

粉煤灰对水泥土强度及固化过程的影响

陈三珊^{1,2}, 陈 峰^{1,2}

(1.福建省环保节能型高性能混凝土协同创新中心,福建 福州 350108;
2.福建江夏学院 工程学院,福建 福州 350108)

摘要:从粉煤灰-水泥相互作用、粉煤灰-淤泥质土相互作用两个方面开展一系列试验,研究粉煤灰对水泥和淤泥质粘土的强度及固化过程的影响,然后通过扫描电镜(SEM)试验,观察粉煤灰水泥土的微结构变化以探究其机理。粉煤灰水泥石强度试验表明粉煤灰能使水泥石 28 d 及以上龄期的强度提高,粉煤灰淤泥质土的含水率试验和固结不排水试验表明,粉煤灰使淤泥土的硬度变大,X 射线衍射(XRD)试验表明粉煤灰能细化水泥中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒,SEM 试验结果表明粉煤灰可以使水泥土的微结构更加密实。

关键词:水泥土;粉煤灰;固化机理;微观分析;强度

中图分类号: TU477

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)01-0061-07

Effects of fly ash on the strength and solidification process of cement soil

CHEN Sanshan^{1,2}, CHEN Feng^{1,2}

(1.Coordinative Innovation Center for Environment-Friendly and Energy-Saving High-Performance Concrete, Fuzhou 350108, China;
2.School of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A series of experiments were carried out considering fly ash-cement interaction and fly ash-silty soil interaction to study the effects of fly ash on the strength and solidification process of cement and silty soil. Then the microstructure changes of fly ash cement soil were observed to explore its mechanism through scanning electron microscope (SEM) tests. The strength test of fly ash cement stones shows that the strength of cement stones at 28 d and above were improved by adding fly ash. The moisture content test of fly ash-silty soil and its consolidated undrained test show that the mixed soil became harder. The X-ray diffraction (XRD) test shows that fly ash could refine the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ crystal grains in cement. SEM test results show that the microstructure of cement soil became more compact by adding fly ash.

Keywords: cement soil; fly ash; solidification mechanism; micro-analysis; strength

国内外众多研究表明^[1-10],水泥土中掺加适合的粉煤灰可以改善水泥土的特性,提高水泥土的强度。黄丽娟^[11]利用正交试验方法分析研究了水泥掺量、水灰比和粉煤灰三因素三水平对水泥土抗压强度的影响规律。赵百超^[12]等研究了水泥、膨润土和粉煤灰等三因数对水泥复合土抗剪强度的影响。蒙强^[13]等研究发现随着龄期的

增长和粉煤灰掺量的增加,固化土的应力应变关系由塑性破坏转变成脆性破坏。当粉煤灰掺量过高时,水泥土中易发生耦合反应,影响固化效果。王崙^[14]开展了不同粉煤灰掺量水泥土试件的无侧限抗压强度、含水率以及中心部位土样溶液 pH 值的测定试验,建议洞庭湖区水泥土中粉煤灰掺量在 20%左右为宜。陈峰等^[15]研究了不同粉煤

收稿日期: 2020-10-16

基金项目: 福建省自然科学基金(2019J01883);福建省教育厅科技项目基金(JAT170611);福建江夏学院青年科研基金(JXZ2016005)

第一作者简介: 陈三珊(1988—),女,福建龙岩人,硕士,实验师,研究方向:岩土工程。

灰掺量下的水泥土变形特性。

当前研究对于粉煤灰的适量掺加可以提高水泥土强度基本已达成共识,但绝大部分局限于宏观方面,且研究角度均为水泥土整体强度的提高。如文献[1]是通过试验分析高钙粉煤灰水泥土早期强度,文献[2]研究粉煤灰对高含水量水泥土无侧限抗压强度的影响,文献[3]–[9]均是研究不同条件下粉煤灰对水泥土的强度的影响,文献[6]研究的是不同侵蚀环境下粉煤灰对水泥土强度的影响。在微观方面,粉煤灰的提高机理尚待进一步研究。另外,土体作为固液气三相综合体,土质特性在不同地区差别极大,如文献[7]取自武汉地区的膨润土,文献[9]取自青海的湿陷性黄土,文献[14]取自洞庭湖区粘土等,所研究的粉煤灰最佳掺量并不一致。为此,本研究首先从粉煤灰-水泥、粉煤灰-淤泥质土的相互作用两个方面入手,通过开展粉煤灰水泥土无侧限抗压强度试验及X射线衍射(即XRD)试验,研究粉煤灰对水泥的影响;通过粉煤灰-淤泥质粘土混合土的含水率试验和固结不排水试验,研究粉煤灰对福州地区淤泥质土特性的影响,最后通过扫描电镜(即SEM)试验观察粉煤灰水泥土微结构的形成过程,研究粉煤灰、水泥、土三者间的作用机理。

