

DOI: 10.11779/CJGE202001020

# 不同矿物成分下土样脱附曲线试验研究

朱赞成<sup>1</sup>, 李纪伟<sup>1</sup>, 林法力<sup>1</sup>, 陈 雾<sup>1</sup>, 孙德安<sup>2</sup>, 刘 藤<sup>1</sup>

(1. 台州学院建筑工程学院, 浙江 台州 318000; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200072)

**摘要:** 精确测定土样含水率的数值对于研究高吸力时非饱和土的土水特性尤为重要。目前国内外现有土工规范在测定土样含水率时均设定恒温箱温度为110℃, 鲜少有文献对该温度设定的合理性进行研究。利用同步热分析仪对高庙子膨润土、高岭土、台州滨海软黏土等7种不同类型的黏土进行了微商热重法分析(DTG)和热重分析(T-G), 同时对这7种黏土, 用X射线衍射仪(XRD)测试了其矿物成分。试验结果显示随着土样中含蒙脱石矿物质量百分数的增加, 其失去吸附水的温度越高; 而当土样中不含蒙脱石矿物成分, 土样的失去吸附水的温度比较低。认为对于蒙脱石含量较高的土样, 测定含水率时, 应将烘箱的温度由110℃提高150℃。

**关键词:** 持水性; 含水率; 层间水化

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)01-0175-06

作者简介: 朱赞成(1977—), 男, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土等方面的科研和教学工作。E-mail: zancheng\_77@163.com。

## Experimental research on desorption curves of soil samples under different mineral compositions

ZHU Zan-cheng<sup>1</sup>, LI Ji-wei<sup>1</sup>, LIN Fa-li<sup>1</sup>, CHEN Fen<sup>1</sup>, SUN De-an<sup>2</sup>, LIU Teng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou 318000, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The accurate determination of water content for soils is particularly important for studying the soil-water characteristics of unsaturated soils with high suction range. At present, the oven temperature is set at 110℃ in the standards of soil testing method at home and abroad. Few literatures have studied the rationality of the temperature setting. Here, seven different types of clays, Na and Ca- Gaomiaozi bentonites, Shanghai soft clay, kaolin and Taizhou coastal soft clay, are analyzed by derivative thermogravimetry (DTG) and thermogravimetric analysis (T-G) with synchronous thermal analyzer. At the same time, their mineral compositions are tested by the X-ray diffraction (XRD). The test results show that the higher the mass percentage of montmorillonite minerals in soil samples, the higher the temperature of losing adsorbed water. When there is no montmorillonite mineral composition in soil samples, the temperature of losing adsorbed water is lower. It is considered that the oven temperature should be raised from 110 to 150 ℃ for measuring the water content of soil samples with high montmorillonite content.

**Key words:** soil-water retention behaviour; water content; hydration

## 0 引言

黏土矿物与非黏土矿物的重要区别之一是前者具有高度的亲水性。亲水性是指在矿物表面引力影响下所形成的结合水总量。黏土的许多物理-化学和力学特性, 诸如膨胀、干缩、塑性、压缩、强度特性等都与其亲水性有关。特别是在非饱和状态下, 含水率的轻微变化都会对土样的吸力和强度产生较大的影响。

众多研究者<sup>[1-5]</sup>发现非饱和土在低含水率, 尤其是低于残余含水率下, 含水率每减少1%, 会导致土体

的总吸力增大数十兆帕, 甚至数百兆帕。因此, 精确测量土样的含水率具有重要的意义。

目前国外众多标准<sup>[6-10]</sup>, 在测试土样的含水率和确定黏土的液限塑限时, 均将土样放置于烘箱内, 在105℃~115℃的恒温下烘至恒重, 将此时的土样质量作为绝对干燥下土样的质量, 计算土样的含水率。

藤田龍之等<sup>[11]</sup>研究了3种不同最大粒径土样, 测

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672172); 台州市科技项目(1702gy09); 浙江省自然科学基金项目(LY19E080007)

