

FLAC(version 2.00)

Fast Lagrangian Analysis of Continua

目录

1.0 引论	5.2.1 网格的形成及材料特性的定义 29
1.1 FLAC 的技术要求及装 机.....3	5.2.2 应用边界条件 33
1.2 绘图机故障分析 4	5.2.3 应用荷载 / 变化条件 33
2.0 立即满意 - 应用 FLAC 的一个 简单指导性示例 4	5.2.4 数据的打印及绘图 33
2.1 建造在非线性之中的壕沟 4	5.3 特殊问题的考虑 36
3.0 基础知识—显式有限差分法 8	5.3.1 大应变 36
3.1 引论 8	5.3.2 平面应力 36
3.2 显式 / 计算循环 8	5.3.3 重力 36
3.3 有限差分格式 9	5.3.4 图形形状 36
3.3.1 导数的表示 9	5.3.5 存入 36
3.3.2 运动方程式 9	5.4 错误处理 37
3.4 速度 / 应变增量方程式 9	5.5 储存 / 复原运行 37
3.5 应力 / 应变规律 10	5.6 建议及忠告 37
3.6 确定网点处的不平衡力 10	6.0 FLAC 中的结构模拟 39
3.7 应力转动修正项 11	6.1 命令结构 39
参考文献 12	6.2 定义结构单元的几何条件及其 支承介质的联动装置 40
4.0 输入指令	6.3 实例应用 40
4.1 定义 12	7.0 例题 45
4.2 输入命令 12	7.1 例 1 无摩擦粘土上的毛石基脚 45
4.3 设置你自己的默认条件	7.2 例 2 粘性摩擦土的边坡稳定 47
参考文献	7.3 例 3 端部有剪力的弹性悬臂 梁 51
5.0 用 FLAC 解答的问题	
5.1 引论 28	
5.2 运行 FLAC28	

7.4 例 4 弹性，弹塑性及横向各向同性岩石介质中，受初应力作用的圆形隧洞

7.4.1 弹性岩石介质 51

7.4.2 弹塑性岩石介质 53

7.4.3 横向各向同性岩石介质 55

参考文献 56

8.0 运行 FLAC 时值得注意的重点及注意事项 57

8.1 初始化各变量 57

8.2 改变材料模型 57

8.3 运行含现场应力和重力的问题 57

附录 A 本构模型描述 59

A1 引论 59

A2 弹性各向同性模型 59

A3 Mohr - Coulomb 模型

A4 空模型

A5 各向异性弹性 60

A6 多处存在结理的模型 61

A7 应力软化 / 强化模型 61

参考文献 63

附录 B 利用 FLAC 时确定平衡条件 64

附录 C 错误及警告信息 66

附录 D FLAC 中的界面逻辑 68

FLAC 快速查阅命令清单 70

FLAC 2.01 版补遗 72

FLAC

Fast Lagrangian Analysis of Continua

(Version 2.00)

@1987

ITASCA Consulting Group, INC.

P.O.Box :14806

Minneapolis, Minnesota 55414

ITASCA Consulting Group, INC.

持有执照的 FLAC 的条款及规则

(Terms and for licensing FLAC)

使用 FLAC 程序之前，你应当仔细阅读以下各条款及规则。把 FLAC 插入你的计算机，意味着你已承认这些条款及规则。如果你不这个程序是由 Itasca 咨询小组有限公司提供的。给记录的数个体起的名称和给支持所起的名称是使用转递用的，但给程序起的名称。达到你的预想效果，并负责安装，使用及从程序中获得结果。

许可证 (License)

在任何一个时间，你只又能在一台计算机使用这个程序。

仅仅为了延伸利用，你可以复制备份程序。

除了本文件提到外，你不能利用，复制，修改或传送本程序或任何复制大部分或一部分。

你不能再执照，出租本程序。

有效期限 (Term)

本许可证终止前一直有效。任何时候，你可以通过程序运用备份拷贝来终止它。如果你不遵守 (fail to comply with) 本的任何条款或条件，它也会终止。你同意这样的终止，使坏程序连同备份拷贝，以任何方式的修改和 / 或的各部分。

保证书 (Warranty)

在本代码，在 12 个月内将免费改正代码中的任何错误，完整的表列输入及输出文件，并错误的书面形式，给出通知。如果经判断，代码有错误，将视情况免费修改或交换拷贝，或偿还。

责任界限(Limitation of Liability)

概不负责 :关于 FLAC 或任何部分的使用 ;关于使用而造成的任何损坏或掉失 ,包括由于使用 FLAC 而造成的时间 ,金钱或信誉损失 (包括各种修改或改正而造成的) . 决不负责因使用 FLAC 而造成的间接的 , 错误的 , 偶然的或随时而发的各种损坏 .

1.0 引论

FALC 是一种显式有限差分代码 (explicit finite difference code), 它模拟由岩土或其它材料建造的结构物的性能, 这些材料达到屈服极限时, 可能经历塑流. 这些材料是通过构成一个网格的域或者单元来表示的; 这个网格由用户调整, 以拟合模拟对象的外形. 各单元对外力边界约束的反应, 是服从某一规定的线性或非线性应力 - 应变定律. 如果应力大得足以使材料发生屈服和流动, 实际上, 网格将随其所用材料变形和移动. 本计算方案被称为 " Lagrangian " (拉格朗日算法) 并完全适宜于模拟大变形. 解答的显式特性, 指的是任何模型的非线性应力 - 应变规律都能服从; 而不招致显著的过大 (overload) (用线性规律相加)

诸如与因岩或土相互作用的隧道衬砌, 岩石锚杆或板桩等结构, 也可以模拟. 因此, 就考察支护坑道的稳定性, 或考察岩土的不稳定性对地面结构的影响.

1.1 FLAC 的技术要求及装机 (FLAC Specification and Installation)

FLAC 2.00 应具有以下设备:

IBM - PC 或兼容 CPU ;

640Kb RAM(Random Access Memory 随机存储器);

一个 360Kb 或 2Mb 软盘;

一个 10M 或更大的硬盘;

IBM 或兼容彩色图像转换器或增强图像转换器;

8007 或 8029 数字处理器;

DOS3.1 或更高版本;

(可选的) Hewlett-Packard 或兼容的 2 或 6 草绘图机及只读器的点阵打印机.

对于上述技术要求, 能模拟约 2000 个域或单元.

FLAC 靠一个 360K 的软盘转递, 而必须储存于计算机的硬盘上. 提供给你的 FLAC 点上的 ARC 程序, 用于重新组装你的硬盘上的可执行文件. 从软盘将所有文件拷贝到你的磁盘上. 然后发出下列命令:

```
C> ARC x flac.arc flac.exe
```

这时, 计算机将从 Flac.arc 文件中建立一个: 非浓缩的 (de-compressed) " Flac.exe 文件.

包含在软盘中的几个例子的文件为： Flac.CGA; Flac.EGA; 几个数据文件。文件 Flac.CGA 及 Flac.EGA 具有一些 Flac 命令，这些命令将你的系统置于 CGA 及 EGA 图形模式。

如后所述，启动时 Flac 将在已写入的 Flac 目录中，寻找称之 Flac.INI 文件。这个文件包含一系列命令，这些命令设置多次利用本代码正常运行该系统或程序的属性。例如，具有 EGA 系统的用户，将需要在 Flac 上建立命令 SET.EGA 以设置 EGA 卡的属性。Flac.CGA 及 Flac.EGA 文件具有一些 Flac.CGA 更名为 Flac.INI

```
C>REName flac.cga flac.ini(设置显示模式)
```

如果你具有 EGA 系统，把 Flac.CGA 更名为 flac.INI

```
C>Rename flac.EGA flac.INI
```

你可以附加任何命令于你想利用任何文本编译器的那些文件。

FLAC 能把线图传给 Hewlett-packard (或兼容的) 式绘图机或带图形 ROM 的点阵打印机。Flac 式绘图机的命令传给用户选择上。多次式绘图机与串联接口 COM 连接。因此，式绘图机的输在存入 Flac 之前指向 COM。串联接口也必须初始化，以便，缺省值为以 (band) 把线图传给 COM1。

如果你的绘图机与 COM2 连接，或者如果你想改变波特 (baud) 速率，直接利用 Flac 命令。set output=Com 2 及 set baud=b 式中 b=1200,2400,4800 或 9600，用以改变确省设置。设置这些值的最简便的方法就是在文件 Flac.in.set output 及 set baud 命令。须记住，绘图机的波特速率，必须与串联接口初始化值一至检查你的绘图机及所有关这些设置的说明。FLAC 采用美国的纸张时，应购置相应的绘图机。利用命令

```
Set . output =Lpt 1
```

也能将输出传给平行接口。作为代替式绘图机图形，变换图形可以传给点阵式绘图机打印机，必自装入 DOS 图形程序在装入 FLAC 前，键入

```
C>graphics
```

当使用 FLAC 时，你可以通过同时按下 shift 与 print screen 键的方式，利用点阵式打印机打出屏幕图高分辨率点阵或 EGA 屏幕打印可以利用市场上供应的程序包。

1.2 绘图机故障分

1.在使用式绘图机中遇到的最常见错误,是不能配置匹配于串联接口与草式绘图机的波特速率,确保草式绘图机上的关键词是正确地调整到的波特速率。

2.应确保绘图机是联接于文件 `plotter.BAT` 中所指定的未有串联接口上;

3.如果在草式绘图机的开关上选择了非美国纸张尺寸,刻写在线图上的文字可能变形.应确保选美国纸张尺寸。

2.0 立即满意—应用 FLAC 的一个简单指导性示例

本节是入并开始试验 FLAC 的用户提供的.选择了一个简单,快速运行的示例题目.它 FLAC 代码的状况。

2.1 建造在非粘性土中的壕沟

一个既能交互式考察,又能说明 FLAC 代码某些机能的简单问题,是在否非粘性土介质中开挖的一个壕沟。

键入 `C>flac`

后,执行 `flac`.计算机将装入程序,并在原有标题下立即显示 `flac>`

为建立最初的有限差分网格,运用 `GRID` 命令:

```
flac > grid 5,5
```

该命令将创建一个宽 5 个域(或单元),高 5 个域(或单元)的网格,现在,应各个域的材料模量及特性,对于本例题,我们采用摩尔-库仑弹塑性模型.键入命令:

```
flac>model mohr
```

```
flac>prop bulk=1e8 Shear=.3e8 fric=35
```

```
flac>prop dens=1000 coh=1e10
```

这里,我们规定 Mohr-conlomb 模型(如同后面将看到的,不需要键入各命令的全部字母,计算机是能够网格中的每个域可以想像地会具有不同的材料模型和特性.然而,在 `Model` 命令后,没有规定域的 `flac` 认为所有域均为 Mohr-Coulomb.接着给出特性值-包括体积模量 `bulk Modulus`(单位 `pa`,仅写 `b=`或直接写 `b`,后限要求的值,是完全一样的;为了明白起见,这里给出了全名),剪切模量 `shear modulus`;内摩擦角及粘聚力 `cohesion`.你会看出,给出了一个很高的粘聚力值.这又是在体内形成重力应力过程中,采用的初始值.实际上,在

最初形成重力应力，我们加载于具有弹性物体。这能避免在模型最初状态期间的任何塑性屈服。只要你懂得明确模拟过程经验，理由会变得很显然。既然已确定了网格及模型特性，便能绘或打印出与模拟有关的数据。发布下列命令：

```
flac>plot x y
```

x,y 坐标将在网点实际位置以表格形式出现。你会注意到，该表有 i 行，j 列（沿表的左上边从 1 到 6）。每个网点及域与 i 行，j 列的一个对应。在本例中，网点的范围为 $i=1\sim6, j=1\sim6$ ，而域的范围有 $I=1\sim5, j=1\sim5$ 。如果你要更进一步了解，参阅第 4 章的图 4-1。为了看清网格图形，发下列命令：

```
flac>plot grid
```

依据你的 Flac.INI 文件而定，你将在屏幕上以低分辨率或 EGA 模式看到一幅网格图线。看完后，按回车键即可返回 flac 状态。注意，如果你不规定网格具有坐标（利用 GEN 或 INITIAL 命令），那么 x,y 的规定为坐于网点数减 1。例如，在上述网格图中，左下角网点取为层点，并给出坐标 (0,0)，右下角（网点 (6,1)）的坐标为 (5m,0)。用户可以完全地用 GEN 及 INITIAL 命令去规定任意点的坐标。为使本例题简单，我们分网格为 $5m \times 5m$ 。

接着，便设定问题的边界条件。在本例中，我们要在底部即两侧边布置轴边界，重力作用于各域并允许它们处于自然状态，产生现场应力。为了使用这些边界（即，在规定的右边无位移或速度），利用下列命令：

```
flac>fix y j=1
```

```
flac >fix x I=1
```

```
flac>fix x I=6
```

上述命令具有以下功能：

1.y 方向被固定。当 flac 见到 $j=1$ 时，便自动取 I 的范围 $1\sim6$ （即，全范围）。你规定 $j=1, I=1,6$ 能完成同样功能。

2.左边网点（ $I=1$ ）及右边网点（ $I=6$ ）沿 x 方向均被固定。FLAC 再次取 j 方向的全范围。然后，键入：

```
flac>set grav=9.81
```

我们设定重力（gravity）式中 $9.81m/sec^2$ 为重力加速度。重力向下为正，向上为负（如果重力认为负的，则物体将会浮起）

如果你想看到模型的某一点的位移，以便观察随时变化的平衡或塌陷，应键

入：

```
flac>his hstep=5
```

```
flac>his ydis I=2 j=6
```

这里，我们对表的第一点选取 5 个时间步长的 y 向位移跟踪监视。

这时，我们准备好了使初始模型处于平衡。因为 flac 是一个显式动力代码，我们通过时间跨入模型（允许网格动能逐渐降低的时间（因此，提供了我们寻找的静力解）），允许在物体内部形成重力，我们时间跨入模型以-----。这里，用 SLOVE 命令自动检验平衡

```
flac>Solve
```

flac 花一定时间（几分钟）去“判断”。在每个时间生长处，步长数及最大不平衡力将显示在屏幕上，当完成时，Flac 将返回一个信息，以示已达到极限。立即再显示 flac。

现在，我们能看见在模型内已发生什么。早先要求的 y 向位移史：

```
flac>plot his 1
```

一个屏幕图形将以单色图或 EGA 表现运输。它表示模型约在 108 个时间步长达到平衡。

我们来考察在物体内部形成的重力应力。窗口是自动定义的，如果你想放大或缩小图形，你可以在重新设定窗口时通过键入：

```
flac>title
```

```
title>a simple trench excavation example:the initial gravity stresses
```

给图形一个标题

（如果你用单色模式，脱离彩色键盘），应键入

```
flac>Set pal=0
```

（以便设置调色板选择器），然后，键入

```
flac>plot Syy yei bou gre
```

你将看见一个边界为绿色（单色屏幕全为绿色），只有黄灰（yellow-brown）

色的 σ_{yy} 应力图（图 2 - 1）。同样，绘 σ_{yy} 应力图应键入：

```
flac>plot Sxx yel bou gre
```

你将注意到，重力应力随深度线性增加。这些是能发现的，须键入：

```
flac>print Sxx Syy
```

将这个初始状态储存起来是明智的,以便在任何时间可以重新启动来完成参数研究.为了存入这个,键入:

```
flac>Save trench.sav
```

在默认驱动上将建立一个存入文件.然后返回一个 flac 提示.现在我们可以 在土中开挖一个壕沟.键入:

```
flac>prop coh=0
```

由各无粘聚力且带无支护的坚壁,一定会崩塌.因为我们要确切地考察这个过程,在代码中必须设置大应变.为此,键入:

```
flac>Set large
```

最后,为了绘图,我们只想观察从壕沟开挖起的位移变化,而不是上述的重力调整量.因此,我们可以把 x,y 的位移调为零:

```
flac>INIT Xdis=0 Ydis=0
```

为了开挖壕沟,键入:

```
flac>model null I=3 j=3,5
```

因为我们故意取粘聚力低得足以发生崩塌.我们不想用是有一个不平衡力极限的 Solve 命令(不平衡力变平衡).因为我们的模拟决不会收敛于平衡状态.而我们能一个时间步长一次跨过模拟过程,关闭和打印出发生崩塌时的结果.这是显示方法的真正本领 - 不要求模型在每一个计算后收敛于平衡,因为我们从未解过线性代数方程组,这正如大多数工程师们所熟悉的显示代码一样.我们利用 step 命令:

```
flac>Step 100
```

3.0 基础知识 - 显式有限差分法

3.1 引论

Flac 是一个一般地质力学数值模型,它利用显式有限差分法去解答运动基本方程.一般讲,差分法涉及到被模拟的物体被划分为若干在网点(节点)处相互连接的若干个二维域(单元).在每个断点处,把被未解的运动方程的格式取为时间步长方式.因此,有可能体系的性能看作是随时间逐渐改变的。

某些著者 (Wilkins 是其中之一, 1963) 已经证明, 由有限差分法和有限单元法导得的方程式, 对于个别问题而言是一致的。使用中, 有限差分法如同有限单元法一样, 适应性很强, 可运用不规则网格, 变化材料类型或特性, 也可规定不同的边界条件。有限差分法详细用于地质力学问题为 Cundall(1976)所讨论。

见第四章 Solve 命令的设置范围。

标题及图例 (Legend) 出现在硬拷贝草图上, 但不出现在屏幕上。

这不会影响计算, 因为在计算工序中模型不要求这些位移。保持它们又是为了方便用户。

更多的细节, 见第四章的 Solve 命令。

Solve 命令也能用于时间步长数量的范围。

3.2 显示 / 计算循环

一般讲, 在解答一个特定问题的运动方程时, 有两种采用数值码的方法。(求解静力问题所应用的数值方法) 隐式法同时求解各网格的未知量值。换言之, 要建立一个把未知量与已知量联系起来的方程组, 比如, 在有限元法某模型中, 通过整体刚度矩阵, 建立节点力与节点位移间的关系。必须储存并求解这个方程组, 从而造成大的计算机内存设备。

显式法利用的概念是: 对于一个很小时间步长, 某一已知网点处的干扰只能靠它的直接领域来承受。比如, 设想在时间 $t=0$ 时, 某个网点的温度升高到了某个值。在一个短时间内, 只有各邻近网点到温度已升高了, 随时间推进, 这个联响将遍布网格, 从而在周围各网点处导致较高的温度。

必须合理的选取时间步长, 以避免解的数字不稳定性 - 即时间步长必须小于两相邻网点间传递现象的时间。在 flac 的力学版本中, 用物体内的声速来控制这个时间步长; 在代码的超力版本中由热扩散率及对流换算系数来检测时间步长。Flac 自动确定保证数字稳定的时间步长。

