



# Research and Application of Thixotropy of Soft Soil in Tianjin Binhai New Area

Yang Aiwu<sup>1</sup>, Yang Shaokun<sup>1,\*</sup>, Wu Kelong<sup>2</sup>, Sun Baishun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, Donghua University, Shanghai, P.R. China

<sup>2</sup>Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Engineering Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin, P.R. China

<sup>3</sup>Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin, P.R. China

## Email address:

tulilab@163.com (Yang Aiwu), yangzhiyi13@163.com (Yang Shaokun), 981677963@qq.com (Wu Kelong),

sunmeadow@163.com (Sun Baishun)

\*Corresponding author

## To cite this article:

Yang Aiwu, Yang Shaokun, Wu Kelong, Sun Baishun. Research and Application of Thixotropy of Soft Soil in Tianjin Binhai New Area.

*Science Discovery*. Vol. 11, No. 2, 2023, pp. 74-82. doi: 10.11648/j.sd.20231102.18

Received: March 28, 2023; Accepted: April 20, 2023; Published: April 23, 2023

**Abstract:** Taking the soft clay of Tianjin Binhai New Area as the research object, the cross-plate shear instrument was used to test the remodeled soil samples with different moisture content for thixotropic time of 1d, 4d, 7d, 10d, and 15d. Then the samples after 15 days of standing were taken for heap load test to investigate the strength change mechanism under natural standing and graded loading, respectively. Meanwhile, the microstructure evolution mechanism was revealed by scanning electron microscopy. The results show that with increase the water content, the increase of soil strength gradually slows down under thixotropic action. When the water content reaches 50% or above, the soil strength hardly increases any more. The strength increases due to the heap load, but there is often accompanied by large deformation or settlement, with the increase of water content. In the process of soil thixotropy, the overall structure gradually changed from the sheet stacked structure to the laminated scaffold structure. The number of particles and pores decreases. The equivalent diameter, roundness, as well as morphology ratio of particles increase, while the changes of these microscopic parameters of pores show an opposite trend. On this basis, thixotropy was used to prepare foundation soil of model and large-scale model tests were carried out to reveal the real situation of the interaction of wave-breakwater-soft soil foundation. The research results can provide reference for the application of soft soil thixotropy under wave action in the foundation of semicircular breakwater.

**Keywords:** Soft Soil, Thixotropy, Microstructure Parameter, Semi-Circular Breakwater, Large Scale Model Experiment

## 天津滨海新区软土触变性研究及应用

杨爱武<sup>1</sup>, 杨少坤<sup>1\*</sup>, 吴可龙<sup>2</sup>, 孙百顺<sup>3</sup>

<sup>1</sup>东华大学纤维材料改性国家重点实验室, 上海, 中国

<sup>2</sup>天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津, 中国

<sup>3</sup>交通运输部天津水运工程科学研究所港口水工建筑技术国家工程实验室, 天津, 中国

## 邮箱

tulilab@163.com (杨爱武), yangzhiyi13@163.com (杨少坤), 981677963@qq.com (吴可龙), sunmeadow@163.com (孙百顺)

**摘要:** 以天津滨海新区软黏土为研究对象, 利用十字板剪切仪对不同含水率下触变时间1d、4d、7d、10d、15d的重塑土样进行测试, 并取静置15d后的土样进行堆载试验, 分别探讨自然静置及分级加载作用下土体强度变化机制, 同时取

样开展扫描电镜试验来揭示其微结构演变机制。结果表明：随着含水率的增加，触变作用下土体强度增幅逐渐减缓，当含水率达到50%及以上时，强度增长不再明显；堆载使得土体强度有所增长，但随含水率的增加往往伴随着较大变形或沉降。软土触变过程中，整体结构由片状堆叠结构逐渐变为叠片支架结构，土颗粒和孔隙的数量都在减少，其中，颗粒的等效直径、圆度、形态比增大，而孔隙的这些细观参数变化呈相反趋势。在此基础上，利用触变性进行模型槽地基土制备并开展大比尺模型试验，揭示波浪-防波堤结构-软黏土地基相互作用的真实情况。研究成果可为波浪作用下软土触变性在半圆型防波堤地基中的应用提供参考。

**关键词：**软土，触变性，微结构参数，半圆型防波堤，大比尺模型试验

## 1. 引言

天津滨海新区地处渤海湾西岸，全区分布着深厚海相沉积软土层，其特点是含水率高、压缩性大、强度低，且由于触变性非常显著，土体经扰动后产生强度弱化效应，而后随着时间的增长又逐渐恢复，从而容易引发工后沉降、地基失稳等工程灾害[1, 2]，因此开展软土触变性研究及其应用，对于充分利用其工程力学性质，解决地基土强度衰减、不均匀沉降、失稳滑坡等一系列工程灾害具有重要的实际意义。

目前，国内外诸多学者均针对软土触变性力学特性进行研究并取得了较多成果。PENG[3]和REN[4]等对大量沉积物进行触变性检测，结果发现除了洁净的砂以外，绝大多数材料都表现出触变特性，尤其对于软弱黏土而言，其触变性更是普遍存在。高彦斌等[5]基于长达半年的灵敏性试验，发现软黏土灵敏度最终增加了原来的80%，达到无侧限抗压强度试验测得灵敏度值的32%左右，表明触变性是造成高灵敏度的一个决定性因素；李丽华等[6]通过室内微型十字板剪切试验，对海淀翠湖湿地公园软土触变性展开研究，发现其受土体埋深、含水量变化影响较大，并确定了遭受扰动后湿地软土的抗剪强度恢复程度、恢复时间以及强度比；张目极[7]等揭示出黏土含水率、孔隙比及灵敏度等因素对湛江结构性土触变性大小的影响规律，同时发现土体结构性越强，其触变性也越强；汤斌等[8]则制备四种不同扰动程度的重塑土样，来测试各静置时间下的微型十字板抗剪强度及无侧限抗压强度，结果发现土体扰动时间和强度恢复程度均与土体扰动程度呈正相关关系；张先伟等[9, 10]针对重塑软黏土开展长期室内试验研究，发现扰动土体静置100d后的无侧限抗压强度增长接近一倍，静置500d后增长约1.6倍，并认为其主要是由于土体微结构的自适应调整及其向亚稳定结构所演变而引起。

