文章编号:1006-544X(2004)01-0055-04

# 结合水及游离氧化物对粘性土相关物理指标的影响

刘晓红[1,2],饶秋华[1]

(1. 中南大学 土木学院岩土工程系,湖南 长沙 410083;2. 湖南理工学院 土建系,湖南 岳阳 414000)

**摘 要**:从土的三相物质组成及其相互作用的角度,分析了土工试验中常规土工物理指标产生偏差及异常的原因. 粘性土的三相不是相互独立而是相互作用的,固相和液相相互作用形成不同于自由水的结合水,结合水对有关的水理指标产生影响;三相中处于游离状态的胶态氧化物对土液塑性指标产生影响. 试验结果表明,在排除土样扰动和人为因素的情况下,土三相作用形成的结合水及三相组成物质中游离胶态氧化物的干燥不可逆是影响土物理指标的主要原因.

**关键词**:粘性土;土工试验;物理指标;结合水;游离氧化物

**中图分类号**:TU411.2 **文献标识码**:A①

笔者在长期的土工试验工作中,发现一些常规土工物理指标与实际情况有偏差甚至异常,如饱和度 $S_r$ 大于最大理论值100%,塑性指数较大的粘土、红粘土及膨胀土实测含水率较经验估计值偏大,液限及塑性指数偏小,自由膨胀率偏小等. 除了所取土样已扰动和试验过程中的人为误差外,土中的结合水及游离氧化物也会对这些指标的测定产生影响.

## 1 土的三相物质组成及特性

### 1.1 结合水的形成及影响因素

土由固体颗粒、水和气体三相组成,其中水由结晶水、结合水及自由水构成. 实验证明,土粒表面大多带负电荷,在其周围多为负电场,水分子是一种极性分子,极性水分子在负电场内定向排列,水分子定向排列的密度会受到离土粒表面的距离大小的影响,距离越大,密度越小,在一定范围以外,水分子不再受负电荷的影响. 一般把这种受负电荷影响的孔隙水叫结合水,把不受负电场影响的那一部分孔隙水叫自由水,可见结合水是固体颗粒与孔隙水相互作用的结果. 实践证明,土的三相不是简单地组合在一起,而是存在相互作用,这种相互作用主要表现为土粒与孔隙水之间的相互作用、相互渗透,并受周围环境(如温度等)的影响而改变这种相互作用、相互渗透的程度,相互作用的程度主要取决于土的三相物质组成及外界环境的变化.

结合水分为强结合水和弱结合水,其性质不同于普通自由水. 强结合水的密度大于1 g/cm$^3$,一般在1.2~2.4 g/cm$^3$[1],在温度达到105℃及以上时才能蒸发,具有极大的粘滞性、弹性和抗剪强度,特别是强结合水,其力学性质接近固体. 弱结合水的存在,使土具有可塑性. 土中结合水的多少受土粒粒径的影响,因为结合水吸附在土粒表面,同样质量的土,其粒径越小,比表面积就越大,能形成更多的表面结合水;而且粒径越小,土粒形成的孔隙也越小,孔隙水距土粒表面越近,越易形成结合水. 因此,颗粒越细粒径越小的土类,形成的结合水越多,如粒径 < 0.002 mm及0.002~0.005 mm的粘粒和胶粒居多的土就属于能形成较多结合水的土类,而粒径 > 0.005 mm的粉质粘土所含结合水相对较少.

① **收稿日期**:2003-05-09

**基金项目**:中国博士后科学基金资助项目(2002032256)

**作者简介**:刘晓红(1968-),女,硕士研究生,讲师,水文地质与工程地质专业.

### 1.2 游离氧化物及其特性

红粘土含有 10% 的游离 $Fe_2O_3$；膨胀土含有约 3% 的游离 $Fe_2O_3$，约 5% 的游离 $SiO_2$，约 3% 的游离 $Al_2O_3$[2]. 天然含水状态下土中的游离氧化物以含水的胶体形式存在，它不同于一般的固体颗粒，可作为土粒之间的胶结物，胶态的游离氧化物具有高温干燥脱水不可逆的化学特性. 作为胶结物，是以极细的胶粒为骨架的凝胶组成，具有很强的吸附能力，能吸附极性水分子，使其定向排列形成结合水，因而它对土体的液、塑限都有明显的贡献，即这些游离氧化物具有较好的水化能力及较高的液、塑限值. 游离氧化物干燥不可逆是指其在干燥状态下，胶体固化变性，使土的可塑性程度降低，而且复浸水后不能恢复原状. 一方面，自身的塑性大大降低甚至消失，从而降低土的可塑性；另一方面，自身收缩的同时，还使土粒团聚，团聚的土粒不能充分水化，形成的结合水达不到天然状态程度，也使土的塑性降低.

