

基于扰动状态概念的结构性土压缩特性分析

刘维正, 石名磊, 缪林昌

(东南大学 交通学院, 南京 210096)

摘 要: 由于土结构性的影响天然沉积土的结构是亚稳定的, 屈服后的压缩变形阶段必然伴随着结构的破损。将附加孔隙比 Δe 作为表征原状土的一个结构状态参数, 基于扰动状态概念, 引入定量分析附加孔隙比 Δe 随固结压力变化关系的方法, 得到一维扰动状态概念(DSC)压缩模型, 以描述结构性土压缩损伤现象, 并通过结构破损指数 b 来刻画压缩过程中的结构破损速率。根据该模型, 对太湖湖沼相典型的天然沉积软黏土、粉质黏土和硬黏土不扰动试样的一维压缩试验结果进行模拟和分析, 并结合试验数据提出了模型参数的测定方法。分析结果验证了该模型能够描述具有不同结构形式土样的压缩特性及其实际变形过程中表现出的非线性, 这给结构性土非线性固结与沉降计算提供了一定的理论基础。

关 键 词: 土结构性; 压缩特性; 附加孔隙比; 扰动状态概念; 结构破损指数

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Analysis of compressibility of structural soils based on disturbed state concept

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

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Due to the effect of soil structure, the structure of natural sedimentary clays was meta-stable and would damage during the process of post-yield compression deformation. First, a one-dimensional disturbed state concept (DSC) compression model of structured soils was established based on the disturbed state concept to characterize the compression destructural behavior of natural soils under loading. Additional void ratio Δe was employed as a structured state parameter reflecting the influence of soil structure; and quantitative analysis was conducted on the relationship between additional void ratio and consolidation pressure. Compression destructive index b was used to describe the rate of destructuring in the DSC model. Then, one-dimensional compression tests were conducted on the Taihu Lake swamped natural soft clay, silty clay and stiff clay, and the results of the tests were simulated and analyzed using the DSC model. A procedure was suggested to determine parameters in the model. The results show that the proposed DSC model can be implemented to describe the compression behavior of natural soils with various structures. The DSC model reflected the nonlinearity of compression curve, which contribute to the accurate calculation in the nonlinear consolidation and settlement of structural soils.

Key words: soil structure; compressibility; additional void ratio; disturbed state concept; destructural index

1 引 言

土体的压缩特性一直是岩土工程中大家较为关注的问题之一, 因为许多实际工程问题的分析都依赖于压缩试验所得出的力学指标。而工程实践中所面对的原位沉积土均会表现出一定形式的结构性。土结构性是指土体颗粒和孔隙的性状、排列形式(几何特征)及其颗粒间的相互作用(联结特征)的综合, 是在沉积历史过程中形成的, 受到诸如物理、化学和生物等复杂作用的影响^[1-2], 简单地说, 包

含使天然结构性土的力学性状不同于相应重塑土的所有特性。土结构性对土力学特性的重要影响很早以前就得到认知^[3-4], 大量试验数据表明, 土结构性和应力历史与孔隙比一样对天然沉积土的力学特性有着非常重要的影响^[5-7]。此外, 在外部作用下, 如加卸荷、风化、取样等情况, 会使结构强度丧失和土结构性发生变化。结构强度的丧失被看作为结构性损伤, 通常在小应变情况下一维压缩造成的结构破损是一种渐进性过程, 反映在压缩指数随固结压力非线性变化的关系上, 如图 1 所示, 图中的压

收稿日期: 2010-04-09

基金项目: 国家自然科学基金自助项目 (No. 50578036); 江苏省交通科学研究计划项目 (No. 06y15)。

第一作者简介: 刘维正, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事软土工程特性及地基处理方面的研究。E-mail: lwzseu@126.com

缩指数 C_c 和固结压力分别用相应重塑土的压缩指数 C_c^* (固有压缩指数) 和结构屈服应力进行了归一化。因此, 沈珠江^[8]明确地提出了建立土体结构性模型及相应的破损理论是 21 世纪土力学研究的核心。

