

黏土弹塑性变形的数值模拟方法研究

艾有刚¹ 张心平² 李艳洁¹ 徐泳¹

(1. 中国农业大学 理学院,北京 100083; 2. 中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 在对黏土土样进行典型土力学实验的基础上,根据岩土材料的弹塑性理论,选取适用于岩土类材料的 Drucker-Prager 准则和与之相关的流动法则,对土样单轴压缩实验采用有限元软件进行数值模拟。模拟与试验结果比较表明:预测得到的屈服面与试验所得破坏面的方位吻合很好,证明所选的土的弹塑性模型是正确的;笔者提出的从土样试验提取模型参数,并根据土样特征选取相应模型进行数值计算的研究方法是可行的,适用于土工程屈服失效问题的数值计算。

关键词 土力学; 土壤力学; 弹塑性; 有限元法; 数值模拟

中图分类号 TV 16; O 347.7

文章编号 1007-4333(2007)01-0081-04

文献标识码 A

Methodology of numerical computation for elastoplastic deformation of clay

Ai Yougang¹, Zhang Xinping², Li Yanjie¹, Xu Yong¹

(1. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Based on typical soil mechanical tests of a soil specimen, the Drucker-Prager criterion and related yield criterion for rocky/ soil materials were adopted to carry out a numerical simulation for the simple compression test of the soil specimen using the Finite Element Method. A comparison between the results from the simulation and the tests was done and the results demonstrated a good coincidence of failure surface position and direction, which proved the soil elastoplastic model a valid approach. The method was proposed for relevant soil engineering computations, such as determining model parameters, and suitable model from soil tests, simulation of the same problem as the simple soil test to validate the selected model etc. Then a real simulation job can be conducted for a practical geotechnique problem.

Key words geotechnique; soil mechanics; elastoplasticity; finite element method; numerical simulation

土是由无数微细的颗粒组成的松散固体,由于自然或人工的原因,不同地区、构造和层次的土的物理力学性质呈现多样性和分散性,使得滑坡、开挖、平整和耕作等土动力学工程问题分析的复杂性大大增加,其数值计算方法也成了当前的研究热点^[1~3]。在有限元法分析土工问题时,首先要确定土的本构模型^[4],之后对确定的模型还需要经过试验检验^[5]。在土工学计算中预测大变形失效或破碎时,通常需要采用具有黏结功能的颗粒离散元法^[6]或者类似块体离散元的非连续变形模型^[7],尚未见到

利用国际流行的先进有限元软件模拟程序预测大变形失效的文献报道。

为探求土力学工程计算的合理途径,本研究尝试一种试验和数值模拟相结合的方法,其基本思路是:以土样的基本试验为基础,获得土样的相关物性参数,并由此选取可能适用的土的本构模型进行数值模拟最基本的土样试验。由于模拟条件及土的物性参数均与试验一致,因此把模拟结果与试验进行比较,就可以判断该本构模型是否适用。当选定了该土样最适合的本构模型后,再用来计算土工程实

收稿日期: 2006-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10372113)

作者简介: 艾有刚,硕士研究生;徐泳,教授,博士生导师,通讯作者,主要从事计算散体力学与固体力学研究, E-mail: xuyong@cau.edu.cn

实际问题就有了方法学保证。

1 土样试验

土样试验的目的是找出土样适合的弹塑性本构模型,并从试验结果中提取模型参数。方法是利用标准试验机并依据操作规范进行常规土力学基本试验。

试验土样取自中国农业大学校园某施工工地,原为农田。首先对试验土样进行颗粒分析试验,得到该种土的颗粒级配曲线(图1)。根据美国农业部颁布的按照土颗粒大小进行土壤分类的方法^[8],确定试验土样为黏土。

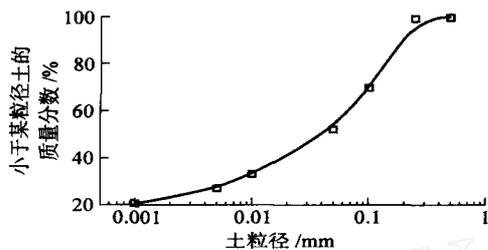


图1 土样颗粒成分累计曲线

Fig.1 Accumulated size distribution of soil components

黏土稠度受土中含水率的影响,黏土根据含水率的高低程度依次表现液态、塑态、半固态和固态。对土样进行试验测出其阿太堡界限(Atterberg limit)为:液限值 $w_l = 33.8\%$,塑限值 $w_p = 15.2\%$,塑性指数 $I_p = 18.6$,液性指数 $I_L = 53.23\%$ 。当土样含水率小于其塑限值时,其体积变化微小。本研究按照土工试验规范^[9]制作标准的土试件,高度 $H = 0.008\text{ m}$,直径 $d = 0.0391\text{ m}$ 。对土试件做单轴压缩试验,测得不同含水率下的轴向应力 σ_1 与轴向应变 ϵ_1 关系曲线见图2。