收稿日期: 2019-03-20

试土样含水率所需的最少土样质量, 及不同加热温度对含水率的影响。而没有分析蒙脱石这种特殊微观分子结构的物理化学性质对膨润土持水性的影响。

本文利用土-水相互作用的机理, 认为在测定黏土的含水率时, 应将烘箱的设置温度由  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  提高到  $150^{\circ}\text{C}$ , 并且在测试蒙脱石含量较高的膨润土含水率时, 土样自取出烘箱后应在 30 s 内测定。先用 X 射线衍射 (XRD) 测定了 7 种土样的矿物成分, 再利用同步热分析仪对 7 种土样进行了微商热重法分析 (DTG) 和热重分析 (T-G) 分析。当土样中蒙脱石、伊利石矿物含量越高, 脱去土样吸附水的温度需越高。为非饱和土测试高吸力条件下的土水特征曲线提供理论依据。

## 1 土-水相互作用机理

黏土的主要成分是黏土矿物, 有的黏土主要含有一种黏土矿物, 其它黏土矿物含量较少, 如膨润土就是以蒙脱石为主要成分的黏土, 其物理化学性质主要取决于蒙脱石的属性和含量。有相当多的黏土则是多种黏土矿物的混合物。黏土中除黏土矿物以外, 还有长石、石英、方解石等非黏土矿物存在。

蒙脱石一般由含铝硅酸盐矿物火山灰在高温环境下经风化作用、热液蚀变等作用生成的。层状硅酸盐  $\text{Al-OH}$  八面体中的三价  $\text{Al}$  元素被 1 价  $\text{Na}$  元素或 2 价  $\text{Ca}$  元素置换, 使得蒙脱石带有多余的负电荷。这些多余负电荷可由晶格中别处的其它离子的置换来补偿, 或用单位晶层底面吸附阳离子来达到平衡, 即该黏土矿物具有阳离子交换性能。在酸性环境长期风化条件下, 蒙脱石会逐渐变成高岭土, 在富钾的碱性介质环境下, 蒙脱石则生成伊利石。

土-水相互作用的机理主要有以下 4 种<sup>[12]</sup>: ① 表面的液态自由水。这种水在稍高于室温的条件下就可全部蒸发掉。② 层间吸附水。处于晶层底面的取向排列的偶极性水和交换性阳离子吸附的阳离子水化膜。这种水一般距蒙脱石矿物表面  $8\sim20\text{ \AA}$  的范围内, 其密度、黏滞度比液态水要大, 特别是强结合水不能流动, 密度大于  $1\text{ g/cm}^3$ , 沸点高于  $100^{\circ}\text{C}$ 。③ 结晶水。主要为碳酸盐类结晶水, 如  $\text{Na}_2(\text{CO}_3) \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ; 硫酸盐类结晶水, 如  $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。由于在不同的矿物的晶格中, 水分子结合的紧密程度不同, 因此结晶水脱离晶格所需的温度也就不同, 但一般不超过  $600^{\circ}\text{C}$ , 通常为  $100^{\circ}\text{C}\sim200^{\circ}\text{C}$ 。④ 结构水。主要为层状硅酸盐矿物的基本构造单位  $\text{Al}-(\text{O}, \text{OH})$  八面体中的  $\text{OH}^-$ , 其脱水温度因构造不同而已一般在  $500^{\circ}\text{C}$  以上脱出较多, 在  $800^{\circ}\text{C}$  左右基本脱净。

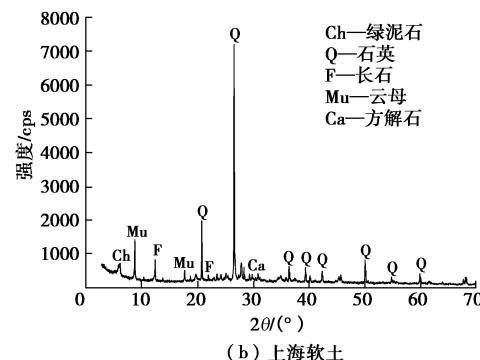
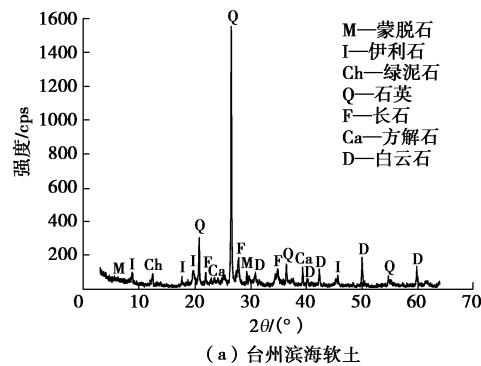
## 2 试验方案