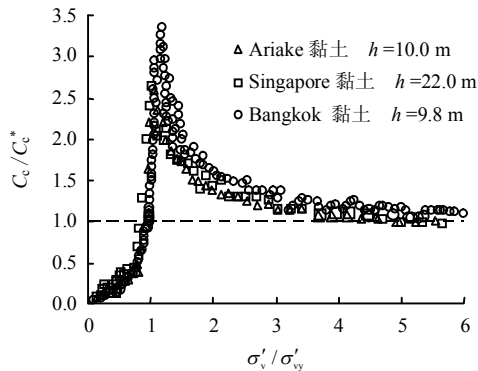


图 1 压缩指数与固结压力的关系^[9]

Fig.1 Relationships between normalized compression index and consolidation pressure for clays^[9]

近年来, 有学者采用破损力学理论对结构性土压缩特性的数学模拟进行了探讨和分析^[10-11], 但涉及到的损伤函数表述复杂, 所用参数测定困难, 在工程实际中难以推广应用。而以平均化为指导思想的扰动状态概念(disturbed state concept, DSC), 吸收了包括损伤力学、临界状态和连续介质等理论的优点^[12-13], 针对材料受力扰动后包括软化段在内的连续的全过程应力-应变关系的模拟获得了较好的效果^[14-17], 取得很大进展。

基于扰动状态概念, 本文引入根据土力学基本原理构造的物理意义明确、形式简单明了的扰动函数, 通过对表征土体结构影响的附加孔隙比 Δe 随固结压力变化的关系进行建模分析, 利用结构屈服应力和结构破损指数来描述结构性土的压缩性状。最后结合太湖湖沼相典型天然沉积土的一维压缩试验结果, 说明了模型参数的确定方法, 并对模拟结果进行了讨论与评价。

2 结构性土的 DSC 压缩模型

2.1 扰动状态概念 (DSC)

扰动状态概念认为, 变形材料单元可被看成是由处于相对完整状态和完全调整状态两种基本成分所组成的混合物。相对完整状态(RI)是指不受任何扰动影响的理想化初始状态; 完全调整状态(FA)为受扰动结构完全破损的临界状态。DSC 的基本思想是: 材料单元可观测的平均响应是根据这两种基准状态下的响应通过扰动函数加权平均得到, 扰动函

数是用来定义由于外界荷载(机械力、热力、环境力)作用引起材料内部微观结构的扰动, 表示观测响应、初始响应与临界响应的关系。对于应变增量, 其一般表达式为

$$d\epsilon_{ij}^a = (1 - D_\epsilon)d\epsilon_{ij}^i + D_\epsilon d\epsilon_{ij}^c + dD_\epsilon(\epsilon_{ij}^c - \epsilon_{ij}^i) \quad (1)$$

式中: ϵ_{ij} 为应变张量, 其中上标 a 表示材料的实测响应; 上标 i 表示相对完整状态材料的响应; 上标 c 表示完全调整状态材料的响应; D_ϵ 为扰动函数。

图 2 为利用扰动状态概念描述弹塑性材料力学响应关系曲线示意图。

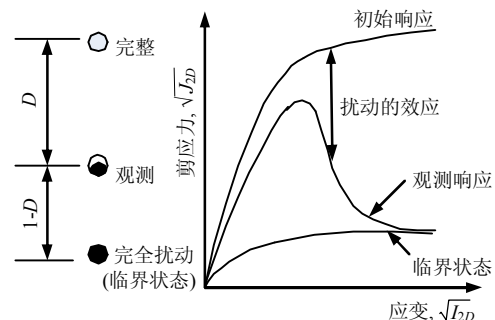


图 2 扰动状态概念示意图

Fig.2 Schematic of disturbed state concept

2.2 结构性土的 RI 和 FA 状态

在 DSC 理论中, 基本状态(RI 和 FA 状态)的确定是非常重要的。DSC 理论允许根据室内或现场试验的实际情况以及所研究问题的需要, 采用适当的方式来定义 2 种基准状态。根据 Burland^[6]建议, 重塑土的特性被视为土的固有特性, 可作为对比的基准状态; 而结构性损伤只有在屈服后才发生, 弹性变形阶段不会造成扰动, 对于此情况, 式 (1) 中的扰动函数 D_ϵ 只是塑性应变的函数。在此, 本文为了简化问题并考虑到试验条件, 选定 RI 状态为 0 塑性应变状态, 即材料为理想弹性材料, 式 (1) 中的 $\epsilon_{ij}^i = 0$; FA 状态为相应结构性土的重塑状态。

