

# 太湖湖沼相天然沉积土结构性评价

刘维正, 石名磊, 缪林昌

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 天然沉积土由于结构性的影响, 通常具有与相应重塑样截然不同的力学性质。利用重塑土的固有特性作为评价参考基准, 通过对太湖湖沼相典型沉积土的原状样和重塑样的固结压缩试验, 从压缩特性方面探讨了如何评价土结构性对天然沉积土力学性状的影响。试验结果表明: 土体结构性使天然土体具有的结构屈服应力对其变形性状起控制作用, 屈服应力比  $YSR$  可判断土结构性的强弱; 并与度量原位状态土体结构性抗力的应力灵敏度  $S_\sigma$ 、衡量土的结构性对变形影响的稳定指数  $SI$  结合起来, 作为定量分析和评价土结构性影响的指标; 评价指标揭示出太湖湖沼相天然沉积土在沉积过程以及沉积后受到土结构性的影响, 具有高位结构性。同时试验结果验证了该评价方法能够适合具有不同结构形式的天然状态土体。

**关键词:** 土结构性; 结构屈服应力; 应力灵敏度; 稳定指数

**中图分类号:** TU471      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2010)10-1616-05

**作者简介:** 刘维正(1982-), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 从事软黏土力学与地基处理研究。E-mail: [lwzseu@126.com](mailto:lwzseu@126.com)。

## Evaluation of soil structural characteristics of Taihu lacustrine-swamp natural sedimentary soils

LIU Wei-zheng, SHI Ming-lei, Miao Lin-chang

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The mechanical properties of natural sedimentary soils evidently differ from those of corresponding reconstituted clays due to the influence of soil structure. Using the intrinsic characteristics of reconstituted clays as a basic evaluation frame for describing the corresponding characteristics of natural sedimentary soils, the effect of soil structure on the compressibility of typical Taihu swamp natural sedimentary soils is assessed through comparative tests on the compressibility of undisturbed and reconstituted soil samples. The test results indicate that the structural yield stress arising from extra structural strength controls the deformation properties of natural intact soils, and the yield stress ratio may be regarded as a structural parameter to assess the influence of the natural soil structure. A simple evaluation system is described, which combines the stress sensitivity ( $S_\sigma$ ) used to reflect the structural resistance of soil to the in-situ consolidation stress with the stability index accounting for the degree of metastability and yield stress ratio. This system enables the mechanical consequences of soil structure that controls the behavior of natural sediments to be quantitatively analyzed and evaluated. The analysis shows that Taihu lacustrine-swamp natural sedimentary soils are subjected to the effects of soil structure during their depositional and post-depositional processes and have a high level of sensitivity and strong structural resistance. Moreover, the result proves that the evaluation method is suitable for natural deposits with various soil structure.

**Key words:** soil structure; structural yield stress; stress sensitivity; stability index

## 0 引 言

由于在沉积过程和沉积后受不同的地质条件、沉积环境、触变硬化、时间效应、淋溶和物理化学胶结作用等多种因素共同的影响, 天然沉积土是一种的复杂工程材料, 具有与相应重塑土截然不同的力学特性<sup>[1-3]</sup>。而那些致使原状土力学特性不同于相应重塑土的复杂因素被简单而通常地归结为土结构性的影响<sup>[1-2]</sup>。许多研究指出, 土结构性导致了不能为孔隙比和应

力历史所解释的屈服前的高刚度与强度, 较高的屈服应力和一定脆性(亚稳定性)。因此, 土结构性和初始孔隙比、应力历史一样, 对土体力学性状的确定具有同样的重要性<sup>[3]</sup>; 沈珠江院士<sup>[4]</sup>更是指出土的结构模型建立的建立是“21世纪土力学的核心问题”。

天然沉积土因地质成因、赋存规律和组成成分等

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50578036); 江苏省交通科学研究计划项目(06y015)

**收稿日期:** 2009-09-14

差异, 其结构性强弱表现出显著的时空变异性 and 区域性, 诸如 London 黏土、Boston 蓝黏土、挪威 Dramman 黏土、加拿大 Leda 和 Champlain 黏土、日本 Ariake 黏土、温州黏土、湛江黏土和连云港软黏土等。这些黏土虽有共性, 但其个性对区域工程建设影响更为重要。因此, 分别开展针对各种区域性土结构性的评价, 是土力学理论研究的需要, 也是正确认识天然沉积土工程特性重要途径之一。

