

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.011



酸雨对河道淤泥气泡混合土工程性质的影响

夏磊¹, 顾欢达²

(1. 上铁轨道安徽铁建工程有限公司, 安徽 蚌埠 233000; 2. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要:通过渗滤法考察模拟酸雨对河道淤泥气泡混合土的侵蚀作用, 试验过程中测定混合土试样的物理力学指标、渗滤液的 pH 值和 Ca^{2+} 浓度值以及矿物组分受酸雨渗滤影响后的变化规律, 研究考察酸雨对混合土性质的影响。试验结果表明: 酸雨导致河道淤泥气泡混合土中的矿物水解并以 Ca^{2+} 离子形式析出, 导致混合土中性化。酸雨的酸性越强, 土体中性化程度越高, 在中性化过程中又有新的矿物生成, 使混合土中矿物相对含量发生改变, 导致混合土物理力学性质的变化; 与正常雨水作用相比, 经酸雨作用后的河道淤泥气泡混合土含水率和密度升高, 强度降低, 破坏模式向脆性化发展, 并且酸雨的酸性越强, 物理力学性质的变化越明显。

关键词: 气泡混合土; 模拟酸雨; 溶出特性; 物理力学性质

中图分类号: X517; TU502.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)06-0076-09

Influence of acid rain on engineering properties of foamed light soil with river sludge

Xia Lei¹, Gu Huanda²

(1. Shanghai Railway Rail Transit Development Co., Ltd., Anhui Railway Construction Engineering Co., Ltd., Bengbu 233000, Anhui, P. R. China; 2. Department of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Impact of acid rain on foamed light soil with river sludge (FMLSS) was studied by percolation method. Physical and mechanical indexes of specimens, pH value and Ca^{2+} concentration of leachate, as well as the change of mineral composition of FMLSS after acid rain infiltration were measured during test, to investigate the influence of acid rain on properties of FMLSS. Experimental results show that acid rain results in the hydrolysis of minerals and dissolution in the form of Ca^{2+} ions leading to neutralization of FMLSS. It is found that the stronger the acidity of simulated acid rain, the higher the degree of neutralization. At the same time, new minerals are generated in the process of neutralization, which changes the relative content of minerals in the mixed soil and leads to the changes of physical and mechanical properties. Compared with those in the normal water condition, moisture content and density increase, while the peak strength decreases. In addition, the failure mode evolves to the brittle type after

收稿日期: 2018-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(51378327)

作者简介: 夏磊(1990-), 男, 主要从事软土地基处理技术及应用研究, E-mail: leixiahf@163.com。

顾欢达(通信作者), 男, 教授, E-mail: ghdgx@163.com。

Received: 2018-01-06

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51378327)

Author brief: Xia Lei(1990-), main research interests: soft soil foundation treatment technology and application, E-mail: leixiahf@163.com.

Gu Huanda(corresponding author), professor, E-mail: ghdgx@163.com.

acid rain. Based on the results, it can be safely arrived at that the stronger the rain acidity, the greater the degree of physical and mechanical changes.

Keywords: foamed light soil; simulated acid rain; leaching characteristics; physical and mechanical properties

在中国江南地区,伴随着河道治理及清淤工程的进行,每年都会产生大量的河道淤泥,基于综合有效利用目的开发利用河道淤泥已引起社会各界的重视。将河道淤泥处理后制成可以满足工程要求的土工材料,不仅可以提高河道淤泥的利用效率,也可以节省大量岩土材料,降低工程成本。同时,还有益于改善河道环境质量,降低淤泥处理成本。以河道淤泥作为原料土开发制成河道淤泥气泡混合土是一种较新颖的利用方式,主要体现在混合土制作工艺简单、施工技术简便、适用性强等方面。

酸雨是指 pH 值小于 5.6 的雨、雪、霜、雾、露等大气降水^[1-2]。近年来,随着工业化的进展及大量化石燃料的使用,空气中酸性物质积累形成酸雨。酸雨已成为一个影响范围广泛、程度比较严重的环境问题。在工程领域,关于酸雨侵蚀对混凝土等水泥基材料、水泥土及岩石等的影响有较多的研究,结果显示,混凝土等水泥基材料、水泥土及岩石等在酸性环境下,其物理力学性能将发生劣化^[3-9],直接影响工程构造物的耐久性及安全性。气泡混合土属于一种新型土工材料,主要用水泥作为固化材料与原料土反应形成水泥土承载骨架^[10-12],关于其本身的工程性质已有系统研究,并且已有应用实例,但是,考虑酸雨作用对气泡混合土工程性质影响的相关研究较少。将河道淤泥作为土工材料用于实际工程时,除了需要考察其物理力学性能以检验工程适用性外,使用过程中的耐久性或性质稳定性也是反映其性能的重要方面。在工程中,气泡混合土常被用于软基填土处理等领域,在大范围酸雨环境下,使用过程中难免会受酸雨作用或影响,考虑酸雨作用下河道淤泥气泡混合土的性能演化是评价其耐久性的一个重要方面。为此,通过试验研究对河道淤泥气泡混合土的耐酸性及破坏机理进行研究。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验原料土来源于苏州某河道疏浚淤泥,为保证气泡混合土的流动性^[11],将河道淤泥用 5 mm 筛过筛处理,经处理后其基本物理指标如表 1 所示,颗粒分析状况如图 1 所示。由颗粒级配曲线可得:原

