# Reading Notes

## ABAQUS book notes

### 1.实体单元类型的选择

（1）如果不需要模拟非常大的应变或进行复杂的需改变接触条件的问题，则应采用二次减缩积分单元(CAXBR, CPEBR, CPSBR, C3D20R等)。

（2）如果存在应力集中，则应在局部采用二次完全积分单元(CAXB, CPEB, CPS8，C3D20等)。它们可用最低费用提供应力梯度最好的解答。

（3）涉及到有非常大的网格扭曲问题(大应变分析)，建议采用细网格剖分的线性减缩积分单元(CAX4R, CPE4R, CPS4R, C3D8R等)。

（4）对接触问题采用线性减缩积分单元或细分的非协调单元(CAX4I，CPE4I、CPS4II，C3D8I等)。

（5）尽可能地减少网格形状的扭歪，形状扭歪的粗网格线性单元会导致非常差的结果。

（6）对三维问题应尽可能采用六面体单元。它们以最小费用给出最好的结果。当几何形状复杂时，完全采用六面体单元构造网格往往难以办到;因此可能需要采用楔形和四面体单元。众所周知，这些形状的一阶单元，如C3D6和C3D4，是较差的单元;若要取得较好的精度，需剖分很细的网格，因此，只有在为了完成网格建模而万不得己的情况下才会应用这些单元，即使如此，这些单元也应远离精度要求较高的区域。

（7）一些前处理程序包含了自由网格算法，它们可用四面体单元构造任意形状的网格。只要采用二次四面体单元(C3D10)，除了接触问题，其结果对小位移问题应该是合理的。C3D10单元的修正单元C3D10M对大变形问题、接触问题有鲁棒性，并表现出最小剪切和体积锁闭性质。但无论采用何种四面体单元，计算所花费的时间都多于采用相应密度的六面体单元。建议不采用只包含线性四面体单元(C3D4)的网格，因为如果不用大量的单元其结果将是不准确的。

接触分析容易出现不收敛的的情况。

（1）接触面的突然分离导致弹性应变能突然释放，单一节点的不稳定接触及突然翻转都容易导致不稳定响应，不稳定响应将会使求解发散。接触面不稳定分离的诊断可以重message文件查到，查看不收敛的求解警告前是否有严重不连续迭代、最大位移修正是否出现在同一节点。

（2）接触区域主面和从面网格划分不能差别太大，网格尺寸相近或一致可以加快收敛速度、提高计算精度、减少计算时间。

### 基于ABAQUS的有限元分析和应用

完全积分

所谓“完全积分”是指单元具有规则形状时，所用的Gauss积分点的数目足以对单元刚度矩阵中的多项式进行精确分析。对六面体和四边形单元而言，所谓“规则形状”是指单元的边是直线并且边与边相交成直角，在任何边中的节点都位于边的中点上。完全积分的线性单元在一个方向上采用两个积分点。因此，三维单元C3D8在单元中采用个积分点。完全积分的的二次单元在每个方向上采用3个积分点。

线性减缩积分单元能够很好地承受扭曲变形，因此，在任何扭曲变形很大的模拟中可以采用网格细划这类单元。

即使在复杂应力状态下，二次减缩积分单元对于自锁也不敏感。因此，除了包含大应变的大位移模拟和某些类型的接触分析之外，这些单元一般是最普遍的应力/位移模拟的最佳选择。

非协调模式单元

仅在ABAQUS/Standard中有非协调模式的单元，它的目的是克服在完全积分、一阶单元中的剪力自锁问题。

在弯曲问题中，非协调模式单元可能产生与二次单元相当的结果，但是计算成本却明显降低。然而它们对单元的扭曲很敏感。

7. 线性动态分析

静态和动态分析之间的主要区别是平衡方程中是否包含惯性力。另一个区别是关于内力的定义。在静态分析中，内力仅由结构的变形引起，而在动态分析中，内力包括了运动（例如阻尼）和结构变形的共同贡献。通过考虑非加载结构（在动平衡方程中令P=0）的动态响应可以确定固有频率。

必须具备以下特点的问题才适合于进行线性瞬态动力学分析：

（1）系统应该是线性的，即线性材料行为，无接触条件，没有非线性几何效应。

（2）响应应该只收相对少数的频率支配。当在响应中频率的成分增加时，如打击和碰撞问题，振型叠加技术的效率会降低。

（3）载荷的频率应该在所提取的频率范围之内，以确保对载荷的描述足够精确。

（4）应用特征模态，应该精确描述由于任何突然加载所产生的加速度。

（5）系统阻尼不能过大。

### ABAQUS有限元分析实例详解

查看模型的应力结果时有两种选择：

（1）查看节点上的应力：这是比较常用且简单方便的方法，但是后处理中获得的节点应力是对单元积分点上的应力进行外插值和平均后得到的，并不精确。

二次减缩积分不能在接触分析中使用，不适于发应变问题。

### ABAQUS在隧道及地下工程中的应用

#### 渗流-应力互相耦合的力学机理

传统的流固耦合模拟中，孔隙度和渗透率保持不变的，而在实际渗流过程中，由于孔隙流体压力的变化，一方面要引起多孔介质骨架有效应力的变化，由此导致渗透率、孔隙度等的变化；另一方面，这些变化又反过来影响孔隙流体的流动和压力的分布。因此，需要考虑孔隙流体在多孔介质中的流动规律及其对多孔介质本身的变形或者强度造成的影响，考虑多孔介质内应力场与渗流场之间的相互耦合作用。完全流-固耦合模型的相互作用机理如下图所示



#### 多孔介质中流体渗流规律

孔隙流体的渗流行为遵循Darcy定律或者Forchheimer定律，Darcy定律一般适用于低渗流流速，是线性关系；而Forchheimer定律是非线性定律，主要模拟更高流速的情况，Darcy定律可以认为是Forchheimer定律的特例。

Darcy定律用于表述为层流条件下通过多孔介质的渗流速度与水力梯度满足线性关系，在一维条件下有：

(6-1)

式（6-1）表示的渗流速度是一种假想的流速，即认为过水断面中任意一点均存在水流（包括固体骨架上也存在水流），实际上，过水断面有两部分，一是孔隙空间，另一部分是固体骨架。但是，水流仅能通过孔隙空间流动，可供水流通过的面积为（为孔隙率）；有时孔隙率中一部分为死端孔隙，水流不能流过，可用有效孔隙率来描述，可供水流通过的面积为。因此，实际渗流速度可以表述为：

(6-2)

饱和条件下，考虑孔隙率的情况下Darcy定律的表达式为：

(6-3)

在非饱和条件下，需要考虑饱和度的

### 甘蔗制糖工业手册

甘蔗压榨提汁的基本原理

甘蔗压榨提汁法的生产过程，是将破碎的蔗料，通过压榨机进行多重压榨和破碎的作用，并加渗浸水进行多重复式渗浸，将蔗料压缩，排出蔗汁。所以压榨提汁就是将蔗料破碎、入辘、挤压、渗浸的过程。因此，甘蔗压榨的理论主要是着重研究蔗料压缩的原理，及甘蔗在压榨过程中压力与体积的变化，甘蔗的压缩程度对提汁的影响，以及在最大压缩后、蔗渣开始膨胀时对蔗汁的重吸作用等。

（一）压力与体积的关系

### 维基百科

**多孔介质**是指由许多骨架形成大量微小缝隙的物质，像是这对[渗流力学](https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%BB%B2%E6%B5%81%E5%8A%9B%E5%AD%B8)非常重要，因为流体在多孔介质就呈现[渗流](https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%BB%B2%E6%B5%81&action=edit&redlink=1)的方式运动。一般多孔介质的空隙都是相通的，也可能是部分连通、部分不连通的。

2010，《A further step in the modelling of the mechanical behaviour of bagasse》 Plaza F使用非关联流动法则的修正剑桥模型，基于ABAQUS软件开发本构模型子程序预测甘蔗纤维初次加载的竖直应力与体积应变的关系，得到了与实验一致的结果。

2003，《A better material parameter for describing the strain hardening behaviour of bagasse》Kent G A提出了一个更简单的参数描述甘蔗纤维的塑性硬化模型，比以往用的三个参数的模型简洁，也比常用的两个参数的模型更准确。

2003，《Finite element modelling of a pressure feeder using direct shear test measurements》Plaza F 分别使用修正Druker-Prager Cap模型和修正剑桥模型甘蔗喂料过程进行了有限元分析，发现DPC模型比MCC模型更容易收敛，分析了两种模型在预测辊子开口处的剪应力和剪应变与实际存在较大偏差的原因。

《An additional step towards modelling the mechanical behaviour of sugar cane》研究通过有限元仿真，预测了单轴加载/卸载下的竖直应力变化。

《Modelling of the mechanical behaviour of heavily over-consolidated bagasse》提出使用非相关流动法则的修正剑桥模型预测超固结后的甘蔗渣的剪切应变和体积应变。

2013，《Determining the material properties for heavily overconsolidated bagasse through parameter estimation》结合单轴压缩实验和剪切实验，使用PEST和SENSAN软件包反演确定经过多次压榨后的蔗渣的材料参数。

《Finite element simulation of the rolling and extrusion multi-phase materials Application to the rolling of prepared sugar cane》从理论上推导了甘蔗纤维与蔗汁流固耦合的相关方程，进行数值模拟。

2003，《A simple test for determining some important material properties for bagasse》使用不同的速度进行快速蔗料压缩实验，通过一个一维的模型进行参数反演，确定甘蔗纤维的渗透系数和压缩指数。

