炭土强度;随着龄期的

增加,水泥联合石英砂的固化效果有所下降,与无填料固化泥炭土相比,强度增幅由7 d龄期的18%下降至14 d龄期的12%.龄期较短时,水泥固化效果没有完全发挥,石英砂的掺入能较好地提升固化泥炭土的强度,而龄期增加后,水泥水化产物不断生成,水泥固化效果不断提升,水泥联合石英砂的固化效果不是十分明显。

2.4 细粒土填料对水泥固化泥炭土强度的影响

2.4.1 细粒土填料种类对固化泥炭土强度的影响

由前文可知,填料颗粒的粒径对固化泥炭土强度的影响显著,因此选择颗粒粒径更小的高岭土和火山灰开展固化试验。

泥炭土 $w_H=500\%$ 、 $w_o=80\%$,设置水泥联合石英砂固化泥炭土的 $w_s=20\%$ 、 $w_c=30\%$,水泥联合高岭土固化泥炭土的 $w_s=20\%$ 、 $w_k=30\%$.水泥联合石英砂和高岭土固化泥炭土的强度见图5.由图5可见:与水泥联合石英砂固化泥炭土相比,龄期7、14和28 d水泥联合高岭土固化泥炭土的强度分别提高了3.9%、6.3%、8.2%,龄期越长,强度增长越明显.这是因为高岭土比表面积比石英砂大,能更好地吸收泥炭土的水分,掺入高岭土后能更有效地降低泥炭土的含水率.相同掺量下,高岭土粒径小且颗粒数目多,能更有效地填充泥炭土的内部孔隙,从而使水泥联合高岭土的固化效果明显高于石英砂。

泥炭土 $w_H=400\%$ 、 $w_o=60\%$,设置 $w_c=15\%$, w_k 和火山灰掺量 w_{VA} 均为5%、10%、15%、20%、30%.龄期为7 d水泥联合石英砂和火山灰固化泥炭土的强度见图6.由图6可见:细粒土填料掺量由5%

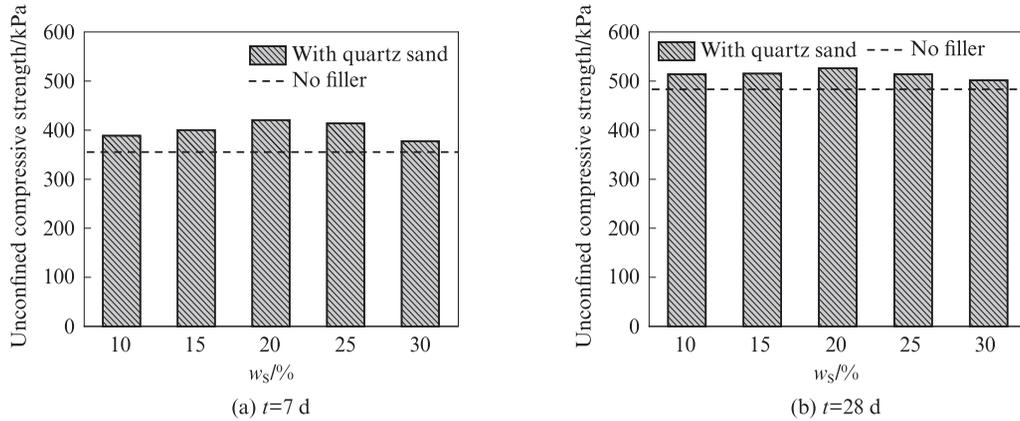


图4 不同石英砂掺量下固化泥炭土的无侧限抗压强度
Fig. 4 Effects of w_s on unconfined compressive strength of solidified peat ($d < 1.0$ mm)

