

文章编号: 0529-6579 (2000) 04-0104-06

水-土化学作用的力学效应及机理分析^{*}

汤连生

(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 通过水-土反应物理力学效应的实验, 探讨了水-土反应的正力学效应和负力学效应. 结果表明, 同一种土在不同水溶液或不同的状态浸泡下, 其水-土化学反应后的液限和塑限不同, 并存在着正负两个方向的力学效应: 纯水或 KNO_3 溶液使土的液塑限及塑性指数增大, 而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 K_2CO_3 溶液交替浸泡会使土的液塑限及塑性指数较大幅度的减小. 进而对水-土反应的力学效应机理进行了分析, 认为具有力学效应的水化学反应主要有溶蚀作用、沉淀或结晶作用和阳离子交替吸附作用 3 种, 并分别对其进行了探讨. 最后认为通过水与土的化学反应可以调整土的物理力学性质, 从而改良土质, 防治环境地质灾害.

关键词: 水; 土; 化学作用; 力学效应; 机理

中图分类号: TU411; TU432 **文献标识码:** A

土或土体的结构 (fabric), 指其组织 (texture)、结构 (structure) 或构造 (construction). 从小范围看, 土的组织分为土的组成成分 (composition) 和结构 (structure) 结构如图 1. 从较大范围看, 土体的结构如图 2.

土是岩石风化的产物, 土粒由各种矿物颗粒或矿物集合体组成. 土中的矿物有原生矿

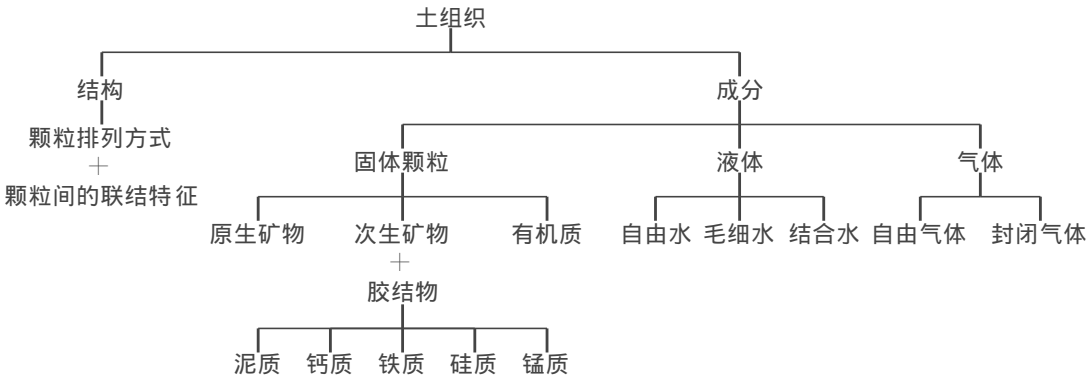


图 1 土组织图示

Fig. 1 Sketch of texture of soil

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59779019, 59809008); 广东省自然科学基金资助项目 (970127)

收稿日期: 1999-09-02; 作者简介: 汤连生 (1963 ~), 男, 博士, 副教授

物、溶于水的次生矿物、不溶于水的次生矿物和有机质。土或土体是一个非均质、多相的、颗粒化的、分散的多孔系统, 它每单位容积的界面面积可以非常巨大^[1]。土组织或土体组构在各组成成分、结构及各相之间都表现有极其复杂的相互作用。然而研究或处理一特定的土及其条件时, 往往将土简化成

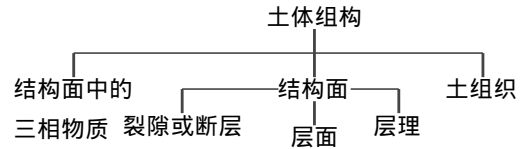


图 2 土体组构图示

Fig. 2 Sketch of fabric of soils

在主要因素或直接相关的因素上, 而对许多复杂因素忽略了。但是, 简化或理想化的概念、相互作用过程和模型用于土力学理论上和应用上的研究, 已显很不够。例如, 水-土化学作用对土物理力学性质的影响及其结构效应和土的非线性特性就很重要。越来越多的实践及其分析证明, 水-土化学作用的力学效应值得重视。因此, 土力学, 尤其是非饱和土力学有必要在此方面得到充实^[2]。土力学研究中已经把相互作用的研究提到了重要地位^[3]。水-土化学作用的力学效应是其重要的一方面, 它对地质环境的合理利用与地质灾害机理研究及其防治具有重要意义。

