

教程 5 浅基础承载力

目录

1. 预览.....	2
1.1 教程目的.....	2
1.2 问题详述.....	2
2. 几何和网格.....	3
2.1. 一般设置.....	3
2.2. 几何.....	3
2.3. 2D 网格.....	3
3. 极限压力分析.....	4
3.1. 模型设置.....	4
3.2. 求解.....	7
3.3. 结果.....	7
4. 确定极限压力的其它计算方法.....	9
4.1. 荷载控制分析.....	9
4.2. 位移控制分析.....	11
4.3. 其它分析.....	12
4.4. 结果.....	13

1. 预览

浅基础单元能承受的最大荷载（称为承载力）是土体的粘聚力和内摩擦角以及地基的宽度 B 和形状的函数。在本教程中，基础是刚性的圆形基础（直径 $B=1$ 米），地基为不排水均质土壤，服从 Tresca 准则（不排水粘聚力 C_u ）。

CESAR 有助于浅基础的设计。利用有限元方法，我们将搜索系统的极限平衡。

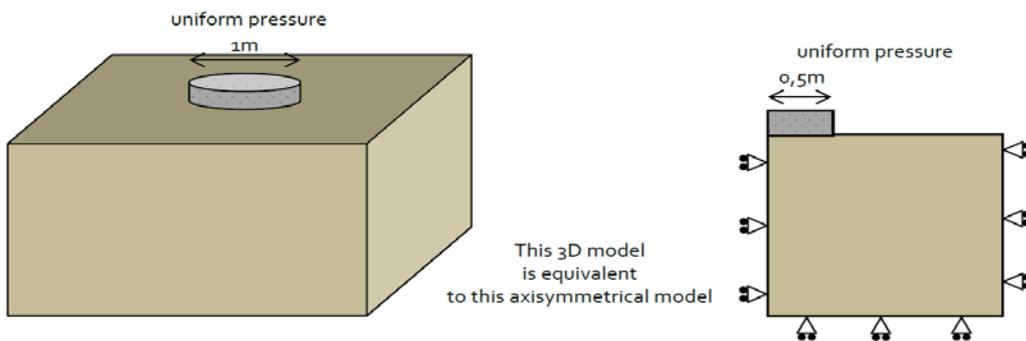
1.1 教程目的

- 学习如何设计网格
- 熟悉非线性分析的增量-迭代过程
- 确定力的安全系数
- 使用后处理工具

1.2 问题详述

一般假定

- 静态分析
- 土体的非线性行为
- 轴对称问题，即，仅建模和分析模型的一部分



材料属性:

假设土壤按照 Tresca 标准表现为刚性-完美塑性行为

	γ_h (kN/m ³)	E_u (MPa)	ν	C_u (kPa)	φ_u (°)	K_o
Soil mass	20	50	0.45	20	0	0.5

2. 几何和网格

2.1. 一般设置

设置长度单位为 m，力为 kN，位移为 mm，可见网格为 1m (dX=dY=1m)

2.2. 几何

点击“点”，输入“0, 0”，应用，然后勾选“连接到点”，输入“0.5, 0”，应用，重复操作剩下坐标，“6, 0”、“6, -10”、“0, -10”、“0, 0”。

2.3. 2D 网格

网格密度：

1. 选择 A 边，常数分割，分 5 段，应用
2. 选择“渐进分割”，勾选“第一/最后段”，分别输入 0.1、1，点击 B 边，点击 E 边
3. 选择“固定长度分割”，输入 1m，选择 C 边，应用，选择 D 边，应用

