

DOI: 10.11779/CJGE201408005

# 黏土触变过程中强度恢复的微观机理

张先伟<sup>1, 2</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 李峻<sup>1</sup>, 杨爱武<sup>2, 3</sup>

(1. 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, 湖北 武汉 430071;

2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300381; 3. 天津城建大学土木工程系, 天津 300381)

**摘要:** 触变性是复杂的流变特性之一, 它是指外力扰动导致土体强度衰减, 静止后随时间增长逐渐强度恢复的现象。为了探寻黏土触变过程中强度恢复机理, 开展了在长达 500 d 的龄期内, 观测湛江黏土扰动后不同静置龄期下的无侧限抗压强度与贯入阻力, 分析触变强度的恢复时间与过程, 利用触变强度比率评价湛江粘土的触变性。利用扫描电镜与压汞试验, 分析不同静置龄期下的结构演变规律。结果表明, 湛江粘土具有明显的触变性, 扰动后静置 500 d 后土体持有强度是其扰动后的 2.58 倍, 但触变恢复强度仅占扰动损失强度的 21.2%~23.5%。对于高灵敏性、强结构性的地基土, 因施工扰动带来的强度损失引发的工程灾害不容忽视。黏土触变过程中的强度恢复主要是颗粒间引力与斥力的相互作用的力场变化使结构有分散趋向絮凝发展所导致, 这一过程中结构产生自适应调整, 孔隙分布均匀化发展, 微观结构向亚稳定结构转变, 在一定时期内表现出触变现象。

**关键词:** 黏土; 触变; 强度; 微观结构; 机理

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)08-1407-07

**作者简介:** 张先伟(1982-), 男, 黑龙江龙江人, 博士, 助理研究员, 从事岩土工程科研方面的研究。E-mail: xwzhang@whrsm.ac.cn.

## Microscopic mechanism of strength increase of clay during thixotropic process

ZHANG Xian-wei<sup>1, 2</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, YANG Ai-wu<sup>2, 3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of

Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300381,

China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300381, China)

**Abstract:** The thixotropy is one of rheological properties, and it is the phenomenon that the strength decreases owing to external force and then gradually increases with time after stopping disturbance. In order to explore the microscopic mechanism of strength increase of clay during thixotropic process, the unconfined compressive strength and penetration resistance of Zhanjiang clay after disturbance of 500 d are tested, the thixotropic strength evolution process is analyzed, and the thixotropic rules are determined according to the thixotropic strength ratio. Furthermore, microstructural change at different standing time is studied using the scanning electron microscope and mercury injection experiment. The results show that the thixotropic characteristics of Zhanjiang clay are significant, and the strength after 500 d is 2.58 times that after the disturbance, but the thixotropic increase strength only accounts for 21.2%~23.5% of the disturbance strength loss. Therefore, for the soils with high sensitivity and strong structure engineering disasters can not be ignored because of strength loss caused by construction disturbance. The thixotropic strength recovery is the result of the structural evolution from dispersion to flocculation through attraction and repulsion between particles owing to change of force field. In this process, the microstructure is self-adapted and pore distribution uniformly develops, and in a certain period of time the thixotropic phenomenon occurs.

**Key words:** clay; thixotropic; strength; microstructure; mechanism

## 0 引 言

“触变(thixotropy)”一词最先是由Peterfi在1927提出<sup>[1]</sup>。Mitchell<sup>[2]</sup>将触变定义为土的成分、体积不变的情况下所发生的随时间而定的等温、可逆的过程, 在此过程中, 重塑使土软化或液化; 静置使土逐渐硬

化。一般而言, 岩土工程学科中, 触变性可认为土在

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102200); 国家自然科学基金项目(51179186); 天津市软土特性与工程环境重点实验室开放课题(2012SCEEKL006)

收稿日期: 2013-12-10

外力的作用下,土的结构强度剧烈降低,甚至发生流动,外力停止后随着时间的增长而逐渐恢复结构和强度的现象。Boswell<sup>[3]</sup>曾对大量沉积堆积物进行触变性调查发现,除干净的砂外,其他材料都呈现出触变特性。Kruyt<sup>[4]</sup>进一步指出,对于大多数黏土—水体系而言,触变性是普遍存在的。