部分学者亦针对动力荷载作用下软黏土的触变特性进行了研究。周建等[11]利用动三轴试验对杭州地区软黏土在循环荷载作用下的触变性进行研究，探讨了循环应力比、振动次数、超固结比等因素对孔压产生的影响，同时认为动荷载作用下土体内部结构将发生重塑、调整，从而产生强度弱化效应；闫澍旺等[12]则基于振动三轴试验，分析了饱和软土地基在海洋波浪荷载作用下的强度减弱机制。

上述研究成果虽然推动了软土触变性的研究进展，然而大多集中在无侧限抗压强度试验、静三轴、动三轴等一些室内试验，基于软黏土取样、运输、养护、试验条件等

众多因素的限制，其并不能彻底反映现场土质特性。此外，鉴于天津滨海软土的特殊性[13]，其相关的触变性试验研究及应用还很少，尚需对它的触变影响因素和触变机理进行摸索。基于此，本文在不同含水率条件下对天津滨海新区软土进行触变性试验，探讨其在自然静置及分级加载作用下的强度变化机制，揭示其触变机理；在此基础上，利用触变性进行大比尺模型槽地基土制备，揭示波浪荷载作用下软土地基上半圆型防波堤的真实工作状态，并深入探究其失稳机理及稳定特性，为防波堤结构在航道治理工程中的实际应用及防护提供理论支撑。

## 2. 软土触变特性

### 2.1. 试验材料及方法

本次试验用软黏土取自天津滨海新区临港工业区，取样深度集中在1.0m~2.0m，参照《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）[14]对其基本物性指标进行检测，结果如表1所示。将现场取得的原状土样烘干、研磨后过筛，配制含水率为30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%等不同情况下的重塑土样，经测试均为饱和土试样。采用内径70mm、高100mm的PVC空心管作为制样模具，装样前在管内部均匀涂抹一层凡士林，配制好土样后两端均采用保鲜膜包裹来达到密封、保湿效果，而后进行蜡封并置于室温环境（25±2℃）下静置一定龄期为试验所用。值得说明的是，笔者前期曾利用整个大块重塑土样静置一定龄期后取样、制样，而后进行强度测试，结果发现因制样造成的扰动使土体强度测试结果产生较大误差，而采用预先制样的方法能够有效减轻此种不利影响。

触变试验采用直径D=20mm、高度H=40mm的微型十字板顺时针以1°/10s的速率展开强度测试，试验发现，静置15d后土体触变强度基本稳定，且含水率35%的重塑土触变强度已符合模型土强度要求，因此触变试验时间设置为1d、4d、7d、10d、15d。考虑到时间及外部压力等因素在土体强度恢复过程中产生的影响，取含水率为30%~55%且静置15d后的土样进行堆载试验，采用分级加载方式，用砝码与小托盘相结合来精确控制压力，分别施加5kPa、10kPa、15kPa的荷载，每级载荷持续5d，加载过程中土体表面上覆保鲜膜，减小含水率偏差。

微观测试借助LEO场发射扫描电子显微镜，对触变过程中静置1d、4d、7d、10d、15d后的含水率35%土体分别取样，为使土样保持原始结构形态，采用真空冷冻升华干

燥法辅助制样，完成后放大2000倍进行扫描电镜试验（SEM）。

表1 软黏土物理力学性质指标。

含水率 $w/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	比重 $G_s$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 $e$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 $I_P$	液性 指数 $I_L$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	垂直渗透系数 $/(\text{cm}\cdot\text{s})$	水平渗透系数 $/(\text{cm}\cdot\text{s})$
36.5	1.81	2.74	94	1.066	33.7	18.0	15.7	1.178	2.655	3.12E-07	3.94E-07

2.2. 触变强度恢复机制

不同含水率下土体剪切强度结果如图1所示。

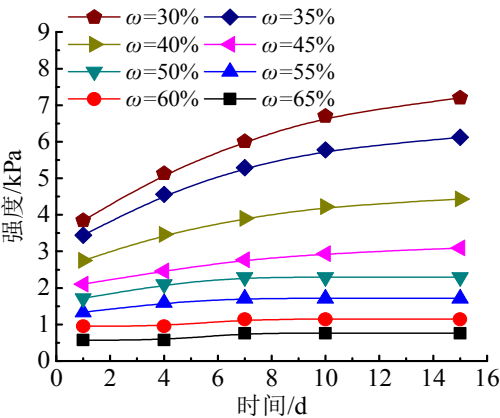


图1 不同含水率土体强度恢复曲线。

由图1可以看出，当土体含水率为30%和35%时，其十字板剪切强度增长较快，15d强度分别达到7.2kPa、6.1kPa；当含水率为40%和45%时，强度虽持续增长，但增幅较低，15d强度偏小，分别为4.4kPa、3.0kPa；而当含水率达到50%及以上时，前7d十字板强度略有增长，7d后强度基本保持

不变。这主要是因为土体含水率较低时 ( $w=30\%$ 、 $35\%$ )，土颗粒间主要以强结合水的形式存在，有利于加强颗粒间结构连结的引力，使得土体具备较强的抗剪切能力；随含水率的增加 ( $w=40\%$ 、 $45\%$ )，颗粒四周的水膜变厚，土体内部形成较好的弱结合水连结，导致土颗粒间的水膜黏结力减弱，另一方面，由于颗粒间的相对位移又导致摩擦力有所降低；随着含水率的继续增大 ( $w\geq 50\%$ )，颗粒四周的水膜继续变厚，孔隙中往往出现一定数量的非结合水，进一步削弱了颗粒间的摩擦阻力，致使土颗粒间的胶结力越来越小[15, 16]，从而使土体的抗剪能力大幅减弱。