！点击的位置定义了初始分段的大小，软件的算法会自适应给定最合适的值。

划分网格：

插值算法选择二次插值，单元类型选择三角形

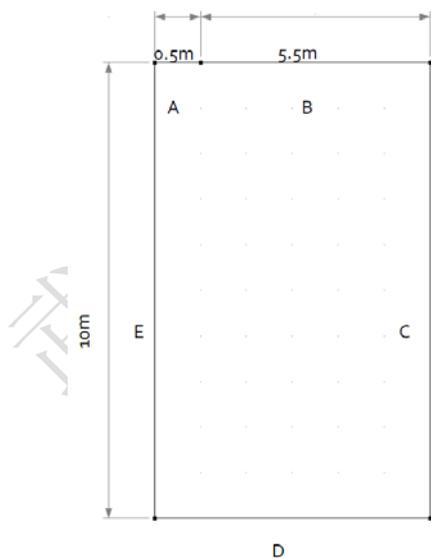


图1：几何



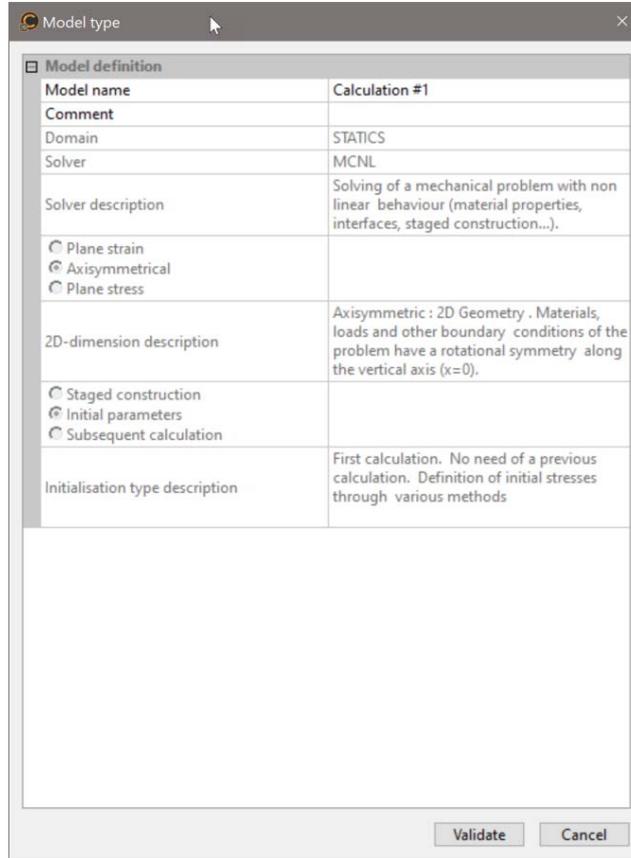
图2：网格



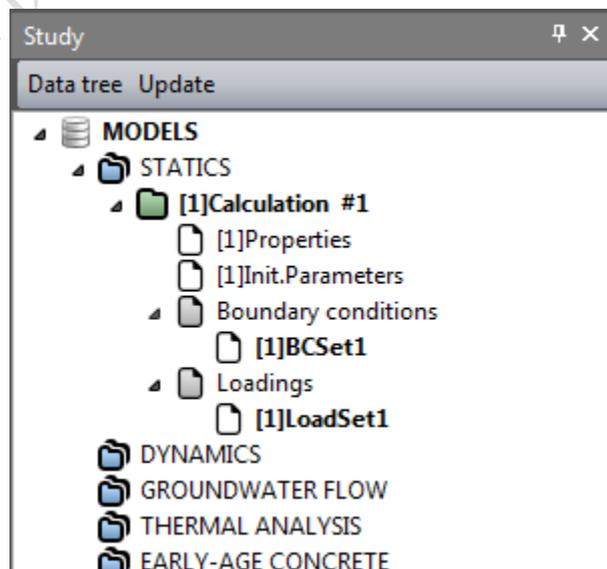
3. 极限压力分析

3.1. 模型设置

新建模型，命名为“计算 1”，选择 MCNL，勾选轴对称、初始参数，点击应用



现在，数据树如下图所示：



实体单元材料属性:

新建属性集“土壤”，弹性选择“各向同性线弹性”，塑性选择“无硬化的莫尔-库仑”，输入如下参数:

	ρ (kg/m ³)	E (MN/m ²)	ν	c (MN/m ²)	ϕ (°)	ψ (°)
Soil mass	2000	50	0.45	0.02	0	0

指定数据集:

将“土壤”指定给 2d 单元

初始化应力场:

选择地应力，输入如下参数:

Height (m)	Volumic weight (MN/m ³)	Ko_x
0	0.02	0.5

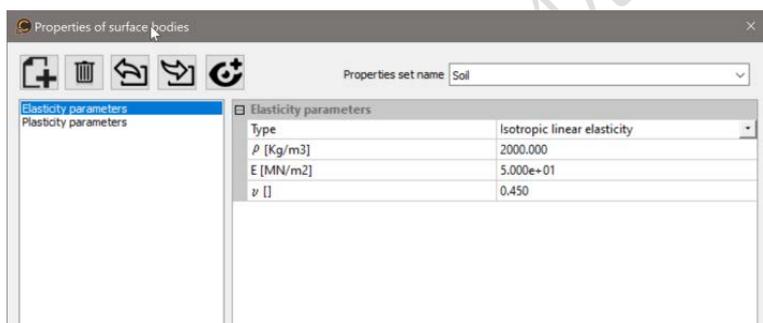


图 3: 输入属性集

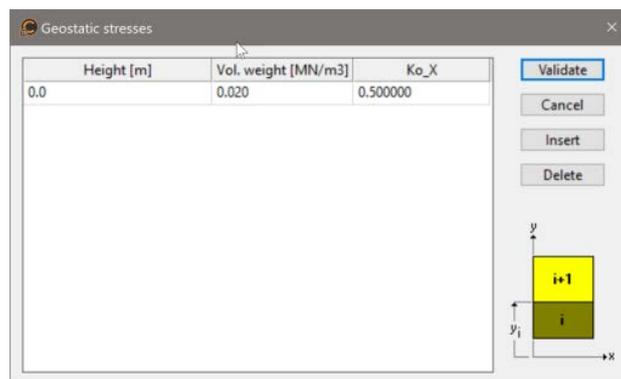


图 4: 输入初始地应力

边界条件:

点击“侧面支撑/固定底座”

荷载:

点击“线性分布荷载”，勾选“均匀压力”，输入“0.120MN/m”，点击线段 A，应用。

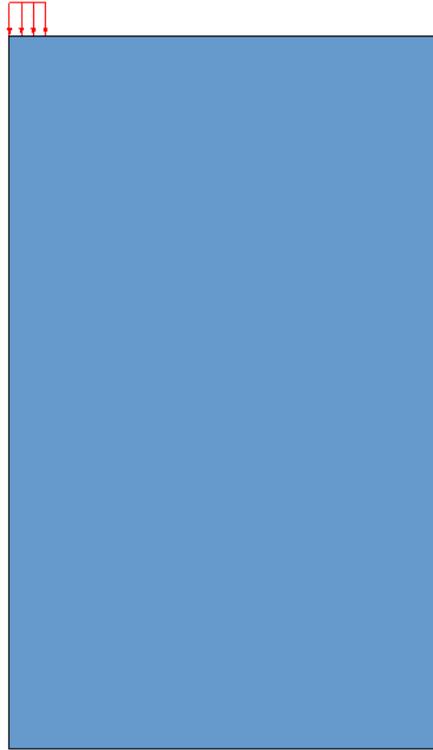
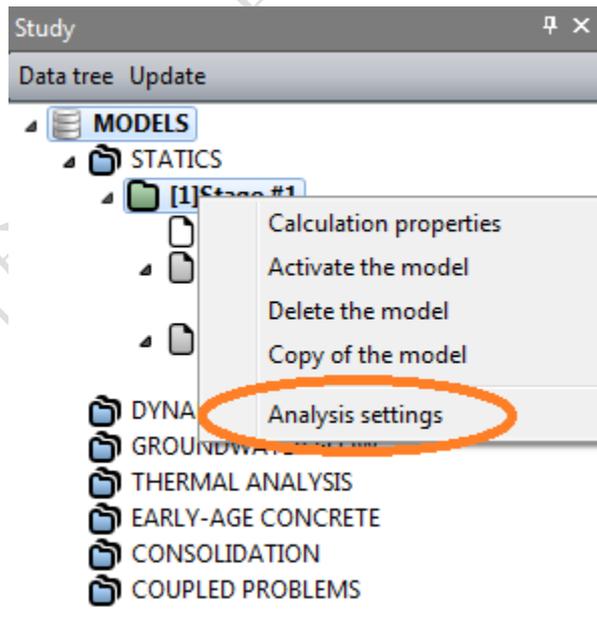


