

DOI: 10.11779/CJGE2019S1044

# 基于扰动状态概念理论的固化淤泥一维压缩模型

饶春义<sup>1,2</sup>, 朱剑锋<sup>\*</sup>, 潘斌杰<sup>1</sup>, 刘浩旭<sup>1</sup>, 周志军<sup>3</sup>

(1. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市镇海区人民政府蛟川街道办事处, 浙江 宁波 315211;  
3. 五邑大学土木建筑学院, 广东 江门 529020)

**摘要:** 采用低碳、环保的镁质水泥对淤泥进行固化处理, 研究了不同龄期下固化淤泥一维压缩特性。采用新型环刀制样方法, 开展了镁质水泥固化淤泥的一维压缩实验研究。结果表明: 固化淤泥的压缩曲线与结构性土变化趋势类似, 固化淤泥的  $\ln(1+e) - \lg\sigma'_v$  曲线存在一个明显的拐点 (结构屈服应力), 且随着龄期的增长, 固化淤泥的结构屈服应力逐渐增大。基于扰动状态概念理论, 提出了能反应固化淤泥强化与弱化并存的一维压缩模型, 试验验证了该模型可以较好预测任意龄期下固化淤泥的一维压缩特性。

**关键词:** 淤泥; 固化; 龄期; 一维压缩; 扰动状态概念

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)S1 - 0173 - 04

**作者简介:** 饶春义(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事软土加固技术研究。E-mail: raochunyi@sina.com。

## One-dimensional compression model for solidified silt based on theory of disturbed state concept

RAO Chun-yi<sup>1,2</sup>, ZHU Jian-feng<sup>1</sup>, PAN Bin-jie<sup>1</sup>, LIU Hao-xu<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-jun<sup>3</sup>

(1. Faculty of Architectural Civil Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Jiaochuan Street Office of the People's Government of Zhenhai District, Ningbo 315211, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

**Abstract:** The low-carbon, environmental-friendly magnesia cement is used to solidify the silt, and the compression characteristics of the solidified silt at different ages are investigated based on the one-dimensional compression tests. A series of one-dimensional compression tests on the magnesia cement-cured silt under different curing ages are carried out using a new ring knife sample preparation method. It is found that there exists an obvious inflection point, structural yield stress, on the  $\ln(1+e) - \lg\sigma'_v$  curve, which is similar to structural soils. Moreover, the structural yield stress of the solidified silt increases gradually with the increase of the curing age. Furthermore, an one-dimensional compression model to characterize the strengthening and weakening properties coexisted in the magnesia cement-solidified silt is proposed based on the concept of disturbed state. The experimental results show that the proposed model can reproduce well the one-dimensional compression characteristics of the solidified silt at any age.

**Key words:** silt; solidification; age; one-dimensional compression; disturbance state concept

## 0 引 言

疏浚工程及港口建设中产生的大量疏浚淤泥通常具有孔隙比大、压缩性高、强度低的特点, 必须对其处理才能用于实际工程<sup>[1]</sup>。近年来, 淤泥固化技术在水泥土搅拌桩、地基处理等工程中得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。固化淤泥随着龄期的增长通常会表现出一定的结构性<sup>[3-5]</sup>, 目前关于固化淤泥结构压缩性的研究引起了学者们浓厚的兴趣: 丁建文等<sup>[3]</sup>通过一维压缩试验发现固化淤泥存在明显的结构屈服点, 固结应力超过该屈服点后固化淤泥的变形急剧增大。王宏伟等<sup>[4]</sup>发现固化淤泥结构的形成与 MgO 的掺量有关, 且屈服后压缩指数显著增大。黄英豪等<sup>[5]</sup>发现固化淤泥的结构屈

服应力与龄期、初始含水率有关。

固化淤泥的强度和刚度随着龄期的增加逐渐增长<sup>[1-2]</sup>, 同时, 在外荷载作用下固化淤泥又可能因其结构性破坏而弱化<sup>[6]</sup>。针对固化淤泥这种新型材料的强化与弱化共存的特点, 传统的损失理论显得无能为力。Desai 提出的扰动状态概念理论<sup>[7-8]</sup> (disturbed state concept, 简称 DSC) 认为, 在任意变形阶段材料单元可以认为是相对完整 (relative intact, RI) 和完全调整

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY17E080006); 国家自然科学基金项目 (51879133; 51409142); 宁波市自然科学基金项目 (2017A610307); 广东高校优秀青年创新人才培养计划项目 (2012CYM\_0128)

收稿日期: 2019 - 04 - 30

\*通讯作者 (E-mail: zhujianfeng0811@163.com)