### Abaqus User Subroutines Reference Guide

用户子程序**DISP**

## Reference Notes

### 1. Computational and experiments modeling of crushing prepared sugar cane

**3.4.2实验步骤**

每次实验，称重2kg已知品种和预处理水平的试样。每组进行已知试样质量的纤维测定。约束单轴实验装置底部放在拉伸强度试验机上，实验装置的侧面由螺栓固定。压板固定在十字头上。用手把预处理的甘蔗纤维放进实验装置。实验甘蔗纤维无气体高度通过下式估计

=无气体的甘蔗纤维体积

=装置的横截面面积

=甘蔗纤维质量

=纤维含量分数百分比

=密度（下标是指纤维固体，指是蔗汁）

尽管通过手动放料获得可靠的无气体高度很困难，从已知的放料高度，初始压缩比可以通过工作开口计算

=是工作开口（沟槽压板的尖端的距离）

=设置开口

**=**沟槽深度

孔隙比与压缩比有下面的关系

3.5单轴实验响应

压缩比与体积应变的关系可以定义为

是无气体体积，是体积应变的参考体积，是任意时刻的体积。

因此

上面方程给出了

这里是C=1的体积应变

是任意时刻的体积应变

如果参考体积等于孔隙无气体体积，则

如果参考体积为初始压缩的体积

**7.4有限元建模需要考虑的问题**

双辊轧机实验的有限元模拟是基于以下方法**：**

1）两个辊模型被假设为对称的，为压榨机的一半（图7.6）

2）假设模型是二维平面应变，因此z方向的应变被约束。Z方向对应的是辊子的轴向。

3）蔗料在初始到压缩的整个过程都假设是饱和的。对于部分饱和状态，在部分饱区域的渗透率随分析的进行不断变大，则会阻止液体压力产生，分析会变得十分复杂。部分饱和模型与饱和蔗料压缩仿真相比，它们在辊子压力和转矩产生的差异是可以忽略的（Adams，1997）。

4）材料行为认为是各向同性的。因为任何的各向异性特性会由于纤维层的方向太复杂而无法确定。实际实验观察到的材料各向同性行为使用线弹性和帽盖Drucker-Prager塑性模型来建模。从单轴/卸载循的的多孔弹性体的影响导致最后体积比初始体积更大，是不符合实际的。多孔弹性体在这次分析中没有尝试，然而多孔材料的特性已经在卸载实验数据中确定。

5）辊子使用两个二维刚体面。通过塑性应变硬化关系中建立齿纹的影响，因此p=0的边界条件是合理的。

6）蔗料与辊子表面的摩擦行为使用库伦摩擦系数描述，设置恒定的摩擦系数为0.5。当模拟二维压辊的时候有表现更好的摩擦模型可用，总的来说都会得到类似的结果当摩擦系数设置为0.5的时候。

7）有限元求解使用拉格朗日公式，网格移动且与固定在材料实体上。而液体可以流过固体。求解过程在辊子在蔗料内的压力和转矩达到稳态值求解过程停止。

**7.4.1蔗料的初始压缩率**

零体积应变的参考点已经定义在孔隙比e=12.1处，在纤维含量为13%下对应的压缩率为0.8。这个12.1仍作为参考孔隙比，因为应变硬化材料是很依赖于孔隙空间的，前面（第五章）就是在这个基础上研究本构参数的。双辊子压缩仿真必须以这个初始孔隙比开始是非常重要的。这就有两种方法，这都会使蔗料与初始孔隙率不同。

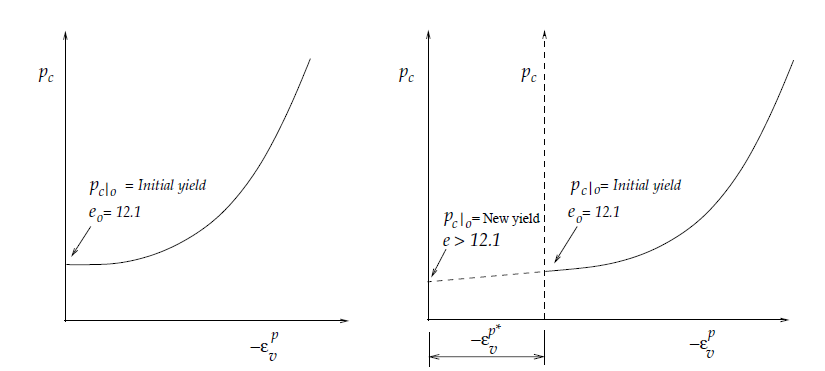
1）第一中方法是通过调整蔗料的高度来进行仿真。对于初始孔隙比高于12.1的蔗料，可以把蔗料的高度减小使其初始孔隙比为12.1，然后再进行有限元仿真。这会减小蔗料与辊子初始的接触角度，但对仿真结果的影响很小。进一步考虑，计算涉及材料在辊子上接触角度应该使用实验中喂料时的接触角度而不是较小的仿真时的接触角度（在压缩实验前有一对进料辊子对蔗料进行预压缩和喂料）。

2）第二种方法是改变屈服面。这种方法是在较高的初始孔隙比（或较低压缩比）时改变屈服面，提供弹性参数在整个压缩过程中是假定为恒定。屈服面参数（）通过下面与较高孔隙比的关系进行转换，而在小应力时忽略任何弹性应变。

式中e=12.1（参考孔隙比）

=蔗料初始孔隙比。

另外的应变硬化曲线可以从较低压力的实验数据确定，或者现有的数值推算如下图所示。这样就可以在较高初始孔隙比进行仿真，而且保持原始的本构行为，即初始孔隙比为12.1时的本构行为不变。前面两种方法都尝试了比12.1更高的孔隙比，对辊子的压力和力矩没有显著的差别。



（a）原始曲线 （b）较高孔隙比的推断曲线

**7.4.2 渗透率响应的合适形式**

不同的研究者（Downing，1999a；Murry，1960a）都从实验和目前的研究在一致的压缩率范围地测定了轴向渗透率的响应（图4.4）。渗透率的任何变化都可能是归因于材料特性，如预处理的程度和其他的因素。只考虑轴向，即蔗汁流动方向的渗透率是合适的。对于双辊子压榨加工，蔗料的在低压缩比下的初始条件可能是部分饱和。部分饱和最可能的影响是吸收、外渗和排气。在饱和状态的低压缩比条件下，渗流引起的固结效应是有效的。部分饱和流介质中的毛细效应与润湿液中的负孔隙水压力相对应。零和正的孔隙水压力对应的是完全饱和条件。在部分饱和的情况下，介质的对流体的渗透率依赖于液体饱和度，也依赖于材料的孔隙率。部分饱和时气体的排出对压榨加工的影响很小。然而在体积减小的过程中，任何高压包埋下的气体，液体必须首先考虑。

7.5 网格畸变和喂料

当蔗料接近辊子的时候由于摩擦作用被拉扯，蔗料的中心相对于边缘承受着塑性剪切。在这种情形下，在间隙区域有限单元网格的畸变很明显。修正的渗透率在7.4.2部分已经讨论，给出了最合适的喂料条件，并且在压缩比小于3.5时网格畸变是由于不好的喂料条件。

表面法向的力学接触默认是硬接触关系，允许从面节点不穿透到主面，在界面间可以没有位移和拉伸应力。这里从面节点是蔗料的，主面是刚性辊子。在这样的设置下，数值模型预测的辊子压力载荷和力矩会比实验值小很多，力矩最大差别时偏小80%。在材料的喂料行为探讨了其原因。发现计算的喂料速度比需要的喂料速度小很多，特别是压缩比高于1.5时。

在接触压力为0时，一个软接触关系允许蔗料穿透一个很小的值，因此可以在间隙为0的时候设计一个法向压力。这样的尝试是为了改善喂料。这个假设的软接触关系是，接触压力是接触表面的间隙的函数，也就是定义一个指数接触过盈关系。这样的关系，一旦接触面的法向方向的测量间隙减小到c，表面开始传递接触压力。当接触间隙连续减小时接触压力在表面间传递，以指数形式增加，如图7.10

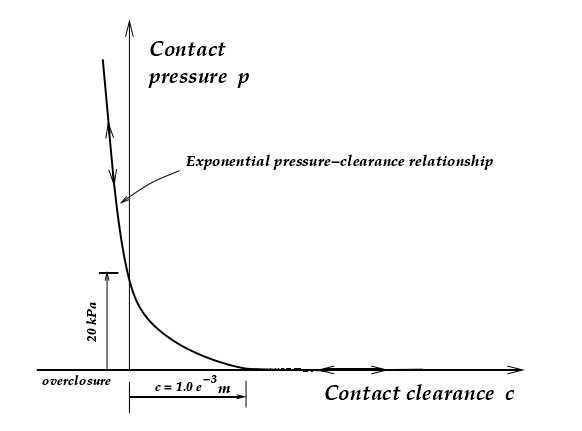
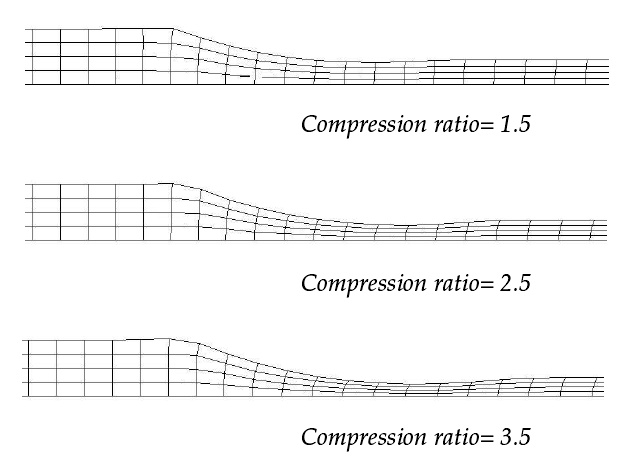