土的力学性质决定于颗粒之间联结力及相应的颗粒、水和气体之间的相互作用。一般土存在 5 种变形效应, 即力效应、水效应、化学效应、温度效应和流变效应。结构效应是其结果, 也是其新的起点。以往, 在力学效应方面, 人们对水-土的相互作用多集中在物理力学方面, 而很少重视其地球化学作用。近年来, 一些工厂发生地基的下陷, 墙体开裂, 地基土变黑软化, 构筑物不均匀沉降等实际问题, 其原因就是工厂本身排放的废水造成的。一些学者根据具体问题对受酸碱废液腐蚀的土体进行了调查和有针对性的实验研究^[4-6], 但这些研究还不系统。

水化学作用是溶解土(体)的矿物成分、胶结物或使某些成分结晶、沉淀, 导致土的孔隙率、土颗粒的排列方式等微观结构发生变化, 改变土质性状, 使土(体)天然的强度、变形特性发生变化。尤其是粘性土的复杂结构易受外界条件影响而发生变化。它不仅受压缩、剪切、温度、浸湿等的作用, 而且受水的渗透和水溶液的化学性质的影响。

粘土矿物成分和结合水及其与水溶液的相互作用是决定粘性土结构特性的基础^[7,8], 粘性土结构特性决定了粘性土的物理力学性质和水理性质。在一定受力条件下, 水渗透、化学作用会引起土颗粒胶结物及土中矿物表面、矿物成分等物理、化学性质的改变, 使粘性土的结构构造发生变化, 从而影响土的力学性质。水化学作用与土体的结构构造、成分的多重耦合和相互作用, 是制约土的强度、变形、渗透性的最主要因素。

1 水-土反应对土力学效应的实验研究

1.1 实验思路与方案

实验的思路是, 通过土与不同水溶液反应后的力学效应的变化特征, 探讨水-土化学作用的正力学效应和负力学效应的机理。本实验是在常温常压下, 对同一种土在不同水溶液或不同浸泡状态下的水-土化学反应后的液限和塑限的变化进行对比研究。采用的土样是珠海某电厂的淤泥质粘土。考虑到地下水或土中空隙溶液都多含 Na^+ , 并根据实验的思路及下述的实验方案, 因此本实验配制了 4 种水化学溶液: ①纯水: $\text{pH}=7.36$, 含 29.73 mg/L 的 HCO_3^- 、 1.38 mg/L 的 SO_4^{2-} 、 4.30 mg/L 的 Cl^- 、 1.25 mg/L 的 Na^+ 、 0.36 mg/L 的 K^+ 、 0.41

mg/L 的 Ca^{2+} 、0.04 mg/L 的 Mg^{2+} 等,矿化度为 63.98 mg/L; ② KNO_3 溶液:由 KNO_3 化学试剂配制而成,矿化度为 10 g/L,而后添加浓度为 98% 的 H_2SO_4 ,使溶液的 $\text{pH}=3$; ③ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液:由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 化学试剂配制而成,矿化度为 10 g/L, $\text{pH}=10$; ④ K_2CO_3 溶液:由 K_2CO_3 化学试剂配制而成,矿化度为 10 g/L,而后添加浓度为 98% 的 H_2SO_4 使溶液的 $\text{pH}=3$. 设计的具体实验方案及步骤:

- (1) 土样用取土器采回,用 30 cm×2 cm 规格的环刀切取制成试件后,环刀两端用透水石封盖,每两个试件为一组,待浸泡于水化学溶液中;
- (2) 实验采用静止浸泡装置,每个装置的水化学溶液为 50 L;
- (3) 设计 2 种不同的浸泡状态: ①将试件分别连续浸泡于纯水、 KNO_3 溶液中 10 d; ②试件被 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液和 K_2CO_3 溶液交替浸泡,交替的周期为 1 d.

1.2 实验结果及分析

浸泡 10 d 后,土的液限和塑限与天然土已有明显不同,结果见表 1.