料土中砂粒、粉粒和黏粒的含量分别为 9.91%、70.98%和 19.11%,主要以粉粒和黏粒为主;不均匀系数 $C_u=5.38$,曲率系数 $C_c=1.31$,原料土为级配良好土。由表 1 可知,原料土含水率高,塑性指数 $I_p=17.9$,液限 $\omega_L=47.1$ 。基于以上测定的基本物理指标,再依据《土的分类标准》(GB/T 50145—2007)中的分类体系,可知原料土为一种级配良好的低液限粉土。

研究表明,气泡的稳定性是影响气泡混合土强度和密度的主要因素,而复配发泡剂比单一发泡剂产生的气泡稳定性好^[13]。发泡剂采用 TY 复配型发泡剂,在 40 ℃ 时其发泡力(发泡力是在一定温度条件下,从 90 cm 高度将 200 mL 试液流到刻度量筒底部 50 mL 相同试液的表面后,测量得到的泡沫高度) ≥ 200 mm,半消沉时间 ≥ 100 min。TY 复配型发泡剂由作为主发泡剂和辅助发泡剂的 A 组与作为稳泡剂的 B 组构成,A 组的成分有 α -烯基磺酸钠、烷基糖苷、椰油酰胺丙基甜菜碱、茶皂素和脂肪酸甲脂磺酸钠,B 组的成分有明胶、阿拉伯胶、羟甲基纤维素和聚阴离子纤维素。

固化剂采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。

表 1 原料土的基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of raw soil

密度 $\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率 $\omega/$ %	比重 d_s	干密度 $\rho_d/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比 e	塑限 $\omega_p/$ %	液限 $\omega_L/$ %
1.58	74.2	2.65	0.91	1.92	29.2	47.1

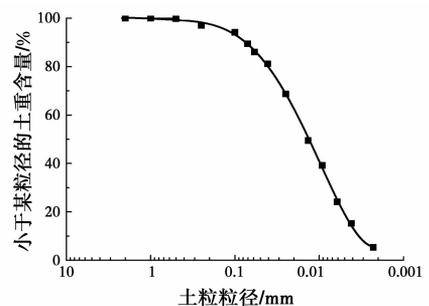


图 1 原料土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of raw soil

1.2 模拟酸雨配制

据观测,中国的酸雨主要是硫酸型酸雨,酸雨严重地区降水的 pH 值已低至 2.85 左右,并且 pH 值

仍有降低的趋势。为此,采用硫酸和硝酸按摩尔比 9:1 配制 pH 值分别为 2.5、4.0 和 5.6 的酸性溶液,其中,pH 值为 2.5 和 4.0 的酸液用于模拟酸雨,而 pH 值为 5.6 的酸液模拟正常雨水。

1.3 试样制作

1.3.1 配比设计 气泡混合土是指按一定的比例把固化剂、水和制作好的气泡浆与原料土混合并且搅拌均匀后所形成的新型土工材料^[10-12]。水泥掺入比、气泡掺入比及含水率均采用与原料土经换算后的干土重比值确定,分别用 ω_c 、 ω_b 、 ω 表示,比如水泥掺入比 $\omega_c = \text{水泥粉末质量} / \text{干土质量}$ 。通过配合试验确定了 2 种配比的气泡混合土,分别以 C1 和 C2 表示。气泡混合土配比情况见表 2。

表 2 气泡混合土配比

Table 2 FMLSS ratio

配比	水泥掺入比 $\omega_c / \%$	气泡掺入比 $\omega_b / \%$	含水率 $\omega / \%$
C1	25	1	110
C2	25	2	110

1.3.2 试样制作 根据配比情况及原料土含水率计算需要掺入的水泥、气泡浆及水的质量,制作气泡混合土;将制作好的气泡混合土分 3 层灌入内径 3.9 cm、高 7.8 cm 的模具中;放进标准养护室中养护大约 1 d 后拆模;继续放到标准养护室养护到 28 d 龄期。

1.4 试验方法

1.4.1 试验原理 河道淤泥气泡混合土本身是一种多孔材料,具有一定的渗透性,酸雨降落到地面后会通过土体孔隙垂直向下渗透到河道淤泥气泡混合土内部。渗滤的酸雨对固化体有物理冲刷和化学溶滤作用^[14-15]。流动的渗滤液可以模拟酸雨的物理冲刷作用,渗滤试验法可以较好地模拟酸雨的这一作用过程^[16]。

在模拟酸雨试验过程中,考虑了酸液初始 pH 值、渗滤量以及河道淤泥气泡混合土配合情况等因素的影响,设计了在模拟酸雨渗滤作用下河道淤泥气泡混合土的腐蚀试验。

1.4.2 试验装置 试验装置由 3 部分组成,分别为盛放模拟酸雨的容器、放置河道淤泥气泡混合土试样的装置和接收渗滤出溶液的容器。将模拟酸雨置于具有一定容积的容器内,气泡混合土试样置于用有机玻璃加工成的渗滤装置内,用塑料锥形瓶收集渗滤出的溶液,各部分之间用塑料软管相互连接并设置有调水阀,以便于调节渗流量,图 2 所示为模拟

酸雨渗滤试验装置。3 个容器分别盛有初始 pH 值为 2.5、4.0 和 5.6 的酸液,每种环境下可同时进行 9 个试样的渗滤试验。



图 2 渗滤试验装置

Fig. 2 Diafiltration test device

1.4.3 试验流程 每一种配比的河道淤泥气泡混合土试样在标准养护室养护到 28 d 龄期时取出,对每个试样称重并测量其体积,计算得到密度;拿 3 个试样进行强度试验,并将其余试样分成 3 份,分别装入渗滤试验装置中进行渗滤试验。