2.3 扰动函数

扰动函数建立是 DSC 建模的关键一步。由于土结构性的存在才导致结构性土与相应重塑土有不同的观测响应。而土结构性的影响在加载过程中由于土体结构强度丧失会逐渐减弱, 因此扰动函数应是能度量土结构性影响大小且是加载应力的函数。Liu & Carter^[13]通过对大量不同类型的结构性土压缩试验数据的研究, 针对天然结构性土的压缩特性, 提出了一个通用的扰动函数:

$$\overline{D_{\epsilon v}} = 1 + S \left(\frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v} \right)^b \quad (2)$$

式中： S 、 b 为描述土体结构压缩损伤的参数； σ'_{vy} 为结构屈服应力。

2.4 一维 DSC 压缩模型

鉴于结构性土在超过屈服应力后才产生塑性变形，结构开始损伤；并假定屈服前的弹性变形与重塑土的一致，与是否具有土结构性无关。结合式(1)和式(2)得到一维压缩条件下体积应变的表达式：

$$d\varepsilon_v^a = \begin{cases} d\varepsilon_v^c, & (\sigma'_v < \sigma'_{vy}) \\ \left[1 + S \left(\frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v} \right)^b \right] d\varepsilon_v^c, & (\sigma'_v \geq \sigma'_{vy}) \end{cases} \quad (3)$$

由于 $\sigma'_v < \sigma'_{vy}$ 时塑性变形为 0， $d\varepsilon_v^c$ 中只含有弹性变形，故式(3)变为

$$d\varepsilon_v^a = \begin{cases} \frac{\kappa^*}{1+e} \left(\frac{d\sigma'_v}{\sigma'_v} \right), & (\sigma'_v < \sigma'_{vy}) \\ \frac{\lambda^*}{1+e} \left[1 + S \left(\frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v} \right)^b \right] \left(\frac{d\sigma'_v}{\sigma'_v} \right), & (\sigma'_v \geq \sigma'_{vy}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： κ^* 、 λ^* 分别为重塑土的回弹指数和压缩指数； e 为孔隙比。

对于屈服前阶段($\sigma'_v < \sigma'_{vy}$)的变形，只要知道 κ^* ，就容易方便确定。本文重点研究的是由于结构损伤产生非线性变形的屈服后阶段($\sigma'_v \geq \sigma'_{vy}$)，利用 $d\varepsilon_v = de/(1+e)$ ，将式(4)转化为常用的 e - $\lg \sigma'_v$ 形式，并引入一个能直观表征土结构性影响的附加孔隙比 Δe ，且定义结构性土的孔隙比 e 由土的固有结构所支撑的固有孔隙比 e^* 和土结构所支撑的附加孔隙比 Δe 组成，即 $e = e^* + \Delta e$ ，如图 3 所示。

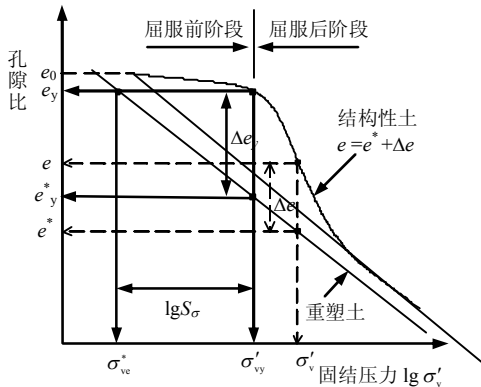


图 3 结构性土与重塑土的理想压缩曲线

Fig.3 Idealized compression curves of reconstituted and structured soils

因此，屈服后阶段式(4)可表示为

$$e = e^* + \Delta e = e^* + \Delta e_y \left(\frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v} \right)^b, \quad (\sigma'_v \geq \sigma'_{vy}) \quad (5)$$

式中： Δe_y 为结构屈服应力处的附加孔隙比； $\Delta e_y/e^*$ 为式(2)~(4)中所定义的 S ； b 为压缩性结构破损参数，用以量化土结构性破损速率。

3 模型参数的确定及验证

为了检验模型能否描述结构性土的压缩特性，下面以太湖湖沼相典型沉积土为试验对象，并阐述模型参数的确定方法。试验所用的土样均为高质量不扰动的薄壁原状样。文中的土样按钻孔号+土样深度进行编号，如 NC1-3，表示 NC1 号孔的 3.0 m 深处土样。