1 材料与实验

1.1 材料性能及参数

粉煤灰的化学成分含量如表1所示,水泥采用42.5普通硅酸盐水泥,其性能指标如表2所示,水灰比0.45。土样取自福州市某基坑淤泥质粘土,内聚力为9 kPa,摩擦角为6.5°,其余物理力学参数如表3所示。

表 1 粉煤灰化学成分及含量

Tab.1 Chemical composition and content of fly ash

化学成分	质量百分比/%
SiO ₂	57.20
Al ₂ O ₃	34.71
Fe ₂ O ₃	3.51
CaO	2.59
MgO	0.17
SO ₃	0.22

表 2 42.5 硅酸盐水泥化学成分及性能指标

Tab.2 Chemical composition and performance indicators of 42.5 Portland cement

性能指标	$m_{SO_3} / \%$	$m_{MgO} / \%$	烧失量/%	比表面积/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa
标准值	≤3.5	≤5.0	≤5.0	≥300	≥3.5	≥17.0
实测值	2.56	1.57	1.95	377	5.8	24.4

表 3 淤泥质粘土的物理力学性质指标

Tab.3 Physical-mechanical properties index of silty clay used for the tests

天然含水率/%	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比	液限/%	塑限/%	压缩系数/ MPa^{-1}
54.4	1.62	1.499	45.1	20.8	1.08

1.2 试样制备与试验过程

为了研究粉煤灰对水泥土强度的影响,着重从粉煤灰掺量与龄期两个影响因素进行考察。粉煤灰掺量(粉煤灰质量/水泥质量×100%)分别为0%、40%、53%、67%。将水泥倒入搅拌锅内,加水,低速搅拌至均匀,再加入粉煤灰搅拌直至均匀,制成70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的立方体试件进行养护,养护龄期分别为7、28、60、90 d。养护龄期完成后开展粉煤灰水泥土的无侧限抗压强度试验。每个配比制作3个试样,取平均值作为该配比强度值。强度试验完成后,选取养护龄期为7 d和28 d的各配比试样,敲开水泥土,从内部取出若干小块,放入烘箱(设置温度105 ℃)中烘干8 h,取出水泥土小块用研钵研碎成粉末,过0.075 mm筛,并将粉末试样放到X射线衍射仪进行分析,设备运行参数为6 kV/30 mA,衍射角度5°~70°,速度为8°/min。

为了研究粉煤灰-淤泥质粘土的相互作用,首先进行煤灰-淤泥质粘土混合土的含水率试验。将试验土样烘干,捣碎过0.5 mm筛,粉煤灰掺量(粉煤灰质量/湿土质量×100%)分别为0%、6%、8%、10%,称取相应掺量的粉煤灰、干土、0.545×干土质量的水倒入搅拌锅内并搅拌均匀,在三瓣模中制备圆柱型试样并采用塑料袋密封试样,养护至7 d和28 d时再测定混合土的含水率。

混合土的固结不排水试验与含水率试验的配比与材料相同,将土样烘干,捣碎,过0.1 mm筛,

称取相应质量的粉煤灰、干土和水搅拌均匀并装入试模,用重 300 g 的击锤击实,养护至 7 d 和 28 d,每个试样分别用 TSZ30-2.0 应变控制式三轴仪在围压 25、50、75 kPa 下固结,然后维持围压不变,进行固结不排水试验。剪切速率为 0.06 mm/min,轴向应变速率为 0.075 %/min,轴向应变达到 20%终止加荷。