表 1 浸泡 10 d 后土的液限、塑限和塑性指数与天然状态土的对比
Tab 1 Comparison of the liquid limit plastic limit and plasticity index between the soil soaked for ten days and natural soil

状 态	天然状态	纯水浸泡	KNO_3 溶液浸泡	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 K_2CO_3 溶液交替浸泡
液限及变化情况	51.8%	53.1%, 增大	51.9%, 稍增大	43.2%, 大幅减小
塑限及变化情况	31.2%	33.0%, 增大	31.5%, 增大	30.5%, 减小
塑性指数及变化情况	18.6	19.9, 增大	20.4, 增大	12.7, 大幅减小

- (1) 浸泡纯水中的土样的液限、塑限及塑性指数均比天然土的有所增大. 因为纯水驱替了原土中部分空隙溶液, 空隙溶液中的高价离子浓度降低, pH 值提高, 土的塑性提高.
- (2) 浸泡 KNO_3 溶液中的土样的液限、塑限及塑性指数均比天然土的有所增大, 且其液限和塑限增幅比纯水浸泡的增幅要小些, 其塑性指数的增幅又比纯水浸泡的要大. 其原因是, 在酸性溶液中, 低价钾离子代替了土中高价离子, 使土中水的高价离子的浓度减低, 土的双电层中电动电位提高, 扩散层变厚, 结合水增多, 从而使土的塑性提高.
- (3) 被 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 K_2CO_3 2 种水化学溶液交替浸泡的土样, 其液限、塑限及塑性指数均比天然土的有较大减小. 其原因是, Ca^{2+} 取代土中低价离子, 使土的双电层中电动电位降低, 扩散层变薄, 结合水减低; 同时 K^+ 取代土中 Na^+ , 使土的分散性减低, 凝聚性提高. 这些使土的塑性降低. 而且, 2 种水溶液的混合作用形成的 CaCO_3 或 CaO , 对土起到胶结作用, 从而也减低了土的液限、塑限和塑性指数.

2 机理分析

水-化学作用对土的物理力学性质的影响主要体现在对土组织的物理化学成分和结构的作用, 其影响机理较复杂.

土与水溶液相互作用具有力学效应的化学作用主要有: 溶蚀作用、沉淀或结晶作用和阳离子交替吸附作用 3 种, 它们对土的物理力学性质有很大影响, 且其效应不同. 总的来说, 在物理化学成分方面, 水-土化学作用改变了土中水溶液的离子成分及浓度、土中粘粒含量及其它成分的亲水性、土的渗透性等方面, 改变了土中水溶液成分, 改变了结合水、双电层及偶

极(库仑)力化学键的力、离子-静电力、湿吸力,最后反馈回来又改变了水-土相互作用.正因为如此,水-土化学作用对土的物理力学性质可能产生巨大影响.

2.1 溶蚀作用和沉淀或结晶作用

溶蚀作用和沉淀或结晶作用是 2 种方向相反的作用.溶蚀作用是指土中矿物、盐类被水溶液化学作用及渗透溶滤作用下,土中一部分物质转入水中.沉淀或结晶作用是指水溶液与土中矿物、盐类及土中原存的水溶液物理化学反应生成的难溶的沉淀物或结晶,使某些元素、离子由水溶液中固结于土孔隙中或晶格体上.溶蚀作用和沉淀或结晶作用都可能导致土的物理力学性质的变化.一般前者如溶滤作用、水解作用和脱硫酸作用等,它使土的胶结强度减弱,使土的塑性、剪切强度和压缩模量降低,使透水能力和压缩系数提高;而后者如浓缩作用、脱碳酸作用和混合作用等,它使土的胶结强度及塑性剪切强度和压缩模量提高,使土的透水能力和压缩系数降低.溶蚀作用和沉淀或结晶作用正因为对下面几方面有影响,从而导致水-土化学作用的力学效应.

(1)土中粘粒含量及土的渗透性.土中粘粒的含量决定着粘性土的渗透性能.对于同一块土,土中颗粒愈小的矿物、盐类愈易与水溶液发生反应并易被后期水的淋滤作用转入地下水或被带走.这种溶蚀作用使土中粒度组成发生变化,使粘粒含量减少,土的塑性降低,同时还使土的透水能力提高.