(fully adjustment, FA) 确定的混合体。由于扰动, 材料内部的微观结构从最初 RI 状态, 经过一个自调整过程, 达到最终的 FA 状态。在这种自调整过程中, 材料有可能产生损伤, 也有可能得到强化, 从而为描述材料损伤与强化共存的现象提供了新途径。本文采用镁质水泥<sup>[9]</sup>作为主固化剂对淤泥进行加固处理, 研究不同龄期下的淤泥其一维压缩性变化规律, 建立基于 DSC 理论的固化淤泥一维压缩模型。

## 1 试验条件

### 1.1 试验材料

选用宁波②<sub>2-2</sub>层淤泥质黏土为试验用土<sup>[10]</sup>, 将淤泥土烘干、碾碎、过 2 mm 筛, 试验采用镁质水泥作为主固化剂<sup>[10]</sup>(主要成分为 MgO、MgSO<sub>4</sub>、柠檬酸和水), 外掺剂为硅灰、熟料和水玻璃。

### 1.2 固化淤泥的制备方法

按配比称取土样、镁质水泥、外掺剂、水, 控制湿土的含水率为 50%, 固化剂质量与湿土的质量比为 15%。试样的龄期( $T$ )分别为 7, 14, 21, 28 d。为消除固化过程中试样体缩的影响, 首先采用直径为 75 mm, 高度为 40 mm 的圆柱体试样, 并将其置于空气中养护到设定龄期后, 用环刀(直径 61.8 mm、高度 20 mm)压入该圆柱体制作一维压缩试样。

### 1.3 试验仪器和试验过程

试验采用 WG-1B 型三联中压固结仪, 每组固化时间做 4 个试样进行平行试验。试验时, 分别在 0, 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa 下进行加载, 每级压力稳定时间为 24 h。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 重塑土一维压缩曲线

通过室内一维压缩试验, 获得重塑土  $e^* - \lg \sigma'_v$  曲线见下图 1。对图 1 中所示孔隙比( $e^*$ )随固结应力( $\sigma'_v$ )的变化规律进行拟合可得

$$e^* = e_0 - a \lg \sigma'_v \quad (1)$$

式中,  $e_0$  为重塑土的初始孔隙比,  $a$  为与颗粒级配、含水率等相关的模型参数。

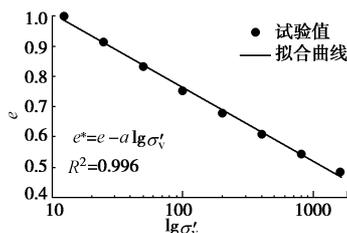


图 1 重塑土的压缩曲线

Fig. 1 Compression curve of remolded soil

### 2.2 结构屈服应力

Butterfield<sup>[11]</sup>通过试验结果发现  $\ln(1+e) - \lg \sigma'_v$  可

以用两条直线进行拟合(见下图 2), 且两条直线的交点即为固化淤泥的结构屈服应力( $\sigma'_{vy}$ )<sup>[3-5]</sup>。不同  $T$  下的  $\sigma'_{vy}$  见下图 3, 对其进行拟合可得

$$\sigma'_{vy} = \sigma'_{vy0} (1 + bT/7) \quad (2)$$

式中,  $\sigma'_{vy0}$  是固化淤泥的初始屈服应力(理论上  $T=0$  时,  $\sigma'_{vy0}=0$ ), 然而由于试验因素,  $\sigma'_{vy0}$  通常略大于 0,  $b$  为与水泥掺量、含水率等相关的模型参数。

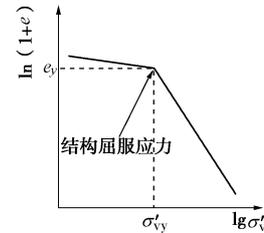


图 2 固化淤泥结构屈服应力

Fig. 2 Structural yield stress of solidified silt

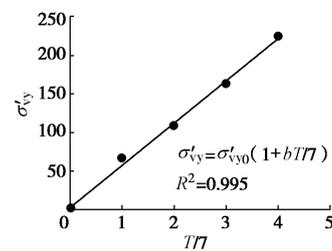


图 3  $\sigma'_{vy} - T$  关系示意图

Fig. 3 Relationship between structural yield stress and age

### 2.3 附加孔隙比 $\Delta e_y$

如图 4 所示, 固化淤泥的附加孔隙比  $\Delta e_y$  为  $e_0 - \lg \sigma'_v$  曲线中固结应力达到  $\sigma'_{vy}$  时对应的固化淤泥孔隙比与重塑土的孔隙比之差。结合 Leroueil 等<sup>[12]</sup>研究发现,  $\Delta e_y$  与  $\lg(S_\sigma)$  之间存在如图 5 所示线性关系, 于是