### 2.1 XRD 试验

为了测试土样的矿物成分, 将土样研磨后过  $0.25\text{ mm}$  筛, 放入  $105^{\circ}\text{C}$  烘箱内烘 6 h, 冷却后, 放入室内静置 10 d, 让土样充分与空气中的水汽平衡, 再用 XRD 测试其物相, 扫描角度  $\theta$  为  $3^{\circ}\sim60^{\circ}$ , 扫描速度  $2^{\circ}/\text{min}$ 。

台州滨海软土取自台州市聚集区深度  $0.5\text{ m}$  处, 上海软土取自浦东第 4 层, 高岭土为福建产的商品高岭土。

图 1 为 7 种土样在  $105^{\circ}\text{C}$  下烘 6 h 后的 XRD 图, 从图 1 (a) 中可以看出, 台州滨海软土主要成分为长石 ( $2\theta = 13.92^{\circ}$ , 对应的  $d$  值为  $6.36\text{ \AA}$ ) 和石英 ( $2\theta = 26.62^{\circ}$ , 对应的  $d$  值为  $3.35\text{ \AA}$ ); 图 1 (b) 中可知, 上海软土主要成分为石英和长石; 图 1 (c) 中可看出, 广西红黏土主要含有蒙脱石、伊利石和高岭土 ( $2\theta = 12.4^{\circ}$ , 对应的  $d$  值为  $7.15\text{ \AA}$ ); 图 1 (f) 中可看出, 高庙子钠基膨润土 (GMZ07-Na) 主要成分为蒙脱石 ( $2\theta = 5.91^{\circ}$ , 对应的  $d$  值为  $15.0\text{ \AA}$ ); 图 1 (g) 中可看出, 高庙子钙基膨润土 (GMZ-Ca) 主要成分为蒙脱石 ( $2\theta = 5.7^{\circ}$ , 对应的  $d$  值为  $15.5\text{ \AA}$ )。这 7 种土样的各种矿物成分的含量如表 1 所示。由表 1 可知, 福建高岭土和上海软土主要矿物为石英、长石和云母, 这些矿物不具有膨胀晶体格架; 高庙子钠基膨润土和高庙子钙基膨润土含有大量的蒙脱石矿物, 为高膨胀性土。