目前, Flac 是通过适当地衰减动力解的办法来求解静力问题。这时“时间步长”不是指的实际时间步长, 而是问题的时间步长, 其中速度以每一时间步长的长度来度量的。这个解法对于在个人计算机模拟地质材料具有很多优点。

因为从不形成矩阵，代码的内存设备是最小的，而且每个时间步长的计算浪费也是很小的。对于地质材料来说，显式方法的一个很重要方面是能轻而易举地处理非线性本构规律。对于服从非线性应力 - 应变规律的材料，不要求（可能引起解的明显误差的）迭代法；相应于也给应变改变的应力变化，如同实际发生的一样，可以在已知域处实施。用这种方法时，用适当的物理方式服从非线性规律，而不依赖于迭代法的路径灵敏度。此外，由于不形成矩阵，可以附加少量的计算耗费便能处理诸如大位移这类现象。然而，也有消极的一面，一般来说，显式码比其隐式的静力、弹性问题运行要慢些。

模拟地质材料的含义是什么呢？对于土壤和岩石，这类材料常常遭受破裂或屈服（即，非弹性），且可能出现大位移。因此，一个物体在一个孤立区可能经受崩塌（如，土的滑移），而部分仍稳定的。对于这类问题，在各网点耦合的隐式中，在矩阵求答的过程中，会成为数字上不稳定的。然而，是代码不遭受时间或稳定性的损失。更微妙的优点是，用户能考察屈服或崩塌的形成过程，而不仅能观察最终的平衡状态。

Flac 采用的显式计算循环说明于图 3-1，对于每个时间步长，对网格的每个网点求解运动方程式。对于一个非平衡状态，出现在每个网点处的力不是平衡的。根据不平衡力分量及集中于网点处的域质量，这格产生网点加速度。积分这些加速度，便得到网点速度，随后，利用这些速度来求应变变化。

把这些应变用于本构规律，以求该域的相应应力增量。一旦求运动增量后，把它们在周围各网点上引起的力加起来，便求得合成的不平衡力。

对每个时间步长，重复这个计算循环。用户可以考察该过程任一阶段时，问题的当前状态。

如上所述，在 Flac 内部，上衰减体系的动力响应，便提供一个静力解答。用于该码的衰减方法后面将予以讨论。当随着增加时间步长问题趋于静平衡时，衰减使不平衡力蜕变为零。平衡时，需要的时间步长数目与很多因素有关，其中包括用户所希望的解的精度，材料的屈服程度，以及问题的大小。

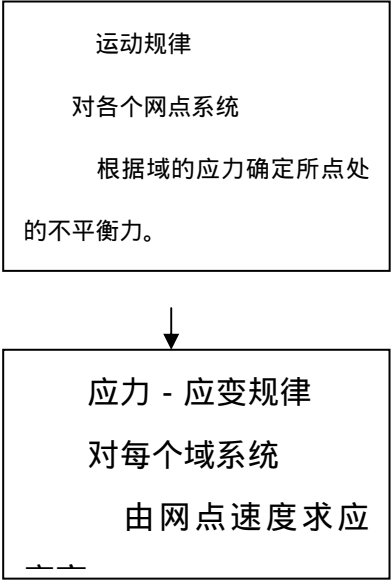


图 3-1 码运行概述

3.3 有限差分格式 (Finite Difference Scheme)

3.3.1 导数的表示 - Wilkins (1963) 根据偏导数的积分定义, 提出了一个差分格式:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \lim_{A \rightarrow 0} \left[\frac{1}{A} \int_s F n_i ds \right] \quad (3-1)$$

F - 某一纯量、矢量或张量;
 式中 x_i - 位置矢量分量;
 A - 积分域;
 ds - 弧长增量;
 n_i - 垂直于 ds 的单位法线分量。

(3-1)式的面积分是连续的, 但沿一个有限多边形进行积分时, 可以写为一个等效的 (虽然近似的) 表达式:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \frac{1}{A} \sum_{n=1}^N \bar{F}^n \varepsilon_{ik} \Delta x_k^n \quad (3-2)$$

式中 N - 边数;
 \bar{F}^n - 边 n 上的 F 平均值;
 Δx_k^n - 边 n 的矢量长度的分量;

ε_{ik} - 二维置换张量 (permutation tensor)

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

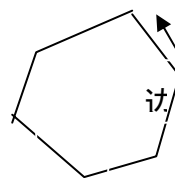


图 3-3 数值积分时边界的

用(3-2)式来推导 Flac 中的所有空间差分方程式。应注意，这种表示没有限制外形及边数，不同于以矩形网格为依据的许多有限差分表示法。

3.3.2 运动方程式——用熟悉的表达式给出的运动方程式为：

$$\rho \left[\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} \right] = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3-3)$$

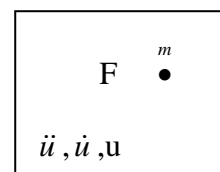
式中 ρ — 密度；

\dot{u} — 速度；

t — 时间。

σ_{ij} — 应力张量；

g — 体力分量；



可以简单例子，试考察受随时变化作用的某质量的运动方程式(图 3-4)：

图 3-4 受随时间变化的质量

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = \frac{F}{m} \quad (\text{即 } F = ma) \quad (3-4)$$

可以用包含半时间步长的速度的中心差分格式 表求解(3-4)式，((3-4)式左边的))加速度可以写为

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = \frac{\dot{u}(t + \Delta t/2) - \dot{u}(t - \Delta t/2)}{\Delta t} \quad (3-5)$$

代入(3-4)式后，得

$$\dot{u}(t + \Delta t/2) = \dot{u}(t - \Delta t/2) + \left[\frac{F(t)}{m} \right] \Delta t \quad (3-6)$$

这是半个时间步长时的网点速度。现在，可以用一个附加积分由速度求得位

移为： $u^{(t+\Delta t)} = u^{(t)} + \dot{u}^{(t+\Delta t/2)} \bullet \Delta t$ (3-7)

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \dot{u}(t + \Delta t/2) \Delta t$$

构成图 3-5 示说明的计算顺序后，使可以求同一时间增量改间的力。

3.4 速度 / 应变增量方程式(Velocity / Strain Zncrement Equations)

Flac 由每个网点处的速度，确定每个时间步长时的一个初应变增量。把这个应变增量用于所选的本构规律，该确定相应的应力增量。在增量形式中，应变张量为：

$$(3-8) \quad \Delta \ell_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right] \Delta t$$

式中 $\Delta \ell_{ij}$ — 应变增量张量， $i, j = 1, 2$ ；

\dot{u}_i — i 向速度分量， $i, j = 1, 2$ ；

x_i — i 向坐标分量， $i, j = 1, 2$ ；

Δt — 时间步长。

应用运动方程（式（3-3））后，在一个典型四边形单元的每个角隅的网点处有一组 x, y 向速度。Flac 把这个四边形再划分为两对重迭的常应变三角形域。命令为 a, b, c, d ，（图 3-6）。

回想（式（3-8））当计算应变增量张量时，需要速度梯度。根据式（3-2），可以用他们的差分来代替偏导数：

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial x_j} = \frac{1}{A} \sum_{\text{边域}} \dot{u}_i \varepsilon_{ik} \Delta x_k \quad (3-9)$$

这个求和是沿域的边缘取的，但只知道角隅处的速度。如果沿每个边缘取平均速度分量，当沿边缘的速度为线形变化时，该求和内的项是与由精确积分式（3-1）求得的相同。Flac 先三角形 a 及 b 求速度梯度，然后对 c 及 d 求速度梯度。对于三角形 a ，式（3-9）的展开式为：

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial x_j} = \frac{1}{2A} \left[\left(\dot{u}_i^{(1)} + \dot{u}_i^{(2)} \right) \varepsilon_{jk} \Delta x_k^{(N)} + \left(\dot{u}_i^{(2)} - \dot{u}_i^{(3)} \right) \varepsilon_{jk} \Delta x_k^{(W)} + \left(\dot{u}_i^{(1)} + \dot{u}_i^{(3)} \right) \varepsilon_{jk} \Delta x_k^{(SE)} \right]$$

为此说明导数的一个分量的上述展开式，该考察应变率：

$$\frac{\partial \dot{u}_1}{\partial x_1} = \frac{1}{2A} \left[(\dot{u}_1^{(1)} + \dot{u}_1^{(2)}) (x_2^{(2)} - x_2^{(1)}) + (\dot{u}_1^{(2)} + \dot{u}_1^{(3)}) (x_2^{(3)} - x_2^{(2)}) + (\dot{u}_1^{(1)} + \dot{u}_1^{(3)}) (x_2^{(1)} - x_2^{(3)}) \right]$$

(3-11)

展开并消项后，有

$$\frac{\partial \dot{u}_1}{\partial x_1} = \frac{1}{2A} \left[\dot{u}_1^{(1)} (x_2^{(2)} - x_2^{(3)}) + \dot{u}_1^{(2)} (x_2^{(3)} - x_2^{(1)}) + \dot{u}_1^{(3)} (x_2^{(1)} - x_2^{(2)}) \right]$$

(3-12)

用同样的方法求所有的其于速度梯度分量，并用于求这些应变增量张量的三个位移。

这里消除了有时在应用有限差分时经历的“水漏”变形状态问题，因为在计算中看到了三角形域，而不是四边形域。

为了防止塑流过程中“锁住”，在三角形 a , b 间及 c , d 间采用了函数格式。在网点处取两组三角形的平均力。

3.5 应力-应变规律

一旦确定了每个三角形内的应变张量，必须根据该域所选用的本构规律计算相应的应力。在正式考察本构规律之前，需要对原有的应力作两个修正。第一，如果采用大应变逻辑，须就网点位移引起的转动应力作修正。这将在 3.6 节中讨论。第二，如果须有效应力，必须从直接应力中扣除孔隙压力。应变与应力间的本构关系给成增量形式：

$$\Delta \sigma_{ij} = f(\Delta \epsilon_{ij}, \sigma_{ij}, \dots) \quad (3-12)$$

式中 $\Delta \sigma_{ij}$ - 应力增量张量 $i, j = 1, 2$ ；

$f()$ - 包含有增量应变，现存总应力状态，材料常数等的本构方程。

本构规律及应变计算应力分量的细节给在附录 A 中。

最后，由加权平均三角形应力分量的方法来确定四边形的平均应力分量。

Flac 允许打印或者三角形或均应力分量。

3.6 确定网点处的不平衡力

一旦四边形域内的应力张量已经求得,便可以用它来计算各网点处的不平衡力。重写运动方程式:

$$p \left[\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial \tau} \right] = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + p g_i \quad (3-13)$$

注意,它的右边可以用式(3-2)代替,并通除以 p 。其结果为

$$p \left[\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial \tau} \right] = \frac{1}{A} \sum \sigma_{ij} \varepsilon_{jk} \Delta x_k + p g_i \quad (3-14)$$

或

$$\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial \tau} = \frac{F_i}{m} + g_i$$

$$\text{式中} \quad F_i = \sum \sigma_{ij} \varepsilon_{jk} \Delta x_k \quad m = pA$$

取产生的各网点处的所有矢量,因此,上式中的质量 m 取为由周围各域凝聚成的质量(图 3-7)。式(3-14)的求和项取为出现在该图说明的闭和回路。

如果取闭合回路为图示路径,并假设凝聚质量等于由路径所包围的质量,那么(1)由绕各网点的全部这样的路径是精确地覆盖了整个网格区;(2)凝聚质量满足一定的条件,即重心。

虽然,域内的回路路径对质量凝聚是重要的,但它对式(3-14)中的求和项是不重要的。因为,域上的域应力为常项,只要终点不变(在网格线中心),对于任何路径,求和给出相同的结果。因此,如图 3-7 所说明,网点力变为:

$$F_i = \sigma_{ij}^a \varepsilon_{jk} (x_k^{(1)} - x_k^{(4)}) + \sigma_{ij}^b \varepsilon_{jk} (x_k^{(2)} - x_k^{(1)}) + \sigma_{ij}^c \varepsilon_{jk} (x_k^{(3)} - x_k^{(2)}) + \sigma_{ij}^d \varepsilon_{jk} (x_k^{(4)} - x_k^{(3)}) \quad (3-15)$$

这个力在所有应力和坐标,在时刻 $t, t + \Delta t$ 等时都是已知的。在下一个半时间步长时的网点速度为:

$$\dot{u}_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) = \dot{u}_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \frac{F_i^t}{m} \Delta t + g_i \quad (3-16)$$

应该指出,如果域中的任何一个搞错了(如,在边界处或如果这个域是空域),相应这个搞错了域的项由式(3-15)中直接省略掉。

如果选择 FLAC 的大应变模型,把修正的网格坐标用于式(3-16)的新速度:

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t \quad (3-17)$$

显然,FLAC 不使用位移,但为了方便用户,也用同样的方式对位移矢量进行修正。

3.7 应力转动修正项

当利用代码中的大应变逻辑时,由于物体的转动,必须修正应力。应力的正规转动方程式为:

$$(3-18) \quad \bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{\alpha\beta} J_{i\alpha} J_{j\beta}$$

式中

$$J_{ij} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{二维})$$

$\bar{\sigma}_{ij}$ —大应变转动时修正了的应力张量。

对于很小的角度 $\Delta\theta$, 因为 $\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx \Delta\theta$, 则

$$J_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\theta \\ -\Delta\theta & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{二维})$$

$$\begin{aligned} \text{因此, } \bar{\sigma}_{11} &= \sigma_{11} J_{11} J_{11} + \sigma_{21} J_{12} J_{11} + \sigma_{12} J_{11} J_{12} + \sigma_{22} J_{12} J_{12} \\ &= \sigma_{11} + \sigma_{21} \Delta\theta + \sigma_{12} \Delta\theta + \sigma_{22} \Delta\theta^2 \end{aligned} \quad (3-19)$$

$$\Delta\sigma_{11} = 2\sigma_{12} \Delta\theta (\text{因为 } \sigma_{21} = \sigma_{12}, \Delta\theta \text{ 很小时, } \Delta\theta^2 = 0)$$

这就是参数于与旧轴成 $\Delta\theta$ 角的新轴的应力变化—但我们需要的是参数于旧

轴(原始轴)的新应力。因此, σ_{11} 的修正项为

$$\Delta\sigma_{11} = -2\sigma_{12}\Delta\theta \quad (3-20)$$

同理，有

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{22} &= \sigma_{11}J_{21}J_{21} + \sigma_{21}J_{22}J_{21} + \sigma_{12}J_{21}J_{22} + \sigma_{22}J_{22}J_{22} \\ &= \sigma_{11}\Delta\theta^2 - \sigma_{21}\Delta\theta - \sigma_{12}\Delta\theta + \sigma_{22}^2 \\ &= \sigma_{22} - 2\sigma_{12}\Delta\theta + \sigma_{11}\Delta\theta^2 \end{aligned} \quad (3-21)$$

反号并略去 $\Delta\theta^2$ 项后，有

$$\Delta\sigma_{22} = -2\sigma_{12}\Delta\theta \quad (3-22)$$

还有

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{12} &= \sigma_{11}J_{11}J_{21} + \sigma_{21}J_{12}J_{21} + \sigma_{12}J_{11}J_{22} + \sigma_{22}J_{12}J_{22} \\ &= -\sigma_{11}\Delta\theta - \sigma_{21}\Delta\theta^2 + \sigma_{12} + \sigma_{22}\Delta\theta \end{aligned} \quad (3-23)$$

$$\Delta\sigma_{12} = (\sigma_{11} - \sigma_{22})\Delta\theta \quad (3-24)$$

当采用大应变逻辑时，把这些修正项加到各应力中。

参考文献

4.0 输入指令(Input Instructions)

4.1 定义(Definitions)

在详细讨论输入命令之前,在这里先重温几个定义。关于术语及问题构成的细节见第 5.0 节。

Zone (域) —有限差分网格的一个单元—类似一个有限单元。

Gridpoint (网点) —有限差分域的角隅节点,由四边形的四角网点确定该四边形域。相邻域在其网点相连接。

Grid (网格) —有限差分域的集合—类似于有限单元网。

在正常运行中,有限差分网格的原点取在网格的左下处。 $i(x)$ 及 $j(y)$ 轴从这个点开始(图 4-1)。因此,每个域及网点具有 $i(x)$ 及 $j(y)$ 的编号和它们相联系。

因为 FLAC 是一个显式码,以逐次时间步长来求解运动基本方程式。代码是动态的,它的意思是每个网点具有一个必须衰减以便给出静力解的逐变分量。当代码变到平衡时,这个衰减在 FLAC 中自动进行。当这些速度达到某些足够小的值时,便得到平衡解。用以确定平衡的手段将在附录 B 中讨论。

4.2 输入命令(Input Commands)

输入 Flac 命令不同于常见的数值模拟计算机程序,为了操作简单和易于使用,规定了专门的命令。FLAC 的操作可以是“交互”式的(即通过键盘发命令),或“文件驱动(file-driven)”式的(即数据存在一个数据文件里,并以软或硬盘的形式读取)。不论那种方式,运行的命令是相同的,由用户的爱好选用。

输入命令是按调序排列的,视其重要,它们包括了一个基本命令字,后跟一些总键及数值输入。下面给出的各命令是通字地键入在输入行上的。应注意,只有前几个字母是大写的。程序只要求键入这些大写字母,以便命令“识别”。许多关键词后跟了一系列关键词要求输入的数值。以小写字母开头的词代表。以 I,j,m 或 n 起头的词为整型,分别为实型词(10 进制小数)。实数的小数点可以省略,但在任何整数中不能出现小数点。这些值可以用任何个空格或下列定界符中的任一个隔开:(), / =

你将看到,带其输入参考的附加符号。它们是:

—表示必选参数(括号不键入);

... —表示可以给出任意个这样的参数。

在输入中，“*”或“;”后面的内容为注释内容，不予考虑。如果以分批（即文件驱动）方式运行时，在输入文件中使用这种注释是有用的，因为可以把这些注释掉的内容可显示输出中。

在 FLAC 中使用以下符号约束，在进入输入时必须记住。

正的值：向下及向右运动时；拉应力及压力时；伸长应变时；剪应变时如右图示

由力矢方向确定力边界条件的正负号（即当指向正坐标轴方向时为正）。虽然我们推荐使用国际（SI）单位，它可以使用任何性能协调的工程单位。在表 4-1 中，给出了各种单位体系的述评。在程序中，又有摩擦角及膨胀角设作约定，它们按度（°）键入。

表示 4-1 单位系统

长 度	m	m	m	cm	ft	in
密 度	Kg/m3	103kg/m3	106kg/m3	106kg/m3	Slugs/ft3	Snails/in3
力	N	KN	MN	Mdynes	Lbf	Lbf
应 力	Pa	Kpa	Mpa	Bar	Lba/ft2	psi
重 力	m/sec2	m/sec2	m/sec2	cm/sec2	Ft/ sec2	In/ sec2