图 5：显示均匀压力

分析设置：



在一般参数部分，输入如下值：

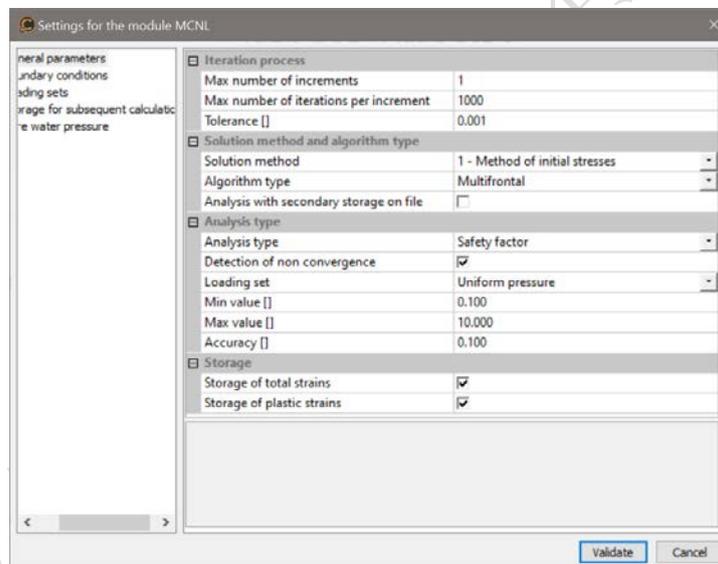
- 迭代过程：
 最大增量步： 1



每个增量步最大迭代次数：500

容忍度：0.001

- 求解方式：1-初始应力法
- 算法类型：Pardiso
- 分析类型：安全系数
 - 勾选“不收敛检测”
 - 设置“最小值” 0.1
 - 设置“最大值” 10
 - 设置精度 0.1
- 勾选“保存塑性应变”
- 勾选“保存总应变”



3.2. 求解

勾选阶段 1，点击确认

3.3. 结果

结果为安全因子，显示在项目窗口中

根据“Undrained bearing capacity factors for conical footings on clay”，G. T. Houlsby and C. M. Martin, Geotechnique 53, No. 5, 513-520, 2003，极限承载力计算结果为：

$$P=5.69 \times C_u=113.8\text{kPa}$$



计算的安全系数为 0.99，因此，极限压力为 118.8kPa，和理论值 113.8kPa 相差不多。

显示塑性应变尺寸：

1. 点击**结果栏**



2. 点击**结果类型**

- 选择网格变形
- 勾选等值图，在列表中选择 $|\epsilon_p|$ ，塑性应变
- 应用



3. 点击**等值图设置**

- 勾选“激活”，选择区域
- 勾选“等值线”，选择灰色
- 应用



4. 点击**位移设置**

- 选择一般，设置 100mm 用 2m 表示（放大 20 倍）
- 应用



5. 点击**图例**

- 选择等值图作为图例类型
- 勾选“图例边框”
- 应用

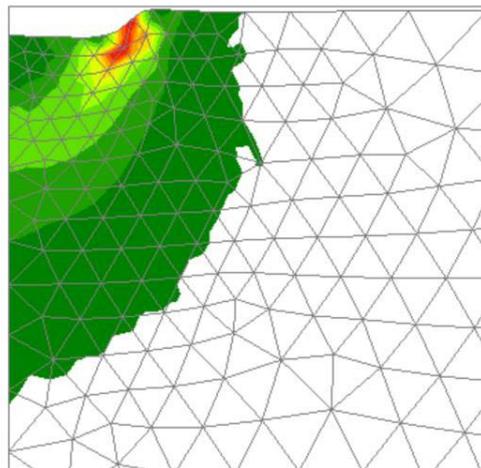


图 6：查看塑性应变场

4. 确定极限压力的其它计算方法

4.1. 荷载控制分析

该分析和前阶段类似，不同之处在于加载过程不是自动的，而是用户定义的模式定义：

复制计算 1，重命名为计算 2，选择初始参数，分享“属性、边界条件、荷载”，点击确定。

材料属性：

无变化

初始应力场：

无变化

边界条件：

无变化

荷载：

无变化

计算参数：

- 迭代过程：

 最大增量步： 12

 每个增量步最大迭代次数： 1000

 容忍度： 0.001

- 求解方式： 1-初始应力法

- 算法类型： Pardiso

- 分析类型： 标准

- 勾选“保存总应变”