## 2 结合水对相关指标的影响

### 2.1 三相比例指标公式的潜在假设

在所有的《土力学》教材中，粘性土的三相物理性质指标是按土三相间的比例关系来定义的，实质就是各相之间体积或质量的数量比例，即假设土的三相是相互独立的，没有反映三相间相互作用对三相比例指标的影响，即没有考虑到结合水、胶态氧化物及环境对土的物理指标的影响. 也就是说，土的物理指标公式是在如下潜在假设的前提下定义的：假设土孔隙中的液态水全部为自由水，而且假设土孔隙中液态水的密度为 1 g/cm$^3$，即忽略了土孔隙中结合水的存在和孔隙水的平均密度大于 1 g/cm$^3$.

### 2.2 对天然含水率的影响

在土工试验过程中经常会出现一些塑性指数较高、颗粒较细的粘土、红粘土、膨胀土的含水率估计值比实测值小 8% ~15% 左右，而对塑性指数较低的粉质粘土往往能估计得比较准确. 这可从结合水的物理特性来解释其原因，因为天然含水量定义为土中水的质量与固体质量的百分比，用来评价土中含水的多少. 它是一个土工实测指标，实测时采用干燥法，即让土在 105 ~110℃ 下恒温 8 h 得到干土的质量，用干土的质量减去湿土的质量求水的质量，求出的水的质量已经包括了结合水的质量. 粘土特别是红粘土及膨胀土较粉质粘土能吸附更多的结合水，而结合水的密度大于 1 g/cm$^3$，当土中含相同体积的水时，含结合水越多，水的质量越大，天然含水率的值就高，其中包含了由于结合水密度大于 1 g/cm$^3$ 而增加的那一部分.

### 2.3 对土的饱和度及其它有关指标的影响

土的饱和度 $S_r$ 定义为土中水的体积与孔隙体积之比，其取值范围为 $0 \leqslant S_r \leqslant 100\%$. 因孔隙体积不易测定，饱和度是由其它实测指标进行换算的，换算值常常会出现 $S_r > 100\%$ 的现象，表 1 是对常见土类的土工试验中出现的 $S_r > 100\%$ 的情况统计.

表 1 常见土类 $S_r > 100\%$ 的情况统计

Table 1 $S_r > 100\%$ statistics of commonly seen kinds of clayey soil

| 土 类 | 红粘土 | 膨胀土 | 粘土 | 粉质粘土 |
|---|---|---|---|---|
| 统计频数 | 23 | 17 | 36 | 50 |
| 换算饱和度 $S_r$/% | 100.1 ~106.0 | 100.1 ~104.0 | 100.0 ~103.0 | <100.1 |

从表中可以看出，越有利于结合水形成的土类，饱和度超过 100% 的百分点越大，而结合水含量相对较少的粉质粘土饱和度大于 100% 的机率就小，可见 $S_r > 100\%$ 与结合水的含量有关. 其原因在于土中水因类型不同密度不同：自由水的密度小于或等于 1 g/cm$^3$，结合水的密度大于 1 g/cm$^3$. 公式中 $\rho_w$ 应为土中水的实测平均密度，因结合水的存在，该值肯定会大于 1 g/cm$^3$，但因土的结构复杂而不能实测，故计算时均以纯水的密度 1 g/cm$^3$ 代替. 这样，当土中结合水较多时，自由水密度就比实际水的密度小，使饱和度的计算值偏大，粘土特别是红粘土、膨胀土含结合水多且饱和度高，故计算中常出现饱和度大于理论最大值 100% 的情况.

同样的原因，结合水的存在也会影响饱和密度 $\rho_{sat}$ 及饱和重度 $\gamma_{sat}$、孔隙比 $e$ 及孔隙率 $n$ 等指标，当换算公式中含有 $\rho_w$ 项时上述 4 个指标偏小.

### 2.4 对土粒比重的影响

土粒比重 $G_s$ 定义为土粒的密度与水的密度之比值，土粒的密度是土粒的质量除以土粒的体积，土粒的质量用烘干法较易实测，但土粒的体积却

较难以测定，通常是用排水法求土粒的体积，即认为土粒的体积等于其排开水的体积. 而在测定时，将干土放入密度瓶内浸泡并沸煮 1 h 以上，土粒有充分的时间吸附结合水，结合水吸附在土粒的表面，使用排水法测出的土粒的体积大于其实际体积，从而测试结果偏小.

