

水土作用体系中铁对土体强度的影响机理初探

代志宏,吴 恒,张信贵,易念平

(广西大学土木建筑工程学院,广西 南宁 530004)

摘要 以南宁市地下水为背景,提取变化显著的铁元素作为研究对象.首先介绍水土作用实验的原理及步骤,然后根据实验数据的统计,初步探讨土中铁的含量、存在状态对土体强度的影响机理.

关键词 铁 水土作用 土体结构 土体强度

中图分类号 :TU46+2 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2003)01-0046-04

随着城市建设的发展和城市人口的日益增多,城市区域的地下水、地表水、大气水之间原有的‘三水’循环系统被扰动,加之大量的天然地表消失,各类污染物进入土体的几率增大等外界因素的影响,城市区域地下水的氧化还原状态发生变异,从而导致地下水的化学组分发生变异.变异的地下水的化学组分促使吸附、溶蚀等物理化学作用活跃,原有的水—土—电解质平衡系统不断调节以构成新的动态的化学平衡,土体的物质稳定和以物质为基础的土体结构、力学性质随之变化(环境变化引起土体工程性质的变化分析如图 1 所示)^[1].

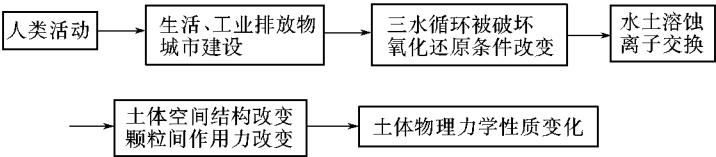


图 1 水土环境变化对土体工程性质影响分析简图

Fig.1 Influence of soil and water environment variation on characteristics of soil engineering

尽管地下水与地基土体之间,相互作用是长期的、缓慢的,但城市建设对地下水的扰动逐渐加大,水土作用将长时期进行量的积累,从而会导致地基土体发生质的变化.因此,研究城市区域的水土作用将有助于预测城市区域建筑环境和建筑地基的变形和稳定问题.

笔者以南宁市为背景,通过对城市多年地下水资料的分析,发现变化较大的元素主要有:钙、镁、铁、锰.土样能谱分析表明土中铁的含量较高(见图 2),其变化对土体的物理力学性质有比较显著的影响,因此本文通过实验,先对水土作用中铁的作用机理进行研究.

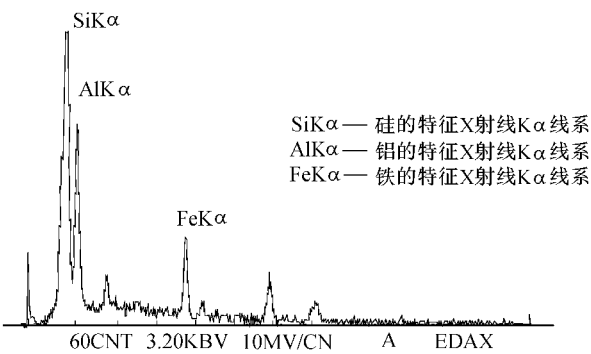


图 2 土样能谱

Fig.2 Energy spectrum of soil sample

1 水土作用过程的室内模拟

1.1 水土背景值

试验土样及水样均取自南宁市某深基坑的下伏粉质粘土.土样的主要物理力学指标、化学组成见表 1. 水样的主要离子浓度见表 2.

表 1 土样的主要物理力学性质和化学组成

Table 1 Major mechanical and physical prepreties and chemical composition of soil samples														
指标	含水量 <i>w</i> /%	湿容重 $\gamma/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 <i>e</i> /%	饱和度 <i>Sr</i> /%	Al /%	Ca /%	Mg /%	液限 ω_L /%	塑限 ω_p	凝聚力 <i>C</i> /kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	Na /%	K /%	Fe /%
含量	22.7	2.01	0.67	93	3.6	0.601	0.188	37.4	21.3	68	8	0.213	1.011	1.987

1.2 试验设计

1.2.1 试样制作

原状样 $d = 3.91\text{ cm}$, $h = 8\text{ cm}$,保持含水量与结构不变。
扰动样 $d = 3.91\text{ cm}$, $h = 8\text{ cm}$,干密度小于 2.0 kg/m^3 ,保证干密度变化量小于 1.5% 。
试样用多孔过滤塑料包扎待用。