长江三角洲南侧太湖边湖沼积平原工程地质区, 与长江口陆上三角洲平原比邻, 沉积物的生成历史与过程受到长江口演变的影响, 软弱土层一般与透水性、半透水性土层呈互层分布。目前, 关于长江口北侧海陆交互天然沉积土结构性评价, 已有初步研究成果<sup>[5]</sup>。本文以太湖湖沼相典型沉积物为主要研究对象, 开展一些针对性的试验研究, 主要从压缩特性方面对天然沉积土结构性的评价进行探讨。

### 1 土样特性

在太湖边湖沼相区域的宁常高速选取 5 个代表性断面, 钻孔编号依次为 NC1、NC2、NC3、NC4 和 NC5。其中, 软土取样分别采用内径为 75 mm、长 50 cm 或 30 cm 的不锈钢管薄壁取土器和内径为 100 mm、长 30 cm 的 PVC 管薄壁取土器, 尽量减小土样扰动; 土质良好的硬黏土则采用普通的取土器。图 1 为所有土样的塑性图。由图可见, 不同土样由于深度不同, 塑性指数变化范围很大, 但基本上位于 A 线之上, B 线以左。

本文针对性地挑选出典型的粉质黏土和黏土进行研究。图 2 为这些不同深度土样的一些基本性质剖面图。深度 4~16 m 为粉质黏土: 孔隙比均大于 1.0; 天然含水率大于液限, 含水比均在 1.0 以上; 但有较高不排水强度, 在 50 kPa 左右。4 m 以上和 16~27 m 为黏土层, 液限相对较大; 天然含水率接近或小于液限, 含水比在 0.8~1.0 之间。

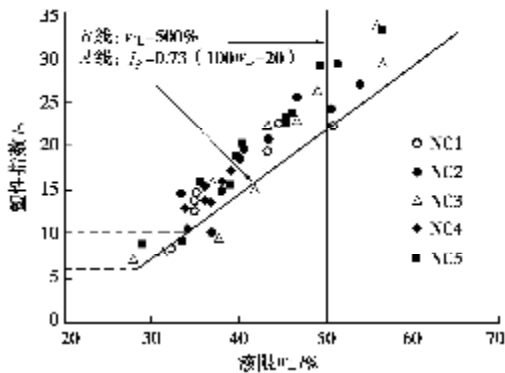


图 1 土样的塑性图

Fig. 1 Plasticity of sedimentary soils

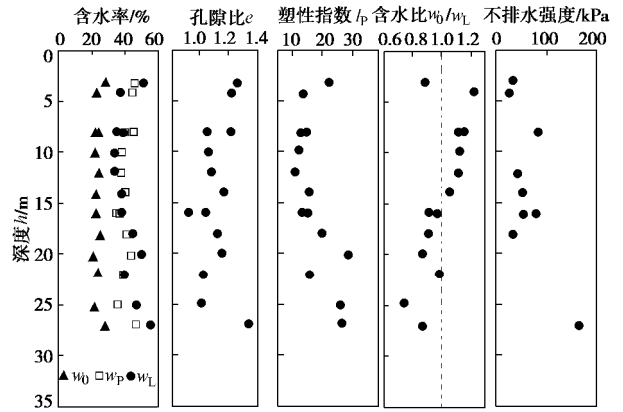


图 2 (粉质) 黏土层基本性质剖面图

Fig. 2 Soil profile with basic properties of (silty) clays

### 2 评价参考基准

天然土体的结构性评价研究大都是建立在与相应重塑样对比分析基础上的。在 1990 的朗肯讲座中, Burland 采用归一化孔隙指数  $I_v$  将初始含水率为 1.0~1.5 倍液限含水率重塑黏土的  $e - \lg s_v$  压缩曲线归一化为一条固有压缩曲线 (ICL), 为理解和解释天然状态土体的压缩特性提供了一个有价值的参考体系。孔隙指数  $I_v$  和 ICL 的定义分别为

$$I_v = (e - e_{100}^*) / (e_{100}^* - e_{1000}^*) = (e - e_{100}^*) / C_c^* \quad (1)$$

$$I_v = 2.45 - 1.285 \lg s_v + 0.015 (\lg s_v)^3 \quad (2)$$

式中,  $e$  为固结压力  $s_v$  (kPa) 下的孔隙比,  $e_{100}^*$ ,  $e_{1000}^*$  分别为重塑土一维压缩试验中对应于外加压力为 100 kPa 及 1000 kPa 时的孔隙比,  $C_c^*$  为固有压缩指数。

