

土体小应变下的非线性特征试验研究

赖 勇,宋雄伟,施建勇

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要:研究土体在小应变条件下的应力-应变关系特征,以标准砂和粉砂为试样,利用 GDS 数字应力控制三轴仪进行特殊应力路径下的固结排水试验,在试验的基础上,将 Puzrin & Burland 的对数曲线型非线性模型、Goto 等的正弦函数型非线性模型和传统的双曲线模型的土体应力-应变关系及弹性模量的模拟结果与试验结果进行对比,结果表明,小应变模型能够更好地反映土体在小应变下的变形特征。

关键词:土体;小应变;应力;本构模型

中图分类号:TU411 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2005)03-0306-04

实际工程中,土体的应变在 3% 以内,主要集中在 0.01% ~ 1% 之间^[1,2],刚好处于小应变区域内,而现有研究表明,土体在小应变条件下,呈现高度的非线性,具有刚度急剧变化、受应力路径影响等特点^[3],因此,在数值模拟计算的过程中,采用小应变模型就显得尤为重要。

目前,已有不少针对土体小应变特征的小应变模型^[4~6],然而,在实际工程中采用的不多,对于小应变模型与常规模型在对土体的非线性特征进行模拟时的差异情况认识目前尚不清楚,为此,笔者采用具有较高精度的 GDS 数字应力控制三轴仪^[7]对砂土进行了试验,在小应变条件下将 Puzrin & Burland^[5]提出的考虑小应变的对数曲线模型、Goto 等^[6]提出的考虑小应变的正弦函数模型和传统的双曲线模型^[8]与试验结果进行了对比。

1 试验设备与方法

1.1 试验设备

试验采用 GDS 数字应力控制三轴仪系统,该系统在应力控制和数字采集方面可全部由计算机控制自动完成,设备主要组成部分有 B&W 压力室, GDS 压力/体积数字控制器,霍尔效应传感器,试验测试系统构成如图 1 所示。

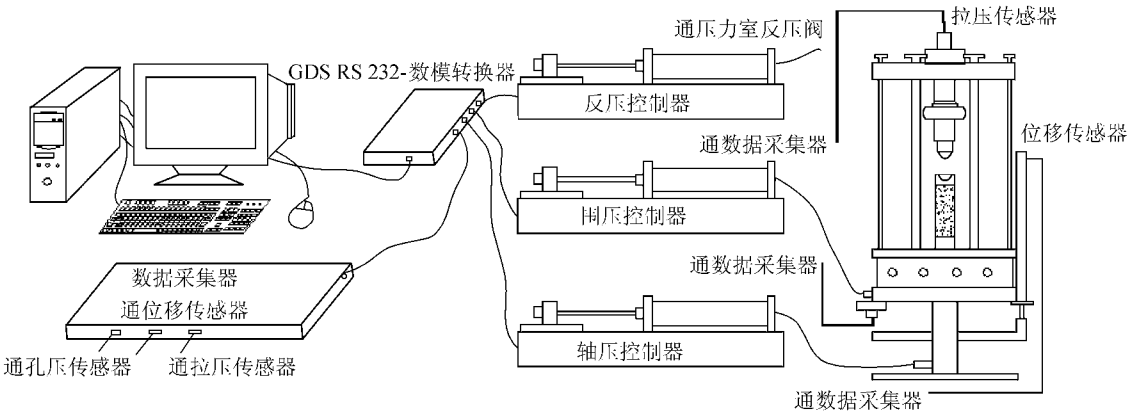


图 1 GDS 三轴测试系统构成

Fig.1 Configuration of GDS triaxial measurement system

1.2 试验方法

试验分两组：一组为等压固结下的常规三轴压缩试验，所采用的土样为实验室常用的标准砂，主要物理力学指标为干密度 1.65 g/cm^3 ，孔隙比 0.64 ，相对密实度 0.63 ，颗粒直径 $0.5\sim 1\text{ mm}$ ，试验方法为将试样等压固结到几个不同的围压下后，保持围压不变、增大轴压进行剪切；另一组为 K_0 固结下的三轴拉伸试验，土样为粉砂，主要物理力学指标为密度 1.86 g/cm^3 ，孔隙比 0.856 ，含水率 29.9% ，试验方法为在几个不同的轴压下实现 K_0 固结后，保持轴压不变，增大围压进行剪切。