2.3. 堆载作用下强度恢复机制

堆载作用下不同含水率土样强度测试结果如表2所示。可以发现，含水率30%、35%土样能够稳定加载至15kPa；含水率40%土样可以加载至15kPa，但仅稳定1d后便产生显著变形；含水率45%土体加载超过10kPa时，加载过程中可以看到较大变形，其最大压力为12.4kPa；含水率50%土样在10kPa压力下没有破坏，但变形已然很大；而含水率55%土样只能经受5kPa压力。为了更直观地反映不同初始含水率下堆载对土体强度恢复产生的影响，图2、图3分别给出了土体在堆载作用下的强度及含水率变化情况。

表2 堆载作用下土体强度变化。

编号	含水率/ $\%$	强度/kPa			
		静置15d	5kPa 加载5d	10kPa 加载5d	15kPa 加载5d
1	30	7.1	10.3	12.6	14.3
2	35	6.1	9.1	11.4	13.0
3	40	4.4	5.9	6.9	稳定1d
4	45	3.1	4.2	4.8	—
5	50	2.3	3.4	3.8	—
6	55	1.7	2.1	—	—

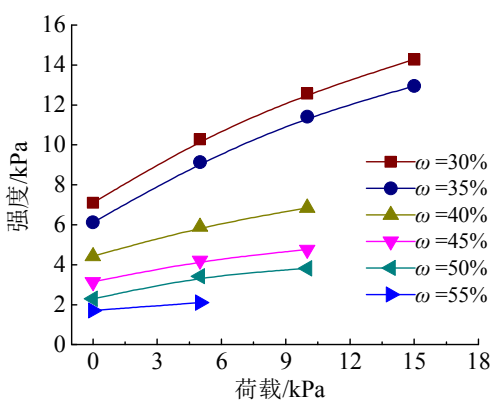


图2 土体强度随堆载变化曲线。

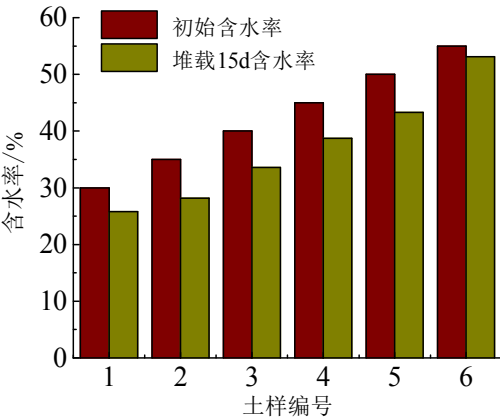


图3 土体堆载前后含水率变化。

由图2可以看出,含水率30%、35%的土体在堆载作用下,强度随压力的增加而不断增长,加载至15kPa时其强度增长趋势并未减缓,原因在于土体触变过程中,堆载使得土体缓慢排水固结,此时外部压力小于土体初始屈服应力,造成土体强度不断增加;含水率40%、45%和50%的土体在堆载作用下,其十字板强度随堆载压力的增加而缓慢增加,加载至10kPa时已接近土体初始屈服应力,已产生较大沉降和变形;含水率55%的土体,施加5kPa外部荷载时便达到其初始屈服应力,整个试验过程中十字板强度略有增加,但两侧土体明显隆起,因此只能测定加载至5kPa时的土体强度。综上,压力的增加使含水率大于35%的土体强度都有所增长,但也促使土体产生较大变形或沉降,最终导致其上部地基土失稳,结构发生破坏。此外,由图3可以看出,加载后所有土体含水率都会降低,这是因为经过一段时间的堆载作用,在土体中形成一个附加应力场,土体本身进行固结排水。附加应力场初期由孔隙水承担,即形成一个超静孔隙水压力场,随着孔隙水的不断排出,超静孔隙水压力慢慢消散,土体有效应力逐渐增加,但整个过程比较缓慢,因此在未达到土体极限承载力时,堆载使得其强度增长;当堆载超过土体极限承载力时,地基土将无法承受上部荷载,土体产生破坏。

综上,含水率30%、35%土体本身屈服强度高,可以加载至15kPa并一直保持稳定,而含水率35%的土体在触变过程中某一时刻十字板强度更接近模型土强度要求。为了更直观地揭示有无压力作用下强度的变化趋势,对含水率35%土体建立强度随时间以及外部荷载变化的关系,如图4、图5所示。

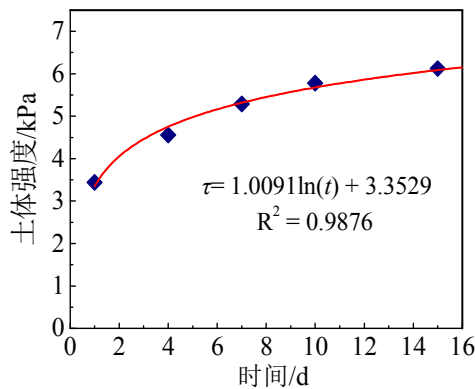


图4 土体强度随触变时间变化曲线。

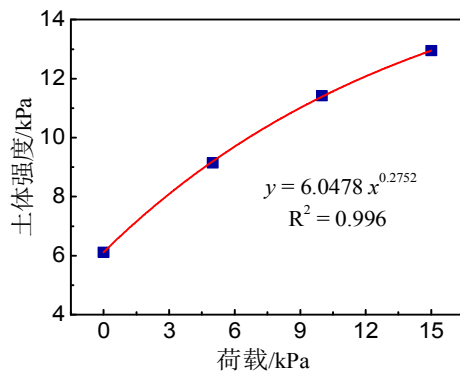


图5 土体强度随荷载变化曲线。

可以看出,土体强度随触变时间呈对数型增长,前期增速较快,后期增长渐趋平缓;在有外部荷载作用的情况下,土体强度呈现幂函数增长趋势。土体强度变化可分别采用式(1)、式(2)来表示:

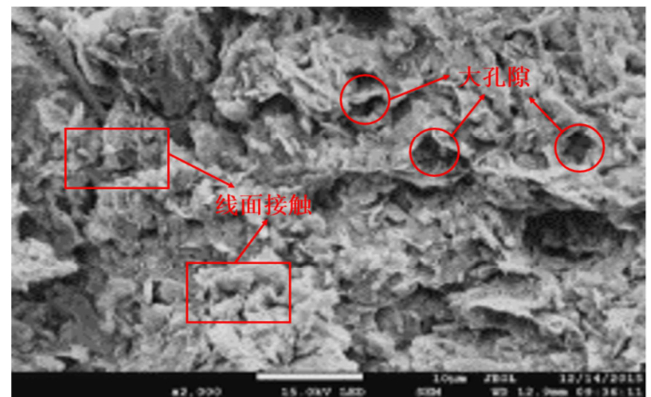
$$\tau = 1.0091\ln(t) + 3.3529 \quad (1)$$

$$\tau = 6.0478 q^{0.2752} \quad (2)$$

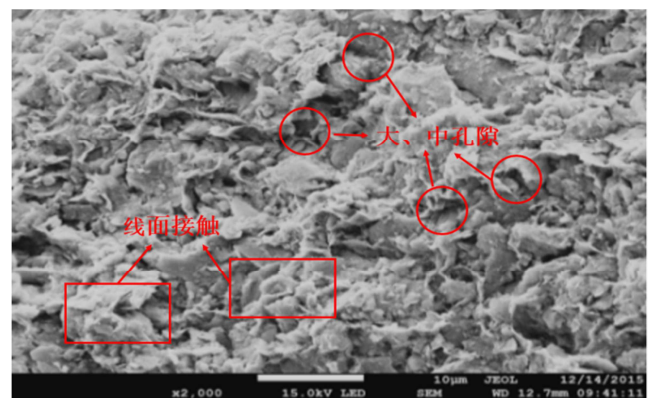
式中:  $\tau$  为土体强度,  $t$  为触变时间,  $q$  为堆载强度。

## 2.4. 触变机理分析

土体触变过程中的微结构变化如图6所示。可以看出,随着触变时间的增加,土颗粒明显聚集变大。触变发生初期(1d、4d),土样颗粒排列比较松散、混乱,存在许多架空的结构,且比较蓬松,团粒间孔隙和颗粒间孔隙的存在占据首要空间,颗粒间的相互接触以线面接触为主,定向排列趋势不明显;随着触变时间的增长(7d、10d),颗粒不断发生移位、凝聚,孔隙变小且量多,土体大、中孔隙明显减少,逐渐转变为中、小孔隙,颗粒慢慢聚合并逐渐形成新的集合体,土单元体结构相对稳定,由初期疏松的分散结构逐渐演变为片架结构和片堆结构,结构逐渐变得比较密实;随着触变时间的继续增加(15d),颗粒聚集成更完整、稳定性更强的聚合体,整体结构由片状堆叠结构慢慢变成叠片支架结构,孔隙变得细小,结构相对密实程度更高,粒间接触亦逐渐转变为面面接触,颗粒定向排列趋势显著增强。

