

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.06.016

钾盐和磷酸盐对固化土早期强度的影响研究

肖寒冰, 欧忠文, 刘晋铭, 莫金川, 杨康辉

(中国人民解放军后勤工程学院 化学与材料工程系, 重庆 401331)

摘 要: 利用土壤板结原理, 通过对硫铝酸盐水泥固化土无侧限抗压强度试验和水稳定性试验, 探讨钾盐、磷酸盐对其早期强度的影响规律; 通过 X 射线衍射 (XRD) 对固化土的物相成分进行了分析, 探讨钾盐、磷酸盐影响固化土强度的变化内在机制。试验结果表明, 钾盐、磷酸盐对固化土强度提高的阈值为 0.6%, 当盐掺入量低于该阈值时, 固化土强度会随着盐掺量的增加而提高, 当盐掺入量超过该阈值时, 固化土强度会逐渐降低。盐掺入量不超过 2% 时, 掺盐固化土水稳定性与未掺盐固化土差不多, 7 d 固化土软化系数基本保持在 70% 以上, 但掺入 K_2SO_4 的固化土水稳定性较差, 软化系数在 60% 左右。生成高强难溶具有膨胀性的矿物晶体是掺盐固化土早期强度提高的主要原因, 但盐掺入量过高, 固化土中矿物晶体过多膨胀作用, 破坏固化土结构, 而使固化土早期强度降低。

关 键 词: 固化土; 钾盐; 磷酸盐; 无侧限抗压强度; 水稳定性

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 06-1643-06

Effects of potassium salt and phosphate on the early strength of stabilized soil

XIAO Han-bing, OU Zhong-wen, LIU Jin-ming, MO Jin-chuan, YANG Kang-hui

(Department of Chemistry and Material Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401331, China)

Abstract: According to the features of soil solidification, a series of unconfined compression and water stability tests is conducted to investigate the effects of the variation of potassium salt and phosphate concentrations on the early strength of sulphoaluminate cement-stabilized soil. X-ray diffraction (XRD) analysis of phase composition of the stabilized soil is performed to reveal the mechanism for the changes of the early strength of the stabilized soil. The experimental results show that there is a threshold of about 0.6% in potassium salt and phosphate contents. If the mixing amount of the salts in the stabilized soil is lower than this threshold value, the strength of the stabilized soil increases with the increase of the salt concentration; while the amount exceeds the threshold, the strength of the stabilized soil will decrease. If the salt concentration is not more than 2%, the water stability of the stabilized soil with salt is similar to that without salt; the softening coefficient of the stabilized soils after 7-day curing is larger than 70%, whereas the water stability of the stabilized soil with K_2SO_4 is poorer, and the softening coefficient is about 60%. XRD analysis shows that the generation of insoluble mineral crystal with high strength and expansibility is the main reason that the early strength of the stabilized soil is improved after introducing potassium salt or phosphate. If the salt concentration is too high, the early strength of stabilized soil will be drastically reduced due to mineral crystal excessive expansion effect, which destroys the structure of stabilized soil.

Keywords: stabilized soil; potassium salt; phosphate; unconfined compressive strength; water stability

1 引 言

战时军用机场跑道、重要军用运输通道的快速开设, 抢滩登陆沙滩处理, 特大地震等地质灾害后交通道路的抢修抢建均涉及到土壤的原位快速高强硬化。此类快硬高强土壤固化材料的开发具有很强的应用价值, 美、日等发达国家已成功开发此类材

料, 并实现工程应用。而我国在这方面起步较晚, 技术尚未成熟, 研发的产品多有早期强度低、水稳性差等特点, 无法达到工程抢修抢建的要求。

为研制快硬高强土壤固化材料, 本研究选定具有快硬早强性能的硫铝酸盐水泥作为基础胶凝材料, 借鉴土壤板结 (soil hardening) 的思想, 尝试将土壤板结的机制运用到土壤固化中, 以提高固化