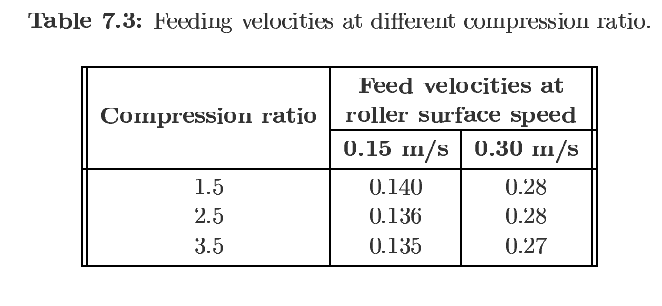
图 7.10

对c=1mm和接触间隙间为0的压力为20KPa，有限元解法的结果会改善喂料，提高载荷压力和力矩的响应。然而，力矩的响应仍然比实验的数值小60%。

检查由初始有限元网格形成垂直线，表明当它通过辊子间隙区基本保持垂直，如图7.11所示。



甚至在高压缩比（C=3.5），网格变形也是很小的，有限单元的喂料速度在稳定状态如表7.3所示。



7.6 双辊子压缩的实验结果和仿真预测

**7.8 表面平滑的辊子的实验**

表面带沟槽的双辊子压缩数值模拟的压力载荷和力矩分别与实验值进行了对比，在低压缩比的时候预测的准确些，而在高压缩比的时候预测效果较差。其中之一的原因是辊子沟槽效果过于简化，这在高压缩比时产生了很大的影响。为了了解这种影响，使用了两个圆周表面平滑的辊子进行实验。

7.8.1 平滑辊子压缩实验方案和初始条件

材料参数的估计：

泊松比：有静态单轴加载卸载曲线求得。

5.5.6 塑性材料参数的确定

正常固结线的斜率，可以通过单轴或者三轴实验在平面确定，该参数已在单轴实验时确定。

临界状态线

临界状态定义为：土体在载荷作用下达到应力不在变化、体积应变不在变化，而剪应变持续发展的流动状态。此时意味着材料已经发生了流动破坏。在三维空间（）中存在一临界状态线，对于正常固结土样来说，是三轴压缩时所有应力路径达到破坏时的终点，也是说剪切实验的结束点。如下图表示不同应力路径下土体被加荷到临界状态。图中①表示围压常数的应力路径，②表示常数的应力路径，③表示不排水剪切应力路径，④表示等向固结应力路径。由图a）可知①、②、③三种剪切路径在坐标下终值应力比都是。图b）是在坐标系中绘制的正常固结线NCL和临界状态线CSL。图c）是在坐标系中绘制的正常固结线NCL和临界状态线CSL，在该坐标系下，这两条线的斜率均为。其中，和是由试验得出的临界状态土性参数。



土的临界状态

a）不同应力路径与临界状态应力比；b）曲线；c）曲线

在临界状态剪应力、正应力和孔隙比存在唯一的关系，这时材料在恒定的应力比，恒定的体积下继续发生剪切变形。应力路径到达临界状态的点组合成临界状态线，临界状态线可用临界状态方程表示。

（1）

（2）

式（1）表示临界状态应力比是，式（2）表示的是临界状态线，是广义剪应力，是平均正应力，是比容，，是时的比容。

剑桥模型或者盖帽Drucker-Prager模型的临界状态线和屈服面在材料响应上具有重要作用。应力路径与屈服面在临界状态线以下相交时会引起材料的应变硬化，当应力路径与屈服面在临界状态线以上相交时，会导致材料体积增加和应变软化，最后在恒定体积下破坏。为了找到合适的值，研究者尝试了通过侧限和非侧限单轴实验、三轴实验和剪切实验估计值（Adams，1997；Plaza et al.,2001,；Schembri et al.,1998）.在非侧限单轴压缩实验，没有观察到径向塑性应变（Adams，1997）。在这样的条件下，临界状态线的斜率或许由屈服面的法向梯度来确定。用剑桥模型和盖帽Druck-prager模型的相关塑性流动模型，估计一个合适的临界状态线斜率为4.2。从部分侧限和飞侧限的单轴压缩仿真的结果，揭示了该值不会产生侧向扩张。值大于4.2时，将会产生负的径向塑性应变，当值小于4.2时，显示侧向塑性应变快速增加。在侧限的单轴压缩实验，不允许发生侧向扩张，因此，侧向应力会密切依赖于值的选择。

甘蔗压榨过程比简单的单轴压缩复杂。Schembri等人（1998）从平均应力、偏应力和特定的体积估计值。通过处理Leitch（1996）的三轴实验并认为实验结束点接近临界状态，值估计在0.08~2.0的范围。但是Leitch的实验结果没有关于临界状态的任何证据。

值也可以从剪切实验估计，通过摩擦角估计（Schembri等人，1998）。在正应力达到4MPa时，摩擦角范围为23.8º~32.7º，结果值为0.81~1.08（Plaza 和Kent）。注意到从直接剪切实验测得甘蔗纤维的摩擦角和颗粒间或者一般摩擦材料是不同的。甘蔗纤维分层在会优先地，但方向随机地垂直与外加应力的方向。因此，测得的垂直与纤维方向的摩擦角会比顺着纤维方向平面的摩擦角大。

除了上面提到的关系外，摩擦角和值没有其他三角函数关系了。从三角函数关系估计的值落在一个较小的范围0.8~1.32。直接剪切实验，在压力为100-20000KPa下测得最后的甘蔗渣（经过压榨机多次压榨后的甘蔗纤维）的值为1.1（Plaza等人，2001）。

通过直接剪切实验和三轴实验估计得到较小的值（1.32以下），大体上预测正确的剪应力水平，但是会严重地预测了过大的侧向应变。另一方面，从非侧限和部分侧限的单轴应力路径估计得到较高的值，可以正确预测压缩过程中较小的侧向应变，但是会过大地预测直接剪切试验中的剪应力。对比侧向应变，考虑到甘蔗压榨是具有更复杂应力状态的部分侧限压缩过程，使用认为是更合理（Adams，1997）。

塑性硬化

使用塑性硬化模型的目的是描述甘蔗纤维的应力应变行为。使用单轴侧限压缩的硬化关系，对于剑桥模型和盖帽Druck-Prager模型在临界状态线以下的所有区域得到的结果是完全相同的。

(3)

2. 现代制糖工艺理论

制糖工艺理论是一门包含较多方面的物理化学理论的应用科学，如糖料萃取过程中的扩散、渗透、渗析、虑洗理论；糖汁提纯过程中的电离、絮凝、吸附、离子交换理论；浓缩结晶过程中的溶解、结晶及废蜜形成理论等，这些内容构成制糖工艺理论的基础。

对制糖工艺理论工作的评价

在制糖工艺的发展史上，制糖技术曾经长时间在很大程度上是以介绍和传授经验为主，如中国古代第一部甘蔗制糖专著《糖霜谱》沿用了千百年。

到20世纪30年代以后，才真正开始在制糖工艺上运用物理化学的知识，从而给制糖工艺原理奠以现代理论的基石。但以现代科学水平来衡量，制糖工艺理论这门应用科学显得比较落后。

20世纪70年代以后，制糖工艺理论研究工作有了很大的进步，对过程的认识由现象解释提高到数理分析，控制范畴由静态的发展到制定动态方程，研究对象由宏观领域深入到微观领域，生成由间歇化到连续化、自动化。

到了20世纪80年代，制糖工艺突出的表现是采用微电子控制技术，对提高产品质量和产量起了很大的作用，同时出现产品多样化的新工艺。

由于制糖工艺理论的研究对象——天然糖汁的组分差异较大，糖汁本身又易变质，且受季节性、地区性的影响，故蔗汁呈现不稳定性。此外在进行科学实验时，取样代表性差也是一个问题。

在采用和推广一些新方法的时候，并没有对这些新技术和新方法所依据的原理做过任何充分的研究和解释，而把某些权威人士的论述看成是科学的经验。这种作法必然影响到制糖技术的健康发展，它是当前制糖理论工作存在的要害问题，即还是以经验主义占主导地位，这表明理论工作没有深入发展和走在生产的前面，也是制糖科学出现薄弱环节的原因之一。

诺蒂亚-雨戈的压榨机理

所谓压榨取汁法是以机械的压缩作用为主，将蔗料中的75%以上的蔗汁挤出来。为了充分提取糖汁，压榨过程中通常还加入渗进水，以便同时产生渗析和沥洗二种作用，从而完善压榨提汁的效能。此外，在糖料提汁的最后阶段，蔗渣和废甜菜丝脱水时，一般也采用压榨方法，即通过压缩处理，通常采用辊压或螺旋压干。因此压缩机理成为糖料压榨提汁工艺理论的重要组成部分。