1.2.2 试验步骤^[2]

对刚制备好未浸泡的原状和扰动土样进行试验,试验结果作为背景值。

当浸泡在 5 种溶液中的原状和扰动土样达到浸泡时间后,每次各取出 4 组,其中 3 组分别加以 100,200,300 kPa 的围压进行三轴试验,另一组粉碎后做化学全分析、酸碱度试验。取土样的同时,取浸泡溶液进行化学成分测试。

每次从浸泡溶液中取出的试样,首先放置在底部有少量水的保湿器内,使试样含水量均匀晾干至浸泡前试样的含水量,然后再进行试验。

试验采用三轴不固结不排水剪,剪切速率为每分钟 1% 。

1.3 铁含量测定^[3]

为了避免用连二亚硫酸钠体系提取游离氧化铁产生沉淀,采用盐酸羟胺-柠檬酸体系提取游离氧化铁。

1.3.1 仪器

721B 型分光光度计,HS21—6 型电热恒温水浴锅,800 型沉淀离心机,PHS—2A 精密酸度计。

1.3.2 样品制备

土样经自然风干,研磨,过孔径为 0.25 mm 筛,制成 1 号和 2 号试样,装入试剂瓶中保存。

1.3.3 操作步骤

称取 0.400 g 土样于 100 mL 烧杯中,分别加入一定量的盐酸羟胺固体、柠檬酸溶液、NaOH 溶液。
烧杯加盖,95℃水浴 4 h,不时搅拌。
烧杯冷却至室温,离心分离,浸渣用饱和 NaCl 水溶液洗涤,稀释定容。

在定量稀释液中依次加入定量的盐酸羟胺水溶液、邻菲罗啉水溶液、NaAc 水溶液,稀释、摇匀,室温下显色 24 h。用分光光度计测量显色液的吸光度。由工作曲线求出铁的含量。

2 试验结果分析

2.1 土中总铁含量和土体强度动态变化机理

由试验得到浸泡液作用下,土中总铁含量和土体强度(主应力差)的变化情况(图 3),可根据时间的推移分为 4 个阶段。

第 1 阶段(0~5 个月) 原来溶液中不含铁(见表 2 试验用模拟溶液主要离子浓度)。土体浸入后,铁的可溶盐溶解,扩散入溶液中,含铁胶体逐渐被水软化,在土颗粒间起润滑作用,内摩擦角变小,土体结构强度下降。

表 2 试验用模拟溶液主要离子浓度

Table 2 Concentration of principal ions used in experimental solution						kg/mL
溶液	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mn ²⁺	Fe ²⁺ , Fe ³⁺ 总量	Na ⁺	
A1	12.6	5.54	0.002	0	2.10	
A2	10.5	5.75	0.283	0	4.95	
A3	38.9	4.14	0.050	0	29.05	
A4	6.9	6.22	0.003	0	5.256	
A5	0.89	0.54	0.098	0	2.34	

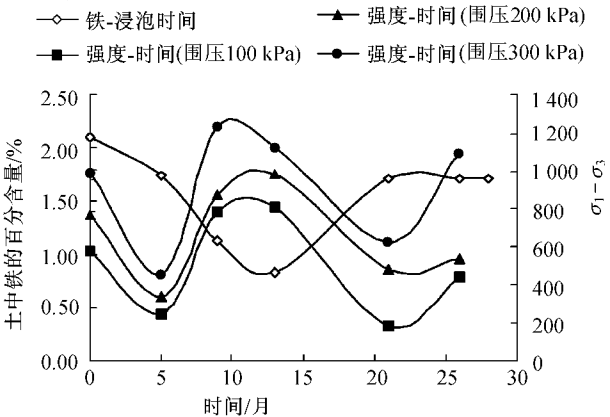


图 3 原状土中铁的含量、不同围压下的主应力差与浸泡时间的关系

Fig.3 Relationship between iron content in soil, principal stress difference, and soaking time