收稿日期: 2014-11-10

基金项目: 后勤科研计划重点项目 (No.BY211C016)。

第一作者简介: 肖寒冰, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要从事工程抢修抢建材料研究。E-mail: x_h_bing@163.com

通讯作者: 欧忠文, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事工程抢修抢建材料研究。E-mail: ouzhongwen@sina.com

土的强度。据相关文献^[1], 土壤板结是指土壤表层经降雨或灌水等外因作用后, 土壤团粒结构遭到破坏, 导致土壤保水能力及通透性降低, 干燥后受黏聚力作用硬化的现象。造成土壤团粒结构破坏的因素有很多, 主要有土壤有机质含量降低和施用无机肥料过量两类。关于前者, 徐日庆等^[2-4]已进行了深入的研究, 并将其应用于淤泥质土的固化。过量施用无机肥料 (主要是钾肥、磷肥) 同样会造成土壤团粒结构破坏, 导致土壤板结。关于无机盐对固化土强度的影响, 国内外进行了一些研究。韩鹏举等^[5-6]研究了硫酸钠、氯化镁对水泥土早期强度与微观孔隙的影响规律; 邓晓轩等^[7]利用可以提高 CH 饱和度的化学试剂来改善固化土的强度; Abood 等^[8]探讨了不同氯化物对固化土强度的影响。但关于钾盐、磷酸盐对固化土早期强度的影响, 目前尚没有系统的研究。因此, 本研究选取了无机肥料中常用的 5 种钾肥、磷肥相对应的无机盐: KH_2PO_4 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、草木灰 (K_2CO_3)、 K_2SO_4 、 KCl , 探讨了 5 种有机盐不同含量时固化土 7 d 无侧限抗压强度的变化规律以及水稳定性能, 同时结合化学反应方程式、水化产物的物相等, 研究了钾盐、磷酸盐对固化土早期强度影响机制。

2 试验材料

试验土样的原材料为重庆市沙坪坝区大学城某处深度范围在 20~150 cm 的土壤, 经 50 °C 恒温鼓风干燥箱烘干至恒重, 过 4.75 mm 筛后得到试验备用土样。土样的基本性质见表 1。

表 1 土样的基本性质
Table 1 Basic properties of soil

土壤类型	液限 /%	塑限 /%	塑性指数 /%	最佳含水率 /%	最大干密度 /(g/cm ³)
黏土	33.6	21.2	12.4	17.2	1.92

试验所用的快硬硫铝酸盐 42.5 水泥(SAC)产自峨眉山强华特种水泥有限责任公司。 KH_2PO_4 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 K_2CO_3 、 K_2SO_4 、 KCl 均为成都市科龙化工试剂厂生产的分析纯。

3 试验方法

3.1 击实试验

通过击实试验, 可以绘制固化土混合料的含水率-干密度关系曲线, 得出其最佳含水率和最大干密度, 从而确定固化土混合料的掺水量及试样的控制密度。试验采用多功能自控电动击实仪, 击实试验

的平均单位击实功为 2 687 kJ/m², 分 5 层击实, 每层 27 次。

3.2 无侧限抗压强度试验

称取一定量的烘干备用土样, 按照掺水量少于最佳含水率, 将水加入到备用土样中并拌合均匀, 将其置于密闭容器中浸润 12 h 以上。再将预定数量的硫铝酸盐水泥与试验土样混合, 加入 3% 水直至拌合均匀, 制备成固化土试样。在这些固化土样中分别掺加不同量的钾盐、磷酸盐, 以考察钾盐、磷酸盐对固化土早期无侧限抗压强度的影响。每种盐按照掺量的不同分为 7 大组, 掺量分别为 0%、0.2%、0.4%、0.6%、1%、2%、3%。根据《土壤固化剂》^[9]、《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[10]等相关标准规范, 在 1 h 内, 按照固化土最大干密度 (1.94 g/cm³) 作为试件控制密度, 在 200 kN 压力下成型为 50 mm×50 mm 圆柱体试件。4 h 后脱模, 称取并记录各试件的质量 m_1 。将试件置于标准养护箱养护 7 d, 称量并记录各试件的质量, 然后进行无侧限抗压强度试验。