3.1 模型参数的确定方法

(1) 结构屈服应力 σ'_{vy}

结构性土的变形性状和强度特性均与此参数有密切关系，如何合理确定结构屈服应力的大小显得尤为重要。Butterfield^[17]首次采用双对数坐标方法 ($\ln(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$) 对压缩试验数据进行分析，结果显示压缩曲线能较好地用 2 条直线段进行描述。后有学者证实 2 直线的交点就是屈服应力^[18-19]。本文采用此方法确定原状样结构屈服应力，代表性结果见图 4。由图发现，所有试验结果的直线拟合度很好，屈服前段 ($\sigma'_v < \sigma'_{vy}$) 的拟合系数均在 0.94 以上，屈服后段 ($\sigma'_v \geq \sigma'_{vy}$) 的拟合系数均达到 0.99，亦表明该方法有很好的合理性与适用性。

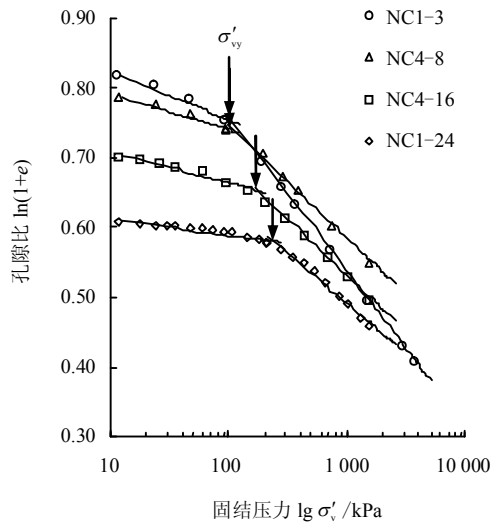


图 4 结构屈服应力确定的示意图

Fig.4 Schematic of determination of structural yield stress

(2) 固有孔隙比 e^*

如果从重塑样的室内压缩试验获得固有孔隙比 e^* ，将是非常直接有效的，但是，实际工程中很少针对重塑样进行压缩试验，如果试验数据缺失，本文建议可以根据 Burland^[6]针对液限 $W_L = 25\% \sim$

150%范围内的重塑土压缩试验提出的归一化的 ICL, 用下式进行确定:

$$e^* = (0.256e_L - 0.04)I_v + 0.109 + 0.679e_L - 0.089e_L^2 + 0.016e_L^3 \quad (6)$$

式中: $I_v = 2.45 - 1.285 \lg \sigma'_v + 0.0159(\lg \sigma'_v)^3$; e_L 为液限状态时的孔隙比。

(3) 附加孔隙比 Δe_y

Δe_y 为结构屈服应力处原状样相对于重塑样的附加孔隙比, 可以从室内压缩试验结果中获得。然而, 当试验所用土样由于严重扰动使压缩曲线失真或缺失试验数据时, 就需要一种预估 Δe_y 的方法。Leroueil^[20]在分析不排水强度 S_u 与液性指数 LI 关系时, 指出强度灵敏度 S_t 的对数值 $\lg S_t$ 和同一不排水强度下原状土与重塑土的液性指数之差 ΔLI 存在比例关系。Hong^[21]根据 Chandler^[22]定义的应力灵敏度 S_σ , 同样得到自重应力处原状土与重塑土的孔隙指数之差 ΔI_v 与 $\ln S_\sigma$ 存在很好的线性关系。而液性指数 LI 和孔隙指数 I_v 本质上就是孔隙比 e , 应力灵敏度为同一孔隙比 e_y 下结构屈服应力 σ'_{vy} 与对应的固有有效应力 σ'_{ve} 之比, 即 $S_\sigma = \sigma'_{vy} / \sigma'_{ve}$, 如图 3 所示, 可以推断 Δe_y 与 $\lg S_\sigma$ 存在一定比例关系。