第2阶段(5~13个月) :浸泡器的开口处用凡士林涂抹来密封,土水系统中的好氧菌不断消耗一开始就被封入的少量氧气,来分解有机物.到5个月左右时,浸泡器内的氧气全部被耗光,厌氧菌开始大量繁殖,“大颗粒”的有机物被分解成小分子(淀粉、纤维、果胶、蔗糖等被分解成葡萄糖;蛋白质被分解成蛋白胨、多肽或氨基酸;脂肪被分解成脂肪酸及甘油^[4]).这一阶段,土处于还原环境中,已经被软化含有大量结合水的胶体状 Fe^{3+} 被还原成易溶的 Fe^{2+} .土中具有极大比表面积的有机质和铁胶体的消失使得土的表面能大幅度下降,结合水减少.由于原来的 Fe^{3+} 是以胶体的形式存在的,而不是自由的离子,因此溶液中 Fe^{2+} 的增加会导致土颗粒的双电层变薄,颗粒容易聚沉、粒径变大,土体的内摩擦角增大.这一过程中,水土系统的酸度略有降低,但 pH 值一直维持在 6.3 左右,变化幅度不超过 0.5,不会使起胶结作用的晶质铁和原生矿物、粘土矿物中的铁溶出.带正电荷的胶体铁和带负电荷的有机质同时减少,对土颗粒之间静电力的影响不大.在还原环境中,二价铁离子和三价铁离子氧化物的混合物很容易沉淀,并且认为这种无定形产物比新鲜沉淀的 $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$ 的溶解度小,但比磁铁矿易于溶解^[5].此时土缺氧,细菌又产生一定的 CO_2 ,就有利于菱铁矿 FeCO_3 的形成. FeCO_3 是一种稳定的含铁矿物,其与 CO_2 都将加强土颗粒间的连结.由此可见,土体的颗粒粒径和结构强度应不断增长.

第3阶段(13~21个月) :水土系统的还原状态持续到了第13个月,浸泡器上起密封作用的凡士林老化,水土系统被曝气,变成了氧化状态.浸泡液中的 Fe^{2+} 迅速被氧化成难溶的胶体状 Fe^{3+} 的无定形氧化物.而土中的变化相对较慢,主要是因为土中的 Fe^{2+} 很多是被吸附在矿物颗粒上的,受负电荷的屏蔽,不易迅速反应.这样,在浸泡液和土体之间存在着 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 的两个浓度梯度,浸泡液中游离的 Fe^{3+} 胶粒多,土中很少,在浓度梯度和土颗粒表面吸附能的作用下, Fe^{3+} 将向土体聚积,随着两者浓度的接近和颗粒表面吸附能的饱和, Fe^{3+} 的迁移速度将变慢.对于 Fe^{2+} ,一方面土中有一些尚未被氧化的 Fe^{2+} ,另一方面在曝气的溶液中,由于 Fe^{2+} 马上会被氧化,则不存在还原态的铁.所以, Fe^{2+} 有从土体向浸泡液扩散的趋势,并且扩散速度的变化远小于 Fe^{3+} .由此,可推断在离子迁移的过程中,接近平衡时必然有一时刻,此刻土的总铁量最高.

第4阶段(21个月以后) :图3显示,浸泡到21个月时铁的含量最高,这以后微微降低并趋于稳定.此时聚积到土中的铁还来不及沉淀或结晶,仅仅以游离的胶体状态存在,使土的比表面积大幅度增加.同时,土孔隙溶液中的 Fe^{2+} 减少,土中的结合水量很高,颗粒双电层变厚.另外,前一阶段形成的起胶结作用的二价铁离子和三价铁离子氧化物的混合物以及菱铁矿 FeCO_3 将溶解,所以此时土体的强度很低.随着离子扩散达到平衡,氧化铁胶体在土体中逐渐沉淀,以氢键将土颗粒粘结起来,土体强度会慢慢提高.接着,沉淀将老化、结晶.因为晶体无任何亲水性和胶结能力,所以预计土体强度会达到一个最高值,然后再下降,直到稳定.