以下各例具体说明各输入命令的使用。为了固定 I=1~10 及 j=1~10 范围内各网点沿 x 向的位移（或速度），下列各命令会产生相同的结果：

fix x I=1,10 j=1,1

或 fix x j=1 I=1,10

或 fix x I=1,10 j=1

如果 I 或 j 之一的范围被略去，这时则取网格的整个范围。

另一个例子，说明利用输入行中的任选参数。为了建立一幅最大长度尺度为 0.001 的位移矢量图，给下列命令：

```
plot disp/max=0.001
```

当程序“认识”“displacement”这个字时，便寻找补充说明或“开关”字。这时，字“max”设置画图的最大位移矢量值。此外，应注意，在一些情形中，在同一输入行中可以给出许多关键词。例如：

```
plot disp/max=0.001 Sxx/int=10E6/red
```

将产生一幅如上所述的位移矢量图，并用红色去附加的应力等值线，其间格为 10。应注意，上例中的/和=是为了方便用户严格地用作分界符，如愿意的话，可以删去它们。

输入命令一览表

```
Apply      keyword=value <keyword=value...>  
           <range>
```

以下的 keywords 可以利用：

Pressure—压力

XForce—x 向力

YForce—y 向力

可以把压力作用在各网点行或列的各处，它们或者沿一个边界作用，或者作出在物体内部。当压力作用在 i 或 j 的转递增序列时，左起的压力为正。

Xforce 及 Yforce 可以作用于任意列或行处。网点的任选范围是与力作用处的网点的。形式为 $i = i_1, i_2, j = j_1, j_2$ 的范围必须维持在输入行上，但不管 i 或 j 的先后次序。

```
Call      filename
```

遥控输入一个带文件名的文件可以用 Call 命令来执行。任何一个组输入指令可以代替该文件以便以遥控或批处理方式运行。命令 ReTurn 必须为遥控文件中的最末命令，以便把输入回到局部或交互方式。目前，不能 Call 命令本身作

为此文件。

CUtoff

对于指定为 Mohr-Coulomb 的所有域,设置 Mohr-Coulomb 塑性及多处同时存在的拉力截止的节理模型(Ubiquitous joint models to sion cut-off)

Fix x <Mark> <range>

Y

X Y

用这个命令,防止由<range>定义域内的网点改变 X 或 Y 向的速度。<range>具有形式 $i = i_1, i_2, j = j_1, j_2$, 不管 i 或 j 的先后次序。如果想固定位移,其相应的后初始化为零(这是启动时的默认值)。可以把 Fix 与 INI XV,YV 命令一起使用,以便提供一个刚性移动边界条件。注意,如果关键词 MARK 已给,只有在<range>内标注的网点被固定。

FRee x <Mark> <range>

Y

X Y

它与 FIX 命令相反。它释放网点约束。

GEN x1,y1 x2,y2 x3,y3 x4,y4 <Ratio_ri_rj> <range> <same> <same>

对于整个网格或子域来说,可以生成各坐标。如果给出上述 GEN 命令形式,把(由行、列范围确定的)四边形域再划分区域。范围中的最小行、列号的网点位于坐标(x1,y1)处;其余范围的角点,按顺时针向进程的方式,其坐标(x2,y2),(x3,y3),(x4,y4)。可以用字 SAME 代替任何一对或对坐标。这时,特殊网点将维持其现行坐标。除非给出了任选关键词 RATIO,在四边形域内部,将均匀地配置四边形域内的其余网点。这时,按照参数 ri 或 rj,可以域的间距增大或减少,其中 ri 或 rj 分别右 i 或 j 方向相继域尺寸间(between successive zone sizes)的几何比值。例如比例 1.1 将产生比原有域大 1.1 倍的相继域(succesive zone)。

GEN Circle xc yc rad

Arc xc yc xb yb theta

Line x1,y1 x2,y2

GEN 命令形式迫使网格的规定区域符合已知外形,如圆、直线等。这些 GEN

命令用于定义网格内部的内面形状,这些形状可用来定义开挖或结构物,诸如层状沉降物或物体 (bedded deposits or are bodies)。 以下形状都是有效的。

ARC—绘制出符合一个圆弧的网格,圆弧的中心为 (X_c, Y_c) 边界起点为 (X_b, Y_b), 并反时针转 θ 。

CIRCLE—绘制出半径为 rad 而中心为 (X_c, Y_c) 的圆形网格。

LINE—绘制出端坐标为 (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) 的直线网格。

注意,构成所给外形部分的各网点都是“有记忆的”(见 MARK 及 UNMARK 命令)。于是,可以通过带 INITIAL, MODKL 及 PROPERTY 命令的关键词 REGION 来寻找自带有记号网点所包围的整个区域的地址。例如,可以用命令 `mod null reg=i,j` 来取消一个圆内部的区域。其中 i, j 在圆内的一个域。运用 GEN 的例子给在第 5.2.1 节。

应小心地运用 GEN 命令。某些几何图形用四边形单元是不可能构成的——例如,由两根相交的线定义的细长三角形区域。此外,用户应知道,一旦网格 MARKED (有记号),就不能再用另外的 GEN 命令来移动它们。如果想移动已 MARKED (有记号)的网点,应先取消 (UMARKED) 该点的记号。

GEN ADJust

网格本身调整,试图获得一个较光滑 (smoother) 的离散。那些有记号 (MARKED) 的网点及边界是都不移动的。逐次 ADJUST 命令可以给出更绘制的网格。其例子可以在第 5.2.1 节中找到。

Grid icol_jrow

规定了计算网格各域的行列数目,对 flac 的 640K 版本,约可采用 Mohr-coulomb 模型的 2000 个域。

His <Nstep=h> <keyword... i=i1 j=j1>

对于网点或域 $i1, j1$, 每 NSTEP 时间步长储存其变量 Keyword 历史。在任何时刻有达 25 个历史,每个历史可储备达 1000 个。每个历史有顺序地从 1 起编号。用户记着各历史的次序,因为在绘图或打印时,必须要求提供一个指定的历史编号。对于所有的历史 NSTEP 必须是相同的,且仅需要在跨入时间步长之前只一次给出;如果没有给出,其默认为 10。

历史值是储存硬盘上的直接读取文件中。当终止 Flac 时 (Stop), 这个文件被抹去。因此, 如果用户想储存 (Save) 这个文件, 必须建立一个储存文件或把这个历史写入一个格式化了的软盘文件 (disk file) (见 HIS WRITE N 命令)。可以跟踪网点或域 i, j 的历史的 keywords 为:

Ang—对于 i, j 域, 从正 x 轴反时针向转至最小主应力的角度;

PP— i, j 域的孔隙压力;

SIG1— i, j 域的最大主应力;

SIG2— i, j 域的最小主应力;

SXX— i, j 域 XX 应力;

SYX— i, j 域 XY 应力;

SXY— i, j 域 XY 应力;

X—网点 i, j 的 X 坐标;

Y—网点 i, j 的 Y 坐标;

XDis—网点 i, j 的 X 向位移;

YDis—网点 i, j 的 Y 向位移;

Unbal—最大不平衡力;

Xvel—网点 i, j 的 X 向速度;

Yvel—网点 i, j 的 Y 向速度;

XXA—域 i, j 的三角形 a 的 xx 应力;

XYA—域 i, j 的三角形 a 的 xy 应力;

YYA—域 i, j 的三角形 a 的 yy 应力;

XXB—域 i, j 的三角形 b 的 xx 应力;

XYB—域 i, j 的三角形 b 的 xy 应力;

YYB—域 i, j 的三角形 b 的 yy 应力；

XXC—域 i, j 的三角形 c 的 xx 应力；

XYC—域 i, j 的三角形 c 的 xy 应力；

YYC—域 i, j 的三角形 c 的 yy 应力；

XXD—域 i, j 的三角形 d 的 xx 应力；

XYD—域 i, j 的三角形 d 的 xy 应力；

YYD—域 i, j 的三角形 d 的 yy 应力；

His keyword

以下各 HISTORY 命令形式允许用户绘、写或重新设置历史。写入屏幕或硬盘上的硬盘文件共 nhis 个历史数目 (nhis=1~总历史数)。可以选择以下 keyword。

Dump_nhis—历史数目 nhis 的历史(时间步长 ,历史值)被写入屏幕(Screen)。如果该历史大于页长 (page length), 将滚过屏幕。利用 ctrl_numlock 键来终止滚动。

Write_nhis—把历史数目 nhis 的历史 (时间步长 , 历史值) 写入硬盘上的 Flac.HIS 文件。终止 Flac 后, 可以打印或操作该文件。逐次的各 HIS Write 命令将顺序地相加 Flac.His 文件。不过, 所写的前面文件将冲掉改写现存的 flac.His 文件。

Reset—清除命令。

Initial keyword_value_<...>_<range>

为某些网格变量赋初值。可以从以下一览表中选择一个或一个以上 keyword：

PP—孔隙压力；

X—x 坐标；

Y—y 坐标；

SXX—xx 应力分量；

SYY—yy 应力分量；

SXY—xy 应力分量；

XDisp—x 向位移；

YDisp—y 向位移；

XVel—x 向速度；

YVel—y 向速度；

为了协助执行 INITIAL 命令，提供了几个任选 keyword。它们为：

Mark—仅对标有记号（MARK）的网点初始化网点变量（其它网点保持原样）。

Region i, j —对标有记号（MARK）的网点的连续序列所包围的各个域进行初始化。域 i, j 是有记号（MARK）区域内的一个域。

Var xv,yv—在整个指定的范围（或区域）上，给定参数的变量，这里 xv 为 x 向变量，yv 为 y 向变量。在具有最小 i, j 量的域（或网点）与具有最大 i, j 量的域（或网点）之间，应用这些变量。

用 <range> 作标志时，可以给出各域或各网点的任选范围。形式为 $i = i1, i2, j = j1, j2$ 的范围必须维持在输入行上，但不管 i 或 j 的先后次序。

例如，如果想初始化水平应力随深度的变化率（gradient），可以发布下列命令：

```
flac>ini_sxx=-30e6_(Var=0,_10e6)
```

这里，网点的 xx—应力为-30MPa，而网项为-20MPa，在这些点之间按 y 线性变化。如果规定 i 或 j 的范围，则在整个范围取变量；变量可以为正或负。

可以利用 INITIAL 命令，把网点移到网格的另一位置。在执行这一措施时，务必小心 flac 内在地把各四边形域划分为两组重迭的成对三角形域，以便进行计算（见图 3-6）。可以用任何方式使四边形变形，但应服从下面两个准则：

四边形的面积必须为正的；

至少一对三角形域的每个三角形必须具有大于四边形总面积的 20% 的面积。

如果这些准则之一不满足，在进行时间步长中，flac 将给出错误信息“BAD GENME”以下图例说明可能的域的变形。

在运行前，带用赋零值来初始化位移。这不会影响计算，并在输出时，会给

出位移的变化。如果不初始化它们，则输入的位移为总位移。

注意：通过运行来部分地改变坐标，是没有意义的。用户可以规定任意的初应力，但它们可能是不平衡的——这时，应先使模型平衡。

```
INTerface—n_keyword_<i1,j1>_<i2,j2>  
            n_keyword=value
```

用 INTerface 命令来激活预释放的界面模型 (The pr-release interface model is actirated)。籍助于一个 “ Interface ” 可以使一个 flac 网格的任何部分与任意其它部分相互作用，这 “ interface ” 由每个相互作用节点处的法向及剪切弹簧 (spings) 所组成。实际上，界面相当于一个断层或节理 (fault or joint) ——即，两个表面间的 “ 软衬层 ” (soft cushion)。必须事先说明每个界面，其方法是：规定两组可以相互作用的边界网点，并规界面的刚度，粘聚力及摩擦性质。可用于这个命令的 keyword 为：

```
Aside i1,j1_<i2,j2_i3,j3_...>  
Bside i1,j1 <i2,j2_i3,j3_...>  
Cohesion Value  
Friction Value  
Glued Value  
KN Value  
KS Value  
TBond Value  
Unglued
```

Aside 及 Bside 相应于界面的两个侧面，而毗连的各对 (i, j) 定义了位于相互作用边界上的各网点。必须安排好各对 (i, j) 的顺序，以便代码知道那一边界面包含坚固材料 (Solid material)。采用的约定如下：如果人沿界面 “ 步行 ”，坚固的网格 (Solid grid) 必须在右边。按人步行的方向，从界面上的第一个网点到最后一个网点，对各网点编号。

n 是所给界面的唯一标志，是顺序的。

为了构成一个相互作用边界，应先在界面所在网格的两个区域内，表明一行空域。如果用户想使这两个区域处于初始接触，那么须用 GEN 或 INITIAL 命令，

使网码的这些对立区域移动，以便在跨入时间步长之前，使它们接触。

必须定义每个界面的材料特性（粘聚力、摩擦、法向刚度 KN、剪切刚度 KS 和拉伸强度 TBOND）。粘聚力及拉伸强度的单位按应力表示（即 Pa、Psi 等），摩擦用度（°）量测，而刚度为每单位长度上的应力（pa/m,psi/in）。采用的这一组单位必须与问题的其它单位一致。

这两平界面，在任何时候可以“胶合”（glued）在一起，以便构成一个粘着的界面，不再发生滑移或分离。这种作用的结果是一个标准的 Flac 网格。GLUE 命令的对应命令为 UNGLUE。关于利用 INTERFACE 命令的更详尽细节给在附录 D 中。

MArk <range>

对所有给 range 内的各网点作记号。一个有记号的网点在任何情况下不影响计算，但对于 INITIAL，PROP 及 MODEL 命令来定界一个区域是起作用的。注意，GEN 命令能自动地对各网点作记号。

<range>具有形式 $i=i1,i2$ $y=y1,y2$ 。i 或 y 何者在前面不限。

Model keyword_<REGION= i,j >_<range>

这个命令把一个本构规律和一个相应于由<range>规定的域范围的网格区或 (i,j) 域所在区域联系起来。关于一个 Flac 网格内部定义的区域更详细见 5.2.1 节。在计算循环中，各个域将查阅相应于下列 keyword 之一本构子程序：

ANisotropic—横向各向同性弹性模型；

Elastic—弹性各向同性本构模型；

Mohr-Coulomb—Mohr-Coulomb 塑性模型；

Null—零域（零域被用于模拟开挖了的材料。零域内的应力都自动赋零）；

SS—应变软化；

Ubiquitous—普通存在节理的模型。

<range>具有形式 $i = i1,i2, j = j1, j2, i$ 或 j 何者在前面不限。另外，模型的区域可以定义为 $REGION=i,j$ 。这时，由一个 MARKED 网格的连续序列所包围的所有域将赋于该已给模型。

NEW 这个命令允许不脱离 Flac 的情况下开始一个新问题。

PLot keyword_<switch_<=v>...>_<keyword...>

这个命令要求在屏幕或 Hewlett-Packard 笔式绘图机上作一幅画。注意，除非默认窗口已满意，在先用 WINDOW 命令来定义画面大小。通过在一行上给出几个 keyword 方法立即可以画出几个变量。在打印或绘图之前，必须（利用 MODEL 命令）给网格一个材料模型。各 keyword 及其意义如下：

BEam—绘各结构单元的几何形状；

Boundary—绘网格的边界，包括零区域的内边界；

Cable—绘钢索锚栓（Cable bolt）几何形状；

Disp—绘位移矢量；

E_P—塑性应变（若仅用应变软化材料模型）；

Grid—绘有限差分网格；

His nhis—由记录在历史量 nhis 内的变量组成的一幅时间终历图；

Pen—把图形转向 Hewlett-Packard 7470A 或 7475A 笔式绘图机（默认值为屏幕），如果要笔式绘图，必须作为第一个 keyword 出现；

PP—孔隙压力等值线；

RE—画成矢量的固定网点处的反力；

STate—绘在各单元形心处的材料现行屈服状态；

STress—主应力矢量；

SXX—xx 应力（总应力）等值线；

SYY—yy 应力（总应力）等值线；

SXY—xy 应力等值线；

Velocity—绘速度矢量(as arrows)；

WAtter—绘地下水位线*；

XDisp—x 位移等值线；

YDisp—y 位移等值线；

XVel—x 速度等值线；

YVel—y 速度等值线；

利用材料特性名称作为一个 keyword 可以绘任何材料特性的等值线图。

如果不给出更多的参数，将自动选择尺度因子。不过，可以在任何 keyword 后，跟上一系列“Switch”，它们是为 keyword 本身赋予某些绘图特征的关键词。

每个 Switch 对它前面的那个 keyword 起作用。以下的各 Switch 是可用的：

Color—根据前面用 SET PAL 命令给出的调色板的选择和图形监视器类型，给出线条颜色的选择**。对于 CGA 调色板非 0，线条颜色选择为 Green,Red 和 Yellow-Brown；对于调色板非 1；线条颜色选择为 Cyan,Magenta 和 White。对于，颜色选择列表示下：

Palette 0(调色板)	keyword
绿色（默认值）	GREen
红色	Red
黄色	Yellow
深红色	MAGenta
褐（咖啡）色	Brown
白色	White
淡绿色	LGreen
淡红色	LRed
淡兰色	LBlue
淡深红色	LMagenta
灰白色	GRAy
强白色	IWhite

黑色	Black
----	-------

Polette1	keyword
兰绿色（默认值）	Cyan
红色	Red
黄色	Yellow
深红色	MAGenta
褐色	Brown
白色	White
淡绿色	LGreen
淡红色	LRed
淡兰色	LBlue

淡深红色	LMagenta
灰白色	GRAY
强白色	IWhite
黑色	Black

Interval=c—等值线间隔为 C。在发布 PLOT 命令之前,通过直接发布 SCLIN 命令可以把等值线的值输给屏幕或笔试题图形(见 SCLIN 命令);

Max=v—对于所有矢量图,设置相应于最大箭头长度的值为 v。而所有其它矢量将以这个最大长度为尺度;

Noh—消除图形的标题;

Zero—产生被略去的 0 等值线。

在给出 PLOT 命令之前,利用 WINDOW 命令可以作一幅放大或缩小的图形。这时,该窗口将保留,而在重新启动时将被记住(The window will then remain set and will be remembered on restart.)。

所提出的建立一个笔试题图形的方法应该先建立一幅你已满意的屏幕图形。一旦完成这一步应键入:Plot pen(后跟用于建立屏幕图形相同,一些 keyword 及 Switch)。用 keyword.pen 来初始化 Hewlett-packard 7470A 绘图机*,且须先于控制图像的 keyword。关于绘图的最后提示——在用 Flac 作图之前,应定义用作输出装置的绘图机。对于更多的信息,见 Set Output 及 Set Baud 命令。