3.3 水稳定性试验

将各大组的试件根据试件养护条件的不同分为浸水养护组和未浸水养护组。未浸水养护组按照无侧限抗压强度试验进行。浸水养护组是指试件脱模后在标准养护箱中养护 6 d, 取出试件, 浸水 24 h, 擦去表面可见自由水, 再次称量并记录各试件的质量 m_2 , 然后测定试件的无侧限抗压强度。同时将其强度及表观质量与未浸水养护组试件进行比较, 以判断不同浓度钾盐、磷酸盐对固化土水稳定性的影响。

3.4 固化土物相分析

浸水养护组和未浸水养护组的试件经养护后, 分别将其破碎取芯, 烘干研磨后, 采用日本岛津 X 衍射分析仪 (XRD-6100) 对其进行成分分析, 测试采用连续扫描测量法, 扫描范围为 5°~80°, 扫描速度为 4°/min。运用 JADE6.5 软件对固化土物相进行分析, 采用尝试法和初步估计的方法找到可能物相, 再结合固化土的实际成分做出推断^[11]。

4 试验结果与分析

4.1 击实试验

本试验中硫铝酸盐水泥掺量均为土样质量的 12%。通过击实试验可以得到固化土混合料含水率与干密度的关系曲线, 如图 1 所示。从而可以确定固化土混合料最佳含水率为 15.1%, 最大干密度为 1.94 g/cm³。掺加不同量的钾盐、磷酸盐, 在固化土混合料含水率为 15.1% 时, 能满足试件 94% 以上的

压实度,符合工艺要求^[12]。为了方便试验对比,试验各组中掺水量均为固化土混合料质量的15.1%。

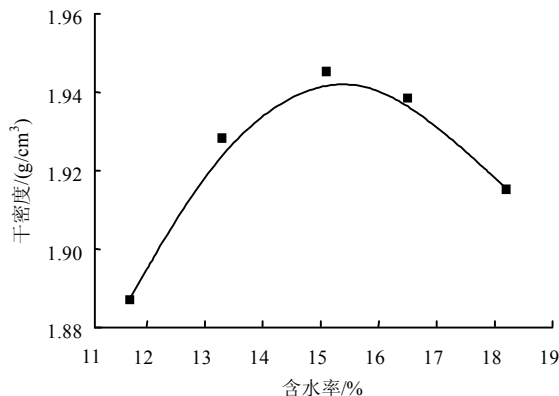


图1 水泥含量为12%时固化土含水率与干密度曲线
Fig.1 Relation between water content and dry density of stabilized soil at a cement-soil ratio of 12%

4.2 无侧限抗压强度

掺入不同比例钾盐、磷酸盐,固化土7 d无侧限抗压强度如图2所示。由图可知,掺入不同的掺钾盐、磷酸盐,其固化土强度变化都有一个共同的特点:盐掺入量对固化土强度增长存在一个阈值;当盐入量低于该阈值时,随着盐掺入量的增加,强度不断

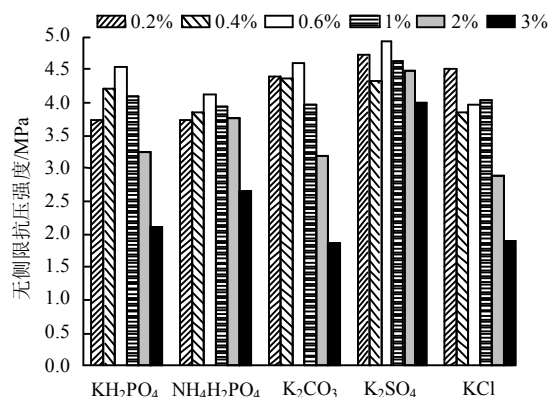


图2 掺入不同量钾盐、磷酸盐固化土7 d无侧限抗压强度
Fig.2 Unconfined compressive strengths of stabilized soils with different amounts of potassium salt or phosphate after 7-day curing