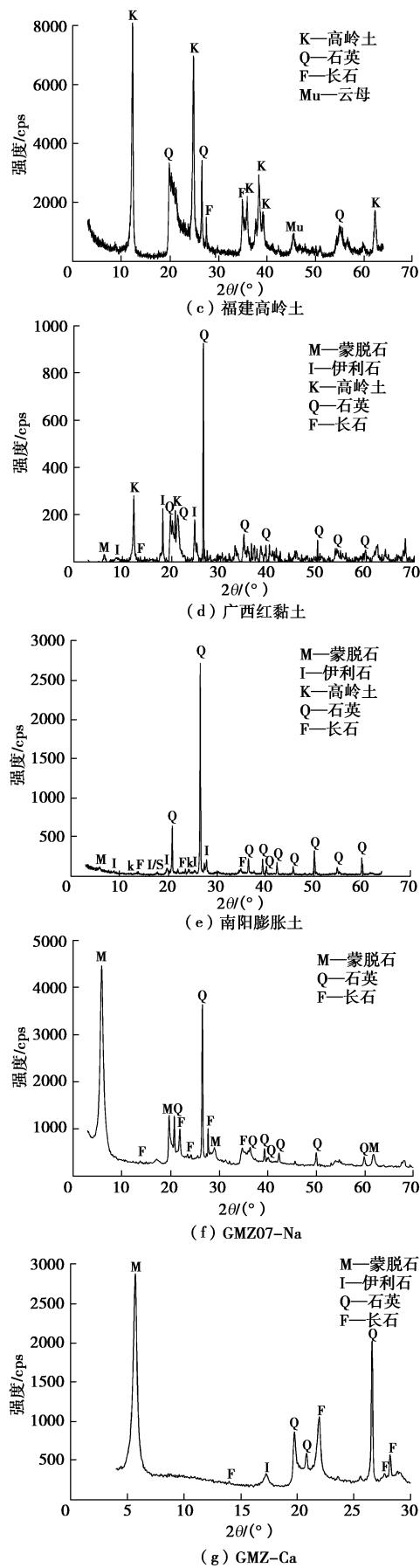


图 1 7 种烘干土样去除背底的 XRD

Fig. 1 X-ray diffraction profiles of background subtracted for 7 samples drying at 105°C

## 2.2 热重分析和微商热重法分析

将上述 7 种土样研磨, 过 0.25 mm 的筛, 再放入恒温干燥箱内, 设置 105°C 烘干 24 h 取出, 立刻将土样装入密封袋内密封, 再利用同步热分析仪进行热重分析 (T-G) 和微商热重法分析 (DTG) 试验。试验测试温度为 20°C~1200°C, 升温速度 20°C/min。

图 2 为 7 种土样的热重分析 (T-G) 和微商热重法分析 (DTG)。因高纯度高岭土矿物的脱水曲线到 400°C 左右都几乎是平的, 表示失去的水很少。它的脱水作用主要在 400°C~600°C 间发生, 失去 OH 结构水, 在微商热重法分析 (DTG) 曲线表现为强烈的、尖锐的吸热峰; 伊利石在 200°C~500°C 逸出结构水; 蒙脱石在 500°C~600°C 使结构水迅速逸出。

从图 2 (a) 可知, 台州滨海软土从 20°C~73°C 失重较快, 在 45°C 时有一个吸热峰, 达到最大失重速率 0.0258%/°C, 在这个区间逸出的是矿物表面的液态自由水; 在 300°C~655°C 又有一个快速的失重段, 在 634°C 时又有一个吸热峰, 达到最大失重速率 0.024%/°C, 在此区间逸出的是绿泥石和蒙脱石的吸附水; 在 821°C 有一个反向的放热谷, 为绿泥石生成橄榄石。

从图 2 (b) 可知, 上海软黏土在 30°C 失重很快, 最大失重速率 0.039%/°C, 主要逸出的是矿物表面的自由水。500°C~635°C, 失重较快, 在 645°C 有一个强烈的、尖锐的吸热峰, 此时最大失重速率为 0.03%/°C, 失去结构水, 矿物结构破坏, 形成新的矿物。

从图 2 (d) 可知, 广西红黏土在 28°C~100°C 失重较快, 在 43.5°C 有一个吸热峰, 此时最大失重速率为 0.0449%/°C, 主要逸出的是矿物表面的自由水和弱结合水。100°C~280°C, 形态平缓且宽, 土样质量几乎不变。280°C~780°C, 失重很快, 在 323°C 有一个小的吸热峰, 其失重速率为 0.0197%/°C, 在 484.4°C 有一个较大吸热峰, 其失重速率为 0.0523%/°C, 323°C 的失重速率与 484.4°C 的失重速率比值为 0.377, 约为三分之一, 失去强结合水膜。在 1012°C 和 1060°C 有 2 个放热峰, 此时失去结构水, 形成新的矿物。