Print keyword_<keyword>_..._<Region=i,j>_<range>

打印输出用于外荷载,极限尺寸(limits),主要网格变量或扩张变量(Extension Variables)。对于用<range>确定的各网点或域的范围,或位于域 i,j 内的区域可以作输出。<range>具有形式 $i = i1, i2, \quad j = j1, j2; i \text{ 或 } j$ 的先后次序不限。另外,可以把模型区域定义为 $REG=ON=i,j$;这时,将打印出由标有 MARK 的各网点的延续序列所包的域的输出。域 i,j 是 MARKED 区域内的一个域。与绘图情形一样,在规定材料模型和特性之前,不会打印网格个各变量。各 keyword 为:

Apply—作用于模型的力或压力的值和范围;

Fix—打印 x 或 y 向的各固定网点;

Limits—对 SOLVE 命令的限制 (limits);
MArk—打印有记号的各网点 ;
MEm—占用的内存 ;
SIrct—打印各结构单元节点处的力弯矩和位移 ;
Interface—打出界面数据 , 包括节点力及单位法向矢量。

主要网格(Main Grid)keyword

Bulk—体积模量 ;
COhension—粘聚力 ;
Den—物质密度 ;
Dilation—膨胀角 ;
E_P—总塑性应变 (应变软化模型);
Friction—摩擦系数 ;
SHear—剪切模量 ;
X—x_坐标 ;
Y—y_坐标 ;
PP—空隙压力 ;
JFric—节理 (joint) 摩擦 ;
JCoh—节理粘聚力 ;
JAngle—节理角度(Joint Angle) ;
NUYx—y-x 泊松比 ;
NUZx—z-x 泊松比 ;
SIG1—最大主应力 ;
SIG2—最小主应力 ;
SXX—xx-应力 ;
SYY—y-y 应力 ;
SXY—xy-应力 ;
Theta—从 x_轴反时针向转至最小主应力的角度 ;
XDisp—x-位移 ;

*可以用任何 Hewlett-Packard 或兼容的笔式绘图机。

YDisp—y-位移；

Xmod—x-模量(Modulus)；

Ymod—y-模量；

XVel—x-速度；

YVel—y-速度；

ASXX—xx-应力（三角形 a）*；

BSXX—xx-应力（三角形 b）；

CSXX—xx-应力（三角形 c）；

DSXX—xx-应力（三角形 d）；

ASYY—yy-应力（三角形 a）；

BSYY—yy-应力（三角形 b）；

CSYY—yy-应力（三角形 c）；

DSYY—yy-应力（三角形 d）；

ASXY—xy-应力（三角形 a）；

BSXY—xy-应力（三角形 b）；

CSXY—xy-应力（三角形 c）；

DSXY—xy-应力（三角形 d）；

State—塑性状态；

0—弹性；

1—屈服处（at yield）；

2—弹性但以前在屈服处（elastic but previously at yield）；

3—在单轴拉伸时，已超过拉力截止（has surpassed tension cut-off）；

4—在屈服处，亦超过拉力截止；

5—在一般拉伸中，已超过拉力截止；

6—目前在屈服处的多处同时出现的节理（ubiquitous joints currently at yield）；

7—在过去已屈服，但目前为弹性状态的多处同时出现的节理（ubiquitous joints have yielded in the past but are currently in the elastic state）；

Iables—将打印储存表格 (Stored Tables);

Xreaction—x - 反力 ;

Yreaction—y - 反力。

PROp keyword=value_<...>_<range>

这个命令为由 MODEL 命令确定的本构模型赋特性值。为了协助 PROPERTY 命令的执行，提供了一些任选 keyword。它们是：

Region i, j ——由 MARKED 网点的连续序列所包围的各个域将具有规定的特性。域 i, j 是 MARKED 区域内部的一个域；

Var xv yv ——可以给出整个规定范围<range>（或区域）上的特性的变化（variation）。其中，xv 为 x 向变化；而 yv 为 y 向变化。这些变化被应用在具有最小 i, j 值的域与具有最大 i, j 值的域之间。

可以给出一个由 <range> 确定的各域的任选范围。形式 $i = i1, i2, j = j1, j2$; i 或 j 的范围<range>必须维持在输入行，但 i 或 j 先后次序不限。

各特性的 keyword，它们的含义及使用它们的本构模型给于下面：

*应记得，Flac 把每个四边形分为四个三角形域：a,b,c,d.

keyword	Description	Model
Angle	各向异性角，从 x 轴逆时针向取值。	横向各向同性
BULK	弹性体积模量。	弹性 Mohr-Conlomb 应变软化/强化 普遍存在节理（ubiquitous joints）
Cohesion	粘聚力	Mohr-Conlomb
Ctab,Dtab,Ftab 表格数		应变软化/强化
Density	物质密度	应变软化/强化

Dilation	膨胀角（度）	所有模型
Friction	内摩擦角（度）	Mohr-Conlomb 应变软化/强化
JAngle	角度（度），对于普遍存在节理， 从 x 轴起逆时针向量取。	普遍存在节理
JCohesion	普遍存在节理的粘聚力	普遍存在节理
JFriction	多节理面的摩擦角	普遍存在节理
Shear-mod	弹性剪切模量	
Xmod	各向同性平面内的弹性杨氏模量	横向各向同性
Ymod	垂直于各向同性面内的弹性杨氏模量	横向各向同性
NUYx	由垂直于各向同性面内的单轴应力 引起的各向同性面内的正应力泊松比	横向各向同性
NUZx	由各向同性面内的单轴应力 引起的各向同性面内的正应力泊松比	横向各向同性

模型类型及其特性，必须在打印或绘制任何数据之前，给以定义。如果所给特性与所选模型不符合，将给出一个警告信息，以通知用户不接受非必需的特性。

各模型需要以下特性：

弹性：(1)剪切模型

(2)体积模量

(3)密度

Mohr-Coulomb：(1)剪切模量 S

(2)体积模量 E

(3)密度 D

(4)摩擦角 f

(5)粘聚力 C

(6)膨胀角（任选项）

横向各向同性：(1)剪切模量*

(2)x-模量

(3)y-模量

(4)密度

(5)NUY_x

(6)NUY_z

*必须确定各向异性弹性的横向剪切模量 G。鉴于岩石的实验室试验，提示了以下方程式:

$$G_{xy} = \frac{E_x E_y}{E_x(1 + 2\nu_{xy}) + E_y}$$

假设 x-2 平面各向同性平面（见附录 A）

普遍存在节理：(1)剪切模量

(2)体积模量

(3)密度

(4)粘聚力(未终损坏的材料 intact material)

(5)摩擦角(未终损坏的材料 intact material)

(6)节理粘聚力(节理)

(7)节理摩擦(节理)

(8)节理角度(节理)

(9)膨胀（未终损坏的材料，任选项）

应变强化/软化：(1)剪切模量

(2)体积模量

(3)密度

(4)摩擦角(初始值 - 任选项)

(5)粘聚力(初始值 - 任选项)

(6)膨胀(初始值 - 任选项)

(7)f_{table}(表非 Φ 与塑性应变间的关系)

(8)c_{table}(表非粘聚力与塑性应变间的关系)

(9)d_{table}(表非膨胀角与塑性应变间的关系)

应变强化及软化的性能由摩擦、粘聚力及膨胀的变化控制，它们是由表格值规定的塑性应变的函数。规定这些值的细节，见附录 A。注意，如果将值均为 0，

这些特性将取所给的值（即，用 COHESION,DILATION 或 FRICTION 各 Keyword）。

REstore filename

从名为 filename 的文件中，恢复一个以前储存的问题的状态。

RETurn

这个命令应维持在一个遥控输入文件内（见 Call 命令）。

SAve filename

在目前状态时，把内存中的现行问题储存在名为 filename 的文件上。如果已存在这个文件，将被覆盖。

SClin n_x1,y1_x2,y2

这个命令在屏幕或笔试绘图机构成的任何等高值线图上，标注等值线。用户定义一个他想知道等值线的值的“扫描线（scan line）”。用户用命名 SCLIN 来定义该线的边界点。在扫描线与等值线间的每个交点处，写上字母 A~Z。给出一个标题，以表示最小和最大等值线的值，以及等值线间隔。这允许计算两端值间的任意等值线的值。缺省条件是无扫描线。在每个新图形之前，必须给一个新的扫描线。对于一幅图，可以规定多达 5 根扫描线。其参数如下：

n—扫描线数目（必须 1，2，3，4 或 5）；

x1,y1—扫描线始点坐标；

x2,y2—扫描线终点坐标。

例如，命令

flac>Sclin _1_0,1_0,10

将产生从 0，1 到 0,10 贯穿扫描线的各等直线的值。

SEt <keyword>

这个命令用来设置在一个运行过程中，始终保持不变的全程条件变量。该命令的各 keyword 为：

Aspect_a——其中 a=x:y,x、y 是从一个应为方形的非方形图像量得的。根据图板（graphics beard）和屏幕垂直尺寸调节，a 一般为 0.5 ~ 1.5。

Back_background_color

0---黑色，1—蓝色，2—绿色，3—兰绿色，4—红色，5—深红色，6—黄褐

色, 7—白色。

BAud b—为输出装置设置波特率。b 选择为 1200, 2400, 4800 及 9600bpm。
波特率只能为 COM1 及 COM2 设置。

CGA 或 CSC—设置 320 × 199 图像分辨率 (pixel resolution) 的彩色屏幕图像模式。这是默认值。

Col_n—n 为最大输出列 (column) 数。注意, 在 flac 运行之前, 用户必须设置适当的打印列模式。有关设置打印机模式的方法, 试查阅你的打印机手册。

EGA—把图形模式设置为 640 × 350 图形分辨率的增加图形转换器。

Force f—设置 SOLVE 命令的不平衡力极限。

Gravity_g<th>—用大小为 g, 方向角为<th>来规定重力, <th>从负的 y 轴量起。

Large—大应变 (各坐标均为适时修正)。

Log_ON—在默认硬盘驱动区中, 打开一个名为 flac.log 的文件。如果已存在 flac.log 文件中, 将覆盖它。但打印于屏幕的文件也写入 log 文件。这对保存交互式对话一段时间的记录, 特别有用的。可以编辑这个文件, 以建一批数据文件。

Log_OFF—关闭记录功能 (Logging function)。它不封闭记录文件 flac.log。如果在这一段时间之后的每一阶段, 给 log on 进行设置, 后来的输出将附加到这个文件里。

Mono—设置单色分辨率图形模式。

Output =p—把画出的输出转送给与通道 p 相连的设备, 这里 p 可以为 COM1, COM2, LPT1 或任何其它通道 (port)。

Pal 0—0 号调色板。给出线条颜色选择, 在 CGA 模式中为红色和黄褐色。

Pal 1—1 号调色板。给出线条颜色选择, 在 CGA 模式中为深红色及白色。
对于 EGA 模式的颜色, 是用 PLOT 命令给出的。默认值=1 号调色板。

P_Stress—平面应力 (仅对弹性及横向各向同性模型)。

Small—小应变 (不适时修正坐标)。

STep n—为 SOLVE 命令设置步长数的极限值。

Time t—为 SOLVE 命令设置运行时间的极限值, 单位为分。

SOLve_<keyword=value ...>

该命令允许自动检测问题的稳定解,直到达到时间步长,运行时间或不平衡的力的限定条件为止,都执行计算任务。用以下任选的 keyword 来改变这些限制:

Step—时间步长;

Time—运行时间(分);

Force—不平衡力。

这些 keyword 的默认值为:

S=500 步, T=5 分, F=100

应该注意, F 取决于所采用的极限制 (system of limits)。如果没作明确的规定,那么将采用旧的极限 (old limits),但当设置或重新启动时 (when set or on restart),会记得这些限制的。不过,当给一个 New 命令时,他们被重新设置为默认值。一个大于 1440 分 (24 小时)的时间极限是不会接受的;对于更大的运行时间 (如,超过周末),可以依次给出几个 SOLVE 命令。如果在执行过程中,触动了任何键,在完成现行步长后,Flac 将返回问题由用户控制。

STEp_n

执行 n 个时间步长。如在执行过程中,动了任何键,在完成现行步长后,Flac 将返回问题由用户控制。

STop_n

Flac 停止,且运行时间结束 (the session ends)

STRuct keyword...

STRCUT 命令用于定义结构单元 (structural elements) 的几何条件特性及端部条件。STRUCT 命令描述了单元类型及几何条件,单元与 flac 网格的连系,以及与单位有关的特性类型数。用于定义结构单元的 keyword 如下:

单元类型 keyword 有两种单元类型:

Beam---用几何条件及特性 keyword 来定义一个梁单元,而它们的值紧跟在 Beam 的 keyword 后面。

Cable---用几何条件及特性 keyword 来定义一个索单元,而它们的值紧跟在 Cable 的 keyword 的后面。

每个梁或索是由节点起点或终点来定义,或者由主网格联动装置 (main grid linkages) 来定义。可以把梁或索划分为若干段,在每个段在端部用

节点联系起来。梁单元结点用三个自由度来描述： x - 及 y - 向的平移和一个转动。索单元只允许 x,y 向平移。最后，各个特性通过一个特性类型数来规定。图 4-2 说明了与梁单元有关的条件。

单元的几何条件及节点联动装置

为了定义单元几何条件，需要以下两个 keyword

Begin keyword - 它确定了梁或索的一个端点；

End keyword - 它确定了梁或索的另一个端点。

单元的各端点，用直接跟在关键词 BEGIN 及 END 后的三个可能的 keyword 及/或数值之一来定义：

Grid _{i,j} - 这里，在单元始或终节点与网点 i,j 处的土壤或岩石物质之间，建立了一个联动装置；

Node _{n} - 在建立这个结构时，Flac 将自动地给各结构节点一个从 1~ 节点数的连续号码，其次序按输入值而定。通过发布该命令，可以把当前单元的始或末端与节点 n 耦合起来；

x,y - 在关键词 BEGIN 后面，可用给定的一对 x,y 来连接，给各个单元节点一个空间坐标。可以用该命令来定义任意空间方位处的一切单元。如果 x,y 都非常接近于一个已存在节点或网点，那么，Flac 将迫使这个新节点与已存节点或网点一致。

单元特性类型 keyword

可以为每个梁或索规定特性。这可以用把一个特性代码 n 与每个梁或索相连系的方法来做。Keyword 的形式为：

Prop _{n} - 把特性代码 n 分配给单元类型。利用命令 struct prop = n 把各特性与特性代码联系起来。

单元段 keyword (Element Segments)

利用以下 keyword 可以把每个单元或索划分为若干段：

Seg _{k} - 把单元分为 k 段。例如，如果始端坐标为 $(0,0)$ ，末端坐标为 $(10,0)$ ，而 $k = 10$ ，那么，将把该单元分为长为 1.0 的 10 个段。

索的预拉力 keyword

一根索锚栓 (Cable bolt) 可以预张拉到一个荷载 t ，这时用 keyword：

Tension t

为了进一步定义单元条件，提供以下两个 STRuct 补充命令：

STRuct Node = n keyword

利用以下定义的 keyword，可以对每个结构节点，规定各种边界或几何条件。

FIX _<x> _<y> _<R> - 这个任选项允许把节点 n 沿 x 向和/或沿 y 向位移同或者固定转动（即，可以把一个梁端锁在适当位置或允许转动）。

FRee _<x> _<y> _<R>---这与 FIX 相反。

Pin---它在节点 n 形成一个铰接（即，没有弯矩）。

Load _fx,fy,m---这允许用户把 x 向和/或 y 向的力，或者弯矩作用于节点 n。

x, y---它们是节点 n 的 x,y 坐标。这用在建立一个新节点时，这时该节点可以包含在结构单元中。这允许用户在单元形成以前，去定义节点号。

STRuct Prop = n keyword = Value...

该命令把特性值与一个特定特性代码 n 联系起来。图 4-3 与图 4-4 分别说明了灌注与锁材料特性的关系。以下的各特性 keyword 可应用：

E = Value - 梁或索的杨氏模量；

I = Value - 梁的惯性矩（第二次面积）；

Area=Value - 梁或索的截面积；

Kbond=Value - 水泥浆的粘结刚度（bond stiffness of grout [力/单位索长/位移]）；

SBond=Value - 水泥浆粘结度 [力/单位索长]；

Yield=Value - 索的屈服强度（力）。

Table n x1,y1 <x2,y2> <x3,y3>...

该命令为内存中的 x 和 y 建立一个供 flac 利用的表格。把这些表格用于定义地下水位（即，孔隙压力计算用）（见 WATER 命令），粘聚力和应变软化模型的膨胀表格（见 PROP 命令）。可以存在多达 20 个表格；数目 n（1~20）是表格标志号。可以给出任意多对 x,y；它们是不需按次序排列的，因为 flac 会把它们按增长的 x 值分类。如果对于相同的表格号给出更多的 TABLE 命令，则把新的 x,y 插入到现有表格的正确位置。如果给出一个与现存 x 值一模一样的 x 值，则对表格中的相应 y 值进行修正（在编辑各表格中，该特性是有用的）。可以用 PRINT TABLES 命令核实一个表格的内容。

Title——把下一个输入的内容作为一系列笔试图形的打印标题及重新启动文件的记录标题。

Unmak <range>——取消在<range>内各任何网点上现有的 MARK。

WATER <Density=Value> <Table=n>

在每个域内，根据位于所列表格给定的地下水位线以下的域的深度，附着一个孔隙压力。这个压力也正比例于水的密度（如上所给 Density）及重力垂直加速度（用 SET GRAVITY 命令给出）。在地下水位线以上的各域具有的孔隙压力为零。

当用 Water 命令把孔隙压力附着在网格中时，将增加相同数量的直接应力（ S_{xx} , S_{yy} ），因为它们全相应于总应力。可以给出或打印出孔隙压力分布；取压力为正。也可以（用 Plot WATER 命令）显示地下水位线。

在计算过程中，Flac 利用有效应力（即，总应力减去孔隙压力）来构成本构模型。在目前的 flac 版本中，孔隙压力既不受域的体积变化的影响，也没有任何水流。总应力显示在图和打印输出上。

如果给出命令 Water Table=0，则从网格中取消所有的孔隙压力。同样，在运行过程中，可以通过开关一个新表格或改变现行表格的内容的方法，来改变压力分布。

Window _ <xlo _xhi _ylo _yhi>

<AUTO>

这个命令在屏幕上或笔试图机上建立一个供绘图用的虚构窗口， $x_{lo} \sim x_{hi}$ ， $y_{lo} \sim y_{hi}$ 的幅面被映在方形屏幕区。因此，如果窗口面不是方形，会以不同的 x, y 尺度画出变了形图形。

如果在绘图以前没有定义 Window，便选择一个能容纳整个网格的窗口。窗口一直保持到改变设置为止。如果希望自动开窗口，试用 Auto 关键词。如果窗口小于网格尺寸，则会删去窗口边框处的屏幕图像。用户可以利用这个特点去得到感兴趣的细节部分放大视图。

4.3 设置你自己的默认条件 (Setting your own default conditions)

如果你想不论什么时候当你起动程序时，Flac 能接受某些参数或模型，试准

备一个名为 Flac.INI 的文件。这个文件可以包含任何有效的各 Flac 命令。Flac 会自动启动来读这个文件，并处理各个命令。例如，Flac.INI 可包含以下命令：

Set force=5e2,CGA , back = 1 , pal = 0

Water density = 1000

如果 flac.INI 文件不存在，flac 直接恢复而没有错误信息(flac simply continues without error)。注意，在一个 flac.INI 文件中的某些命令可以产生一个错误信息。例如，如果你在定义网格之前，试图给出一个网格的各特性值，则会出现正常的错误信息。

参考文献 (Reference)

Lekhnitskii,S.G.Theory of Elasticity of an Anisotropic Body.Moscow:

Mir Publishers,1981.