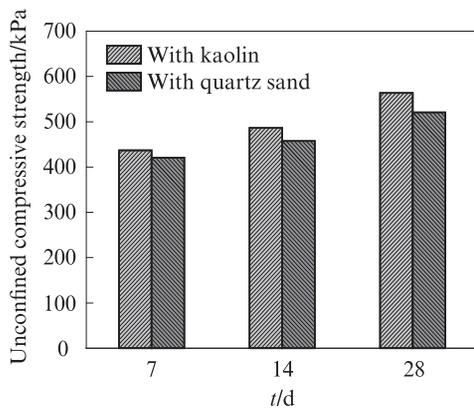


图5 水泥联合石英砂和高岭土固化泥炭土的强度
Fig. 5 Unconfined compressive strength of cement combined with quartz sand and kaolin solidified peat

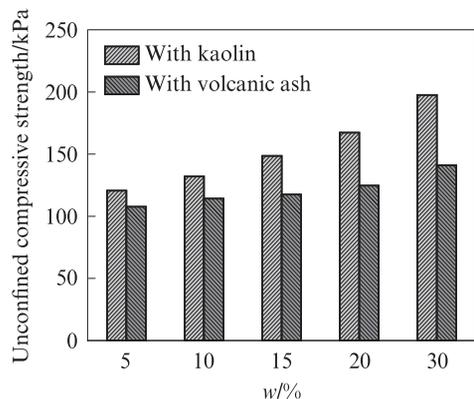


图6 龄期为7 d水泥联合高岭土和火山灰固化泥炭土的强度
Fig. 6 Unconfined compressive strength of cement combined with quartz sand and volcanic ash solidified peat at 7 d

增加至30%时,水泥联合火山灰和高岭土固化泥炭土的强度分别由107.7、120.7 kPa增加至131.0、197.6 kPa,其增幅分别为21.6%、63.7%;水泥联合火山灰的固化土强度比掺高岭土固化的工况低10.8%~33.7%。综上,水泥联合高岭土的固化效果明显优于水泥联合火山灰。下文选择水泥联合高岭

土进一步开展固化泥炭土强度特性的研究。

2.4.2 高岭土掺量对固化泥炭土强度的影响

随着高岭土掺量的增加,泥炭土含水率迅速降低,但其降低的速率逐渐放缓。泥炭土含水率越高,掺高岭土后含水率降低的幅度越大。当 w_H 为400%、600%时, $w_k=30%$ 水泥联合高岭土固化泥炭土的含水率降幅分别为60%、68%。不同高岭土掺量下水泥联合高岭土固化泥炭土的强度见图7。由图7可见:(1)当 $w_H=400%$ 时,随着高岭土掺量的增加,固化泥炭土强度增幅明显,且水泥掺量越大,强度增幅越大;当水泥掺量为15%、18%和20%时,高岭土掺量从5%增加到30%后7 d龄期固化泥炭土强度分别增加了76.9、96.3、101.6 kPa,增幅为47.5%~63.7%;龄期增至28 d后,不同水泥掺量下固化泥炭土强度增幅为62.7%~81.7%。(2)当 $w_H=600%$ 时,水泥掺量为20%、25%、28%时,高岭土掺量从5%增至30%,28 d龄期固化泥炭土强度分别增加了74.5、178.1、241.9 kPa,增幅高达58.5%~116.6%。水泥掺量越高,高岭土掺量对固化泥炭土强度影响越明显。当龄期为7 d时, $w_c=28%$ 、 $w_k=10%$ 的固化泥炭土强度与 $w_c=25%$ 、 $w_k=15%$ 的固化泥炭土接近,表明增加5%的高岭土能达到降低3%水泥用量的效果。当龄期为28 d时, $w_c=25%$ 、 $w_k=10%$ 固化泥炭土的强度与 $w_c=20%$ 、 $w_k=30%$ 固化泥炭土接近。综上,增加高岭土掺量能达到降低水泥用量的目的。

2.5 固化泥炭土微观结构分析

通过C-S-H凝胶的附着生长评估填料粒径对固化泥炭土强度的影响。龄期为28 d,不同石英砂粒径下固化泥炭土的SEM照片见图8。由图8可见:石英砂作为骨料加入,促使土体结构中接触节点增多,有利于C-S-H凝胶的附着;当 $d < 0.5$ mm时,小粒径颗