因此, 当获得某重塑土的室内  $e - \lg s_v$  压缩曲线后, 就可通过式 (1) 计算得到 ICL。当重塑土的固结试验数据欠缺时, Burland<sup>[3]</sup> 建议用下列经验公式计算  $e_{100}^*$  和  $C_c^*$ :

$$e_{100}^* = 0.109 + 0.679e_L - 0.089e_L^2 + 0.016e_L^3 \quad (3)$$

$$C_c^* = 0.256e_L - 0.04 \quad (4)$$

式中,  $e_L$  为对应于液限的孔隙比,  $e_L = G_s w_L$ 。同时, Burland 指出经验公式 (3) 和 (4) 适用的范围为液限  $w_L$  在 25%~160% 之间, 且在塑性图 A 线以上。

为验证 Burland 提出的 ICL 对太湖湖沼相沉积土的适用性, 本文制备了一些重塑样, 并进行了一维压缩试验。采用上述孔隙指数  $I_v$ , 根据式 (1) 对重塑状态压缩试验数据进行归一化分析, 参见图 3。可以看出, 起始两级荷载除外, 太湖湖沼相不同性质重塑土的归一化压缩曲线与 Burland 的固有压缩曲线 (ICL) 基本吻合。因此, 当该区域性黏性土的重塑样数据缺失时, 可采用 ICL 进行代替; 同时也表明了 ICL 为该区域性天然黏性土结构性评价提供良好的参考体系。下述的评价研究正是基于 ICL 开展的。

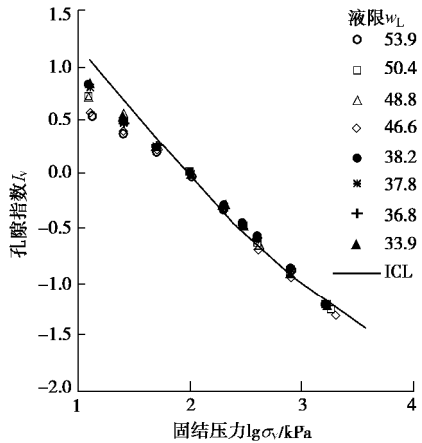


图3 太湖湖沼相重塑状态黏性土归一化压缩曲线  
Fig. 3 Normalized compression curve of remolded clays

### 3 定性评价

与绘制ICL相似, Burland 将某一种黏土不同深度土样的天然孔隙比 $e$ 也用孔隙指数  $I_v$  归一化, 发现不同天然沉积土可被较好地归一至一条曲线附近, 并称之为沉积压缩曲线 (SCL)。SCL位于ICL上方, 在常规应力范围内 (100~1000 kPa) 基本平行于ICL, 且在相同的孔隙指数下, 天然土所能承担的有效上覆压力大约是重塑土的5倍。

本文根据天然孔隙指数  $I_{v0}$  与固有压缩曲线 ICL 和沉积压缩曲线 SCL 的位置定性评价土结构性。图4为太湖湖沼相典型沉积土的  $I_{v0}$  与有效应力的关系。可以看出, 不仅所有的原位孔隙指数  $I_{v0}$  均位于 ICL 上方, 而且大部分土样位于普通黏性土的天然沉积曲线 SCL 上方。由此表明, 该区域沉积土的原位状态具有强的结构性, 有着高的灵敏度, 可以预示其力学性状与重塑土有着根本性的区别。

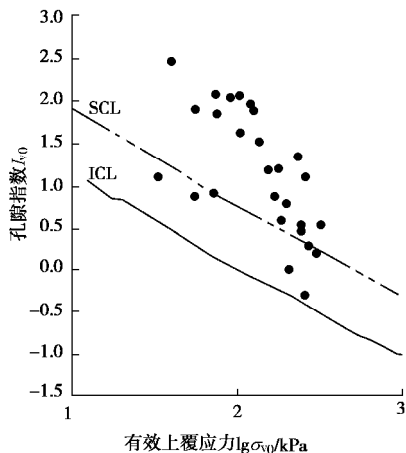


图4 原位孔隙指数与有效上覆应力的关系  
Fig. 4 Relationship between in-situ void index and effective overburden pressure