渗滤试验以渗滤量作为试验节点,渗滤量以渗滤液体积数进行衡量,定义渗滤液体积数为渗滤出的酸液总体积与试样的体积之比,设定测试渗滤液体积数为 2.9、4.0、6.7、10.0 和 20.0,5 个试验节点对应的渗滤量为 266.1、372.5、620.9、931.3、1862.6 mL。在每个试验节点测定渗滤液的 pH 值和 Ca^{2+} 离子浓度;在渗滤液体积数为 4.0、6.7 和 20 时,分别取出 3 个试样进行强度试验。试验过程中及时监测锥形瓶中流下的渗滤液体积,及时倒出瓶中渗滤液,离试验节点还差 50 mL 时开始接取约 80 mL 渗出溶液进行 pH 和 Ca^{2+} 离子浓度的测定。

2 溶出特性分析

研究表明,通常情况下,污泥固化体在填埋场渗透液的作用下其内部碱性物质会不断流失,被固定在固化体内的重金属可能会再次溶出^[14-15]。张虎元等^[17]通过酸性中和容量试验和渗透溶滤试验对污泥固化体中重金属溶出特性进行研究,结果表明:在酸性中和试验中,当浸渍液的 pH 值小于 6 时,大量重金属溶出;但以水泥作为固化剂固化的污泥具有一定的稳定性,在短期的渗流作用下固化污泥中的重金属很难溶出。

酸雨等水化学溶液的侵蚀造成混凝土等水泥基材料、水泥土及岩石强度等力学性能的劣化与 Ca^{2+} 等离子溶出有关^[3,6,9,18-20]。溶液 pH 值变化及溶出离子浓度变化能反映材料与化学溶液之间的反应程度及材料被侵蚀的程度^[21-22]。为了分析酸雨与河道

淤泥气泡混合土的反应机制,考察混合土内部参与化学反应的矿物成分以及反应程度,在渗滤试验过程中,测定渗滤液的 Ca^{2+} 离子浓度和 pH 值的变化规律。

2.1 渗滤液 pH 值变化规律

在设定的试验节点,采取经过混合土试样渗滤后的酸液测定 pH 值,结果如图 3 所示。

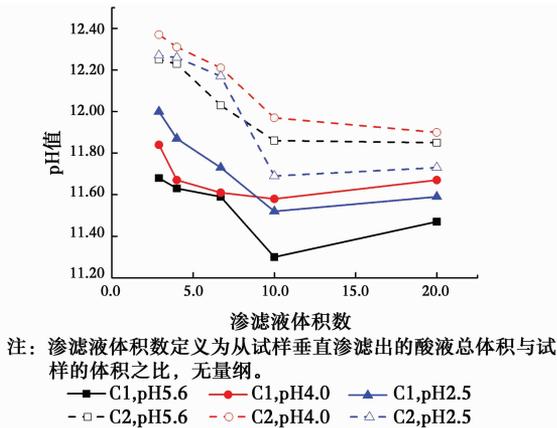


图 3 渗滤液 pH 值随渗滤液体积数变化曲线

Fig. 3 Variation curves of pH concentration of leachate with leachate volumes

根据试验结果可以得到:

1) 在渗滤初期渗滤液体积数比较小的阶段,即累积渗滤量不大的情况下,渗滤开始时渗滤液 pH 值较大,此后,随着累积渗滤量的增大,析出的渗滤液 pH 值呈下降趋势,当渗滤液体积数达到一定程度后,析出的渗滤液 pH 值趋于稳定或呈略有增大趋势。其机理在于,在渗滤初期,混合土中性化程度较低,酸雨对土骨架的侵蚀作用不明显,随着累积渗滤量的增大,pH 值逐渐降低;当渗滤作用达到一定程度时,随着酸雨的持续侵蚀,混合土中较多碱性矿物水解并被渗滤析出,导致土体内部孔隙体积增大,酸性溶液容易渗入,同时,酸液与混合土内部的矿物接触面积变大,酸液与混合土的反应强度增大,导致后期析出的渗滤液 pH 值呈趋于稳定甚至略有增大的趋势,此结果说明随着酸雨侵蚀作用的持续进行,渗滤量越大或作用时间越长,酸雨对混合土的侵蚀作用呈强化或加速趋势。

2) 考察不同初始酸液酸性水平的影响,在累积渗滤量相同的条件下,pH5.6、pH4.0 和 pH2.5 酸液经混合土渗滤后,pH 值升幅均值分别约为 6.19、7.91 和 9.38,即初始设定酸性越强的酸液渗滤后的 pH 升幅越大,初始设定酸性越弱的酸液渗滤后 pH 升幅越小。这说明模拟酸雨酸性越强,土样受渗滤作用后中性化进展速度越快,中性化程度越高;模拟

酸雨酸性越弱,土样的中性化程度相对降低。

3) 对比不同的混合土配合条件可以看出,总体上 C2 配合混合土渗滤液的 pH 值较高,根据表 2 所示配合条件可知,C2 配合气泡掺入较多,即形成的混合土中相对孔隙总体积更大,使得渗滤通过更容易,渗滤发生后土体的中性化程度更高,在同样的累积渗滤量条件下,渗滤液的 pH 值更高。

2.2 渗滤液 Ca^{2+} 离子浓度变化规律

在设定的试验节点取经过混合土试样渗滤后的酸液测定 Ca^{2+} 离子浓度,结果如图 4 所示。考察试验结果及对应的相关关系,可以得到:

1) 经混合土渗滤出的溶液中, Ca^{2+} 浓度的变化与酸液初始 pH 值存在密切的相关关系,初始 pH 值越低,渗出的溶液中溶出的 Ca^{2+} 浓度越大。在渗滤液体积数达到 10.0 之前,渗滤出的溶液 Ca^{2+} 浓度随着渗滤液体积数的增大而逐渐减小;在渗滤液体积数大于 10.0 之后,随着渗滤的进行,渗出的溶液 Ca^{2+} 浓度又出现增大的趋势。原因在于,累积渗滤量较少时,混合土中性化程度较低,随着渗滤的进行,渗出溶液中 Ca^{2+} 溶出量浓度会随着累积渗滤量的增大逐渐减小;但是,当渗滤作用达到一定程度时, Ca^{2+} 累计溶出量已经较多,混合土侵蚀程度增大,酸液容易渗入,同时,酸液与混合土内部的矿物接触面积变大,酸液与混合土的反应强度增大,渗出的溶液中 Ca^{2+} 浓度明显增大。

2) 对比不同气泡掺量条件下渗滤液 Ca^{2+} 浓度,可以发现,除了 pH5.6 酸液条件下两者比较接近外,随着酸液酸性水平的提高,气泡掺量较少的 C1 配合条件下渗出溶液 Ca^{2+} 浓度要高于气泡掺量较多的 C2 配合条件下的溶液 Ca^{2+} 浓度,且酸液的酸性越强其趋势越明显,可以认为,在气泡掺量较少的混合土内部气孔数量相对较少,利于溶出的土骨架体积相对较大。

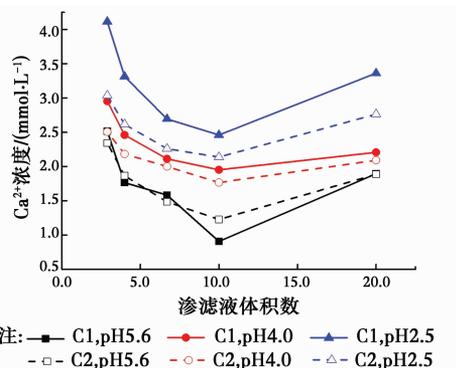


图 4 渗滤液 Ca^{2+} 浓度随渗滤液体积数变化曲线

Fig. 4 Variation curves of Ca^{2+} concentration of leachate with leachate volumes

3 酸雨作用对河道淤泥气泡混合土物理力学性质的影响

3.1 酸雨作用下物理性质的变化

3.1.1 含水率变化 在酸性溶液渗滤作用下,河道淤泥气泡混合土试样的含水率随渗滤量的变化情况如图 5 所示。根据图示试验结果可以看出,两种配合条件的混合土试样经酸液渗滤作用后含水率变化规律基本相同,混合土的含水率随着渗滤量的增加而增大,并且酸液初始 pH 值越低,含水率增大趋势越明显。在试验时间范围内,初始 pH 为 5.6、4.0 和 2.5 的酸液环境下,C1 配合试样的含水率与渗滤前相比,增加的百分比分别为 3.25%、3.96%、4.28%,C2 增加了 5.70%、6.39%、6.84%,说明气泡含量大的试样含水量增大更加明显。根据试样的含水率变化可以看出,含水率增大呈阶段性,在渗滤初期混合土的含水率升高较快,当渗滤液总量累计到使渗滤液体积数达到 6.7 时,试样增加的含水率已达到整个试验龄期内增加含水率的 70%~85%,这个值相当于浸渍试验中混合土浸渍 28 d 时含水率的增加程度。

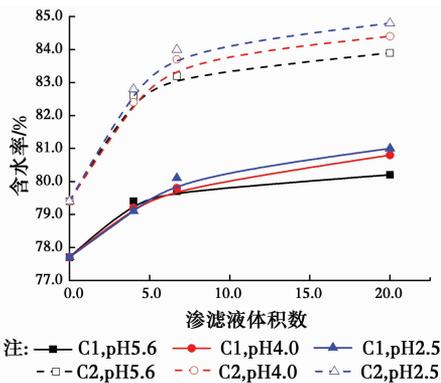


图 5 含水率随渗滤液体积数的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of moisture content with leachate volumes

3.1.2 湿密度变化 图 6 显示为河道淤泥气泡混合土在模拟酸雨渗滤作用下试样的湿密度随渗滤量的变化情况。根据图示结果可以看出,在酸液的渗滤作用下,混合土的湿密度随着渗滤量的增加而增大,并且酸液酸性越强,湿密度增大趋势越明显。在渗滤液体积数达到 20 的条件下,pH5.6、pH4.0 和 pH2.5 酸液渗滤作用时,C1 配合的试样湿密度与渗滤前混合土相比,分别增加了 0.79%、0.90%、1.17%,C2 配合的试样湿密度分别增加了 1.75%、2.19%、2.25%。这同样说明,气泡掺量较多的 C2 配合混合土湿密度增长幅度大于气泡掺量较少的

C1。湿密度变化同样显示出明显的阶段性,渗滤初期,混合土的湿密度增长幅度较大。当渗滤液体积数为 6.7 时,在 C1 和 C2 配合条件下,混合土在 3 种设定酸度的酸液渗滤作用下湿密度平均值与渗滤前相比分别增加了 0.69% 和 1.75%,分别占到整个渗滤过程中湿密度总增加值的 72.02% 和 84.61%。

