

结构性黏土的压缩变形特性

陈盼¹, 韦昌富¹, 李永和², 王吉利¹, 马田田¹, 魏厚振¹

(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, 武汉 430071; 2. 浙江省水利河口研究院, 杭州 310020)

摘要: 海相软黏土的结构性对土体的变形与强度特性有着重要的影响, 这种影响与爆炸挤淤置换法处理软基的置换深度直接相关, 是海堤基础沉降与稳定性分析的不确定因素。为了探究结构性对海堤地基沉降的影响, 并对海相软黏土的压缩特性进行定量分析, 建立结构性黏土的压缩变形模型, 同时给出模型参数的确定方法。利用文献中的试验数据对模型进行了验证, 结果表明模型不仅适用于一维应力状态下的变形分析, 能够描述三轴应力状态下结构性黏土的压缩特性。利用所建模型对浙江漩门地区海相软黏土的压缩特性进行模拟, 分析表明, 模型能较好地考虑结构性对该地区软黏土压缩变形的影响, 为该地区海堤沉降的预测提供量化分析的手段, 有助于加强结构性黏土地区海堤地基设计与施工的理论基础。

关键词: 结构性; 黏土; 沉降; 压缩模型; 爆炸挤淤置换法

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Compression deformation characteristics of structural clays

CHEN Pan¹, WEI Chang-fu¹, LI Yong-he², WANG Ji-li¹, MA Tian-tian¹, WEI Hou-zhen¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences Wuhan, 430071, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The effect of structure is important for the deformation and strength of marine soft clays. The replacing depth is also related to the structure of soft clays during the dealing progress of soft foundation, in which the blasting-based squeezing and replacing method is used. The structure may be an uncertain factor to evaluate the settlement and the stability of the embankment. In order to explore the effect of structure on the settlement of the foundation, a compression model of structural soils is established for analyzing the compression characteristics of marine soft clays quantitatively. The calibration method of model parameters is also given. The compression model is verified by the experimental data from literatures. The results show that the model is not only effective for predicting well the deformation at the 1D stress state but can be used to describe the compression characteristics at triaxial stress state. Then the model is adopted to analyze the compression characteristics of marine soft clays in Xuanmen area, Zhejiang province. The effect of structure on the compression deformation of soft clays in the area is simulated well by the new model. The model offers a quantificational method to predict the settlement of the embankment in the area. Furthermore, the model will be helpful for reinforcing the theoretical basis for design and construction of the embankment in the structural clay area.

Key words: structure; clay soils; settlement; compression model; blasting-based squeezing and replacing method

1 引言

一般将不同于重塑黏土变形、强度等力学特性的变化归结为黏性土体结构性的影响, 土体结构性是指土体的组构及土颗粒之间的黏结作用^[1]。由于结构性土体颗粒或团粒之间黏聚力的存在, 使得土体在相同外荷载条件下抵抗变形与破坏的能力高于

相应的重塑土, 一旦结构性遭到破坏, 土体的强度将显著降低, 可能出现变形与强度突变的现象, 成为工程建设的潜在威胁。结构性对软黏土压缩变形的影响对工程的设计与施工具有重要的影响^[2], 一些学者已经开展了这方面的研究。吕海波等^[3]通过室内压缩试验, 研究了土体结构性对琼州海峡软土压缩特性的影响, 并认为由于未考虑土体结构性的

收稿日期: 2012-05-28

基金项目: 浙江省重大科技专项资助 (No.2009C13010); 广西岩土力学与工程重点实验室开放基金资助 (No.11-KF-05)。

第一作者简介: 陈盼, 男, 1984年生, 博士, 助理研究员, 主要从事非饱和土渗流与边坡稳定性问题分析及软黏土工程特性方面的研究工作。

E-mail: pchen@whrsm.ac.cn.

通讯作者: 韦昌富, 男, 1966年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学与多相孔隙介质多场耦合问题方面的研究工作。

E-mail: cfwei@whrsm.ac.cn.

作用,造成爆炸挤淤置换法建造海堤未能达到原设计标高的异常情况。Chai 等^[4]对国外几种天然结构性黏土的固结特性进行了研究,并针对灵敏度大于 4 的结构性黏土,提出了新的孔隙比与有效平均应力的线性关系。王军等^[5]通过室内试验发现加荷比对结构性软土的压缩特性有显著影响。