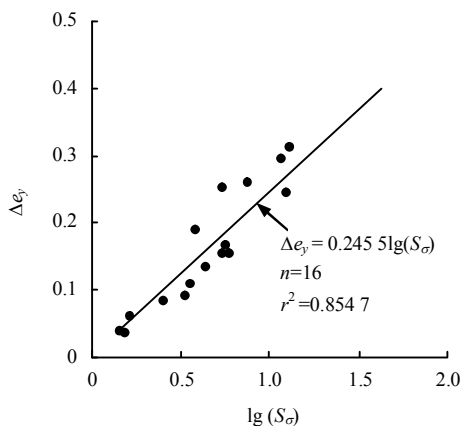


图 5 Δe_y 与 $\lg S_\sigma$ 之间的关系
Fig.5 Relationship between Δe_y and $\lg S_\sigma$

图 5 为太湖湖沼相典型沉积土中 16 个不同深度原状样的 Δe_y 与 $\lg S_\sigma$ 之间的关系, 根据试验数据回归得到如下关系:

$$\Delta e_y = 0.2455 \lg S_\sigma; r^2 = 0.8547 \quad (7)$$

需要说明的是, 关系式 (7) 只适合于该区域的天然沉积土。

(4) 结构破损指数 b

不同类型的天然沉积土具有不同的 b 值。参数 b 通过拟合屈服后阶段试验压缩曲线的方法进行确

定, 下面将进行论述。

3.2 试验模拟与模型验证

结合上述模型参数的确定方法, 根据式 (5), 利用一维 DSC 压缩模型对太湖湖沼相天然沉积的软黏土、粉质黏土和硬黏土屈服后阶段的压缩试验结果进行了模拟。参数 e^* 由式 (6) 确定, 模型中其余参数见表 1。图 6 为典型的模拟预测结果与实测数据的比较, 图中的预测模拟曲线均与试验数据吻合得较好, 表明该模型能较好地描述天然沉积结构性土在一维压缩条件下的力学响应。根据一维 DSC 压缩模型对 16 个不同深度原状土样压缩数据拟合分析得到的结构破损指数, 其中软黏土的 b 值范围为 0.30~1.00, 平均值为 0.65; 粉质黏土的 b 值范围为 0.35~0.54, 平均值为 0.47; 硬黏土的 b 值范围为 0.18~0.35, 平均值为 0.23。

表 1 太湖湖沼相天然沉积土一维 DSC 压缩模型参数值
Table 1 Values of one-dimensional DSC compression model

土样	编号	Δe_y	σ'_{vy}	b	b 的均值
软黏土	NC1-3	0.186	109	0.50	0.65
	NC2-25	0.309	471	0.30	
	NC2-27	0.250	395	1.00	
	NC3-8	0.256	265	0.60	
	NC5-8	0.292	189	0.80	
	NC5-14	0.243	243	0.72	
粉质黏土	NC4-4	0.152	75	0.50	0.47
	NC4-8	0.152	112	0.54	
	NC4-14	0.166	148	0.35	
	NC4-16	0.088	171	0.50	
	NC1-24	0.106	238	0.20	
	NC2-10	0.058	411	0.16	
硬黏土	NC3-14	0.035	222	0.18	0.23
	NC3-27	0.034	394	0.20	
	NC3-30	0.080	384	0.28	
	NC3-33	0.132	360	0.35	

4 讨论

具有不同结构形式的天然沉积土有着不同的结构破损指数 b 值, 即屈服后的结构破损速率不同。假定在结构屈服应力处的附加孔隙比 Δe_y 相同, 图 7 为不同的参数 b 对结构性土屈服后阶段压缩特性影响示意图。由图可以看出, b 越大, 附加孔隙比减小的速率越快, 即土的结构强度丧失越快, 很快就趋向重塑土的状态; $b=0$, 意味在原位压缩过程中, 土结构未受破损, 附加孔隙比保持不变; $b \rightarrow \infty$, 意味着应力水平达到结构屈服应力后, 结构立即坍塌。据此, 从太湖湖沼相不同沉积土的压缩性结构破损指数 b 的平均值来看, 天然沉积饱和软黏土的 b 相