## 4 定量评价

### 4.1 屈服应力比 YSR

对于结构性土, 结构屈服应力是一个重要的参数。结构性土在屈服前阶段与屈服后阶段力学性质差异显著: 压缩曲线初始段很平缓; 当压力超过结构屈服应力时, 土结构大量破损, 出现陡降段, 并向重塑土的压缩曲线靠近。因此, 天然土体的变形特性均受此参数控制, 结构屈服应力可作为评价土结构性强弱的一个参数。

有研究者指出<sup>[6-7]</sup>: 采用双对数坐标方法 ( $\ln(1+e) - \lg s'_v$ ), 能较好地用两直线段对压缩试验数据进行描述, 且两直线的交点就是结构屈服应力。鉴于该方法的合理性和简便性, 还能减小人为因素对结果的影响。本文采用该方法确定结构屈服应力, 代表性结果参见图5。

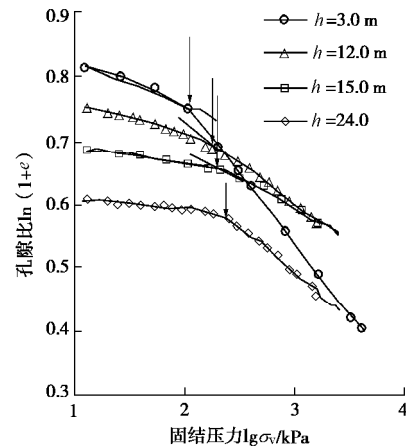


图5 不同深度土样的结构屈服应力

Fig. 5 Structural yield stress of clays at different depths

针对不同类型的沉积土, 可用归一化指标——屈服应力比 YSR (结构屈服应力与自重应力的比值) 来判定结构性的强弱。因此, 根据上述确定的结构屈服应力, 得到太湖湖沼相天然沉积粉质黏土、黏土的 YSR 分布范围为 1.2~3.7, 参见表 1。参照 YSR=1 时为弱结构性土, 可知该区域典型沉积土为 (较) 强结构性土。

### 4.2 应力灵敏度 $S_e$

Skempton<sup>[8]</sup>发现不同灵敏度的天然正常固结黏土的压缩曲线在  $I_L - \lg s'_v$  坐标内大致是平行的, 且灵敏度低的压缩曲线位于区域左侧, 灵敏度高的位于右侧。由此可见, 灵敏度可以作为表征土结构性对压缩特性影响的一个定量参数。

Chandler<sup>[9]</sup>将压缩曲线用  $I_v - \lg s'_v$  表示, 提出了应力灵敏度的概念, 定义为同一  $I_{vy}$  ( $e_y$ ) 下结构屈服应力  $s'_{vy}$  与等效的固有竖向有效应力  $s'_{ve}$  之比, 参见图6, 表达式为

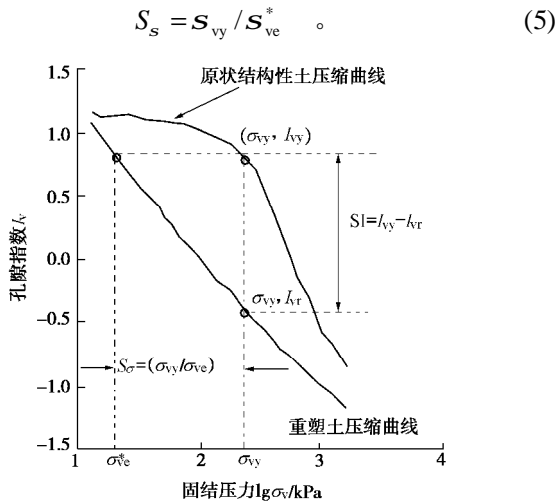


图 6 应力灵敏度  $S_\sigma$  和稳定指数 SI 定义示意图

Fig. 6 Definition of stress sensitivity and stability index

当  $I_{vy} (e_y)$  确定后,  $s_{ve}^*$  可通过式 (2) 反算得到。对于完全重塑土, 应力灵敏度  $S_\sigma$  为 1, 压缩曲线为 ICL; 而 SCL 的应力灵敏度  $S_\sigma=5$ 。因此, 应力灵敏度  $S_\sigma$  的大小可反映出土结构性的强弱。