溶蚀作用使土的透水能力提高,沉淀或结晶作用使土的透水能力降低.透水性愈好,土的压缩性愈好.例如,孙重初^[9]对 2 组红粘土进行了淋滤渗透实验,结果表明土被酸性溶液淋洗后透水性大幅提高.

由于与大气不连通的封闭气体对土的工程性质影响较大,它增大了土的弹性,减少了土的渗透性,延缓了土的压缩和膨胀、变形随时间的发展过程^[9].因此,当水-土化学作用在土中产生了一些封闭气体或消耗、破坏了一些封闭气体,或由于此作用改变了土的气体渗透率,这些作用就可能导致土的物理力学性质的变化.例如淤泥和泥炭土中,由于微生物的活动分解作用,土中产生一些硫化氢、甲烷等气体,使土层不易自重压密而形成高压压缩的软土.一般土中有机质的增多,会使土中封闭气体含量提高.含有机质较多的土,若在水化学的作用下,使土中有机质减少,封闭气体受到破坏,气体和水的渗透率都得到提高,这些都可能提高土的物理力学性质.

(2)胶结作用.一般,溶蚀作用使胶结强度降低,而沉淀或结晶作用使胶结强度提高.但是,溶蚀作用也可能是沉淀或结晶作用的开始.例如,水溶液溶蚀的是土颗粒某种矿物,而在土颗粒间生成另一种沉淀或结晶物,这就是因为最初有了溶蚀作用而导致胶结作用加强.

(3)土颗粒的亲水性.粘土矿物八面体中的类质同象置换(如 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 对 Al^{3+} 的置换)和层状硅酸盐中镁、铁含量的增加将导致其比亲水性降低.事实上,据 Foster(1955)的资料,蒙脱石的膨胀含水量随八面体中类质同像置换的增加可降低 2 倍以上.奥西波夫^[8]也取得了类似的结果.如 Na-型奥格兰棱斯蒙脱石的自由膨胀含水量为 1 890%,而契尔卡斯克蒙脱石总共只有 610%.蒙脱石的结合水膜厚度与它们 Mg^{2+} 和 Fe^{3+} 的含量成反比.

亲水性的降低,导致水的表面张力、湿吸力和结合水厚度降低,由此影响粒间的连接,也导致沉积物的自然压密和脱水作用和体系强度的增强.值得指出的是,含 Fe^{2+} 与含同量的 Fe^{3+} 比较,前者引起晶胞的尺寸更急剧的增加.因此, Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ,如风化作用,会导致层状硅酸盐亲水性的增加,这已被 Foster 的实验资料所证实^[8].

(4)双电层. 粘粒表面双电层越发育, 土的塑限、液限及塑性指数越大. 双电层越发育, 粒间的距离便越大, 能量越高, 体系趋于不稳定状态. 从而双电层发育的土粒间连接松散, 抗压、抗剪能力减弱. 如果采用有利于双电层发育的流体驱替原有空隙溶液, 则粒间最佳平衡距离减小, 相当于产生一个附加外荷, 原已压缩稳定的试样将进一步压密, 导致前期固结压力提高, 压缩系数降低. 双电层发育意味着结合水含量增加, 重力水减少, 土的渗透性变差; 反之, 重力水增多, 土的渗透性变好^[7].

溶蚀作用和沉淀或结晶作用对双电层的影响, 是源于它们均能改变土中水溶液的离子成分及离子浓度, 而土中水溶液的离子成分及浓度的变化对双电层的影响很大. 例如, 文献[6]的实验结果表明, 酸性水溶液使红粘土中的许多 Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} 转入了水中, 使双电层中高价离子浓度提高, 导致扩散层变薄, 结合水较少, 使土的塑性降低.

2.2 阳离子交替吸附作用

土颗粒表面带有负电荷, 能够吸附阳离子, 一定条件下, 颗粒将吸附水溶液中某些阳离子, 而将其原来吸附的部分阳离子转为水溶液中. 不同的阳离子, 其吸附于土颗粒表面的能力不同, 按吸附能力, 自大而小顺序为: $\text{H}^{+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{Na}^{+}$ ^[8]. 阳离子交替吸附作用, 由于对土颗粒表面双电层的发育状况、土颗粒的亲水性及颗粒间的湿吸力、可变结构吸力等具有很大的影响, 因此, 它对土的物理力学性质也具有很大影响.

