理论实践

取土器切入引起土体扰动的数值模拟分析

李家平，高大钊，李永盛
（同济大学地下建筑与工程系，上海 200092）

[摘 要]采用有限元法对取土器压入土体过程作了初步数值模拟，评价该过程产生的扰动，并分析取土器参数对扰动程度的影响。根据模拟结果，取土器切入对周围土体产生了扰动影响，形成环形和上端塑性扰动带，中心部位扰动相对较小，中间土位移以竖向为主，竖向应变经历了压－拉过程。取土器面积比、摩擦系数和刃口角度大小均对扰动程度产生影响。

[关键词]取土 扰动 数值模拟
[中图分类号]TU413 [文献标识码]A [文章编号]0495－5331(2003)S0－0113－06

0 引 言

室内土工试验是获取设计所需土性参数的重要手段之一。参数选取直接影响到整个设计的安全性和经济性。然而参数的可靠与否在很大程度上取决于土样扰动程度。因此，研究土样扰动就显得十分重要。1985、1987年Baligh等[1]把取土过程看作是无压缩变形、无粘滞性、无转动的液体沿不透水取土筒的流动过程，通过在取土器两头设定不同的水头势能，使液体沿取土筒壁产生流动。在此假设下进行数值模拟，并用“应变路径法”分析取土过程产生的扰动影响。通过分析模拟结果，Baligh等指出土样轴线上的土体单元经历了初始压缩、压缩－拉伸和再压缩三个不同的阶段，如图1。模拟时Baligh采用敞口圆筒模拟取土器，该取土器设有内间隙比，但没有考虑取土器刃角形状和土体抗剪强度的影响。本文将土看作理想弹塑体，考虑土体的剪切强度以及取土器刃角，采用有限元方法模拟取土器压入土体的过程，研究该过程对土样产生的扰动以及取土器参数对扰动程度的影响。

1 建立模型

1.1 基本假定

1）假设土体是连续、均匀、各向同性的理想弹塑性介质，服从Drucker－prager屈服准则；

2）不考虑孔隙水的影响；

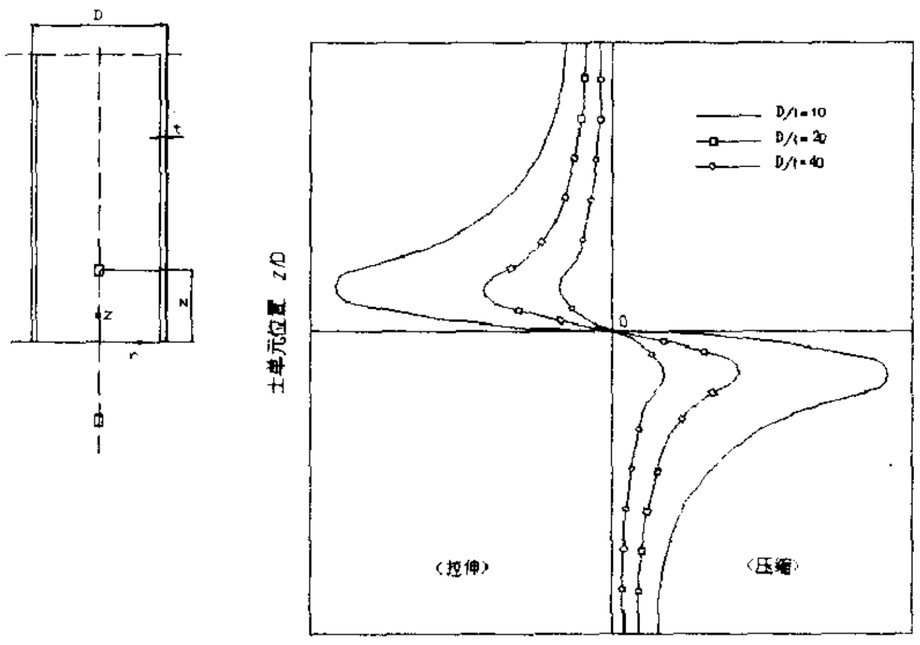


图1 轴线上土样应变变化过程(Baligh)

3）相对于土体而言，取土筒刚度大，在切入土体过程中，其变形很小，因此假设取土筒为刚体；

4）假设取土器和土界面服从库仑摩擦，当接触压力较小时，摩擦力与接触压力成正比，当接触力达到一定值时，摩擦阻力不再增大，保持为一定值，并产生滑动，摩擦模式如图2所示。

1.2 简化分析模型

取土器的几何形状和约束条件以及作用的荷载都对称于取土筒轴线，切入土层时产生的位移、应变和应力也对称于该轴，因此分析时采用轴对称模型，将三维问题简化为二维问题处理；简化模型如图3。

1.3 界面接触单元

在竖向荷载作用下，取土器切入土体，产生相对位移，一部分竖向荷载通过取土器内外表面摩擦阻力传递给土体，为了模拟这个过程，在取土器和土体

[收稿日期]2003－07－20；[责任编辑]苗国航。
[第一作者简介]李家平(1972年－)，男，2003年毕业于同济大学，获硕士学位，在读博士生，主要从事地下结构工作。