## 3　游离氧化物对相关物理指标的影响

由于游离氧化物具有较强的吸水性、可塑性和干燥不可逆的特性，所以会影响到一些相关的物理指标，如液、塑限指标，自由膨胀率指标等.

### 3.1　对液限、塑限及塑性指数的影响

根据文献［3］，液限、塑限可采用天然含水量试样或风干土样测定. 但由于前期的土样制备（土样的风干和浸润）需要 1 ~ 2 d 时间，时间拉的太长，不能满足工程单位赶工期的要求，所以，土工试验室除采用天然土样、风干土样以外，更多的是采用 105 ~ 110℃下恒温烘干土样，而且浸润时间也不满足 24 h 的要求，往往还不到 12 h，甚至只有几个小时. 通过对比试验发现，采用烘干土样测得的液限 $w_L$、塑限 $w_P$及塑性指数 $I_P$均偏小，且偏小的程度与浸润时间及土类有关，从对比试验的统计情况（表 2）可知：（1）$w_L$，$w_P$及 $I_P$均受土类、浸润时间、制样状态的影响，其中 $w_L$及 $I_P$受影响较大，$w_P$受影响较小.（2）越有利于形成结合水的土类，如红粘土、膨胀土、粘土，所受影响越大，而粉质粘土受影响较小.（3）同一类土液塑性指标随浸润时间（24 h 以内）的延长而增大，故试验制样时，一定要保证浸润时间不少于 24 h.（4）风干状态下各指标随着浸润时间的延长可接近天然状态下的各值；而烘干状态下无论时间怎样延长，也达不到天然状态下的各值.

由此可见，风干脱水对液、塑限没有明显影响（只要浸泡时间足够长），但烘干脱水对液限、塑性指数的影响较为明显，表明烘干脱水过程对液、塑限是不可逆的. 这是因为土中的游离氧化物呈凝胶状态，并相对稳定，即使土体处于风干状态，凝胶团不断失水而缩小，一旦吸水膨胀仍具有凝胶特性，即具有一定的可逆性. 若在 105 ~ 110℃下烘干后，胶结物失去了凝胶特性，使土体的各种与凝胶有关的特性不可逆. 此时胶态的游离氧化物脱水固结增强了团聚体内土粒间的粘结强度，复浸水后在短时间（如 24 h 甚至不到 24h）内胶结物不能恢复到天然状态，即产生了干燥不可逆，使水不能充分与团聚体内的每个土粒产生相互作用，制约了结合水的形成，从而影响土的塑性，使液限及塑性指数明显偏小. 干燥不可逆的程度越大，对上述指标的影响也越大. 资料

**表 2　液限、塑限对比试验统计**

Table 2　Contrast test statistics of liquid limit and plastic limit

| 制样状态 | | 天然状态 | | | 风干状态 | | | 烘干状态 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 样号及频数 | 浸润时间/h | 液限 $w_L$ | 塑限 $w_P$ | 塑性指数 $I_P$ | 液限 $w_L$ | 塑限 $w_P$ | 塑性指数 $I_P$ | 液限 $w_L$ | 塑限 $w_P$ | 塑性指数 $I_P$ |
| 红粘土（13） | 12 | 57.1 | 28.5 | 28.6 | 53.2 | 28.3 | 24.9 | 48.3 | 28.1 | 20.2 |
| | 24 | 57.8 | 28.7 | 29.1 | 53.7 | 28.4 | 25.3 | 48.8 | 28.2 | 20.6 |
| | 48 | 58.0 | 28.7 | 29.3 | 56.5 | 28.8 | 27.7 | 50.5 | 28.3 | 22.2 |
| | 72 | 58.0 | 28.7 | 29.3 | 57.8 | 28.7 | 29.1 | 50.7 | 28.3 | 22.4 |
| 膨胀土（11） | 12 | 50.1 | 26.1 | 24.0 | 49.6 | 26.0 | 23.6 | 46.0 | 25.6 | 20.4 |
| | 24 | 51.4 | 26.8 | 24.6 | 50.0 | 26.2 | 23.8 | 46.3 | 25.7 | 20.6 |
| | 48 | 51.5 | 26.8 | 24.7 | 51.0 | 26.6 | 24.4 | 47.7 | 25.9 | 21.8 |
| | 72 | 51.5 | 26.8 | 24.7 | 51.4 | 26.7 | 24.7 | 48.0 | 26.0 | 22.0 |
| 粘土（21） | 12 | 48.0 | 25.4 | 22.6 | 45.1 | 25.0 | 20.1 | 44.6 | 24.8 | 19.8 |
| | 24 | 48.7 | 25.7 | 23.0 | 46.0 | 25.2 | 20.8 | 45.1 | 25.0 | 20.1 |
| | 48 | 49.0 | 25.9 | 23.1 | 48.4 | 25.5 | 22.9 | 46.0 | 25.1 | 20.9 |
| | 72 | 49.1 | 25.9 | 23.2 | 48.9 | 25.7 | 23.2 | 46.1 | 25.1 | 21.0 |
| 粉质粘土（30） | 12 | 38.5 | 23.0 | 15.5 | 37.6 | 22.9 | 14.7 | 36.0 | 22.9 | 13.1 |
| | 24 | 38.8 | 23.0 | 15.8 | 37.8 | 22.9 | 14.9 | 36.6 | 22.9 | 13.7 |
| | 48 | 39.0 | 23.0 | 16.0 | 38.9 | 23.0 | 15.9 | 37.0 | 23.0 | 14.0 |
| | 72 | 39.0 | 23.0 | 16.0 | 39.0 | 23.0 | 16.0 | 37.1 | 23.0 | 14.1 |