诺蒂亚的静态压缩过程

关于甘蔗压缩理论的研究，首推诺蒂亚，他与20世纪20年代初期便提出从事研究蔗料在静态压缩过程的报告，明确了压力对蔗料体积压缩的指数关系和压力与这只压出量的比例关系。他是把蔗料置入活塞筒中进行压缩试验的。由于他所推算出的计算式没有联系到不同的压力范围，所以说他的计算式也许不完全正确，不过此后三、四十年没有人继续做这方面更深入的研究工作，因此长期以来被认为这还是一项合理的研究结果。诺帝亚的压缩计算式如下[6]

式中

雨戈的动态压缩过程

到了20世纪50年代中期，雨戈又在诺蒂亚研究的基础上，推得蔗料在辊压过程中压力与压缩比的关系，并重新确定压缩比的指数如下式[3]

式中

当压力

詹金士（Jenkins）曾试验表明，为了取得一定的压缩比c，压榨机需要的动力比诺蒂亚在同样压缩比下测得的静压大的多，可能与蔗料的破碎度余蔗汁挤出速度有关。根据詹金士的试验结果修正上式如下：[7]

在压榨机中榨出的蔗汁如果不能及时排除，则会被压缩后回胀的纤维重吸。根据布洛克（Bullock）和默利（Murry）的研究[10],发现松散的蔗层纤维渗透性能很高，但压力到达一定限度时，其渗透性会突然下降，而在极大的压力下，其渗透性能将等于零。因此在压榨过程中处于低压区的蔗汁易被蔗层纤维重吸。这是辊子压榨机的最大缺点，这是由于压榨机的辊式结构和蔗渣的物性带来的后果，因此很难克服。

### 3. [7]Application of porous media mechanics to the numerical simulation of the rolling of sugar cane

摘要：提出两相材料滚压的有限元求解方案，并应用在甘蔗压榨上。对广义Boit理论进行拓展和修正时期使用于甘蔗压榨，把固体骨架的速度和孔隙压力作为基本的未知量。应有有限元方法进行控制方程的空间离散，使用标准差分法进行时域离散。通过约束压缩实验的有限元仿真评估本构关系。提出了甘蔗双辊子压榨的数值模型，描述了甘蔗纤维的材料参数，推导和讨论了压榨过程中的变化。数值模拟的结果表明了模型和方法的性能和能力。

Darcy最先研究了多孔介质的流体现象，这些基本的研究随后被Terzaghi和Biot发展和应用到土力学问题，他们把Darcy定律拓展到了多孔介质压缩变形的情形。Boit的研究建立了控制饱和多孔介质在静态和动态条件下行为的理论，

除了粉末金属和土壤等经典多孔介质外，在特定条件下，一些天然材料如甘蔗纤维和木材也可以看成饱和或不饱和的多孔介质。

尽管甘蔗压榨提汁方法使用了几个世纪之久，但是涉及的相关问题，如提汁率、破碎、压力和力矩的预测，都是仅能通过实验和经验来获得。

### 3. [18]Review and Future Options For Computer Modelling in the Sugar Industry

在甘蔗制糖的一些加工过程，如甘蔗清洗、甘蔗坯料制备和蔗糖干燥，应用计算机建模来提高设备设计和运行的存在很大的限制。一个突出的问题是在这些过程有大量粒子和粒子相互作用，如果分别单独进行建模，计算量会非常大。尽管存在这样的问题，一些尝试已经进行，获得了一些知识或者解决了一些实际问题。即使需要详细的建模，一个模型往往可以给一些加工过程提供很有用的了解。

甘蔗压缩提汁过程的详细建模有可能为糖厂带来好处。有可能改善的是减少蔗渣中的水分，增加甘蔗提取率、降低能量消耗、减少投资和运营成本。建模使用有限元方法（FEM），研究应变应力的关系，也可以确定蔗汁流体在纤维材料内的流动。如Leitch（1996）所说，ABAQUS软件为土力学建模开发了大量的临界状态模型。它们被认为是当时对甘蔗渣的弹塑性行为建模的最好方法，蔗料压缩过程涉及大变形、压缩应力从喂料装置的几千帕斯卡到压榨机窄口处的20000kPa变化。这些临界状态模型是专门为土壤建模开发的，然而其类似性也保留了对压榨机中的甘蔗渣行为进行建模的能力（Schembri et al.，1998）。Plaza（2002）通过实验表明蔗料的力学行为在临界状态行为与土壤相似。然而将现有的土壤模型应用在蔗料行为的建模也会存在很大的局限性。比如，对剪应力的预测需要改善（在辊子表面的剪应力总和成为驱动辊子的转矩）。尽管存在这样的限制，Kent（2004）也能够使用ABAQUS有限元的数值模型发展了一个经验方程更好地预测压喂料速度，有可能更好设置压榨机组满足压榨效率和性能目标。这个经验方程在广泛应用前还需要实验验证。在有限的资源下，针对蔗料材料模型的研究持续着。20世纪90年代由于热电联产收益的需求，进行甘蔗压榨过程建模，现在经济对改善甘蔗压榨过程需求更加强烈。

### 4. [19]A FURTHER STEP IN THE MODELLING OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF SUGAR CANE BAGASSE

对压榨过程中蔗料的行为有更好的认识是进一步提高甘蔗压缩提汁的必要前提。如改善喂料、蔗糖提取率、蔗渣水分。

对蔗料在压缩提汁时的力学行为进行建模能够帮助确定如何改善甘蔗压缩过程，然而，目前还没有相对完善的蔗料力学模型可供使用。

以前的研究已经证明蔗汁在蔗料中的流动遵循Darcy定律，辊子粗糙表面对蔗料的作用可以用莫尔-库伦失效准则描述，蔗料内部的力学行为是与土壤相似的临界状态行为。在目前的商用软件里有完善的渗透模型，但是却没有包含有蔗料的完善的力学模型

在近来的14年已经研究者着手研究蔗料压缩提汁过程的仿真，仿真使用的是商用有限元软件的材料模型，而这些模型最初是为黏土开发的临界状态力学模型，而不是蔗料。尽管这些模型被认为是蔗料的力学行为最有前途的仿真工具，但是这些模型有一些重大的局限性。比如，蔗料被垂直压缩的时候呈现很小的横向应力。为了对这样的压缩行为建模，在仿真上一个重要材料参数使用了在物理上不可能存在的量级。比如临界状态线的斜率，它是材料内部摩擦角的度量，使用了3.5~4.0的数值（例如, Loughran and Kannapiran, 2002）。物理上最大的数值是3.0，对应与三轴压缩试验中90°的摩擦角（Muir Wood, 1990）。大多数由颗粒组成的物质测量的数值是远小于3.0的。另一个问题是这些蔗料压缩模型不能正确预测压榨机辊子的转矩。

现有的商用软件有几个材料模型可以应用于甘蔗压缩提汁的数值模拟。如在ABAQUS软件里的修正剑桥模型（MCC）和Drucker-Prager盖帽模型（DPC）可充分仿真蔗料被压缩的力学行为。DPC模型能描述张力（内聚力的分量），而MCC模型则不能。Plaza和Kent（1998）的研究表明，在低垂直压力或零垂直压力下，蔗料是能够抵抗剪力的，这是存在内聚力的表现。蔗料经过两个辊子窄口处必定会产生拉应力，DPC模型能对一些张力建模的特性，使得它仿真蔗料压缩提汁具有更强的数值健壮性。但是，DPC模型在屈服面的定义和变形存在很大的局限性，并且固定于ABAQUS软件内，不能直接修改。

Kent(2004)使用Drucker Prager Cap模型在ABAQUS软件里进行了建模，获得了一个可以更好预测一个压榨机组的生产量的经验方程，但是，同以往的研究一样，从压缩模型预测的力矩比测量值小很多。

Plaza （2002）等人提出了一个叫改进的1 of Yu模型，与之前的模型相比，提高了对甘蔗压榨的加载和卸载条件的建模能力，但是这个模型不能描述拉应力。

Souza Neto（2008）等人使用类似与改进1 of Yu模型的方法，对MCC模型进行了改进，增加了它描述内聚力的能力。

An upgrade to the MCC model is described by de Souza Neto et al. (2008) to add a cohesion capability. This model has the flexibility to be modified in a similar way as the modification 1 of Yu (1998) model, in order to achieve improved predictions.

### 5. TOWARDS A MATERIAL MODEL FOR BAGASSE

已有的研究表明，蔗料和蔗渣在压力机的压力和压紧作用下的测得的临界状态行为和土壤的表现相似。

本文表明，在更高的密度下蔗渣表现出临界状态的行为，行为细节的不同，并提供了的材料参数的大小。结合实验结果和已有研究指出的模型的局限性，用来下一阶段研究一个可以正确地重现甘蔗渣纤维的行为的模型。提出的材料模型所具有的特性能重现蔗渣纤维的行为。

本文是一个延续的工作，以提高对制备的甘蔗和甘蔗渣固体骨架（纤维）的行为的了解。

### 6. MODELLING OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF HEAVILY OVER-CONSOLIDATED BAGASSE

前面的研究表明，蔗汁流动遵循Darcy渗透定律(Kent and McKenzie, 2003)，沟槽表面对蔗料的作用力可以用土壤力学的Mohr-Coulomb失效准则描述(Plaza and Kent,1997)，蔗料纤维的内部力学行为与砂和黏土临界状态行为相似 (Plaza, 2002)

本文在Souza等人的模型上和之前蔗料在压缩、卸载、重加载、剪切和一般固结的简单加载情况下（(Plaza, 2011）的预测进行研究。如果材料模型能够仿真蔗料在简单力学试验的应力和应变，那么也很可能可以预测压榨机的压力和力矩，或充分预测在压料机构或辊子沟槽的蔗料的运动和变形。

本文关心涵盖所有可能的情形（蔗渣纤维超固结下的剪切）的最终的加载情况。比如蔗渣纤维从压料机出来，在喂料斜槽里移动和接触到喂料辊子和顶棍的表面。在粗糙的辊子表面，蔗渣纤维的摩擦系数很可能会超过1.0(Plaza *et al*., 2002)。因此对蔗渣纤维的剪切行为建模与能可靠喂料的辊子接触角有关。

传统的MCC模型的采用关联流动法则，即屈服面和塑性势面相同。本文则采用屈服面和塑性势面是不相同的。屈服面由M值（临界状态线斜率）和β1（对屈服面形状的修正因子）定义，势面由ψ（膨胀角）和β2（势面的修正因子）定义。

结论:预测的体积与测量的值匹配的很差。尽管尝试没有成功，但是仿真表明该模型经过小修改很可能可以充分描述最后一个重要的加载条件。

### 7. AN ADDITIONAL STEP TOWARDS MODELLING THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF SUGAR CANE BAGASSE

Adam C J. Application of computational porous media mechanics to the rolling of prepared sugar cane[D]. James Cook University, 1997.

