

文章编号:1006-2467(2013)09-1363-04

# 羟基铝及其聚合物对蒙脱土力学特性影响的试验研究

孙世永, 姚海林, 董启朋, 段建新

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘要:**提出了一种原位处理膨胀土的新方法,利用羟基铝与蒙脱土发生反应而制成不同的改性试样,将改性后的蒙脱土在特定条件下养护一定的时间,通过X射线衍射分析、强度及膨胀性试验等手段探讨了羟基铝及其聚合物对蒙脱土力学性质的影响.结果表明:羟基铝与蒙脱土通过离子交换、包被、胶结成键等物理化学反应改变了土体的亲水性和强度特性;经羟基铝改性后,显著提高了蒙脱土的物理特性和强度指标,改善了其膨胀性,达到了非膨胀土的性能要求.

**关键词:**蒙脱土;羟基铝及其聚合物;改性

**中图分类号:**TU 443 **文献标志码:**A

## Experimental Study of Influence of Hydroxy-aluminum/Polyaluminum on Mechanical Characteristics of Montmorillonite

SUN Shi-yong, YAO Hai-lin, DONG Qi-peng, DUAN Jian-xin

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The hydroxy-aluminum/polyaluminum modified clay and the clay only samples were examined by X-ray diffraction (XRD), unconsolidated undrained (UU) triaxial strength test, unconfined compressive strength testing techniques, swelling potential tests and so on. The results indicated that the hydrophilic nature and swelling-shrinkage property were changed drastically, that the free swelling ratio ( $F_s$ ) could be reduced sharply, and that the particle size gradation, strength characteristics of the modified montmorillonite clay were improved greatly. The clay content decreased dramatically, while the silt content increased. This study suggests that the hydroxy-aluminum/polyaluminum can influence the mechanical and physical properties of montmorillonite clay by physicochemical interaction.

**Key words:** montmorillonite; hydroxy-aluminum/polyaluminum; modification

膨胀土是自然地质过程中形成的一种多裂隙并具有显著胀缩性的特殊黏性土,其黏粒成分主要由亲水矿物蒙脱石及其混层黏土矿物组成,对建筑物

可产生变形破坏作用并具有长期潜在危险,使膨胀土地区的建筑物、铁路、公路、机场、水利工程等遭受严重的破坏。

收稿日期:2012-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51279198)资助

作者简介:孙世永(1980-),男,山东省临邑县人,博士生,主要从事特殊土路基变形与强度特性研究。

姚海林(联系人),男,研究员,博士生导师,电话(Tel.):027-87198350;E-mail:hlyao@whrsm.ac.cn.

经过大量工程实践,通过添加石灰、水泥等<sup>[1]</sup>添加剂已使膨胀土的路基填筑取得了令人满意的效果.然而,路基填土是扰动土,采用这种方式可以控制其填筑质量,但对于地基和边坡等原位膨胀土而言,添加石灰等添加剂的方式在工程上很难实施,而且上述改良剂中的钙等矿物成分与土壤中的硫(通常为石膏)将生成钙矾石、硅灰石膏等,使得路基产生后期鼓胀而导致路基破坏<sup>[2]</sup>. Bryhn 等<sup>[3]</sup>在试验室研究了铝(氢)氧化物  $\text{Al}(\text{OH})_{2.5}\text{Cl}_{0.5}$  对灵敏性黏土的处理效果,发现其可使土体无侧限抗压强度由 20 kPa 增加到 500~600 kPa;同时,在试验室和原位条件下对比了含添加剂的铝(氢)氧化物与消石灰对灵敏性黏土的处理效果,发现铝(氢)氧化物的处理效果优于消石灰<sup>[4]</sup>;Matsuo 等<sup>[5]</sup>研究了聚合氯化铝(PAC)在以氧化铁粉为添加剂的情况下对非常软的海积黏土的处理情况,并得到了较为理想的效果.