由于结构强度的存在,原状软黏土的变形与力学性质不同于完全重塑土,不考虑结构性对黏土性质的影响,而简单借用现有重塑土的研究成果对结构性软黏土的力学与工程特性进行研究是不合理的^[3,6]。因此,只有建立合理的数学关系描述结构性黏土的力学本构行为,才能准确地反应结构性黏土在外荷载施加过程中的力学响应,以沈珠江院士为代表的一些学者掀起了国内结构性土本构关系建模的热潮^[7-8]。国外 Horpibulsuk 等^[9]基于修正结构性剑桥模型,建立了水泥黏土的本构模型,并利用建立的模型对不同胶结程度与围压条件下的水泥黏土的变形与强度特性进行了分析。

通过调研发现,目前结构性黏土本构模型的研究主要通过引入扰动状态函数、损伤函数与结构势的概念来描述土体结构性对变形与强度的影响。沈珠江^[7]采用损伤力学的手段建议了一个能够考虑黏性土结构性的损伤力学模型。Liu 等^[10]引入扰动状态因子来描述结构性对一维应力状态下土体压缩变形的影响,并在此基础上,基于修正剑桥模型提出了结构性黏土的本构模型^[11]。谢定义等^[12]利用综合结构势量化结构性对土体力学特性的影响,将结构性参数引入土体的变形与强度本构关系。雷华阳^[13]针对天津市欠固结海积软土进行了试验研究,通过引入结构强度系数,提出了相应的弹塑性本构关系模型。刘维政等^[14]基于扰动状态概念对太湖湖沼软黏土的一维压缩特性开展研究,根据试验结果对一维应力状态下模型结构性参数的变化规律进行了分析。

上述结构性黏土的本构模型均在重塑土本构模型的基础上增加了描述结构特性的参数,而这些结构参数的确定方法对模型的应用与推广具有重要影响。李向全等^[15]利用分形几何理论,对结构性软土的结构参数进行量化分析。张敏江等^[16]利用图像处理技术,对结构性软土的微观结构参数进行了分析,并提出了一种微结构参数的量化描述方法。基于结构性土体微观结构的分析建立宏观行为的描述不失为一种好的思路。

以上分析可知,目前对结构性黏土力学特性的研究大多集中于一维应力状态下情形,而对三维

应力状态下结构性的演化规律的研究显得不足。因此,有必要开展复杂应力状态下结构性土力学特性的研究。本文首先建立了结构性黏土的压缩模型,随后结合文献中现有的试验数据对该模型进行了验证,针对浙江漩门湾地区的结构性软土开展了原状与扰动土的一维压缩试验与三轴试验,采用建立的模型对该地区结构性黏土的压缩特性进行了分析,为本地区海堤建造过程中及建造后堤身的沉降变形预测与稳定性评价提供重要的理论基础。

2 结构性黏土的压缩模型

2.1 基本假设与基本变量

模型的基本假设为:(1)完全重塑土的行为能够通过修正剑桥模型描述;(2)不考虑土体各向异性效应,假设每层土体单元为各向同性体。

黏性土重塑样的特性称为此类土的固有特性,为区别于原状样的描述,完全重塑样的各种指标参数均用上标*表示。按照临界状态土力学的框架,在一般应力空间中,平均有效应力为 p' ,偏应力为 q ,应力比为 η 定义如下:

$$\left. \begin{aligned} p' &= \frac{1}{3} \sigma'_{ii}, (i=1, 2, 3) \\ q &= \frac{1}{2} S'_{ij} S'_{ij}, S'_{ij} = \sigma'_{ij} - p' \delta_{ij}, (i, j=1, 2, 3) \\ \eta &= \frac{q}{p'} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2.2 结构性黏土的屈服面

结构性黏土的屈服面示意图见图 1,具体表达式为

$$f = \left(\frac{q}{M^*} \right)^2 + p'(p' - p'_s) \equiv 0 \quad (2)$$

式中: p'_s 为椭圆屈服面的长轴直径; M^* 为重塑土临界状态线的斜率。

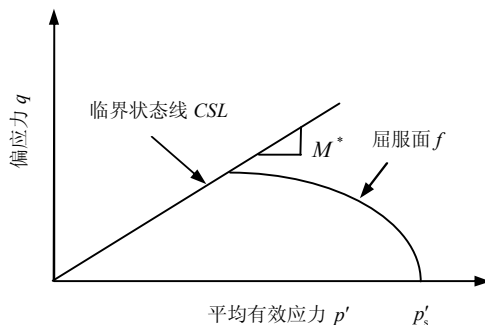


图 1 结构性黏土屈服面示意图

Fig.1 Sketch of the yield surface for structural clays

假设结构性黏土在弹性阶段的变形与重塑土相同, 相同荷载条件下结构性土与重塑土孔隙变化的差异仅仅由于土体结构性的存在, 使其孔隙比高于相应重塑土。当土体的应力状态达到初始屈服应力时, 土体的结构强度降低, 与重塑土之间的孔隙比之差也逐渐降低, 在高压作用下, 土体的结构完全破坏, 力学行为与重塑土相同。