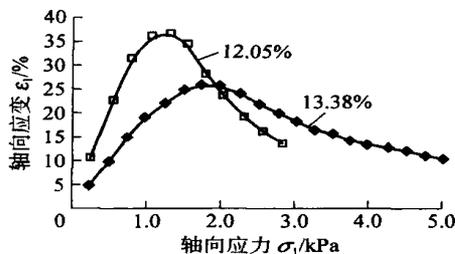


图2 2种含水率土试件单轴压缩曲线

Fig.2 Compression test curves of soil samples with two different moisture contents

土试件拉伸试验无标准设备,本研究中采用啤酒罐铝合金筒和弹簧秤自制了一套装置,可以将圆

柱形试件水平放置在下有滚珠的2个平板上进行拉伸试验,所得土的拉伸强度 σ_t 稳定在压缩强度 σ_c 的 $1/6$ 左右。试验中压缩应变 ϵ_c 容易测定,而与拉伸强度 σ_t 相应的拉伸应变 ϵ_t 却很难测出。作者将压缩曲线从原点反向延长到拉伸强度 σ_t 处,对应的应变值即可认为是相应的拉伸应变 ϵ_t (图3)。当压缩试验中载荷增加到某一值时(如图3中A附近)停止并卸载,发现有部分回弹和部分塑性变形,这表明按照土的弹塑性模型分析比较合理。

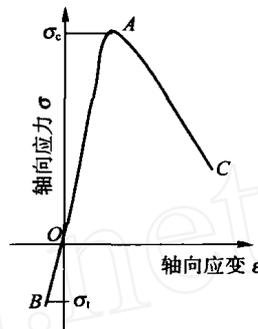


图3 确定土试件拉伸应变示意图

Fig.3 Sketch of determining tension strain of the soil specimen

对一定含水率的土试件进行常规三轴压缩试验,可测得土样的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ϵ_1 的关系曲线。图4(a)和(b)分别示出含水率 13.67% 和 8.09% 的试件在不同围压下主应力差与轴向应变的关系。由图4可知,在加载过程中土样的主应力差单调增加而无峰值。按土工试验规范^[9],当试验曲线无屈服点时,取 15% 轴向应变对应的主应力差值作为失效点,以剪应力,即主应力差为纵坐标,法向(轴向)应力为横坐标,可得莫尔-库仑准则下的2个抗剪强度参数,即黏聚强度 c 和内摩擦角 ϕ 。

2 理论模型

对土的数值模拟,本研究采用多数研究者所选用的弹塑性模型,材料屈服准则为考虑静水压力对屈服和破坏影响的 Drucker-Prager 准则^[10]。在主应力空间中该准则的数学表达式为

$$f_y = I_1 + \sqrt{J_2} - k \tag{1}$$

式中: I_1 和 J_2 分别是第1和第2应力张量不变量: $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, J_2 = S_{ij}S_{ij}/2, S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_1/3$ 。

材料模型参数 k, c 与莫尔-库仑准则参数 C, ϕ 存在一定的换算关系:在 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 条件下推导出如下关系

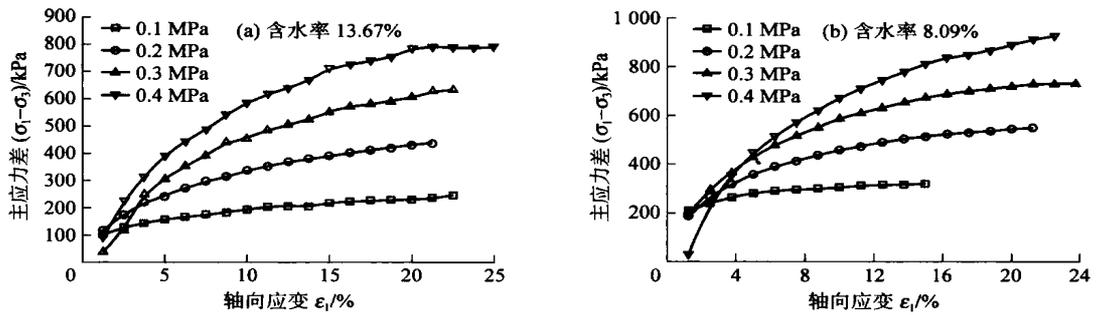


图 4 不同围压下测出的土试件的主应力差与轴向应变曲线

Fig. 4 Measured curves of principal stress difference versus tensile strain of samples at different surrounding pressures