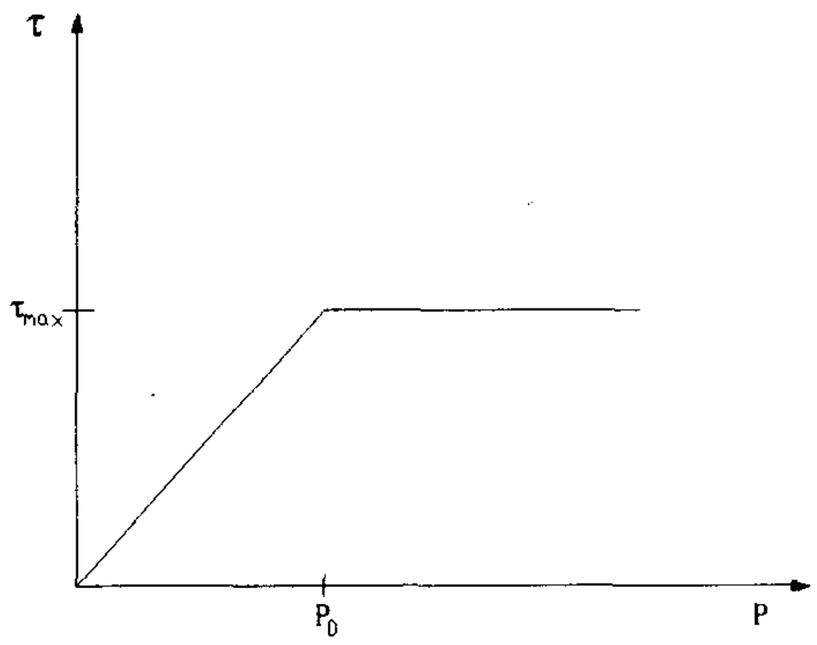


图 2　接触面摩擦模式

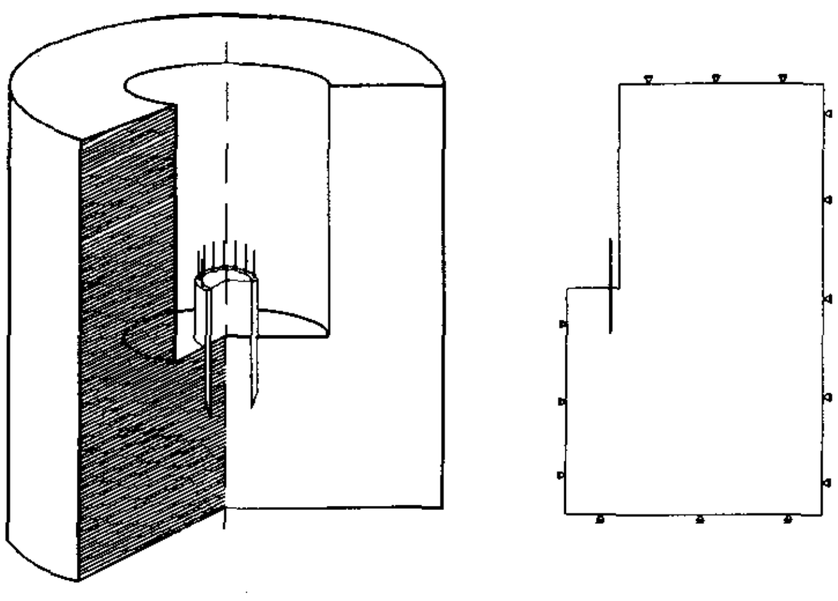


图 3　取土过程简化模型

接触部位设置接触面单元,模拟取土器和土相对滑动,并传递摩阻力。接触单元是覆盖在实体单元接触面上的一层零厚度单元。由于取土器和土体之间相互作用的部位是取土器侧面和土体面,因而在建模分析时,采用面—面接触分析。两个相互接触的面分别被称为接触面和目标面,接触面覆盖在土体单元上,目标面覆盖在取土器单元上。

1.4　计算参数的选取

岩土介质的本构模型很多,有的模型数学形式也非常复杂,要具备很深的数学力学功底才能理解。尽管如此,绝大多数模型预测岩土介质形态的能力都很有限。这其实并不难理解,因为除了绝大部分模型引进了固体力学的研究成果和方法外,计算参数的选取也是非常重要而又非常困难的因素。土体计算参数的获得方法主要有土工试验结果和反演分析。这次模拟主要根据试验选取参数。土体参数 c、φ 根据不固结不排水三轴试验强度指标选取,模量取变形模量;考虑到影响摩擦力大小的因素复杂以及我国取土器的使用具体情况,分析时采用了多种摩擦系数。

2　模拟结果分析

图 4 ~9 为摩擦系数取 0.375,D/t = 40,刃角为 8.5°的敞口薄壁取土器切入土体时,在周围土体中产生的位移和应变。图 10 为摩擦系数取 0.375,刃角为 8.5°时,轴线上竖向正应变随位置的变化以及不同的 D/t 值对该应变的影响。