当试样初始应力 p' 低于初始屈服应力 $p'_{y,i}$ 时, 土体尚未屈服, 处于弹性阶段, 当前屈服面的大小 $p'_s = p'_{y,i}$ 。当 p' 逐渐增大超过 $p'_{y,i}$ 时, 土体开始屈服, 此后, 土体的应力状态将一直处于屈服面上, 当前屈服面的大小为 $p'_s = p'$ 。上述屈服面大小的变化可表述如下:

$$p'_s = \begin{cases} p'_{y,i}, & (p' \leq p'_{y,i}) \\ p', & (p' > p'_{y,i}) \end{cases} \quad (3)$$

2.3 结构性黏土的压缩特性

结构性黏土的孔隙比 e 可以表述为完全重塑土的孔隙比 e^* 与由于存在结构强度而维持的孔隙比 Δe :

$$e = e^* + \Delta e \quad (4)$$

通过分析大量的结构性黏土与相应重塑土的压缩曲线变化, Liu 等^[10]得出初始屈服后结构性黏土与重塑土的孔隙比差异变化近似满足指数曲线的结论, 见图 2。当平均有效应力大于初始屈服应力时, 土体结构性开始破坏, 孔隙比的变化可采用下述方程描述,

$$\Delta e = \Delta e_{\max} \left(\frac{p'_{y,i}}{p'} \right)^b, \quad (p' \geq p'_{y,i}) \quad (5)$$

式中: $\Delta e_{\max}$ 为当平均应力 $p' = p'_{y,i}$ 时, 结构性土的孔隙比与相应重塑土的孔隙比之差, 此时, 土体结构性还未破坏, 土体保持着最大的孔隙比增量; b 为结构性破坏因子。研究发现部分黏性土体 (如掺水泥的土体) 的结构强度在较大压力下并未完全破坏, 最终的孔隙比始终高于完全重塑土, 因此, 上述模型需要进一步的完善^[9],

$$\Delta e = a \left(\frac{p'_{y,i}}{p'} \right)^b + c, \quad (p' \geq p'_{y,i}) \quad (6)$$

由已知条件,

$$p' = p'_{y,i}; \quad \Delta e = \Delta e_{\max} \quad (7)$$

可得参数 a 、 c 须满足下列约束:

$$a + c = \Delta e_{\max} \quad (8)$$

式 (6) 比式 (5) 多引入一个参数, 增加了模型的适用性。

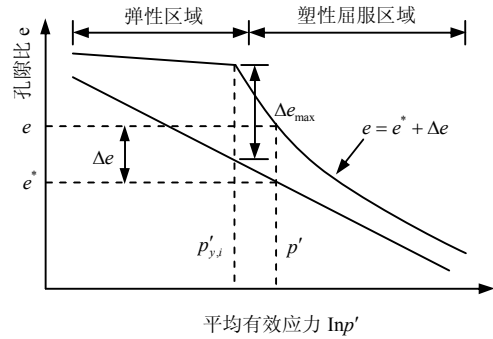


图 2 结构性土与重塑土各向同性压缩曲线

Fig.2 The isotropic compression curves of structural and remolded clays

将式 (6) 代入式 (4) 中, 并将平均有效应力 p' 用当前屈服面的大小应力 p'_s 代替, 可得结构性黏土的孔隙比演化方程:

$$e = e^* + a \left(\frac{p'_{y,i}}{p'_s} \right)^b + c \quad (9)$$

在等压应力状态下, 完全重塑土的变形与压力曲线在半自然对数坐标下为一直线, 其各向同性压缩曲线 (ICL) 方程表述为

$$e^* = e^*_{i0} - \lambda^* \ln p' \quad (10)$$

在各向同性压缩曲线上, 当 $p' = 1$ kPa 时的孔隙比为 e^*_{i0} , λ^* 为压缩曲线的斜率。

将式 (10) 代入式 (9) 中, 可得一般应力状态下孔隙比的演化方程:

$$e = e^*_{i0} - \lambda^* \ln p' + a \left(\frac{p'_{y,i}}{p'_s} \right)^b + c \quad (11)$$

将土体变形分为弹性部分与塑性部分:

$$e = e^*_{i0} - \kappa^* \ln p' - (\lambda^* - \kappa^*) \ln p'_s + a \left(\frac{p'_{y,i}}{p'_s} \right)^b + c \quad (12)$$

