

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.017



水泥固化温州污染土的力学性质和 微观结构特性

朱超鹏, 潘林有, 余闯, 王辉, 蒋吉方, 廖饶平

(温州大学 建筑工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要:在不同水泥掺量和龄期条件下对 NaCl、油脂、 $Pb(NO_3)_2$ 污染的温州软土进行水泥固化处理后,土体的强度得到改善。为进一步得出水泥固化处理对于不同污染土的处理效果,对水泥固化稳定不同的污染土进行了无侧限抗压强度试验和微观结构研究。分析了不同污染物类型、污染物掺入量、水泥掺入量以及养护龄期对水泥固化污染土强度特性的影响以及不同污染物浓度下水泥固化土微观结构的差异。试验结果表明:NaCl 在一定范围内促进了水泥固化土早期强度的提高;油脂使水泥固化土的强度明显降低,压缩性增大; $Pb(NO_3)_2$ 掺入到土体中后,水泥固化土的强度总体上略有降低,掺入量与强度之间大致呈线性关系。随着水泥掺入量及龄期的增加,水泥固化污染土的强度会有显著提高。扫描电镜(SEM)结果分析得出:由于污染物的作用,污染物浓度的增加使固化土中孔隙增多,结构变得疏松。

关键词:水泥;污染土;强度;微观结构

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)03-0117-07

Mechanical properties and microstructure characteristics of cement solidification pollution soil from Wenzhou

Zhu Chaopeng, Pan Linyou, Yu Chuang, Wang Hui, Jiang Jifang, Liao Raoping

(School of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: Under the condition of different cement content and curing time of NaCl, grease, $Pb(NO_3)_2$ pollution in Wenzhou soft soil cement solidification processing, the strength of the soil have been improved. In order to further obtain the treatment effect of different contaminated soil during cement solidification process, unconfined compressive strength tests and microstructure studies were conducted on different cement solidified contaminated soil. The effect of pollution type, pollution content, cement content, curing time on the cement solidified soil strength characteristics was analyzed. Furthermore, the difference of the microstructure of cement solidified soil with different pollutants concentration was also

收稿日期:2017-06-05

基金项目:国家自然科学基金(41372264, 51578427, 51508418);浙江省公益性应用研究计划项目(2014C33015, 2015C33220);温州市重大科技专项(ZS2017002)

作者简介:朱超鹏(1991-),男,主要从事环境岩土研究,E-mail:540344137@qq.com。

余闯(通信作者),男,教授,E-mail:3945735@qq.com。

Received:2017-06-05

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41372264, 51578427, 51508418); Public Welfare Application Research Project of Zhejiang Province (No. 2014C33015, 2015C33220); Wenzhou Major Science and Technology Project(ZS2017002)

Author brief: Zhu Chaopeng(1991-), main research interest: environmental geotechnical, E-mail:540344137@qq.com.
Yu Chuang(corresponding author), professor, E-mail:3945735@qq.com.

analyzed. The results show that within a certain range, the NaCl concentration promotes cement solidification of the early strength; grease content makes the cement solidification soil strength reduce obviously and compressibility increase; after $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ was dropped into the soil, the strength of the cement solidification is reduced in general. A linear relationship appears between the strength and admixing amount. The cement solidification soil strength enhances with the increase of cement content and curing time. Scanning electron microscopy(SEM) results indicate that the increase of contaminate leads to the rise of porosity and loose structure of the solidified soils.

Keywords: cement; contaminated soils; strength; microstructure

随着人类生产力不断发展,生活水平不断提高,环境污染变得越来越严重,其中,废水、废渣已成为土壤的重要污染源。这些污染物质进入土体,改变土体的物理结构和化学性质,破坏土体或地下构筑物结构稳定性,导致地基土工程性质恶化,从而使工程建设活动产生安全隐患。因此,迫切需要对污染场地进行环境评估与工程处理^[1]。