研究触变性对深入了解土的力学机制,解决工程地基的稳定性和防止地质灾害等有着重要的指导意义。一些研究者从不同方面对此展开研究,Skempton等<sup>[5]</sup>的研究表明,触硬化是造成低至中等灵敏性的主要原因,也是过敏性黏土具有灵敏性的部分原因<sup>[5]</sup>。Mitchell指出,相对于化学因素,土的含水量对于改变粒间力进而影响土的触变具有重要影响作用<sup>[2]</sup>。研究手段方面,Díaz-Rodríguez等<sup>[6]</sup>、冯秀丽等<sup>[7]</sup>、李丽华等<sup>[8]</sup>分别利用电导率法、旁侧声纳、微型十字板剪切仪对墨西哥土、黄河三角洲粉土和翠湖湿地软土的触变性进行研究,这些研究结果表明触变性的影响对扰动土能导致重塑后强度增加达到100%甚至更多。一些研究者也建立了相关的触变预测模型<sup>[9]</sup>。在工程应用方面,很多研究表明打桩时软土触变性影响严重,如比较调查静载打桩数据表明,一般打桩后桩承载力的增加在2.5~3个月内完成,这段时间内桩的承载力比打桩7d增加1.7倍多<sup>[10-11]</sup>。徐永福针对某高速公路软基处理中的湿喷桩下沉现象开展桩施工扰动作用下的饱和粉土触变性研究,结果表明湿喷桩施工扰动引起饱和粉土产生触变,表现为湿喷桩施工初期,桩间粉土的强度降低;随着施工后静置时间增加,粉土强度增加,甚至超过粉土的初始强度<sup>[12]</sup>。

上述工作推动了土的触变性研究进展,但以往研究仍存在几点不足。首先,触变是一种长期缓慢的过程,利用数周至数月的时间内得到的触变强度恢复的试验数据是否可以真实反映土的触变性值得商榷。另外,目前尚未建立一种可以准确反映土的触变强度恢复指标供以指导工程实践。更重要的是,虽然一些学者从微观结构<sup>[13]</sup>、粒间力的平衡状态调整<sup>[2]</sup>、土粒间的相互作用在水溶液中调整过程<sup>[12]</sup>等方面对触变机理进行论述,但土的触变现象的机理认识至今仍停留在不完整的定性说明阶段,缺乏可靠的试验数据支持,难以从根源上解释土的触变发生与发展的本质。

鉴于以上研究现状,本文开展了在长达500d的龄期内,观测湛江黏土充分扰动后在不同静置时间触变引起的强度恢复过程,确定了触变强度的恢复时间、触变强度比率。利用扫描电镜与压汞试验,获得不同静置龄期下土体的微观结构,进行触变恢复强度与微观结构演化的关联性与敏感性分析,以期从微观角度

解释土的触变机理。

## 1 试验土样与方法

### 1.1 试验土样

试验土样取自广东省湛江市霞山区南柳河东南侧,距入海口约2km处,为第四系下更新统湛江组海陆交互沉积黏性土,埋深14.0~16.0m。湛江黏土原状样的物理、力学性质指标:含水率 $w$ 为50.04%;密度 $\rho$ 为1.67g/cm<sup>3</sup>;比重 $G_s$ 为2.682;孔隙比 $e$ 为1.428;液限 $w_L$ 为64.26%;塑限 $w_P$ 为32.25%;液性指数 $I_L$ 为0.56;塑性指数 $I_P$ 为32.01;无荷膨胀率 $\delta_c$ 为2.1%, $c_{cu}$ 为67.2kPa; $\varphi_{cu}$ 为10.20°。土中粒径小于0.005mm的黏粒含量超过70%,天然孔隙比较高,接近饱和状态。但压缩系数 $a_{1-2}$ 低至0.27MPa<sup>-1</sup>,无侧限抗压强度达175kPa,三轴固结不排水剪切 $c_{cu}$ =67.2kPa,灵敏度约为7.0。该土在结构破坏前后力学性质差异显著,应力超过结构屈服应力后,力学性能迅速劣化<sup>[14]</sup>,属一种高灵敏的强胶结结构性黏土。

考虑土中的化学成分与矿物组成对其触变影响较大,对土中矿物与化学成分进行了测试:石英为41.9%,伊利石为18.1%,蒙脱石为8.2%,高岭石为15.3%,绿泥石-蛇纹石5.1%,钾长石为4.0%,锰方解石为0.8%,黄铁矿为3.6%,赤铁矿为3.0%。该土的次生黏土矿物达46%以上,主要以伊利石、高岭石和蒙脱石为主,含有一定量的黄铁矿与赤铁矿。土的pH=6.55,略显酸性,有机质含量较低,为0.521%,交换阳离子量为20.44meq/100g,易溶盐含量较低,为0.482%,颗粒总表面积较高,为138m<sup>2</sup>/g,其中外表面积41.359m<sup>2</sup>/g。