式中: κ^* 为回弹曲线的斜率。

式 (12) 即为建立的结构性黏土的压缩模型, 由式 (12) 可见, 结构性黏土孔隙比的变化由两部分组成, 一是与当前平均有效应力有关的弹性变形; 二是由当前屈服面决定的塑性变形, 其中塑性变形部分又分为与重塑土变化相同的塑性变形和结构性破坏引起的塑性变形。

2.4 模型参数的确定

在运用结构性黏土压缩模型进行黏土的变形与力学行为的预测之前, 需要确定模型参数。压缩模型引入 e_{I0}^* 、 λ^* 、 κ^* 、 $p'_{y,i}$ 、 a 、 b 、 c 共 7 个参数, 新增加了 4 个参数 ($p'_{y,i}$ 、 a 、 b 、 c) 用来描述结构性对黏性土压缩特性的影响。参数 e_{I0}^* 、 λ^* 、 κ^* 由重塑土的等压固结试验可以较易获得; 结构性参数 $p'_{y,i}$ 、 a 、 b 、 c 可以通过结构性土的等压固结试验确定, 通过固结压缩曲线初始压缩的直线段与压缩急剧增大的加速变形阶段的转折点确定 $p'_{y,i}$ 和 $\sigma'_{vy,i}$; 参数 c 可以通过结构性黏土的固结压缩曲线与完全重塑土的固结压缩曲线对比直接获得, 由方程 (8) 方程的限制可以获得参数 a , 利用方程 (12) 对所测结构性黏土的固结压缩曲线进行预测, 采用最小二乘法进行参数拟合, 从而获得模型参数 b 。

对一维固结试验的结果进行预测分析时, 可以利用一维固结试验的结果近似确定模型的结构性参数。在一维固结应力状态下, 侧向应力与垂直应力的变化直接相关^[11]:

$$\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \approx 1 - \sin \varphi'_c \quad (13)$$

式中: σ'_h 为侧向有效应力; σ'_v 为竖向有效应力; φ'_c 为临界状态条件下土体的有效内摩擦角。

一维固结试验的应力比:

$$\eta = \frac{3 \sin \varphi'_c}{3 - 2 \sin \varphi'_c} \quad (14)$$

根据 Mohr-Coulomb 破坏准则, 可以推得临界状态线斜率的表达式:

$$M^* = \frac{6 \sin \varphi'_c}{3 - \sin \varphi'_c} \quad (15)$$

根据临界状态土力学, 平均有效应力与当前屈服面大小之比满足如下关系式:

$$\frac{p'}{p'_{y,i}} = \frac{M^{*2}}{M^{*2} + \eta^2} \quad (16)$$

将式 (14)、(15) 代入式 (16) 确定初始屈服压力 $p'_{y,i}$:

$$p'_{y,i} = \left(1 - \frac{2}{3} \sin \varphi'_c \right) \left[1 + \left(\frac{3 - \sin \varphi'_c}{6 - 4 \sin \varphi'_c} \right)^2 \right] \sigma'_{vy,i} \quad (17)$$

式中: $\sigma'_{vy,i}$ 为一维固结应力状态下土体的初始屈服压力。

根据临界状态土力学, 当 $p' = 1 \text{ kPa}$ 时, 等压应力状态下的孔隙比 e_{I0}^* 与常应力比 η 下的孔隙比 e_η^* 满足如下关系:

$$e_{I0}^* = e_\eta^* + (\lambda^* - \kappa^*) \ln \left(\frac{p'_{y,i}}{p'} \right) \quad (18)$$

将式 (17) 代入式 (18) 中, 可得

$$e_{I0}^* = e_\eta^* + (\lambda^* - \kappa^*) \ln \left[1 + \left(\frac{3 - \sin \varphi'_c}{6 - 4 \sin \varphi'_c} \right)^2 \right] \quad (19)$$

当缺少重塑土的实测结果时, Nagaraj 等^[17]建议采用如下方程式 (20) 近似描述重塑土在一维固结状态下的固结变形特性。

$$e_\eta^* = (1.23 - 0.276 \lg \sigma) e_L^* \quad (20)$$

式中: e_L^* 为重塑土在含水率为液限 w_L 时的孔隙比;

$$e_L^* = w_L G_s \quad (21)$$

式中: G_s 为土粒的相对密度, 这里采用上述经验方程来描述重塑土在一维固结应力状态下的变形特性, 进而对结构性黏土的变形特性进行预测。

由上面提出的近似方法可知, 基于三轴应力状态建立的结构性黏土的压缩模型, 同样可以用于一维应力状态下黏土压缩特性的分析。结构性黏土的压缩模型能够考虑由于土体结构性的存在而表现出的不同于重塑土的力学性质, 引入了指数关系曲线描述加载过程中黏土结构性逐渐破坏的规律。建立的模型具有等级性, 当结构性黏土的结构性完全破坏时, 土体的力学性质与重塑土相同; 当土体存在一定的结构强度时, 模型可以描述土体结构性逐渐破损的过程。该模型不仅能够用于一维固结应力状态, 对于三维应力状态的压缩变形分析同样适用。另外, 结构性黏土压缩模型引入的参数可以通过常规的室内试验方便获得, 便于模型在实际工程中推广应用。