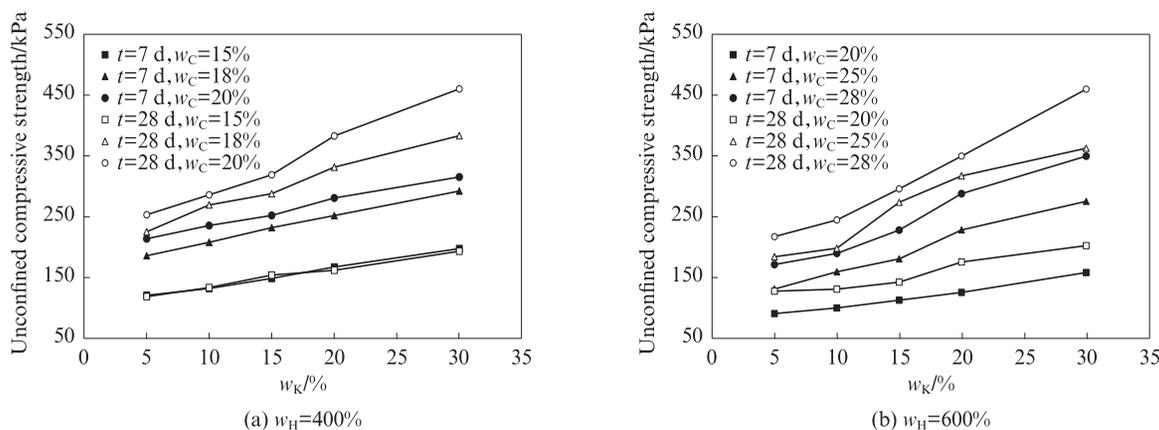


图7 不同高岭土掺量下水泥联合高岭土固化泥炭土的强度
Fig. 7 Strength of cement combined kaolin solidified peat with different kaolin contents

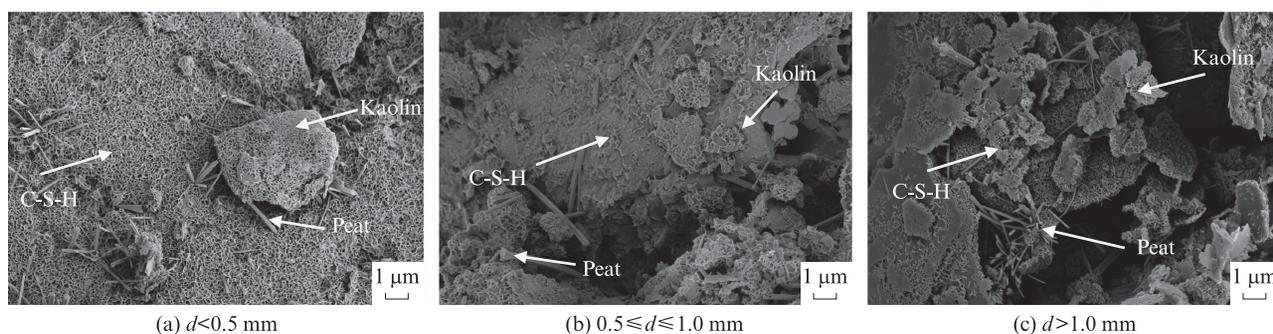


图8 不同石英砂粒径下28 d固化泥炭土的SEM照片
Fig. 8 SEM images of solidified peat with different particle size of quartz sand at 28 d

粒不仅数目多,而且可以更好地填充固化泥炭土孔隙,C-S-H凝胶能够成片生长,联结石英砂和泥炭土颗粒形成连续的土骨架,宏观表现为无侧限抗压强度较高;当 $0.5\text{ mm} \leq d \leq 1.0\text{ mm}$ 时,填料颗粒明显大于泥炭土的纤维状结构和黏土颗粒,使得C-S-H凝胶局部抱团生长,未能形成整片的连续土骨架;当 $d > 1.0\text{ mm}$ 时,填料粒径过大且数目少,C-S-H凝胶只能围绕单个填料颗粒生长,联结少数泥炭土纤维结构,石英砂颗粒之间相对独立,无法形成连续的骨架,宏观表现为无侧限抗压强度较低。

