水土作用与土体细观结构研究*

吴 恒 张信贵 易念平 代志宏 (广西大学 南宁 530004)

摘要把土体中的固相划分为不可溶蚀相、可溶蚀相两个亚相。由此对因地下水环境变异引起的土体可溶蚀相变化 进行了理论公式推导,用公式定量解释了可溶蚀相变化引起的土体孔隙变化,并预测了土体潜在变形量。实验室模 拟结果证实了公式的正确性。

关键词 地下水变异,可溶蚀相,CT 值变化率,潜在变形,模拟实验

分类号 TU 411.4 文献标识码 A 文章编号 1000-6915(2000)02-0199-06

1 前 言

土的固相主要由矿物颗粒和胶结物两部分组成。 胶结物主要由盐类、氢氧化物、二氧化硅、倍半 氧化物及有机质和无机化合物等组成,它们在单位 土体中所占有的体积决定着土体孔隙的大小,其赋 存的状态又决定着颗粒接触方式及土的结构强度。 因此,胶结物的物理及化学性质在相当大的程度上 决定着土体的力学性状与工程特性。

大多数盐类胶结物可以与水溶液发生反应。在 自然环境中,胶结物的成分及对颗粒胶结作用的强 弱与地下水的化学组分相关联。在许多情况下,地下 水中化学组分的变异,与胶结物的溶蚀、颗粒的吸附 等构成一种动态的化学平衡,从而影响着土体的细 观结构。

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、大气水之间的原有的 "三水"循环系统被扰动,加之大量的天然地表面消 失,以及各类污染物进入土体机率增大等外界因素, 城市区域的地下水的氧化还原状态发生变异,并导 致地下水的化学组分发生变异。

当地下水的化学组分发生变异之后,原有的水 土之间的化学组分间的平衡就必然遭到破坏,原有 的水-土-电解质之间的平衡必然瓦解,吸附溶蚀作用 随之活跃。当考虑到城市的建设是日复一日的进行, 人类活动对地质环境的扰动不可能是一个常量等事 实,则水-土-电解质之间的不平衡状态就持续存在。

在上述背景下,土体的细观结构会有什么变化? 其变化的数学表征如何表述,相应的测定方法是什 么?本文正是针对这样一系列问题,从水土作用机理 来进行理论探讨和论证。

2 细观结构变异物理过程及形变增量 计算

土体的细观结构是指土颗粒之间的相对位置、 接触状态、胶结物及胶结状态、粒间孔隙大小与形 状。细观结构研究的对象是颗粒间所发生的作用、结 构及内在的原因。细观结构与土体宏观结构、土的微 观结构研究的重点差异是土体宏观结构着重研究土 层赋存状态及不同性状土体在空间的相对位置;土 的微观结构着重研究颗粒内部的晶体结构、矿物组 分、形态及相互关系。显然,从研究对象的空间尺度 看,笔者所定义的土体的细观结构是介于土的微观 结构与土体的宏观结构之间。

组成土的细观结构有颗粒、胶结物及孔隙。对于 固相介质,又以是否易溶于水面分为可溶相与不可 溶相。图1为细观结构示意图。结构中的孔隙由水或 水和气或气所占据,不可溶相包括难溶矿物颗粒和 难溶盐组成的胶结物。

¹⁹⁹⁹年11月15日收到初稿, 1999年12月22日收到修改稿。

^{*} 国家自然科学基金及广西自然科学基金联合资助课题(49662010),广西高校跨世纪学科带头人培养对象专项基金资助课题和广西青年科学基金资助课题(桂科青 9912013)。

作者 吴 恒 简介: 男, 1956 年 12 月生, 博士, 1982 年毕业于南京大学地质系水文地质与工程地质专业, 现为博士生导师, 主要从事工程地 质与岩土工程专业方面的研究工作。







2.1 细观结构的变异过程分析

由于所研究的是置于城市环境下的水土介质, 则导致土体细观变异的因素将涉及地下水化学组分、 结构中的可溶盐的量和体积等。由前述定义的细观 结构可知,在受到外荷时,组成细观结构体之一的 孔隙可以被压缩而使结构体发生变异,也可以是由 易溶盐组成的胶结物被溶蚀而导致结构体发生变异; 第二种情形即使出现的概率是正常级的,对细观结 构体同样能产生变异,即当颗粒吸附、溶蚀作用较 为显著时,细观结构中胶结物的体积、孔隙的状态 及大小均可发生变异。

假设矿物颗粒和胶结物构成土骨架,水溶液充 满于土骨架构成的土孔隙当中。为方便研究,将三 者按体积和质量划分如图1所示。由图1我们给出 如下指标的定义:

