

湛江海域结构性软土的边界面损伤模型研究

孙吉主¹, 王 勇¹, 孔令伟²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430070)

摘 要: 鉴于天然软土普遍具有结构性的特点, 为了考虑软土结构性的逐渐破坏过程, 提出反映结构损伤的损伤参量。在边界面理论的弹塑性模量中直接引入损伤函数, 建立结构性软土的边界面损伤模型, 避免了在边界面方程中引入损伤变量带来的复杂性, 易于在土工数值分析时采用。将理论预测与某海洋软土三轴排水与不排水剪切试验结果比较, 显示了该模型的合理性。

关 键 词: 结构性软土; 损伤; 边界面

中图分类号: TU 4

文献标识码: A

Study on bounding surface damage model for structural soft soil in Zhanjiang sea area

SUN Ji-zhu¹, WANG Yong¹, KONG Ling-wei²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430070, China)

Abstract: In view of the structural characteristics of natural soft soil, a damage parameter for reflecting structural disruption is proposed in order to consider a continuous structure damage process of soft soil. Damage function is introduced in elastic and plastic modulus expression of the bounding surface formulation directly; then a bounding surface damage model for structural soft soil is developed; the complication induced by introducing damage parameter into the bounding surface equation is avoided and its numerical implementation is easy for the analysis of earth structures. The theoretical predictions are compared with triaxial drained and undrained compression test results of a marine soft soil; it is shown that the model is reasonable.

Key words: structural soft soil; damage; bounding surface

1 引 言

结构性在天然软土中普遍存在, 对其工程性质有重要影响。近年来部分学者对软土的结构性开展了试验和理论研究, 提出了反映土结构性破坏的本构模型^[1-3]。这些模型多是根据结构性土的静力变形特性建立, 不能反映其动力变形特性以及固结状态的影响等。基于边界面塑性的概念^[4], Kavvasas、Gajo 规定边界面为结构损伤变量的函数, 以反映结构性土的动力特性^[5-6]。但模型过于复杂, 很不实用, 甚至失去了原有模型的某些功能。

本文考虑软土结构性的逐渐破坏过程, 在边界面弹、塑性模量中直接引入损伤变量, 建立结构性软土的边界面损伤模型, 准确地模拟了湛江海域结

构性软土的三轴剪切试验结果。

2 边界面损伤本构关系

为了简便起见, 以下仅讨论三轴试验情况。若土体在围压 σ_c 、偏压 σ_a 作用下, 孔压为 u , 则总的平均压力 σ_m 及有效平均应力 p 和偏应力 q 表示为:

$$\sigma_m = (1/3)\sigma_a + p_c \quad (1)$$

$$p = \sigma_m - u, \quad q = \sigma_a \quad (2)$$

此时 3 个方向的主应力为 $\sigma_1 = \sigma_a + \sigma_c$ 和 $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_c$, 相应的体应变和偏应变为 $\varepsilon_p = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_q = 2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/3$ 。以下指标上‘.’表示速率, ‘ \prime ’和‘ $\prime\prime$ ’分别表示弹性和塑性。

3 结构损伤变量

软土在载荷作用下存在两个相反趋势的变形机理,一方面,对于正常固结或弱超固结土,加载将使土体进一步固结(在不排水时为弹性和塑性体应变的转换),导致刚度增加。对严重超固结土加载,会引起剪胀现象,刚度降低。另一方面,加载又会逐一破坏土颗粒之间的胶结,使土体结构破损,刚度衰减。定义结构损伤变量为 ω

$$\omega = 1 - e^{-D\varepsilon_q''} \quad (3)$$

式中 累积塑性偏应变 $\varepsilon_q'' = \int_0^t \dot{\varepsilon}_q'' dt$, $\dot{\varepsilon}_q''$ 是塑性偏应变率, $D > 0$ 是模型参数,反映了结构破损的速度。

4 弹性损伤本构关系

在软土变形过程中,考虑结构破损对剪切模量的损伤,弹性增量本构关系由下式给出:

$$\dot{\varepsilon}_p' = \dot{p}/B, \quad \dot{\varepsilon}_q' = \dot{q}/3G(1 - d_e\omega) \quad (4)$$