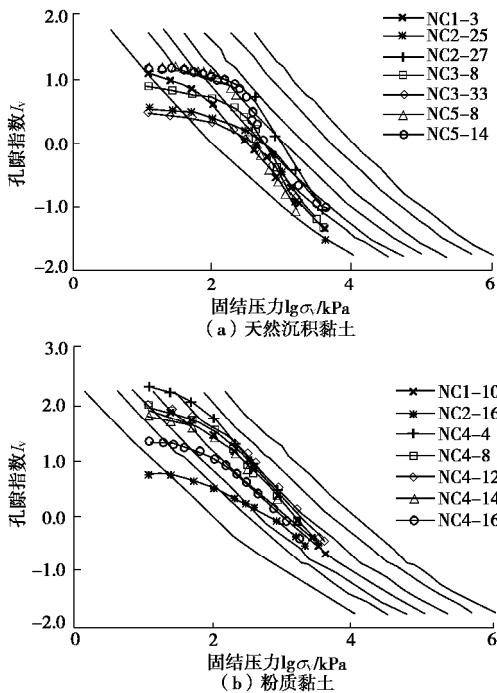


图 7 太湖湖沼相典型沉积土  $I_v - \lg \sigma_v$  压缩曲线

Fig. 7 Typical  $I_v - \lg \sigma_v$  compression curves of clays

本文将太湖湖沼相天然沉积黏土、粉质黏土不扰动样的压缩曲线绘于  $I_v - \lg \sigma_v$  坐标里, 并与不同  $S_\sigma$  的沉积压缩曲线进行对比, 参见图 7。从图 7 和表 1 可知, 天然沉积黏土的应力灵敏度  $S_\sigma$  为 3.9~15.8; 粉质黏土的应力灵敏度  $S_\sigma$  为 4.4~24.9, 高于天然黏土, 这与粉质黏土的含水比大于天然黏土相吻合的。上述结果表明, 太湖湖沼相典型沉积土具有较高的应力灵敏度  $S_\sigma$ , 在加载受压缩过程中有着很强结构性抗力和附加抗力。

### 4.3 稳定指数 SI

前述已指出原状结构性土在屈服应力前后差异显著, 屈服前阶段状态是亚稳定的, 屈服后阶段的变形是逐渐向稳定状态的重塑土逼近的过程。本文基于 Burland (1990) 的固有压缩曲线, 提出稳定指数 SI 概念, 用来度量不扰动结构性土相对于平衡稳定状态重塑土的亚稳定性, 定义的示意图参见图 6, 表达式如下:

$$SI = I_{vy} - I_{vr} \quad (6)$$

式中  $I_{vy}$  表示结构屈服应力  $\sigma_{vy}$  下原状土的孔隙指数, 当液限状态时的孔隙比  $e_L$  和  $\sigma_{vy}$  处的孔隙比  $e_y$  已知时, 就可通过式 (1) 确定出;  $I_{vr}$  为  $\sigma_{vy}$  下重塑土的孔隙指数, 可通过式 (2) 得到。

稳定指数 SI 本质上是通过结构性土亚稳状态到重塑土稳定状态孔隙特征的变化幅值描述土结构性。因此, SI 可以反映出结构性对变形的影响, 同一压力下, SI 越大意味着屈服后变形量越大。太湖湖沼相典型沉积土的稳定指数 SI 分布范围为 0.66~1.79, 平均值为 1.20, 参见表 1。