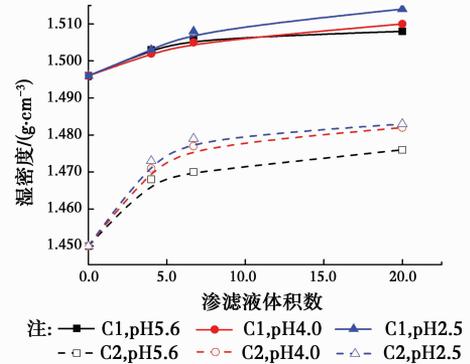


图 6 湿密度随渗滤液体积数的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of wet density with leachate volumes

3.2 酸雨作用下力学性质的变化

3.2.1 河道淤泥气泡混合土的强度变化 图 7 为河道淤泥气泡混合土在模拟酸雨渗滤作用下试样的抗压强度随渗滤液体积数的变化情况。

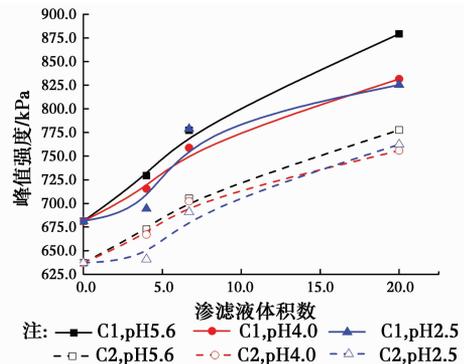


图 7 峰值强度随渗滤液体积数的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of peak strength with leachate volumes

根据试验结果可以得到:

1) 在 3 种酸度水平酸液渗滤作用下,两种配合条件的试样峰值强度随渗滤量的增加呈增长趋势,但在渗滤液体积数超过 6.7 后,随着渗滤的进行,增长趋势趋缓。结合渗滤后的溶出性可知,在短期渗滤条件下, Ca^{2+} 累计溶出量少,混合土中土骨架的劣化程度较低,固化剂的固化作用仍可以保持混合土的强度增长趋势;但是,当渗滤液总量累计到使渗滤液体积数达到 6.7 时,酸性溶液的侵蚀累积作用开始削弱气泡混合土内部土骨架强度,强度增长趋缓。

2)进一步考察模拟酸雨酸性水平的影响可以发现,在酸性较强的 pH4.0 及 pH2.5 条件下,随着渗滤的进行,混合土峰值强度增长的幅度小于酸性较弱的 pH5.6 条件下混合土峰值强度。在设定溶液初始 pH 值为 5.6、4.0 和 2.5 条件下,整个渗滤过程中,两种配比经渗滤作用后试样的强度平均值与渗滤前相比分别增大了 25.55%、20.35% 和 20.39%。结合溶出试验结果,较强酸性条件下, Ca^{2+} 累计溶出量大于较弱酸性条件下 Ca^{2+} 累计溶出量,土骨架损伤程度较高,导致强度低于 pH5.6 条件下的强度。

3)对比不同配比的影响可以看出,气泡掺量较少的 C1 配合混合土经渗滤作用后峰值强度增幅大于气泡掺量较多的 C2 配合混合土。在 C1 和 C2 配合条件下,整个渗滤过程中,混合土在 3 种设定酸度的酸液渗滤作用下峰值强度平均值与渗滤前相比分别增大了 24.10% 和 20.09%。原因是随着气泡掺量的增加,土中气孔所占体积增大而土骨架体积相对减小,酸液渗滤作用后土骨架受损伤程度较高导致混合土强度相对降低。

3.2.2 河道淤泥气泡混合土的变形特性 图 8 所示为河道淤泥气泡混合土在模拟酸雨渗滤作用下试样的变形模量 E_{50} 和峰值应变随渗滤液体积数变化情况。

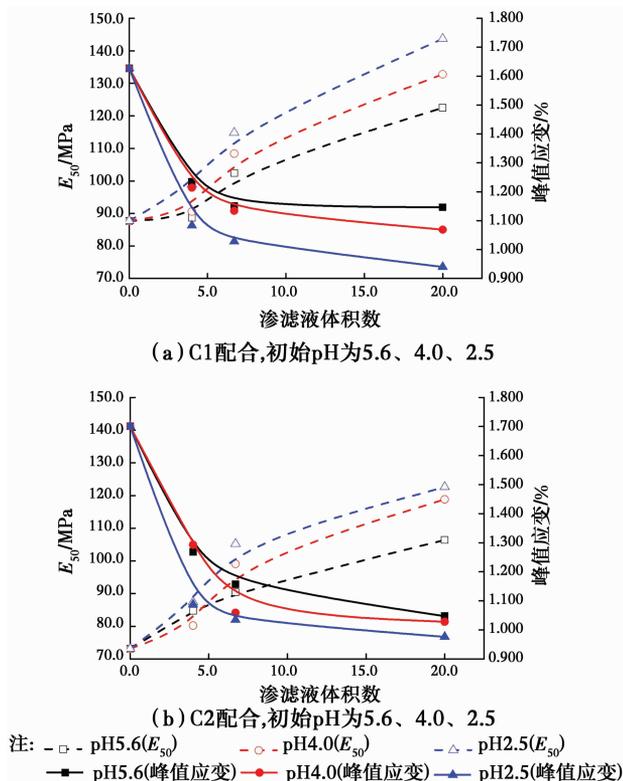


图 8 E_{50} 和峰值应变随渗滤液体积数的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of E_{50} and peak strain with leachate volumes