从图 2 (e) 可知, 南阳膨胀土从 26°C~178°C 失重较快, 在 54°C, 121°C 处有 2 个吸热峰, 其失重速率分别为 0.0581%/°C 和 0.0127%/°C, 第二个吸热峰约为第一个吸热峰的五分之一, 主要逸出的是矿物表面的自由水和弱结合水。在 267°C, 431°C 有 2 个吸热峰, 其失重速率分别为 0.0066%/°C 和 0.0124%/°C, 第一个吸热峰约为第二个吸热峰的二分之一, 失去结构水。从图 2 (f) 可知, 高庙子钠基膨润土从 20°C~134°C 失重较快, 在 52°C, 118°C, 200°C 处有 3 个吸热峰, 第二个吸热峰约为第一个吸热峰的四分之一, 主要逸出的

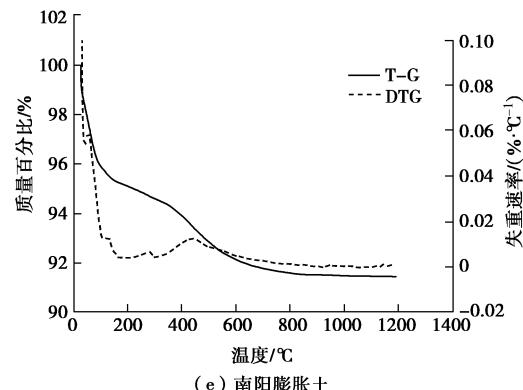
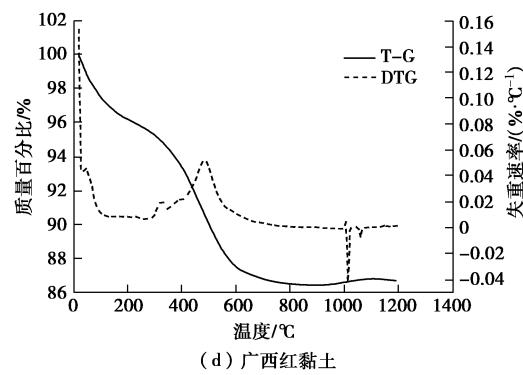
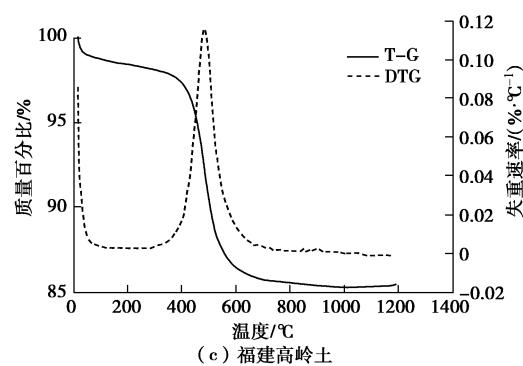
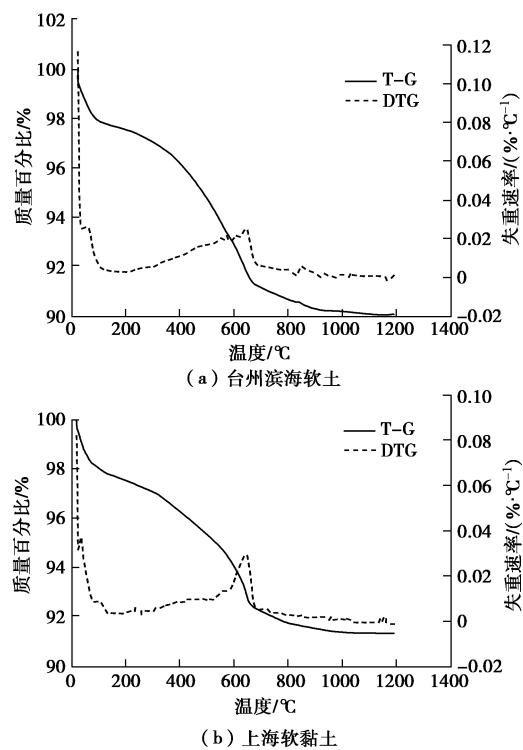
表 1 7 种土样矿物成分和物理参数