表 1 不同天然沉积土的评价指标

Table 1 Evaluation indexes of soil structure for different soils

土样	$w_0$	$G_s$	$w_L$	$S_{vy}$	$e_y$	SI	$S_\sigma$	参考文献
NC1-3	45.0	2.73	50.4	109	1.11	0.66	3.9	本文(YSR=3.4)
NC1-10	39.0	2.72	35.0	158	0.95	1.50	19.8	本文(YSR=1.8)
NC2-16	34.1	2.72	37.7	199	0.82	0.73	4.4	本文(YSR=2.6)
NC2-25	34.4	2.73	46.6	471	0.88	0.76	5.5	本文(YSR=1.9)
NC2-27	46.0	2.73	53.9	395	1.21	1.35	15.8	本文(YSR=1.5)
NC3-8	40.0	2.73	48.8	265	1.03	0.90	6.6	本文(YSR=3.7)
NC3-33	33.0	2.73	41.7	360	0.80	0.62	4.0	本文(YSR=1.4)
NC4-4	43.7	2.72	36.1	75	1.11	1.79	24.9	本文(YSR=1.9)
NC4-8	44.2	2.72	38.2	112	1.09	1.60	22.4	本文(YSR=1.6)
NC4-12	37.5	2.72	33.9	150	0.96	1.67	23.1	本文(YSR=1.4)
NC4-14	39.6	2.72	37.8	148	1.03	1.51	18.5	本文(YSR=1.2)
NC4-16	35.7	2.72	36.8	171	0.89	1.06	8.5	本文(YSR=1.3)
NC5-8	44.5	2.73	46.0	189	1.13	1.28	12.6	本文(YSR=1.8)
NC5-14	40.1	2.73	39.6	243	0.98	1.34	15.2	本文(YSR=1.6)
Bothkennar 黏土	73.9	2.65	85.4	80	1.90	0.86	5.3	文献[3]
Kitakyusyu 黏土	59.4	2.69	78.4	115	1.43	0.34	2.1	文献[10]
Kitakyusyu 黏土	56.1	2.69	70.0	122	1.39	0.57	3.2	文献[10]
Ariake 黏土	87.4	2.62	82.2	65	2.14	1.39	12.9	文献[10]
Ariake 黏土	82.3	2.64	90.3	123	2.03	1.13	9.4	文献[10]
Kimhae 黏土	42.9	2.73	38.0	99	1.12	1.70	24.8	文献[11]
Kimhae 黏土	46.3	2.72	45.0	131	1.23	1.57	21.8	文献[11]
Pusan 黏土	58.0	2.65	53.0	91	1.37	1.33	13.0	文献[11]
Pusan 黏土	54.0	2.65	53.0	102	1.20	0.85	5.7	文献[11]
Shniho 黏土	56.0	2.68	53.0	88	1.42	1.42	14.7	文献[11]
Shniho 黏土	52.0	2.69	55.0	133	1.32	1.17	9.9	文献[11]
Jangyu 黏土	63.2	2.69	58.0	127	1.56	1.64	21.9	文献[11]
Eulsookdo 黏土	50.2	2.71	58.0	128	1.28	0.84	5.1	文献[11]
Eulsookdo 黏土	54.1	2.68	70.0	176	1.36	0.69	4.2	文献[11]
温州黏土	68.4	2.75	63.4	120	1.82	1.84	34.3	文献[12]
Singapore 黏土	58.0	2.74	76.0	218	1.45	0.70	4.4	文献[13]
Singapore 黏土	67.6	2.75	82.0	254	1.67	0.99	7.7	文献[13]
Singapore 黏土	54.8	2.79	76.0	298	1.45	0.80	5.4	文献[13]

从图 6 的示意图可以看出, 稳定指数 SI 与应力灵敏度  $S_\sigma$  应该有密切关系。  $S_\sigma$  较大的天然沉积土有着较高的 SI。将本文所研究的天然沉积土的 SI 和  $S_\sigma$  进行拟合分析, 发现两者之间存在很好的对数关系, 拟合

系数达到 0.97, 参见图 8, 表达式为

$$SI=0.5078\ln(S_{\sigma}) \quad (7)$$

并从图 8 可见, 表 1 中来自不同文献有着不同液限天然沉积土的 SI 与  $S_{\sigma}$  基本位于上述拟合曲线的附近, 这证实了表达式 (7) 的正确性, 也表明了式 (7) 的关系适合于不同类型的天然沉积土。同时, 太湖湖沼相典型沉积土较高的  $S_{\sigma}$  和 SI, 验证了由 YSR 得出该区域天然沉积土具有高位结构性的结论。