图中符号规定为: m — 饱和土总质量, m_s — 固体相质量, m_w — 水的质量, m_k — 不可溶蚀相 质量, m_i — 可溶蚀相质量, V — 饱和土总体积, V_k — 不可溶蚀相体积, V_i — 阿溶蚀相体积, V_i — 可溶蚀相体积, V_i — 可溶蚀相体积, V_k — 固体相形成的孔隙体积, V_w — 水的体积, V_k — 固体相体积($V_i + V_k$)。

各指标定义如下:

式

(1)不可溶蚀相相对密度 d_k:不可溶蚀的土颗 粒密度与水密度的比值,即

$$d_{k} = m_{k} / (V_{k} \rho_{w})$$
(1)
$$\mathbf{r}: \rho_{w} \longrightarrow \mathbf{N}$$

(2) 可溶蚀相相对密度 *d*_j: 可溶蚀物质密度与水 的密度的比值, 即

$$d_{\rm j} = m_{\rm j}/(V_{\rm j}\rho_{\rm w}) \tag{2}$$

(3) 孔隙比 e_{kiv}: 土中孔隙体积与固体相体积之 比, 即

$$e_{kjv} = V_{kjv} / V_{kj} = V_{kjv} / (V_k + V_j)$$
(3)

(4) 可溶蚀率 B: 可溶蚀相质量与固体相质量之 比, 即

$$B = m_{\rm i}/m_{\rm s} \times 100\% \tag{4}$$

由图1及上述各指标定义,可以导出如下关系

$$m_{\rm k} = m_{\rm s} - m_{\rm j} = m_{\rm s} - Bm_{\rm s} = m_{\rm s}(1 - B)$$
 (5)
由式(1), (5)可得

$$V_{k} = m_{k}/(d_{k}\rho_{w}) = m_{s}(1-B)/(d_{k}\rho_{w})$$
(6)
由式(2), (4)可得

$$V_{j} = m_{j}/(d_{j}\rho_{w}) = m_{s}B/(d_{j}\rho_{w})$$

$$(7)$$

由含水量定义
$$w = m_w/m_s$$
可得

$$V_{\rm w} = m_{\rm w}/\rho_{\rm w} = w \, m_{\rm s}/\rho_{\rm w} \tag{8}$$

由于水溶液充满于固体相组成的土孔隙中,可

$$V_{kjv} = V_{w} \tag{9}$$

由式(3),(6),(7)和式(8)可得

$$e_{kjv}(V_k + V_j) = w m_s / \rho_w$$

 $\mathbb{P}: e_{kjv}[m_s(1-B)/(d_k\rho_w) + m_sB/(d_j\rho_w)] = w m_s/\rho_w$

整理得

得

$$e_{kjv} = B^{-1} w \, d_k d_j / [(B^{-1} - 1)d_j + d_k] \quad (10)$$
将式(4)代入可得

$$e_{kjv} = w m_s d_k d_j / \{m_j [(m_s/m_j - 1)d_j + d_k]\}$$

经整理得

$$e_{kjv} = m_w d_k d_j / (m_j d_k + m_k d_j) \tag{11}$$

由式(11)可以看出,若 m_w, d_k, d_j, m_k 为常量 时,可溶蚀相质量 m_j的变化将直接影响到土骨架及 孔隙的变化。当 m_j 减少时, e_{ky}将增大。

由上述过程推理可知:当城市地下水化学组分 变异而导致土的可溶蚀相质量变小时,土的孔隙就 会增大。由此,导致土的细观结构发生变异。

2.2 可溶蚀相溶蚀后的潜在变形量

可溶蚀相质量 m, 的变化影响了土体孔隙的变 化, 孔隙变化后土体潜在变形如何? 假设一土样在侧 限条件下受压缩, 则土样压缩以后截面积保持不变。 由于地下水化学环境变异引起固体相发生溶蚀, 则 孔隙体积在原孔隙基础上增加一个增量。假定溶蚀 前后压力 P 保持不变, 如图 2。

图中符号: P — 压应力, H_0 — 溶蚀前土样 稳定高度, V_{s0} — 溶蚀前土样固体相体积, V_{v0} — 溶蚀前孔隙体积, H_1 — 溶蚀后土样潜在稳定高 度, s — 溶蚀后土样潜在变形, V_{s1} — 溶蚀后土样 固体相体积, V_{v1} — 溶蚀后的孔隙体积(与 V_{v0} 相 等); ΔV_{v1} — 溶蚀后土样增加的孔隙体积增量。