SEM 试验中,将掺量为 0% 和 8% (粉煤灰质量/水泥土质量×100%) 的粉煤灰分别掺入相同的水泥土中制备试样,养护龄期到后取试样约 1 cm×1 cm×1 cm,经电吹风低温吹干,表面镀金处理后在扫描电镜下观察,扫描电镜设备为德国蔡司扫描电镜 EVO 10。

2 实验结果分析

2.1 粉煤灰水泥石强度试验

图 1 为不同粉煤灰掺量与水泥石的无侧限抗压强度关系图。可以发现,7 d 龄期时水泥石的强度随着粉煤灰掺量的增加而减小,粉煤灰掺量越大,水泥石强度越低。龄期在 28、60、90 d 时,水泥石强度随着粉煤灰掺量的增加先增大后减小,在 0%、40%、53%、67% 4 个粉煤灰掺量条件下,最佳粉煤灰掺量为 53%。图 2 为不同龄期与水泥石强度的关系图,可以发现,7 d 龄期时,粉煤灰掺量为 0 的水泥石强度最大,其余龄期时,水泥石的强度均随着龄期的增长而增长,增长速率随着龄期的增长而逐渐变缓。

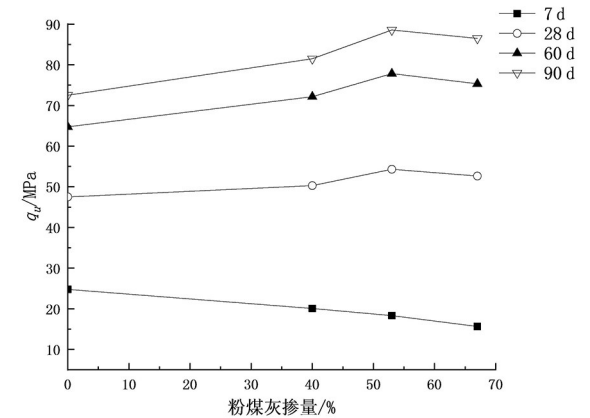


图 1 粉煤灰掺量与水泥石强度关系

Fig.1 Relationship between fly ash content and cement stone strength

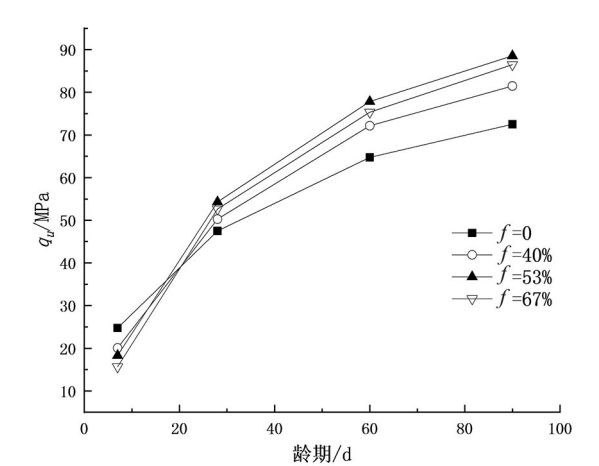


图 2 龄期与水泥石强度关系

Fig.2 Relationship between age and cement strength

2.2 粉煤灰水泥石的 XRD 试验

水泥的水化主要是水泥中熟料矿物的水化以及少量 CaSO₄ 的水化,这是水泥土强度增长的主要过程。普通硅酸盐水泥熟料矿物组成主要有硅酸三钙 3CaO·SiO₂ (简称 C₃S)、硅酸二钙 2CaO·SiO₂ (简称 C₂S)、铝酸三钙 3CaO·Al₂O₃ (简称 C₃A)、铁铝酸四钙 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃ (简称 C₄AF)。在水泥水化完全的环境中,C-S-H 为硅酸钙凝胶,是 C₂S 和 C₃S 的水化产物,约占 70%,对水泥土强度起决定性作用;Ca(OH)₂ 约占 20%;水化硫铝酸钙约占 7%;3% 为其他水化产物,如水化产物钙矾石 AFt。AFt 结晶的形成有利于提高水泥土早期凝结速率。