提高;相反当盐掺入量超过该阈值,随着盐掺入量的增加,强度会得到极大地降低。该阈值基本保持在0.6%左右,不同盐对应的阈值存在一定的差异。其中KCl在掺量为0.2%时固化土强度最高,在掺量为0.4%~1%时,强度较掺量为0.2%有所降低,但在该范围内强度变化不大,并且仍大于不掺盐的固化土强度,因此,可以认为KCl的阈值也在0.6%左右。

在所掺入的几种盐中早期固化效果依次为: $K_2SO_4 > K_2CO_3 > KH_2PO_4 > KCl > NH_4H_2PO_4$ 。其中 K_2SO_4 早期固化效果最好,在掺量较低时,固化土强度就很高;掺量较高时,固化土强度降低很小,且在掺量为0.6%时,固化土强度达到最高的4.92 MPa,比未掺盐固化土强度提高了32.6%。 K_2CO_3 固化效果较好,最佳掺量对应的固化土强度比未掺盐固化土强度提高了23.7%。 KH_2PO_4 、KCl固化效果次之,最佳掺量对应的强度比未掺盐固化土强度分别提高了22.6%、21.2%。 $NH_4H_2PO_4$ 早期固化效果最差,掺入后固化土强度变化不大。

4.3 水稳定性

掺入不同盐的7 d固化土浸水24 h后无侧限抗压强度见图3,其软化系数 η 及质量变化 Δm 见表2。

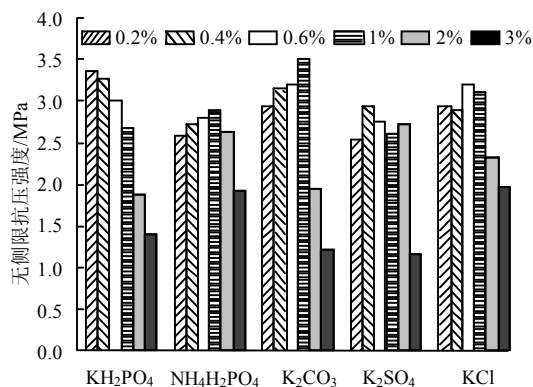


图3 掺入不同量钾盐、磷酸盐固化土浸水养护后7 d无侧限抗压强度

Fig.3 Unconfined compressive strengths of stabilized soils with different amounts of potassium salt or phosphate after 7-day curing in water

表2 掺入不同盐的固化土水稳定性能

Table 2 Water stabilities of stabilized soils with different salts

盐掺入量/%	软化系数 η /%					质量变化 Δm /g				
	KH_2PO_4	$NH_4H_2PO_4$	K_2CO_3	K_2SO_4	KCl	KH_2PO_4	$NH_4H_2PO_4$	K_2CO_3	K_2SO_4	KCl
0.2	90.1	68.9	66.9	53.6	74.7	1.2	1.4	1.7	1.9	1.2
0.4	77.6	71.0	72.2	68.1	75.1	1.3	1.1	1.7	1.9	1.5
0.6	66.8	67.9	69.4	56.0	80.1	1.3	0.8	1.2	1.5	1.8
1.0	74.6	73.3	88.6	56.2	76.8	1.3	2.2	1.0	2.1	1.1
2.0	58.1	70.1	60.7	60.8	80.7	3.1	3.8	1.8	2.2	0.5
3.0	开裂	开裂	缺损	开裂	72.1	开裂	开裂	缺损	开裂	1.5