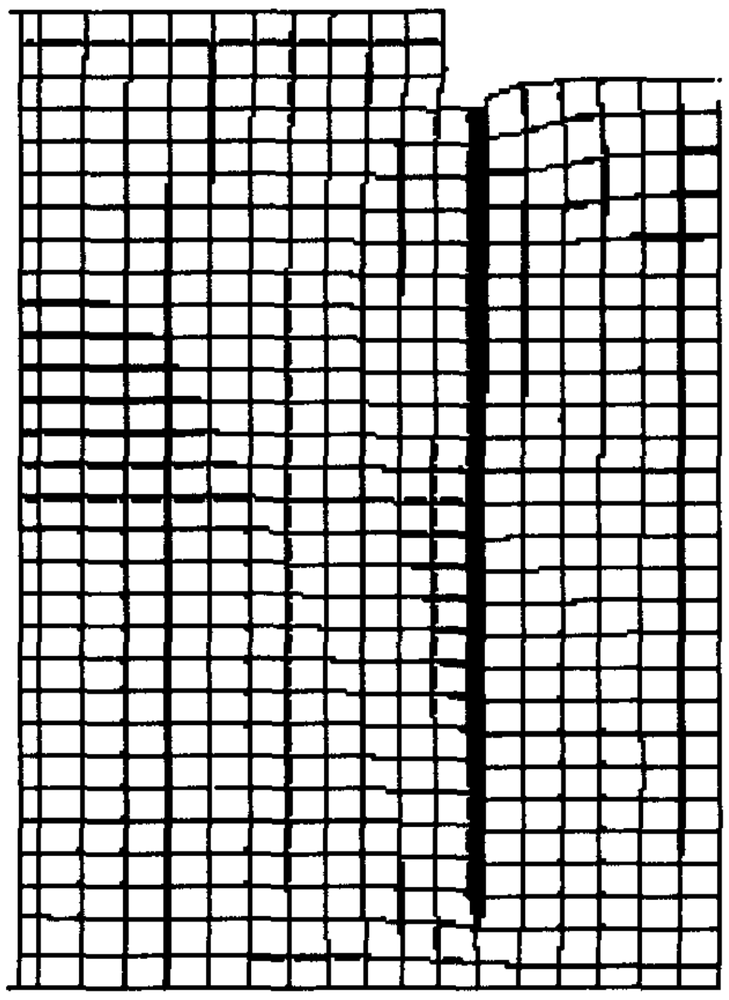


图 4　土体网格变化

2.1　单元网格变化及位移矢量场

图 4 为取土筒切入对土体网格的影响,我们可以看出,在取土器压入土体时,由于取土筒对附近土体产生挤压和拖动力,引起周围网格扭曲变形,筒壁外侧和内侧下端的网格发生向下错动;内侧上端土由于敞口取土器内部上端没有约束作用,在挤压力的作用下产生明显隆起。

图 5 为取土筒切入时在周围土体中引起的位移

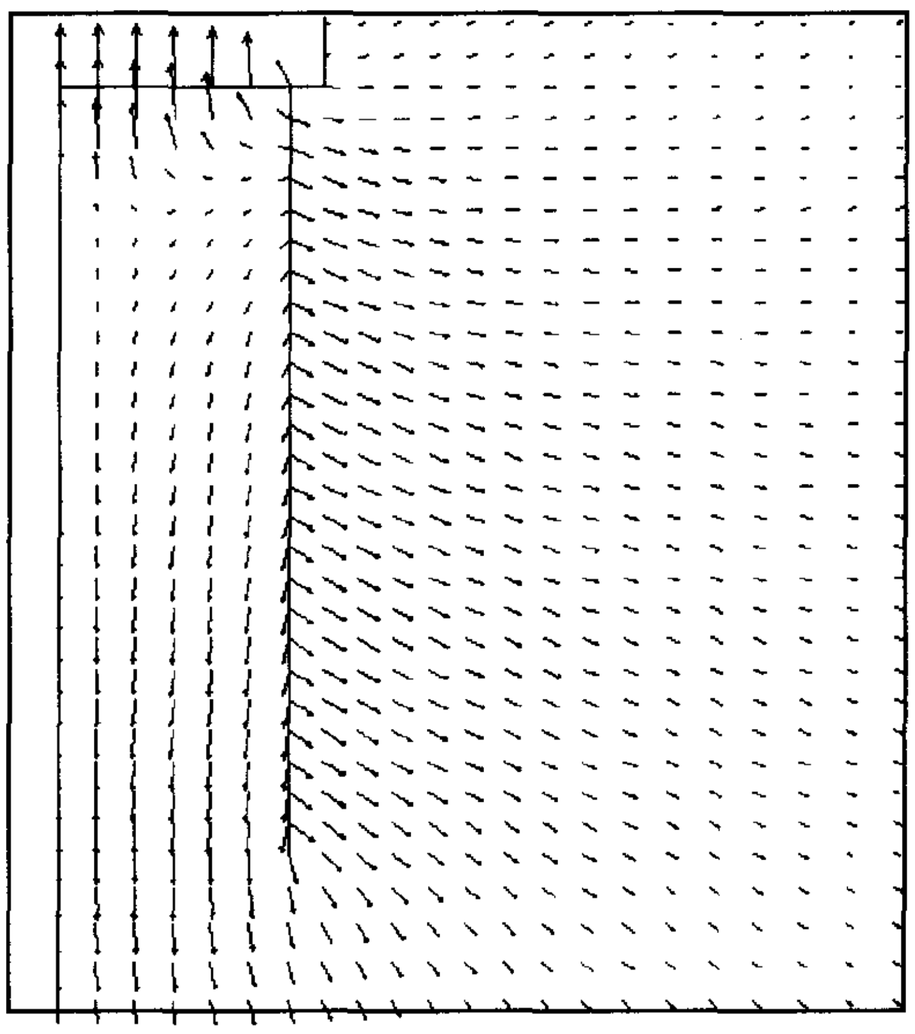


图 5　周围土体的位移矢量场

矢量场。由于取土筒刃角构造,筒外侧的挤压作用比内侧明显。在挤压力和摩擦力的共同作用下,筒外侧土位移矢量的水平分量很明显。位移矢量主要为侧下方向,且随离取土筒距离的增加而减小;由于内部土样轴对称受力且挤压力相对较小,所以内侧土样位移矢量主要平行于取土筒轴线,位移矢量的水平分量较小。靠近土样上端某一位置存在一个临界面,该面上土体单元的位移等于零。该面以上的土向上移动;该面以下的土向下移动,并随着深度的增加,位移量逐渐增大。

图4和5都表明,采用对土样上端无约束作用的敞口取土器取土,土样上端出现明显隆起现象。这对于抗拉强度较差的土来说,将产生较大的扰动。交通部第三航务工程勘察设计院的乌孟庄[2]工程师曾对土样不同位置的无侧限抗压强度进行了比较,结果如表1,表明两端土样无侧限抗压强度仅为中间土样的70~80%左右。因此两端土样的质量相对较差,进行力学性质试验时尽量不要采用该部位土样进行试验。

表1　同一土样不同位置的无侧限抗压强度对比/kPa

土样	由上向下位置/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
土样1	59.8	76.7	82.2	68.2	
土样2	64.3	80.8	77.1	76.8	53.7

2.2　土体应变场分析

图6为取土筒切入在周围土体中引起的径向正应变等值线图。取土筒切入过程对取土筒内、外侧土在水平向上为压缩作用,而在取土器刃角处特别是以下部位,由于撕裂作用,出现拉伸应变。从切入过程来看,内部土样的径向正应变经历了从拉到压的过程,该过程在筒壁附近表现地最为充分,因此该部位土样的扰动程度应该较大。

图7为环向正应变等值线。筒内土样在周边筒壁的挤压作用下,内部土样环向正应变为压缩应变。随着土体单元进入取土筒,环向正应变增大并逐渐趋于稳定。中心部分的土样在同一水平面内环向正应变变化很小。