本文使用多孔介质弹性模型和各向同性塑性模型，通过单轴静态压缩和三轴实验测定材料参数。通过动态单轴压缩的数值模拟方法逆向确定蔗渣的渗透系数，预实验值比较，获得了合理的结果。

### 8. Three-dimensional simulation of the rolling of a saturated fibro-porous media

The above governing equations represent a fully coupled highly non-linear set of partial differential equations, which undergo spatial and temporal discretization in the Lagrangian model prior to solution[17]. For this coupled application it is noted that the stability of the finite element solution is enhanced if different interpolation/integration orders are used for the liquid pressure and velocity fields. Either a full Newmark scheme or reduced rank formulation can be used for time discretization. deSouza et al. [9]noted no practical difference in computational output. The resulting governing equations are then solved  
with a Newmark scheme.

上述控制方程代表了一个完全耦合的非线性偏微分方程组，求解前通过在拉格朗日模型 进行空间和时间离散化

### 9. [24]ABAQUS在岩土工程中的应用

在蔗料数值模拟研究中用过的材料模型有Cam-Clay模型和Drucker-Prager模型两种模型。Arasu Kannaprian （2003）讨论了Cam-Clay模型及其参数测定，并在Abaqus软件包中使用修正的Drucker-Prager盖帽模型进行甘蔗压缩的数值模拟。

在Abaqus中Drucker模型有多种类型，拓展的Drucker-Prager模型和修正Drucker-Prager盖帽模型。拓展的Drucker-Prager模型又包含有线性Drucker-Prager模型、双曲线Drucker-Prager模型、指数Drucker-Prager模型。

1.线性Drucker-Prager模型

（1）屈服面。线性Drucker-Prager模型的屈服面如图4-7所示，函数为：

（4-42）



式中，这里不采用作为偏应力是为了反映主应力的影响。

是屈服面在应力空间上倾角，与摩擦角有关。

是三轴拉伸强度与三轴拉伸强度之比，反映了主应力对屈服面的影响，为了保证屈服面是凸面，要求。不同的在面上的形状是不一样的。当=1时，，此时屈服面为mises屈服面的圆形。

d是屈服面在应力空间轴上截距，可按下式确定：

* ，根据单轴抗压强度定义。
* ，根据单轴抗压强度定义。
* ，根据剪切强度定义。

（2）塑性势面。线性Drucker-Prager模型的塑性势面如图4-8所示，函数为：

由于塑性势面与屈服面不相同，流动法则是非关联的。

需要指出当，时线性Drucker-Prager模型即退化为经典的Drucker-Prager模型。

（3）硬化规律。硬化规律的实质是控制屈服面大小的变化。ABAQUS中的扩展Drucker-Prager模型允许屈服面放大（硬化）或缩小（软化）。屈服面大小的变化由某一个等效应力控制的，用户通过给出与等效塑性应变的关系来控制，其中等效塑性应变为。针对线性Drucker-Prager模型，ABAQUS中提供了一下三种形式：

* 取为单轴抗压强度，。
* 取为单轴抗压强度，。
* 取为凝聚力，。



图4-8 线性Drucker-Prager模型的塑性势面

2.双曲线Drucker-Prager模型

（1）屈服面。双曲线Drucker-Prager模型的屈服面如图4-9所示，是由Rankine最大拉应力状态和高围压下线性Drucker-Prager应力状态组合成的连续函数，函数形式为：

式中 ，为材料的初始平均应力抗拉强度；

为高围压下的摩擦角，如图4-9所示。

为硬化参数，为的初始值可按如下式确定：

* ，根据单轴抗压强度定义。
* ，根据单轴抗压强度定义。
* ，根据粘聚力定义。



图4-9 双曲线Drucker-Prager模型的屈服面

（2）塑性势面。双曲线Drucker-Prager模型的塑性势面如图4-10所示，函数为：



图4-10 双曲线Druck-Prager模型的塑性势面

式中为子午面上的偏心率，它控制G在子午面上的形状与函数渐近线之间的相似度，ABAQUS会自动根据采用的模型设置默认值，用户无需理会。其余参数意义如前。

类似地，当时退化为相关联的流动法则。

（3）硬化规律。双曲线Drucker-Prager模型的屈服硬化思路（如图4-11所示）和线性Drucker-Prager模型是一致的，只不过，等效塑性应变的定义有所区别，其为。

3.双曲线Drucker-Prager模型。指数Drucker-Prager模型的屈服面如图4-12所示，其函数形式为



图4-12 指数Druck-Prager模型的屈服面

式中与是与塑性无关的材料参数。是硬化参数，表示材料的抗拉强度，按下列式子确定：

* ，根据单轴抗压强度定义。
* ，根据单轴抗压强度定义。
* ，根据粘聚力定义。

（2）塑性势面。指数Drucker-Prager模型的塑性势面与双曲线Drucker-Prager模型相同。

（3）硬化规律。指数Drucker-Prager模型采用作为硬化参数（如图4-13所示），此时等效塑性应变的定义与双曲线Drucker-Prager模型相同，即。



图4-13 指数Drucker-Prager模型的塑性势面

在甘蔗数值模拟可能会用到的是修正Drucker-Prager盖帽模型，它在线性Drucker-Prager模型上增加了一个帽盖状的屈服面，从而引入了压缩导致的屈服，同时也能控制材料在剪切作用下的无限制剪胀现象。

屈服/破坏面可以用三个应力不变量表示：

等效压应力

Mises等效应力

偏应力第三不变量

式中，是偏应力，定义为

为单位矩阵，再定义

这里不采用作为偏应力是为了反映主应力的影响。是屈服面在应力空间上倾角，与摩擦角有关。

是三轴拉伸强度与三轴拉伸强度之比，反映了主应力对屈服面的影响，为了保证屈服面是凸面，要求。不同的在面上的形状是不一样的。当=1时，，此时屈服面为mises屈服面的圆形。

（1）屈服面

修正的Drucker-Prager帽盖模型的屈服面，如图1所示。由图可见，屈服面主要有两段组成，Drucker-Prager给出的剪切破坏面和右侧的盖帽曲面。这里剪切“破坏面”，意味着这一部分不会发生硬化，即是理想的塑性，在后面的流动法则中我们会看到该处的塑性变形增量方向指向左上方，即发生剪胀变形，造成体积增加，随着会造成盖帽的缩小（软化）。帽盖面是一个椭圆曲线，其实可以放大或缩小的（与塑性体积应变有关在）。在剪切破坏面和帽屈服面之间ABAQUS用渐变曲线光滑连接。

剪切破坏面为：

帽盖面为：

式中R是控制帽盖几何形状的参数；是一个数值很小的数，决定了过渡区的形状，会在后面讨论； 是盖帽与p轴的，称为压缩屈服平均应力，控制了帽盖的大小。是帽盖面与过渡面交点对应的p值，由下式确定：

过渡面为:

这里的是一个数值很小的数，通常为。表示没有过渡区，此时由于帽盖面的法线都指向右侧（体积压缩），帽盖面上不会出现软化；取得越大其过渡面的曲率就越大，有利于拟合剪切破坏数据点。

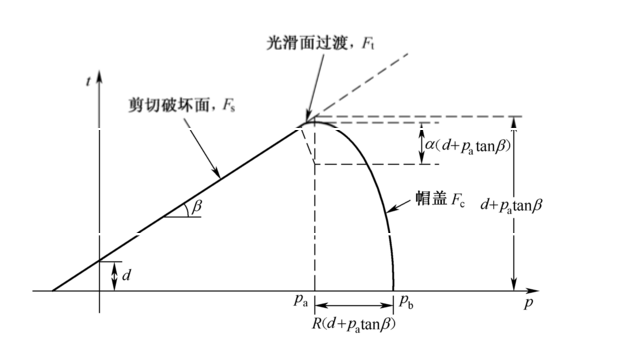


图1修正的Drucker-Prager帽盖模型的屈服面

(2) 应变分解

假设线性应变分解，则有

其中，是总应变率，是弹性应变率，是无弹性（塑料）与时间无关的应变率，

是无弹性（蠕变）随时间变化的应变速率。

（3）弹性行为

材料的弹性行为描述可以用线弹性体，或者包含张力的多孔介质弹性体，这在手册“Porous elasticity，”Section 4.4.1有介绍。如果定义了蠕变，弹性行为必须用线性建模。