通过 XRD 试验可得不同粉煤灰掺量下 7 d 和 28 d 的水泥石粉末试样的衍射图谱,限于篇幅,仅列粉煤灰掺量为 53% 的衍射图谱如图 3 所示。其中 C-S-H 由于化学成分不稳定,结晶度低,同时其化学成分各异,不能明显区分,所以试验中的衍射图谱并未检测出 C-S-H。Ca(OH)₂ 一般结晶程度高,所有 XRD 衍射图谱中均存在较明显的 Ca(OH)₂ 衍射峰。粉煤灰掺量与衍射峰强度制作成相应的曲线如图 4 所示。

由图 4 可见,粉煤灰掺量为 0 时,Ca(OH)₂ 的衍射峰强度最高,且 28 d 龄期比 7 d 龄期明显更大,这说明 Ca(OH)₂ 结晶程度随着龄期增长变得更高,晶体结构趋于完整。掺入粉煤灰后,7 d 龄期时随着粉煤灰掺量的增大,Ca(OH)₂ 的衍射峰强度逐渐降低,但不明显,28 d 龄期时降低程度

较大,28 d 龄期与 7 d 龄期相比 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的结晶更加不完善。可以推测这是因为粉煤灰中富含活性 SiO_2 和 Al_2O_3 , 会与水泥水化生成物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行反应, 化学反应见公式 (1) 和公式 (2)。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量减少, 促使水泥发生“二次水化”, 粉煤灰活性效应的发挥消耗了大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体。而 7 d 龄期粉煤灰的活性效应基本不发挥, 所以 7 d 龄期时粉煤灰的掺加对 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰强度影响较小。

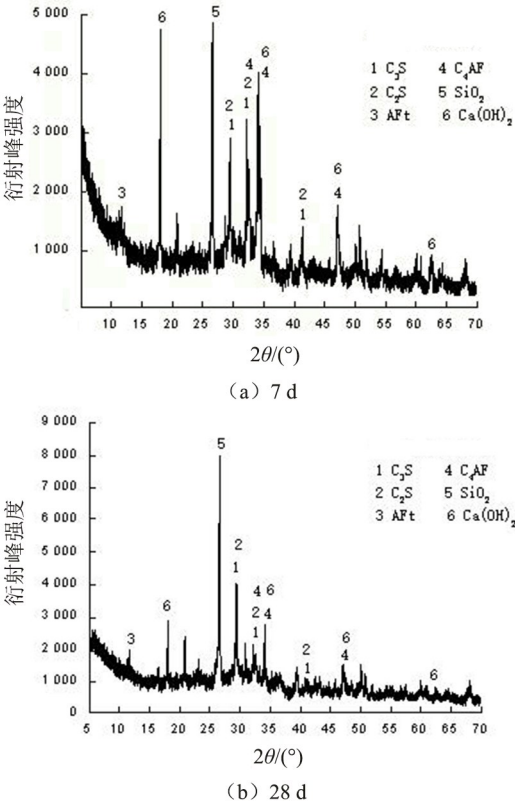
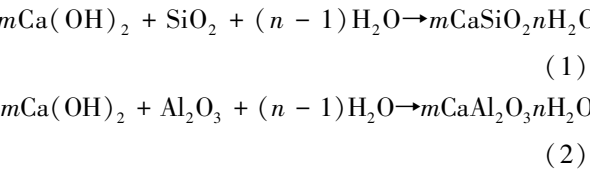


图 3 粉煤灰掺量 53% 时衍射图谱

Fig.3 Diffraction pattern of cement stone with 53% fly ash content

试验数据通过 Jade 软件分析及谢乐公式的推导可得 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒尺寸。图 5 是粉煤灰掺量与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒尺寸的变化关系图。由图 5 可知, 7 d 龄期时, 随着粉煤灰掺量的增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒

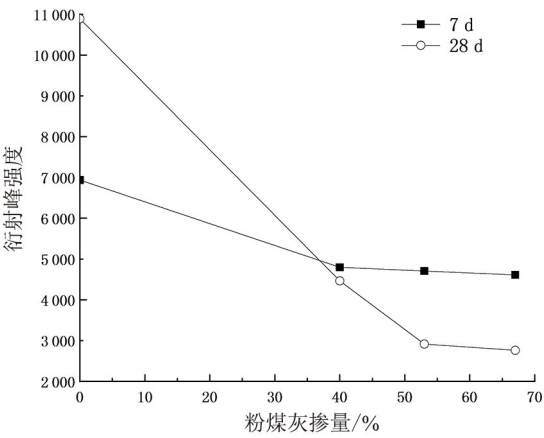


图 4 粉煤灰掺量与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰强度关系曲线
Fig.4 Relationship between the content of fly ash and the intensity of the diffraction peak of $\text{Ca}(\text{OH})_2$

尺寸逐渐减小, 不过减小程度低; 28 d 龄期时, 因粉煤灰的掺加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒尺寸大幅度减小, 并且在粉煤灰掺量为 53% 时减小的程度最大。说明粉煤灰的掺加对 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒有细化作用, 能够使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒尺寸减小, 并且在最佳粉煤灰掺量时粉煤灰的细化效果最显著。

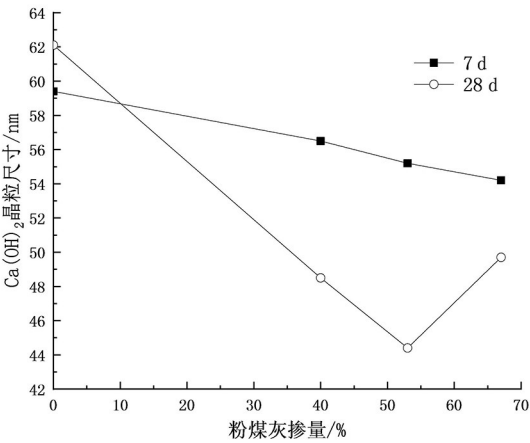


图 5 粉煤灰掺量与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒尺寸关系
Fig.5 Relationship between fly ash content and grain size

2.3 粉煤灰-淤泥质粘土的含水率试验

含水率试验在一定程度上可以反映混合土的物理性质。图 6 给出了不同粉煤灰掺量下混合土含水率的变化值, 无论 7 d 还是 28 d, 粉煤灰的掺加均会降低混合土的含水率。粉煤灰在 7 d 龄期时其活性基本没有发挥, 说明 7 d 龄期时, 粉煤灰使混合土含水率降低的原因不是粉煤灰活性成分

SiO_2 和 Al_2O_3 与土中水或土颗粒发生化学反应,而是粉煤灰与土之间的物理作用使得混合土含水率降低,硬度变大。

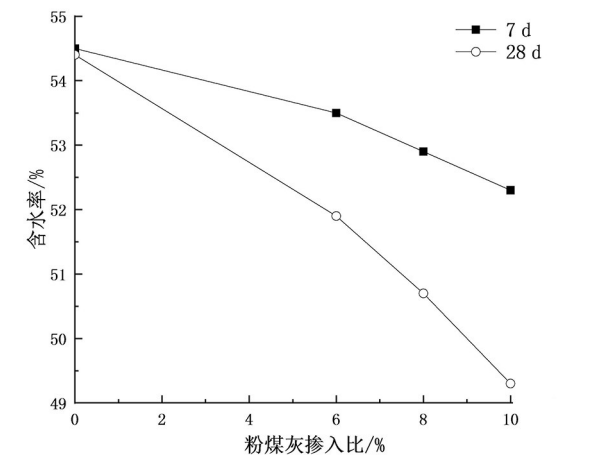


图 6 不同粉煤灰掺入比混合土含水率
Fig.6 Moisture content of mixed soil with different fly ash content ratio

2.4 粉煤灰-淤泥质粘土的固结不排水试验

对于混合土的力学性能主要通过固结不排水试验来研究,试样在不同围压 σ_3 下竖向加载,可分别得到不同配比混合土剪切破坏的最大主应力 σ_1 ,以 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 为圆心, $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 为半径,可绘出每个配比的应力圆和抗剪强度包线。