表明[2]，粘土特别是红粘土及膨胀土中游离氧化物的含量较多，其干燥不可逆的程度较大，所以上述各指标的偏差也越大. 此外，干燥后游离氧化物自身塑性的丧失也对土的液限及塑性指数产生一定的影响.

### 3.2 对自由膨胀率的影响

自由膨胀率是评价土粒与水作用后土粒的膨胀量的指标，表达式[3]

$$\delta_{ef} = (V_{we} - V_0) / V_0 \times 100\%.$$

其中：$V_{we}$（ml）是试样在水中膨胀稳定后的体积；$V_0$是试样原体积（10 ml）. 10 ml 土样的制作：风干土碾细后过 0.5 mm 筛，筛下土拌匀，并在 105～110℃温度下烘干，置于干燥箱内至室温，倒入特制量筒中量取 10 ml. 试验中发现，粘土特别是红粘土的自由膨胀率值偏小. 因为实验室用烘干（或风干）土样，土中游离状态的氧化物胶体固化改性，使土粒的团聚更加紧密，在只浸泡 24 h 的情况下，团聚的土粒不能充分分散与水作用产生膨胀，使土的自由膨胀率偏小.

## 4 结 论

（1）土的三相不是简单的组合，而是相互作用，这种相互作用主要表现为固液两相间的相互作用，并通过相互作用形成不同于自由水的结合水. 结合水的存在对相关物理指标产生影响.

（2）三相物质成分中的游离氧化物在天然含水状态下是以含水胶态形式存在，温度升高到一定程度后，其特性干燥不可逆，这种不可逆致使自身塑性丧失的同时，也使土粒团聚程度增大，抑制了每一土粒与水的充分作用，从而影响结合水的充分形成，也降低粘性土的可塑性，使液限和塑性指数明显减小.

（3）由试验资料分析可知，在排除土样扰动和人为因素的情况下，土三相物质成分中的游离胶态氧化物的干燥不可逆及三相作用形成的结合水是影响土物理指标的主要原因.

## 参考文献

[1] 东南大学，浙江大学，湖南大学. 土力学 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2001. 19～23.

[2] 谭罗荣，孔令伟. 某类红粘土的基本特性与微观结构模型 [J]. 岩土工程学报，2001，23（4）：458～462.

[3] GBJ 50123－1999，土工试验方法标准 [S].

# Bound water and free oxide effects on relevant physical index of clayey soil

LIU Xiao-hong[1,2]，RAO Qiu-hua[1]

（1. *Civil Engineering College of Central South University*，*Changsha* 541004，*China*；
2. *Institute of Hunan Science and Technology*，*Yueyang* 414000，*China*）

**Abstract**：Commonly seen index deviation and abnormality in soil test are pointed out after analysis based on the tri-phase acting mutually. Clayey soil tri-phase is not independent each other but acting mutually，the mutual action between solid-phase and liquid-phase forms bound water，which is different from free water and influences soil's physical index involving water. Free oxide also affects liquid-plastic index of clayey soil. The test datum reveal that bound water and free oxide's drying non-reversibility are the main reason for commonly seen indexes deviation or abnormality.

**Key words**：clayey soil；soil test；physical index；bound water；free oxide