（4）塑性行为

屈服面/失效面在这个模型里用术语应力不变量表达：等效压应力

（2）塑性势面

修正的Drucker-Prager帽盖模型的塑性势面同样也采用几段组成，其在帽盖面上是相关联的，而在剪切破坏面和过渡区是非关联的。

帽盖面上的塑性势面函数为：

剪切破坏面和过渡区的塑性势面函数为：

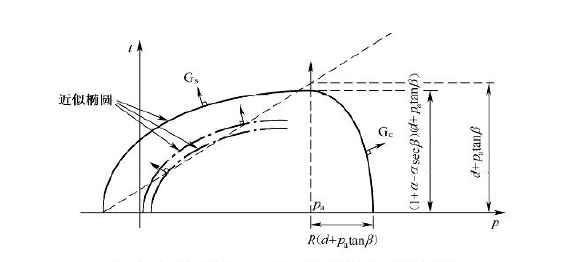


图2 修正的Drucker-Prager帽盖模型

（3）硬化律

修正的Drucker-Prager帽盖模型中的硬化参数为，用户可以分段指与塑性体积应的关系。图中的是蠕变引起的塑性应变体积，塑性应变体积应变轴的原点可取任意值。为分析开始时材料的初始状态在该轴上对应的位置，这就定义了分析开始时盖帽的位置，或初始屈服面大小。

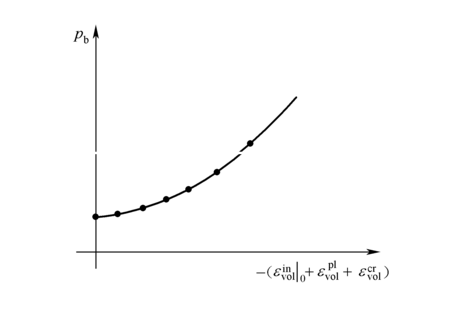


图3 与的关系

（4）模型参数的实验标定

通过实验数据拟合参数时，用户可指定中的部分参数，ABAQUS会自动拟合余下的参数。这类岩土本构模型的参数通常用三轴实验获得，在实验曲线上选择合适的点重新绘制到应力空间中便可以确定模型参数。

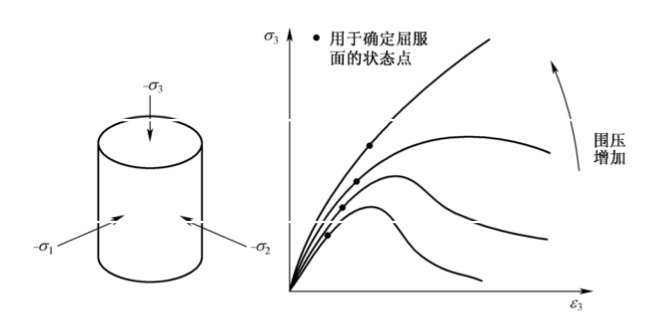


图4 利用三轴实验确定模型参数

1）三轴压缩实验

在三轴压缩实验中，试件受到均布围压，然后某个方向上收受到附加的压应力。这样三个主应力值均为负值，即

因而有

2）三轴拉伸实验

在三轴压缩实验中，试件受到均布围压，然后在一个方向上压力减小。三个主应力的关系为：

因而有：

3）使用修正的Drucker-Prager帽盖模型时，在ABQAUS软件中需要设置的参数有：

* p-t平面上的粘聚力d
* p-t平面上的摩擦角
* R，需大于0
* 定义初始屈服位置
* ，包含蠕变效应时，
* k，三轴拉伸强度与三轴压缩强度之比
* 通过表格给定随的变化

### 10. 试验土工学

为了减少试样周壁摩擦力的影响，应先用凡士林、硅油、聚四氟乙烯或二硫化钼涂于环刀侧壁。

### 11. [26]基于遗传算法的岩土力学参数反演及其在ABAQUS中的实现

12.ABAQUS在隧道及地下工程中的应用

反分析就是正分析的逆过程，通过试验数据来求取想要的而又难以直接测得的参数。反分析是从岩土力学领域发展起来的，主要用于岩体参数反演。现在反分析着重为数值分析确定合理的参数，对于应用它们进行数值分析，得到与工程测量一致的结果具有重要意义。反分析分为正演法和反演法。正演法是通过传统计算方法，通过多次优化改进，不断改变初始输入参数，直至得到所测试结果的方法。最优化技术中的直接法是求解正演法的有力工具，正演法以及其计算时所测结果的方法来分类，分为模式搜索法、变量轮换发、单纯形法、鲍威尔法等进行优化的正演法。

反演法是自观测量导出所需参数的方法。由使用的已知量可分为：应力反分析，是指依据地下工程测得的相应的应力实测值来反推载荷的值。位移反分析法，是依据实测的变形量来反算载荷的值。

输出状态

已知输入

已知模型的模型结构

测量装置

输出观测值

量测噪声

含未知数

反分析的研究方法

参数识别是在模型已知的情况下，根据能够测出来的输入和输出，来决定模型中的某些和全部参数。

一般表示为系统的实际输出量测值和模型的输出的偏差的某个函数，可取

将误差函数作为准则函数，是已知量测值；当输入为已知值时，显然准则函数的大小随这所选的模型参数不同而不同，当达到最小值时的参数即为最优解。从这个角度来看，反演问题实质是一种优化问题。

遗传算法是建立于达尔文生物进化“物竞天择 ,适者生存”基本原理之上的一种迭代自适应概率性优化搜索算法。它是一种全局最优化方法，特别适用于多极值点的优化问题，将选择 、交叉、变异等概念引入到算法中，通过构成一组初始可行解群体并对其进行操作， 使其逐渐移向最优解 。向衍，苏怀智和顾冲时[27]应用遗传算法反演了坝体混凝土的弹性模量和坝基变形模量，结果表明与传统的常规反演和确定性模型反演相吻合 ，说明反演得到的物理力学参数符合大坝运行的实际情况 ，同时也表明将遗传算法应用于物理力学参数反演和识别中是可行的。贾善坡[26]结合ABAQUS有限元软件，提出遗传算法与有限元联合反演法，将有限元程序作为一个单独模块嵌入到遗传算法程序中，以测点的实测值与计算值建立误差函数，编制了遗传算法反演分析程序，反演得到了岩土材料的弹性模量、摩擦角和粘聚力这三个力学参数，与真实值的误差小于5%。刘杰和王媛[28]提出一种改进的遗传算法，求解有自由面的裂隙岩体渗流参数反问题。改进后的方法在一定程度上克服了基本遗传算法求解此类问题时遇到的计算量大、易出现早熟收敛现象等缺陷，计算效率及收敛精度都有较大提高。

位移反演模型是反演物理力学参数应用最为广泛的反演模型。位移反演方法是利用现场位移测量资料反演分析材料的物理力学参数，如弹性力学参数、塑性参数、流变参数等，可表示为：

式中: ——待求参数的总个数。  
通过测量手段可得到测点处的相对位移或绝对位移，表示为:

式中:——各测点处的位移实测值;  
n——测点的个数。

位移 U 是变量 的函数， 则有:

给定待求参数 初始值，通过数值计算，由这些初始参数出发，可以得到测点处的位移计算值， 即:  
  
式中:——各测点处的位移计算值。

在保证力学参数取值在允许范围的前提下，优化各力学变量，使得各种工况下的有限元计算结果和响应点原位观测值的差值的平方和最小。在数学上以误差函数来表达：

材料参数在一定的允许范围内，约束条件为：

式中，和为材料参数的允许范围，可根据相关室内和现场实验获得。

参数优化反演的过程就是寻找一组材料参数，使得下式成立：

位移反演的优化解认为，但误差函数取得最小极值时，计算所用的材料参数即可视为研究对象的材料参数。

matlab提供了较为完善的遗传算法工具，因此通过mtlab调用abaqus有限元软件进行有限元计算，利用matlab遗传算法优化工具计算目标函数，从而可以实现反演材料力学参数。甘蔗纤维的渗透系数是较难测定，因此可以使用反演分析的方法确定。同时，若以甘蔗压榨过程中的运行参数（如辊子速度，压缩比和蔗层厚度）为待反演参数，以辊子压力或者转矩的取最小值为目标。那么也可以使用遗传算法搜索出压榨机最优的运行参数。

使用遗传算法反演物理力学参数或搜索压榨机最优运行参数的实现流程可用下图表示。

开始

输入实测值、带反演参数初始值以及优化算法控制精度

读取有限元程序命令流文件，调用abaqus软件，进行有限元计算

读取计算结果文件，获取测点的有限元计算值，计算目标函数

求出，输出反演结果

优化处理

修正反演参数***X***

否

是

结束

常规三轴试验

在常规三轴试验中，分别施加周围压力和轴向压力，简称围压和轴压。在土力学领域这种试验主要用于确定土的抗剪强度参数和应力应变关系，包括三轴压缩试验和三轴伸长试验，他们各自又有几种方法。例如，在三轴压缩试验中（），保持围压保持不变，增加轴压直至破坏；或者保持轴压不变，减小围压直至破坏。在三轴拉伸试验中（），保持围压不变，减少轴压直至破坏；或者保持轴压不变，增加围压直至破坏。常规三轴试样的固结状态是从围压的角度考虑的，例如，当试验中施加的固结围压大于试样的先期固结压力时，试样便处于正常固结状态。