$$= \frac{2 \sin}{\sqrt{3}(3 + \sin)}, k = \frac{6 c \cos}{\sqrt{3}(3 + \sin)} \quad (2)$$

按照有限变形理论即可建立结构在大变形时的弹塑性本构关系,具体公式推导参看文献[4]和[11]。

3 单轴压缩试验数值模拟

3.1 数值模拟的参数和条件

在加载中土试件的变形多属非线性大变形,采用包含丰富土壤本构模型的有限元软件 MARC 分析模拟^[12]。经过二维和三维 2 种分析模式的计算比较,发现三维有限元计算的结果没有二维的直观,所以简化为平面应力问题。按照横截面积等价原则简化,即 H 不变,以直径 d 为横向尺寸算出厚度 t 。故试件高度 $H = 0.008$ m,宽度 $d = 0.0391$ m,厚度 $t = 0.0307$ m。

沿轴向在端面上施加位移,试件轴向受压变形而横向自由膨胀,两端面出现分布反力。简化后的矩形的 2 个侧边为自由边界。采用较高精度的三角形 6 节点单元。选取含水率 12.05% 的土试件进行模拟,所用参数见表 1。表中初始弹性模量 E_0 为加

表 1 土试件数值模拟采用的物理和模型参数

Table 1 Material properties and model parameters

参 数	值
初始弹性模量 E_0 / Pa	3.965×10^6
割线弹性模量 E_s / Pa	2.435×10^6
平均弹性模量 E_a / Pa	3.200×10^6
泊松比	0.14
压实密度 ρ / (g/cm ³)	1.698
黏聚强度 C / kPa	31.642
摩擦角 φ / (°)	25.8
初始屈服强度/ kPa	28.717
材料模型参数 $k = \frac{2 \sin}{\sqrt{3}(3 + \sin)}$	0.1464

载开始时的切线模量;割线模量 E_s 是取曲线原点与失效点(图 3 的 A 点)间的割线得到; E_a 是初始模量与割线模量的均值。按照网格单元边长减半方式比较前后 2 次计算结果,当二者充分接近时为收敛。现采用的单元总数约为 12 000 个。采用 $N-R$ 迭代方法和位移收敛准则。分别选用表 1 中的 3 种材料模量 E_0 、 E_s 、 E_a 对压缩试验进行数值模拟。

3.2 模拟与试验结果比较分析

图 5(a)和(b)分别示出单轴压缩试验土试件的破坏结果和选用初始模量 E_0 时按二维简化模拟所得的试件屈服变形的网格图和主剪应力等值线图,其中试件破坏的形式为几次试验中之典型者。可以看出,采用 Drucker-Prager 准则的弹塑性模型,按照物理和几何非线性大变形问题的模型,计算出的土试件屈服失效面(或称剪切带)与土试件压缩试验破坏裂面吻合较好。

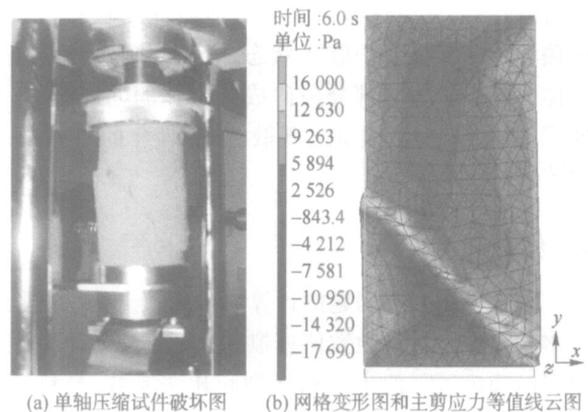


图 5 土试件压缩试验与有限元模拟结果的比较

Fig. 5 Comparison between results from uniaxial compression test and FEM simulation