3 结论

(1)控制水泥联合石英砂固化泥炭土强度的影响因素依次为水泥掺量 w_c 、有机质含量 w_o 、石英砂粒径 d 和掺量 w_s 。当 $d > 1.0\text{ mm}$ 时,水泥固化泥炭土的强度提升有限,而 $d < 0.5\text{ mm}$ 的石英砂能明显提升水泥固化泥炭土的强度。石英砂粒径越小,越容易填充泥炭土的孔隙,利用水泥联结石英砂和泥炭土颗粒,可形成连续土骨架。

(2)随着石英砂掺量的增加,水泥固化泥炭土的强度呈现出先增加后降低的趋势;当石英砂掺量为20%时,水泥固化泥炭土强度出现峰值,即石英砂最优掺量

为20%。

(3)水泥联合高岭土固化泥炭土的强度仍比石英砂工况高3.9%~8.2%;水泥联合高岭土固化泥炭土强度比火山灰工况高10.8%~33.7%。可见水泥联合高岭土固化泥炭土的强度明显高于石英砂和火山灰工况。

(4)随着高岭土掺量的增加,水泥联合高岭土固化泥炭土强度增幅明显,且水泥掺量越大,强度增幅越高。当泥炭土含水率为400%、600%,高岭土掺量从5%增至30%时,固化泥炭土28 d强度增幅分别为62.7%~81.7%、58.5%~116.6%。高岭土颗粒粒径小且比表面积大,能有效降低泥炭土含水率和填充泥炭土孔隙,进而提升水泥固化泥炭土的强度。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] AXELSSON K, JOHANSSON S E, ANDERSSON R. Stabilization of organic soils by cement and pozzolanic reactions-feasibility study of report [R]. Linköping: Swedish Deep

- Stabilization Research Centre, 2002.
- [3] 王荣,董俊全,范衍琦,等. 超高含水率泥炭土的固化机理及强度特性[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(10):1047-1054.
WANG Rong, DONG Junquan, FAN Yanqi, et al. Solidification mechanism and strength characteristics of peat with ultra-high water content[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(10): 1047-1054. (in Chinese)
- [4] TIMONEY M J, MCCABE B, BELL A L. Experiences of dry soil mixing in highly organic soils [J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, 2012, 165(1):3-14.
- [5] 曹净,孔程,李松坡. 腐殖酸对泥炭土强度的影响及其机理分析[J]. 安全与环境学报, 2021(5):2493-2499.
CAO Jing, KONG Cheng, LI Songpo. Effect of humic acid on strength of peat soil and its mechanism analysis[J]. Journal of Safety and Environment, 2021(5):2493-2499. (in Chinese)
- [6] 陈永辉,陈明玉,张婉璐,等. 矿渣-水泥固化碱渣土的工程特性[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(4):582-585, 597.
CHEN Yonghui, CHEN Mingyu, ZHANG Wanlu, et al. Engineering properties of solidified soda residue with GGBS and cement[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(4):582-585, 597. (in Chinese)
- [7] WANG J Y, LI M, WANG Z L, et al. The benefits of using manufactured sand with cement for peat stabilisation: An experimental investigation of physico-chemical and mechanical properties of stabilised peat [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(8):4441-4460.
- [8] WANG Z L, LI M, SHEN L F, et al. Incorporating clay as a natural and enviro-friendly partial replacement for cement to reduce carbon emissions in peat stabilisation: An experimental investigation[J]. Construction and Building Materials, 2022, 353: 128901.
- [9] LEONG S W, ROSLAN H, FAISL A. Improved strength and reduced permeability of stablized peat: Focus on application of kaolin as a pozzolanic additive [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40:783-792.
- [10] DEGHANBANADAKI A, AHMAD K, ALI N. Influence of natural fillers on shear strength of cement treated peat [J]. Gradevinar, 2013, 65(7):633-640.