根据包线可得不同龄期不同配比的混合土黏聚力和内摩擦角,绘制粉煤灰掺入比与粘聚力和摩擦角的关系曲线分别如图 7 和图 8 所示。由图 7 可见,混合土黏聚力均随着粉煤灰掺入比的增加而增大,并且 28 d 的增大程度明显大于 7 d 龄期。由图 8 可见,粉煤灰的掺入能够提高混合土的内摩擦角,并且随着龄期的增长效果越明显。这是因为一方面完全重塑土静置长时间之后自身的固结作用使结构趋于密实,另一方面是粉煤灰活性效应的发挥。

3 粉煤灰水泥土固化机理的微观试验分析

使用德国蔡司扫描电镜 EVO 10,观察不同倍数下粉煤灰掺入比分别为 0% 及 8% 时的电镜扫描图片,如图 9 及图 10 所示。图 9 中(a)(b)和(c)(d)不同龄期相同倍数图片对比可见,7 d 龄期时,主要有板片状、凝絮状水化产物及一定量的

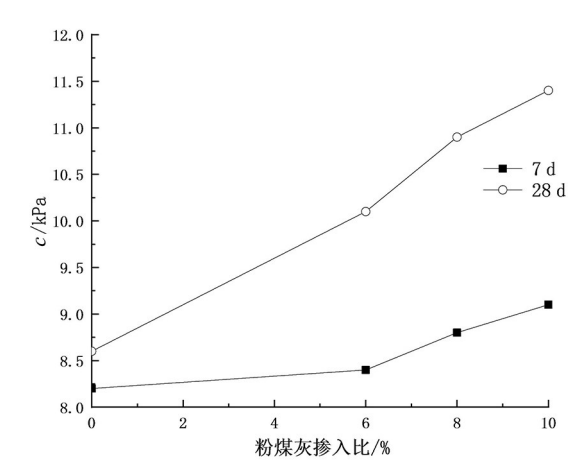


图 7 粉煤灰掺入比与混合土黏聚力关系
Fig.7 Relationship between fly ash content ratio and cohesive force of the mixed soil

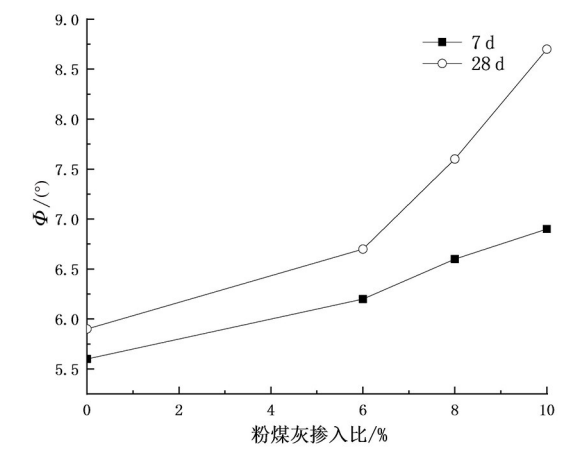
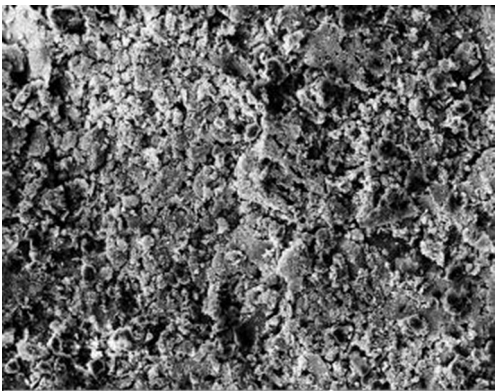
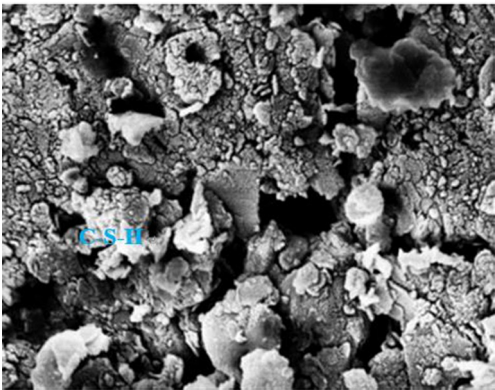


图 8 粉煤灰掺入比与混合土内摩擦角关系
Fig.8 Relationship between fly ash content ratio and friction angle in the mixed soil