Table 1 Physical properties and mineral compositions of seven samples

物化属性	台州滨海软土	上海软土	福建高岭土	广西红黏土	南阳膨胀土	GMZ07-Na <sup>[16]</sup>	GMZ-Ca
液限/%	61.0	44.5 <sup>[13]</sup>	48.1	77.8 <sup>[14]</sup>	38.8 <sup>[15]</sup>	276	99 <sup>[18]</sup>
塑限/%	36.3	22.4 <sup>[13]</sup>	30.7	42.1 <sup>[14]</sup>	17.2 <sup>[15]</sup>	37	41 <sup>[18]</sup>
塑性指数	24.7	22.1 <sup>[13]</sup>	17.4	35.7 <sup>[14]</sup>	21.6 <sup>[15]</sup>	239	58 <sup>[18]</sup>
蒙脱石含量/%	1.0	—	—	4.1	6.7	62	73~82 <sup>[17]</sup>
伊利石含量/%	8.9	—	—	3.2	3.6	—	1.0 <sup>[17]</sup>
高岭石含量/%	—	—	92.2	56.8	4.4	—	—
角闪石含量/%	1.1	0.9	—	—	1.6	—	—
绿泥石含量/%	13.0	17.6	—	—	—	—	—
石英含量/%	46.7	47.8	3.0	23.8	66.9	25	14~20 <sup>[17]</sup>
长石含量/%	23.4	19.8	2.8	4.7	16.8	6	1~6 <sup>[17]</sup>
云母含量/%	—	11.2	2.0	—	—	—	—
赤铁矿含量/%	—	—	—	7.4	—	—	—
方解石含量/%	2.6	1.3	—	—	—	—	—
白云石含量/%	3.3	—	—	—	—	—	—

是矿物表面的自由水和弱结合水。134℃~500℃, 形态平缓且宽。500℃~700℃, 失重很快, 在 637℃有一个强烈的、尖锐的吸热峰, 此时最大失重速率为 0.017%/℃, 失去结构水。

从图 2 (g) 可知, 高庙子钙基膨润土从 20℃~145℃失重较快, 在 68℃, 130℃时有吸热峰, 第二个吸热峰约为第一个吸热峰的三分之一, 主要逸出的是矿物表面的自由水和弱结合水。145℃~500℃, 形态平缓且宽。350℃~635℃, 失重很快, 在 633℃有一个强烈的、尖锐的吸热峰, 此时最大失重速率为 0.016%/℃, 失去结构水。



(b) 上海软黏土

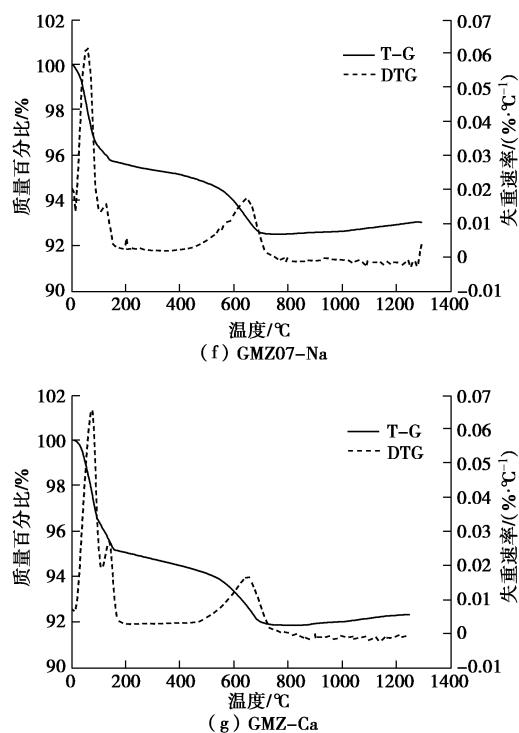


图 2 7 种土样热重和微商热重法分析

Fig. 2 Results of thermogravimetry and derivative thermogravimetry tests on seven clays

按照现行土工试验规范和本文提出测试温度的要求, 计算 105℃, 150℃和 200℃测的干燥土样为绝对干燥土样质量, 分别计算 3 种温度下的含水率, 其结果汇总如表 2 所示。由表可知, 对于不含蒙脱石矿物的上海软土、福建高岭土, 主要水分为矿物表面液态自由水, 所以 105℃, 150℃和 200℃对应的含水率差别不大。