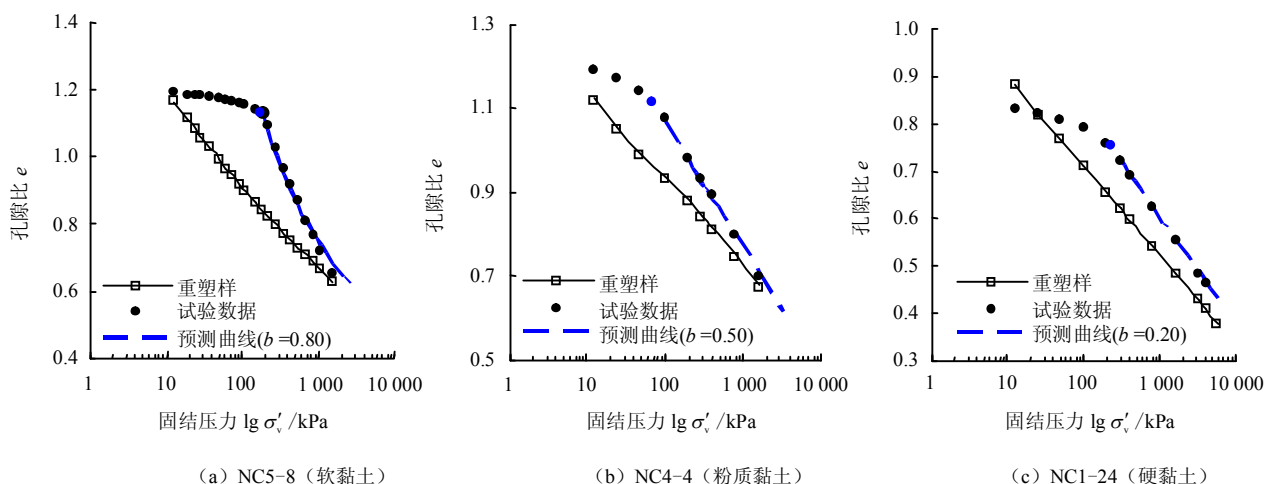


图 6 太湖湖沼相沉积土一维压缩试验
Fig.6 One-dimensional compress test on Taihu Lake swamped natural soils

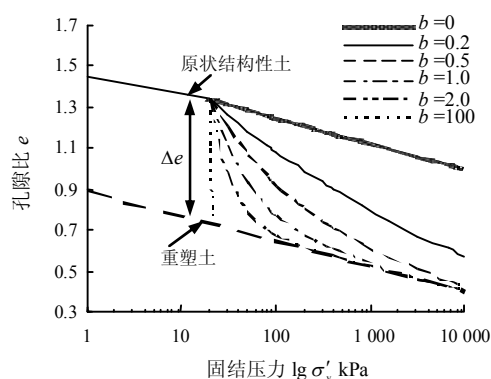


图 7 参数 b 对结构性土屈服后段压缩特性的影响
Fig.7 The influence of b on the post-yield compress behavior

对最大, 附加孔隙比减小的速率最快, 即土结构强度丧失相对最快, 粉质黏土与之接近, 硬黏土相对最小。总体而言, 太湖湖沼相天然沉积土压缩性结构破坏指数 b 相对不高, 实际工程中可对结构性特征加以利用。

以重塑土为参照状态的一维 DSC 压缩模型, 参数 σ'_{vy} 、 e^* 和 Δe_y 易于求取, 能较好地反映结构性土的原位压缩特性和描述屈服后压缩曲线在 e - $\lg \sigma'_v$ 坐标中的非线性, 为结构性土的力学性状和本构关系的研究奠定了较好的基础。同时, 结构性土体的固结特性必然受到压缩特性在结构屈服应力前后发生急剧变化这一非线性特征的影响, 因此, 对压缩性状合理描述是准确计算结构性土固结与沉降的前提。当然, 为了更好地描述结构破坏过程以便应用于工程实践中, 参数 b 必须要能很方便地确定, 譬如与土性参数间的经验关系, 然而由于数据有限, 本文没能建立此类关系。

另外, 当确定模型参数所需的高质量不扰动样

缺乏时, 对于本文所研究的区域性沉积土, 根据前面的分析, 屈服后阶段的变形可用式 (8) 近似表示。

$$e = \begin{cases} e^* + 0.245 \lg S_\sigma \left(\frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v} \right)^{0.75}, & \text{(软黏土)} \\ e^* + 0.245 \lg S_\sigma \left(\frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v} \right)^{0.47}, & \text{(粉质黏土)} \\ e^* + 0.245 \lg S_\sigma \left(\frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v} \right)^{0.23}, & \text{(硬黏土)} \end{cases} \quad (8)$$