式中 G 是剪切模量,系数 $d_e \in [0, 1]$ 反映了剪切模量损伤的程度,体积模量 B 可从下式得到

$$B = (1 + e_0)p/k \quad (5)$$

式中 e_0 为初始孔隙比; k 为 $e - \ln p$ 图中回弹曲线的斜率。如用 p_0 和 λ 分别表示土体等压固结的压力和固结线的斜率,可以得到:

$$\dot{p}_0 = \frac{(1 + e_0)p_0}{\lambda - k} \dot{\varepsilon}_p'' \quad (6)$$

土体压缩性受到结构破损的显著影响,损伤增加时,土体强度降低,压缩性也增大。假设

$$\lambda = \lambda_0(1 + d_\lambda\omega) \quad (7)$$

式中 λ_0 为原状土压缩曲线初始斜率,数 $d_\lambda \geq 1$ 反映了压缩性增加的程度。

5 塑性损伤本构关系

在 p - q 应力空间中选取边界面为一椭圆如图 1,椭圆与正 p 轴交于点 $A(p_0, 0)$,顶点在临界状态线(斜率为 M) 上,中心点是 $(p_0/R, 0)$, R 为材料参数,实际应力状态 (p, q) 与其在边界面上的像应力 (\bar{p}, \bar{q}) 符合径向投影规则,边界面方程如下:

$$F = \bar{p}^2 + \frac{(R-1)^2}{M^2} \bar{q}^2 - \frac{2p_0}{R} \bar{p} + \frac{2-R}{R} p_0^2 \quad (8)$$

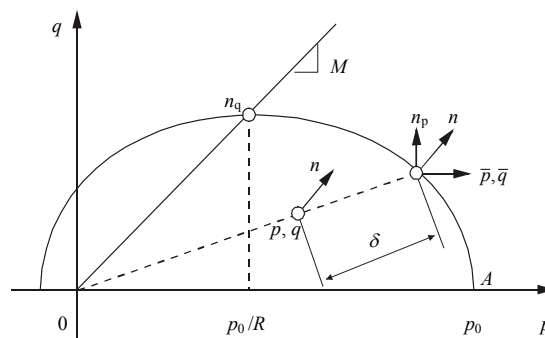


图 1 边界面与映射规则

Fig.1 The bounding surface and mapping rule

边界面塑性本构关系为:

$$\dot{\varepsilon}_p'' = \langle L \rangle n_p, \quad \dot{\varepsilon}_q'' = \langle L \rangle n_q \quad (9)$$

$$L = \frac{1}{H}(\dot{p}n_p + \dot{q}n_q) = \frac{1}{H_b}(\dot{p}n_p + \dot{q}n_q) \quad (10)$$

式(9)为 $\langle L \rangle$ 阶跃函数, $L \geq 0$ 时, $\langle L \rangle = L$; $L < 0$ 时, $\langle L \rangle = 0$; n_p, n_q 是边界面上像应力点处的法向单位向量的分量。式(10)中 H_b 为“边界”塑性模量,可由一致性条件 $dF = 0$ 求得,它与实际塑性模量 H 的插值关系为:

$$H = \left[H_b + \frac{1 + e_0}{\lambda - k} \frac{\delta}{p_0 - \delta} p_0 h \cdot (1 + |X|^{-m}) \right] (1 - d_p\omega) \quad (11)$$

式中 δ 为应力点与其像之间的距离; $X = M/(q/p)$, m, d_p 和形状硬化模量 h 是材料常数。通过引入损伤因子,上式反映了结构破损对塑性模量的影响, $d_p \in [0, 1]$ 反映了损伤的程度。

6 模型特性与预测分析

试验研究表明^[7, 8]: 湛江海域海洋土虽按土质分类为淤泥,但其抗剪强度相对较高,具有一定的结构强度,是一种结构性软土,以至在该海域进行防波堤爆炸挤淤过程中出现按通常爆填施工未能达到原设计标高异常现象。本文用前面建立的边界面损伤模型对该海洋土的常规三轴排水和不排水剪切过程进行了计算,选用参数如表1所示(m, h 本次计算不用),与实验结果比较如图2, 3所示,其中曲线代表理论计算结果,点符表示试验数据。

表 1 边界面损伤模型计算参数

M	R	λ_0	k	G / kPa	d_e	d_p	d_λ	D
0.71	2.70	0.06	0.06	2000	0.34	0.80	1.57	1.2

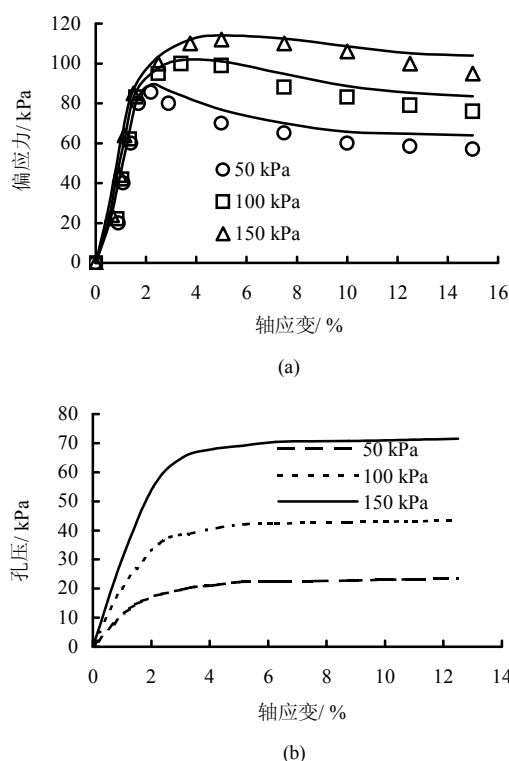


图2 湛江海域软土 CU 试验与理论计算结果
Fig.2 Predicted and experimental results for triaxial undrained compression on soft soil in Zhanjiang sea area