### 1.2 试验方法

将通过研磨与手搓获得的充分扰动的软塑状重塑土放于直径68cm,高20cm的塑料盆中,此重塑土的密度与原状土密度的差值控制在±0.05g/cm<sup>3</sup>,含水率差值控制在±2%内。将内径为50mm,厚2.0mm的PVC管切成高100mm空心管60个及高40mm的空心管40个,空心管一端用刀削成30°的刃口,将空心管在轴向方向锯开使之形成双瓣膜,用布基胶带在径向方向箍紧使其恢复为空心管形状。在空心管内部涂抹一薄层凡士林,将刃口向下放在重塑土样上垂直下压,用切土刀整平空心管两端土样,用PE保鲜膜密封包裹空心管,蜡封后存放于密闭保湿缸内,室温控制在25±2℃。笔者曾设计将大块的重塑土样放置不同龄期后取样、制样,然后进行强度测试,但制样过程引起的扰动必然会使强度测试结果产生一定误差,而采用预先制样的方法可以有效减小这种不利影响。

触变恢复强度采用无侧限抗压强度试验与微型贯入仪测试。依次去除蜡封、PE保鲜膜、布基胶带、掰开双瓣膜, 将直径 50 mm, 高 100 mm 试样用于无侧限抗压强度试验, 每组试验测定两个试样。利用微型贯入仪测定触变过程中土的强度的原理在于, 当贯入仪在压力作用下匀速贯入土中, 测头附近一定范围内土受到压缩和剪切破坏, 对探头产生贯入阻力, 而贯入阻力的变化则反映了土的触变恢复强度变化。利用 PS-MPT-A 型微型贯入仪 (测头面积为 0.3 cm<sup>2</sup>), 根据《袖珍贯入仪试验规程》<sup>[15]</sup>对直径 50 mm, 高 40 mm 的试样在轴向方向匀速地贯入至 6 mm 时读取贯入阻力  $P_t$ 。每次试验选取不同位置测定 5 次取平均值。触变恢复强度测试龄期在试验开始阶段为 1 天 1 次, 一周后约为 10 天 1 次, 100 天后为 50 天 1 次。

触变过程中土的微观结构测试采用电镜扫描 (SEM) 与压汞 (MIP) 试验。选取不同的龄期, 对直径 50 mm, 高 40 mm 的试样取样, 采用真空冷冻升华干燥法制样<sup>[14]</sup>, 利用 Quanta 250 扫描电子显微镜与 Poremaster 33 高压孔隙结构仪进行 SEM 测试与 MIP 试验, 获得触变过程中土的微观结构照片与孔隙分布, 各得到 7 组有效数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 触变性的判别

一般而言, 不同于完全触变材料, 土的触变过程中恢复强度无法完全达到未扰动状态下的强度。土的触变过程可用图 1 表示。

图 1 中  $C_u$ ,  $C_r$ ,  $C_t$  分别为未扰动状态土的强度、完全扰动状态下土的强度和触变过程中某一时刻  $t$  土的强度。则土的因扰动损失的强度为  $C_u - C_r$ , 某一时刻因触变恢复的强度为  $C_t - C_r$ 。土的灵敏度  $S_t$  为

$$S_t = \frac{C_u}{C_r} \quad (1)$$

定义某一触变时刻  $t$  时土的触变强度比率  $A_t$  为

$$A_t = \frac{C_t}{C_r} \quad (2)$$

触变强度比率  $A_t$  为土样扰动后  $t$  时刻的强度与扰动后 0 时刻的强度之比。由于触变强度比率不是绝对强度的增加, 为了进一步评价触变过程中相对强度的恢复程度, 定义某一触变时刻  $t$  时的触变恢复强度比  $B_t$  为

$$B_t = \frac{C_t - C_r}{C_u - C_r} \times 100 \quad (3)$$

触变恢复强度比  $B_t$  (%) 为表征触变过程中强度恢复占扰动损失强度的百分比。

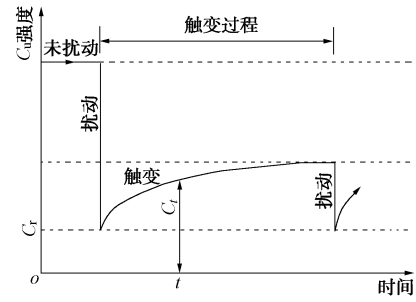


图 1 土的触变过程示意图

Fig. 1 Scheme of thixotropic process of soils

### 2.2 黏土触变过程强度恢复分析

湛江黏土扰动后的无侧限抗压强度  $q_u$  随静置时间  $t$  的变化曲线如图 2 所示。该土扰动后持有的无侧限抗压强度约为 23.5 kPa, 静置 10 d 后,  $q_u$  增长约 5 kPa, 随着触变时间的增长,  $q_u$  进一步增大。大约 100 d 时测得的  $q_u$  约为扰动后  $q_u$  值的 2 倍, 随后峰值强度变化平缓, 此后的 400 d 内  $q_u$  仅增长 10 kPa 左右。土的贯入阻力  $P_t$  可较好地反映土剪切强度<sup>[16]</sup>, 图 2 同时列出了土的  $P_t$  随静置时间的变化曲线,  $P_t$  随静置时间的增长规律与  $q_u$  的变化规律基本一致。湛江黏土触变过程中的  $q_u$  与  $P_t$  随时间  $t$  的变化规律基本符合幂函数增长关系, 其关系可以表示为