3 结构性黏土压缩模型的试验验证

采用上述建立的结构性黏土压缩模型对已有的压缩试验数据进行了分析, 模型预测曲线与实测结果对比如图 3 所示, 土样的基本力学参数及所得的模型参数见表 1、2。

表 1 重塑土的物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of remolded soils

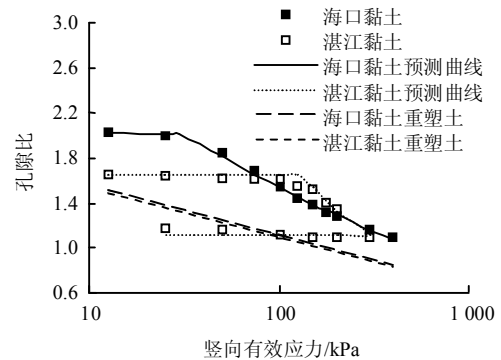
土样	参数					
	e_{I0}^*	e_{η}^*	e_L^*	λ^*	κ^*	M^*
海口黏土	2.050	2.003	1.628	0.195 2	0.015 2	0.490
湛江黏土	2.017	1.969	1.601	0.191 9	0.000 5	0.369
南沙软土	1.470			0.090 9	0.021 4	
Pisa clay	2.595			0.269 3	0.099 2	
Vallericca clay	1.700			0.148 1	0.026 3	

表 2 结构性黏土的物理力学参数
Table 2 Physico-mechanical parameters of structural clays

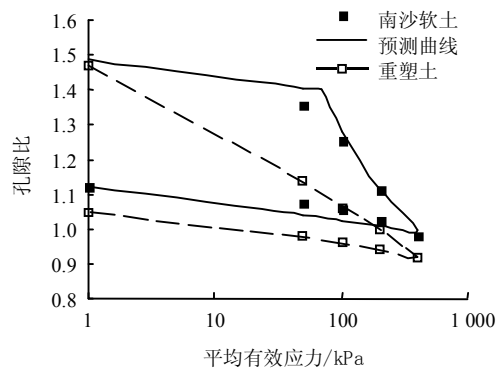
土样	参数			
	a	$\sigma'_{y,j}/\text{kPa}$	b	$p'_{y,j}/\text{kPa}$
海口黏土	0.691	30.0	0.45	33.0
湛江黏土	0.626	125.0	1.20	141.9
南沙软土	0.31		0.85	69.0
Pisa clay	0.42		0.60	145.3
Vallericca clay	0.20		0.15	2 086.0

海口黏土的压缩试验数据来自孔令伟等^[18]进行的一维固结试验，土体的有效内摩擦角 φ'_c 取其三轴 CU 剪的有效内摩擦角 13.1° ，湛江黏土一维压缩试验数据来自吕海波等^[3]、拓勇飞等^[19]采用同一地区的土样进行了三轴试验，获得的有效内摩擦角为 10° ，根据式(15)可以求得临界状态线的斜率。陈晓平等^[20]进行了南沙软土的等压固结试验，得到土体的结构屈服压力为 69.0 kPa 。Pisa clay 和 Vallericca clay 的试验数据来自 Callisto 等^[22]的等压固结试验，两种结构性黏土的结构屈服压力分别为 145.3 、 $2\,086.0\text{ kPa}$ ，其中，参数 e_L^* 通过重塑土的基本物性试验，由式(21)获得。一维固结应力状态下重塑土在 $p'=1\text{ kPa}$ 时的孔隙比 e_{η}^* 由式(20)求得，进而由式(19)求得初始孔隙比 e_{I0}^* ； λ^* 来自对重塑土压缩曲线拟合获得的直线斜率。以上各黏土的其他详细物理力学参数可见上述文献。