其中软化系数 η 等于浸水养护组无侧限抗压强度与未浸水养护组无侧限抗压强度的比值^[13], 质量变化 $\Delta m = m_2 - m_1$ 。

由表 2 可看出, 当盐掺入量较低时, 除 K_2SO_4 外, 掺加不同盐的固化土, 其软化系数多数保持在 70% 以上, 与未掺盐的固化土的软化系数差别不大。掺入 K_2SO_4 的固化土水稳定性较差, 软化系数在 60% 左右。而未掺盐固化土浸水后的无侧限抗压强度为 2.79 MPa, 由图 3 可知, 尽管掺盐后的固化土软化系数不高, 但其浸水后的无侧限抗压强度仍高于未掺盐固化土浸水后的强度。说明在盐掺入量适量的情况下, 钾盐、磷酸盐的掺入对固化土早期强度有促进作用。当盐掺入量增加到一定值时, 固化土性能发生急剧变化, 吸水性得到极大增强, 固化土呈现出开裂溃烂等现象。如图 4(a) 为 K_2CO_3 掺量 3% 时固化土未浸水养护组照片, 固化土表面布满了白色类似霉状物质。图 4(b) 为 K_2CO_3 掺量 3% 时固化土浸水养护后照片, 固化土四周已溃散缺损。出现上述现象的主要原因可能是: K_2CO_3 是碱性物质, 与土壤混料拌合后, 会发生一系列的水化反应, 生成 KOH。在 K_2CO_3 掺量较高时, 固化土中产生了大量的 KOH, 在固化土硬化的初期, KOH 往往存在于固化土剩余水中, 随着固化土逐渐干燥硬化, 固化土内部的这种剩余水就逐渐沿着固化土内部的细小孔隙移动到固化土表面。随着水分逐渐蒸发, KOH 就被析出, 大量累积在固化土表面, 出现类似泛碱现象。固化土浸水后, 由于 KOH 极易溶于水, 固化土表面遭到侵蚀而软化。图 4(c) 为 $NH_4H_2PO_4$ 掺量 3% 时固化土浸水养护后照片, 固化土出现龟裂现象。 KH_2PO_4 、 K_2SO_4 在掺量较高时同样会出现上述现象。因为盐掺入量较高时, 固化土中会产生较多的膨胀性物质, 当膨胀量超过固化土的孔隙体积, 同时膨胀力也超过固化土自身的黏结力, 固化土发生破坏, 内部结构不再致密, 遇水后吸水量急剧增加, 更容易软化开裂^[14]。



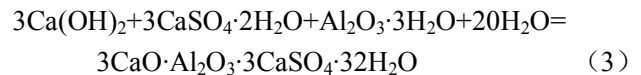
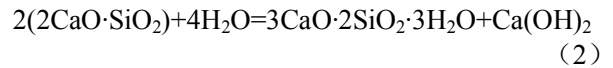
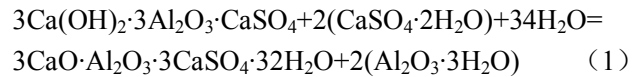
(a) 3% K_2CO_3 , 未浸水 (b) 3% K_2CO_3 , 浸水 (c) 3% $NH_4H_2PO_4$, 浸水

图 4 掺盐固化土养护后表面形态

Fig.4 Surface morphology of stabilized soils with salts after curing

4.4 微观分析

对未掺盐固化土和掺入不同浓度钾盐、磷酸盐的固化土进行了 XRD 分析。由图 5、6 可知, 掺入钾盐、磷酸盐的固化土与未掺盐固化土土样在成分上有一定的差别。未掺盐时, 硫铝酸盐水泥加固土主要通过以下水化反应过程:



XRD 试验结果表明, 掺入钾盐的固化土有一些共同特点: 固化土土样都有含钾的钾长石、白云母、珍珠云母生成, 而钠长石、蒙脱石、钡钠长石等矿物含量较原状土有所降低。这些矿物含量的变化说明 K^+ 将土壤矿物中部分多价阳离子置换出来。而土壤中多价阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主, 置换出来的 Ca^{2+} 可以与钠长石 ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) 中的 Na^+ 发生等量交换, 形成水泥蜂窝状的团粒结构, 使土体单元更加紧密坚固; Ca^{2+} 同样还可以与固化土中的 OH 结合促进反应式 (3) 的进行, 加速钙矾石 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) 晶体的形成, 从而提高固化土的早期强度。