当羟基铝沉淀在蒙脱石或蛭石的层间时,可导致过渡性层状矿物的生成,即从膨胀性矿物向非膨胀性矿物(如绿泥石)的过渡,或由 2:1 型过渡至 2:2 型层状硅铝酸盐<sup>[6]</sup>. 铝(氢)氧化物与黏土矿物的交互作用对土壤的水土保持、污染防治、岩土力学性能等十分重要,当黏土矿物表面被铝(氢)氧化物胶结后,土壤的结构及吸附和力学性能都出现了明显的变化<sup>[7]</sup>. 根据土壤中铝(氢)氧化物的存在形式及其与土颗粒的作用形式和作用效果,结合铝(氢)氧化物自身的物理化学性质,将其作为一种膨胀土的改良剂来处理膨胀土,对于治理膨胀土工程、从根本上解决膨胀土危害具有重要的意义.

本文研究了羟基铝及其聚合物对膨胀土力学特性的影响,探讨了铝(氢)氧化物处理膨胀土的可行性,在试验室从宏观力学特性入手研究了羟基铝与蒙脱土的胶结作用.

## 1 试验材料

### 1.1 蒙脱土

所用蒙脱土(MT)为浅灰色至灰色粉末,表面容积密度为 370 g/L,所含游离态水分小于 3%,微孔体积范围:0~80 nm 为 0.36 mL/L;0~24 nm 为 0.30 mL/L;0~14 nm 为 0.26 mL/L. 其主要化学组成(质量分数计):73.00%  $\text{SiO}_2$ , 14.00%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2.70%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 0.20%  $\text{CaO}$ , 1.10%  $\text{MgO}$ , 0.69%  $\text{Na}_2\text{O}$ , 1.90%  $\text{K}_2\text{O}$ .

### 1.2 试样制备

羟基铝和蒙脱土胶结试样的制备方法详见文献[8]. 取一定量 1 mol/L 的  $\text{AlCl}_3$  溶液,加热至

80 °C;然后,向溶液中加入一定量的蒙脱土,使得反应体系中铝离子的摩尔数与蒙脱土的质量比满足 0.8 mmol/g,添加过程不停地用力搅拌,搅拌速度为 300 r/min;待一定时间后,缓慢滴入 0.6 mol/L 的 NaOH 溶液,使其碱化度  $B$  值达到 1.0、1.5、2.0、2.5 为止( $B$  为  $\text{OH}^-$  与  $\text{Al}^{3+}$  的摩尔比,由此配制的不同改性试样分别命名为  $\text{MMT}_x$ ,  $x=1.0\sim 2.5$ ),并充分搅拌;分别将溶液在常温下养护至指定时间 5 d 后,离心分离,用蒸馏水洗涤产物 6~10 次,至蒙脱石表面无残留  $\text{Cl}^-$  (采用 0.1 mol/L 的  $\text{AgNO}_3$  溶液检验),从而制成改性后的蒙脱土. 为了进行对比分析,亦对改性前的蒙脱土(MT)进行一系列试验.

## 2 改性试验与结果

### 2.1 X 射线衍射图谱

改性前后试样的 X 射线衍射(XRD)图谱如图 1 所示. 可见:改性前,其特征谱线中的强衍射峰为蒙脱石,试样中的黏土矿物还包括伊利石,非黏土矿物主要为石英、白云石和方解石等;改性后,蒙脱石( $\text{MMT}_{1.0}$ 、 $\text{MMT}_{2.0}$  和  $\text{MMT}_{2.5}$ )的层间距( $d_{001}$ )由 1.500 nm 分别变为 1.558、1.606 和 1.527 nm,表明羟基铝与蒙脱石反应后进入了其层间,并置换出所吸附的层间水,使其所吸附的层间水减少,改变了其亲水性,降低了其对水的吸附性,从而影响了蒙脱土的胀缩特性.