$$q_u = At^B \quad (4)$$

$$P_t = Ct^D \quad (5)$$

式中,  $A, B, C, D$  为触变系数。需要说明的是, 式 (4)、(5) 可以反映不同静置时间内土的触变强度恢复规律, 但并不是说在无限长的时间内强度会无限增长, 如湛江黏土在扰动后静置 500 d 后测得无侧限抗压强度为 57.9 kPa, 远小于用原状样测得无侧限抗压强度 175 kPa。

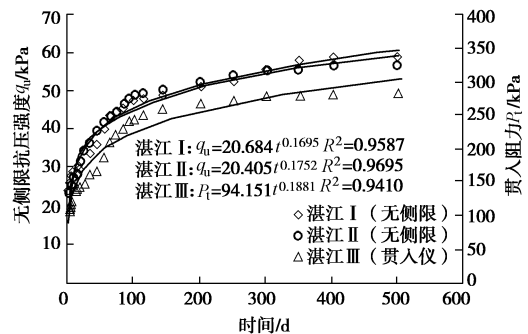


图 2 无侧限抗压强度与贯入阻力随时间变化曲线

Fig. 2 Curves of unconfined compressive strength and penetration resistance versus time

土的灵敏度与触变性密切相关<sup>[5]</sup>, 但灵敏度无法用以评价土的触变特性, 而触变强度比率指标反映了土样扰动后任意时刻强度的变化情况, 利用触变强度

比率可以判别触变性的强弱。图3给出湛江黏土与其他地区黏性土以及纯矿物黏土<sup>[2, 5]</sup>的触变强度比率 $A_t$ 随 $t$ 的变化规律, 如果不考虑土样的初始含水率(图3(a)中土样的含水率为其液限值、图3(b)中土样的含水率为其塑限值), 天然含水率下湛江黏土扰动后的 $A_t$ 随时间 $t$ 的变化规律与London黏土相似, 但在静置20d后湛江黏土的 $A_t$ 增长速度明显大于London黏土, 500d后湛江黏土的 $A_t$ 最大可达2.58, 而London黏土为1.85左右, 表明湛江黏土在静置20d后触变对强度恢复程度明显大于London黏土。结果显示, 湛江黏土触变500d后土体持有的强度约是其扰动后的2.58倍, 李丽华等<sup>[8]</sup>利用自制微型十字板剪切仪对翠湖湿地软土的触变试验表明, 扰动后60d后土体强度可以达到扰动时的近5.0倍。从图3(a)中还可以发现, 湛江黏土在扰动后静置的前期(20d内), 触变强度比率变化曲线位于Horten、Beauharnois、Shell haven这3个地区黏土的曲线下, 说明湛江黏土触变过程前期触变对强度恢复的影响相对较弱。

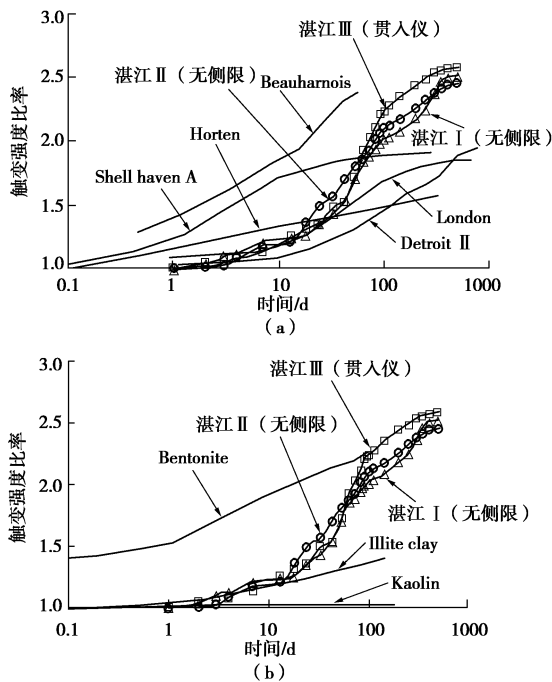


图3 不同静置龄期的触变强度比率变化曲线  
Fig. 3 Change of thixotropic strength ratio at different time

土在受到外来因素扰动时, 土粒间的胶结物质以及土粒、离子、水分子所组成的平衡体系被破坏, 其内部结构与应力状态发生变化, 土体的强度降低和压缩性增大, 虽然触变性会使强度有所恢复, 但恢复的强度有限。如图4所示, 除了Detroit黏土, 其他地区黏土静置龄期内的触变强度恢复都比较小, 湛江黏土在静置500d后因触变恢复的强度仅占因扰动损失的强度的21.2%~23.5%。这说明即使考虑触变性, 对于