不同钾盐对提高固化土早期强度的效果不同, 主要原因在于不同钾盐对应的阴离子不同, 这些阴离子影响固化土中水化产物的生成。 K_2SO_4 固化效果最好, 是因为 K_2SO_4 中的 SO_4^{2-} 与固化土反应生成石膏 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), 如图 5(c) 所示, 其体积是 $Ca(OH)_2$ 的 2 倍多, 使固化土发生膨胀。同时石膏的生成还能促进式 (1) ~ (3) 反应的快速进行, 生成钙矾石晶体, 由于其膨胀性, 体积的增加填充了固化土中的孔隙, 从而提高了固化土的早期强度。但当 K_2SO_4 掺量超过一定值后, 固化土产生的膨胀力超过了固化土自身的黏结力, 固化土结构遭到破坏, 导致其强度降低^[15]。 K_2CO_3 固化效果较好, 在于其 CO_3^{2-} 能与固化土中的 Ca^{2+} 反应生成难溶于水的 $CaCO_3$ 晶体, $CaCO_3$ 晶体具有较高的强度和稳定性, 对固化土强度具有增强作用。

从 XRD 分析试验结果可以看出, 掺入磷酸盐的固化土有块磷铝矿 ($AlPO_4$)、橙磷铁镁石 ($MgFe_2(PO_4)_2(OH)_2 \cdot 8H_2O$) 等含 PO_4^{3-} 的物质生成, 掺入 $NH_4H_2PO_4$ 的固化土还会生成磷钠铵石、草酸铵石。这些矿物含量的变化说明, 掺入的磷酸盐中的 PO_4^{3-} 与固化土中的 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 等阳离子反应生成了极难溶于水的物质, 而且这些物质具有很高的强度, 热力学性能也极为稳定, 这可能是掺入磷酸盐后固化土早期强度提高的原因。

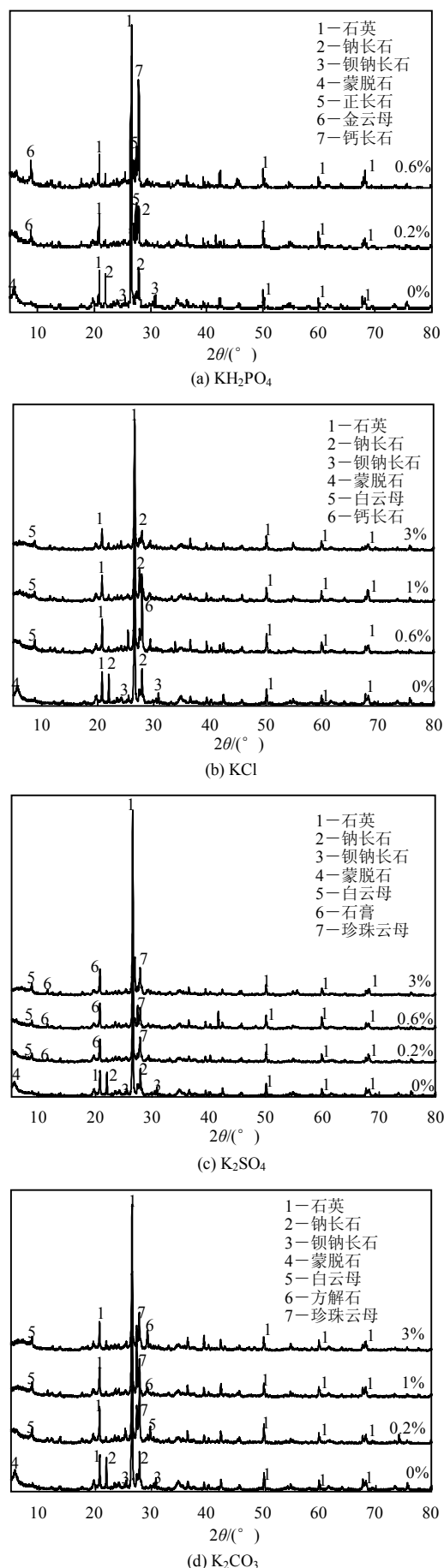
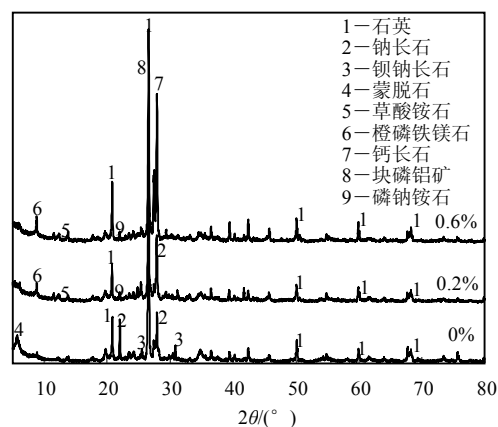