图8为剪切应变等值线图。在水平面上,取土筒内部土样的剪切应变从筒壁向中心方向逐渐减小,轴线上剪应变最小。土样最大剪应变发生在取土器刃角附近,根据应力-应变关系,说明在刃角处产生剪应力集中现象。由于取土器切入过程是一个动态过程,因此筒壁内侧一定厚度范围内的土样都

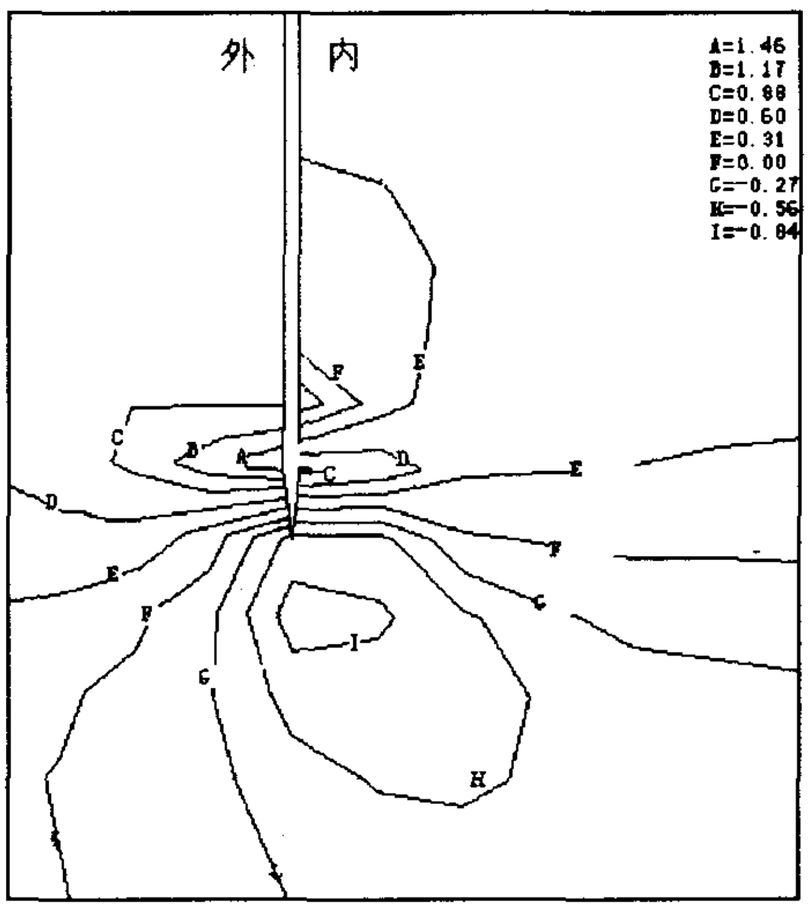


图6　径向正应变等值线

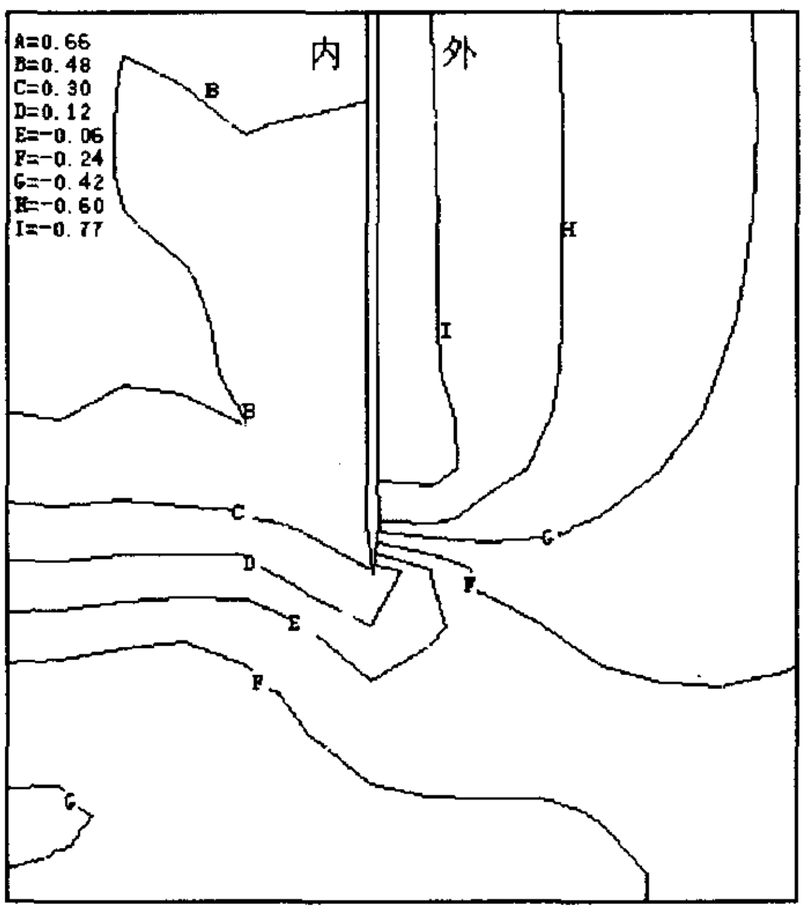


图7　环向正应变等值线

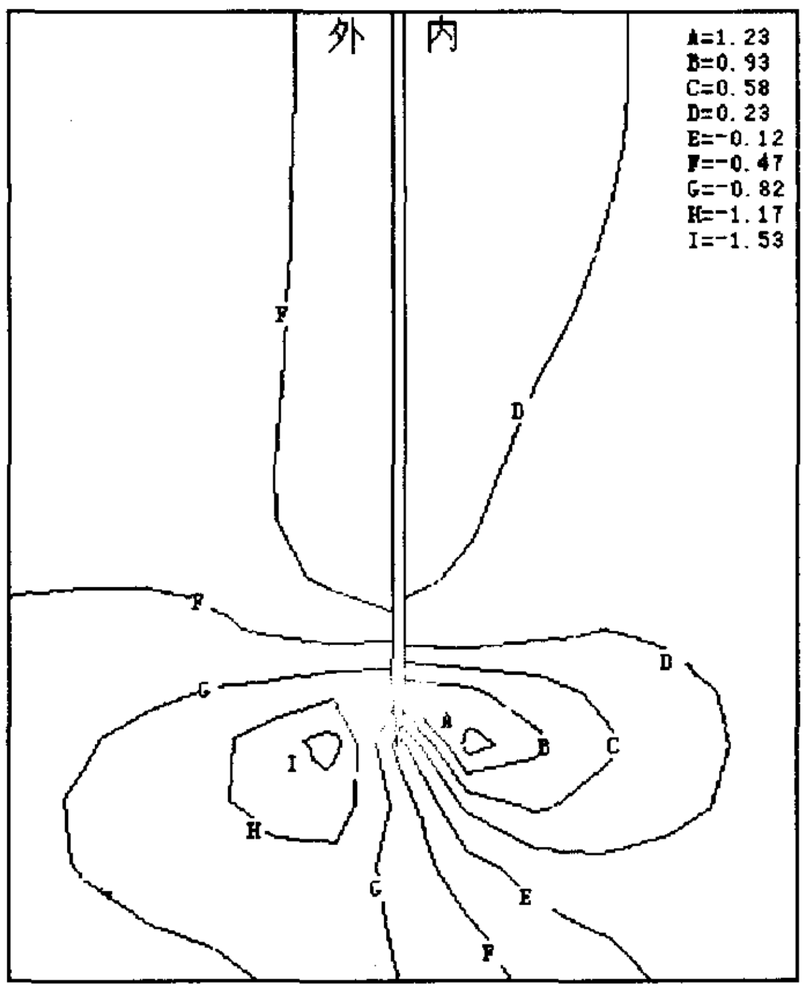


图8　剪切应变等值线

经历过刃角处的最大剪应变过程,形成了环形扰动带,边缘附近扰动较大,中心部分扰动较小。因此室内试验应取中心部位土样试验。对于特定土类、取土器,如知道土样破坏剪应变值,就可以根据模拟计算出的剪切应变等值线图确定筒壁周边剪切破坏带的宽度,用来指导野外选用取土器直径,以保证有足够的中心部分供试验用。

图 9 和 10 分别为竖向正应变等值线图和轴线上竖向正应变随土单元位置的变化图。从这两个图中可以看出,和 Baligh 等的结论基本一致。随着取土筒的下移,取土筒范围以内的土体竖向正应变经历了压缩阶段和拉伸阶段。位于取土筒下部的土体首先受到压缩作用,竖向正应变从距刃角下远处时的零逐渐增加,在接近刃角水平面时发展到最大压缩应变;随后压缩应变开始逐渐减小并回至零应变;进入取土筒后的土样出现拉伸应变,在逐渐发展到最大拉伸应变后趋于稳定。与 Baligh 的模拟结果不同的是,仅在取土筒以下的压缩阶段出现应变极值。在取土筒内部,拉伸应变基本一致,没有 Baligh 等提出的明显的再压缩阶段;拉伸应变也没有随 D/t 的变化而产生明显变化;而且在本次条件下压缩应变大于拉伸应变。Clayton 等[3](1998)也曾得到相似的模拟结果。这些不同可能是由于两次模拟所使用的取土器不同引起的(Baligh 设置了内间隙比,而本次没有),也可能是 Baligh 等没有考虑土的抗剪强度引起的。