由图示结果可以得到:

1)在 3 种酸度酸液渗滤作用下,两种配合条件的试样变形模量 E_{50} 随强度增长呈增长趋势,但在渗滤液体积数超过 6.7 后,随着渗滤的进行增长趋势趋缓。以上结果与渗滤后的溶出性相关,在短期的渗滤条件下 Ca^{2+} 累计溶出量少,混合土中土骨架的劣化程度较低,固化剂的固化作用仍可以保持混合土的强度与刚度增长趋势;但是,当渗滤液总量累计到使渗滤液体积数达到 6.7 时,酸性溶液的侵蚀累积作用开始削弱气泡混合土内部土骨架刚度, E_{50} 增长趋缓。进一步考察模拟酸雨酸度的影响可以发现,模拟酸雨的酸性越强,混合土的 E_{50} 增长幅度越大,原因是在模拟酸雨中的 H^+ 离子侵蚀混合土造成混合土中矿物溶解的同时,模拟酸雨中的 SO_4^{2-} 等离子渗入混合土内部与水化产物反应生成结晶盐,对气孔有填充作用,密实度增加,变形模量增大^[7-8,23], H^+ 的溶解作用为 SO_4^{2-} 向混合土内部的渗透提供通道^[7,23],生成的结晶盐越多,这就是 pH 值越低的酸液中变形模量增大的幅度越大的原因。试验结束时,在初始 pH 值为 5.6、4.0 和 2.5 酸液条件下,两种配比经渗滤作用后试样的变形模量平均值与渗滤前相比分别增加了 42.62%、56.97% 和 65.81%。

2)经 3 种酸度酸液渗滤作用后混合土的峰值应变均呈减小趋势,即试样破坏前的应变减小,模拟酸雨作用后导致混合土脆性化,且模拟酸雨的酸性越强,混合土的脆性化程度越高。因此,经酸雨作用后的河道淤泥气泡混合土由于酸雨的侵蚀作用,在受荷后更易于发生破坏,耐久性趋弱。渗滤试验结束时,在设定溶液初始 pH 值为 5.6、4.0 和 2.5 条件下,两种配比经渗滤作用后试样的峰值应变平均值与渗滤前相比分别减小了 34.00%、36.94% 和 42.41%。进一步考察模拟酸雨渗滤量影响可以发现,峰值应变随渗滤量增大表现出的变化规律与变形模量类似,在渗滤初期,峰值应变减小幅大;但在渗滤液体积数超过 6.7 后,随着渗滤的进行减幅明显降低。上述混合土的脆性化过程同样与其溶出性密切相关,渗滤初期 Ca^{2+} 溶出速率较快,土骨架的中性化速度相对也较快。

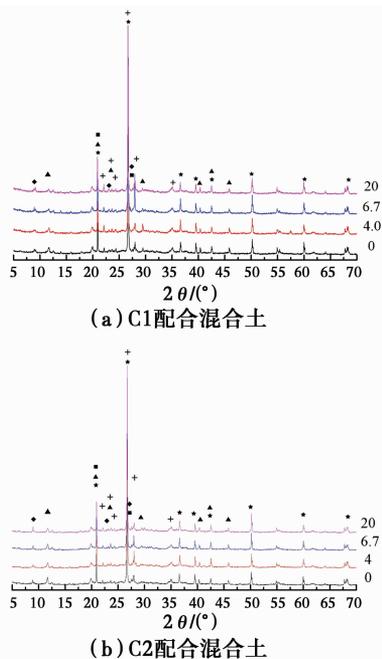
3)在 C1 和 C2 配合条件下,整个渗滤过程中混合土在 3 种设定酸度的酸液渗滤作用下变形模量平均值与渗滤前相比分别增大了 51.61% 和 58.66%,而峰值应变平均值与渗滤前相比分别减小了 35.36% 和 40.21%。对比不同配比的影响,可以发现,气泡掺量较多的 C2 配合混合土经渗滤后变形模

量增幅大、脆性化程度高。原因是气泡掺量较多的情况下,混合土中气孔所占体积增大而土骨架体积相对减小、渗透性相对好, H^+ 和 SO_4^{2-} 离子更易渗入混合土内部,导致混合土中性化程度大,同时,生成的结晶盐较多,模拟酸雨对土骨架的侵蚀程度大。

4 酸雨作用下河道淤泥气泡混合土矿物组分变化及机理分析

4.1 酸雨作用下河道淤泥气泡混合土的矿物组分变化

通过 XRD 试验对经过酸液渗滤作用后的河道淤泥气泡混合土进行物相定性测试,图 9 列出了部分试验结果。



注: \bullet SiO_2 \blacktriangle 石膏 \blacksquare 水化硅酸二钙 \circ 钙矾石 $+$ 钠长石

图 9 混合土在 pH2.5 环境下不同试验节点时的 XRD 图谱
Fig. 9 XRD pattern of FMLSS in pH2.5 environment at different test nodes

考察试验结果可以得到:

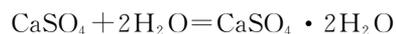
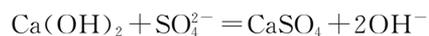
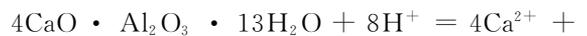
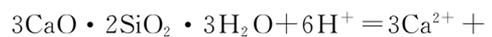
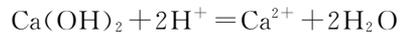
1)河道淤泥气泡混合土中含有石英、石膏、水化硅酸二钙、钙矾石和钠长石的晶相,5 种物相中,石英的衍射峰在各试验龄期均为最强,其次是钠长石和石膏,而水化硅酸二钙和钙矾石的峰最弱。