图 6 示出采用表 1 中 3 种按常数计算的弹性模量进行有限元模拟得到的试件加载过程中轴向应力-应变曲线与实测结果的比较,其中有限元模拟的轴

向应力结果取截面上应力的平均值。以压缩试验的应力-应变曲线为基准与模拟结果逐一比较可见,模拟得出的3组曲线与试验曲线变化趋势一致。以试验曲线初始切线斜率为弹性模量的有限元计算值与试验值相比,偏差为1.45%;而按试验曲线起点与峰值点取直线的割线模量计算时误差为2.26%,按平均模量计算误差为0.16%。按试件在屈服前的刚度比较,采用初始切线弹性模量计算的结果与试验最接近,采用割线模量计算时刚度较小偏离最大,而按平均模量计算刚度在二者之间。综合考虑弹塑性2阶段的曲线特征,笔者认为采用初始弹性模量计算好些,而采用割线模量将导致变形偏大的结果。

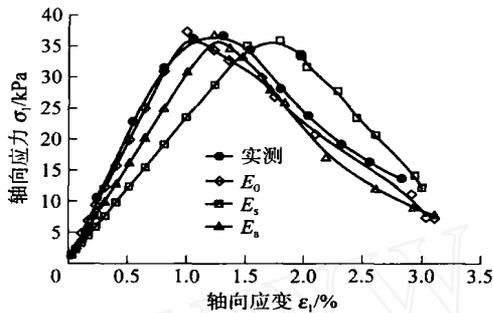


图6 FEM模拟和实测的应力-应变曲线比较

Fig. 6 Comparison between measured and simulated curves of axial stress and axial strain

综上,笔者设想的将土工试验与数值计算结合的方法,即土力学试验—选定模型—数值模拟检验后,进入土工工程实际问题计算的计算模式,经证明具有可行性;但凭借现有的大多数有限元工程软件只能预测到屈服失效的临界状态,若需要预测涉及连续体的开裂破坏或部分破碎成离散体的问题,则只能采用类似于有限元-离散元相结合的方法解决^[7-13]。

4 结论

1)在土工实际问题的计算中,按照“土力学试验—本构模型—对试验数值模拟”的思路,先做预备性研究以确定适用的土本构模型和相关参数,是科学的工程数值预测的必要途径。

2)本研究所用的试验土样,数值模拟和试验结果得到的剪切破裂带方位及形状吻合,证明选用Drucker-Prager准则和相关的流动法则是合理的。

3)在弹塑性有限变形范畴内,对承压土体结构用有限元法模拟屈服失效可得到比较满意的结果。

致谢:感谢清华大学机械工程学院曾攀教授及其研究组成员和美国MSC公司北京代表处钱纯、陈火红的指导。

参考文献

- [1] 栾茂田,黎勇,杨庆.非连续变形计算力学模型在岩体边坡稳定性分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):289-294
- [2] 茹忠亮,冯夏庭,李洪东,等.大型地下工程三维弹塑性并行有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1141-1146
- [3] 刘亚莲,李永见,茜平一.土工有限元中弹塑性分析的实现[J].重庆大学学报(自然科学版),2002,25(6):106-108
- [4] 陈惠发(美),萨里普A.F.混凝土和土的本构关系[M].余天庆,王勋文,刘西拉,等,编译.北京:中国建筑工业出版社,2004
- [5] 栾茂田,鹄饲惠三.关于岩土工程研究中若干基本力学问题的思考[J].大连理工大学学报,1999,39(2):309-316
- [6] Iwashita K, Oda M. Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method[J]. Powder Technology, 2000, 109(1-3):192-205
- [7] 栾茂田,黎勇.非连续变形计算力学模型弹塑性数值分析方法及其应用[J].岩土工程学报,2001,23(5):530-535
- [8] 邓恩.土工分析基础[M].北京:地质出版社,1984
- [9] GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999
- [10] 邓楚键,何国杰,郑颖人.基于M-C准则的D-P系列准则在岩土工程中的应用研究[J].岩土工程学报,2006,28(6):735-739
- [11] 廖红建,王铁行.岩土工程数值分析[M].北京:机械工业出版社,2006:43-54
- [12] 陈火红,尹伟奇,薛小香.MSC.Marc二次开发指南[M].北京:科学出版社,2004
- [13] Owen D R J, Feng Y T. Parallelised finite/ discrete element simulation of multi-fracturing solids and discrete systems[J]. Engineering Computations, 2001, 18(3-4):557-576