表 2 7 种土样含水率对比

Table 2 Comparison of water content for seven samples (%)

土样	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_2 - w_1$	$w_3 - w_1$
上海软土	2.06	2.32	2.52	0.26	0.46
福建高岭土	1.29	1.43	1.57	0.14	0.28
台州滨海软土	2.16	2.35	2.52	0.19	0.36
广西红黏土	2.72	3.42	3.93	0.70	1.21
南阳膨胀土	4.35	4.89	5.14	0.55	0.79
GMZ07-Na	3.81	4.42	4.59	0.61	0.78
GMZ-Ca	3.85	4.96	5.42	1.10	1.39

注:  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  分别为 105℃, 150℃, 200℃计算得到的含水率。

因台州滨海软土蒙脱石含量只有 1%, 层间结合水化膜极少, 因此 105℃与 150℃, 150℃与 200℃对应的含水率差分别只有 0.19% 和 0.36%, 说明超过 105℃再增加温度对含水率的影响较小。而蒙脱石含量较高的 GMZ07-Na 在 105℃与 150℃, 150℃与 200℃对应含水率差值分别达到了 0.61% 和 0.78%, GMZ-Ca 则分别为 1.10% 和 1.39%, 说明当土样中的蒙脱石含

量较高时, 升高温度对含水率的影响较大。由试验结果可知, 这 7 种土样在 150℃与 200℃下得到的含水率差值比较小, 而在 105℃与 150℃下的含水率差值比较大。钠基膨润土 105℃与 150℃对应含水率差值没有钙基膨润土的大, 主要原因是钠基膨润土每个晶胞所带的净电荷没有钙基的大, 使得钠基膨润土矿物表面与氢键黏结力没有钙基膨润土的大, 只吸附一层水膜, 而钙基膨润土吸附了二层水膜。已有资料证明, 黏土矿物的吸附水量(强结合水)主要取决于交换性阳离子的成分:  $\text{Al}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ , 交换阳离子成分不仅影响吸附水的总量, 而且也影响其能量的状态, 在其它条件相同时二价离子比一价离子对吸附水膜控制得更牢些 (Martin<sup>[19]</sup>, Mitchell<sup>[20]</sup>)。

### 3 结论和建议

本文通过对 7 种土样进行 XRD 分析, 得到这 7 种土样的矿物成分, 并通过热重和微商热重分析, 对 105℃, 150℃和 200℃下的试验数据进行含水率计算分析, 可得到如下结论:

(1) 台州滨海软土、上海软土、高岭土的吸热峰数量较少, 且在 100℃内; 而蒙脱石含量高的高庙子钠基膨润土呈现 3 个吸热峰(第一个吸热峰约 52℃, 第二个吸热峰约 120℃, 第三个吸热峰为 200℃), 高庙子钙基膨润土呈现双吸热峰(第一个吸热峰约 70℃, 第二个吸热峰 130℃)。

(2) 不含蒙脱石矿物成分的土样, 在 105℃, 150℃和 200℃下, 测得的含水率差别不大。而蒙脱石矿物成分含量较高的土样, 在 105℃和 150℃下, 测得的含水率差别比较大, 150℃与 200℃下的含水率差别不大。

(3) 通过 7 种土样试验数据分析, 对于不膨胀性土测试含水率时烘箱温度设置为 110℃±5℃, 而膨胀性土烘箱温度设置为 150℃为宜。

### 参考文献:

- [1] VILLAR M V, LLORET A. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite[J]. Applied Clay Science, 2004, 26(1/2/3/4): 337–350.
- [2] 叶为民, 白云, 金麒, 等. 上海软土土水特征的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 260–263. (YE Wei-min, BAI Yun, JIN Qi, et al. Lab experimental study on soil-water characteristics of Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 260–263. (in Chinese))
- [3] TANG A M, CUI Y J. Effects of mineralogy on