$$\Delta e_y = d \lg(S_\sigma) \quad (3)$$

式中  $S_\sigma$  为应力灵敏度, 且  $S_\sigma = \sigma'_{vy} / \sigma'_{ve}$ ;  $\sigma'_{ve}$  为  $e_y$  对应的重塑土样的固结应力,  $e_y$  为  $\sigma'_v = \sigma'_{vy}$  时的孔隙比;  $d$  为与固化剂掺量、含水率等相关的模型参数。

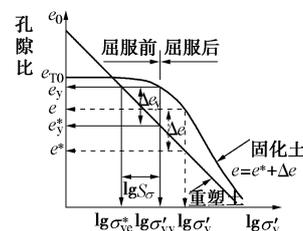


图 4 固化淤泥一维压缩曲线

Fig. 4 One-dimensional compression curves of solidified silt

## 3 基于 DSC 理论固化淤泥一维压缩模型

### 3.1 扰动函数

由前述试验结果易知, 随着固结应力( $\sigma'_v$ )的增加, 固化淤泥的强度受结构性的影响越来越弱。当

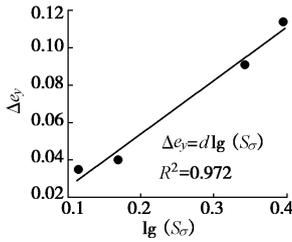


图 5  $\Delta e_y$  与  $\lg(S_\sigma)$  的关系

Fig. 5 Relationship between  $\Delta e_y$  and  $\lg(S_\sigma)$

$\sigma'_v > \sigma'_{vy}$  时, 固化淤泥的强度衰减速度显著增加, 变形突然增大。因此固化淤泥的扰动函数应与  $\sigma'_{vy}$  和加载应力相关, 参考Liu等<sup>[8]</sup>提出的结构性土体的扰动模型, 建立如下所示的固化淤泥扰动函数:

$$D_{ev} = 1 + \chi \left( \frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v} \right)^\xi, \quad (4)$$

式中,  $\chi$  为描述结构性土体压缩破坏的参数, 且  $\chi = \Delta e_y / e^*$ ,  $\xi$  为固化淤泥的破损指数。

### 3.2 固化淤泥的一维扰动压缩模型

由图 4 可知, 固化淤泥的变形可分为屈服前和屈服后两个阶段, 屈服前的固化淤泥只发生弹性变形, 当  $\sigma'_v > \sigma'_{vy}$  时发生塑性变形, 结构开始破坏。根据 DSC 理论, 可得<sup>[8]</sup>

$$d\varepsilon_v^a = \begin{cases} d\varepsilon_v^i & \sigma'_v < \sigma'_{vy} \\ \left[ 1 + \chi \left( \frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v} \right)^\xi \right] d\varepsilon_v^c & \sigma'_v \geq \sigma'_{vy} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $d\varepsilon_v^a$  表示固化淤泥的体应变增量;  $d\varepsilon_v^i$  与  $d\varepsilon_v^c$  分别表示处于 RI 状态和 FA 状态 (重塑土) 时固化淤泥的体应变增量。当固结应力小于结构屈服应力时, 固化淤泥的塑性应变为 0,  $d\varepsilon_v^a$  只有弹性应变, 于是

$$d\varepsilon_v^a = \begin{cases} \frac{\kappa^*}{1+e} \left( \frac{d\sigma'_v}{\sigma'_v} \right) & \sigma'_v < \sigma'_{vy} \\ \frac{\lambda^*}{1+e} \left[ 1 + \chi \left( \frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v} \right)^\xi \right] \left( \frac{d\sigma'_v}{\sigma'_v} \right) & \sigma'_v \geq \sigma'_{vy} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  分别是重塑土的回弹指数和压缩指数,  $e$  为固化淤泥的当前孔隙比。由式 (6) 可知, 固化淤泥屈服前的变形处于弹性阶段,  $e - \lg(\sigma'_v)$  呈下述直线关系:

$$e = e_{T0} - k \lg \sigma'_v \quad (\sigma'_v < \sigma'_{vy}), \quad (7)$$

式中,  $e_{T0}$  为不同龄期下固化淤泥的初始孔隙比,  $k$  是固化淤泥在  $e - \lg(\sigma'_v)$  曲线中弹性阶段的斜率。计算屈服后固化淤泥的变形, 采用描述固化淤泥结构性影响的附加孔隙比 ( $\Delta e$ ), 并定义  $e = e^* + \Delta e$ 。于是, 固化淤泥屈服后的  $e$  可表示为

$$e = e^* + \Delta e = e^* + \Delta e_y \left( \frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v} \right)^\xi \quad \sigma'_v \geq \sigma'_{vy} \quad (8)$$