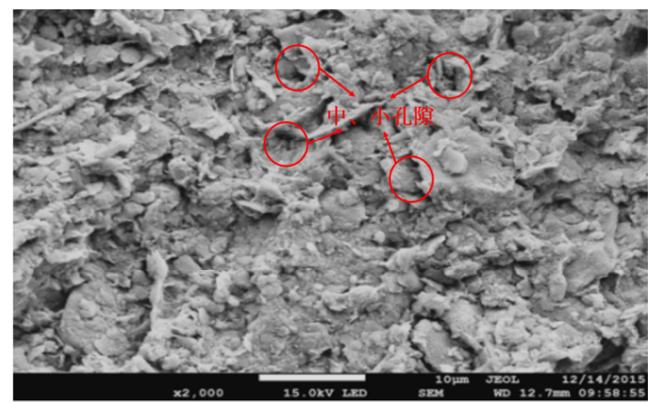


(a) 静置1d

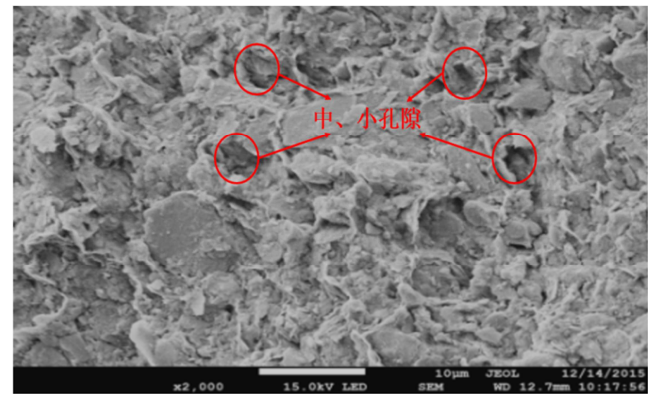


(b) 静置4d

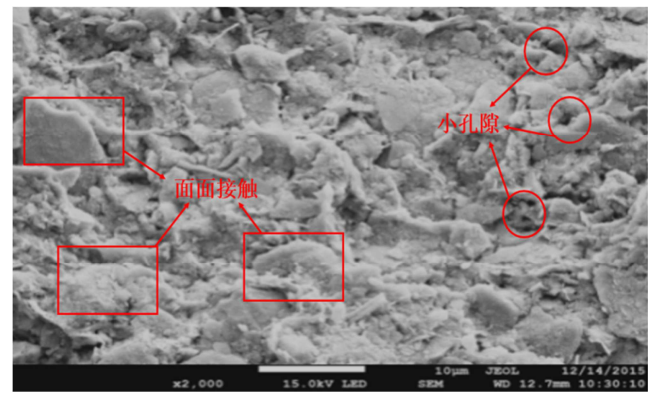




(c) 静置7d



(d) 静置10d



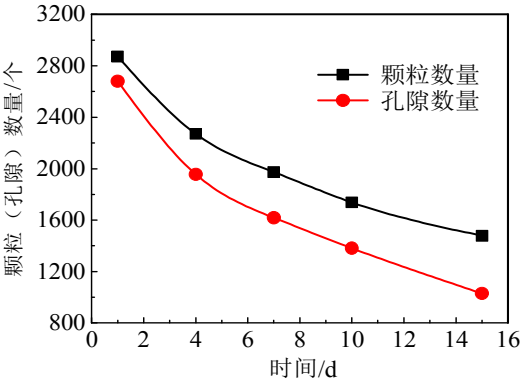
(e) 静置15d

图6 土体触变过程中SEM照片。

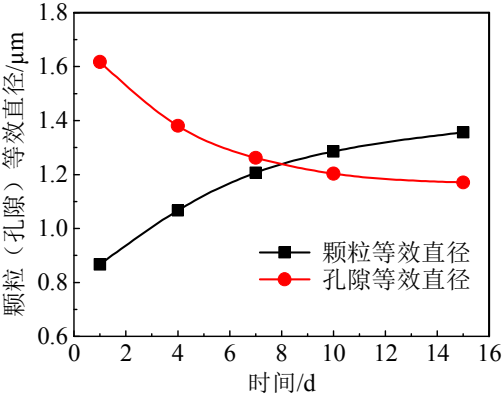
为进一步定量评价触变过程中土体微结构演变趋势，对上述SEM照片作数值化处理，取颗粒和孔隙的数量、等效直径、圆度以及形态比四种细观参数进行定量分析。关于土颗粒（孔隙）上述细观参数的定义[17]，此处不再赘述。通过对二值化图像的颗粒（孔隙）进行识别、标识、边缘跟踪，完成对每个颗粒（孔隙）的结构参数计算、统计后，得到微结构参数随触变时间的变化情况如图7所示。

由图7可知，软土触变过程中，随着触变时间的增加，颗粒和孔隙的数量整体都在减少，颗粒的等效直径、圆度、形态比增大，而孔隙的等效直径、圆度、形态比变化呈相反趋势。究其原因主要是：随着触变时间的增加，小颗粒向大颗粒聚集并相互聚合，大孔隙被分割，小孔隙被填充，

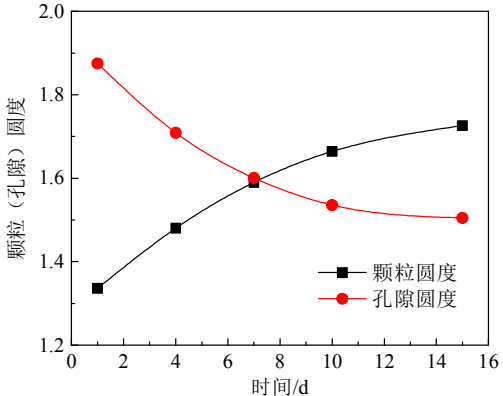
最终由于聚合导致颗粒数量减少。土的基本微元体持续进行新的排列组合，微小的土颗粒不断的聚集粘结，最后形成大颗粒，土体颗粒不断以簇粒结合的方式存在，由于簇粒的微原体横断面积较大，其包裹土颗粒的水膜变薄，颗粒间粘结力增加，导致颗粒数量减少，等效直径增大；同时大直径孔隙被分割，小直径孔隙被颗粒填充，表现为孔隙数量和等效直径减小，土体强度提高。在触变过程中，土颗粒产生相互位移，小颗粒附着于大颗粒周围，颗粒间相互粘结形成聚集体，最终是颗粒聚集体越来越大，越来越不规则，即颗粒圆度、形态比变大；伴随着大直径孔隙被分割，小直径孔隙被填充，孔隙的圆度和形状比与颗粒呈现出相反的变化趋势。



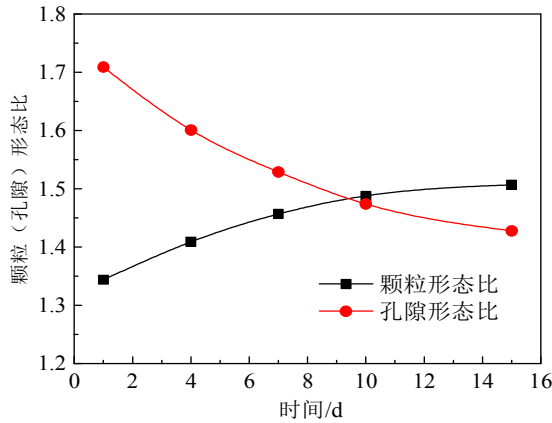
(a) 颗粒（孔隙）数量与时间关系



(b) 颗粒（孔隙）等效直径与时间关系



(c) 颗粒（孔隙）圆度与时间关系



(d) 颗粒(孔隙)形态比与时间关系

图7 微结构参数与触变时间关系曲线。

### 3. 触变性在模型试验中的应用

#### 3.1. 半圆型防波堤模型设计

半圆型防波堤通常由半圆型拱圈和底板构成,建造于抛石基床上起阻浪、挡沙等作用的钢筋混凝土构件。在长江口深水航道治理二期工程中,受寒潮大浪的侵入、袭击,已安设完成的十多个防波堤结构中,部分产生了2~5m沉降,个别甚至滑移了近20m[18]。

上述工程地基土为强度很低的淤泥质黏土,利用与其物理力学性质相似的天津滨海新区软黏土,基于大比尺模型试验方法,模拟波浪荷载作用下软土地基上防波堤的实际工作状态,从而揭示波浪荷载-防波堤结构-软土地基交互作用的真实状况。由于室内模型试验存在缩尺效应,故室内试验中地基土强度需按照统一比例缩小,本次试验采用比例尺为1:5,先对其承载力进行缩尺计算,再反推模型地基土强度。图8为长江口深水航道二期工程半圆型防波堤断面示意图。