- thermo-hydro-mechanical parameters of MX80 bentonite[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, 2(1): 91 - 96.
- [4] 孙德安, 高游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔隙分布[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(2): 351 - 356. (SUN De-an, GAO You, LIU Wen-jie, et al. Soil-water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(2): 351 - 356. (in Chinese))
- [5] 朱赞成, 孙德安, 王小岗, 等. 基于膨润土微观结构确定土水特征曲线的残余含水率[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(7): 1211 - 1217. (ZHU Zan-cheng, SUN De-an, WANG Xiao-gang, et al. Determination of residual water content in SWCC based on microscopic structure of bentonite[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(7): 1211 - 1217. (in Chinese))
- [6] Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass: ASTM D2216 -10[S]. ASTM International West Conshohocken.
- [7] Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils: ASTM D4318-17[S]. ASTM International West Conshohocken.
- [8] 土の含水比試験方法: JIS A1203—2009[S]. (JIS A1203—2009 Test Method for Water Content of Soils: JIS A1203—2009[S]. (in Japanese))
- [9] 土工试验规程: SL237—1999 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (Standard of Soil Test Method: SL237—1999[S]. Beijing: China Water and Power Press, 1999. (in Chinese))
- [10] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. (Standard of Soil Test Method: GB/T 50123 — 1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [11] 藤田龍之, 古河幸雄. 含水比測定に用いる試料の最小質量の目安に関する検討[C]// 第33回地盤工学研究発表会発表講演集, 1998: 377 - 378. (FUJITA T, FURUKAWA Y. A study on the minimum mass of the sample used for the determination of water content[C]// The 33rd Geotechnical Research Presentation Presentation Lecture Collection, 1998: 377 - 378. (in Japanese))
- [12] 王鸿禧. 膨润土[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 4 - 9. (WANG Hong-xi. Bentonite[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 4 - 9. (in Chinese))
- [13] 孙德安, 陈波, 周科. 重塑上海软土的压缩和剪切变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1389 - 1394. (SUN De-an, CHEN Bo, ZHOU Ke. Experimental study of compression and shear deformation characteristics of remolded Shanghai soft clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1389 - 1394. (in Chinese))
- [14] 孙德安, 刘文捷, 吕海波. 桂林红黏土的土-水特征曲线[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3345 - 3351. (SUN De-an, LIU Wen-jie, LÜ Hai-bo. Soil-water characteristic curve of Guilin lateritic clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3345 - 3351. (in Chinese))
- [15] 张俊然, 孙德安, 姜彤. 吸力历史对非饱和弱膨胀土力学性质的影响[J]. *岩土力学*, 2015, 36(11): 3094 - 3100, 3120. (ZHANG Jun-ran, SUN De-an, JIANG Tong. Effect of suction history on mechanical behavior of unsaturated weakly-expansive soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(11): 3094 - 3100, 3120. (in Chinese))
- [16] 陈永贵, 李全, 贾灵艳, 等. 钠钾盐梯度循环作用下高压实膨润土膨胀力衰变特性[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(5): 872 - 879. (CHEN Yong-gui, LI Quan, JIA Ling-yan, et al. Decay characteristics of swelling pressure of compacted bentonite under salinity gradient cycling[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(5): 872 - 879. (in Chinese))
- [17] 刘月妙, 温志坚. 用于高放射性废物深地质处置的黏土材料研究[J]. *矿物岩石*, 2003, 23(4): 42 - 45. (LIU Yue-miao, WEN Zhi-jian. Study on clay-based materials for the repository of high level radioactive waste[J]. *Journal Mineral Petrol*, 2003, 23(4): 42 - 45. (in Chinese))
- [18] 方雷, 孙德安, 孙文静. 高庙子钙基膨润土的膨胀特性[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2013, 19(5): 508 - 512. (FANG Lei, SUN De-an, SUN Wen-jing. Swelling characteristics of Gaomiaozi ca-bentonite[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2013, 19(5): 508 - 512. (in Chinese))
- [19] MARTIN R T. Adsorbed water on clay: a review[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1962, 9(1): 28 - 70.
- [20] MITCHELL J K, SOGA K. *Fundamentals of Soil Behavior*[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005.