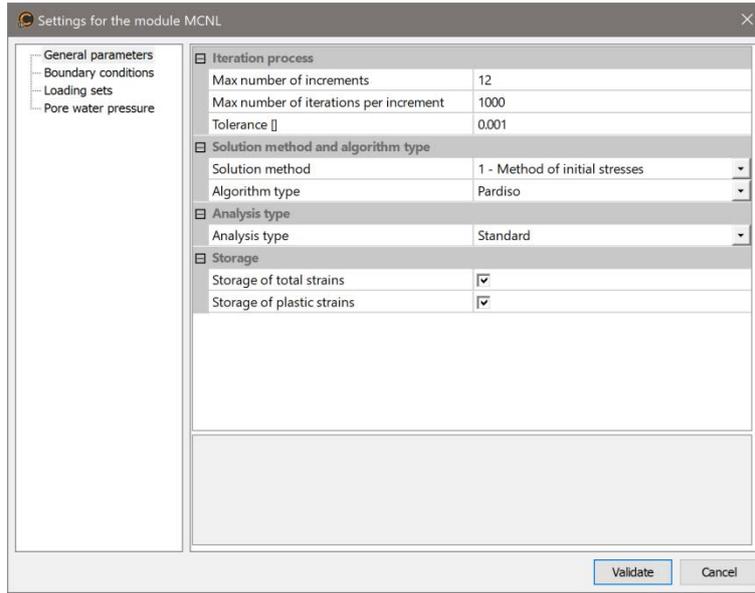


图 7：设置计算参数

求解：

点击分析，勾选阶段 2，确定

结果：

计算过程显示在项目窗口中，在列表文件中。

我们了解到，计算在增量 12 时停止，因为直到最大迭代次数（1000）时都没有收敛。这意味着在第 12 次荷载增量下，土壤无法达到平衡。

最后的荷载值为 $11/12 \times 120\text{kPa} = 100\text{kPa}$

极限压力值在 110kPa 和 120kPa 之间

```

-----
Iteration number 992  Convergence index (residual) = 0.11032E+00
Iteration number 993  Convergence index (residual) = 0.11029E+00
Iteration number 994  Convergence index (residual) = 0.11027E+00
Iteration number 995  Convergence index (residual) = 0.11025E+00
Iteration number 996  Convergence index (residual) = 0.11023E+00
Iteration number 997  Convergence index (residual) = 0.11021E+00
Iteration number 998  Convergence index (residual) = 0.11019E+00
Iteration number 999  Convergence index (residual) = 0.11017E+00
Iteration number 1000 Convergence index (residual) = 0.11015E+00

CPU time for iteration 12 ( 1001 iter.)      :    10.68 seconds
CPU time for output processing                :     0.02 seconds
    
```

**** STOP because of NO CONVERGENCE ****

STOP in EXMNL, IERRCS = 200

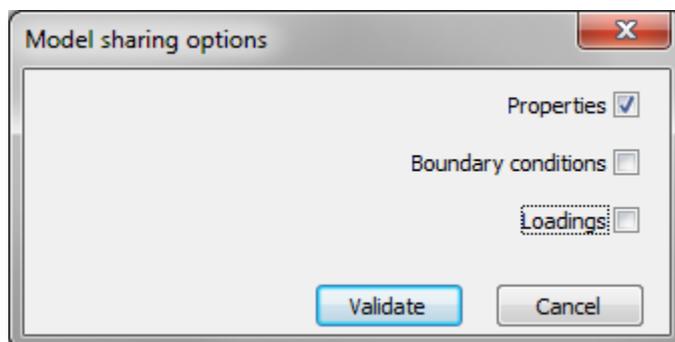
 END of analysis in EXEC mode

图 8：在计算结束时列表文件

4.2. 位移控制分析

模型定义：

复制计算 1，重命名计算 3，选择初始参数，点击确认，分享属性，不勾选边界条件和荷载。



材料属性：

无变化

初始应力场：

无变化

边界条件：

假定的位移就是一个新的边界条件集，在边界上的支撑没有变化。

在计算树中，右键点击边界条件，然后点击添加边界条件集，命名为“强制位移”，确认。在边界条件集中，选择“强制位移”，点击一般定义，勾选“v 强制”，输入-40，选择线段 A，应用。