由于溶蚀前后土样截面积保持不变及原有孔隙 保持不变,又假设 $V_{v0} = V_{v1} = 1$,所以:

 $H_0/(1 + V_{s0}) = H_1/(1 + V_{s1})$

即

$$H_0/(1 + V_{s0}) = (H_0 - s)/(1 + V_{s1})$$





Fig. 2 The deformation of saturated mass by corrosion

整理得

$$s = (V_{s0} - V_{s1})H_0/(1 + V_{s0}) =$$

$$\Delta V_{v1}H_0/(1 + V_{s0}) = \Delta V_{v1}H_0/V = \varepsilon_v H_0 \quad (12)$$

式中: $\varepsilon_v = \Delta V_{yy}/V$, ε_v 称为体变。

由式(12)可知,当 H_0 ,V为常量,固体相体积 V_{s0} 减少,即孔隙体积 ΔV_{v1} 增大时,潜在变形。将增大。

又由式(12)可计算出土的细观结构变异而产生 的形变增量值。

3 细观结构变异的测定

3.1 常用测定方法

尽管自然环境下的水土作用是缓慢的但引起的 细观结构变异却是存在的,只是变异量大小的问题。 一些常用的测定其变异大小的方法有:

(1) 化学全分析: 对不同时段的土体进行跟踪 测定,得出溶蚀量 m_i,即可由式(11) 得到孔隙比 e_{ky} 的变化。缺点是组份分析困难,周期长,特别是土体 中存在有机质、二氧化硅、三氧化二铝、三氧化二铁 等多种胶结物和多种矿物成分时,各组分的影响很 难分开。且式(1),(2) 中d_i, d_k从一定意义上说并不 是定值。

(2)宏观应力、变形测定法:对埋设在土体中的 应力和变形仪器进行连续观测从而得到变形和应力 变化值。土体微观的变化很难在宏观上反映,况且 周期过长、外部干扰影响大。

常规测定方法很难把土体可溶蚀相微量的长期 变化反映到宏观变形的层面上。为解决这个问题, 作者采用了 CT 测定技术。

3.2 CT 技术测定

(1) CT 技术原理简介

CT 断层摄影(computed tomograph)是电子计 算机断层摄影的简称,是 1967 年英国 EMI 公司的 中央研究所工程师 Goelfley N. Hounsfied 发明并成 功地应用于医学的一项尖端技术,为物体的无损伤 摄影提供了新的手段。它可以显示物体的横断剖面 影像,达到了对物体的三维空间的观察。物体的密度可依靠 CT 值来反映, CT 值是表示物体某部分 X 射线衰减的数据,以 Hu 为单位。物体密度愈高,则 CT 值愈大;密度愈低,则 CT 值愈小。并可对感兴趣区的图像进行测量、分析,同时计算出感兴趣区的面积、CT 值的平均值及 CT 值的标准差。因此 CT 技术与其他检测技术相比,最大的特点是对物体可以无损伤无接触检测,并且可进行动态的连续定 位观测。

对于笔者所研究的问题,也可以转化为密度变 化的问题。若水土作用的结果使单位面积上的易溶 盐被溶蚀转移,则表现在单位面积上的密度值就低; 若产生较强的吸咐沉淀,则相应的密度值就提高。 因此用 CT 技术就可以显示出水化学组分变异对土 体细观结构的"扰动"作用,达到直观而又不扰动地 对土体细观结构实施动态全程监测的目的。

(2) 土体 CT 值变化率与体变的统一性

假设某 CT 扫描断层厚度为 2 mm, 取整个土样 横截面为感兴趣区(面积 A), 则该区域的初始 CT 平 均值为 (X_{cr})_始, CT 值反映了该区域的平均密度的 变化。改变此土样所赋存的化学环境后, 对同一土 样同一断面进行再次扫描, 得到同一感兴趣区域的 终了 CT 值平均值为(Y_{cr})_终, 则该土样 CT 值变化率 为

$$\overline{N}_{\rm CT} = \frac{(\overline{Y}_{\rm CT})_{\sharp \sharp} - (\overline{X}_{\rm CT})_{\sharp \sharp}}{(\overline{X}_{\rm CT})_{\sharp \sharp}} \times 100\%$$
(13)

当 $(\overline{Y}_{cr})_{\$} < (\overline{X}_{cr})_{\$}$ 时, $\overline{N}_{cr} < 0$ 土颗粒发生溶 蚀, 孔隙增加;