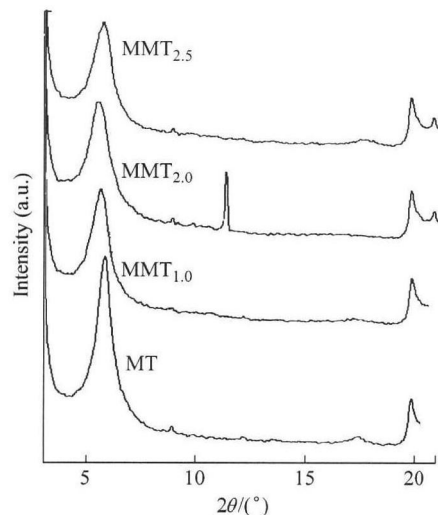


图1 改性前后试样的 XRD 图谱

Fig. 1 X-ray patterns of MT and MMT specimens

### 2.2 土体物理性能指标

改性前后蒙脱土试样的基本物理性能指标见表 1. 其中,  $G_s$  为蒙脱土的比重,  $w_l$ 、 $w_p$  分别为蒙脱土的液限和塑限,  $I_p$  为塑性指数,  $F_s$  为自由膨胀率.

表1 改性前后蒙脱土的物理性能指标

Tab. 1 Physical and mechanical indexes of montmorillonite before and after modification

| 土样                 | $G_s$ | $w_l/\%$ | $w_p/\%$ | $I_p/\%$ | $F_s/\%$ |
|--------------------|-------|----------|----------|----------|----------|
| MT                 | 2.55  | 139.4    | 32.5     | 106.9    | 125.0    |
| MMT <sub>1.0</sub> | 2.58  | 92.1     | 57.8     | 34.3     | 41.0     |
| MMT <sub>1.5</sub> | 2.60  | 88.0     | 55.0     | 33.0     | 27.0     |
| MMT <sub>2.0</sub> | 2.61  | 86.2     | 54.7     | 31.5     | 24.0     |
| MMT <sub>2.5</sub> | 2.61  | 96.3     | 62.4     | 33.9     | 38.0     |

可见,改性前,蒙脱土(MT)的液限和塑性指数较大,分别为139.4%和106.9%, $F_s=125\%$ 。根据公路路基设计规范(JTG D30—2004)规定的膨胀土判别标准,可判定其为强膨胀土,表明蒙脱土的分散性较强,颗粒较细,比表面积较大,黏粒或亲水矿物含量较高,具有较强的吸附水能力和较大的膨胀势。

由表1还可见,在不同碱化度条件下,改性后的蒙脱土的可塑性发生了明显变化,其液限的降幅较大,塑限明显增加,塑性显著降低,表明蒙脱土中的黏粒含量减少、土颗粒的亲水性显著减弱,而且改性后的蒙脱土的自由膨胀率接近或低于40%,已不具备膨胀土的基本特征,达到了非膨胀土的要求(符合公路工程规范)。另外,改性后蒙脱土的比重也有所增大。

### 2.3 颗粒级配的变化情况

由表2的颗粒分析结果可知,改性后蒙脱土中的粉粒含量增加。其中,粒径 $<2\mu\text{m}$ 的黏粒、胶粒含量明显减少(从48.1%分别降至1.3%、4.6%、6.8%、9.4%),而粒径处于 $5\sim 74\mu\text{m}$ 的粉粒含量增加(从40.5%分别增至97.5%、94.1%、84.8%、83.0%),表明土体的颗粒粒径增大、比表面积减少,土颗粒的分散程度降低,土颗粒相互聚集而形成较为紧密的结构,由此证明羟基铝及其聚合物对土颗粒具有“团聚”作用,其可改变蒙脱土颗粒粒径的大小。经改性后,土颗粒与水分的接触面积减少,蒙脱

表2 改性前后蒙脱土颗粒级配的变化情况

Tab. 2 Changes of grain-size distribution of soils before and after modification

| 土样                 | 粉粒质量分数/%                 |                         |                    |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|
|                    | 粒径 $5\sim 74\mu\text{m}$ | 粒径 $2\sim 5\mu\text{m}$ | 粒径 $<2\mu\text{m}$ |
| MT                 | 40.5                     | 11.4                    | 48.1               |
| MMT <sub>1.0</sub> | 97.5                     | 1.2                     | 1.3                |
| MMT <sub>1.5</sub> | 94.1                     | 1.3                     | 4.6                |
| MMT <sub>2.0</sub> | 84.8                     | 8.4                     | 6.8                |
| MMT <sub>2.5</sub> | 83.0                     | 7.6                     | 9.4                |