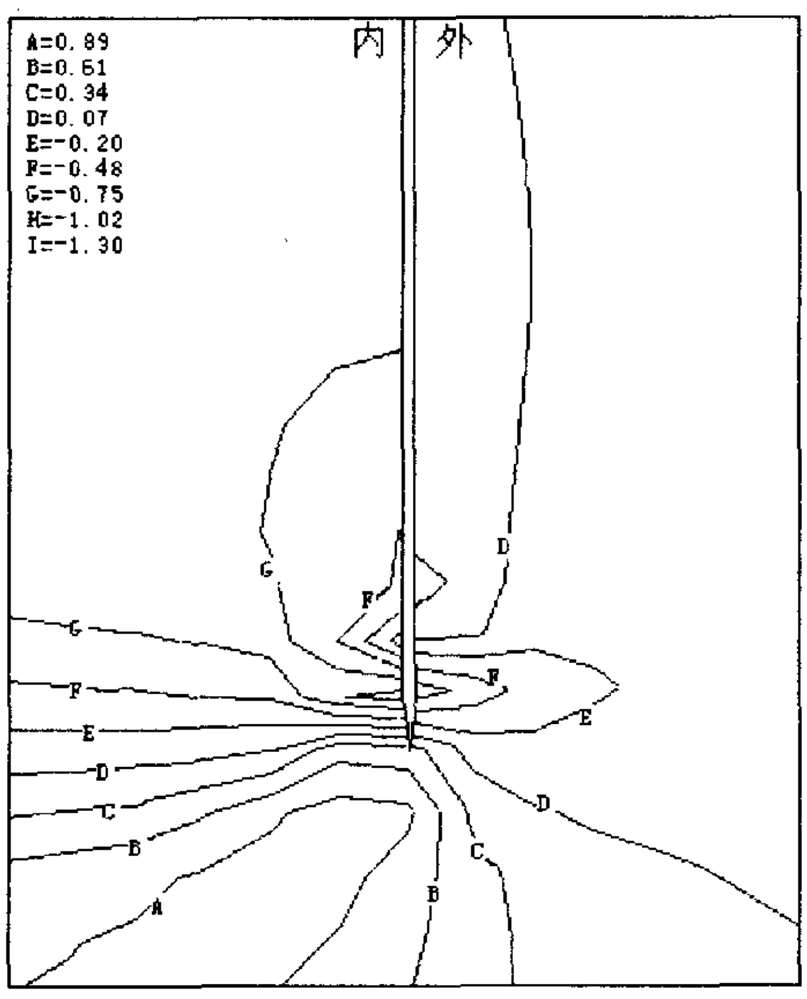


图 9 竖向应变等值线

根据上述一系列图可以发现,在取土筒内,仅在取土器壁附近土样内的径向应变、环向应变和竖向应变变化较大,筒内中间部位土样的应变变化不大,

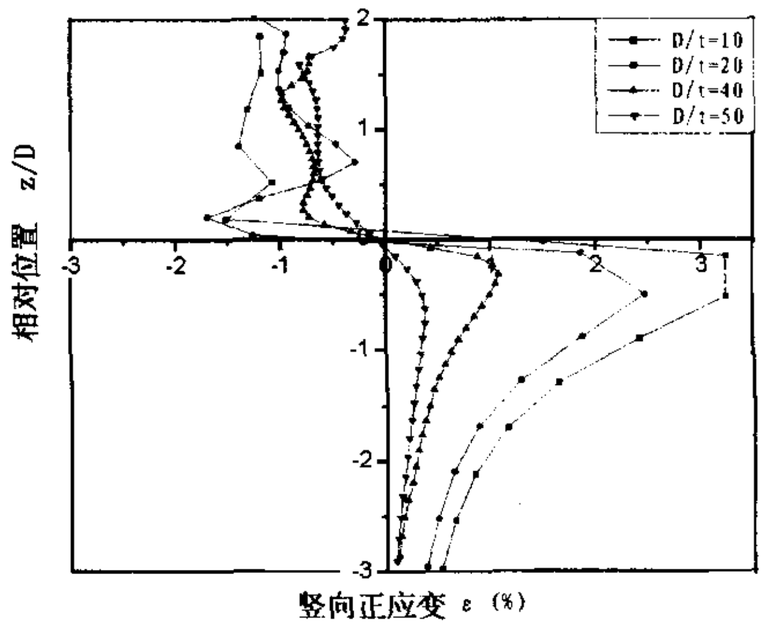


图 10 取土筒轴线上土单元的竖向应变路径

这和 1995 年 Hight[4] 得到的结论类似,筒内中心部位土样应变基本一致。

由图 6 ~ 9 应变等值线,中心 1/2 半径以内,最大径向、环向、剪切和竖向正应变分别大约为 0.31、0.48、0.58 和 0.89,最小径向、环向、剪切和竖向负应变分别大约为 -0.27、-0.42、-0.47 和 -0.75,无论正、负应变均以竖向应变绝对值最大。这说明对以中心土样为重点的取土来说,选用竖向应变作为评价土样扰动程度是可以的,当初 Baligh 等选用竖向应变作为评价土样扰动程度指标也正是出于这个原因。我国的魏汝龙[5]教授也曾通过试验得到竖向应变增加,抗剪强度线性减小的结论。

3 取土器参数影响的规律性探讨

3.1 径厚比 D/t 及面积比 Ca 的影响

根据图 10 整理,得到轴线上最大压缩应变随取土筒的径厚比、面积比变化结果见表 2。图 11,12 是根据表 2 结果整理得到的取土筒轴线上土体单元的竖向最大压缩应变随取土筒径厚比以及面积比变化时的结果。

表 2 径厚比及面积比对轴线上最大压缩应变的影响

径厚比 *D/t*	10	20	40	50
面积比 *Ca*	0.563	0.235	0.108	0.085
最大压缩应变 %	3.24	2.47	1.08	0.382

从表 2、图 11 和 12 可以看出,径厚比从 10 变化到 50,面积比从 0.563 降到 0.085,产生的最大压缩应变从 3.24 降到 0.382。轴线上土体单元的竖向最大压缩应变随取土筒径厚比几乎为线性减小;随取土筒面积比的增加而增加。根据魏汝龙等的试验结果,土样的不排水强度随竖向应变的增大而线性减小。因此,取土筒径厚比、面积比对扰动程度具有重要影响。由室内试验我们知道。对于一般情况下的大多数土,特别是密实砂或超固结硬粘土以及一

些灵敏度较高的土,3%左右的轴向应变可能已经使土样达到极限强度而破坏,因此采用 D/t 小于 10 的取土器取土得到的土样可能无法用于室内力学试验。而薄壁取土筒产生较小的最大竖向应变,扰动相对较小,因此用薄壁取土器取土具有很高的优越性。