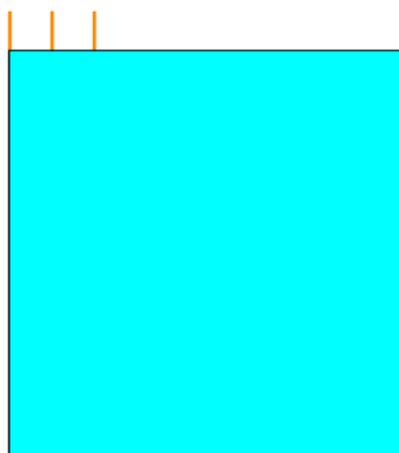
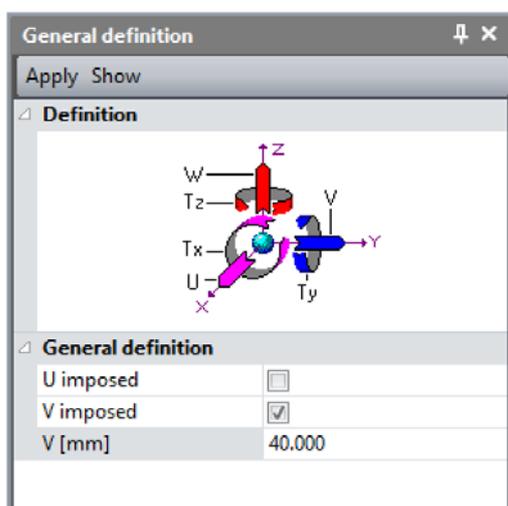


图 9：在应用强制位移后查看软件界面



荷载：

当我们使用强制位移时，均匀的压力是无用的。但是，我们复制了以前的模型，因此必须将其删除。点击荷载，选择线段 A，删除，重命名为无荷载。

计算参数：

- 迭代过程：
 - 最大增量步：20
 - 每个增量步最大迭代次数：500
 - 容忍度：0.001
- 求解方式：1-初始应力法
- 算法类型：多波前
- 分析类型：标准

💡在边界条件中，程序自动设置因子为 1，除以 20。因此，得到 40mm 除以 20，即 2mm 为一个位移增量步。

求解：

勾选计算 3，确认

4.3. 其它分析

4.3.1 可变杨氏模量线弹性排水分析

非线性分析可以用来估算在排水条件下的沉降，杨氏模量随深度的增量是需要考虑的重要参数。将模型分层几层（例如 2m，3m，5m），估算每层中点排水杨氏模量，使用 Ohde-Janbu 经验公式：

$$E = E^{ref} \left(\frac{\sigma_v}{\sigma^{ref}} \right)^N$$

土壤属性如下：

	γ_h (kN/m ³)	E (MPa)	N	v
Soil mass	20	10 at $\sigma^{ref} = 100$ kPa	0.7	0.33



4.3.2 可变不排水粘聚力非线性弹塑性分析

不排水粘聚力随深度的增加是需要考虑的一个重要因素。将模型上部划分为几个较薄的层，并使用以下关系估算各层中心的不排水粘聚力：

$$\varphi_u \approx 0$$

$$c_u = \frac{1}{2}(\sigma_v'^{ini} + \sigma_h'^{ini}) \sin \varphi + c \cos \varphi$$

土壤属性如下：

	γ_h (kN/m ³)	E_u (MPa)	N	ν	c_u (kPa)	φ_u (°)	K_o
Soil mass	20	50 at $\sigma^{ref} = 100$ kPa	0.7	0.45	22	35	0.5