5.0 用 FLAC 解答的问题 (Problem Solving with flac)

5.1 引论 (Introduction)

为了用 Flac 运行一个模拟试验，必须先确定问题的几何条件，边界条件及材料模型。这些过程与所有应力分析码是相似的。必须为模拟的区域划分为若干个四边形单元或域，用域的四个节点或网点来定义每个域。为了后续计算，在内部，Flac 再把每个四边形分为四个三角形单元。一旦网格已定义，必须提供边界及原始条件。这些条件包括：

在 x,y 向被固定的网点位移或速度；

作用于任何面或网点线的压力；

在任意网点处作用于 x,y 向的力；

物体中的原始应力；

重力。

对于 Flac 这样的显式模型，问题的实际解答是稍不同于许多平常的隐式模型的解答的。显式码命名为“时间逼近”(time - marching)。在逼近中，以直到达到平衡为止的逼次渐尽的时间来求解运动基本方程式。实际上，对用户系统，这指的是用一个有物理意义的方法来寻求解问题。

例如，试考虑在靠地面的土中开挖的一个隧洞。这时，由重力引起力是主要的。可以最初设置一个大得足以避免边界效应的尺寸（图 5-1）侧面及下面边界是用滚轴固定的，而重力作用于材料。于是，通过若干时间步长，直到各网点处的速度或不平衡力趋于零为止，来“步入”（S stepped）这个模型。即直到这些变量衰减到一个可接受的水平。Flac 允许两种基本方法来时间步入每个模拟阶段的平衡。用户可以用一个他所要求的具体的时间步长数，内部网格的最大不平衡力的极限，或求解所允许的真实时间（分）。另外，可以允许程序不受用户干扰去求解平衡问题。前一种方法的优点是由求解方法的明显特性所引起的。当初形成的显式程序是允许求解诸如不可能获得的结构崩塌这类高度非线性问题。这时，它便于能考察当崩塌发生时的崩塌过程。为此，在某一时间时（取决于问题的类型）把解的过程循环若干步，建立一个“Save”文件，绘出图形，并考察数值输出。重新储存这个 Save 文件，并用这种方法，或继续循环以使用户满意（即，或者到平衡或者到某些破坏状态）。

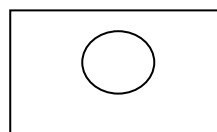


图 5-1 靠地面的

试考虑图 5-1 示靠地面的隧洞问题。在本例中，一旦开挖外面的网格，已经出现平衡，物体内的重力应力就已形成，且会处于现场应力状态。这时，通过把开挖域的材料模型改为“空（null）”域的办法来进行开挖。计算过程由再步入平衡来进行。如以前一样，用户能直接让程序求解平衡状态，或人工跨步并考察在中间各步时物体的状态。

因此，用 flac 的问题解答过程包含在图 5-2 示的逻辑中。这种处理方法是方便的，因为它实际上表现了发生在自然环境中的过程。几个简单问题的模拟会有助于用户熟悉这一求解过程。这些问题是：Prandtl 楔形体（wedge），深埋圆形隧洞（kirsch 解）及重力荷载下的土体边坡稳定。

5.2 运行 FLAC（running flac）

FLAC 可以用交互式（通过键盘进入命令）或文件驱动（成批）式两种方式之一进行运行。首先，用户必须通过软驱动器将代码拷贝到硬盘，并通过给在第一章的以下各指令解压（de-compressit）。然后，通过键入：

```
c>flac
```

来启动这个程序。计算机将调用 flac，并显示以下信息：

```

FLAC(Version 2.00)
Fast Lagrangian Analysis of Continua
( C ) Copyright Peter Cundall ( 1987 )
Itasca Consulting Group.Inc. ( 1987 )
Strike return to continue

```

如果存在一个 flac.INI 文件 ,当击 Return 键时 ,程序将读取并执行各个命令。当 flac 已接受这些命令时 , 显示以下提示符 :

```
flac>
```

如果你想交互式地运行某个码 ,试开始键入前面已介绍 ,并在以下各节进一步讨论各个命令。当按 Return 键时 , Flac 将执行每个命令。如果出现一个错误 , 给用户的警告将出现于屏幕。

也可以通过一个事先准备好的文件来运行这个代码 ,该数据文件包含一组与交互式时应进入的相同的一组命令。这个数据文件可以用任何 DOS 编辑器来建立 ,并扩展名为.DAT的文件来储存。为了再调用并执行这个数据文件 ,利用 CALL 命令:

```
flac> Call file.dat
```

式中 file 是你给 Data.file 取的名字。你会看到 ,当 FLAC 每读取一行数据时 , 在屏幕上数据入口处向上卷动。最后 ,通过利用任选项的事先储存的状态 ,可以重新启动这个程序。对于这三种输入方案的典型数据组给于下一节中。

5.2.1 网格的形成及材料特性定义 (Mesh generation and material properties definition)

必须首先输入形成有限差分网格的各命令。控制这个功能的三个基本命令为 :

```
flac> grid icol , jrow
```

```
flac> gen { 2 }
```

```
flac> initial x or y <range>
```

GRID 命令生成一个宽 icol 个域 ,高 jrow 个域。i-轴平行于问题的 x-轴 ,而 j-轴平行于问题的 y-轴 (图 4-1)。

GEN 命令用于提供网格坐标 ,并形成所要求的任何外形的网格。GEN 命令

的特殊性能包括“分级”(grading)网格,以便表示远的边界。

这个命令也用于建立网格内部(或在网格内部)的各种外形的边界。预先编辑的外形包括圆、弧及直线。直线函数能进一步用于形成任意形状的孔洞。下列是利用 GEN 命令生成各形状的例题。

例 1——方形域

在它的最简单的形式中,GEN 命令能为网格提供新的坐标。命令

```
flac> grid 10, 10
```

```
flac> m e
```

将建立一个 10 域 × 10 个域的方形网格(11 个网点 × 11 个网点)并对各个域指定了一个弹性模型。如果打印这阶段的网格各坐标,需发布的命令为:

```
flac> pr x y
```

你将注意到, x,y 都从 0.0~10.0 运行——即 flac 规定了一个网点之间相同一个单位间距的方形网格。如果网格的实际坐标为 x 向 0.0 ~ 500.0 ,而 y 向为 0.0 ~ 1000.0 ,那么采用以下 GEN 命令

```
flac> gen_0.0,0.0_0.0, 1000.0_500.0, 1000.0_500.0, 0.0_i=1,11 _j= 1,11
```

注意,由 i=1,11,j=1,11 确定的网格区从网格的左下角开始,并以顺时针方式绕各外角围成。位于这些外角点内部的所有网点,将根据各点坐标重新确定其坐标。现在,再打印出这些坐标,以便看出这些坐标,的确已经改变了。注意,正好能给出一个网格区的各个新坐标。这个网格区是由 i , j 的范围定义的。在上述例题中,如果把范围规定为 i=5, 11 ; j = 5,11 ,这只影响网格的右上角。范围必须按顺时针方式规定。

例 2——开矩形孔洞

能用 GEN 命令来形成网格中的畸变。例如,试用以下命令:

```
flac> new
```

```
flac> grid 20,20
```

```
flac> m e
```

```
flac> gen 0,5 0,20 20,20 5,5 I = 1,11
```

```
flac> gen same same 20,0 5,0 I=11,21
```

```
flac> plot grid
```

在本例中，唯一的一个网格还被用每个 GEN 命令畸变了。第一个 GEN 命令，由半个网格形成一个畸变的四边形，而第二个 GEN 命令。“复盖”(wrap)了网格的其余部分构成一个矩形孔洞。注意，逐次的 GEN 命令是相加的 即只一次改变，直到再用 GEN 或 INI 命令来改变，这些网格坐标才保留为新坐标。

例 3 按等比级数逐渐变大(小)的网格

为了表示各边界，可以用 GEN 命令来逐次变化一个网格(to grade a mesh to represent for boundary)例如，在许多情形下，在岩石物质的极深处进行开挖。须确定开挖周围应力及位移的详细信息，这些地方的干扰是大的。但是，在远离开挖处，不必细微。在以下例题中，网格的左下部分(is left tightly discretized)，在外面把边界分为 x,y 向的(the boundaries are graded outward in x, and y,direction)。试发布以下命令：

```
flac> new
flac> grid 20,20
flac> m e
flac>
flac> plot grid
```

GEN 命令将使网格沿 x,y 向以 1.25 传于前一个网跨的比率扩展至 1000 个单位。注意，如果比例介于 0~1 之间，网格的尺寸将随坐标值的增加而减少。例如，发布以下命令：

```
Flac> new
Flac> grid 10 , 10
Flac> m e
Flac> gen -100 , 0 -100 , 100 0 , 100 0 , 0 rat .80 , 1.25
Flac> plot grid
```

你将会看见沿 x,y 向逐渐变小的网格。

例 4 带孔洞的网格

常需要在网格中进行开挖，要构成复杂形状的开挖，是十分麻烦的，特

别是用直接移动各单独的网点来构成圆弧时。这里给出了利用 GEN 命令来建立开挖形状的两个例子。

首先，建立一个圆形开挖。试用以下命令：

```
Flac> grid 20,20
```

```
Flac> m e
```

```
Flac> gen circle 10,10 5
```

```
Flac> plot grid
```

这个命令自动构成一个外轮廓在网格内部的圆孔，圆孔中心在 ($x = 10$, $y = 10$) 处，而半径为 5.0。注意，网格其余部分仍为方形 即，单元的各角均为 90°。为了使网格更好的与新开孔一致，键入：

```
Flac> gen adjust
```

```
Flac> plot grid
```

逐次的各 GEN ADJUST 命令将使网格变形(warp)，以便日益显著地弄通(to increasingly greater - levels)

当利用 Circle，Arc 或 Line 命令，在网格内部构成内部形状时，flac 把由有记录的闭合路线形成的网格的不同区域间予以区分。在上例中，Gen Circle 命令，在由圆边界构成的网格内部，建立了两个区域：边界内的区域和边界外部的边界。如果你想看见网格的边界在那里，试键入：

```
Flac> pr mark
```

那些由 flac 调整了以便形成边界的各个域，在打印输出中，用一个“M”来表示。

应小心注意 如果由闭合的轮廓线把两个区域隔开，那么才能形成两个区域。换句话说，始末点在网格内部而不构成一个闭合边界的一条线段，只能形成一个区域。对于上例，可以用关键词 RGIN 去规定二个域 x 的模型、特性或原始值。例如，为使上例隧洞内部无效，只要键入命令：

```
Flac> mod null region = 10,10
```

```
Flac> plot grid
```

你会注意到，隧洞中的各个域已被挖去。这时可以用以下命令代替它们。

```
Flac> m e region = 10,10
```

注意，可以用任意模型及与模型相协调的特性来代替开挖。更多细节，见 Model 及 Prop 命令。

例 5 移动网点

可以用 Initial 命令，把一个点或若干点从当前位置移到一个新位置。以下各命令建立了一个网格，并用 Initial 命令来使它变形：

Flac> grid 5,5

Flac> model elastic

Flac> gen 0,0 0,10 10,10 10,0 (沿 x,y 向规定网点坐标为 0 ~ 10)

Flac> Ini x = - 12 I = 1 j = 6 (把左上角水平移动 - 2 个单元)

Flac> Ini x = 12 I = 6 (把各右边界网点各移 2 个单元，注意，因为没有给 j 的范围，取为整个范围)

注意，可以用 Initial 命令，把任何网点移至任何位置。当然，各单元不能重迭。如果重迭了将给出一个为 “ BAD.GEOMETRY” 的警告信息，直到校正了网格结构中的错误为止，flac 不会继续执行的。为了得到合理的解，应把各域的高宽比的实际范围，保持在约 1:10 或更小。

一旦定义了网格，便必须对物体内部的各个域，规定一个或更多的材料模型及所要求的模型。这可利用 3.0 节中所叙述的 Model 及 Property 命令来达到。

5.2.2 应用边界条件 (Apply the Boundary Conditions)

在生成网格以后，便应用边界及/或原始条件。可能的边界条件如表 5-1 所示。

表 5-1 边界及初始条件命令小结

Command	Effect
Initial	
Sxx	初始化域的 Sxx 应力
Syy	初始化域的 Syy 应力
Sxy	初始化域的 Sxy 应力
Xdis	初始化域的 x - 位移
Ydis	初始化域的 y - 位移

Xvel	初始化域的 x - 速度
Yvel	初始化域的 y - 速度
Fix	
X	固定一个网点处的 x - 向速度 (或位移)
Y	y
X Y	x,y
Free	
X	与 Fix 命令相反
Y	
X Y	
Apply	
Pressure	沿整个一行或列各网点作用的压力
Xforce	作用于网点的行或列上的 x - 力
Yfoce	y - 力

例如，试考虑受重力荷载的网格的形成。在这个网格内部，开挖了一个靠地表的圆形隧洞。可以键入以下命令序列，供交互式考察 GEN 命令的效应：

```

Flac> grid 10,10
Flac> model elastic
Flac> gen circle 5,5 2 ( 在初始化应力之前，形成隧洞的网格 )
Flac> plot grid
Flac> gen adjust ( 调整网格 )
Flac> plot grid
Flac> prop s = .3e8 b = 1e8 d = 1600 ( 特征值 )
Flac> set grav = 9.81
Flac> fix x I = 1
Flac> fix x I = 11 ( 在两侧面及底部让土壤均匀沉降的滚轴边界条件 )
Flac> fix y j = 1
Flac> * 在物体内形成的应力，这时，开挖隧洞并观察反力

```

Flac> pr mark (显式在物体内部的各个区域的边界)

Flac> mod null region = 5 , 5 (使隧洞内部的区域失效)

flac> plot grid

Flac> set 300

Flac> plot str bou

... 视需要继续模拟。。

上述问题说明了一个初始应力问题 即在开挖以前, 存在于物体中的应力。因为在时间步长开始以后, 网格不能改变, 它必须通过变形, 以适应初应力处于平衡前的图形边界。这种典型的问题, 与物体受应力以前就存在隧洞的? 大不相同。对于无支撑的开挖转形极限应力状态是相同的; 不过隧洞处的位移是不同的。这类似于把在一个预应力板中剥开的孔洞与在一个板中先开洞而加应力的情况相比较。在这种情况下, 用户必须决定那种类型的问题是适宜。

5.2.3 应力荷载/变化条件 (Applying loading/changing condition)

flac 允许在求解的过程中, 改变任意点的模型条件。这些变化可以为以下形式:

材料的开挖;

网点荷载或压力补充或删除;

任何域的材料模型或特性的变化;

固定或解除任意网点的位移或速度。

为了在交互式完成这些操作, 连接在屏幕提示处键新的命令。

作为在一个运行过程中, 能改变各种条件的例子, 试考虑一个随挖随添的简单例子, 这里先进行开挖, 而后立即回填。试运行以下简化问题:

flac> grid 10,10

flac> m e * elastic rock mass

flac>prop s=5.7eq b=11.1eq d=2000

flac>fix x y i=1

flac> fix x y y=1

```

flac> fix x y i=11 固定所有边界
flac> fix x y y=11
flac>int sxx= - 30e6 syy= - 20e6(场地应力)
flac>his nstep=1
flac>hia xdis i=5 y=5(回采工作与壁<Stope wall>处的 x 位移)
flac>salve
flac> * new excavate
flac>mad null i=3.4 y=3.6(开挖非 1)
flac>plot grid
flac>step zoo(步入平衡)
flac>plo his 1(校核平衡)
flac>plot gird str (绘应力, 网格)
flac>mod mohr i=3.4 y=3.6(用 sangfill 特征)
flac>mod null i=3.4 y=7(开挖非 2)
flac>ini xd=0 yd=0(初始化位移, 以致于看出开挖引起的变化)
flac>step zoo(再次步入接近平衡)
flac>plo his 1
flac>plot grid str(绘应力及网格)
flac>plot coh(绘不同的材料类型)

```

在本例中, 对于一个精确解来说, 边界太近了。但它说明了在运行过程中, flac 是能改变模型条件的。应注意——如果用户用其他材料 (在本例中, 为 sandfill) 来代替空域后的网格, 各取消的单元将被代替。这说明, 即使各个域给为空材料, 且不绘或打印出来, 但它们仍然存在并能在任何时候被改变。材料特征的一幅轮廓图也能通过在所要求的特征后面, 键入 plot 来绘出。

这里利用 history plot, 是让用户能判别什么时候问题足以接近平衡。这时, 开挖壁处网格的 x 向位移是用作移向平衡的指示器。当逐次时间步长间的值 (惟一, 应力等) 有微小变化时, 则模型大体上处于平衡了。

5.2.4 数据的打印及绘图 (Printing and plotting of data)

如前面所讨论，直接利用 print 命令，可以得到一个适当的数据的屏幕打印：

```
flac> print keyword
```

打印出的数值矩阵类似于网格本身的逻辑格式。各 keyword 是显然的，但以下两点例外：

如前面讨论，flac 把用户定义的各矩形域在分为名为 a,b,c 及 d 的四个三角形子域。用户可以利用以下的命令请求打印每个子地域的应力
Flac>print asxx,....etc.

flac 保存了一份每个域的屈服史记录。它常常用于了解那些域现在正在屈服，那些过去已经屈服但现在为弹性，以及那些域现在及过去均为弹性。可以用 print sta 来提供每个域的现行弹性状态。打印在矩阵域中的各个数值具有如下意义：

- 0 弹性
- 1 屈服处
- 2 弹性但以前屈服
- 3 已超过单轴拉伸的拉力 cut-off
- 4 屈服，也超过拉力 cut-off
- 5 已超过一般拉伸的拉力 cut-off
- 6 现在屈服的多处存在的节理 (ubiquitous joints)
- 7 过去屈服但现在为弹性状态的多处存在的节理

用户可以用 SET LOG ON 及 SET LOG OFF 装置，来得到打印于屏幕的任何文件的打印拷贝。在一个 flac 数据组中（或者来自批文件，或者一个交互式文件），这命令

```
flac>set log=on
```

将打开一个硬盘文件（FLAC.LOG），该文件将记录后续的所以命令及 flac 的各个响应。要关闭该记录装置，应键入：

```
flac>set log=off
```