将式 (1), (2), (3) 代入式 (8) 可得

$$e = e_0 - a \lg \sigma'_v + [d \lg S(\sigma)] \left[ \frac{\sigma'_{vy0} (1+bT/7)}{\sigma'_v} \right]^\xi, \quad (9)$$

其中,  $\xi$  为固化淤泥的破损指数, 可通过拟合屈服后阶段的压缩曲线获得。如图 6 所示,  $\xi$  与  $T$  的关系为

$$\xi = f - gT/7, \quad (10)$$

其中,  $f$  和  $g$  为模型参数。将式 (10) 代入式 (9) 可得

$$e = e_0 - a \lg \sigma'_v + [d \lg S(\sigma)] \left( \frac{\sigma'_{vy0} (1+bT/7)}{\sigma'_v} \right)^{f-gT/7} \quad (11)$$

于是基于 DCS 理论的固化淤泥一维压缩模型为

$$d\varepsilon_v^a = \begin{cases} \frac{\kappa^*}{1+e_0 - k \lg \sigma'_v} \left( \frac{d\sigma'_v}{\sigma'_v} \right) & \sigma'_v < \sigma'_{vy} \\ \frac{\lambda^*}{1+e_0 - a \lg \sigma'_v + [d \lg S(\sigma)] \left( \frac{\sigma'_{vy0} (1+bT/7)}{\sigma'_v} \right)^{f-gT/7}} \left[ \left( 1 + \chi \left( \frac{\sigma'_{vy0} (1+bT/7)}{\sigma'_v} \right)^{f-gT/7} \right) \left( \frac{d\sigma'_v}{\sigma'_v} \right) \right] & \sigma'_v \geq \sigma'_{vy} \end{cases} \quad (12)$$

其中, 模型参数  $\lambda^*$ ,  $\kappa^*$  可通过重塑土的一维压缩试验与回弹试验确定,  $a, b, d, f, g, k$  为模型参数, 可通过不同龄期的固化淤泥的一维压缩试验确定。

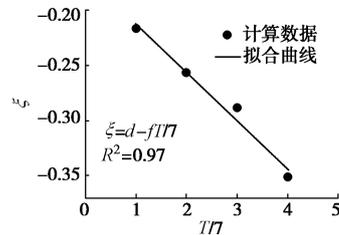


图 6 破损指数与龄期的关系

Fig. 6 Relationship between breakage index and age

### 3.3 模型验证

为验证本文基于 DSC 理论固化淤泥一维压缩模型的可行性, 现选取宁波地铁某基坑项目的淤泥质黏土 (②<sub>2-2</sub>层) 为试验用土, 并采用镁质水泥复合固化剂对其进行固化处理, 养护到不同龄期, 然后开展一维压缩试验, 模型参数见表 1。通过式 (12) 预测不同龄期下固化淤泥的  $e - \lg \sigma'_v$  曲线如图 7 所示。

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of model						
$a$	$b$	$d$	$f$	$g$	$\lambda^*$	$\kappa^*$
0.245	54.7	0.2489	-0.169	-0.044	0.165	0.026

由图 7 可知, 任意龄期下采用本文模型预测结果均与一维压缩试验结果一致, 因此本文基于 DSC 理论的固化淤泥一维压缩模型是可行的。

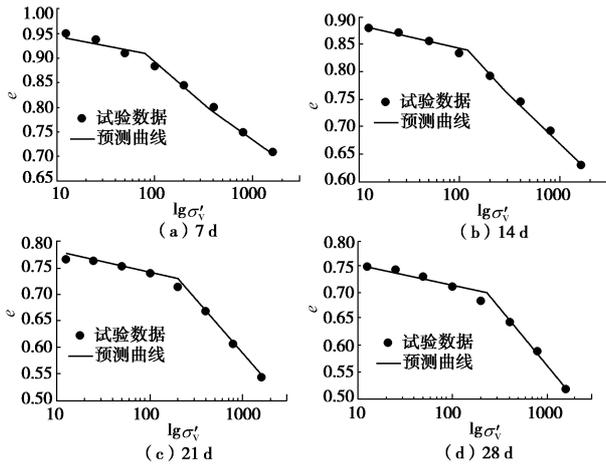


图7 不同龄期下固化淤泥的  $e - \lg \sigma'_v$  曲线试验值与预测值

Fig. 7 Test and predicted  $e - \lg \sigma'_v$  curves at different ages

## 4 结 论

(1) 不同龄期下固化淤泥的一维压缩试验结果表明: 随着龄期的增长, 破损指数逐渐减小, 固化淤泥由塑性材料逐渐变成脆性材料, 与结构性土体相似, 固化淤泥存在结构屈服应力( $\sigma'_{vy}$ ), 超过 $\sigma'_{vy}$ 时试样破坏速度加快, 且 $\sigma'_{vy}$ 随着龄期近似呈线性增加。