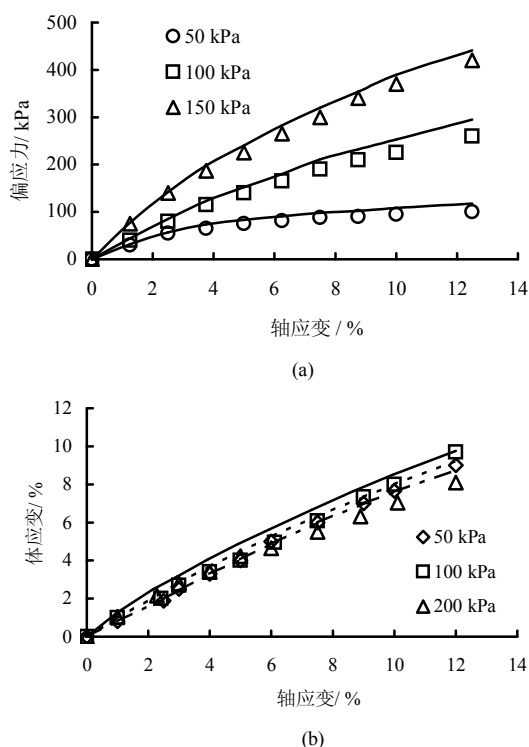


图3 湛江海域软土 CD 试验与理论计算结果
Fig.3 Predicted and experimental results for triaxial drained compression on soft soil in Zhanjiang sea area

图2是围压分别为50, 100和150 kPa时三轴不排水CU剪切过程的理论计算与实测结果。从图2(a)应力-应变曲线可以看到, 模型对结构性土的应

变软化过程进行了较好的模拟。图2(b)显示: 理论计算孔压单调增加, 土体软化过程伴随体缩而不是体胀, 软化现象是由结构损伤引起的。

图3是围压分别为50, 100和150 kPa三轴排水CD剪切过程的理论计算与实测结果。图3(a)表明: 在排水条件下结构损伤不明显, 土体变形多以颗粒错动发生, 无应变软化现象出现, 模型很好地捕捉到了这一特性。从图3(b)可以看到, 在不同围压下进行剪切, 土体表现出相同的剪缩性。原因是剪胀性与固结状态(OCR)直接相关, 而本次试验土样均为正常固结(OCR=1), 模型预测与试验结果吻合较好。

7 结 语

本文提出了考虑结构性损伤的软土边界面模型, 使边界面塑性模型能更好地描述粘土的本构关系, 具体表现如下:

(1) 天然软土大都具有结构性, 但现有的边界面塑性模型难以描述由于土的结构性引起的各种非线性行为, 其计算结果与实际数值有一定差距。

(2) 保留原边界面塑性模型的各种功能, 即对不同单调和循环加载条件下粘土本构特性的模拟。

(3) 避免了在边界面方程中引入损伤变量带来的复杂性, 在塑性模量中直接引入损伤函数, 更易于在土工数值计算时采用。

(4) 本文模型能较好地模拟湛江海域结构性软土的三轴剪切变形特性, 对循环荷载下土体响应描述的适应性有待检验。

参 考 文 献

- [1] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥, 等. 粘土结构性对其力学性质的影响及其形成原因分析[J]. 水利学报, 2000, (10): 43-47.
GON Xiao-nan, XION Chuan-xiang, XIAN Ke-xiang, et al. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2000, (10):43-47.
- [2] 沈珠江. 结构性粘土的堆砌体模型[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.
- [3] 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.
- [4] Dafalias Y F, Herrmann L R, Denatale J S. The bounding surface plasticity model for isotropic cohesive soils and its application at grenoble workshop[A]. Ed., G.Ghudeus, F. Darve, I.Vardoulakis, *Constitutive Laws for Soils*. Brookfield: A.A Balkema, 1984, 273—87.
- [5] kavvasdas M, Amorosi A. A constitutive model for structured soils[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(3): 263—273.
- [6] Gajo A, Wood D M, A new approach to an anisotropic, bounding surface plasticity and simulations of natural and reconstituted clay behaviour. **Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.** 2001, 25: 207-241.
- [7] 吕海波. 琼州海峡软土结构性的工程效应及损伤模型研究[博士学位论文 D]. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002.
- [8] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. *水利学报*, 2002, (9): 82—88.
- KONG Ling-wei, LU Hai-bo, WANG Ren, et al. Engineering properties and micro-mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, (9): 82—88.