真三轴试验

常规三轴试验不能充分反映土的应力变形特性，因为这种试验没有考虑中间主应力的影响。为此，人们发展出了真三轴试验，即3个方向上应力不等的三轴试验（）。在真三轴研究中，可用下列参数表示的影响。

（1）Lode参数：

（2）Bishop采用b值来反映中间主应力的影响，b定义为

与b具有如下关系：

b表示在和之间额位置。真三轴试验表明，随着b的增大，应力应变曲线越来越陡，（）的峰值点提前，材料的破坏更接近于脆性破坏。

### 12. 高等岩土力学

(1)屈服准则

屈服准则可用以判断弹塑性材料被施加一应力增量后是加载还是卸载，或是中性变载，亦即是判断是否发生塑性变形的准则，加载时都会产生；卸载时仅产生。在下图中，对于A点，加载时，同时产生；卸载时。仅产生。对于点，无论载荷*q*增加或减少，都不会产生，仅产生。



图1 弹塑性模型

从O点逐渐加载到A点，则A点为屈服点，随着应变增加，B、C都成为新的屈服点。可见应力状态在屈服点上，意味着加载时有塑性变形发生，卸载时只有弹性变形。应力状态减小到屈服点以内时，正负应力应力增量只引起弹性变形，总塑性应变一直不变，所以屈服点和塑性应变相关。塑性应变成为屈服准则的一个内变量，在简单的应力状态下可表示为

(1)

(2)屈服函数

式（1）是一种最简单的应力状态下的屈服函数。在一般应力状态下，屈服准则可以用应力张量的函数表示，即

（2）

其中，为屈服函数；为应力张量；为反映材料塑性性质的参数，一般为塑性银边的函数，称为硬化参数。

对于应变硬化的情况，用屈服函数判别加卸载的方法如下：

（1）=0时表示应力状态在屈服面上，为加载，同时发生；为中性变载，只发生弹性形变；为卸载，只发生弹性变形

（2）则表示应力状态在现有屈服面内，微小的应力变化只产生弹性应变。对于各向同性的材料，屈服函数的一般形式，式（2）也可表示为

(3)

(4)

(5)

3.屈服面与屈服轨迹

屈服准则用几何方法来表示即为屈服面和屈服轨迹。由于许多模型都假设土是各项同性的，侧式（3）、式（4）和式（5）可分别在不同的三维应力空间中表示成曲面，称为屈服面。这一屈服面与任何一个二维应力坐标平面的郊县就是屈服轨迹。图2（a）为一种最简单的圆锥形屈服面，所以屈服面和屈服轨迹是一系列曲面族或曲线族。如果应力状态位于某一屈服面

（图2（b）），在阴历增量下超载了当前的屈服面，使屈服面变化到了，是加载过程，将发生弹性和塑性应变增量；如果应力增量使应力状态A点想当前屈服面内运动，则是卸载过程，将只发生弹性变形。



（a） （b） （c）

图2 圆锥性屈服面及其屈服轨迹

（a）三维主应力空间的屈服面 （b）p-q平面上的屈服轨迹 （c）平面上的屈服轨迹

4. 屈服面和屈服轨迹的形状

经典的塑性理论实在金属受力变形和加工的基础上建立的，以剪力作为简单的加卸载准则是最通常的形式，在空间他便是为一平行于轴的直线，如图3（a）直线1，从微观的角度看，土的不可恢复的塑性应变主要是由于土颗粒间相互位置的变化（错动或挤密）及颗粒本身的破碎。尤其是当颗粒收到外力后从一个高势能进入相对低势能的较稳定状态，其位移是不可恢复的。对于土这种摩擦材料，在等应力比作用下，从理论上桨颗粒间几乎不发生相对滑动，所以许多本构模型选择平面上过原点的射线为土的屈服轨迹（空间为各种锥面），可以反映土作为一种摩擦力为主的材料的变形与强度特性。如图3（a）直线2所示。

与其他材料不同，在各项等压或平均主应力增加的等比应力条件下，土体颗粒相互靠近也会导致机构破坏、颗粒破碎、孔隙减少，同时发生塑性应变。因而各种与P轴相交的“帽子”屈服面也是图的本构模型常用的形式，如图3中曲线3.有些土的本构模型具有上述两组屈服面，即锥面与帽子屈服面。有人将两者结合起来，采用图3中曲线4的这种统一的形式。

5.土的屈服轨迹及屈服面的确定

图的屈服准则很难严格准确地确定，这主要是由于土实际上常常没有严格的加载卸载或塑性变形的分解，许多试验在卸载-再加载过程中也有塑性应变发生。另外，由于应力路径的影响，某一应力状态下的应变不唯一，加卸载也难以唯一确定。所以屈服准则一般是基于经验及假设而建立的

最基本的方法是基于上述的土的摩擦特性和压缩特性的认识，假设一定的屈服面（锥面、帽子等），然后在设定适当的硬化参数H，使计算应力应变关系符合试验结果。实际上许多土的本构模型都采用此方法。

另一种方法是根据屈服准则的定义直接通过试验来确定土在一定应力平面上的屈服轨迹。具体的方法是利用三轴试验在应力平面上不断变化应力路径，通过相应的应力银边曲线判断加卸载，然后得到小段屈服轨迹，再用曲线拟合得到屈服函数。这种方法的不足之处是不同应力路劲得到的结果可能不同，另外应力应变曲线上的屈服点有时不易清晰界定，因而整理出一套完整的屈服轨迹和屈服面比较困难。

### 13. 土的本构关系

塑性理论的三大支柱：屈服条件、流动法则和硬化规律，它们分别被定义为：

（1）屈服条件是确定开始产生塑性变形的应力条件；

（2）流动法则是确定塑性应变增量的法则；

（3）硬化规律是确定银边增量大小的规律，确定硬化规律实质上是要确定硬化参量。

临界状态定义为：土体在载荷作用下达到应力不再变化、体积应变不再变化，而剪切应变持续发展的流动状态。此时意味着土体已经发生了流动破坏。

5.3 修正剑桥模型

如图所示，在与轴相交出塑性势曲线与轴不正交，对于等向固结情况，应力的变化沿着轴，此时的塑性应变应该只有塑性体积应变增量，塑性剪应变增量，总塑性应变增量方向应沿着水平轴。而原始剑桥模型的应变增量方向不仅有体积应变增量还有剪应变增量，显然与实际不符。因此1968年罗斯柯等人提出了修正剑桥模型。

在修正剑桥模型中，塑性势线（=屈服线）与轴正交，提出了椭圆形的塑性势面，与剑桥模型不同之处只是根据塑性功推导出的应力比与应变增量比的关系不同。

5.3.1塑性势函数

忽略二次高阶项，修正剑桥模型的塑性功可以表示为

（1）

整理上式得

（2）

根据塑性势函数与塑性应变增量正交的条件式

（3）

得

（4）

解上式常微分方程

（5）

因此可得修正剑桥模型的塑性势函数为

（6）

其中为积分常数，取不同的值，得到不同的塑性势函数。所以上式表示的也是一簇曲线簇。如下图虚线表示的是原始剑桥模型的塑性势面，实线表示的是修正剑桥模型的塑性势面。修正剑桥模型的塑性势面是一个椭圆，在特征点处，塑性体积应变，只有塑性剪应变；在处，只有塑性体积应变，这与等向固结情况相符，改进了剑桥模型中不合理之处。



修正剑桥模型塑性势面与剑桥模型的对比

5.3.2屈服函数

采用屈服函数与塑性势函数相等的相关流动法则，因此屈服函数为

（7）

上式中时，，代入上式解得积分常数，所以

（8）

5.3.3 硬化参数

修正剑桥模型除了屈服曲线改为椭圆外，其应变硬化准则与原始剑桥模型相同。

根据屈服函数得

（9）

两边取自然对数并整理得

（10）

正交法确定了塑性应变增量的流动方向与塑性势面正交，把等向固结（）的试验结果绘制在坐标系下，如下图所示。加荷曲线和回弹再加荷曲线的斜率分别是和，荷载从增加到时，孔隙比的改变量为

（11）



等向固结试验参数

总体积应变为

（12）

其中，弹性体积应变为

（13）

所以塑性体积应变为（硬化参数）

（14）

上式可以整理为

（15）

把上式代入屈服函数的对数表达式并整理得屈服函数为

（16）

式中，，，是甘蔗纤维的基本塑性参数，，除了可以通过等向固结试验测得，还可以通过侧限压单轴压缩试验更简易测定。可以通过直接剪切试验或三轴试验测得，但是甘蔗纤维压缩变形大，三轴仪器的轴向压缩有限制，因此甘蔗纤维的应该通过直接剪切试验来测得。

上式还可以写成

（17）

可见塑性体积应变有两部分组成：第一部分表明，平均正应力的增加产生塑性体积应变；第二部分表明，塑性体积应变与应力比相关，即体积应变不仅与平均正应力相关，还与广义剪应力相关。

屈服函数还可以简记为

（18）

上式表明剑桥模型的屈服函数是塑性体积应变的等值面，应力在屈服面内变化只发生弹性变形，应力变化超过屈服面将产生塑性变形，随着屈服面扩大，弹性范围增大，所以塑性体积应变也称为硬化参数。