具有高灵敏性、强结构性的地基土, 因施工扰动带来的强度损失仍不容忽视。

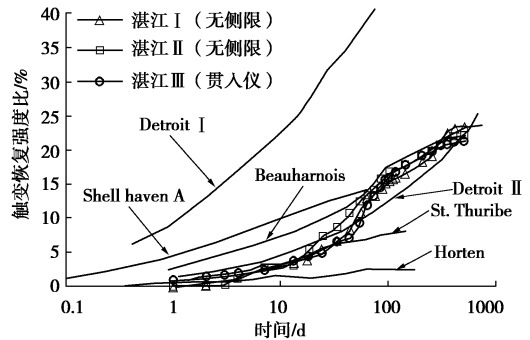


图4 触变恢复强度比随静置龄期变化曲线  
Fig. 4 Change of thixotropic recovery temperature ratio at different time

### 2.3 黏土触变过程微观结构变化

图5为原状土与扰动后静置不同时间的土的SEM照片。从图5(a)中可以看到, 湛江黏土的结构单元实际上是以许多单片堆叠而成的片堆颗粒单元, 粒状碎屑矿物和少量单片黏土矿物颗粒构成, 而扁平状的片堆以及单片间又以边一面、边一边为主、少量面一面接触的形式构成定向性无序的开放式絮凝结构, 这使得湛江黏土在具有较大孔隙比的同时具有强灵敏性, 一旦外力超过土粒间力土体会发生脆性破坏。而扰动后土的片堆结构单元变得不明显, 取而代之的是相对较大体积的单元体以面一面、边一面、点一面接触, 孔隙大小分布不均, 颗粒联结弱, 结构分散度高。随着时间的增长, 这种颗粒趋于絮凝现象更加明显, 如100d后(见图5(f)~(h)), 已无明显片堆结构单元存在, 颗粒发生移位、凝聚, 甚至有大团粒出现, 颗粒定向程度有所增加, 大体积孔隙数量明显减少。

为进一步定量评价触变过程中土的孔隙分布变化进行了压汞试验, 结果见图6。湛江黏土孔径分布呈单峰分布, 在0.1~1.0 μm的孔隙组占有绝对优势, 这一区间的孔隙体积占总孔隙体积的50%左右, 粒径 $d < 0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙组体积约占总孔隙体积的35%。从图6(a)可见, 扰动破坏了土在天然沉积下形成的架空孔隙, 重塑形成了新的架空孔隙与大体积的粒团间孔隙, 导致扰动土的孔隙分布呈双峰分布,  $d > 10 \mu\text{m}$ 的孔隙体积含量分布占优。随着静置时间增长, 曲线优势峰对应孔径向小孔隙偏移, 100d后 $d < 1.0 \mu\text{m}$ 的小孔隙组体积亦开始减少, 取而代之的是 $1.0 \mu\text{m} < d < 10 \mu\text{m}$ 的中孔隙数量开始增多, 表现在图6(b)中这部分孔径对应的曲线峰值逐渐升高。这反映出湛江黏土

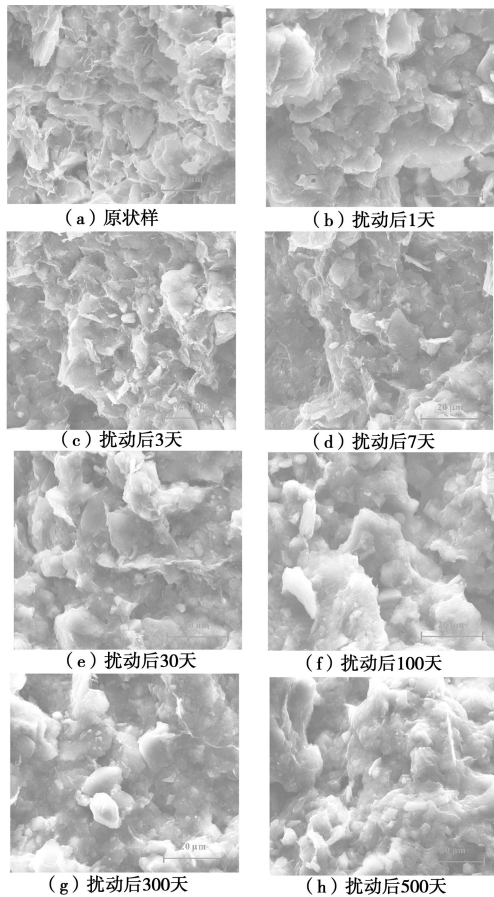


图 5 原状土与不同静置龄期内扰动土的 SEM 图片( $\times 2000$ )  
Fig. 5 SEM photos of natural clay and disturbed clay at different thixotropic time ( $\times 2000$ )