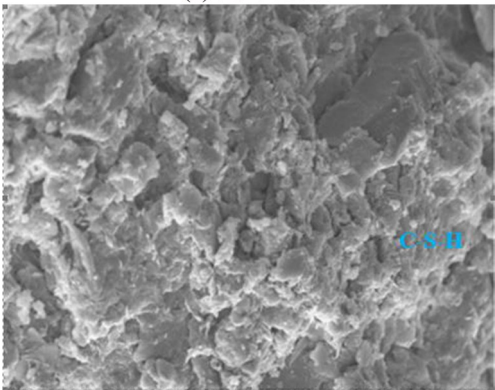
短棒状水化产物。板片状的晶体为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,凝絮状为 C-S-H 凝胶,短棒状水化产物为 AFt 晶体。该龄期时粉煤灰、土颗粒棱角分明,水化产物部分附着在孔隙或土颗粒表面,C-S-H 凝胶含量较少。28 d 龄期时,凝絮状水化产物 C-S-H 明显较 7 d 龄期时多,短棒状的水化产物相互交错搭接,大部分的颗粒表面已经被水化产物覆盖而不易观察,但整体上看形成的结构更为密实,且此时水泥水化生成碱环境使粉煤灰也开始发生“火山灰效应”。这说明随着龄期的增长,水泥土颗粒结构越来越密实,孔隙不断被 C-S-H 凝胶物质填充,土颗粒胶结越来越强,水泥土的强度越来越高。



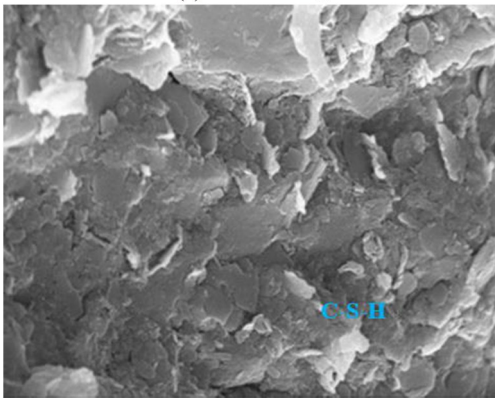
(a) 7 d 1 000倍



(b) 7 d 7 500倍



(c) 28 d 1 000倍

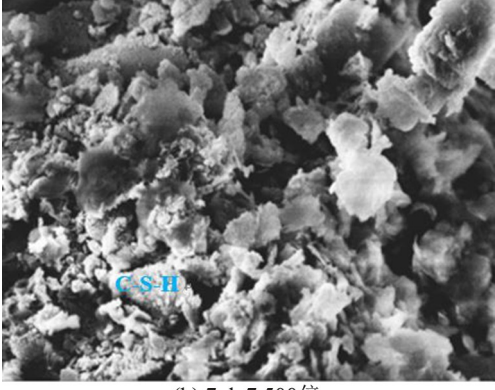


(d) 28 d 7 500倍

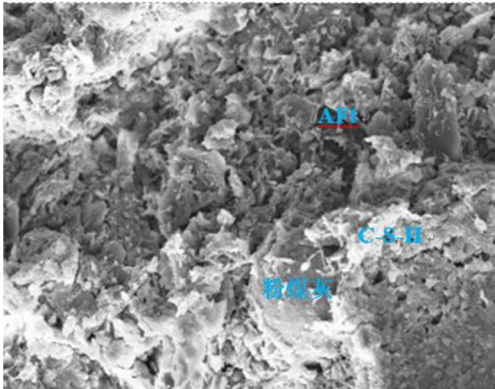
图 9 粉煤灰掺入比为 0% 时扫描电镜照片
Fig.9 SEM photos when fly ash content ratio is 0%