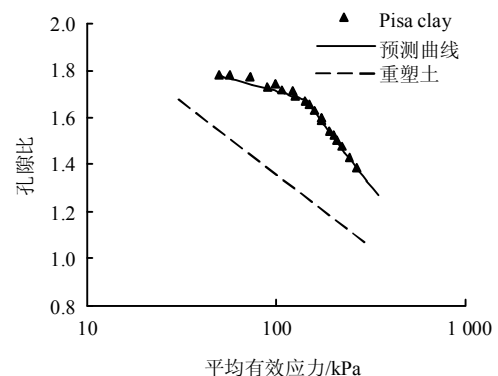
从图 3 预测曲线与实测结果的比较可以看出，由于结构性的存在，黏土抵抗变形的能力高于重塑土，不能简单采用一般重塑土的压缩模型来描述结构性黏土。采用结构性黏土压缩模型预测的曲线与实测数据符合较好，表明该模型能够有效地描述结构性黏土在一维与等压固结应力状态下的变形特性。从表 2 中可以看出，湛江黏土的结构性破坏因



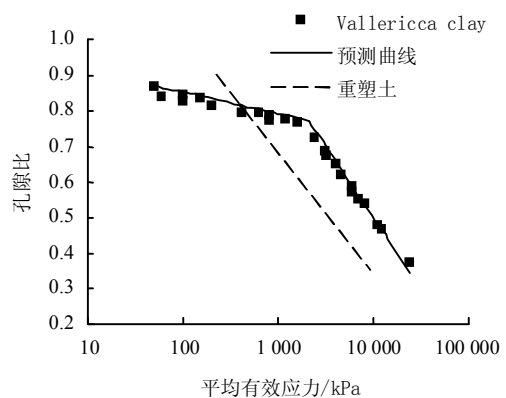
(a) 海口、湛江黏土



(b) 南沙软土



(c) Pisa clay



(d) Vallericca clay

图 3 模型预测与实测结构性黏土的压缩曲线
Fig.3 The predictive and experimental compression curves of structural clays

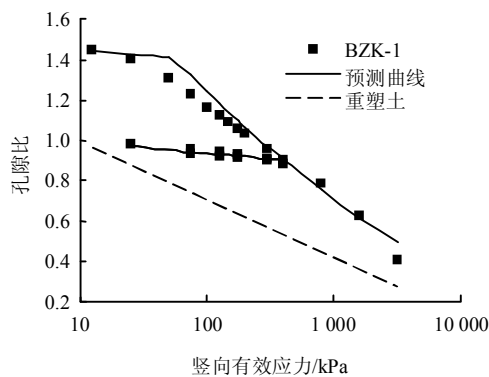
子最大, Vallericca clay 的破坏因子最小; 湛江黏土的灵敏度较大, 而 Vallericca clay 属硬黏土, 灵敏度较低, 表明结构破坏因子 b 与结构性黏土的灵敏度具有正相关性。

4 结构性黏土压缩模型的应用

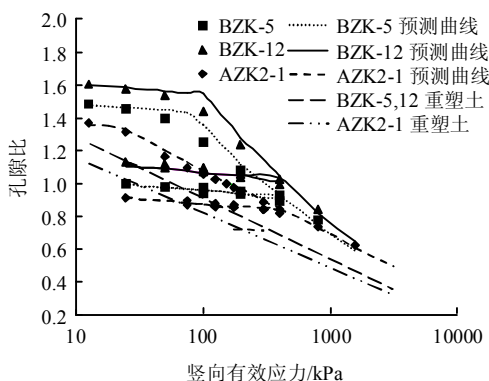
为了进一步验证该模型的可靠性及适用范围, 对浙江漩门三期海堤工程爆炸挤淤施工扰动前后进行了原位取样, 随后对所取土样进行一维固结试验 (见图 4(a)~4(c)) 和等向压缩试验 (见图 4(d))。采用建立的结构性黏土压缩模型, 对试验数据进行分析与预测, 预测结果如图 4 所示。采用的基本力学参数与模型参数见表 3、4。图 4 中所列土样的取样深度及基本物理力学性质的详细信息可参见文献 [22]。 M^* 取自对室内排水三轴试验数据的分析, 其余各参数的确定方法参见章节 3。通过试验发现, 该软黏土在高压范围趋近于重塑土的压缩曲线, 故参数 c 取 0 值。从表 4 可以看出, 漩门地区结构性黏土结构性破坏因子 b 的取值的分布范围较小, 范围为 0.13~0.60。

图 4 显示, 爆炸挤淤施工后 II 层淤泥的结构强度明显降低, 而 III 层淤泥质粉质黏土的结构强度降低稍小。由于应力状态的不同, 一维固结应力状态下黏土的压缩特性与等向压缩条件下有所差别。结构性黏土的压缩模型基本能描述浙江漩门地区结构性黏土屈服后, 结构性逐渐破损过程中的压缩、回弹与再压缩的变形特性, 爆炸挤淤扰动后, 土体的屈服应力明显降低, 特别是 II 层土。利用爆炸挤淤扰动降低结构性土的屈服强度, 使海堤抛石地基在自重作用下达到预定的置换深度是该方法的基本原理。因此, 对该地区结构性黏土压缩变形特性的研究, 能够为爆炸挤淤置换法的施工设计提供一定的理论基础, 同时, 可为海堤落底深度的设计提供量化模型。