土呈粉土化,其分散性和亲水性均降低。

### 2.4 膨胀特性

在无荷载与荷载50 kPa下进行膨胀率及膨胀力的测量试验,采用直径61.8 mm、高度20 mm的环刀试样,在杠杆式固结仪上完成,其结果见表3。其中, $w$ 为含水量, $\rho_d$ 为干密度, $p_e$ 为膨胀力。可以看出,在相同(由于制样误差与制样控制指标的差异较小)干密度和含水量的条件下,经羟基铝改性后,蒙脱土的无荷载膨胀率( $\delta_e$ )、荷载50 kPa下的膨胀率( $\delta_{e50}$ )及膨胀力( $p_e$ )均显著降低,即羟基铝能够大幅降低蒙脱土的膨胀性,使其工程性质得到改善。

表3 膨胀特性的变化情况

Tab. 3 Changes of expansive properties of soil

| 土样                 | $w/\%$ | $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\delta_e/\%$ | $\delta_{e50}/\%$ | $p_e/\text{kPa}$ |
|--------------------|--------|--|---------------|-------------------|------------------|
| MT                 | 39.8   | 1.29                                   | 13.32         | 3.89              | 136.60           |
| MMT <sub>1.0</sub> | 40.2   | 1.30                                   | 7.73          | 1.05              | 61.08            |
| MMT <sub>1.5</sub> | 40.3   | 1.29                                   | 7.21          | -0.25             | 35.80            |
| MMT <sub>2.0</sub> | 39.5   | 1.30                                   | 1.40          | -0.15             | 35.08            |
| MMT <sub>2.5</sub> | 39.7   | 1.30                                   | 1.55          | -0.10             | 36.20            |

### 2.5 羟基铝对蒙脱土强度的影响

为探讨羟基铝的碱化度对改性后蒙脱土强度的影响,将改性前后的蒙脱土制成相同含水量及干密度的试样,分别进行无侧限抗压强度( $q_u$ )及三轴不固结不排水(UU)剪切试验(围压分别为100、200、300、400 kPa),其结果见表4。

表4 改性前后蒙脱土的抗剪强度指标对比

Tab. 4 Comparison of mechanical properties of montmorillonite before and after modification

| 土样                 | $w/\%$ | $q_u/\text{MPa}$ | $c/\text{kPa}$ | $\varphi/(\text{°})$ |
|--------------------|--------|------------------|----------------|----------------------|
| MT                 | 39.8   | 0.41             | 181.96         | 5.81                 |
| MMT <sub>1.0</sub> | 40.1   | 0.71             | 142.32         | 16.90                |
| MMT <sub>1.5</sub> | 40.3   | 0.98             | 143.97         | 19.85                |
| MMT <sub>2.0</sub> | 39.5   | 1.16             | 306.40         | 14.74                |

由表4可见,羟基铝对蒙脱土的各项强度指标影响较大。其中,当碱化度 $B=1.0, 1.5$ 时,与改性前相比,蒙脱土的内摩擦角( $\varphi$ )增大了3.0~3.5倍,而黏聚力( $c$ )则稍有减小,这是由于 $B=1.0, 1.5$ 时的粉粒含量增加显著,土体呈现出粉土化的缘故<sup>[9]</sup>。随着碱化度增加,改性后蒙脱土的黏聚力和内摩擦角均出现显著增加。

由表4还可以看出,经羟基铝改性后,蒙脱土的无侧限抗压强度均有所增加,且随着碱化度增加而

增大.由图2可见:改性后的蒙脱土出现了应变硬化的趋势,呈现出脆性破坏;而改性前的试样为塑性破坏,无明显的破坏点.图3所示为无侧限抗压强度试验的试样破坏形态.可见:改性前,蒙脱土呈现出明显的鼓胀破坏特征,且试样顶部发生了凹陷,没有明显的剪切面,为典型的塑性破坏;而改性后的试样则呈现出脆性破坏特征,且随着碱化度增加,脆性破坏的趋势越来越明显.