粉砂采用击实法制样，标准砂采用经过煮沸过的砂样，直接在压力室底座上装样，经过水头饱和后再反压饱和，直到试样的饱和度达到 95% 以上才开始试验。为了减少外部测量带来的误差，在试样高度的 $1/3\sim 2/3$ 处安装了轴向霍尔效应传感器，并在试样中部安装了径向传感器，即采用压力室内部测量局部位移的方法测量应变。试验时，先使试样固结达到一定应力，然后使固结应力维持 24 h 以上，以消除蠕变带来的影响。整个试验都是在恒温条件下进行的，可减少温度变化带来的误差影响。

2 模型简介

2.1 Puzrin & Burland 的对数曲线模型

Jardine^[3]提出可以把土体的应力-应变关系在边界内分成 3 个区域，从内往外分别为线弹性区域、非线性弹性的小应变区域和弹塑性区域。在 Jardine 的小应变区域的理论基础上，Puzrin 等^[5,9,10]提出可以用对数曲线模型来模拟土体在小应变及弹塑性阶段的应力-应变关系。

首先，将应力、应变归一化，即

$$y = \frac{\sigma'}{\sigma'_L} \quad x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{\text{ref}}} \quad \epsilon_{\text{ref}} = \frac{\sigma'_L}{E_{\text{max}}} \tag{1}$$

式中： y ——归一化应力； x ——归一化的应变； σ' ——应力； ϵ ——应变； σ'_L ——极限应力； ϵ_{ref} ——基应变； E_{max} ——最大弹性模量或初始弹性模量，也就是处于线弹性阶段的弹性模量。在此基础上，应力-应变关系可表示为

$$y = x - \alpha(x - x_e) \ln(1 + x - x_e) \tag{2}$$

式中： x_e ——归一化的线弹性应变极限； α, R ——与土体特性有关的参数。当归一化的应力分别采用偏应力和球应力，对应的归一化应变采用剪应变和体积应变时，模型可用来计算剪切模量和体积模量。

2.2 Goto 的正弦曲线模型

Gotd^[6]认为用以下正弦曲线模型可以很好地反映土体在小应变下的变形特征。

$$y = \frac{q - q_0}{q_{\text{max}} - q_0} = \sin(A + B \lg \epsilon_a)^C \tag{3}$$

式中： y ——归一化应力； q, q_0, q_{max} ——偏应力、初始偏应力和极限偏应力； ϵ_a ——轴向应变； A, B, C ——与土体特性有关的参数。模型的劲度用割线弹性模量表示时，小应变段与线弹性段的劲度不连续。为此，Goto 提出了相应的修正方法。

2.3 传统的双曲线模型

根据 Kondner^[11]的发现，在一定的固结压力 σ_3 下， $q \sim \epsilon_a$ 的关系可表示为

$$q - q_0 = \frac{\epsilon_a}{\frac{1}{C_1 E_{\text{max}}} + \frac{\epsilon_a}{C_2 (q_{\text{max}} - q_0)}} \tag{4}$$

式中： C_1, C_2 ——加权系数。公式 4 就是传统的双曲线模型所采用的应力-应变关系。当 $q_0 = 0, \sigma_3$ 保持不变，加权系数 $C_1 = C_2 = 1$ ，弹性模量采用切线弹性模量时，即为常用的 Duncan-Chang 模型^[8]。

3 试验结果分析

图 2 为围压 50 kPa 的常规三轴压缩试验结果的模拟情况。由图 2 可见，Goto 正弦曲线模型的模拟结果最好，在整个应变变化范围内与试验曲线几乎吻合。传统的双曲线模型的模拟结果与试验结果比较，除在轴向

应变 0.04% 以下有一点偏差外,总体上具有很好的一致性,说明在围压不变时,双曲线模型是基本适用的;Puzrin & Burland 模型模拟出的曲线关系与试验曲线在轴向应变为 0.1% ~ 1% 时有一些差距,但轴向应变在 0.1% 以下时具有很好的一致性。