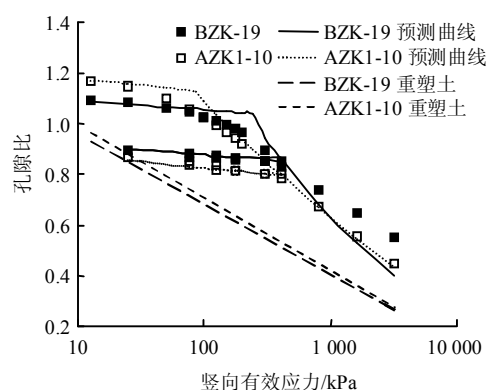
以重塑黏土的力学性质为基础, 对比结构性土与重塑土的力学性质的差异, 采用简单的数学模型来描述这些差异, 进行结构性软黏土压缩特性的预测是一种较合适的途径。采用这种研究思路的优势在于, 无论是试验研究、理论模型还是数值模拟方面, 对重塑黏性土变形与力学特性的研究已较为广泛、成熟, 积累了丰富的研究成果与经验, 可供结构性软黏土理论模型的发展及试验验证提供可靠的模型与试验数据。



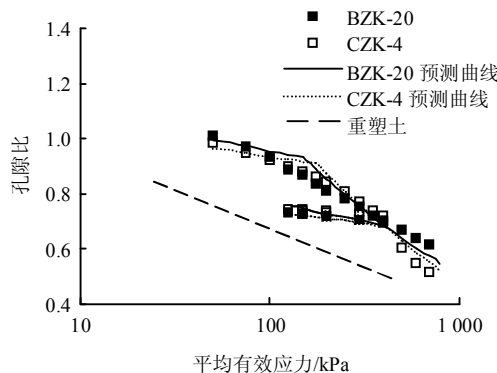
(a) I 层土样一维压缩试验



(b) II 层土样一维压缩试验



(c) III 层土样一维压缩试验



(d) III 层土样等压固结试验

图 4 预测与实测的浙江漩门地区软黏土的压缩回弹曲线
Fig.4 The predictive and experimental compression and rebound curves of soft clays in Xuanmen area Zhejiang province

表 3 重塑土的物理力学参数
Table 3 Physico-mechanical parameters of reconstituted soils

土样 编号	参数						
	e_{r0}^*	e_{η}^*	e_t^*	λ^*	κ^*	M^*	η^*
BZK-1	1.314	1.281	1.041	0.124 8	0.024 5	1.207	0.755
BZK-5	1.688	1.647	1.339	0.160 5	0.026 7	0.974	0.581
BZK-12	1.688	1.647	1.339	0.160 5	0.026 7	0.974	0.581
BZK-19	1.267	1.233	1.003	0.120 2	0.016 7	1.172	0.728
AZK2-1	1.523	1.488	1.210	0.145 0	0.024 6	0.807	0.466
AZK1-10	1.313	1.281	1.041	0.124 8	0.020 7	1.062	0.645
BZK-20	1.230			0.120 2	0.059 7		
CZK-4	1.115			0.120 2	0.039 3		

表 4 结构性黏土的物理力学参数
Table 4 Physico-mechanical parameters of structural clays

土样编号	参数			
	a	$\sigma'_{w,d}/\text{kPa}$	b	$p'_{v,d}/\text{kPa}$
BZK-1	0.609	50.1	0.30	46.4
BZK-5	0.473	74.1	0.55	72.4
BZK-12	0.641	100.0	0.55	97.7
BZK-19	0.439	199.5	0.60	186.2
AZK2-1	0.286	18.2	0.13	18.5
AZK1-10	0.380	70.8	0.30	67.8
BZK-20	0.300		0.55	150.0
CZK-4	0.420		0.45	175.0

5 结 语

以重塑黏土的压缩特性为基础,通过考虑结构性对黏土压缩特性的影响,引入结构性因子,建立结构性黏土的压缩模型能够对一维与三轴应力状态下的变形规律进行分析。建立的结构性黏土压缩模型能较好地预测浙江漩门地区结构性软黏土的压缩特性,可为该地区地基的沉降预测提供量化的手段。

开展爆炸挤淤置换施工前后结构性软黏土压缩特性的研究,有助于定量评价爆炸挤淤施工的实际效果,并为爆炸挤淤施工设计提供参考,从理论上提高海堤落底深度设计的准确性与可靠性。

参 考 文 献

- [1] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(3): 329—378.
- [2] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(1): 100—111.