在退出 flac 后那么可以关闭这个文件，或者把它拷贝给打印机，以作为永久记录，直接利用 DOS COPY 或 PRINT 命令。

网格的几何条件及各种输出变量的图形，可以在 PC 显示器或一台 Hewlett-Packard 或兼容绘图机上完成。适用于用户的现有图形类型，编列如下：

GRID 绘制有限差分网格，当时间步长继续时，GRID 命令将绘出有限差分网格变形后的形状（在大应变模型时）。这对于大应变逻辑是特别重要的。因为，破坏方式常常从边了形的图形中变得明显（since,often,failure modes become evident from the defarmed plots）

Displacement 及 Velocipy 给出各个网点处的位移及速度矢量图。

Boundary 绘制网格边界及开挖。它常常是便于把边界图重叠在其他不同的图上，诸如矢量及等值线图。

sxx,syy 及 sxy 绘制 xx, xyy 或 xy 应力。

Xdisp 及 YDISP 绘制 x 位移及 x 位移等值线。

XVEL 及 YVEL 绘制 x 速度及 y 速度。

STRESS 绘制主应力矢量。

PP 绘制孔隙压力等值线

HISTORY 绘制由 HIS 命令所选择的变量的时间经历（time history）。

STATE 绘制线的屈服状态。

BEAM 绘制结构单元。

CABLE 绘象铺（cable bolt）的几何条件。

必须首先用 SET 命令初始化图形屏幕。2.00 版要求一个 IBM(或兼容机) 的 CGA 或 EGA 图形卡（graphics card）或 hercules 单色卡。SET 命令定义为：

1. 屏幕类型 * ——低分辨率彩色（CGA），高分辨度彩色（EGA），或高分辨度单色的。默值为低分辨率单色屏幕。屏幕的选择点，以下命令之一设置：SET CGA（低分辨率彩色图形装置时），SET MONO（单色时），SET EGA（增强图形转换装置）

* 单色图要求彩色图形转换装置，但是，将以任选的高分辨率单色图形方式，绘在彩色屏幕上。一个独立的 flac 版本(a separate version of flac) 是适用于 Hercuies Graphics board 绘图的情况。

2.背景颜色——用 SET back=iback 来设置背景颜色，其中 iback 的范围为 0~7： 0=黑色(black) 1=兰色(blue) 2=绿色(green) 3=兰绿色(cyan) 4=红色(red) 5=深红色(magenta) 6=黄褐色(yellow-brown) 7=白色(white) 默认值为单色方式的绿色，因为背景为线条颜色。例如，如果你想在单色方式的黑色屏幕上的红色图形，那么 Set back=4。CGA 及 EGA 转换器(board) 要求一个黑色背景(或 back=0)。如果你有这些任选项之一，最好用 set back=0 建立一个 flac.ini 文件

3.调色板的选择——利用 SET-PAL 命令时，有两种可能的调色板(palette) 选择设置(ipal=0 或 1)。每种调色板有三种可能的前景颜色。ipal=0 时，CGA 的颜色选择为褐色、红色及黄褐色。ipal=1 时，CGA 的颜色选择为兰褐色、深红色及白色。EGA 时，14 种颜色选择是可能的。关于颜色选择的细节，参见 PLOT (第四节)。通过 PLOT 命令的颜色 keyword，来定义前景颜色。

设置一个彩色，有黑色背景底分辨率屏幕，而调色板为非 0 的示例性命令为：

```
flac> set pal=0 back=0 CGA
```

一旦图形设备已经说明，便可以设置绘图窗口。窗口应该是方形的，以便清除图形的畸变。命令形式为：

```
flac>wind xlow,xhigh,ylow,yhigh
```

如果没有给出 WINDOW 命令，将自动选择一个尺度。注意，通过改变窗口尺寸，可以把图形放大以便细致的考察网格。窗口应该始终保持为方形，否则，图形会畸变。即使为方形，图形也可能稍微有点畸变。这是由于每个屏幕的调节器的变化所引起的。为了清除任何畸变，试调节显示器背面的调节器钮，或利用 SET ASPECT。

现在可以直接键入后给各重叠图形的 keyword 的 PLOT 命令，来把这些图形绘到屏幕上。一个示例性图形命令为：

```
flac>plot Sxx disp boun
```

它将重绘 Sxx 应力等值线，位移矢量及网格和开挖边界，在图形的左上角，生成一个描述图形的标题。图形更进一步增强(enhancements to the plot) 可以用“sub-keywords”或开关来获得。这些开关可以用于：

定义最大矢量长度 (max==value);

定义等值线的间隔 (Intenval==value);

定义线条颜色 ;

取消标题 (remave headings)。

例如，上述命令能给成：

```
flac>plot Sxx Int=1e4 Cyan disp max=0.001  
mag-boun
```

这里，Sxx 应力等值线绘成为蓝绿色（取调色板非 1），具有 1E04 的等值线间隔；深红色的位移量是以最大矢量长度为 0.001 来度量的；网格及开挖的边界均以背景颜色来表示。

在绘图以前，可以用 SCLN 命令把各等值线标号。

一旦一幅图已在屏幕上构成，并感到满意时，可以在一个 Hewlett-Packard 笔式绘图机上生成一幅图形的拷贝。通过在 PLOT 的 keywords 前面，键入命令 PEN，得到一幅这样的图形。例如命令：

```
flac>plot pen Sxx disp boun
```

将把这幅图形的内存信息转移于笔式绘图机。

也可以把这个图形传给图形点矩打印机 (graphics dot matrix printer)。在把 flac 装入之前，通过发布 DOS 命令 GRAPHICS，既可做到这一点。当一幅图绘在屏幕上时，可以用 print screen 键把它转移到打印机上。一般说来，图形在打印机上的高宽比是相同的。为了建立一幅在打印机上不致畸变，而在屏幕上的“换算”(corrected)畸变图形，用一个非方形窗口作某些试验是必要的。一些商业软件包 (commercial package) 是适用建立单色或彩色 CGA 或 EGA 转换器的点矩图形的。

5.3 特殊问题的考虑 (special considerations)

flac 有一些注释特性(feature of note)，在此予以回顾。

5.3.1 大应变 (large strain)

当物体遭受应变时，正常的假设是：位移的大小小得足以使物体的坐标保持不被改变。这是 flac 中默认的小应变逻辑情况。然而，如果应变都很大，当应变发生时，各网点的坐标必须修正，而各域的应力也应校正。当处理塑性本构模型

及可能的结果崩塌模型时，大应变逻辑是不可少的。用命令：

```
flac>set large
```

来调用 flac 中的大应变任选项，就是这种情形。如果你想返回到小应变模型，其命令：

```
flac>set small
```

那么，在进一步的计算中，将对网点坐标不作修正。

5.3.2 平面应力 (plane stress)

flac 的默认解是平面应变。不过，平面应力假设可用以下命令来设置：

```
flac>set p-stress
```

在运行中间从平面应变转向平面应力是不合理的，因此，这个命令应仅用于网格初始下时。

5.3.3 重力 (gravity)

通过设置重力，可以把重力力包含在物体内部：

```
flac>set grav 9.8 0
```

值 9.8 是重力引起的加速度，而 0 指的是重力竖向作用。（默认值为 0，且是不必要的）。重力的符号约定如下：

+ == 向下 - == 向上

5.3.4 图形形状 (Aspect)

一个方形网格应以一个方形呈现在显示屏幕上。如果办不到，有两种改正方法。

第一个方法是用竖向尺寸控制或你的 PC 监视口的调节器。如果这个方法不能解决问题，那么在屏幕上绘一个方形网格（即，grid 2,2）并用直尺手工测量其水平及竖向尺寸。跨高比为水平/竖向用以下命令设置 flac 的跨高比 (aspect ratio)

```
flac>set asp=a
```

5.3.5 存入 (logging)

利用 “logging on” 和 “logging off” 可以得到？的 flac 对话期间的一个硬盘文件。其命令为：

```
flac>set log =on
```

及 `flac>set log =off`

它们分别表示打开存入 (log on) 及关闭存入文件 (log off)。在这两个命令之间打入屏幕的任何信息, 将被存入名为 flac.log 硬盘文件中。别忘了, 当你开始一个新的 flac 运行时, 一个存在的 flac.log 文件已被覆盖。如果你想保留这个 log 文件, 在你开始新的 flac 运行以前, 将它更名。

5.4 错误处理 (Error handling)

flac 具有一个错误矫正逻辑, 它能识别很多常见错误, 并在交互对话方式时, 为用户给出一个不中止程序的信息。控制系统返回到提示程序。各种错误的信息一览表给在附录 C 中。

5.5 保存/复原运行 (Saving/Restoring)

在模拟过程的任意处, flac 允许用存入一个状态, 然后又复原它。通过键入以下命令, 来建立一个保存文件

```
flac>Save Z:file.Sav
```

其中 “file” 是你想给的保存文件名; “Z” 是驱动器说明。为了复原一个已存在的文件, 直接键入命令:

```
flac>rest Z:File.Save
```

其中 “file” 是以前存入状态的名称。自由的把存入文件用于参数研究, 绘图及打印总是最好的主意。

5.6 建议及忠告 (Suggestions and Advice)

flac 采用常应变。如果应变梯度是强烈的, 你需要很多域来表示非均匀分布。为了校核, 试用更多的域来运行相同的问题。对于塑流, 采用常应变是因为使用许多低价单元比几个高价单元的好。

试使域的划分尽可能的均布。避免细长域或很畸变的域。

对于一个新问题, 总是以少量的几个域先作试运行, 以便对于各种响应及可能的困难, 获得一个快速感受。当你了解了试运行结果时, 才增加域的数目, 以便得到更准确的结果。

flac 将花一个很长的时间收敛, 如果 (a) 有巨大的刚度变化; (b) 有巨大的域尺寸对比。

一个很刚性的荷载板, 常常可以用一系列给出常速度的固定网点来代替 (重

新调 FIX 命令表固定速度，而不是位移）。

为了确定一个崩塌荷载，经常最好是在“应变控制”条件下，而不是在“应力控制”条件下来进行——即，应用一个常速度并测量各反力，而不是应用力并量测各位移。当外加荷载趋于崩塌荷载时，一个崩塌的系统变成难以控制（这对一个真实体系以及一个模型体系是正确的）。

只要有可能，试利用对称条件，以节省计算机内存及运行时间，例如，如果一个体系是对称于一竖轴的，你可以把对称线表示为 X 向具有固定网点的竖向边界（但在 Y 向自由的）。

频繁的利用 save 文件。例如当进行参数研究时，保存中间状态。如果由于某种原因运行终止，你将有这些中间状态。

处理一个 flac 模型正如一个物理模型一样。在一个 flac 运行中，试图重现自然中实际上会发生的各个阶段。别忘记，对于一个非弹性体系，没有唯一的平衡状态。可能有许多满足平衡的可能阶段；你所得到的阶段取决于历史。

flac 怎样表现一个体系的性能。常用一些简单试验去校核你正在作你想做的事。例如，如果加载条件和几何条件是一致的，试校核反应是对称的，或者，在使荷载变化或其他变化，试先执行少数几个步长（如 5）；以便检验其初试反应具有正确的符号及位于正确的位置。

Might also do back-of-the-envelope estimates of expected order of magnitude stress or displacements and compare them to flac out put

如果把一个强烈的冲击（violent shock）作用于一个体系，你会获得一个强反应。如果你把非物理的合理的东西加于这个体系，你必须预料一些奇怪的结果。

在继续进行模拟之前，试以鉴定的眼光考察输出。例如，如果除在一个角域处大速度外，一切正常，则直到你了解原因为止，便不要继续下去了。这时，你可以让一个“固定”的网点自由。

FLAC 不直接给出一个“安全系数”。如果你需要一个安全系数，可以通过取真实值与引起破坏的值的比的办法，来对你认为重要的安全参数来定义安全系数。例如：

$$FW == \frac{\text{引起崩塌的地下水位}}{\text{实际地下水位}}$$

$$F^{\phi} = \frac{\tan(\text{实际摩擦角})}{\tan(\text{引起破坏的摩擦角})}$$

$$F_l = \frac{\text{破坏荷载}}{\text{设计荷载}}$$

注意，总是用较小的值去除较大的值（假设在实际条件下，体系不会破坏）

14. 如果你想 flac 通宵运行，但次日上午仍有计算机可以利用，试直接设置一个适合大步长数。当你需要计算时，可以键入任何键，以便返回到命令 (command level)。万一电源中断，在包含一个调用(called)频繁 save file 的控制下，作长运行是比较保险的。

15. 试用历史图形(history plots)去确定什么时候一个模型处于平衡。

6.0 FLAC 中的结构模型 (Structural Modeling in Flac)

任意几何条件及特性结构，以及它们同土壤或岩石介质的相互作用，是可以 用 FLAC 来模拟的。提供了两类结构单元：

梁单元（它可以同拧一个梁单元和/或土壤或岩石介质连接，以模拟各种问题，比如，挡土墙，缺口开挖的支撑（Support struts in an open-cut excavation），以及隧洞的混凝土或喷射混凝土（Shotcrete）衬砌，或诸如荃脚（footing）这样的地面结构。）

索或岩栓（Rackbolt）单元（能用它来表示全灌浆（fully-grouted）或点锚（point-anchor）岩栓，索栓（Cablebolt），或牵索栓（Tie-back anchor）

所有情形，定义这些结构符必须的各命令是相当简单的，只不过调用（invoke）一个十分强有力且适应性强的结构逻辑（Structural logic）。因为这个结构逻辑是用如同其余代码（与矩阵结构法不同）一样的相同有限差分逻辑，其结构可以遭受大位移。

6.1 命令结构 (Command Structure)

为了模拟结构与土壤及岩石介质的相互作用，用户必须定义支撑物的几何条件（除了物体外），支撑物的特性，以及各结构单元间和它们与支撑介质间的连动装置的类型。

为了完成这些功能，提供三个基本命令。命令

$$\text{STRuct} \begin{bmatrix} \text{Beam} \\ \text{Cable} \end{bmatrix} \text{Begin} \begin{bmatrix} \text{Grid} & i, & j \\ \text{Mode} & & n \\ x_b & , & y_b \end{bmatrix} \text{end} \begin{bmatrix} \text{Grid} & i, & j \\ \text{Mode} & & n \\ x_e & , & y_e \end{bmatrix}$$

<Seg=n Prop=k tens=t>

定义了单元类型，它的始点联动装置，结构的节点或 X，Y 坐标，参数终点，单元分为若干段的数目，以及单元的特殊类型。一根索栓可以预张到某一荷载 T，用 keyword TENSION。

命令

STRuct Prop=k keywords.....

定义了梁或索栓的特征类型。可以利用以下特征 keyword:

Aera	截面积
E	扬氏模量
I	梁的惯性矩（二次面矩）
Kbond	灌浆的粘结刚度
Sbond	灌浆的粘结强度
Yield	索的屈服强度

最后，命令 STRuct Node=n keyword

定义了各结构单元节点处的联动装置。用户选择各节点处的固定或自由位移或转动，作用于 X，Y 向的俩或弯矩，或压个节点处规定一个铰链。默认值时，把各节点考虑为自由的。以下 keyword 可用于定义联动装置：

Fix	<x>	<y>	<2>	节点 n 处，固定 x 或 y 位移或转动
FRee	<x>	<y>	<2>	与 FIX 相反
Load	fx	fy	m	用户提供的取决于方向的力或弯矩
Pin				在节点 n 处建立铰链
x, y				用户提供的节点 n 的 x 及 y 坐标

用这三个命令，能规定任意几何条件、边界条件及各个结构。

6.2 定义结构单元的几何条件及其直承介质的联动装置 (Defining the Structural Geometry and Its Linkage to the Support Medium)

对于每给梁或索必须定义其几何条件及联动装置。可以把一根单梁或索分为

若干段，已改进计算精度，采用了上述基本命令/位于括号内的 keyword 都是任选项，虽然必须规定每一个 keyword。

各梁单元都是用于任何弯曲刚度重要的结构构件。应用梁单元的例子包括：
诸如基础或荃脚这类地面结构（使用的逻辑是通用的，因此可以把地面结构表示梁系（assemblage of beams）

各种支持结构（retaining structures）

诸如混凝土或喷射混凝土衬砌，或钢木支撑这一类内部连续隧洞支撑。

应用索单元的例子包括：

（1）支撑结构的牵索锚（点或全灌浆锚固（anchorage））

（2）索锚（点或全灌浆锚固）

（3）岩栓（rockbolt）（点或全灌浆锚固）

用关键词 Begging 或 End 来定义单元的始末端联动装置。对于 begging 及 End 的几个适合选项为：（1）grid=i, j （2）node=n 及（3）Xb,Yb 或 Xe,Ye

关键词 grid=i, j 表示梁或索的始（或末）端，与岩石或土壤介质的网点 i, j 相连接。令 node=n 把梁或索的始（或末）端与结构的另一个节点（即，另一个梁或索单元）相连接。通过一对表示梁或索始（或末）端坐标的 x,y，用户可以把一个结构单元安置在网格内部或外部的任意位置。

每个不同类型的老梁或索，用命令 STRuct Prop=n 来规定其特征。例如，如果某根梁 一种结构截面（one structural cross-section）取 n=1，对于 W6×25 梁（SI 单位），其命令为：

```
flac>strac prop=1 E=200e9 I=2.3e5 A=4.8e-3
```

应指出，所有量的必须用等价的单位系绘出（见表 4-1），在计算荷载时，代码不考虑结构自重，因此，如果结构自重在问题是重要性，应把等价于自重的竖向力作用于结构。

补充命令 struct node=n keyword 提供了描述结构单元间连接的任选项。任选项包括：

自由或固定 x,y 位移或转动。

铰节点

外荷载或弯矩

节点坐标。

这些联动装置任选项由以下适宜的选项 keyword 给出。

Fix x,y,r 固定分给节点处的 x,y 位移和/或转动。

Free x,y,r 释放

Pin 在一个节点处提供一个铰链（即，释放弯矩）

Load fx,fy,m 在一个节点处作用一个 x,y 向荷载，或弯矩。荷载沿卡笛尔坐标为正。反时针向弯矩为正。

x,y 规定一个新节点号的坐标。注意，如果你用一个任选项而不是 node=n 命令已建立了各节点，FLAC 将自动把节点号分配给它？建立的那些节点。为了了解现行各节点号，试发布命令 PRINT STRUCT

6.3 实例应用 (Exmaple Applications)