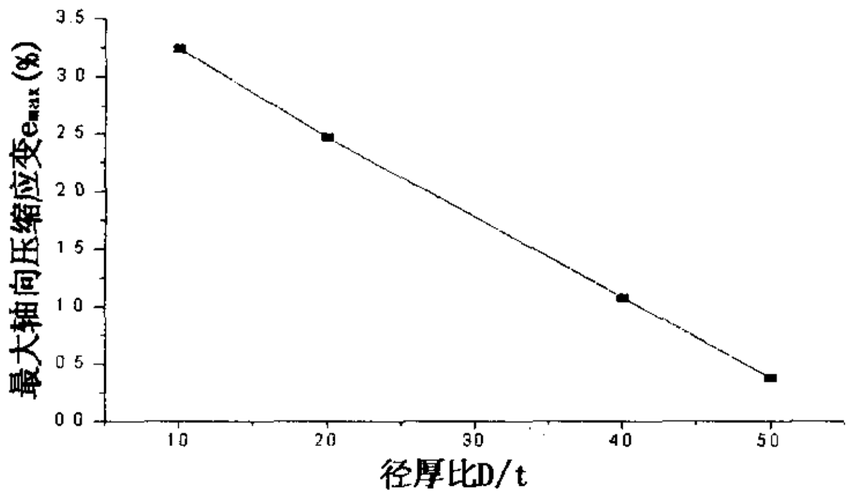


图 11　最大压缩应变与径厚比的关系

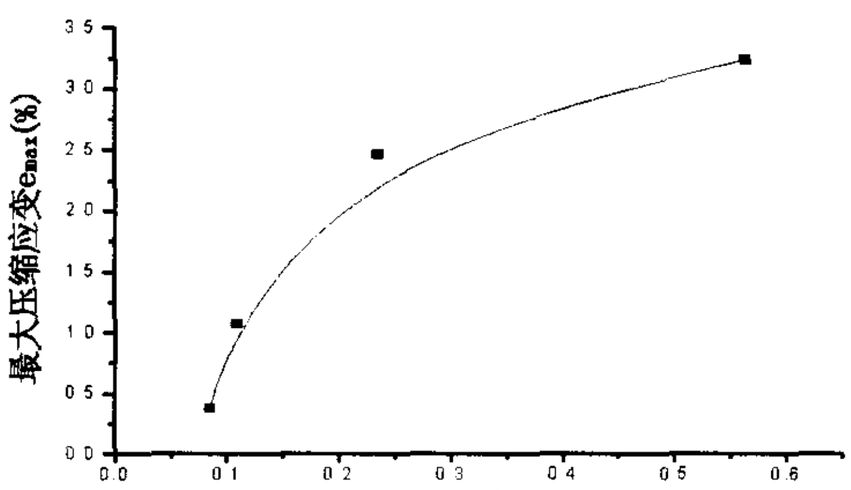


图 12　最大压缩应变与面积比的关系

根据上图结果,在面积比为 0.2 以下时,最大压缩应变对面积比的敏感程度更大,当面积比大于 0.2 以后,面积比的增加对最大压缩应变影响不再那么显著。

3.2　摩擦系数的影响

图 13 为 D/t = 40,刃角等于 8.5°时摩擦系数变化对轴线上竖向正应变的影响。与 Balight 的研究结果相比,竖向应变等于零的位置并非一定在刃角水平面,其位置与摩擦系数大小有一定的关系,随取土器摩擦系数增加有上移的趋势,另外图中显示摩擦力的增加使刃角下部土体的压缩应变增加,刃角上部土样的拉伸应变减少。相对于摩擦系数 m = 0.1,这种变化趋势非常明显。图 14 为轴线上竖向最大压缩应变与摩擦系数的关系曲线。在摩擦系数较小时,竖向最大压缩应变随摩擦系数的增加而迅速增大,随后趋于平缓。因此在设计比较光滑的薄壁取土器时不应忽视摩擦系数的影响。

3.3　刃口角度的影响

图 15 为 D/t = 40,摩擦系数取 0.1 时,刃口角度对轴线上竖向最大压缩应变的影响结果。对于该薄壁取土器,刃口角度在 5°以下时,取土筒刃口角度变化对轴线上竖向最大压缩应变的增长程度影响较大;刃口角度大于 5°时,刃口角度的变化对轴线上竖向最大压缩应变影响不大。这和有关研究结果还是很接近的。