(2) 以重塑土的压缩特性作为参考, 通过引入附加孔隙比( $\Delta e_v$ )反映结构性对固化淤泥压缩特性的影响, 建立了 $\Delta e_v$ 与应力灵敏度之间的函数关系。

(3) 基于DSC理论, 综合考虑 $\sigma'_{vy}$ ,  $\Delta e_v$ 等参数的影响, 建立了固化淤泥一维压缩模型。该模型能同时描述固化淤泥随龄期强化与受荷超过 $\sigma'_{vy}$ 后的弱化现象。算例验证表明: 该模型可很好预测不同龄期下固化淤泥的一维压缩特性, 且模型参数均可通过一维压缩试验进行测定, 可在淤泥固化工程中推广应用。

## 参考文献:

- [1] 丁建文, 张 帅, 洪振舜, 等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2817 - 2822. (DING Jian-wen, ZHANG Shuai, HONG Zhen-shun, et al. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2817 - 2822. (in Chinese))
- [2] 徐日庆, 邵玉芳. 温州半岛工程海堤淤泥质地基加固试验研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, **31**(4): 475 - 478. (XU Ri-qing, SHAO Yu-fang. Experimental study on treating the silty foundation of sea dike in Wenzhou Peninsula construction project[J]. Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci), 2005, **31**(4): 475 - 478. (in Chinese))
- [3] 丁建文, 吴学春, 李 辉, 等. 疏浚淤泥固化土的压缩特性与结构屈服应力[J]. 工程地质学报, 2012, **20**(4): 627 - 632. (DING Jian-wen, WU Xue-chun, LI Hui, et al. Compression properties and structure yield stress for solidified soil composing of dredged clays[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(4): 627 - 632. (in Chinese))
- [4] 王宏伟, 王东星, 贺 扬. MgO 改性淤泥固化土压缩特性试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, **48**(8): 2133 - 2141. (WANG Hong-wei, WANG Dong-xing, HE Yang. Experimental study on compressibility behavior of solidified dredged sludge with reactive MgO[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, **48**(8): 2133 - 2141. (in Chinese))
- [5] 黄英豪, 朱 伟, 周宣兆, 等. 固化淤泥压缩特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(10): 2923 - 2928. (HUANG Ying-hao, ZHU Wei, ZHOU Xuan-zhao, et al. Experimental study of compressibility behavior of solidified dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(10): 2923 - 2928. (in Chinese))
- [6] HORPIBULSUK S, LIU M D, LIYANAPATHIRANA D S, et al. Behaviour of cemented clay simulated via the theoretical framework of the Structured Cam Clay model[J]. Computers and Geotechnics, 2010, **37**: 1-9.
- [7] 朱剑锋, 徐日庆. 考虑扰动影响修正 Duncan-Chang 模型的二次开发[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 1): 84 - 88. (ZHU Jian-feng, XU Ri-qing. Secondary development of modified Duncan-Chang model considering disturbance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 84 - 88. (in Chinese))
- [8] LIU M D, CARTER J P, DESAI C S, et al. Analysis of the compression of structured soils using the disturbed state concept[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, **24**: 723 - 735.
- [9] UNLUER C, AL-TABBAA A. Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements[J]. Cement and Concrete Research, 2013, **54**: 87 - 97.
- [10] 朱剑锋, 饶春义, 虞秋水, 等. 硫氧镁水泥复合固化剂加固淤泥质土的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 1): 3206 - 3213. (ZHU Jian-feng, RAO Chun-yi, TUO Qiu-shui, et al. Experimental study on the properties of the organic soil solidified by the composite magnesium oxysulfate cement-curing agent[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S1): 3206 - 3213. (in Chinese))
- [11] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils[J]. Géotechnique, 1979, **29**(4): 469 - 480.
- [12] LEROUEIL S, TAVENAS F, LE BIHAN J P. Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, **20**: 681 - 705.

(责编: 明经平)