为了具体说明 FLAC 中各结构单元的使用，给出几个简单例子。第 2.0 节中的例题具体说明了一个崩塌的壕沟。这里，我们用两根支撑开挖壁的结构表示这个壕沟。以各命令序列是对把这些支撑土即放置在开挖上的情形而言的。

```
flac>gird 5,5
flac>m mohr
flac>prop s=0.3e8 b=1e8 d=1600 fric=20 coh=0
flac> fix y j=1
flac> fix x i=1
flac> fix x i=6
flac>set large
flac>hist nstep=1
flac>hist xdis i=3 j=6
flac>set grav=9.81
flac>solve
flac>*excavate trench and install braces
flac>model null i=3 j=3,5
flac>*properties for w6×25 beam in SI units
flac>struc prop=1 E=200e9 I=2.3e-5 area=4.8e-3
```

```

flac>struc beam beg gr=3,6 end gr=4,6 s=3 pr=1
flac>struc beam beg gr=3,4 end gr=4,4 s=3 pr=1
flac>step 50
flac>plot gird beam
flac>plot rf bound
flac>plot bound dis beam

```

反复考察平衡移动，绘结构图，反力图，位移图

图 6-1 说明了两根支撑的效应（与图 2-2 和 2-3 相比）。壕沟的崩塌仍会发生（对该模型），但破坏范围减少了。补充的支撑和/或板桩（由竖梁表示的）可能试图稳定壕沟。

第二个例子说明了地面结构基础荷载。这里，一个简单的交叉撑平台（）建造在放于土壤介质上的混凝土板上。结构受有作用于各支撑柱上的竖向集中荷载。本项目是考察结构中的荷载及弯矩，以及土壤介质中的应力及位移。

以下命令结构用于准备和运行该问题：

```

flac>*a Simple cross-braced stracture on a sail
flac>grid 10,10 *the sail mass
flac>m e
flac>prop s=0.3e8 b=1e8 d=1600
flac>fix x i=1
flac>fix x i=11
flac>fix y j=1
flac>srt grav=9.81
flac>salve
flac>*let sail equilibrate under gravity
flac>*build structure
flac>*concrete slab
flac>strac prop=1 E=17.58e9 I=0.0104 a=0.5
flac>strac prop=2 E=200e9 I=2.3e-5 a=4.8e-3
flac>struc beam beg gr 5,11 end gr 7,11 s=2 pr=2
flac>struc beam beg node=1 end 4,13 s=2 pr=2
flac>struc beam beg 4,13 end 6,13 s=2 pr=2

```

```

flac>struc beam beg 6,13 end 4,10 s=2 pr=2
flac>struc node =8 5.0,11.5
flac>struc beam beg node=8 end node=1 s=1 pr=2
flac>struc beam beg node=1 end node=4 s=1 pr=2
flac>struc beam beg node=1 end node=6 s=1 pr=2
flac>struc beam beg node=1 end node=2 s=1 pr=2
flac>struc beam node=1 fix r
flac>struc beam node=2 fix r 4
flac>struc beam node=4 load 0 -1e6 0——似应为 node=3
flac>struc beam node=6 load 0 -1e6 0 2(译者著)

```

```

flac>plot beam *check strcture
flac>pr struc *check linkage
flac>step 100
flac>pr struc
flac>plot beam boun ydis 反复考察朝平衡的移动
flac>plot rf beam boun

```

本问题的原始图形如图 6-2 示。荷载对带结构物的土壤的影响说明于图 6-3。产生在结构物中的力及力矩，是各外荷载和与弹性网格相互的结果，并可用 PRINT STUCT 来。

例三：

第三个例题中，考察产生在喷射混凝土及混凝土中的荷载，该衬砌位于双向应力场中，是作用？。因此用梁单元表示与岩石介质接触的衬砌。各界面单元也可用于模拟衬砌与岩石间的划移效应（见附录 D）。

对于这种情形，网格及衬砌的形成如下：

```


flac>grid 15,15
flac>m mahr (mohr-coulomb model)
flac>gen 0,0 0,30 30,30 30,0
flac>gen 14,14 14,60 60,60 60,14 rat 1.2 1.2 i=8,16 j=8,16
flac>gen 14,-30 14,14 60,14 60,-30 rat 1.2 0.833 i=8,16 j=1,8

```

```

flac>gen -30,30 -30,14 14,14 14,-30 rat 0.833 0.833 i=1,8 j=1,8
flac>gen -30,14 -30,60 14,60 14,14 rat0.833 1.2 i=1,8 j=8,16
flac>gen circle 14,14 4
flac> gen adjust
flac>*rock properties
flac>prop s=5.75e9 b=6.6e9 d=2000 coh=1e7 fr=35
flac>*boundary conditions
flac>fix x y i=1
flac>fix x y i=16
flac>fix x y j=1
flac>fix x y j=16
flac>ini sxx=-60e6 sy=-30e6(初应力)
flac>solve (处于平衡, 坑道隧洞及设置支撑; 然后让它达到平衡)
flac>mod null region=8.8
flac>pr mark
flac>struc beam beg gr 7 9 end gr 8 9
flac> struc beam beg gr 8 9 end gr 9 9
flac> struc beam beg gr 9 9 end gr 9 8
flac> struc beam beg gr 9 7 end gr 9 7
flac> struc beam beg gr 8 7 end gr 7 7
flac> struc beam beg gr 7 7 end gr 7 8
flac> struc beam beg gr 7 8 end gr 7 9
flac>plot gird beam
flac>step 100
flac>plo bou disp red beam
flac>pr struc
flac>pr state

```



反复考察朝平衡的移动

各衬砌单元中的荷载及弯矩 (从 PRINT STRUCT) 列表 6-1。衬砌通风? 周围的最后应力状态如图 6-4 所示

表 6-1 隧洞衬砌例题 PRINT STRUCT 结果

structural node data....								
ID	X	Y	X-disp	Y-disp	ang-dis	xfix	yfix	rfix
1	1.000E+01	1.400E+01	1.955E-02	9.416E-05	-7.235E-05	no	no	no
7	1.117E+01	1.117E+01	1.279E-02	3.815E-03	-1.863E-03	no	no	no
6	1.400E+01	1.00E+01	3.403E-04	5.737E-03	-1.306E-04	no	no	no
1	1.654E+01	1.091E+01	-1.188E-02	3.793E-03	2.095E-03	no	no	no
1	1.800E+01	1.400E+01	-2.128E-02	2.984E-04	2.018E-05	no	no	no
1	1.683E+01	1.683E+01	-1.334E-02	-2.645E-03	-2.178E-03	no	no	no
1	1.400E+01	1.800E+01	5.852E-04	-6.271E-03	1.286E-04	no	no	no
1	1.091E+01	1.654E+01	1.434E-02	-3.678E-03	1.809E-03	no	no	no
ID	X-load	Y-load	moment	i	j	pin	i	ang
8	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01	7	8	no		
7	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01	7	7	no		
6	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01	8	7	no		
5	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01	9	7	no		
4	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01	9	8	no		
3	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01	9	9	no		
2	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01	8	9	no		
1	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01	7	9	no		
Structural element data...								
ID	node-1	node-2	prop	F-shear	F-axial	mom-1	mom-2	
8	8	1	1 beam	-3.087E+03	4.079E+06	-6.855E+03	-1.457E+03	
7	7	8	1 beam	3.002E+03	4.073E+06	2.336E+03	6.855E+03	
6	6	7	1 beam	-9.753E+01	8.277E+06	2.037E+03	-2.336E+03	

5	5	6	1	beam	6.595E+02	9.351E+06	4.351E+03	-2.037E+03
4	4	5	1	beam	-3.912E+03	4.343E+06	-9.037E+03	-6.351E+03
3	3	4	1	beam	4.091E+03	4.520E+06	3.437E+03	9.037E+03
2	2	3	1	beam	-3.761E+02	9.382E+06	2.336E+03	-3.487E+03
1	1	2	1	beam	-2.568E+02	8.185E+06	1.457E+03	-2.336E+03

Structural properties...

Prop NO.	E	I	Area
1	1.380E+10	2.800E-04	1.500E-01

最后的例题是考察受跨中荷载的轻质钢筋混凝土梁 (lightly reinforced concrete beam) 的性能。这里，有索单元表示钢筋。该问题的输入命令为：

```

flac>*a simple reinforced beam
flac> gird 10,2
flac>m e
flac>prop s=9e9 b=10e9 d=2400
flac>set large p-stress
flac>*boundary conditions
flac>fix y j=1 i=1
flac>fix y j=1 i=11
flac>apply yforce -1e7 j=3 i=6
flac>struc cable beg -1 -1 end 9.9 -1 s=12 prop=1
flac>struc prop=1 yi=1e6 kb=1e9 sb=1e7 e=200e9 a=2e-4
flac>his ydisp i=6 j=3
flac>salve f=1e5 1000 t=15
flac>save beam.sav
flac>ret

```

这时，跨中竖向位移约为 12mm。

7.0 例题 (Example Problems)

下面提供了一系列岩土力学领域的问题，已作为说明 FLAC 码的各种特征。可能的话，把这些结果与解析相比较，已验证 FLAC 码的效果。

7.1 例 1：无摩擦粘土上的毛面荃脚（Rough footing on a friction cohesive soil）

能为数值模型进行颇为严格检验的一个标准土力学问题，是预测支承在粘土上的一个荃脚的崩塌荷载（SLon 及 Randolph）。从“Prandtl's Wedge”解得到的土的承载能力为：

$$q = (2 + \pi)c = 5.14c$$

式中 q 为破坏荷载，而 C 为材料的粘结力。可知道发生破坏的模型。

一个颇粗略的网格被用于该问题的 FLAC 模拟最初规定为 10×10 方形网格，但把右边及底部延伸可一点，以便提供合理的逼近于一个半无限边界。在网格的左边利用了对称条件，而底部及右边边沿，沿 x 及 y 方向均是固定的，可以用三种可能的方法，来模拟荃脚荷载：

把一个压力边界条件应用在跨越所要的各单元的负方向。

把等价于的荃脚应力的网点力，作用在跨越荃脚宽度的各表面网点的负 y 方向。

把一个常速度边界，应用于跨越荃脚宽度的负 y 方向。

因为我们的目标是把预测解与精确解相比较，选择了第三种替换方法，通过监视破坏边界下方格网中的力的变化，可以计算出承载能力。这就看出了对外边界条件进行到发生崩塌为止的试验的必要性。

把具有以下材料特性的 Mohr-Coulomb 本构定律用于本模拟：

密度 1000 kg/m^3 粘结力 $1.0 \times 10^5 \text{ pa}$

剪切模量 $0.3 \times 10^8 \text{ pa}$ 摩擦角 0 体积模量 $1.0 \times 10^8 \text{ pa}$

此外，为了与精确协调一致，采用了小应变逻辑。

用以下命令序列给出输入：

```
set    log=on
```

```
tit
```

```
prandtl's   wedge
```

```
gr   10,10
```


9	2.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
8	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
7	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000
6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000
5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000
4	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000
3	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	1.000	2.000	0.000	0.000
2	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	0.000	0.000	0.000
	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	0.000	0.000	0.000

数值 1 表示该域的材料现为屈服。数值 2 和 0 表示材料现为弹性，通过绘位移矢量及速度等值线图，可以得到一幅更好的已屈服材的几何图形。首先，设置屏幕为彩色方式。如果你仅有单色屏幕，为了建立着幅图应不理睬以下两个命令：

```
flac>set CGA(或 Set EGA)          flac>set pal=0
```

而键入

```
flac>plot xv z int=1e-4 yel dis red bo
```

开关字 Z 消除了零等值线区间，而区分类 int=1e-4 把该等值线区间设置为 1×10^{-4} m/sec。

为了获得一幅笔式图(假使你已恰当的连接了笔式绘图机——见 POLT 命令)，应在上一个命令行的 POLT 后面，了解插入 PEN 字。

崩塌时，在茎脚下面的 y 向力。由以下命令给出：

```
flac>print yreaction
```

也可以用以下命令绘出图形：

```
flac>plot rf
```

屈服的平均应力，可取为 y 力除以截面积，与精确解 5.14×10^5 pa 相比较，共值为 $q=5.17 \times 10^5$ pa。因此，即使相当粗略的离散，取误差离真实解小于 1%。

时间关系如图随着时间而增加的位移，表示模型已没有达到平衡，而是现行崩塌。

有关这个问题输入方面的几点最后说明是必要的。Solve 命令的解的极限，已对默认极限作重新定义。最后，应注意，这个数据文件能否建立在硬盘上，先在运用程序时调用，而不是以交互式方法使用。利用编辑器把相同的数据组键入一个文件（如 Foot.DAT），并通过以下命令来调用：

```
flac>Call foot.DAT
```

当 flac 调用它时，用户会看到依次执行的每一行。如果你希望将出现在哦上的信息，记录在一个硬或软盘中，直接利用命令

```
flac>Set log=on
```

所有打印到屏幕上的数据，将存入硬盘文件 flac.log 中。

最后，命令 save foot.sav 将建立一个再启动现行模型状态的文件。为了再启动一个保存的状态，在默认驱动器上直接利用 Resto 命令(如，flac>Rest foot.sav)。

7.2 例 2: 粘性摩擦土的边坡稳定(Slope Stability for a Cohesive and frictional Soil)

在工程土力学中遇到的另一个常见问题，上有摩擦土体的边坡稳定。在本例中，我们运行两个实例研究。第一，用陡于砂的休止角（angle of repose）的初试边坡，当模拟无粘接力的砂。当然，这个边坡应崩塌，而我们希望给出当它发生崩塌时的进程。第二，我们给这个材料附加一个晓得粘接力，为了确定它是否稳定再进行考虑。

我们将利用一个简单的例子，并认为土为均匀的，这里，可以利用解析及图解法，来确定边坡的稳定及安全系数。flac 的本域在于它能考察更复杂的边坡几何条件，比如，可以存在几层不同材料的土限。通过对不同的域规定不同的材料模型，考察这类问题并不费力。

本例说明了一些网格生成功能，以及域的“开挖”方法的使用。以下命令序列是用于初始化边坡及建立一个重新启动文件。（边界条件及/或材性可能不同于原有的）：

```
tit
```

```
*Granular Slope under gravitational load
```

```

sr 20,10

*Mohr-Coulomb Model

m m

*Warp grid to form a slope—first use line command to form slope face
gen line 5,3 9,10

*Mark area of slope in front of face so that the regions are formed
mark i=1,6 j=4

>null region in front of slope
mad null reg=1,10

*sail properties—note large cohesion to force initial elastic
*behavior for determining initial state. This will prevent
*Slope failure when initializing the gravity stresses
prop s=0.3e8 b=1e8 d=1500 fri=20 coh=1e10

*displacement history of slope
his nste=1

his ydis i=10 j=10

*displacement boundary condition x
fix x i=1
fix x i=21
fix x y j=1

*apply gravity
Set grav=9.81

*solve for initial gravity stresses
Solve

*reset displacement components to zero
ini xdis=0 ydis=0

*Save initial state
Save hill1.sav

*set cohesion to 0
Prop coh=0

```

*Use large strain logic

Set large

Step zoo

Save hill2.sav

Step zoo

Save hill3.sav

Return

设置了 20×10 个域的初始方形网格。注意，除非用户另外定义，默认值指定该初始的尺寸为 x 向 20 个单位，y 向为 10 个单位，规定各域为一个 Mohr-Coulomb 本构模型（因为没有给定范围），并是有以下特征：

密度 density 1500 kg/m^3 剪切模量 shear modulus $3 \times 10^8 \text{ pa}$

体积模量 bulk modulus $1 \times 10^8 \text{ pa}$ 摩擦角 friction angle 20°

粘结力 cohesion $1 \times 10^{10} \text{ pa}$

你会注意到，最初我们规定了一个很大的粘结力。通过复查显示模型工作方式，能看出这样做的理由。这时，我们必须形成一个初始网格，并把重力作用于各网点，且让重力应力达到平衡。因为这个模型事实是动力的，我们通过时间来步入，使材料团结（consolidating the material），直到各网点的速度很少为止。对于大多数问题，我们希望尽可能快地发生这个团结过程，通过在团结过程中，要求具有弹性的材料，就可以做到这一点。一旦各应力已平衡，我们就可以规定选用任何材性、开挖、施加的荷载等，并继续其模拟过程。在这里具体说明的例题中，最初，我们指定了一个塑性本构模型，但设置了很高的粘结力，以便迫使材料具有弹性行为。一旦这些应力已达到平衡，我们可以重新定义要求的粘结力值。这就免得去重新定义平衡后的本构模型及性质，以节省一些输入步骤。如果先把一个初始的弹性模型用于网格的团结，而后改变为 Mohr-Coulomb 模型、并定义材料的摩擦及粘结力，也能起到相同的作用。用作初始化一个重力荷载网格的上述两个方法，都是可疑的，由用户自己选用。不过，重要是用户用遵循图所说明的一般求解过程。

我们已经定义了基本网格，现在必须将它变形为边坡形状，且让土壤在边坡

的下面。这可用 QEN 命令办到。

首先,我们定义一根我们将用于定义可能发生的边坡边界的内部直线。其命令为: `flac> gen line 5,3 9,10`

它构成一根始点 $(x,y)=(5,3)$ 而终点为 $(x,y)=(9,10)$ 的直线。你可以绘出网格以验证所发生的那根内部直线。应注意,如果生成实线,该线的两个端点应与已有的网点重合如果它们不在正确位置,你可以在利用 GEN 命令以前,(用 INI 命令)来改变个网点的位置。其次,我们连接使没有切断边坡脚 (slope toe) 的边坡左边的区域失效。这由建立一个“region”来实现(即,我们需要把网格划分为由一个边界分开的两个区域)。你将注意到,定义边坡面的直线,始于网格内部,且必须延伸至左边界。有两种方法能延伸这个边界。可以用另一个 GEN LINE 命令,网格的左侧面向边坡脚延伸一条水平线,或可以对这根水平线作记号(MAKE),以通知 FLAC 是一个存在的边界。这里,我们将利用 MAKE 命令。输入 (the entry)

```
flac>mark i=1,6 j=4
```

将把沿 $j=4$ 从 $i=1,6$ 的一条边界线作上记号。现在我们成功的定义了两个区域:边坡及边坡上面已取消区域。这可用发布 Pr MAKE 命令来验证。用以下命令来拆除位于边坡以上的区域:

```
flac>mad null region=1,10
```

它将使域 1,10 所在的区域失效。现在,试绘出网格以便看一下最后的结果。

下面,把重力加速度设置为 9.81m/sec^2 (向下为正)。所应用的边界条件,包括模型前面和后面的滚轴边界,以及一个固定的底边。现在我们要得到一个平衡重力应力的初始弹性状态。用默认极限值的 Solve 命令可以办到。当达到 100N 的不平衡时,得到平衡。作为考察运行进展的一种方式,用户可以要求边坡顶点某一网点的 y 位移史。用命令 HIS 来实现它。当命令 Solve 已达到它的极限值时,试绘出这个位移史,以验证网格的确处于平衡状态,(即,plot his 1)通过以下命令,可以得到弹性应力的一个故值或图形表示法:

```
flac>print Sxx Syy
```

```
flac>plot Sxx yellow bound*
```

```
flac>plot Syy yellow bound*
```