 $(\overline{Y}_{cT})_{\#} = (\overline{X}_{cT})_{\#}$ 时, $\overline{N}_{cT} = 0$ 土颗粒与孔隙 处于平衡状态, 未发生变化;

 $(\overline{Y}_{cr})_{\$} > (\overline{X}_{cr})_{\$}$ 时, $\overline{N}_{cr} > 0$ 土颗粒发生沉 淀吸附, 孔隙减少。

由前可知,体变是孔隙的增量与土样初始体积的比值。CT 值变化率是 CT 值增量与初始土样 CT 值的比值。且 CT 值是具有一定厚度的体积内的土样的平均值。故两者物理含义相同:孔隙增量与 CT 值增量等价;初始土体体积与初始土样 CT 值等价。

若对 H。厚度内的土样进行多断面扫描,得到 n 个 CT 值变化率,其平均值为

$$\overline{N} = \frac{N_1 + N_2 + \cdots N_n}{n}$$

则式(12)可变为

$$\epsilon = \epsilon_{\rm v} H_{\rm 0} = k \overline{N}_{\rm cr} H_{\rm 0}$$

式中: H₀—— 原始厚度为 H₀的土样; N_{cr}——CT 值变化率平均值; k—— 系数,用于对部分溶积效应 的颗粒影像重叠、孔隙体积计算误差进行修正。

4 细观结构变异过程模拟及实验验证

4.1 模拟的试验环境

(1)试验溶液模拟南宁市地下水化学场,其主要离子浓度如表1所示。

表1 试验用模拟溶液主要离子浓度

| Table 1 | L | Main | ionic | density | of | simulated | solution | μg | • m1 ⁻ | 1 |
|---------|---|------|-------|---------|----|-----------|----------|----|-------------------|---|
|---------|---|------|-------|---------|----|-----------|----------|----|-------------------|---|

| 离子 | Fe ²⁺ (Fe ³⁺)总量 | Ca ²⁺ | Mn ²⁺ | Mg ²⁺ |
|----|--|------------------|------------------|------------------|
| 浓度 | 0. 121 | 0. 633 | 0.115 | 0. 245 |

(2)试验土样为粉质粘土,取自南宁市某工程 深基坑地下水面附近,土样为保持天然结构的原状 土样。制备成直径为 3.91 cm,高为 8 cm 的三轴试 验用土样,试样用粗滤纸包紧,外束多孔塑料厚板。 浸泡容器采用密封的有机玻璃圆筒。试样安装如图 3 所示。







4.2 试验步骤

(1)试验土样在浸泡前做标记确定多条 CT 扫描断面,标记的目的是为了对同一断面进行连续动态观测。

(2)初始浸泡液为 pH 值=7 的模拟溶液。土样被浸泡 t 时间后,对做标记的断面进行 CT 扫描,确定溶液 pH 值=7 时土样断面的初始 CT 值,作为土样初始状态的背景值。

(3) 然后打开滴定瓶开关, 将浸泡简中的溶液 调到不同的 pH 值, 模拟水环境变异。浸泡到 t 时间 后, 再次对土样做标记的断面进行 CT 扫描, 确定该 溶液状态下土样断面的 CT 值, 然后由式(13)计算 CT 值的变化率。

(4)每次对土样断面进行 CT 扫描后,打开浸泡 简取土进行粒度分析。仪器采用日本产"SA-CP3"粒 度分析仪。土样制备采用超声波定时发散,分散介 质采用甘油和水的混合液是为了增加其粘度、减慢 颗粒沉降,以此确定颗粒的宏观变化。

4.3 试验结果及分析

表 2 为浸泡土样在不同的时间段、不同的 pH 值 水化学环境下的小于 5 µm 颗粒含量、比表面积及 CT 值等的变化值表。图 4 为土样同一断面在不同的 水化学环境下的 CT 扫描照片。

表 2 不同时间段及不同水化学环境下的试验结果

 Table 2
 Test results in different water-chemical condition and time

| 时间/月份 | pH 值 | 比表面积 | CT 值变化 | <5µm 颗粒含量/% |
|-------|------|--------|---------|-------------|
| 1 | 7.0 | 0. 489 | 1 589 | 31.0 |
| 2 | 6.5 | 0.512 | 1 570 | 32.0 |
| 3 | 6.0 | 0.540 | 1 537 | 29.0 |
| 4 | 5.5 | 0.682 | 1 4 3 9 | 45.5 |
| 5 | 5.0 | 0.757 | 1 341 | 48.8 |
| 6 | 4.5 | 0.849 | 1 329 | 42.3 |
| 7 | 4.0 | 0.953 | 1 308 | 49.9 |