近年来,学者们对污染场地修复技术的开发与应用十分重视。其中,固化稳定法因具有施工技术成熟、操作简便、经济等特点,是工程上处理被污染土体的主要方法^[2]。水泥以其工程性能良好、材料广泛、价格低廉等优点,已被广泛应用到固化稳定法处理污染土的工程中^[3]。众多学者对水泥固化污染土进行了研究。Pandey 等^[4]认为金属的存在会使水泥和土工聚合物的压缩强度降低。Zhang 等^[5]通过实验证明,经过盐溶液浸泡后, Cl^- 会延缓 SO_4^{2-} 引起的混凝土膨胀。Horpibulsuk 等^[6]研究表明,水泥土在 NaCl 溶液浸泡条件下,含盐量的增加会使固化体的液限、塑限和塑性指数均逐渐减小,抗压强度有所降低。Cuisinier 等^[7]在水泥固化 NaCl 污染土的研究中发现,NaCl 的存在并未破坏水泥土的强度,反而使其强度增大。陈四利等^[8-10]进行了污水环境对水泥土力学性能的影响试验、化学侵蚀条件下水泥土的渗透时间以及水泥土的冻融循环试验研究,发现水泥土在污水浸泡等条件下强度降低,内摩擦角以及黏聚力降低。杜延军等^[11]研究了水泥固化锌污染后的高岭土,研究得出随锌离子浓度增加,固化污染土的强度总体呈下降趋势。董晓强等^[12]对污水浸泡情况下的水泥土强度和电阻率特性进行了研究,得出了矿渣硅酸盐水泥土和普通硅酸盐水泥土的电阻率与其抗压强度之间的相关性。查甫生等^[13]研究了水泥对重金属污染土的固化,得出被金属污染物污染后的土体强度有所降低,而水泥掺入量和龄期的增加使土体强度逐渐提高。

以上试验研究多是对水泥固化单一类型的重金属或酸碱污染土进行的研究,而实际工程中,污染土

的污染物质复杂多样,特别是在温州地区,有些工业废水含有大量的重金属、碱类、盐类和油脂。目前,针对这些复杂污染物污染土的研究,尤其是关于温州软土被污染后的相关研究还鲜有系统性研究成果的报道。

针对水泥固化几种不同类型的污染土,进行了无侧限抗压强度和扫描电镜(SEM)试验,涉及到重金属、盐类、有机物 3 个方面。采用 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、NaCl、油脂作为污染物,人工配制掺有相关污染物的温州软粘土,研究了在不同污染物浓度、水泥掺量、龄期下的水泥固化后的强度特性和微观结构的变化规律。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用的污染土由室内人工制备而成。试验用土选取温州地区的软粘土,试验用土的主要物理性质指标如表 1 所示。

表 1 试验土的基本物理特性

Table 1 Basic physical properties of experimental soil

含水 量/%	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重	液限/ %	塑限/ %	最优含 水率/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
66.0	1.58	2.68	58	26	30	1.45

试验中重金属污染源采用 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 因为 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 的溶解度较高; 钠盐污染源采用 NaCl 分析纯, 因为 NaCl 溶解度高且无毒; 油脂类污染源采用植物油, 因为植物油常温下为液态且取材方便。

设计污染物在干土中的含量为 1 000、10 000、30 000 mg/kg, 即分别为干土重量的 0.1%、1%、3%。不含污染物的普通水泥土用 0% 表示。

试验中所用的水泥为强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥, 综合考虑工程实际情况和室内试验的方便, 最终决定水泥掺量分别为干土重量的 4%、8%、12%。

1.2 试验方法

将试验所用的土样进行烘干、加工成粉末状,然后再烘干,最后进行过筛处理(200目)。根据试验设计的污染物浓度、水泥掺入量,量取一定质量的烘干土并计算出这些烘干土所需的水泥用量、污染物用量。以对温州土进行人工击实试验得出的最优含水率,作为本试验实际掺水量,量取一定量的去离子水,用磁力搅拌机将污染物充分溶解于去离子水中,得到污染物溶液。将烘干后的土粉和相应配比用量的水泥掺在一起,并且搅拌均匀,然后加入配制好的污染物溶液,再次充分搅拌,达到各组分均匀性良好。

采用人工击实法制样,分3层击实制成高10 cm、直径5 cm的柱状试样,脱模、称重、放入密封的塑料袋中,在标准养护条件(温度 $20\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度95%),养护至设计龄期(7、14、28 d)。无侧限抗压强度试验采用YSH-2型,控制轴向应变速度为1 mm/min,扫描电镜试验中观测图像放大10 000倍。

2 实验结果与分析

2.1 龄期对强度的影响

图1为不同污染物含量的污染土,掺入4%、8%、12%的水泥固化稳定后的无侧限抗压强度随养护龄期的变化曲线。对于未污染的土,经过养护后,水泥固化土的强度逐渐提高,养护前7 d水泥固化土的强度提高较大,之后随着养护期的增加强度增加缓慢,特别是7~14 d之间,强度几乎不变。