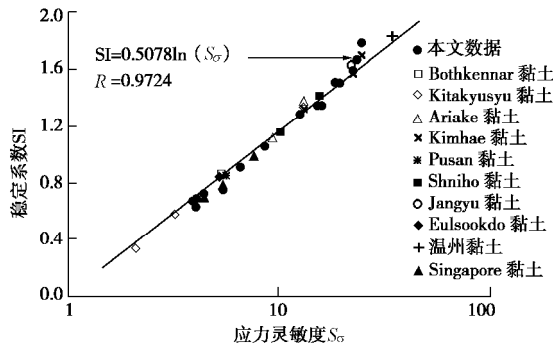


图 8 稳定指数与应力灵敏度之间的关系

Fig. 8 Relationship between stress sensitivity and stability index

## 5 结 论

(1) 太湖湖沼相天然沉积黏土、粉质黏土重塑样的归一化压缩曲线与 Burland 的固有压缩曲线 (ICL) 基本吻合, 证实了对于该区域天然黏性土结构性的评价, 无需再做繁琐的重塑土试验, ICL 可作为良好的评价参考基准。

(2) 该区域天然沉积土的原位孔隙指数  $I_{v0}$  均位于 ICL 上方, 而且大部分位于普通黏性土的 SCL 上方, 定性表明其原位状态具有强的结构性。

(3) 归一化指标——屈服应力比 YSR 和应力灵敏度  $S_{\sigma}$  的分布范围分别为 1.2~3.7、3.9~24.9, 一致表明该区域天然沉积土在加载受压缩过程中有着很强结构性抗力和附加抗力。

(4) 基于 ICL, 定义的稳定指数 SI 可反映土结构性对天然沉积土的影响程度 (亚稳定性), 且与  $S_{\sigma}$  存在很好的对数关系, 定量表达式见公式 (7), 并为不同液限天然沉积土的数据所验证。故, YSR、 $S_{\sigma}$  和 SI 可作为不同液限天然沉积土结构性评价指标。

### 参考文献:

[1] LEROUEIL S, TAVENAS F, BRUCY F, et al. Behavior of destructured natural clays[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1979, **105**(GT6): 759 - 778.  
 [2] LEROUEIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks[J].

Géotechnique, 1990, **40**(3): 467 - 488.

- [3] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Géotechnique, 1990, **40**(3): 329 - 378.  
 [4] 沈珠江. 土体结构性的数学模型-21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(1): 95 - 97. (SHEN Zhu-jiang. Mathematical model of structural soil—The key problem for soil mechanics in 21century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(1): 95 - 97(in Chinese))  
 [5] 石名磊, 洪振舜. 天然沉积粉质土压缩特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(12): 1397 - 1401. (SHI Ming-lei, HONG Zhen-shun. Compressive behavior of natural silty soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(12): 1397 - 1401. (in Chinese))  
 [6] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils[J]. Géotechnique, 1979, **29**(4): 469 - 480.  
 [7] SRIDHARAN A, ABRAHAM B M, JOSE B T. 1991. Improved technique for estimation of preconsolidation pressure[J]. Géotechnique, 1991, **41**(2): 263 - 268.  
 [8] SKEMPTON A W. The consolidation of clays by gravitational compaction[J]. Quarterly Journal of the Geological of London, 1970(125): 373 - 411.  
 [9] CHANDLER R J. Clay sediments in depositional basin: the Geotechnical Cycle[J]. Quarterly. Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2000, **33**(1): 7 - 39.  
 [10] 洪振舜, 刘松玉, 于小军. 关于结构土屈服破坏的探讨[J]. 岩土力学, 2004, **25**(5): 684 - 687. (HONG Zhen-shun, LIU Song-yu, YU Xiao-jun. On destructuration of structured soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(5): 684 - 687. (in Chinese))  
 [11] CHUNG S G, PRASAD K N, NAGARAJ T S, et al. Assessment of compressibility behavior of naturally cemented soft clays[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2004, **22**(1-2): 1 - 20.  
 [12] 王立志, 沈恺伦.  $K_0$  固结结构性软黏土的本构模型[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(4): 496 - 504. (WANG Li-zhong, SHEN Kai-lun. A constitutive model of  $K_0$  consolidated structured soft clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(4): 496 - 504. (in Chinese))  
 [13] LOW H E, PHOON K K, TAN T S, LEROUEIL S. Effect of soil microstructure on the compressibility of natural Singapore marine clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(2): 161 - 176.