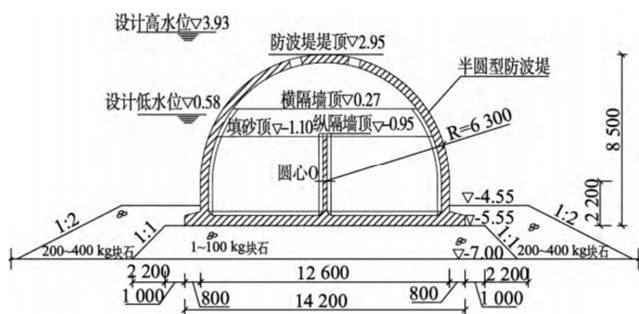


图8 半圆型防波堤断面图。

#### 3.2. 模型地基土强度验算

模型每米重量为9.45t,底部长为2.84m,宽度为4.12m。故模型基底平均压力为:

$$P_p = 9.45 \times 10^3 \times 10 / 4.12 = 22.94 \text{ kPa} \quad (3)$$

模型土为淤泥质粘土,黏聚力 $c=13.5 \text{ kPa}$ ,内摩擦角 $\varphi=12.5^\circ$ ,天然重度 $\gamma=16.9 \text{ kN/m}^3$ ,土粒比重 $G_s=2.72$ ,含水量 $w=50.5\%$ ,则浮重度为

$$r' = \frac{(G_s - 1)r}{G_s(1 + w)} = 7.10 \text{ kN/m}^3 \quad (4)$$

基础埋深 $d=4.12 \text{ m}$ ,水的容重 $\gamma_w=10 \text{ kN/m}^3$ ,基础宽度 $b=5 \text{ m}$ 。基础两侧荷载:

$$q = \gamma_w \times d = 41.2 \text{ kPa} \quad (5)$$

根据太沙基公式承载力系数表[19],当 $\varphi=12.5^\circ$ 时,查得承载力系数为: $N_c=11.0$ , $N_q=2.0$ , $N_r=1.1$ 。极限承载力为:

$$P_u = c N_c + q N_q + 1/2 r' b N_r = 250.425 \text{ kPa} \quad (6)$$

模型土的地基极限承载力为:

$$P_{um} = c N_{cm} + q N_{qm} + 1/2 r' b N_{rm} \quad (7)$$

式中: $N_{cm}$ 、 $N_{qm}$ 、 $N_{rm}$ 代表模型土的承载力系数。

根据库伦公式:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (8)$$

由于模型土近似为饱和软黏土,采用原位十字板试验, $\varphi=0^\circ$ ,则 $\tau_f=c$ 。查得承载力系数 $N_{cm}=5.7$ , $N_{qm}=1.0$ , $N_{rm}=0$ 。根据模型比尺设计,

$$P_{um} = P_u / \lambda = 250.425 / 5 = 50.09 \text{ kPa} \quad (9)$$

式中: $\lambda$ 为比尺系数。

试验中设计低水位1.51m,则

$$q = 10 \times 1.51 = 15.1 \text{ kPa} \quad (10)$$

模型土黏聚力:

$$c = (P_{um} - q) / N_{cm} = (50.09 - 15.1) / 5.7 = 6.1 \text{ kPa} \quad (11)$$

即原位十字板剪切强度 $\tau_f=6.1 \text{ kPa}$ 。

由太沙基极限承载力公式得到

$$P_u = c N_c + q N_q + 1/2 r' b N_r = 49.98 \text{ kPa} \quad (12)$$

安全系数 $K$ 取2.0,则有

$$[\sigma] = P_u / K = 24.99 \text{ kPa} > P_p = 22.94 \text{ kPa} \quad (13)$$

综上所述,只要模型土强度达到6kPa左右,即可满足模型试验对地基承载力的要求。由前文知,含水率35%重塑土静置15d的剪切强度为6.1kPa,符合试验要求。

#### 3.3. 触变性在模型地基土制作中应用

大比尺模型槽尺寸为长 $L=23 \text{ m}$ ,宽 $B=5 \text{ m}$ ,高 $H=4 \text{ m}$ ,实物图布置见图9。强度为6kPa的软黏土由4台泥浆制造机制作,每天出土量23m<sup>3</sup>左右。将搅拌均匀的土体通过运输斗移运到模型槽内,并对槽内地基土覆盖保湿。每置入半米人工抹平并用振动机振动密实,用米尺和激光水准仪相

结合进行土体高程定位，达到一定高度时埋入孔压计和土压计等传感器。每1m进行十字板测试，以确定土体强度是否满足要求，当造土达到设计标高后压实、抹平，最后覆盖土工布及塑料布保湿养护至规定时间。在地基土整个制备过程中充分利用土体自身触变性，使地基承载力达到设计要求，具体制作流程如图10所示。



图9 模型槽实物图。

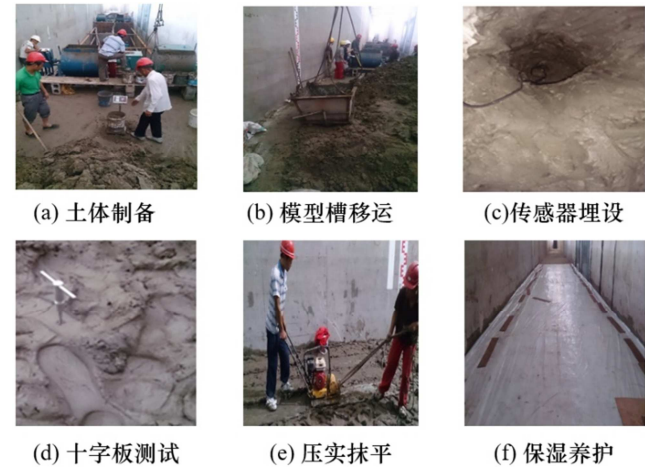


图10 地基土制备流程。

分别沿模型槽长度方向平均取五个点L1、L2、L3、L4、L5和宽度方向平均取三个点A、C、D作为十字板测试点，其中点L3与点C重合，具体点位布置如图11所示。沿模型槽长度方向分别对L1~L5五点的土体表层进行十字板剪切，测试结果见图12。