由图1(a)可以看出,随着龄期的变化水泥固化NaCl污染土的强度变化趋势与未掺入污染的水泥土类似,都是随着龄期的增长强度提高,并且都是前7 d增长最快,7~14 d增长缓慢,几乎不变,而14~28 d增速又稍有提高。对比分析前期的增长速率,污染物的浓度越低,前7 d的增长速率越大,当不含污染物,且水泥掺量为12%时,增长速率最大,对应的7天强度最高。对于浓度为3%的NaCl的强度随着龄期的增加提高较小,特别是水泥含量较低(4%水泥)时,养护龄期的增加强度只有小幅度的提高。

通过图1(b)可以看出,水泥固化油脂污染土的强度随龄期的发展规律跟无污染水泥土有较大区别,水泥固化油脂污染土的强度随着养护龄期的增加提高较为明显,增长线性较好,增长速率大致相同。相对于无污染的水泥固化土以及NaCl污染的水泥固化土而言,7~14 d的增长速率有较大提高。

但是,7~14 d的强度值与NaCl的7~14 d的强度值相差较大。同样,油脂含量越低,随着养护期的增加,强度提高越明显,同样,增长速率越大,相反油脂含量越大时,强度提高不太明显,增长速率较小,当油脂含量为3%,水泥掺入量为4%时,养护龄期的增加对水泥固化油脂污染土的强度几乎没有影响,只略有提高。

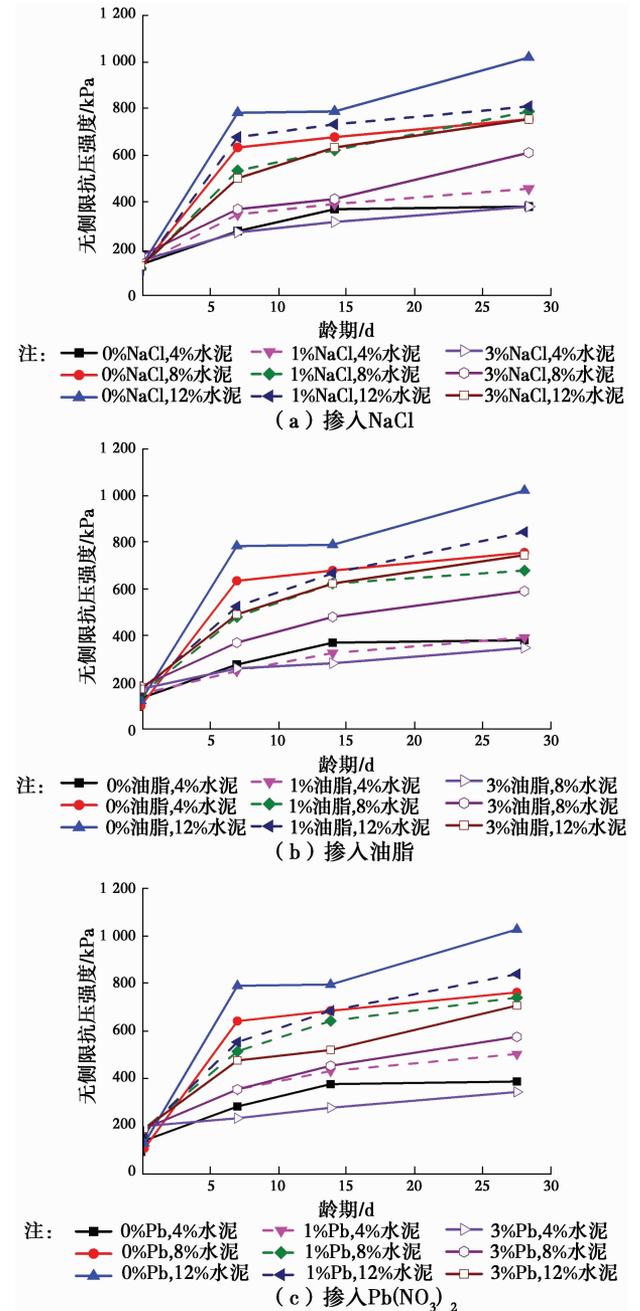


图1 掺入不同污染物水泥固化土强度随龄期变化

Fig. 1 Variation of strength of cemented soils mixed with different pollutants with curing time