式中各符号的意义同前。

5 结 论

(1) 以重塑土的固有压缩特性为参照状态、表征土结构骨架支撑的附加孔隙比 Δe 为变量的一维 DSC 压缩模型, 能较好地反映土结构性对天然沉积土压缩特性的影响和如实反映屈服后土结构渐进性的破坏过程。

(2) 模型参数中固有孔隙比 e^* 和结构屈服应力 σ'_{vy} 能通过简便的方法进行确定。试验数据表明, 对于同一区域的天沉积土, 结构屈服应力处的附加孔隙比 Δe_y 可通过与应力灵敏度对数值 $\lg S_\sigma$ 间的线性关系确定。

(3) 利用模型分析了太湖湖沼相天然沉积的软黏土、粉质黏土和硬黏土的原位压缩特性, 得到其结构破坏指数 b 分别为 0.65、0.47 和 0.23, 说明了其结构强度丧失速率相对较慢, 实际工程中可对结构性特征加以利用。同时, 式 (8) 可作为本文所研究的太湖湖沼相区域沉积土屈服后阶段变形的经验公式。

参考文献

- [1] MITCHELL J K. Practical problems from surprising soil behavior[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers**, 1986, 112(3): 259—289.
- [2] SCHMERTMANN J H. The mechanical aging of soils[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers**, 1991, 117(9): 1288—1330.
- [3] CASAGRANDE A. The structure of clay and its importance in foundation engineering[J]. **Boston Soc. Civil Eng.**, 1932, 19(4): 168—209.
- [4] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 1976.
- [5] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. **Geotechnique**, 1985, 35(1): 1—18.
- [6] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(3): 329—378.
- [7] LEROUÉIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(3): 467—488.
- [8] 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 21st century[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(1): 95—97.
- [9] 张玉洁, 王常明, 王芳, 等. 黏性土基于扰动状态概念的应力-应变关系及压缩变形分析[J]. 世界地质, 2005, 24(2): 200—202.
ZHANG Yu-jie, WANG Chang-ming, WANG Fang, et al. Stress-strain relationship and analysis of compressive deformation of cohesive soil based on DSC[J]. **Global Geology**, 2005, 24(2): 200—202.
- [10] 沈珠江. 结构性土的堆砌体模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 1—4.
SHEN Zhu-jiang. A masonry model for structured clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(1): 1—4.
- [11] 刘恩龙, 沈珠江. 结构性土压缩曲线的数学模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 616—620.
LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Modeling compression of structured soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 616—620.
- [12] DESAI C S. A consistent finite-element technique for work-softening behavior[C]//Proc., Int. Conf. on Computational Methods in Nonlinear Mechanics, Austin: [s. n.], 1974.
- [13] DESAI C S. Mechanics of materials and interfaces: The disturbed state concept[M]. Boca Raton: CRC Press.LLC, 2001: 77—78.
- [14] LIU M D, CARTER J P, DESAI C S. Modeling compression behavior of structured geomaterials[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2003, 3(2): 191—204.
- [15] 郑建业, 葛修润, 孙红. 扰动状态理论在岩土力学问题中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3456—3462.
ZHENG Jian-ye, GE Xiu-run, SUN Hong. Application of disturbed state concept to issues in geotechnical engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 3456—3462.
- [16] 于小军, 齐志宏. 基于扰动状态概念的结构性软黏土本构模型[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1882—1887.
YU Xiao-jun, QI Zhi-hong. Constitutive model for soft clay based on disturbed state concept[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(12): 1882—1887.
- [17] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(4): 469—480.
- [18] SRIDHARAN A, ABRAHAM B M, JOSE B T. Improved technique for estimation of preconsolidation pressure[J]. **Geotechnique**, 1991, 41(2): 263—268.
- [19] HONG Z S, ONITSUKA K. A method of correcting yield stress and compression index of Ariake clays for sample disturbance[J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38(2): 211—222.
- [20] LEROUÉIL S, TAVENAS F, LE BIHAN J P. Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1983, 20: 681—705.
- [21] HONG Z S, HAN J. Evaluation of sample quality of sensitive clay using intrinsic compression concept[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(1): 83—90.
- [22] CHANDLER R J. Clay sediments in depositional basin: The geotechnical cycle[J]. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 2000, 33(1): 7—39.