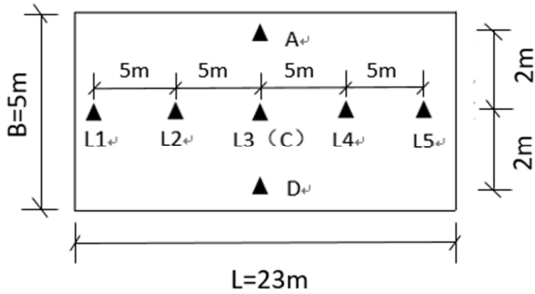


图11 十字板测试点示意图。

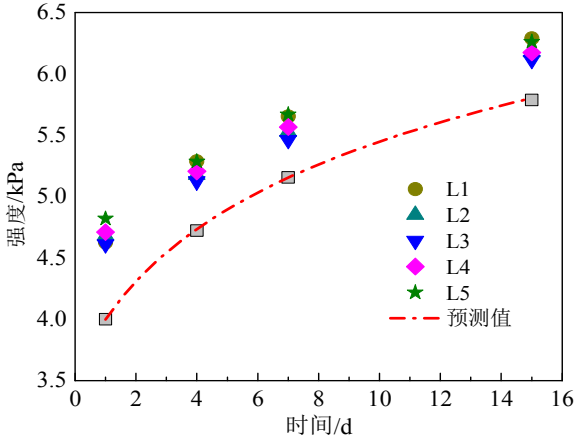


图12 土体强度随时间增长曲线。

从图12可以看出，各点处的土体强度变化趋势基本相同，均表现为前7d强度增长较快，7d后增长速率减缓。虽然实际强度值偏大，但计算结果与实测值整体较为接近，最大误差仅为0.625kPa，说明公式(1)能够较准确地预测土体强度变化情况。

土体静置15d后，沿模型槽宽度方向分别对A、C、D三个点不同深度（0cm、50cm、100cm、200cm）处的地基土进行十字板剪切，测试结果见图13。由图13可以看出，模型土强度随深度的增加而逐步增加，说明地基土总体上均匀性较好，强度亦满足要求。由于A、D两点位于边界处，地基土含水率略低于C点，造成强度偏高，表明边界强度一定程度上要高于中间强度。

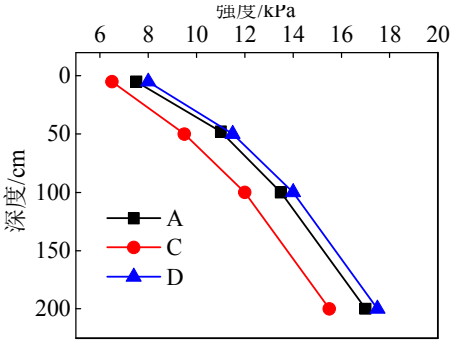


图13 土体强度随深度变化曲线。

3.4. 波浪载荷试验

造波装置采用活塞式推板造波机（自行研发），采用6台交流伺服电机（260kW）带动齿轮和齿条工作。造波试验时，在计算机中输入造波参数，采用标准正弦波加载，试验低水位1.51m、高水位2.19m，波高M为0.2m、0.4m，作用周期为3.5s。通过履带驱动直线运动单元带动推板在水中遵从设计好的规律路径运动，来实现所期望的波浪。

模型槽中土体的孔隙水压力和土压分别用微型BWMK系列的孔压传感器（P）和SJ-BW系列的土压力传感器(e)测得。由于采集数据较多，选择有代表性的4P01、4E01和4P08、4E05这两组数据进行分析，其中，4P01、4E01位于模型正下方0.1m，4P08、4E05位于模型正下方



1.2m, 传感器布设位置见图14。波高0.2m作用下不同设计水位时不同波高作用下孔压和土压变化过程如图16所示。水位的孔压和土压变化过程如图15所示, 设计水位2.19m

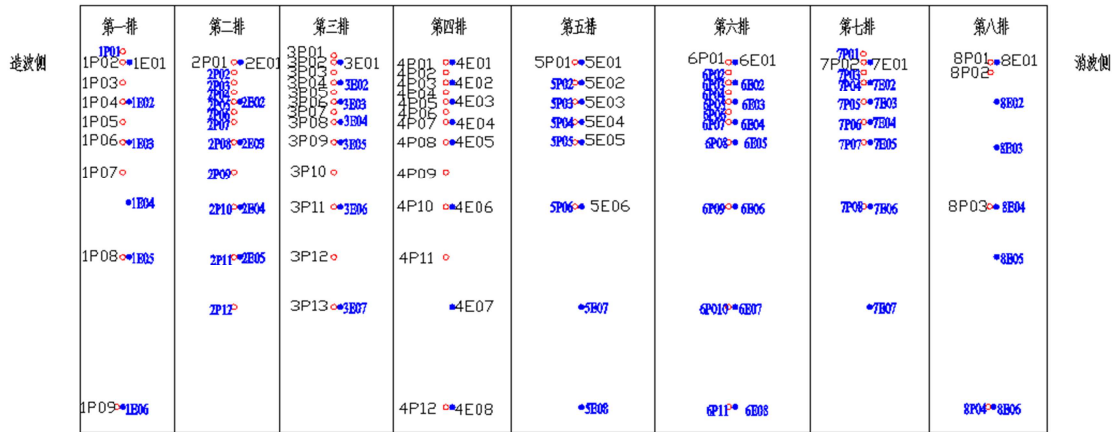
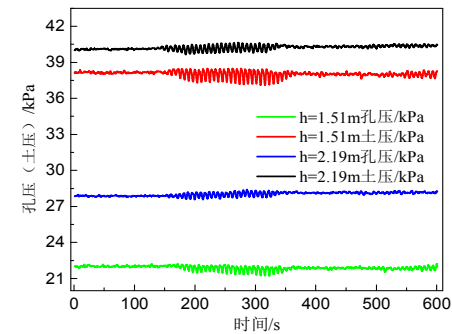
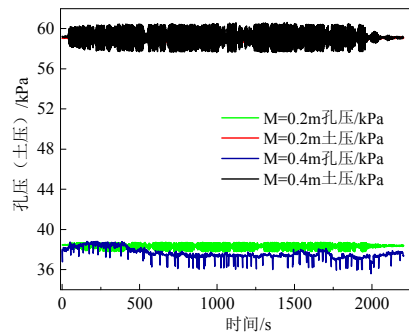