注意 1：塑性区集中在土壤的第一米范围内，具有不同粘聚力的层必须足够薄才能得到较好的效果。

注意 2：使用 Ohde-Janbu 方程估算模型每层土的不排水刚度

4.4. 结果

荷载控制分析

第 12 步未实现收敛。这表明土体破裂。极限压力值在 110 kPa 和 120 kPa 之间。

位移控制的线弹性排水分析和可变杨氏模量

有限元分析得到的应力-位移曲线和参考答案吻合。施加给基础中心点的可变荷载如下图所示：

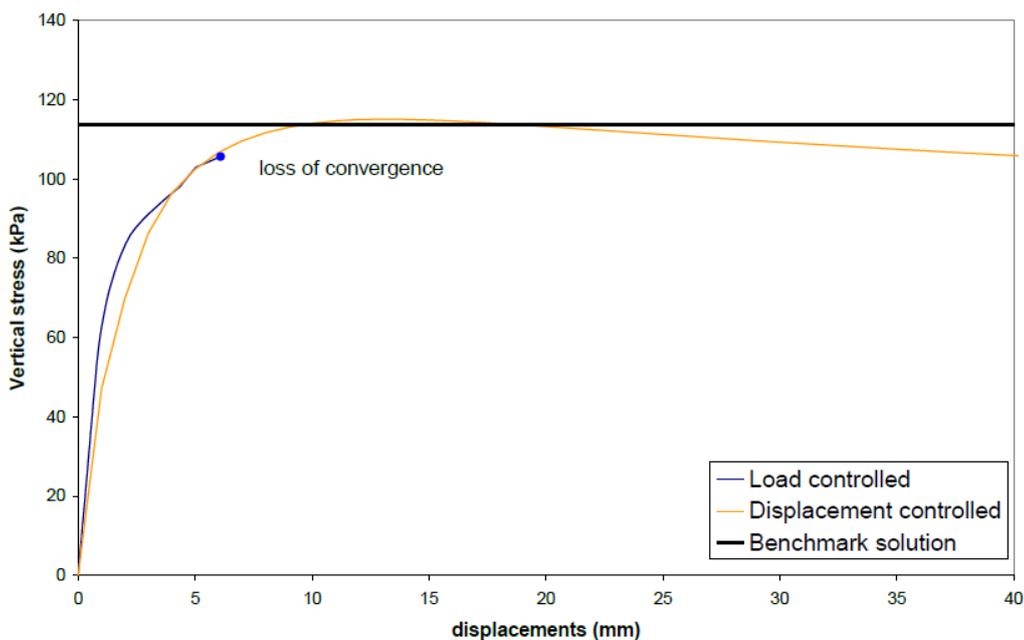


图 10：基础中心点应力-位移曲线

位移控制的非线性弹塑性分析和可变不排水粘聚力

土层顶面两米的结果如下，被分层了 3 个亚层（每层 667mm 厚）。图 11 显示了得到的应力位移结果。注意，在与分析承载力的交点处观察到曲线的不连续性，该分析承载力对应于第一个子层的粘聚力。

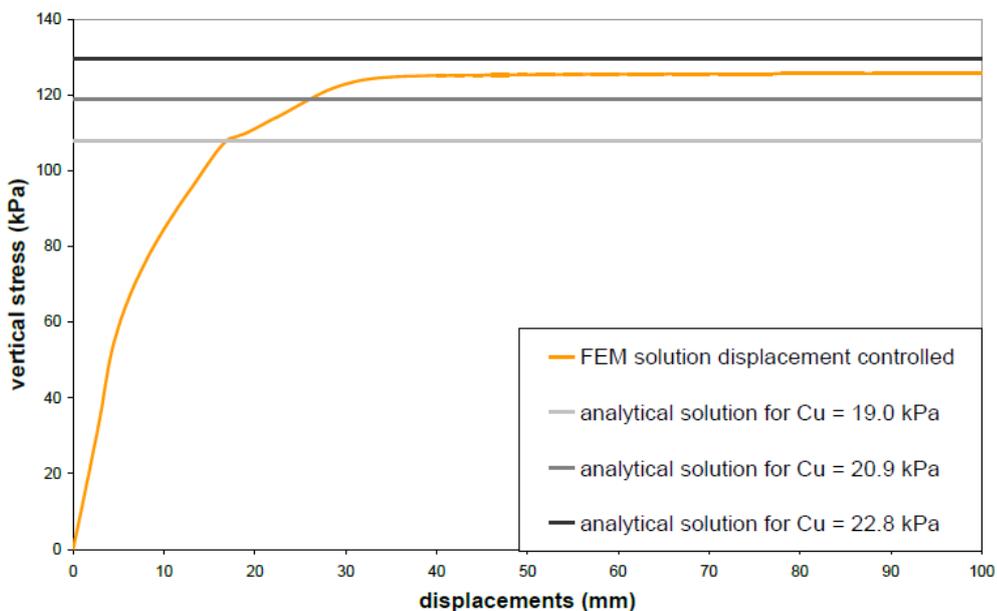


图 11：基础中心点的应力-位移曲线