在触变过程前期, 大孔隙优先发生变化, 大孔隙体积减少, 小孔隙略有减少; 触变过程中后期小孔隙体积减小, 同时伴随着中孔隙体积的增加。笔者将触变过程中这种孔隙变化规律称为孔隙匀化原理, 即触变过程中结构重排导致的自适应过程中, 大孔隙优先改变, 大孔隙与小孔隙逐步转为中孔隙, 孔隙分布逐步均匀化。

### 3 讨 论

为了探寻黏土触变过程强度恢复机理, 笔者将不

同地区的黏土的物性指标、黏粒含量及活动性、阳离子交换量作为土的触变影响因子, 选取 10, 30, 100 d 的触变强度比率作为评价触变性强弱指标, 进行两者之间的关联性与影响敏感性分析。然而, 对现有试验数据而言, 除了阳离子交换量与触变强度比率呈正相关性外, 并没有发现某种常规土性指标可以与触变性关联。Skempton 根据多个地区黏土的触变试验结果指出, 具有高液限指数的土的触变性可能会更明显, 但他也认为该结论需要深入研究<sup>[5]</sup>。从表 1 所列数据以及图 3 (b) 可以看到, 黏土矿物类型对土的触变性有明显影响, 高岭土、伊利石土、膨润土的触变强度比率依次增高, 高岭土在 100 d 的静置时间内强度几乎没有增加, 而蒙脱土在 100 d 时的  $A_t=2.3$ , 触变特征明显。这主要是因为相对 1:1 型的双层结构的高岭石矿物, 2:1 型的三层结构的蒙脱石矿物具有大比表面

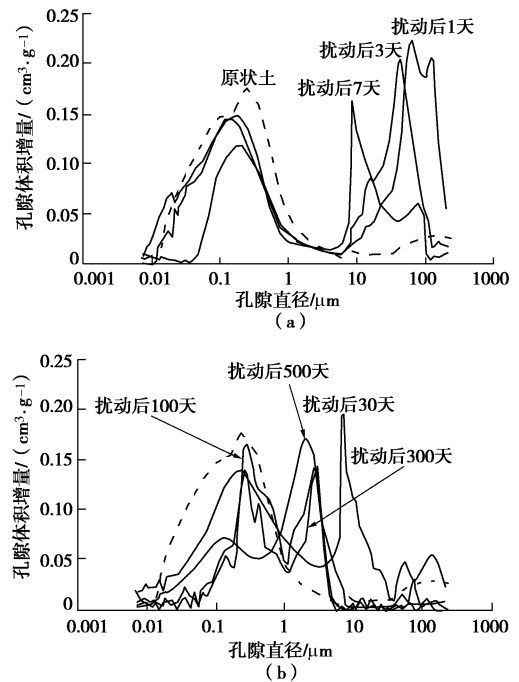


图 6 原状土与不同静置龄期内扰动土的孔径分布曲线  
Fig. 6 Pore size distribution curves of natural clay and disturbed clay at different thixotropic time

表 1 不同地区黏土的物性指标与触变强度比率

Table 1 Physical properties and thixotropic strength ratio of clay in different areas

取样地区 或矿物	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性 指数 $I_p$	液性 指数 $I_L$	黏粒含量 ( $d < 2 \mu\text{m}$ )/%	活动性 $A_d$	阳离子交换量 /( $\text{meq}/100\text{g}$ )	灵敏度 $S_t$	触变强度比率 $A_t$		
									10 d	30 d	100 d
Beauharnois	66.00	25.00	41.00	1.30	79.0	0.52	—	14.0	1.85	2.20	—
Shell haven A	97.00	32.00	65.00	0.84	51.0	1.27	31.00	7.6	1.70	1.83	1.90
London	73.00	25.00	48.00	—	50.0	0.96	17.00	—	1.19	1.41	1.67
Detroit II	51.00	25.00	26.00	0.84	65.0	0.40	—	4.8	1.09	1.25	1.47
Horten	29.00	16.00	13.00	1.20	38.0	0.35	18.00	19.0	1.34	1.43	1.48
bentonite	580.00	40.00	540.00	—	87.0	6.20	100.00	—	1.90	2.12	2.30
Illite clay	73.00	28.00	45.00	—	50.0	0.90	8.40	—	1.21	1.27	1.36
kaolin	64.00	38.00	26.00	—	78.0	0.33	3.80	—	<1.05	<1.05	<1.05
湛江	64.26	32.25	32.01	0.56	39.2	0.82	20.44	7.0	1.19~1.24	1.43~1.56	2.00~2.23