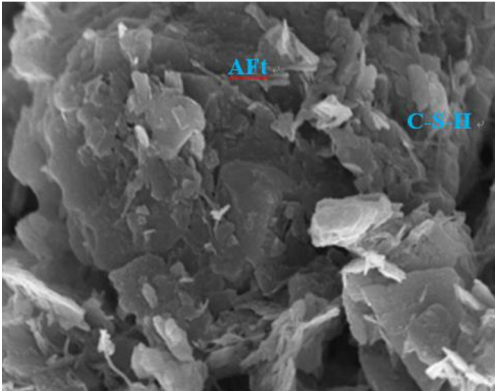
(a) 7 d 1 000倍



(b) 7 d 7 500倍



(c) 28 d 1 000倍



(d) 28 d 7 500倍

图 10 粉煤灰掺入比为 8% 时扫描电镜照片
Fig.10 SEM photos when fly ash content ratio is 8%

比较图 9 和图 10 的相应图片,掺加了粉煤灰的孔隙明显较未掺加粉煤灰的少,粉煤灰的掺加使得水泥土的孔隙更少结构更完整。粉煤灰的掺加能够使水泥土产生大量呈纤维状的水化产物,这些水化产物相互胶结,使结构更加稳定。结合上述所有试验成果可知,粉煤灰水泥土作为水泥、粉煤灰与土三种物质组成的整体,其强度的形成是水泥-粉煤灰-土三者之间相互作用的结果。

4 结论

1)粉煤灰水泥土强度试验表明粉煤灰的掺加使水泥土 7 d 龄期强度降低,不利于水泥土早期强度发展,但能使其 28 d 龄期及以后的强度提高。

2) XRD 试验结果表明,掺加粉煤灰后 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的结晶程度随龄期变低,粉煤灰能使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒尺寸减小,细化 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒。

3)掺加粉煤灰的淤泥质粘土含水率试验表明粉煤灰使淤泥质粘土的含水率降低,硬度变大。

4)粉煤灰-淤泥质土的三轴固结不排水试验结果表明粉煤灰的掺加能提高混合土的抗剪强度,且龄期越长粉煤灰增强土体抗剪强度的效果越明显。

5) SEM 试验表明粉煤灰的掺加明显改善了水泥土的微结构特征,使结构更加紧密。粉煤灰水泥土强度的形成是粉煤灰、水泥、土三者相互作用的结果。

参考文献:

- [1] 董玉萍,张玉佩. 高钙粉煤灰水泥土早期强度试验[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3248-3252.
- [2] JONGPRADIST P, JUMLONGRACH N, YOUWAI S, et al. Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1): 49-58.
- [3] LUIS A, DENG L. Development of mechanical properties of Edmonton stiff clay treated with cement and fly ash[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 14(3): 329-339.
- [4] BINAL A, BINAL B. Ternary diagrams for predicting strength of soil ameliorated with different types of fly ash[J]. Arabian Journal for science Engineering, 2020, 45(10): 8199-8217.
- [5] MURMU A, DHOLE N, PATEL A. Stabilization of black cotton soil for subgrade application using fly ash geopolymer[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 21(2): 1-19.
- [6] 董玉萍,石金祥. 不同侵蚀环境对高钙粉煤灰水泥土强度影响试验[J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 33(3): 63-66.
- [7] 陈律,胡福洪,胡刚. 武汉地区粉煤灰和膨润土双掺合剂水泥土性能改良试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(12): 62-67.
- [8] 姜鹏,章剑青,朱征平. 粉煤灰水泥土强度增长机理研究及其试验验证[J]. 山西建筑, 2019, 45(18): 6-8.
- [9] 崔靖俞,解邦龙,季港澳,等. 粉煤灰水泥土渗透性能的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(34): 323-329.
- [10] 张鹏飞,邬旺,刘志军. 掺入粉煤灰对水泥土强度影响试验分析[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(9): 144-146.
- [11] 黄丽娟. 粉煤灰对水泥土抗压强度影响的正交试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2009, 28(3): 352-356.
- [12] 赵百超,陈四利,董凯赫. 基于膨润土、粉煤灰的水泥复合土抗剪强度研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9): 2882-2889.
- [13] 蒙强,邵俐,施倩芸. 粉煤灰水泥土力学特性试验研究[J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(5): 490-496.
- [14] 王崙,耀英,方国宝,等. 洞庭湖区掺粉煤灰水泥土性能试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 210-216.
- [15] 陈峰,赖锦华. 粉煤灰水泥土变形特性实验研究[J]. 工程地质学报, 2016(1): 96-101.

(责任编辑:方素华)