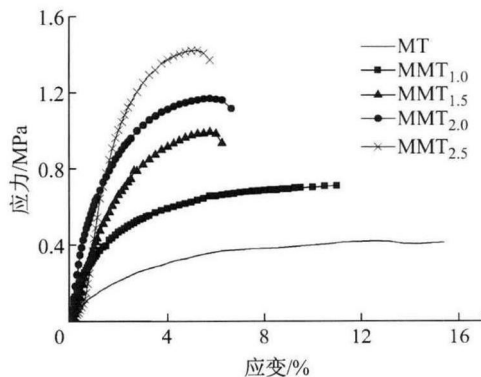


图2 轴向应力与轴向应变的关系

Fig. 2 Relationship between axial stress and axial strain

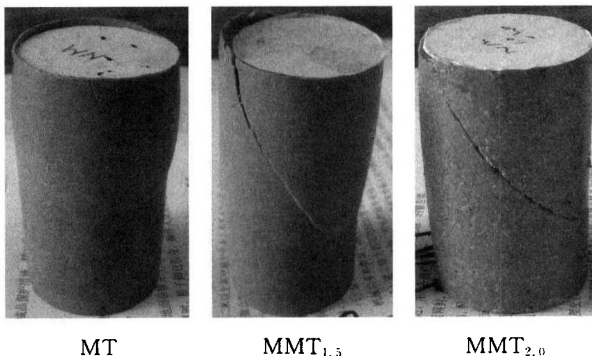


图3 无侧限抗压强度试验的试样破坏形态

Fig. 3 Damage to specimens in unconfined compressive strength experiments

### 3 结论

(1) 经羟基铝改性后,蒙脱土的层间距有所增加,表明羟基铝与蒙脱土反应后进入其层间并置换出层间水,从而改变了其亲水性,降低了其吸附水的能力,影响了蒙脱土的胀缩特性.

(2) 改性后的蒙脱土比重增大、液限降低、塑限增加、塑性指数显著降低,表明改性后的蒙脱土中黏粒含量减少,土颗粒的亲水性变差.

(3) 羟基铝能够对黏土颗粒起到“团聚”作用,使蒙脱土中的粉粒含量增加,黏(胶)粒含量明显减

少,经羟基铝改性后土颗粒与水分的接触面积减少,并使蒙脱土呈粉土化.

(4) 经羟基铝改性后,蒙脱土的剪切强度有所增加,无侧限抗压强度增大,并使蒙脱土呈现出应变硬化的趋势和脆性破坏特征.

(5) 经羟基铝改性后,蒙脱土的自由膨胀率接近或低于40%,达到非膨胀土的性能要求,且使其有、无荷载下的膨胀率均大幅降低.

### 参考文献:

- [1] Nalbantoglu Z, Gucbilmez E. Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid environments [J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, 47 (4): 453-463.
- [2] Petry T M. Studies of factors causing and influencing localized heave of lime treated clay soils (sulphate induced heave) [M]. Vicksburg: Contract Report US Army Engineers, 1994.
- [3] Bryhn O R, Loken T, Reed M G. Stabilization of sensitive clays (quick clays) using  $Al(OH)_{2.5}Cl_{0.5}$  [J]. *Norwegian Geotechnical Institute*, 1984, 16 (5): 130-135.
- [4] Bryhn O R, Loeken T, Aas G. Stabilization of sensitive clays with hydroxy-aluminium compared with unslaked lime [M]. USA: Norges Geotekniske Inst, 1984.
- [5] Matsuo S, Kamon M. Soil stabilization by multivalent cations [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm: Transportation Research Board, 1981: 735-738.
- [6] 高国瑞. 近代土质学[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990: 76-78.
- [7] Yang Zhong-lian, Gao Bao-yu, Cao Bai-chuan. Effect of  $OH^-/Al^{3+}$  ratio on the coagulation behavior and residual aluminum speciation of polyaluminum chloride (PAC) in surface water treatment [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 80 (1): 59-66.
- [8] Hu Cheng-zhi, Liu Hui-juan, Chen Gui-xia, et al. Effect of aluminum speciation on arsenic removal during coagulation process [J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 86: 35-40.
- [9] Abdullah W S, Al-Abadi A M. Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil [J]. *Applied Clay Science*, 2010, 47 (3): 43-350.