2.2 力学作用机理

由图3可以看出,当浸泡5个月之后,土中总铁含量和土体强度有一定的相关性,对5个月后试验所获得的 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa 围压下的三轴试验主应力差与土中铁的百分含量利用多项式、指数、对数和幂函数分别进行拟合,得到最优的拟合曲线如下(x 为土中铁的含量(%),主应力差的单位是 kPa):

100 kPa 围压下的主应力差与土中铁的百分含量:

$$y = -58.215x^2 + 25.253x + 505.56 \quad (\text{相关系数绝对值为 } 0.5245)$$

200 kPa 围压下的主应力差与土中铁的百分含量:

$$y = -97.354x^2 + 96.469x + 618.86 \quad (\text{相关系数绝对值 } 0.6125)$$

300 kPa 围压下的主应力差与土中铁的百分含量:

$$y = -58.021x^2 - 76.294x + 918.02 \quad (\text{相关系数绝对值为 } 0.7234)$$

相关系数绝对值最大的是 0.7234.这反映了土体力学性质是非常复杂的,即土体性质不能单由铁这一个因素来决定.100 kPa 围压下、200 kPa 围压下、300 kPa 围压下的主应力差的回归方程中,多数方程的相关系数绝对值随围压依次增加.反映围压增大时铁对主应力差的影响增强.相关系数绝对值,100 kPa 围压下的是 0.5245,200 kPa 围压下的是 0.6125,300 kPa 围压下的是 0.7234.出现这一现象的原因是土体具有塑性体积应变,即在球应力的作用下也会发生明显的不可恢复的体积应变.土体与金属材料不同,是疏松的三相体系,在各向相等的压力作用下,从宏观上来说,是不受剪切的;但在微观上,颗粒间有错动^[6].土体压缩前,颗粒架空,存在较大孔隙.试验中,铁胶体一部分粘在颗粒间的接触处,一部分就游离于孔隙中.这样,在接下来施加主应力差时,起粒间润滑作用的只有部分铁的胶体.压缩后,有些颗粒挤入原来的孔隙中,颗粒错动,相对位

置调整,颗粒之间发生剪切位移,大部分铁胶体被挤在颗粒中间,剪切变形时发挥作用.而 100 kPa 的围压较小,不足以大幅度破坏土体原有的粒间连结,粒间孔隙大,因此铁的影响弱.围压越大,粒间孔隙越小,铁的影响越大.

3 结 语

本次实验目的在于证实铁的作用,得到相对的变化量,不追求绝对量的变化.为了模拟自然状态下的水土作用,避免放大影响因素后引起的失真,使用的是天然状态下的水和土.这一体系中,化学物质活性弱,导致实验周期长、实验过程中土体的物质成分和物理力学指标变化幅度较小.由于实验设备的精度、水土体系的空间结构和物质组成的复杂性、外界环境(温度、大气压、大气成分、微生物等)的多变性等种种因素的影响,实验数据进行拟合后相关系数不太高.但是,初步实验的结果仍然反映了很多合理、有益的规律.排除其他影响因素的变化后情况如何,还有待于进行大量的实验验证.

参考文献：

[1] 吴恒,张信贵,易念平,等. 城市环境下的水土作用对土强度的影响[J]. 岩土力学,1999,20(4) :25—30.
[2] 吴恒,代志宏,张信贵. 水土作用中铝对土体结构性的影响[J]. 岩土力学, 2001,22(4) :474—477.
[3] 龚琦,将新建,张信贵,等. 盐酸羟胺-柠檬酸体系提取土壤中的游离氧化铁[J]. 岩矿测试, 1998,17(4) :299—302.
[4] 高国瑞. 近代土质学[M]. 南京:东南大学出版社,1982. 150—152.
[5] 于天仁,陈志诚. 土壤中发生的化学过程[M]. 北京:科学出版社,1990. 221—222.
[6] 吴恒,张信贵,易念平,等. 水土作用与土体细观结构研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(2) :199—204.

Influence of iron element on soil strength in water-soil interaction system

DAI Zhi-hong, WU Heng, ZHANG Xin-gui, YI Nian-ping

(College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi Univ., Nanning 530004, China)

Abstract : With the element of iron in the groundwater of Nanning City as an object for study, an introduction is given to the principle and process of the water-soil interaction experiment. Based on the analysis of experimental data, a discussion is made on the content and existing state of the element of iron in soil and its influence on soil strength.

Key words : iron ; water-soil interaction ; soil structure ; soil strength