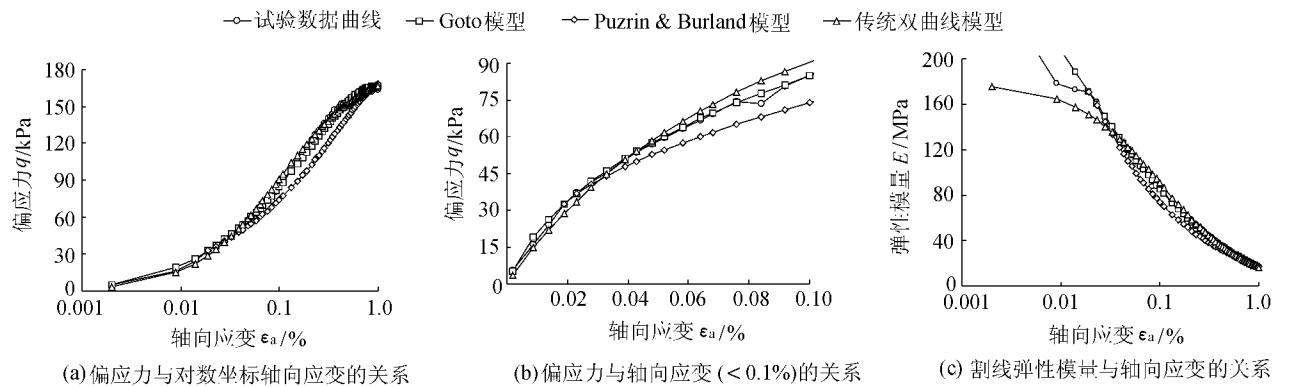


图2 常规三轴压缩试验模拟情况

Fig.2 Simulated result of conventional triaxial compression tests

图3为轴压 200 kPa 的 K_0 固结下的三轴拉伸试验的模拟结果,试样 K_0 固结后有效轴压为 200 kPa,有效围压为 105 kPa. 由图3可见,Goto 正弦曲线模型仍然很好地反映了试验曲线的变化规律,传统的双曲线模型在轴向应变变化小于 0.2% 时与试验结果存在很大差异,该试样的 $\epsilon_a/\Delta q \sim \epsilon_a$ 关系曲线(图4)也可发现,在小应变下其不再是一条直线,且与直线的偏差很大,这说明在 K_0 固结、 σ_3 变化的情况下,使用双曲线模型已不合理,此时 Puzrin & Burland 模型模拟出的曲线与试验曲线也有很好的一致性,但在轴向应变变化小于 0.1% 时,相对于 Goto 正弦曲线模型模拟的结果还有一定的差距。

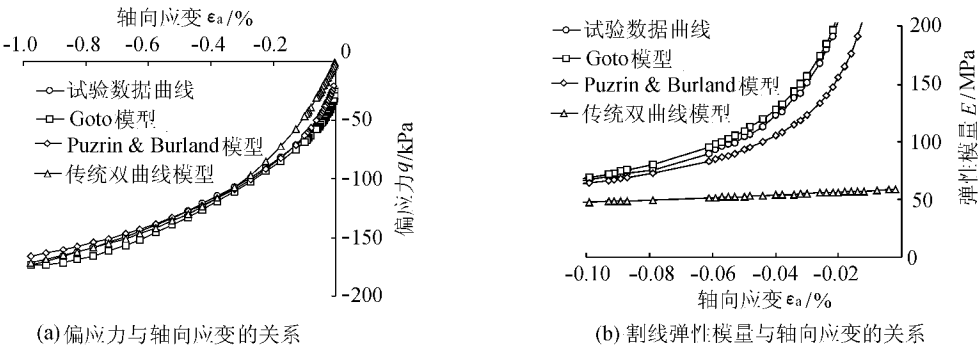


图3 三轴拉伸试验模拟情况

Fig.3 Simulated result of triaxial tensile tests

传统的双曲线模型(比如 Duncan-Chang 模型)相对于小应变模型具有参数物理意义明确且易于确定等优点,这是其在非线性弹性模型中得到广泛应用的根本原因.然而,本文的试验结果表明,这一类模型不能反映土体在 K_0 固结、 σ_3 变化时,在小应变下具有高度的非线性、很高的劲度、劲度急剧变化、受应力路径的影响等特点.而实际工程中,土体通常处于 K_0 固结状态,并且围压不变的也很少,因此,在实际应变为小应变的工程中进行数值计算时传统的双曲线模型不适用。

另外,在轴向应变 $\epsilon_a < 0.04\%$ 时,本次试验所采用的两种土体都表现出了极高的劲度,割线弹性模量都在 100 MPa 以上,因此,在数值模拟计算时,实际应变范围应为小应变的,对这一极高的劲度加以考虑是有必要的。