这时，建立一个保存当前文件平衡状态的再起文件是聪明的（ smart ）。以防万一在进一步运动时，改变材料参数或本构模型，这样做便可节约时间。完成这些研究仅须重新起动弹性状态，因此，免除了重新形成平衡状态的必要性**。以下命令将在默认驱动器上建立一个名为 Hill1.sav 的重新起动文件

```
flac>Save hill1.sav
```

这时，我们应终止（ quit ） flac，并通过直接键入以下命令，重新把保存的状态存在后一个时期处：

```
flac>restore hill1.sav
```

在完成时间步长处，该模拟仍在 RAM 中，因此，我们可以从这里继续运行。

对于模拟的下一步阶段，当考虑可能的破坏过程时，我们要设置实际土壤的材性及时间步长。在这一过程期间，将绘出边坡递增位移图形。为了避免分析数据中的任何混淆，我们不能只了解位移变化，而不顾知道模拟开始以来的累计位移（ cumulative displacements ）（即，时间步长=1 以来的位移）。在计算过程中，显示法不要求位移，但作为方便用户，保留了每个网点的累计总位移。因此，在计算过程中，我们可把任何点处的位移调整为零（即，初始化），而不会影响最后得到的解答。为此，利用命令：

```
flac>ini xdis=0 ydis=0
```

这样，绘出的位移，或打印出的位移，将仅表示从前状态以来的位移变化。

其次，利用 PROP 命令来设置各个域的材性。对于目前由土壤组成的各个域来说，粘结力设置为零。再次用 Region 命令来实现。最后，我们把计算模型设置为大应变，以便提供随着边坡破坏呈现出的精确的几何表示。因为边坡崩塌将由于土的休止角（ Angle of Repose ）出现，我们不要利用 Solve 命令（不会达到平衡的）***。利用 Step 命令，并同时直接时间一步入一个小的时间步长数的模拟来停止打印或绘出这些中间阶段，这是很容易的。这里，我们看到了显示法在能处理在整个时间中决不会收敛于一个平衡状态的高度非线性问题方面的能力。

试以 200 个时间步长间隔进入步长，接着便打印及绘制其结果，其命令为：

```
flac>Step 200
```

```
flac>print xv yv yd state
```

```
flac>plot xv z yellow displ yed bound
```

以下一组图形 表示出了在 75.475 及 1275 个时间步长时 ,以上仍给出的 Plot 命令的各个结果。这些图形清楚地说明了边坡的逐渐崩塌。

* 假设在绘图前，屏幕已初始为彩色屏幕，调色板为 0。

** 这里值得提到，特别是当模拟复杂开挖或材性变化时，建设足够的利用重新启动任选两页。

*** 当然，如果采用了较大的不平衡力，或一个较小的时间步长数，或总运行时间，可以利用 Slove 命令。

图 7-5 表示由以下命令产生的初始网格图：

```
flac>plot pen gird(用自动窗口绘网格)
```

然后以 zoo 补充时间步长问题。这时键入

```
flac>step zoo
```

图 7-6 表示了时间步长为 475 时，在位移矢量及边坡边界上的 x 速度矢量。这个图是由以下命令产生的：

```
flac>plot pen xv z red disp max=0.4 gre boun gre
```

你能清楚的看出边坡崩塌的各起点。X 速度等值线用图形说明了屈服面的发展。图 7-7 是 ;另一个 800 时间步长以后的图形。这里 ,企图达到土的休止角(angle of repose) 时，边坡正在崩塌。显然，随着继续延伸时间步长，各网点的位移变成与事实不符的（这是一个连续介质码）。FLAC 能自动地校核过大网格？，如果发出并显示出不损伤运行错误信息，它会停止运算过程。

用户必须了解到，各大畸变是有意的是有限度的。当各域的形状变的畸形到太大的程度时，所得到的计算可能变得不准确。

完成以上模拟以后，应键 `flac>new`

而一个新的运行 将被初始化。通过规定土的一个小的粘结力来进行另一个模拟，可以得到一个有趣的比较。因为我已保存了初始状态，我们只需从这个时间步长开始重新启动：

```
flac>rest hill1.sav
```


随后紧接早先用过 的方法，应键入：

```
flac>ini xdis=0 ydis=0  
flac>prop coh=7e4 regin =10,1  
flac>set large  
flac>step zoo
```

如前所述那样的问题，以便考察变化各特征的后果。

7.3 例三：端部有剪力的弹性悬臂梁 (Elastic Catilever Beam with End Sheer)

以下一个例题，分析了一个悬臂梁的弯曲，在它的端面作用一个剪力。虽然象 flac 这样连续介质代码不最适宜于 (be not best suited) 分析包括弯矩的结果问题，但这个问题提出了一个颇难以证实的试验 (this problem presents a fairly difficult)

所给出的输入数据给于以下命令序列中：

```
set log on  
tit  
beam with end shear  
gr 30,6  
*  
*5:1 beam with 6 zones across width  
*  
m e  
set p-stress col=132  
prop d=1000 balck=1e8 shear=0.5e8  
*clamp end of beam  
fix x y i=1  
*apple end shear  
apple yforce=-0.142857e5 i=31 j=1.7 *(load of 1e5 units)  
step 3500  
set log off  
save colan.sav
```

return

一个 30×6 个域的网格代表了平面应力梁。输出也按 132 列配置。梁的一端 x,y 向固定,而其余的为无约束。 $20 \times 10^5 \text{ N}$ 的负 y-力作用于梁的另一端。该荷载分布于 7 个端点中,每个网点为 $-0.142857 \times 10^5 \text{ N}$ 。虽然这个例题进行颇慢,约 3500 时间步长后得到了收敛。图 7-8 说明了沿渠的最后 y-位移最后位移为 0.41m,与解析解 0.39 相比,误差为 5%。

7.4 例 4: 弹性、弹塑性及横向各向同性岩石介质中,受初应力作用的圆形隧洞

(Circular Tunnel In an Elastic, Elasto-Plastic, and Transversely-Isotropic Rock Mass Under Initial Stresses)

本例说明了几种本构模型以及 GEN 命令的应用,这里,用 GEN 命令去生成一个网格坐标系,应在平面应变的无限岩石介质中,构成一个隧洞的原型边界。

通过仅考察四分之一洞孔,显示了把对称条件引入模型的方法。在本例中,也说明了利用初始应力及应用边界应力,来提供现场应力 (in-situ field stresses)

7.4.1 弹性岩石介质 (Elastic Rock Mass)

本例的输入数据给予了以下清单中。该文件可以建立在硬盘中。并可以利用 CALL 命令读出,或可以用交互式将它键入。

```
tit
Hole in elastic medium
* generate the grid
gr 20,20
* elastic model
m e
*give initial grid coordinates and grade mesh to
boundaries
gen 0,0 0,6 6,6 6,0 rat 1.2 1.2
*generate a quarter circle in lower left hand corner of grid
```

```

*using the arc function
gen arc 0,0 1,0 90
* elastic properties
prop s=2.9e9 b=3.9e9 dens=2500
*initial stresses
ini Sxx=-30e6 Syy=-30e6
*boundary conditions for a quarter symmetry problem
fix x i=1
fix y j=1
fix x y j=21
fix x y j=21
*monitor history of displacements of tunnel periphery
his nste=1
his ydis i=1 j=12
his xdis i=12 j=1
*solve for initial stress state
solve
*now excavate hole
mod null region=1,1
*time step to equilibrium
step 500
*create a save file
save ehole.sav
*return to interactive mode
return

```

对于弹性本构规律规定了一个 20×20 域的网格 (400 个单元)。我们希望有一个半径为 1 米的隧洞, 且将该隧洞周边 (periphery) 精细地离散, 这样, 其结果是合理的。为此, 我们想要在包围隧洞区域内, 具有网距约为 $1/5$ 半径的 x-及 y-网格, 但我们也需要相距约为 5 倍半径的边界 (boundaries about 5 rad

away), 以便避免孔洞对位移的影响。为了建立一个网距 0.2 米的网格, 用 GEN 命令来在定义 x-及 y-向 0~6 米的网格 7 坐标。如果你想证实 GEN 的结果, 应利用 print x 及 print y 命令。

用 GEN ARC 命令来构成隧洞周边。该命令的效果可以通过设置窗口

```
flac>wind -0.5,2 -0.5,2
```

来观察。并可以通过绘出网格来观察。在模型中的初应力已平衡后, 我们将开挖隧洞周边内部的各个域。

其次, 各边界条件必须设置成体现出沿左边及下边界的对称条件, 及位于“无限远”处的固定位移边界(顶边及右边)。为此, 沿 $i=1, j=1, 21$ (左边) 及 $j=1, i=1, 21$ (右边) 边界, 布置滚轴, 而沿 $i=21, j=1, 21$ (右边) 及 $j=21, i=1, 21$ (顶边) 边界布置固定点。有了已固定在空间中的网格后, 可以利用命令 initial Sxx=<value> Syy=<value> 来施加? 地应力(in-situ stresses)。

如同上一个例题一样, 在开挖以前这些应力必须先平衡(因为是客观事实)。这只需要一个时间步长, 因为 FLAC 直接把这些应力装入其数组的适当位置。这可以用以下命令之一来完成

```
flac>step 1
```

及

```
flac.>solve
```

你可以用 prin Sxx 或 print Syy 命令来核实所得到的原有应力状态*。此时, 作好建一个 save.file, 这样, 可以从这个初始状态来重新起动该文件。

再其次, 通过使隧洞各域失效的方法来建立开挖。这可以用一组 model null 命令来办到。为了检验你已失效的那些原有域, 试绘出网格*。整个网格及开挖区的放大图, 如图 7-9 示。这一图形由以下命令生成:

```
flac>plot pen gird * plots full gird
```

```
flac>wind -0.5,2 -0.5,2(建立小窗口)
```

```
flac> plot pen gird(绘开挖周围的网格)
```

现在, 把问题步入平衡。对于小应变逻辑的 20×20 网格, 在带慢速 8087 (4.7MHz) 芯片 (chip) 的标准 PC 机上, 约需 30 秒/时间步长, 才能达到平衡解 (取决于你定义的平衡)。

最好的做法是，绘制遭受最大位移变化各处（即，开挖边界处）的位移史图，以确定模型朝平衡的进展。你将能迅速的看出问题的收敛特征，你可以用 PLOT 命令在屏幕上绘出应力及位移。记住，如果你想用彩色屏幕，你必须键入 SET CGA（或 SET EGA），并使用你所酷爱的调色板选择。

把这些结果与平面应变无限大板中有孔洞的解析解（kirsch）相比较，其结果如图 7-11 所示。如你所能看到的，这些解比较起来是相当好的。引起的误差颇趋向于隧洞的域的划分。用一个 30 × 30 域的模型作同样的运行，其吻合度在 5% 以内。

7.4.2 弹塑性岩石介质（Elasto-plastic Rock Mass）

下面，对同一问题进行比较，但利用弹塑性本构规律。唯一需要调整的输入数据是本构定律反其特征定义。为此，应把读取的输入文件的第二、第三行改为

```
flac>mohr
```

```
flac>prop s=2.8e9 b=3.9e9 d=2500 fric=30
```

用 solve 命令来使各应力达到平衡，并需要一个时间步长。用以前的 mode null region 命令来挖隧洞。最后，用 initial xd=0 yd=0 命令可以重新设置各位移。对于平衡的模拟，需要 500~600 时间步长——或在标准 PC 机上约为 20~3 小时求解时间。在 AT 机上，或在带序协处理器（6-12MHz）的等数机上，或当利用有提高了速度的处理板的商业用计算机时，其时间将显然地减少。

对于塑性情形，孔口周围的应力分布图 7-12 示。该图明确的说明了隧洞周围形成的切向应力数值，已超过它的极限。理论的和预测的分布图与理论解（BRAY 1967）相当匹配。破坏区半径由下式给出：

$$r^{br} = a \left[\frac{2p - q_u + [1 + \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})]c \cot \phi}{[1 + \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})]c \cot \phi} \right]^{1/\phi} \quad (7-1)$$

式中 a——隧洞半径

c——粘结力

p ——远端场的流体压力

$$\theta = \frac{\tan(45 + \phi/2)}{\tan(45 - \phi/2)} - 1$$

q'' ——单轴压力强度

ϕ ——摩擦角

塑性域中的切向及径向应力为：

$$\sigma_{\theta} = c \cot \phi [(r/a)^{\theta} - 1] \quad \sigma_r = c \cot \phi [\theta(r/a)^{\theta} - 1] \quad (7-2)$$

而弹性区的应力为：

$$\sigma_{\theta} = p + (\beta/r^2) \quad \sigma_r = p - (\beta/r^2) \quad (7-3)$$

式中
$$\beta = \left[\frac{[tg^2(45 + \phi/2) - 1]p + q_u}{tg^2(45 + \phi/2) + 1} \right] r_{br}^2$$

这时，用（7-1）式的破坏区半径为 1.85m。你可以考察用 flac 来预测的屈服区半径范围，这时，键入

```
flac>print state
```

或

```
flac>polt state
```

各状态指示器表明，屈服区约为 1.6 米，且与解析是合理的。再后，误差是由相对正常网个引起的。一个 30×30 域模型吻合在 7% 以内。

该问题的主应力矢量，位移矢量及剪应力等值线绘在图 7-13，7-14、7-15 中。这时图形是由以下命令产生的：

```
flac>set cga pal=0(如果你有一台彩色监视器)
```

```
flac>wind -0.5,2 -0.5,2
```

```
flac>plot pen str bou
```

```
flac>plot pen disp max=0.3 red bou green
```

```
flac>sclin 1 0,0 5,5
```

```
flac>plot pen Sxy z boun green
```

如果你想只有一幅屏幕图形，便去掉关键字 PEN。

7.4.3 横向各向同性岩石介质

最后一个算例是对横向同性岩石介质中的隧洞进行的，它受有双轴初始应力。隧洞的位移解是由 EISSA 给出的。在本例中，用于使初值达到平衡的边界压力如图示。如前两个隧洞例题一样，我们用同一网格从弹性岩石介质开始。键

入的数据与前两个例题一样，不同处为：材料模型及性质必须改变，而且不是用固定边界条件，应施加边界压力，以维持现场应力。应注意，这里的对称性只在各向异性角等于 0 时才有效；如果它等于某个角度，其对称性不切合实际的。

通过固定沿 $i=1$ 线的 x -速度及沿 $j=1$ 线的 y -速度，再次取 $1/4$ 对称部分。为了提供边界荷载，我们在各对称边界上利用 Apply 命令：

```
flac>apply press=1.0e6 i=1,21 j=21
```

```
flac>apply press=0.5e6 i=21 j=21,1
```

这些命令把一个双轴压力作用在边界上。应力的方向由受应力作用的各节点的编号来控制。（详见 APP-命令）。我们也用命令 Init $S_{xx}=-0.5e6$ $S_{yy}=-1e6$ 来建立初应力状态，以致于在 1~3 个时间步长内平衡。通过键入 print S_{xx} S_{yy} 可以随时考察这些应力。

一旦这些应力已达平衡，应利用以下命令来 材料模型及给出新的特征：

```
flac>model anis(把各域设置为各向异性模型)
```

```
flac>prop s=0.1103e6 xm=0.976e6 ym=0.953e6
```

```
flac>prop nuy=0.167 nuz=0.165 dens=2000
```

如以前一样，现在应使各位移为零，并开挖隧洞。利用 step 或 solve 命令。这时可以让问题？到平衡。约需要 1000 个时间步长，在标准 IBMPC 机上，每个步长约花 30 秒。

所得到的主压力及位移矢量图形，重叠在边界轮廓线上，如图 7-17 及 7-18 所示。这些图形由以下命令组产生的：

```
flac>wind -0.5,2 -0.5,2(设置一个小窗口)
```

```
flac>set cga pal=0(设置彩色屏幕。0 号调色板)
```

```
flac>plot pen str boun green(绘主应力)
```

```
flac>plot pen max=4 red bo gre(绘位移矢量)
```

如果只要求一幅屏幕图形，取消关键字 PEN。如果你有一抬双笔绘图机（Two-pen plotter），命令行中的各种颜色，以便改变每一个新图形所遇到的笔颜色（pen color）。主压力总是以 1#颜色绘制，而主拉应力将用 2#颜色绘制。

图 7-19 绘出了计算与解析位移，它们约为于 x 轴所成角度的函数。本例的最大误差接近 1%，它主要是由闭合的邻近应力边界及粗糙的网格引起的。

8.0 运行 FLAC 时值得注意的重点或注意事项 (Important points or cautions note when running FLAC)

本节详述在运行 FLAC 中的某些难点, 我们已发现这些难点, 对某些用户来说, 可能构成错误, 随着用户反馈的继续, 我们将扩充及本节内容。

8.1 初始化各变量 (Initializing Variables)

通常的做法是, 在两次运行之间初始化各网点的位移, 有助于一个模型的互相贯通, 该模型采用了许多不同的开挖阶段。这是可以办到的, 因为在计算中, 代码不要求各种位移——方便用户, 可以由网点的速度求出位移。

然而, 初始化速度是一件难事, 如果把网格的速度设置为常数值, 直到重新设置为止, 我们将仍为这个常数值。因此, 不准把网点速度初始化为零, 这会直接清除它们——影响模拟结果。

8.2 改变材料模型 (Changing Material Models)

在一个模拟过程中, FLAC 对你可以利用的不同材料模型的个数, 是有一个限制的。代码已选定的允许用户对每个域(如果你愿意) 具有一个不同的材料(对你的 FLAC 版本的最大号码网格而言)。不过, 如果对于最大型问题(larger-Sized problem), 你要改变整个网格的材料模型, 可能回出现内存的问题。

8.3 运行含现场应力和重力的问题(Running Problems with in-situ field stresses and gravity)

有许多问题必须把现场应力及重力作用于模型。深埋的随挖随填的采矿, 就是这类问题的一个例子。这时, 岩石的质量遭受到强现场应力作用(即, 可略去限定网格范围的重力应力), 但其就位的回填支柱, 将在深井开采中产生重力应力, 在荷载下矿井可能崩塌。在这些模拟中应注意的重点(如同作用上重力的任何模拟一样), 至少是网格上的两个点必须固定于空间中——否则, 整个网格会因重力而平移。如果你曾注意到整个网格沿负 y-方向平移, 那么, 可以判定, 你忘记了把网格固定在空间中。

如果你想只有随深度变化的场地应, 应利用含深度变化任选项的 INITIAL 命令:

```
flac>ini Sxx=-30e6 (Var=0,10e6)
```

这将产生从网格底部处 ($i=1, j=1$) 为 $-30e6$, 变化到网格顶部处 ($i=n, j=n$)

为-20e6 的 σ_{xx} -应力，因为 i,j 范围没有给出，FLAC 取为整个网格。在本例中， σ_{xx} -变化（ σ_{xx} -variance）设置为零。

FLAC 程序说明书

FLAC 程序说明书

2004-8-26