3 结 论

分析了土的组织 and 土体的组构, 由此强调土或土体是一个非均质、多相的、颗粒化的、分散的多孔系统, 土组织或土体组构在各组成成分、结构及各相之间都表现有极其复杂的相互作用, 将土过于简化或理想化是不可取的. 越来越多的实践及其分析证明, 水-土反应, 尤其是水化学作用的力学效应值得重视.

水-土反应物理力学效应实验的结果表明, 同一种土在不同水溶液或不同浸泡状态下, 其水-土化学反应后的液限和塑限有不同的值, 存在着正负 2 个方向的力学效应: 纯水或 KNO_3 溶液使土的液塑限及塑性指数增大, 而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液和 K_2CO_3 溶液交替浸泡土会使土的液塑限及塑性指数较大幅度的减小.

对水-土反应的力学效应的机理进行了分析, 认为具有力学效应的水化学反应主要有, 溶蚀作用、沉淀或结晶作用和阳离子交替吸附作用 3 种, 并分别对其进行了探讨. 其中认为, 溶蚀作用和沉淀或结晶作用正因为对下面几方面有影响, 从而导致水-土化学作用的力学效应: 土中粘粒含量及土的渗透性, 胶结作用, 土颗粒的亲水性及双电层.

溶液与土的化学作用, 于土的物理力学性质来讲, 或是一种损伤, 或是一种加固. 本文的分析及实验结果的意义在于, 使我们认识到可以通过水与土(包括土中的水溶液)的化学反应(如调控地下水流动系统)达到调整土的物理力学性质, 以改良土性或加固土体, 达到防治环境地质灾害. 这是一个新的研究思路, 也是一种环保思想. 因为水-土化学作用的力学效用具有时间效应, 且可以是可逆的, 也可以是不可逆的, 因而在应用中要根据实际情况和需要进行必要的调控和取向. 此方面是环境地质灾害研究中一个值得开拓的新研究领域.

参考文献:

[1] D. 希乐尔, 土壤和水——物理原理和过程[M]. 华孟, 叶和才译. 北京: 农业出版社, 1981.

- [2] 汤连生, 王思敬. 湿吸力及非饱和土的有效应力原理探讨[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1) :83~88.
- [3] 谢定义. 21 世纪土力学的思考[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4) :111~114.
- [4] 顾季威. 酸碱废液侵蚀地基土对工程质量的影响[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(4) :72~78.
- [5] 郑黎明. 铁路基床的环境工程地质效应[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(2) :60~64.
- [6] 孙重初. 酸液对红粘土物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4) :89~93.
- [7] 汪民. 饱水粘性土中粘粒与水相互作用的初步探讨[J]. 水文地质工程地质, 1987, 13(3) :1~5, 12.
- [8] B. И. 奥西波夫著. 粘土类土和岩石的强度与变形性能的本质[M]. 李生林, 张之一译. 北京:地质出版社, 1985. 48~52.
- [9] 赵明华, 李刚, 曹喜仁, 等. 土力学地基与基础疑难释义[M]. 北京:中国工业出版社, 1998.

Mechanical Effect of Chemical Action of Water on Soil and Analysis on Its Mechanism

TANG Lian-sheng^{*}

Abstract :Researching the mechanical effects of chemical action of water-soil on soil is of great importance to geoenvironmental hazard control. The texture of soil and the fabric of soil mass are set forth. Tests on physical and mechanical property are performed to investigate the mechanism of the positive and negative mechanical effects of different chemical property of aqueous solution. The results make clear that the plastic limit, liquid limit and plasticity index are changed, and there exist both positive and negative effects on specimens in this test. Based on the analysis of the mechanism of the mechanical effects of water-soil interaction on soil, it could be estimated that hydrochemical actions being provided with mechanical effects on soil include dissolution, sedimentation or crystallization. The significance of these tests lie in which it is recognized for us that we may improve, adjust and control the quality of soils, and may achieve the goal of geological hazard control and prevention.

Keywords :soil ;water ;chemical action ;mechanical effects ;mechanism

^{*} Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou, 510275, China