2)考察不同配合条件下土样 5 种物相衍射线主强线的强度变化,可以发现,在酸雨作用前,河道淤泥气泡混合土中 5 种物相衍射线主强线的强度均随气泡掺量的增加而增大;经模拟酸雨作用后,钠长石的晶相主强线的强度随气泡掺量的增加而降低,钙矾石的晶相主强线的强度随气泡掺量增加有大幅度

降低。

3)无论是气中养护还是模拟酸雨侵蚀,混合土的五种矿物中石英和钠长石的相对含量增大;在气中养护环境下,混合土中石膏的相对含量基本没变,钙矾石的相对含量减小,钠长石的相对含量增幅较大;在模拟酸雨环境下,混合土中石膏的相对含量降低较多,而钙矾石的相对含量仅在酸性较弱的 pH5.6 条件下出现降低趋势,在酸性较强的 pH4.0、pH2.5 条件下钙矾石的相对含量呈增大趋势,并且,随着酸雨酸性的增强其增大趋势越明显。原因是河道淤泥气泡混合土中的石膏会与水泥水化产物水化铝酸钙反应生成钙矾石,另外,试验中用到的模拟酸雨为硫酸型酸雨,酸性越强的模拟酸雨中 SO_4^{2-} 离子浓度越大,其与混合土反应后生成的钙矾石增多。

酸雨中的侵蚀性离子与河道淤泥气泡混合土中矿物之间的部分反应方程式为



4.2 河道淤泥气泡混合土物理力学性质与矿物组分变化相关性

酸雨作用使河道淤泥气泡混合土中石英、钠长石等流失,酸液不断渗入,导致混合土含水率和湿密度均增大。在酸性较强的条件下,混合土中矿物溶出的较多,导致含水率升高幅度越大;酸雨侵蚀后的混合土矿物的含量随着气泡掺量的增加而增多,不同气泡掺量的混合土在酸雨环境下矿物相对含量变化的差别以及渗透性的不同导致混合土的含水率和湿密度均随气泡掺量的增加而增大。

在酸雨环境下,酸雨中的 H^+ 离子使气泡混合土中碱性的水化产物水解、溶出,导致河道淤泥气泡混合土整体的胶凝性变差;主要矿物石英和钠长石含量的减少导致混合土的整体结构遭到破坏;钙矾石含量的增大可能会引起混合土在微孔处开裂。结果导致混合土强度降低且破坏模式向脆性化发展。在酸性较强的条件下,这些侵蚀效应更明显;酸雨侵蚀效应随气泡掺量的增加而增大。

5 结论

利用室内试验方法考察研究了在模拟酸雨环境下河道淤泥气泡混合土的溶出特性及相关的物理力学性质的变化,并且分析了微观矿物成分变化与物理力学性质的相关性,主要结论如下:

1)酸雨中的 H^+ 离子会与河道淤泥气泡混合土中的胶凝材料水化硅酸盐等反应,导致其水解并以 Ca^{2+} 等离子太溶出,使混合土不断中性化。模拟酸雨的酸性越强,与混合土的反应强度越大,反应后酸液中溶出 Ca^{2+} 量越多,渗滤液 pH 值升高幅度越大,土体中性化程度越高。在渗滤液体积数达到 10.0 之前,渗滤液 Ca^{2+} 浓度随着渗滤的进行而逐渐减小,但当渗滤液体积数大于 10.0 之后,渗滤液 Ca^{2+} 浓度又出现增大的趋势,说明以水泥作为固化剂形成的河道淤泥气泡混合土固化效果较好,在累计渗滤量较少时,混合土侵蚀程度较低,只有当渗滤液累计量达到一定值时,混合土溶出较多 Ca^{2+} 离子。

2)在模拟酸雨的渗滤作用下河道淤泥气泡混合土含水率和湿密度随渗滤量的增加而增大,且在渗滤初期增幅较大。模拟酸雨的酸性越强,渗滤作用后的混合土含水率和湿密度增长幅度越大。气泡掺量多的混合土渗滤后含水率和湿密度增长幅度大。

3)在模拟酸雨的渗滤作用下,河道淤泥气泡混合土变形模量 E_{50} 和峰值强度随渗滤量的增加呈增大趋势,而峰值应变呈减小趋势,且在渗滤初期,变形模量和强度增幅以及峰值应变减幅较大。随着模拟酸雨酸性的增强,渗滤作用后的混合土变形模量增幅和脆性化程度提高,而峰值强度降低。气泡掺量多的混合土渗滤后受侵蚀程度大,土骨架受损伤程度较高,脆性化程度高、峰值强度增长幅度相对降低。

4)根据 XRD 试验分析结果,可知酸雨作用使河道淤泥气泡混合土中石英、石膏、水化硅酸二钙、钙矾石和钠长石等矿物的相对含量改变,导致混合土的宏观结构发生变化,从而引起物理力学性质的变化。

参考文献:

[1] ZHANG X Y, JIANG H, JIN J X, et al. Analysis of acid rain patterns in northeastern China using a decision tree method [J]. Atmospheric Environment, 2012, 46(1): 590-596.