由图1(c)可以看出,随着龄期的增加水泥固化Pb(NO₃)₂污染土的强度变化趋势与无污染水泥土有较大区别,但与水泥固化油脂污染土的强度随龄

期变化规律相似,但对于 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 含量为 3%,水泥掺入量为 4% 时,养护龄期的增加对水泥固化 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 污染土的强度影响较明显。

2.2 水泥掺量对强度的影响

图 2 为掺入不同污染物且污染物掺量不同的土样,掺入 4%、8%、12% 的水泥固化稳定后的无侧限抗压强度随水泥掺量的变化曲线。由图 2 可以看出:经过养护后,水泥固化土的强度逐渐提高,强度随水泥掺入量的增加呈增长趋势。原因是在加入较多水泥后,混合土体的 pH 值会呈碱性。水泥越多,

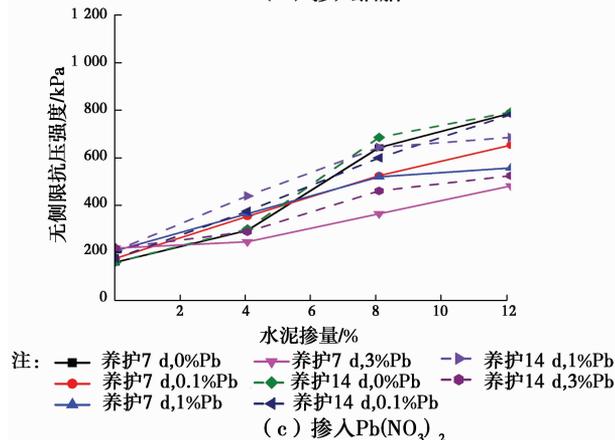
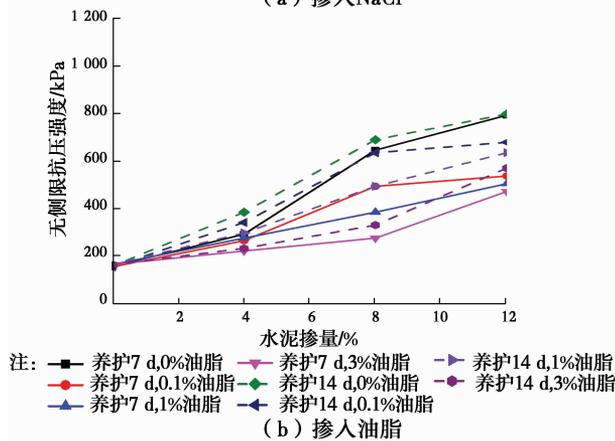
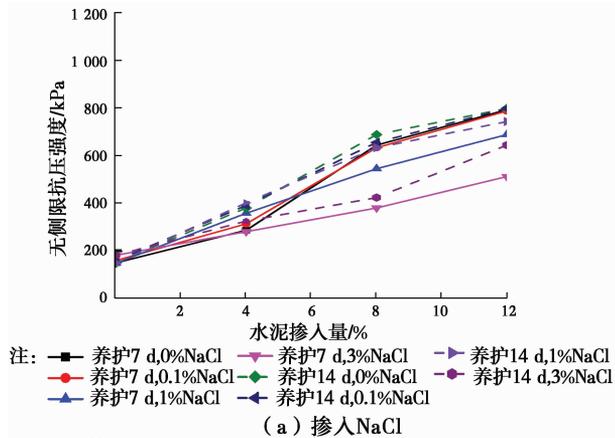


图 2 掺入不同污染物水泥固化土强度随水泥掺量变化

Fig. 2 Variation of strength of cemented soils mixed with different pollutants with cement content

碱性越强。在这种环境下,水泥和污染土体中的硅和铝的溶解性大幅增加,促进了它们与固化材料中的 Ca^{2+} 相互反应,生成水化铝酸钙(CAH)、水化硅酸钙(CSH)等水化胶结物,这些物质的存在使污染土的强度得到提高^[14]。