图 5~7 分别为不同水化学环境下的土颗粒比表 面积和 CT 值及小于 5 µm 颗粒含量柱状变化图。

由上述成果可发现,当水化学环境发生变化, 即 pH 值从 7 变到 4 时,土体细观结构发生了变化。 具体表现在:随时间增长及随 pH 值的降低(酸性化 增长),CT 值不断降低,土颗粒的比表面积逐渐增 大,小于 5 μ m 的颗粒含量逐渐增多,说明了土样的 可溶蚀相已逐渐发生溶蚀,细颗粒逐渐增多,土孔 隙逐渐增大。应用前述理论推导,可以通过 CT 值变 化,对土体的潜在变形 8 进行定量评价。如:p:I 值 =7 时,CT 值的平均值为 1589,而 pH 值=5 时 CT 值的平均值为 1341,则CT 值的变化率为-16.1%, $N_{\rm cr} < 0$,说明土中可溶蚀相发生了溶蚀。该土样潜 在变形 8(土样原始高 $H_0 = 80$ mm)为

$$s = \varepsilon_{\rm v} H_0 = k \overline{N}_{\rm CT} H_0 =$$

 $-16.1\% \times 80 \times k = -12.9 k$

土样的比表面积增大,细颗粒增多,分散指数 增大,定量地说明了宏观变化(颗粒分散)和细观变 化(CT 值变化率为负值)是相一致的。









(a) pH=7.0, CT 值=1 589

(b) pH=6.5, CT 值=1570

(c) pH=6.0, CT 值=1 537

(d) pH=5.5, CT 值=1 493



(e) pH=5, CT 值=1 341



(f) pH=4.5, CT 值=1 329

(g) pH=4.0, CT 值=1 308

图 4 不同水环境下土样 CT 扫描照片 Fig. 4 CT scanning pictures of test samples in different water condition



 ■ pH值
 ■ 比表面积
 图 5 不同水环境下土颗粒比表面积变化
 Fig. 5 Variety of specific surface area of soil grain in different water condition





Fig. 6 Variety of CT Value in different water condition

构造的模拟实验表明:城市地下水化学环境变 异必将导致土中可溶相介质发生变异,导致土中孔



图 7 不同水环境下小于 5 µm 颗粒含量 Fig. 7 Grain content with the size less than 5 µm in different water condition

隙大小及数目发生变异,从而导致土的细观结构变异。这个试验也为进一步研究不同地下水化学组分与不同土质的细观结构之间的关系给出了一个"工作平台"。

5 结 论

(1)地下水变异引起土体可溶蚀相溶蚀,并引起土体细观结构发生变化。土体的细观变化和颗粒宏观分散可证实这一点。

(2) 用理论公式定量解释水环境变异所引起土体的细观孔隙及潜在变形的变化。

(3) 土体体变率和 CT 值变化率存在统一性,因

此为 CT 技术研究水环境变异下土体的细观研究提 《 供了较好的手段。

(4) CT 技术可以用于预测因地下水环境变异引起的土体结构变异或引起土体污染后土体性质变化的趋势,进而为建筑环境的岩土环境稳定性做出评价和预测。

🕏 考 文 献

James K Mitchell 著. 岩土工程土性分析原理[M]. 南京: 南京工

学院出版社, 1988

- 2 陈仲颐,叶书麟主编.基础工程学[M].北京:中国建筑工业出版社,1990
- 3 吴 恒,张信贵,易念平.城市建设与地质环境的关系及研究要点[J].地质科学,1999,34(1):162~170
- 4 吴 恒,张信贵,韩立华.水化学场变异对土体性质的影响[J]. 广西大学学报,1999,24(2):85~88
- 5 龚 琦,蒋新建,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
- 6 吴紫汪,马 巍. 冻土蠕变过程中体积变化的 CT 分析[J]. 冰川 冻土, 1995, 17(增): 41~46

RESEARCH ON WATER-SOIL INTERACTION AND MESOSTRUCTURE OF SOILMASS

Wu Heng Zhang Xingui Yi Nianping Dai Zhihong (Guangxi University, Nanning 530004 China)

Abstract The soilmass is divided into soluble phase and insoluble phase. The theoretical formulas of soluble phase's change are deduced, which is caused by variation of groundwater. The change of soilmass void caused by soluble phase's change is explained with formulas. The potential deformation of soilmass is predicted. The accuracy of the formulas is proved by the results of simulation testing in lab.

Key words variation of groundwater, soluble phase, the rate of CT value change, potential deformation, simulation test