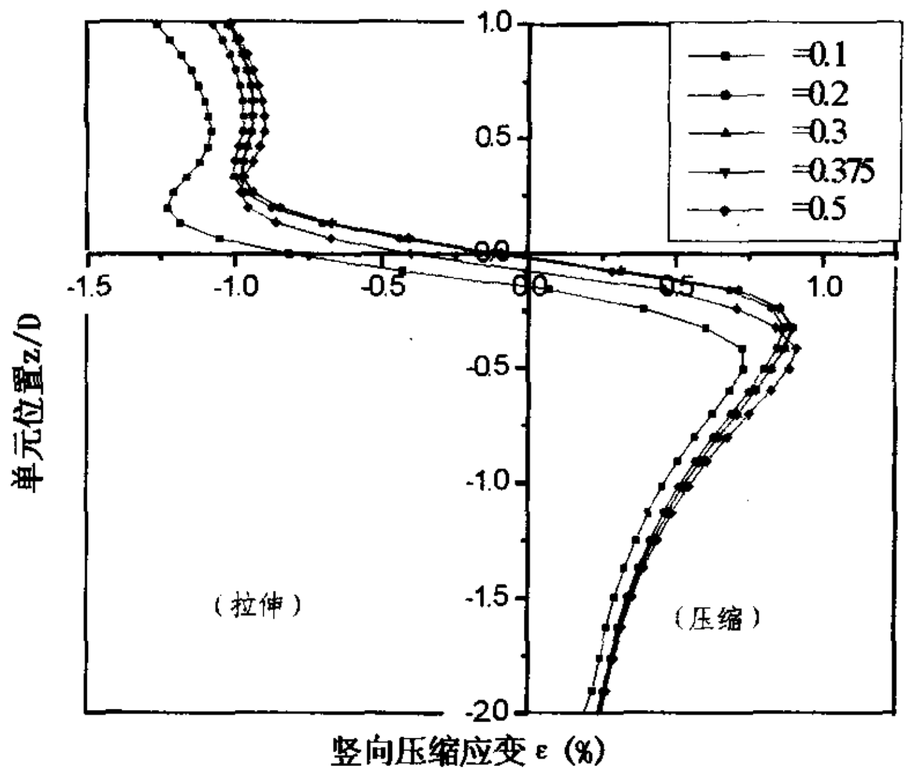


图 13　摩擦系数对轴线上竖向应变的影响

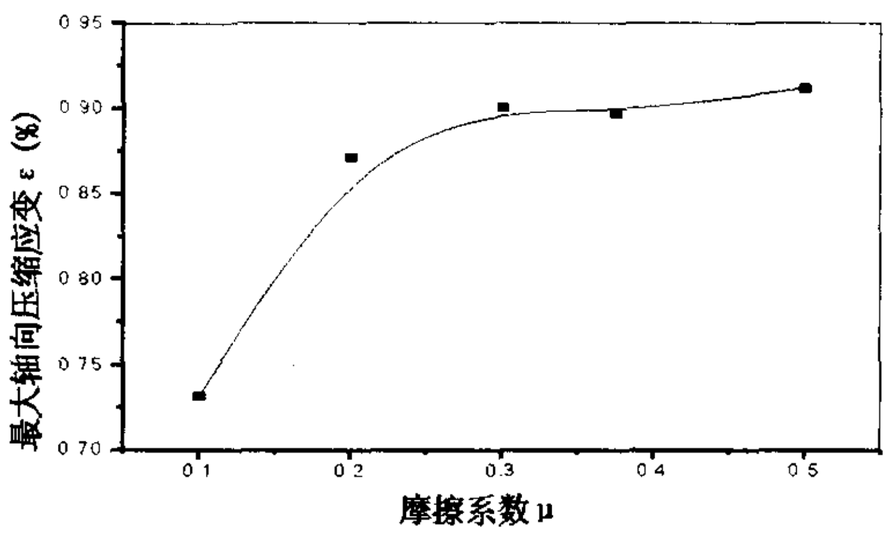


图 14　摩擦系数对轴线上最大压缩应变的影响

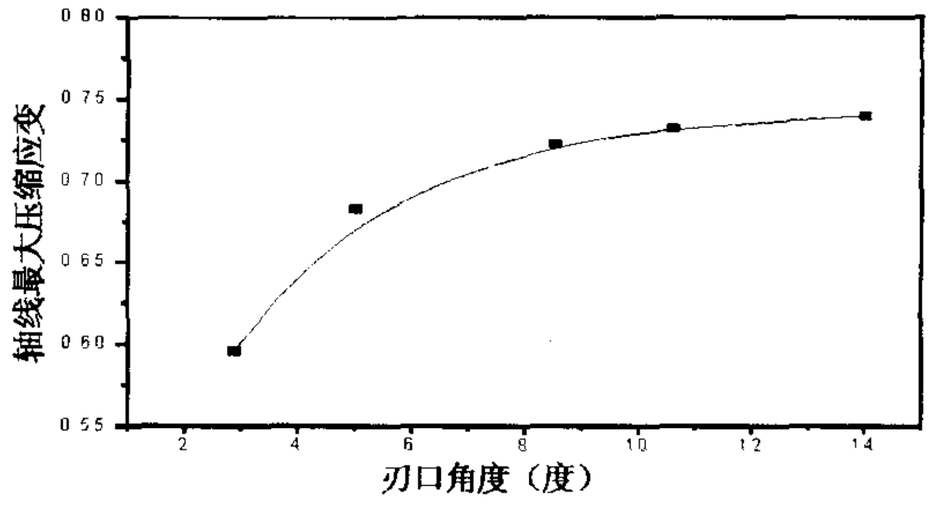


图 15　刃口角度对轴线上竖向最大压缩应变的影响

4　结 论

本文采用有限单元法对取土筒切入土体过程作了初步模拟,研究该过程对土样产生的扰动影响,并分析了取土筒的设计参数对扰动程度的影响,得出下面一些规律。

1)取土器压入土体时,筒壁内、外侧下端土向下错动;由于没有约束作用,内侧上端土产生明显隆起,扰动相对严重。筒外侧土位移矢量的水平分量

很明显;内侧土样位移矢量主要平行于取土筒轴线,水平分量较小。

2)取样过程中,土样径向正应变经历了从拉到压的过程,该过程在筒壁附近表现地最为充分,该部位土样的扰动程度应该较大。

土样环向正应变为压缩应变。随着土体单元进入取土筒,环向正应变增大并逐渐趋于稳定。中心部分的土样在同一水平面内环向正应变变化很小。

土样的剪切应变从筒壁向中心方向逐渐减小,筒壁内侧一定厚度范围内形成了环形塑性扰动带,因此室内试验应取中心部位土样试验。竖向正应变经历了压缩和拉伸阶段。由于取土器壁薄、摩擦力较小,仅在压缩阶段出现应变极值,拉伸应变基本一致,也没有随 D/t 的变化而产生明显变化;没有明显的再压缩阶段,而且在本次条件下压缩应变大于拉伸应变。

综合以上几方面说明土样中心扰动相对最小,并且对以中心土样为重点的取土来说,选用竖向应变作为评价土样扰动程度是可以的。

3 取土筒径厚比、面积比对扰动程度具有重要影响。用薄壁取土器取土具有明显优越性。设计薄壁取土器时应考虑摩擦系数的影响;对薄壁取土器而言,刃口角度在 5°以下时,刃口角度变化对扰动程度影响较大;刃口角度大于 5°时的影响不大。

当然,由于土性复杂,采用数值方法研究的成果还较少,本文仅仅是一些初步研究,考虑的影响因素不多,采用了一些假设条件,建立的模型还有许多不足之处,而且仅仅研究了少数工况,今后还需要进一步深入研究。

[参考文献]

[1] Mohsen M. Baligh, Amr S. Azzouz, Chung - Tien Chin, Disturbance due to ideal tube sampling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 7, 113(7): 739 ~ 757.

[2] 乌孟庄. 系列薄壁取土器的研制和应用[J]. 交通部第三航务工程勘察设计院勘察处.

[3] Clayton, Siddique and Hopper. Effects of sampler design on tube sampling disturbance numerical and analytical investigations[J]. Geotechnique, 1998, 48(6): 847 ~ 867.

[4] *D W Hight and V N Georgiannou. Effects of sampling on the undrained behaviour of clayey sands*[J]. Geotechnique, 1995, 45(2): 237 ~ 247.

[5] 魏汝龙. 软粘土土样质量的定量评价[J]. 水利水运科技情报, 1988, (1): 101 ~ 121.

NUMERICAL SIMULATION OF SOIL DISTURBANCE CAUSED BY SAMPLING

LI Jia - ping, GAO Da - zhao, LI Yong - sheng

(*Geotechnical Engineering Department of Tongji University, Shanghai* 200092)

Abstract: Primary numerical simulation was performed on sampling using FEM. Disturbance caused by sampling was assessed and influence of parameters of sampler was analyzed. From the results, it can be seen that disturbance occurred in the soil. A plastic band formed around the sample, whereas disturbance at the center of sample was relatively small. Soil at this site was dominated by vertical displacement and experienced from crushing strain to pulling strain along the axes of sampler. Disturbance of soil was also influenced by Ratio of area、coefficient of friction and angle of blade.

Key words: Sampling, Disturbance, Numerical simulation