图5 7 d 固化土 X 射线衍射图

Fig.5 X-ray diffractions of stabilized soil samples at 7 days

图6 掺入 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的 7 d 固化土 X 射线衍射图Fig.6 X-ray diffraction of stabilized soil samples with $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ at 7 days

但由于 KH_2PO_4 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 溶于水呈酸性, 能与硫铝酸盐水泥中的碱性成分发生酸碱中和反应, 消耗一部分硫铝酸盐水泥, 从而降低了水泥基材料水化反应的碱性环境, 影响到硫铝酸盐水泥水化生成水化硫铝酸钙晶体, 因此, 其对固化土早期强度的促进作用要次于 K_2SO_4 、 K_2CO_3 。

而掺入 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的固化土比掺入 KH_2PO_4 固化土的早期强度低, 主要原因可能是 NH_4^+ 与固化土反应生成了氨气 (NH_3), 氨气在逸出的过程中, 使固化土产生了孔隙, 从而降低了固化土的强度, 而 KH_2PO_4 中的 K^+ 对固化土早期强度有一定的促进作用。因此, KH_2PO_4 的固化效果要比 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 好。

5 结 论

(1) 在一定浓度范围内, 试验所掺入的钾盐、磷酸盐对固化土早期强度有一定的促进作用, 该阈值为 0.6% 左右。在该范围内, 所掺盐固化效果依次为: $\text{K}_2\text{SO}_4 > \text{K}_2\text{CO}_3 > \text{KH}_2\text{PO}_4 > \text{KCl} > \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 。当 K_2SO_4 掺量为 0.6% 时, 固化土强度达到最高的 4.92 MPa, 比未掺盐固化土强度提高了 32.6%。

(2) 在钾盐、磷酸盐掺量不超过 2% 时, 掺盐固化土水稳定性与未掺盐固化土差不多, 软化系数多数保持在 70% 以上。但掺入 K_2SO_4 的固化土水稳定性较差, 软化系数在 60% 左右。但掺盐固化土浸水后的无侧限抗压强度仍比未掺盐固化土浸水后强度高。

(3) XRD 物相分析得出, 钾盐、磷酸盐的掺入有利于生成高强难溶具有膨胀性的矿物晶体, 这是掺入钾盐、磷酸盐提高固化土早期强度的主要原因, 但当钾盐、磷酸盐掺入量过多, 生成的矿物晶体过度膨胀, 导致固化土结构破坏, 从而引起固化土强度降低。