通过图 2(a)可以发现:离子浓度较低时,水泥固化 NaCl 污染土的强度与水泥固化无污染土接近;离子浓度较高时,对强度有较大影响,特别是 NaCl 掺量为 30 000 mg/kg 时,水泥固化 NaCl 污染土的强度与水泥固化无污染土的强度差别较大,不但变化曲线的趋势有所不同,强度差别更是较为明显。可能是少量的 NaCl 导致水泥固化土产生了结构性强、空隙较少的水化产物,而随着 NaCl 掺量的增加,水化产物变得结构疏松,空隙增多、变大,从而导致强度降低。

通过图 2(b)可以发现:无论油脂浓度高低,3 个龄期内水泥固化油脂污染土随着水泥掺入量的增加,强度都逐渐提高,0.1% 油脂的变化曲线与水泥固化无污染土接近,但随着油脂浓度的增大,变化曲线发生较为明显的差别;3 个不同龄期时的变化曲线整体相似,3 种油脂含量下的强度在 0%、4%、12% 水泥时都较为相近,但在 8% 水泥时相互差别都较大。

通过图 2(c)可以发现:3 个龄期内,3 种 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 含量下,水泥固化 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 污染土的强度都随着水泥掺入量的增加而提高;水泥固化 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 污染土的强度变化曲线的斜率随着水泥掺入量的增加基本不变,这与水泥固化未污染土的强度变化曲线的斜率随着水泥掺入量的增加先增加后减小不同,可见在 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 的影响下,水泥固化土的强度随水泥掺入量的增加时的变化更加均匀。

2.3 污染物含量对强度的影响

图 3 为掺入不同污染物且污染物掺量不同的土,掺入 4%、8%、12% 的水泥固化稳定后的无侧限抗压强度随污染物掺量的变化曲线。对于掺入 NaCl 的固化土而言,可分为两种情况:1) 当水泥掺量大于等于 8% 时,水泥固化土的强度随着 NaCl 掺量的增加而降低。2) 当水泥掺量不大于 4% 时,NaCl 污染土在被水泥固化后其强度随着 NaCl 掺量的增加先逐渐增加而后再降低,且都在 NaCl 掺量为 1% 时强度达到最大。说明在一定范围内 NaCl 对水泥有一定的活性激发和早强作用^[15]。

对于掺入油脂的情况,从图 3(b)可以看出,水泥固化油脂污染土的强度变化曲线较为相似,都表现出了随油脂掺入量的增加而降低,且各个龄期的

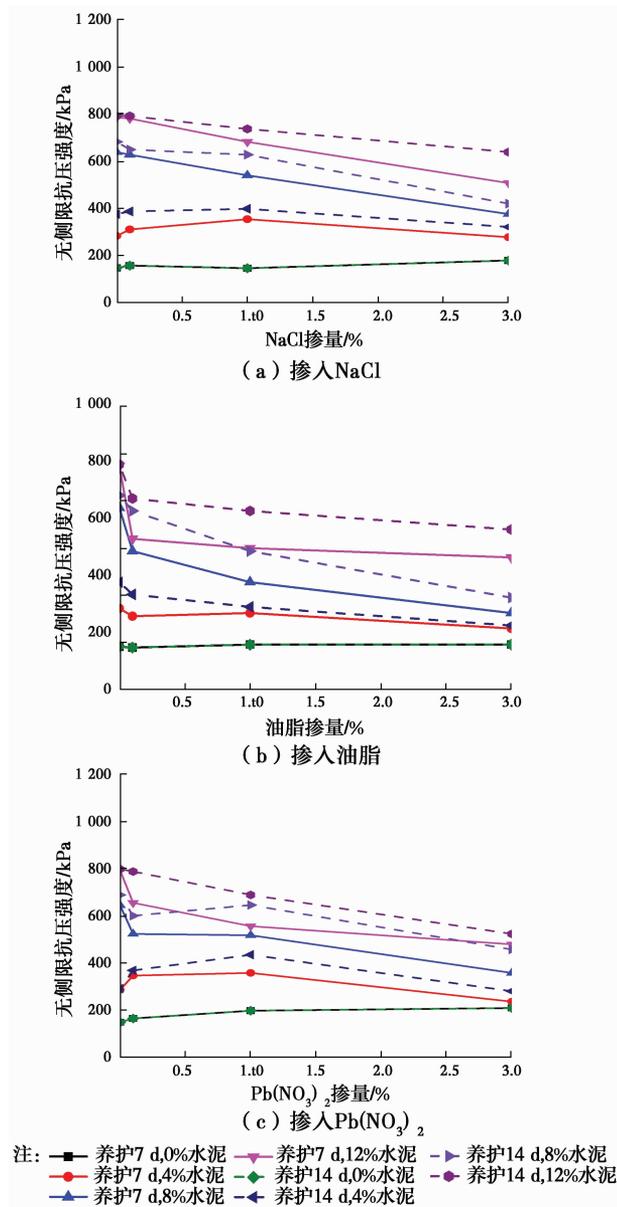


图 3 掺入不同污染物水泥固化土强度随污染物掺量变化
 Fig. 3 Variation of strength of cemented soils mixed with different pollutants with pollutant content