学报, 1998, 20(1): 100—111.

SHEN Zhu-jiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(1): 100—111.

- [3] 吕海波, 汪稔, 孔令伟, 等. 结构性对琼州海峡软土压缩特性的影响[J]. *岩土力学*, 2001, 22(4): 467—469, 473.
- LU Hai-bo, WANG Ren, KONG Ling-wei, et al. The influences of soil structure on compressibility of Qiongzhou strait soft marine clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(4): 467—469, 473.
- [4] CHAI J C, MIURA N, ZHU H H, et al. Compression and consolidation characteristics of structured natural clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(6): 1250—1258.
- [5] 王军, 高玉峰. 加荷比对结构性软土沉降特性的影响[J]. *岩土力学*, 2007, 28(12): 2614—2618.
- WANG Jun, GAO Yu-feng. Effect of loading ratio to structured soft clay settlement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(12): 2614—2618.
- [6] 孔令伟, 张先伟, 郭爱国, 等. 湛江强结构性黏土的三轴排水蠕变特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(2): 365—372.
- KONG Ling-wei, ZHANG Xian-wei, GUO Ai-guo, et al. Creep behavior of Zhangjiang strong structured clay by drained triaxial test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 365—372.
- [7] 沈珠江. 结构性黏土的弹塑性损伤力学模型[J]. *岩土工程学报*, 1993, 15(3): 21—28.
- SHEN Zhu-jiang. An elasto-plastic damage model for cemented clays[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 15(3): 21—28.
- [8] 沈珠江. 结构性黏土的堆砌体模型[J]. *岩土力学*, 2000, 20(1): 12—15.
- SHEN Zhu-jiang. A masonry model for structured clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 20(1): 12—15.
- [9] HORIBULSUK S, MARTIN L 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(1-2): 1—9.

- [10] LIU M D, CARTER J P. Virgin compression of structured soils[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(1): 43—57.
- [11] LIU M D, CARTER J P. A structured cam clay model[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(6): 1313—1332.
- [12] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35—41.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zhen-zhong. A constitutive laws considering soil structural properties[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(4): 35—41.
- [13] 雷华阳. 结构性海积软土的弹塑性研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 721—724.
LEI Hua-yang. Study on elastoplasticity of structural marine soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(6): 721—724.
- [14] 李向全, 胡瑞林, 张莉. 软土固结过程中的微结构变化特征[J]. 地学前缘, 2000, 7(1): 147—152.
LI Xiang-quan, HU Rui-lin, ZHANG Li. The variation of microstructure during soft soil solidification[J]. **Earth Science Frontiers**, 2000, 7(1): 147—152.
- [15] 张敏江, 阎婧, 初红霞. 结构性软土微观结构量化参数的研究[J]. 沈阳建筑大学学报, 2005, 21(5): 455—459.
ZHANG Min-jiang, YAN Jing, CHU Hong-xia. The quantitative analysis of microstructure parameter of soft soil[J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University**, 2005, 21(5): 455—459.
- [16] 刘维政, 石名磊, 缪林昌. 基于扰动状态概念的结构性土压缩特性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3475—3480.
LIU Wei-zheng, SHI Ming-lei, MIAO Lin-chang. Analysis of compressibility of structural soils based on disturbed state concept[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3475—3480.
- [17] NAGARAJ T S, NARASIMHA P N S, RAJU P S R. Compressibility behaviour of soft cemented soils[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(2): 281—287.
- [18] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 海口某海域软土工程特性的微观机制浅析[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 36—40.
KONG Ling-wei, LU Hai-bo, WANG Ren, et al. Preliminary analysis of micro-mechanism of engineering properties for soft soil in a sea area of Haikou[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(1): 36—40.
- [19] 拓勇飞, 孔令伟, 郭爱国, 等. 湛江地区结构性软土的赋存规律及其工程特性[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1879—1884.
TUO Yong-fei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Occurrence and engineering properties of structural soft clay in Zhanjiang area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1879—1884.
- [20] 陈晓平, 曾玲玲, 吕晶, 等. 结构性软土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3223—3228.
CHEN Xiao-ping, ZENG Ling-ling, LU Jing, et al. Experimental study of mechanical behavior of structured clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3223—3228.
- [21] CALLISTO L, RAMPELLO S. An interpretation of structural degradation for three natural clays[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2004, 41(3): 392—407.
- [22] 陈盼, 李永和, 王吉利, 等. 爆炸挤淤作用对海相软粘土压缩特性的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 49—55.
CHEN Pan, LI Yong-he, WANG Ji-li, et al. Effect of squeezing silt by blasting on the compression characteristics of marine soft clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.1): 49—55.