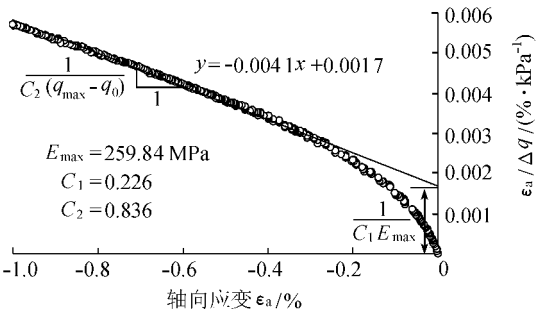


图4 $\epsilon_a/\Delta q \sim \epsilon_a$ 关系曲线

Fig.4 Curves of $\epsilon_a/\Delta q$ versus ϵ_a

4 结 语

- a. 在等压固结、 σ_3 不变时 ,双曲线模型与试验曲线基本吻合 ,但在 K_0 固结、 σ_3 变化时 ,难以反映土体的小应变特征 ,因此双曲线模型在实际应变为小应变的工程数值模拟计算中不适用.
- b. Goto 正弦曲线模型在两组试验中都很好地反映了整个试验曲线的变化规律 ,是本文 3 个模型中模拟得最好的 .Puzrin & Burland 模型在轴向应变 $\epsilon_a < 0.1\%$ 也能较好地反映土体的小应变特征 .在保持传统的双曲线模型参数物理意义明确、易于确定等优点的前提下 ,如果能参考 Goto 模型可以反映小应变特征的做法对传统的双曲线模型进行修正 ,使之也适用于小应变情况 ,这将是非常有意义的工作 .
- c. 在轴向应变 $\epsilon_a < 0.04\%$ 时 ,本次实验采用的两种土体都具有很高的劲度 ,因而 ,在利用数值模拟计算土体的沉降、地层的移动及对建筑物的影响等小应变范围内的工程问题时 ,采用考虑小应变特征的模型是很有必要的 .

参考文献 :

[1] BURLAND J B. Ninth laurits bjerrum memorial lecture : small is beautiful—the stiffness of soils at small strains[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1989 26(4) :499—514.

[2] MAIR R J. Developments in geotechnical engineering research : application to tunnels and deep excavations[J]. Proc Instn Civ Engrs Civ Engng ,1993 93(2) :27—41.

[3] JARDINE R J ,SYMES M J ,BURLAND J B. The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus[J]. Geotechnique ,1984 34(3) :323—340.

[4] 施建勇 ,赵维炳 ,LEE Fouk-hou 等 . 软黏土的各向异性和小应变条件下的本构模型(ASM I) [J]. 岩土力学 ,2000 21(3) :209—212.

[5] PUZRIN A M ,BURLAND J B. A logarithmic stress-strain function for rocks and soil[J]. Geotechnique ,1996 46(1) :157—164.

[6] GOTO S ,BURLAND J B ,TATSUOKA Fumio. Non-linear soil model with various strain levels and its application to axisymmetric excavation problem[J]. Soils and Foundations ,1999 39(4) :111—119.

[7] 宋雄伟 ,吕进 .GDS 在测量土体小应变中的应用[J]. 电力勘测 ,2003 (2) :17—20.

[8] 钱家欢 ,殷宗泽 .土工原理与计算[M]. 第 2 版 . 北京 :中国水利水电出版社 ,1996. 54—60.

[9] PUZRIN A M ,BURLAND J B. Non-linear model of small-strain behavior of soil[J]. Geotechnique ,1998 48(2) :217—233.

[10] HARDIN B O ,DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils : design equations and curves[J]. J. of SMFE Div Proc ASCE ,1972 ,98(7) :667—692.

[11] KONDNER R B. Hyperbolic stress-strain response : Cohesive soil[J]. J. of SMFE Div Proc ASCE ,1963 89(1) :115—143.

Experimental study on nonlinear behavior of soils at small strains

LAI Yong , SONG Xiong-wei , SHI Jian-yong
(*Geotechnical Research Institute , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China*)

Abstract :A study was made on the stress-strain behavior of soils at small strains . With the standard sand and silty sand selected as test samples , consolidation-drained tests for special stress path were performed by use of the GDS triaxial measurement system . The comparison of the test result with the simulated results obtained by Puzrin & Burland 's non-linear logarithmic curve model , the sine function nonlinear model proposed by Guto , et al , and the conventional hyperbolic model , shows that the deformation behavior of soils at small strains can be better expressed by small strain models .

Key words :soil ; small strain ; stress ; constitutive model