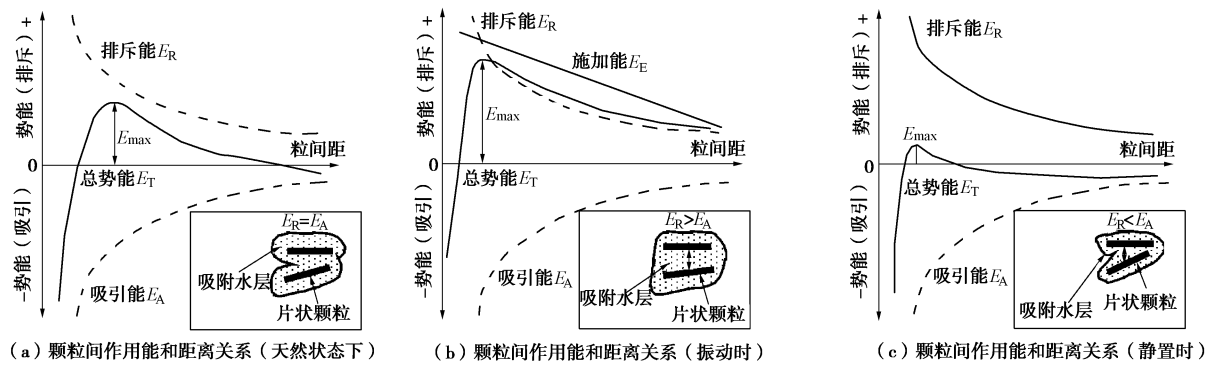


图7 触变过程中能量与粒间距关系

Fig. 7 Energy - distance curves of thixotropic process

积, 高活性、高阳离子交换量, 矿物表面带有大量电荷, 这势必影响颗粒间的相互作用力, 进而控制颗粒间接触点的强度。Mitchell<sup>[2]</sup>也曾指出, 初始含水率对土的触变特征有重要影响, 其根本原因是粒间力的改变引起。

根据以上认识, 根据触变过程中土的微观结构变化引起的粒间作用力改变对黏土触变过程强度恢复机理论述。土-水-电解质系统的相对作用, 使黏土颗粒表面形成双电层, 当两颗粒相互靠近至一定距离时, 颗粒间的双电层相互重叠产生相互作用力场。如图7所示, 曲线 $E_R$ 表示两颗粒靠近时排斥能增加的情况; 曲线 $E_T$ 表示吸引能变化的情况。以相斥为正, 相吸为负, 曲线 $E_T$ 表示总势能与粒间距的关系。当颗粒相距较远时, 引力占优势, 曲线在横轴以下, 总势能为负; 随着颗粒距离变近, 斥力发挥作用, 总势能上升为正, 至一定距离处, 总势能最大, 出现一个能峰 $E_{max}$ 。位能上升意味着两颗粒不能进一步靠近, 或者说它们靠近后又分开, 如越过峰能 $E_{max}$ , 势能迅速下降, 意味着颗粒发生絮凝。

如见图7(a)表示, 未扰动黏土由于粒间引力与斥力的平衡处于一种稳定状态。当土扰动后, 外部施加能量作用于土壤系统, 由于颗粒间距越小需要促使颗粒运动的能力越大, 即能量随颗粒距离的减小而增加, 反映在图7(b)中用一条直线表示。这部分外部施加的扰动能充分利用, 天然沉积形成土体初始结构被打破, 颗粒间胶质联结破坏, 片状黏土被分散, 也就是说外部施加能量帮助双电层内部作用力产生的颗粒间的斥力使结构趋于分散, 且由于外部力作用, 颗粒间作用力能量处于高水平状态, 吸附水层和双电层离子会重新分布, 微观结构重组, 一些大体积孔隙随之产生。然而, 一旦扰动停止, 外部施加能量一部分使颗粒间内部斥力作用形成分散结构消耗掉, 于是粒间斥力减小, 结构为适应这种新的力场发生自适应调节, 发生如前述微观分析中指出的大孔隙体积减小,

颗粒移位、相互靠近的现象。当引力超过斥力(见图7(c)), 粒间力超过能峰 $E_{MA}$ 颗粒发生絮凝, 或颗粒在相互靠近的过程中消耗掉一部分能量而未能越过能峰 $E_{MA}$ 也会达到一种新的粒间平衡, 这时结构试图调整成新的能量较低的状态, 这些颗粒运动造成了孔隙分布逐步均匀化, 结构从扰动后的分散结构逐步向絮凝结构发展。由此看来, 天然状态下土体扰动后强度损失, 静置后因触变引起的强度恢复过程, 是一种初始结构被破坏将其分散, 颗粒间引力与斥力的相互作用的力场变化使结构趋向絮凝发展的过程, 是一种土体从稳定的颗粒排列、孔隙分布被打破变为非稳定结构, 由于结构自适应调整向亚稳定结构转变的过程, 而这一过程需要颗粒的移位, 水和离子的运动, 存在时间依赖性, 也就是土的触变现象。然而, 土在扰动过程同时也破坏粒间的胶结联结作用, 造成土粒接触点的结构强度丢失, 这一部分强度一般是不完全可逆的, 这也造成即使是长时间的触变发生, 土体的强度恢复也无法达到天然状态下的强度水平。