[2] LI Z J, SONG L L, MA J Z, et al. The characteristics changes of pH and EC of atmospheric precipitation and

analysis on the source of acid rain in the source area of the Yangtze River from 2010 to 2015 [J]. Atmospheric Environment, 2017, 156:61-69.

- [3] 苗胜军,蔡美峰,冀东,等. 酸性化学溶液作用下花岗岩岩力学特性与参数损伤效应[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 829-835.
- MIAO S J, CAI M F, JI D, et al. Damage effect of granite's mechanical properties and parameters under the action of acidic solutions [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 829-835. (in Chinese)
- [4] 李宁,朱运明,张平,等. 酸性环境中钙质胶结砂岩的化学损伤模型[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 395-399.
- LI N, ZHU Y M, ZHANG P, et al. A chemical damage model of sandstone in acid environment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 395-399. (in Chinese)
- [5] WANG W, LIU T G, SHAO J F. Effects of acid solution on the mechanical behavior of sandstone [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(1): 04015089-1-04015089-6.
- [6] 韩铁林,陈蕴生,师俊平,等. 水化学腐蚀对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(Sup2): 3064-3072.
- HAN T L, CHEN Y S, SHI J P, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandstone subjected to hydrochemical erosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup2): 3064-3072. (in Chinese)
- [7] 张英姿,范颖芳,刘江林,等. 模拟酸雨环境下 C40 混凝土抗压性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 105-110.
- ZHANG Y Z, FAN Y F, LIU J L, et al. Experimental study on compressive performance of concrete C40 in simulated acid environment [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1): 105-110. (in Chinese)
- [8] 夏峰. 模拟酸雨环境下水泥基材料力学性能研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2014.
- XIA F. Study on mechanical properties of cement-based materials under simulated acid rain environment [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [9] 宁宝宽. 环境侵蚀下水泥土的损伤破裂试验及其本构模型[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- NING B K. Experiments and its constitutive model of cement-mixed soil under environmental erosion [D]. Shenyang: Northeastern University, 2006. (in Chinese)
- [10] 姬凤玲,朱伟,张春雷. 疏浚淤泥的土工材料化处理技术的试验与探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(12):

- 1999-2002.
- JI F L, ZHU W, ZHANG C L. Study of treatment technology of dredging sludge with geosyntheticizing method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(12): 1999-2002. (in Chinese)
- [11] 陈忠平, 王树林, 邓江. 气泡混合轻质填土新技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- CHEN Z P, WANG S L, DENG J. New technology bubble mixed light soil [M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [12] YOON G L, KIM S B. Numerical analysis of light-weight air foamed soils using dredged materials for soft ground improvement method [J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2016, 2(61): 2073-2077.
- [13] 何国杰, 丁振洲, 郑颖人. 气泡混合轻质土的研制及其性能[J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(1): 18-22.
- HE G J, DING Z Z, ZHENG Y R, et al. Preparation of bubble mixed light soil and its properties [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5(1): 18-22. (in Chinese)
- [14] STANFORTH R, YAP C F, NAYAR R. Effects of weathering on treatment of lead contaminated soils [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131(1): 38-48.
- [15] ZHANG H Q, YANG Y Y, YI Y C. Effect of sulfate erosion on strength and leaching characteristic of stabilized heavy metal contaminated red clay [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(3): 666-675.
- [16] BAKHSHIPOUR Z, ASADI A, HUAT B B K, et al. Effect of acid rain on geotechnical properties of residual soils [J]. *Soils & Foundations*, 2016, 56(6): 1008-1020.
- [17] 张虎元, 王宝, 董兴玲, 等. 固化污泥中重金属的溶出特性[J]. *中国科学(E辑: 技术科学)*, 2009, 39(6): 1167-1173.
- ZHANG H Y, WANG B, DONG X L, et al. Dissolution characteristics of heavy metals in solidified sludge [J]. *Science in China (Series E: Technological Sciences)*, 2009, 39(6): 1167-1173. (in Chinese)
- [18] 张倩, 赵洁, 成华. 酸雨对水泥砼强度影响的模拟及其腐蚀的化学机理分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2005, 24(3): 49-51.
- ZHANG Q, ZHAO J, CHENG H. Simulation of influences of the acid rain on the concrete pavement and analysis of the chemical corrosion mechanism [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2005, 24(3): 49-51. (in Chinese)
- [19] 杨俊杰, 孙涛, 张明宸, 等. 腐蚀性场地形成的水泥土的劣化研究 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(1): 130-138.
- YANG J J, SUN T, ZHANG Y C, et al. Deterioration of soil cement stabilized in corrosive site [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(1): 130-138. (in Chinese)
- [20] 傅小茜, 冯俊德, 谢友均. 硫酸盐侵蚀环境下水泥土的力学行为研究 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(Sup1): 659-662.
- FU X Q, FENG J D, XIE Y J. Mechanical behavior of soil cement under ambient with sulfate conditions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(Sup1): 659-662. (in Chinese)
- [21] SAXENA V, AHMED S. Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study [J]. *Environmental Geology*, 2001, 40(9): 1084-1087.
- [22] DU Y J, WEI M L, REDDY K R, et al. Effect of acid rain pH on leaching behavior of cement stabilized lead-contaminated soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 271(4): 131-140.
- [23] 张英姿, 赵颖华, 范颖芳. 受酸雨侵蚀混凝土弹性模量研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(2): 175-180.
- ZHANG Y Z, ZHAO Y H, FAN Y F. A theoretical model for assessing elastic modulus of concrete corroded by acid rain [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(2): 175-180. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)