参考文献

- [1] 郑浴, 张艳丽, 王琨, 等. 城市园林土壤板结机制及改良研究[J]. 农学学报, 2014, 4: 25—29.
- ZHENG Yu, ZHANG Yan-li, WANG Kun, et al. Mechanism and improvement on urban landscape greenbelt soil hardening[J]. **Journal of Agriculture**, 2014, 4: 25—29.
- [2] 徐日庆, 李俊虎, 蔡承晟, 等. 用固化剂 GX08 加固杭州海湖相软土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1528—1533.
- XU Ri-qing, LI Jun-hu, CAI Cheng-sheng, et al. Study of strength characteristics of stabilized soil by using stabilizing agent GX08 treating marine and lacustrine soft soil in Hangzhou[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(6): 1528—1533.
- [3] 畅帅, 徐日庆, 李学刚, 等. 基于响应面法的淤泥质土固化配方优化研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 105—110.
- CHANG Shuai, XU Ri-qing, LI Xue-gang, et al. Optimization of formula for stabilizing muddy soil using response surface methodology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1): 105—110.
- [4] 李学刚, 徐日庆, 畅帅, 等. 响应面法优化有机质软土复合固化剂配方[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(5): 843—849.
- LI Xue-gang, XU Ri-qing, CHANG Shuai, et al. Application of response surface methodology on optimizing mixture ratio of composite curing agent used to improve organic matter soil stabilization[J]. **Journal of Zhejiang University(Engineering Science)**, 2014, 48(5): 843—849.
- [5] 韩鹏举, 刘新, 白晓红. 硫酸钠对水泥土的强度及微观孔隙影响研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2555—2561.
- HAN Peng-ju, LIU Xin, BAI Xiao-hong. Effect of sodium sulfate on strength and micropores of cemented soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2555—2561.
- [6] 韩鹏举, 张文博, 刘新, 等. 氯化镁对水泥土早期强度的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1173—1178.
- HAN Peng-ju, ZHANG Wen-bo, LIU Xin, et al. Early strength of cemented soils polluted by magnesium chloride[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(6): 1173—1178.
- [7] 邓晓轩, 黄新, 宁建国. 外掺剂对水泥固化土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1628—1633.
- DENG Xiao-xuan, HUANG Xin, NING Jian-guo. Influence of admixture on strength of stabilized soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(10): 1628—1633.
- [8] ABOOD T T, KASA A B, CHIK Z B. Stabilisation of silty clay soil using chloride compounds[J]. **Journal of Engineering Science and Technology**, 2007, 2(1): 102—110.
- [9] 中华人民共和国建设部. CJ/T 3073—1998 土壤固化剂[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [11] VEISI M, CHITTOORI B, CELAYA M, et al. Accelerated stabilization design of subgrade soils[R]. El Paso: The University of Texas at El Paso, 2010.
- [12] 樊恒辉, 吴普特, 高建恩, 等. 密度和含水率对固化土无侧限抗压强度的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(3): 54—58.
- FAN Heng-hui, WU Pu-te, GAO Jian-en, et al. Influence of density and water content on unconfined compression strength of solidified soil[J]. **Science of Soil and Water Conservation**, 2006, 4(3): 54—58.
- [13] 张大捷, 田晓峰, 侯浩波, 等. 矿渣胶凝材料固化软土的力学性状及机制[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1987—1991.
- ZHANG Da-jie, TIAN Xiao-feng, HOU Hao-bo, et al. Mechanical behavior and mechanism of stabilizing soft soil by slag cementitious material[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(9): 1987—1991.
- [14] 储诚富, 刘松玉, 邓永锋, 等. 含盐量对水泥土强度影响的室内试验研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(1): 139—143.
- CHU Cheng-fu, LIU Song-yu, DENG Yong-feng, et al. The threshold of salt contents on strength of cement-mixed clays: A finding of laboratory tests[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(1): 139—143.
- [15] 韩鹏举, 白晓红, 赵永强, 等. Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 相互影响对水泥土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 72—76.
- HAN Peng-ju, BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, et al. Experimental study on strength of cement soil under Mg^{2+} and SO_4^{2-} interaction influence[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(1): 72—76.