## 4 结 论

(1) 湛江黏土具有明显的触变性, 扰动土静置10 d后其无侧限抗压强度增长5 kPa, 100 d后无侧限抗压强度增长近一倍, 500 d后土体持有的强度是扰动后土的2.58倍。

(2) 触变特性会导致扰动土在一定时间内强度有所恢复, 但触变强度恢复程度有限, 湛江黏土在静置500 d后触变恢复强度仅占因扰动损失的强度的21.2%~23.5%。因此, 对于具有高灵敏性、强结构性的地基土, 因施工扰动带来的强度损失进而引发的工程灾害仍不容忽视。

(3) 黏土触变强度恢复过程的机理可认为是, 因扰动导致土体初始结构被破坏将其分散, 颗粒间引力与斥力的相互作用的力场变化使结构趋向絮凝发展的过程, 这一过程中土体稳定的颗粒排列、孔隙分布

被迫调整变为非稳定结构, 由于结构自适应调整, 孔隙分布均匀化发展, 微观结构向亚稳定结构转变, 这种影响是长期持续的, 在一定时期内表现出土的触变现象。

#### 参考文献:

- [1] PETERFIT T. Arch entwicklungsmech[J]. Organ, 1927, **112**: 680.
- [2] MITCHELL J K. Fundamental aspects of thixotropy in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1960, **86**(3): 19 - 52.
- [3] BOSWELL P G H. A preliminary examination of the thixotropy of some sedimentary rocks[J]. Quarterly Journal of Geological Science, 1949, **104**: 499 - 526.
- [4] KRUPP H R. Colloid science, I, Irreversible systems[M]. Amsterdam, Houston, New York, London: Elsevier, 1952.
- [5] SKEMPTON A W, NORTHEY R D. The sensitivity of clays[J]. Géotechnique, 1952, **2**(1): 30 - 53.
- [6] DÍAZ-RODRÍGUEZ J A, SANTAMARINA J C. Thixotropy: the case of Mexico City soils[C]// XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Iguazu Falls, Brazil, 1999: 441 - 448.
- [7] 冯秀丽, 周松望, 林霖, 等. 现代黄河三角洲粉土触变性研究及其应用[J]. 中国海洋大学学报, 2004, **36**(6): 1053 - 1056. (FENG Xiu-li, ZHOU Song-wang, LIN Lin, et al. The thixotropy of silt in Huanghe Delta[J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, **36**(6): 1053 - 1056. (in Chinese))
- [8] 李丽华, 陈轮, 高盛焱. 翠湖湿地软土触变性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 765 - 768. (LI Li-hua, CHEN Lun, GAO Sheng-yan. Experimental research on thixotropy of wetland soft soil in Cuihu[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 765 - 768. (in Chinese))
- [9] DULLAERT K, MEWIS J. A structural kinetics model for thixotropy[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2006, **139**(1/2): 21 - 30.
- [10] KUL'CHITSKII F B. Thixotropy of soils of the middle obregion and its consideration when constructing pile foundations[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1975, **12**(3): 168 - 170.
- [11] ROMANOV S V, ROMANOV D A. Procedure for impressing reinforced-concrete piles into leader holes using soil thixotropy[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997, **34**(1): 22 - 24.
- [12] 徐永福, 王驰, 黄铭, 等. 湿喷桩施工中饱和软土的触变性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1784 - 1789. XU Yong-fu, WANG Chi, HUANG Ming, et al. Thixotropy of silt soils at saturation due to the construction of DCM columns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1784 - 1789. (in Chinese))
- [13] PERRET D, LOCAT J, MARTIGNONI P. Thixotropic behavior during shear of a fine-grained mud from Eastern Canada[J]. Engineering Geology, 1996, **43**(1): 31 - 44.
- [14] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(2): 406 - 412. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(2): 406 - 412. (in Chinese))
- [15] CECS 54—93 袖珍贯入仪试验规程[S]. 1993. (CECS 54—93 Rules of pocket penetrometer test[S]. 1993. (in Chinese))
- [16] NEARING M A, WEST L T. Soil strength indexes as indicators of consolidation[J]. American Society of Agricultural Engineers, 1988, **31**(2): 471 - 476.