**2.2.4 应力应变关系**

（1）弹性应变应力关系

1）弹性体积应变增量

根据各向同性条件下的弹性方程（胡克定律）可知，弹性应变增量为

（19）

式中，为弹性模量；为泊松比。

弹性体积应变增量可表示为

（20）

2）弹性剪应变增量

根据弹性力学可知

（21）

根据式（19）和式（21）可以求得

（22）

把式（20）和式（22）写为

（23）

（24）

式中的弹性参数，通过甘蔗单轴静态压缩实验测定。把甘蔗纤维单轴静态压缩结果绘制在坐标系中，如图2.可求得弹性模量

设，得

（25）

（2）塑性应力应变关系

修正剑桥模型屈服函数（16）可以改写为

（26）

由上式求偏导的

（27）

因为，所以

（28）

求，由公式（26）得

（29）

求，由公式（26）得

（30）

把式（29）和式（30）代入式（28）得

（31）

设，式（30）可以整理为

（32）

把式子（32）代入剪胀方程（2），得塑性剪应变增量为

（33）

整理公式（32）和公式（33）

（34）

（3）总应力应变关系

综合弹性和塑性应力应变关系，总的应力应变关系可以写成下面矩阵形式

（35）

把式（25）和式（34）代入式（35），解得此时柔度矩阵的元素为

（36）

### 14. [31]A simple test for determining some important material properties for bagasse

Kent G A等人使用不同的速度进行快速甘蔗纤维压缩实验，提出了一个一维的模型，使用两个参数和描述蔗汁的渗透系数，使用压缩指数描述固体纤维的压缩特性。Kent G A等人使用该模型模拟快速压缩过程，通过优化参数输入，使预测数据与实验数据的误差最小，从而估计出上述的三个参数，但是没有涉及甘蔗纤维在剪力、三维复杂应力下的力学特性及材料参数。

### 15.大理岩弹塑性耦合特性试验研究

大量研究表明，岩石经历塑性变形时其弹性参数会发生变化，即存在弹塑性耦合现象。为了研究岩石的弹塑性耦合特性，进行了两种大理岩的循环加、卸载试验。试验结果表明：与常规试验对比，循环加、卸载试验对岩石的变形、强度及破坏形态影响较小；弹性参数随塑性变形的变化显著，考虑弹塑性耦合时，弹性参数取体积模量和剪切模量更为合适；基于Mohr-Coulomb 屈服准则，计算得到了强度参数，即黏聚力和内摩擦角随塑性内变量的演化规律。所得结论将为岩石弹塑性耦合本构模型的建立提供基本的试验支持。

传统的塑性增量理论中，弹塑性性质的表述包含以下几个方面[33]：（1）存在一个与应力和应变历史有关的的屈服函数或加载函数，它在应力空间中定义了现时的弹性区域；（2）有一个不变的对称正定的弹性矩阵，联系应力和弹性应变；（3） 屈服（或加载）函数作为塑性位势函数，即采用关联的流动法则；（4）有一个强化规律，它与加载函数的某些参数（不可逆过程的某种度量）相对应，在变形过程中，加载面随应力点向外扩大表示强化，加载面保持不变表示理想弹塑性。这些性质满足 Drucker关于稳定材料的公设。

### 16 [34]Displacementwaves in saturated thermoelastic porous media

针对一种饱和热弹性多孔介质。提出一系列完整的宏观方程描述流体压力变化和流体及固体温度、位移的方程。包括质量、动量和能量平衡方程，本构关系的定义。平衡方程考虑惯性效应，流体压缩导致的阻力和能量和固体基质变形。

### 17 [35]Shock waves in saturated thermoelastic porous media

针对饱和多孔介质，以耦合形式，流体和固体速度非线性波动方程的形式提出流体和固体基质的宏观运动方程，非线性方程允许冲击波的产生。这些方程确定热弹性固体的相速度，也包含了多孔介质整体的能量平衡方程，以及两相质量平衡方程。但是在刚性多孔介质情况下，压力突然变化的波动仅通过流体传播。

### 18 Finite element formulations for large‐scale, coupled flows in adjacent porous and open fluid domains

研究了存在多孔介质流体域和纯流体域交界的大规模的、耦合的、不可以缩的流动，分别采用两种不同方法描述纯流体域和多孔介质内的流体域。纯流体域均采用纳维-斯托克斯方程描述，在多孔介质流体域，一种方法采用Darcy定律描述，在孔隙流体域和纯流体域交界使用Beavers-Joseph滑移条件和一种新的界面条件实现。另一种方法是多孔介质流体域使用Brinkman方程描述，这大大简化了在孔隙流体域和纯流体域之间的界面处的匹配条件的实现，而且还导致与该界面相邻的多孔区域中的速度边界层难以进行数值求解。数值模拟结果表明使用Darcy定律-滑移条件的描述具有更好的精度并且计算量更少。

19

研究多孔介质流体和多孔介质结构耦合的动态分析，应用ADINA一般流固耦合（FSI）算法水库-土坝-地基系统的地震分析。水库的水使用基于流体单元和亚音速势流元Navier-Stokes方程描述。耦合分析给出地震任意时间水库区域的动水压力和速度，土坝和地基的位移，孔隙压力和应力。

**参考文献**

[1] 庄茁, 由小川, 廖剑晖. 基于ABAQUS的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

[2] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 机械工业出版社, 2006.

[3] 陈卫忠, 伍国军, 贾善坡. ABAQUS在隧道及地下工程中的应用[M]. 北京: 中国水力水电出版社, 2010.

[4] 甘蔗制糖工业手册编写组. 甘蔗制糖工业手册[M]. 北京: 轻工业出版社, 1984.

[5] Arasu K. Computational and experiments modeling of crushing prepared sugar cane[D]. University of Madras, 2003.

[6] 陈树功. 现代制糖工艺理论[M]. 轻工业出版社, 1988.

[7] D.R.J. Owen, S.Y. Zhao, J.G.Loughran. Application of porous media mechanics to the numerical simulation of the rolling of sugar cane[J]. Engineering Computations, 1995,12(3):281-302.

[8] Darcy H, Darcy H, Darcy H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon[M]. 1856.

[9] Terzaghi K V. Die berechnung der durchlassigkeitsziffer des tones aus dem verlauf der hydrodynamischen spannungserscheinungen[J]. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, Abteilung IIa, 1923,132:125-138.

[10] Terzaghi K. Theoretical soi] mechanics. w Chapman and Hall[Z]. London, 1943.

[11] Biot M A. General Theory of Three-Dimensional Consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941,12(2):155.

[12] Biot M A, Willis D G. The elastic coefficients of consolidation theory[J]. J. Appl. Mechan, 1957,24:594-601.

[13] Whitaker S. The equations of motion in porous media[J]. Chemical Engineering Science, 1966,21(3):291-300.

[14] Greenkorn R A. Flow phenomena in porous media: fundamentals and applications in petroleum, water and food production[J]. 1983.

[15] Holt J E. The prediction of roll loads in the crushing of prepared sugar cane[M]. University of Queensland, 1964.

[16] Loughran J G. Mathematical and experimental modelling of the crushing of prepared sugar cane[J]. 1990.

[17] Murry C R, Holt J E. mechanics of crushing sugar cane[J]. 1967.

[18] Plaza F, Kent G, Rackemann D, et al. Review and future options for computer modelling in the sugar industry[J]. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists 36th Conference, 2014.

[19] Plaza F. A further step in the modelling of the mechanical behaviour of bagasse[J]. 32nd Annual Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists 2010, 2010:621-628.

[20] F. PLAZA, J.M. KIRBY, L.M. LANGENS. TOWARDS A MATERIAL MODEL FOR BAGASSE[J]. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol, 2002,Vol. 24.

[21] F PLAZA. Modelling of the mechanical behaviour of heavily over-consolidated bagasse[J]. Proc Aust Soc Sugar Cane Technol, 2012,Vol 34.

[22] Plaza F. An additional step towards modelling the mechanical behaviour of sugar cane bagasse[J]. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 2011,33.

[23] J.G. Loughran, Arasu Kannapiran. Three-dimensional simulation of the rolling of a saturated fibro-porous media[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005,42(1):90-104.

[24] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

[25] 谢定义, 陈存礼, 胡再强, 等. 试验土工学[M]. 高等教育出版社, 2011.

[26] 贾善坡. 基于遗传算法的岩土力学参数反演及其在ABAQUS中的实现[J]. 水文地质工程地质, 2012,39(1):31-35.

[27] 向衍, 苏怀智, 顾冲时. 基于遗传算法的物理力学参数反演[J]. 长江科学院院报, 2003,20(6):55-58.

[28] 刘杰, 王媛. 改进的遗传算法及其在渗流参数反演中的应用[J]. 岩土力学, 2003,24(2):237-241.

[29] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[30] 罗汀, 姚仰平, 侯伟. 土的本构关系[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

[31] Kent G A, McKenzie N J. A simple test for determining some important material properties for bagasse, 2003[C]. PK Editorial Services; 1999.

[32] 张凯, 周辉, 冯夏庭, 等. 大理岩弹塑性耦合特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010(08):2425-2434.

[33] 殷有泉, 曲圣年. 弹塑性耦合和广义正交法则[J]. 力学学报, 1982(01):63-70.

[34] Bear J, Sorek S, Ben-Dor G, et al. Displacement waves in saturateci thermoelastic porous media. I. Basic equations[J]. Fluid Dynamics Research, 1992,9:155-164.

[35] Sorek S, Bear J, Ben-Dor G, et al. Shock waves in saturated thermoelastic porous media[J]. transport in porous media, 1992,9(1):3-13.

[36] Salinger A G, Aris R, Derby J J. Finite element formulations for large‐scale, coupled flows in adjacent porous and open fluid domains[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1994,18(12):1185-1209.