规律一致。根据水泥掺量的不同也可以分为两种情况:当油脂掺量较小时,油脂的掺入对水泥固化土的强度影响尤为明显,微量的油脂就可使水泥固化土的强度有较大幅度的降低;当油脂掺量大于 0.1% 时,只有水泥掺量为 8% 的水泥固化土的无侧限抗压强度随着油脂掺量的增加继续大幅度降低,其他水泥掺量下的无侧限抗压强度随油脂掺量的增加继续降低,但降低幅度很小。说明了油脂对水泥固化土的强度发展有较大的阻碍作用,使水泥土的胶结作用减弱,最终导致土体强度降低。可能是油脂对水泥固化土有物理的隔离作用,包裹在水泥土颗粒表面,导致水化反应变弱,结构性较差,从而强度明

显降低。油脂的存在使得水泥的水化反应在某一阶段受到阻滞,不能充分发挥自身的作用,最终导致水泥的加固效果减弱^[16]。

对于掺入 Pb(NO₃)₂ 的水泥固化土,由图 3(c) 可以看出,Pb(NO₃)₂ 对水泥固化过程的影响比较复杂,当水泥掺量为 12% 时,水泥固化 Pb(NO₃)₂ 污染土的无侧限抗压强度随着 Pb(NO₃)₂ 浓度的增加而降低,且降低幅度较大;当水泥掺量为 8% 时,水泥固化 Pb(NO₃)₂ 污染土的无侧限抗压强度随着 Pb(NO₃)₂ 浓度的增加先降低,再略微增加,而后再降低,总体表现为降低趋势;在水泥掺量不大于 4% 时,水泥固化 Pb(NO₃)₂ 污染土的无侧限抗压强度随着 Pb(NO₃)₂ 浓度的增加先增加后降低,并且都在 Pb(NO₃)₂ 浓度为 1% 时达到最大强度。分析其原因可能是当 Pb(NO₃)₂ 浓度较低时,孔隙水中的 Pb²⁺ 容易在由于水泥产生的碱性环境下,生成的一氧化铅水合物 $xPbO \cdot yH_2O$,具有一定的胶结作用,从而具有较高的强度;而 Pb(NO₃)₂ 浓度较高时或有较高的水泥掺入量时,孔隙水中的 OH⁻ 就会与 Pb²⁺ 反应,生成少量的亚铅酸 $[Pb(OH)_4]^{2-}$,从而使固化土的胶结作用减弱,强度降低。

2.4 微观结构研究

图 4 是扫描电镜放大 10 000 倍下的 12% 水泥掺量,污染物掺量分别为 1% 和 3% 并养护 28 d 土样的微观结构扫描电镜照片。

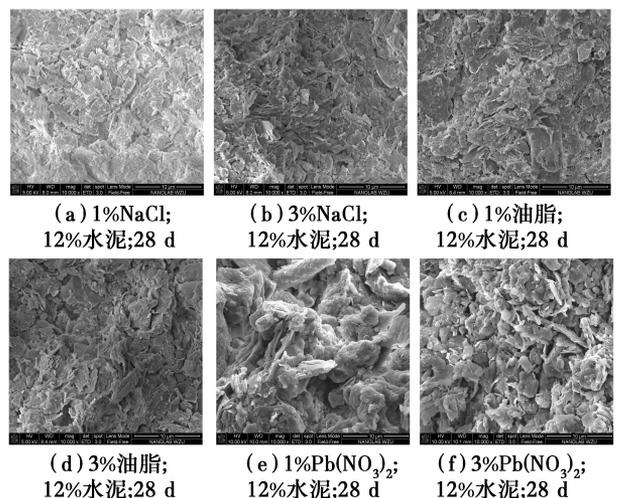


图 4 放大 10 000 倍 12% 水泥掺量
 养护 28 d 试样扫描电镜照片

Fig. 4 SEM photos of soils magnified at 10 000 times for soils with cement content of 12% and curing time of 28 d