图14 孔压计、土压计布设图。

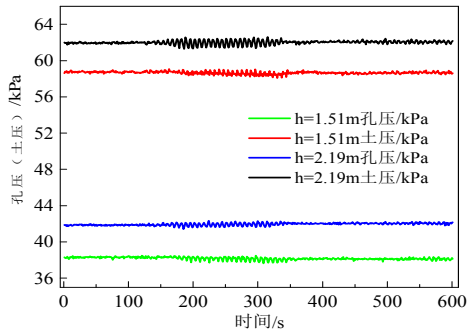


(a) 4P01、4E01



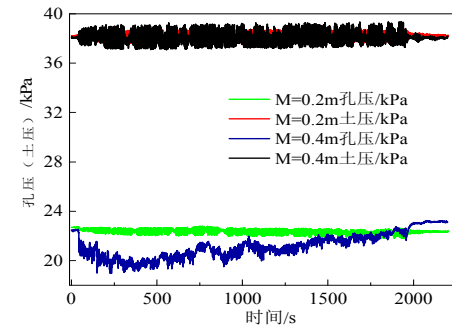
(b) 4P08、4E05

图16 不同波高作用下孔压和土压变化曲线。



(b) 4P08、4E05

图15 不同设计水位下孔压和土压变化曲线。



(a) 4P01、4E01

由图15可以看出, 在相同波高、周期的波浪荷载作用下, 孔隙水压力、土压力均随设计水深的增加而增加, 且当传感器埋置较深时, 其随时间的增长对波浪力的响应变小; 由图16可知, 在设计水位相同、波高不同的情况下, 波高的大小对土压影响不大。在波浪荷载循环作用下, 地基土表层土体孔压逐渐增长, 有效应力变小, 土骨架强度降低, 但深层土体的强度并未产生明显变化, 地基未发生失稳。这是因为利用触变性制备的地基土在施加荷载后部分发生固结, 孔隙比减小, 强度略有增大, 因而抵抗波浪荷载的能力有所增强; 此外, 受制于试验场地、外部条件等因素的影响, 自行研制造波机所制造波浪荷载的作用参数低于实际工程要求, 是造成地基未发生失稳破坏的主要原因。

#### 4. 结论

- (1) 随着含水率的不断增加, 软土触变强度增长幅度逐渐降低, 当含水率达到50%及以上时, 其强度基本保持稳定。基于试验数据分析, 构建了软土强度随触变时间变化的关系式。
- (2) 分级加载作用下, 压力的增加使土体强度都有所增长, 其中, 含水率30%、35%土样能够稳定加载至



15kPa,但随着含水率的增加往往伴随着较大变形或沉降,最终导致地基土发生失稳现象。

- (3) 随着触变时间的增长,土单元体空间由初期分散结构逐步演变为叠片支架结构,粒间接触由线面接触转为面面接触为主,颗粒定向排列趋势显著增强。土颗粒和孔隙的数量都在减少,此外,颗粒的等效直径、圆度、形态比增大,而孔隙的细观参数变化呈相反趋势。
- (4) 计算表明 $w=35\%$ 重塑土静置15d的触变强度,能够满足半圆型防波堤模型槽地基承载力要求,在此基础上,利用软土触变性制作模型地基土,均匀性效果较好。
- (5) 波浪荷载循环作用下,模型土孔压和土压力均随着设计水深的增加而增加。表层地基土的强度逐渐降低,而深层土体的强度并未产生改变,地基未产生失稳破坏,主要是由于模型波浪荷载作用参数低于实际工况所导致。

## 致谢

研究由国家自然科学基金项目(No. 42177119, 51978440);中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2232021A-07)资助。

## 参考文献

- [1] REN Y B, YANG S L, ZHANG S X, et al. Experimental study of the thixotropic strength recovery and microstructural evolution of marine clays [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2022, 148 (8): 04022059.
- [2] 王亮,曹玲珑,李磊,等.太湖与白马湖疏浚淤泥的触变特性研究[J].*工程地质学报*,2015,23(3):548-553.
- [3] PENG J, LUO S M, WANG D F, et al. Quantitative evaluation of thixotropy-governed microfabric evolution in soft clays [J]. *Applied Clay Science*, 2021, 210: 106157.
- [4] REN Y B, YANG S L, ANDERSEN K H, et al. Thixotropy of soft clay: A review [J]. *Engineering Geology*, 2021, 287: 106097.
- [5] 高彦斌,鲍文鹏,楼康明.上海地区第4层淤泥质黏土灵敏性试验与分析[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2015,43(1):140-145.
- [6] 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.
- [7] 张目极,殷建风,王巍,等.湛江组结构性黏土物理力学特性对其触变性的影响[J].*工程地质学报*,2021,29(4):1240-1246.
- [8] 汤斌,姚正,亢佳帅.扰动程度对湛江组结构性黏土触变性的影响[J].*科学技术与工程*,2021,21(21):9059-9066.
- [9] 张先伟,孔令伟,李峻,等.黏土触变过程中强度恢复的微观机制[J].*岩土工程学报*,2014,36(8):1407-1413.
- [10] ZHANG X W, KONG L W, YANG A W, et al. Thixotropic mechanism of clay: A microstructural investigation [J]. *Soils and Foundations*, 2017, 57 (1): 23-35.
- [11] 周建,龚晓南.循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J].*土木工程学报*,2000,33(5):75-78.
- [12] 闫澍旺,贾宵,孙立强.波浪荷载作用下软土强度软化的加固处理[J].*地震工程学报*,2014,36(3):452-456.
- [13] 霍海峰,齐麟,雷华阳,等.天津软黏土触变性的思考与试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2016,35(3):631-637.
- [14] GB/T50123-2019.土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [15] LIU C, SHI B, ZHOU J, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials [J]. *Applied Clay Science*, 2011, 54 (1): 97-106.
- [16] 陈剑平,刘经,王清,等.含水率对分散性土抗剪强度特性影响的微观解释[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2021,51(3):792-803.
- [17] 杨爱武,苟乐宇,张振东.循环荷载作用下结构性软土微结构演化特性试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2017,36(1):234-242.
- [18] 孙百顺,孟祥玮,戈龙仔,等.波浪作用下软土地基半圆型防波堤稳定性模型实验研究[J].*地震工程与工程振动*,2018,38(1):97-107.
- [19] 化建新,郑建国.工程地质手册(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.