比较图 4(a)、(b) 可知,掺入 3% NaCl 的情况下水泥固化土的结构较为松散,空隙较多。而掺量为 1% NaCl 的情况下,结构性较好,并且有较多的水泥

凝胶体与粘土颗粒互相胶结而形成的纤维状结晶体。其原因可能是 Cl^- 对水泥固化土的水化反应有阻碍作用或者是 Cl^- 腐蚀了水化硅酸钙胶体,从而在掺入 3% NaCl 的水泥固化土中看不到 C—S—H 生成。

比较图 4(c)、(d)可知,掺入油脂的情况下水泥固化土的结构都较为松散,结构性较差,空隙较大、较多。在掺入 1% 的油脂时,出现了较薄的石针状的水泥水化产物,但边缘较为圆滑;油脂掺量达到 3% 时,石针状结构消失,变为了较为薄的片状和块状结构,结构更加松散,边缘更加圆滑。分析其原因,一方面,油脂对水泥固化土进行了物理的包裹,隔离了水泥颗粒之间以及水泥与土颗粒之间的接触,使其水化反应受阻。另一方面,油脂的掺入改变了水泥固化土中的 pH 值,不利于水泥土中水泥的水化反应,从而结构性相对 NaCl 的影响下更差。

通过图 4(e)、(f)可以发现,在 1% $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 时,水泥固化土体的块状较大,且相互接触较为紧密,但在 3% $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 时,水泥固化土体变得扁平且如同碎屑,孔隙较多,结构性很差。原因可能是 Pb^{2+} 在水泥土颗粒间产生了化学抑制作用,影响了水化产物的形成,并且减弱了原本土颗粒间的相互粘结,从而使水泥土的结构变得薄而零碎。

3 结论

对受 NaCl、油脂、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 污染的温州软粘土进行了水泥固化后的无侧限抗压强度试验和扫描电镜(SEM)试验,分析了其在不同影响因素下的力学特性和微观结构特性,得出以下主要结论:

1)在 NaCl 的影响下,水泥固化污染土的无侧限抗压强度随养护龄期的变化与无污染水泥土的相似;无侧限抗压强度随水泥掺量的变化在 NaCl 掺量为 0.1%、1% 时与无污染物时相似,但 NaCl 掺量为 3% 时差别较大;当水泥掺量不大于 4% 时,固化水泥土的无侧限抗压强度随 NaCl 掺量的增加先提高后降低,体现出了一定范围内的早强作用。

2)在油脂的影响下,水泥固化污染土的无侧限抗压强度随养护龄期的变化与无污染水泥固化土的差别较大,增长速率较为均匀,但在 3% 油脂的影响下,其强度随龄期的增加几乎没有提高;当水泥掺入量增加时,其无侧限抗压强度提高情况较为复杂,与无污染物时差别较大;其无侧限抗压强度随油脂掺量的增加而降低,微量的油脂掺入就可以使水泥固化土的强度有很大的降低。

3)在 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 的影响下,水泥固化污染土的

无侧限抗压强度变化较为均匀,在低水泥掺量(小于 4%)时也表现出早强作用,高水泥掺量时则降低了固化土的强度。

4)SEM 结果表明,在 3 种污染物的影响下,水泥固化土的结构都变得疏松多孔,且污染物浓度越大,结构性越差;污染物浓度较低时,有 C—S—H 纤维状结构出现,较高时则无纤维状晶体出现,反而变为较为疏松的薄片状结构;油脂对水泥固化土的影响最大,结构改变最为明显,NaCl 和 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 都会对水泥水化产物的形成起抑制作用。

5)综合分析水泥固化 3 种污染物污染土的强度,可以发现:油脂对水泥固化土的影响最大,油脂影响下水泥固化土的强度最低,与无污染情况下相差最大; $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 影响下水泥固化土的早期强度比 NaCl 影响下水泥固化土的早期强度低,但 28 d 强度二者相差不大。

参考文献:

- [1] 余闯,徐江伟,陈樟龙,等.成层土中考虑衰变作用的污染物迁移规律分析[J].自然灾害学报,2013,22(1):45-51.
YU C, XU J W, CHEN Z L, et al. Pollutant migration in layered soil with consideration of decay[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(1): 45-51. (in Chinese)
- [2] 蒋宁俊,杜延军,刘松玉,等.酸雨入渗对水泥固化铅污染土淋滤特性的影响研究[J].岩土工程学报,2013,35(4):739-744
JIANG N J, DU Y J, LIU S Y, et al. Leaching behaviors of cement-based solidification stabilization treated lead contaminated soils under effects of acid rain [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 739-744. (in Chinese)
- [3] 张华杰,韩尚宇,蒋敏敏,等.NaCl 侵蚀环境下水泥土的宏微观特性分析[J].水利水运工程学报,2012(2):49-54.
ZHANG H J, HAN S Y, JIANG M M, et al. An analysis of the macro-and-micro properties of cement-soil under NaCl erosion environment [J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(2): 49-54. (in Chinese)
- [4] PANDEY B, KINRADE S D, CATALAN L J. Effects of carbonation on the leachability and compressive strength of cement-solidified and geopolymer-solidified synthetic metal wastes[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 101: 59-67.
- [5] ZHANG M H, CHEN J K, LU Y F, et al. Study on the expansion of concrete under attack of sulfate and sulfate-chloride ions [J]. Construction and Building

- Materials, 2013, 39(2): 26-32.
- [6] HORPIBULSUK S, PHOJAN W, SUDDEEPPONG A, et al. Strength development in blended cement admixed saline clay [J]. Applied Clay Science, 2012, 55: 44-55.
- [7] CUISINIER O, BORGNE T L, DENELEE D, et al. Quantification of the effects of nitrates, phosphates and chlorides on soil stabilization with lime and cement [J]. Engineering Geology, 2011, 117(3/4): 229-235.
- [8] 陈四利, 杨雨林, 张精禹. 污水环境对水泥土力学性能的影响试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(4): 112-117.
- CHEN S L, YANG Y L, ZHANG J Y, et al. Experimental analysis of effects of polluted water environment on mechanical properties of cemented soil [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2015, 37(4): 112-117. (in Chinese)
- [9] CHEN S L, DONG K H, YU T, et al. Experimental study on infiltration time effects of mechanical behaviors of cement soil [J]. International Journal of Applied Mathematics and Statistics, 2013, 50(20): 302-309.
- [10] 陈四利, 史建军, 于涛, 等. 冻融循环对水泥土力学特性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(2): 343-349.
- CHEN S L, SHI J J, YU T, et al. Influence of freezing and thawing cycles on mechanical properties of cemented soil [J]. Journal of Basic Science and Engineering Applications, 2014, 22(2): 343-349. (in Chinese)
- [11] 杜延军, 蒋宁俊, 王乐, 等. 水泥固化锌污染高岭土强度及微观特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2114-2120.
- DU Y J, JIANG N J, WANG L, et al. Strength and microstructure characteristics of cement-based solidified/stabilized zinc-contaminated kaolin [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 2114-2120. (in Chinese)
- [12] 董晓强, 苏楠楠, 黄新恩, 等. 污水浸泡对水泥土强度和电阻率特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1855-1870.
- DONG X Q, SU N N, HUANG X E, et al. Effect of sewage on electrical resistivity and strength of cemented soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1855-1870. (in Chinese)
- [13] 查甫生, 许龙, 崔可锐. 水泥固化重金属污染土的强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 652-664.
- ZHA F S, XU L, CUI K R. Strength characteristics of heavy metal contaminated soils stabilized/solidified by cement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 652-664. (in Chinese)
- [14] 邵俐, 刘佳, 丁勇, 等. 水泥固化镍污染土的强度和微观结构特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 75-80.
- SHAO L, LIU J, DING Y, et al. Research on strength and microstructure characteristics of cement solidified nickel contaminated soil [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(2): 75-80. (in Chinese)
- [15] 王复生, 朱元娜, 张磊. 氯化钠对粉煤灰硅酸盐混合水泥活性激发能力和结合方式的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(1): 31-37.
- WANG F S, ZHU Y N, ZHANG L. Experimental research of sodium chloride on activity excited ability and binding mode of fly ash Portland blend cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2009, 28(1): 31-37. (in Chinese)
- [16] Al-RAWAS A, HASSAN H F, TAHA R, et al. Stabilization of oil-contaminated soils using cement and cement by-pass dust [J]. Management of Environmental Quality, 2005, 16(6): 670-680.

(编辑 胡玲)