

基于强度折减法的边坡稳定性分析

本模型基于《COMSOL 软件许可协议》 6.3 版本授权。
所有商标均为其各自所有者的财产。请参见 www.comsol.com/trademarks。

简介

强度折减法与有限元分析相结合是求解岩土力学安全系数 (FOS) 的一种方法，尤其适用于边坡和路堤的稳定性分析。在强度折减法中，逐步降低典型的材料属性，直到材料失效。尽管 FOS 的定义取决于具体情况，但在岩土工程问题中通常是根据土体的强度参数来定义，如参考资料 1 所述。

强度折减法适用于线性失效准则，例如莫尔 - 库仑准则。当莫尔 - 库仑准则与强度折减法一起使用时，同时减小内聚力、内摩擦角和膨胀角，直到失去力学平衡。随着材料参数的降低，土体的剪切强度降低，边坡最终趋于不稳定，在一定的载荷、材料参数和边界条件的组合下会产生边坡失稳。初始内聚力和失效时内聚力的比值给出了 FOS，参考资料 1 和参考资料 2 给出了有关该方法的更多细节。

本例中的几何形状、边界条件、载荷条件和材料参数与参考资料 1 中讨论的相同。在 *堤坝边坡稳定性* 中可以找到类似的示例模型。

模型定义

图 1 显示路堤的横截面。长度 L_1 和 L_2 分别为 85 m 和 20 m，路堤高度 H_1 和 H_2 分别为 20 m 和 10 m。坡角 α 从 15° 到 45° 不等。

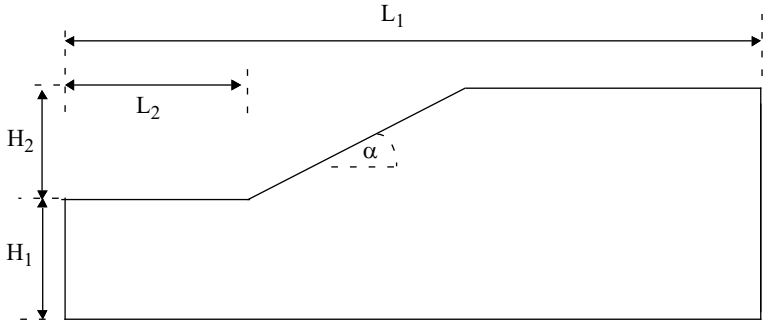


图 1：路堤横截面的几何形状。

表格 1 总结了关联塑性和非关联塑性的材料属性，摘自参考资料 1。

表格 1：材料属性。

属性	材料实例 1	材料实例 2
E	20 MPa	20 MPa
ν	0.3	0.3
c	20 kPa	20 kPa

表格 1：材料属性。

属性	材料实例 1	材料实例 2
ϕ	25°	25°
ψ	0°	25°
ρ	1940 kg/m^3	1940 kg/m^3

采用平面应变近似法在二维模式下对路堤进行建模，重力的影响包含在内。莫尔 - 库仑模型的材料参数随安全系数 FOS 的变化而变化。使用参数化研究逐渐增加 FOS 参数，从而降低了每个步骤中的土体强度。实际安全系数是模型不再收敛时的 FOS 参数值，这是边坡失稳的标志。

莫尔 - 库仑屈服函数 F 和塑性势 Q 为

$$F = m\sqrt{J_2} + \frac{\sin\Phi}{3} I_1 - C\cos\Phi \tag{1}$$

$$Q = m_q\sqrt{J_2} + \frac{\sin\Psi}{3} I_1 - C\cos\Psi \tag{2}$$

其中 I_1 是第一个应力不变量，J_2 是第二个偏应力不变量。参数化的内聚力 C、参数化的内摩擦角 Φ 和参数化的膨胀角 Φ 通过 FOS 给出，

$$C = \frac{c}{\mathrm{FOS}}, \Phi = \operatorname{atan}\left(\frac{\tan\phi}{\mathrm{FOS}}\right), \Psi = \operatorname{atan}\left(\frac{\tan\psi}{\mathrm{FOS}}\right) \tag{3}$$

其中 c 是内聚力，ϕ 是内摩擦角，ψ 是膨胀角。请注意，c、ϕ 和 ψ 是初始未折减的材料参数。对于关联流动法则，$\phi = \psi$。

对于非关联流动法则，ψ 在小于 Φ 时保持不变，详见参考资料 2。但在本例中，当使用非关联流动法则时，ψ 为零，因此不需要特殊处理，方程 3 适用于关联以及非关联流动法则。

对于非关联流动法则，强度折减法可能会触发数值不稳定性，这反过来会导致非唯一的失效面和相应的 FOS。为避免潜在的不稳定性和收敛问题，本例使用参考资料 1 和参考资料 2 中建议的 *Davis procedure B* 方法，将关联流动法则与减小的内聚力和内摩擦角值一起应用，捕捉非关联流动法则的效应。减小的内聚力 c‘ 和减小的内摩擦角 ϕ' 由下式给出

$$c' = \beta c, \phi' = \operatorname{atan}(\beta\tan\phi) \tag{4}$$

其中*折减系数* β 为

$$\beta = \frac{\cos\left(\operatorname{atan}\left(\frac{\tan\phi}{FOS}\right)\right)\cos\left(\operatorname{atan}\left(\frac{\tan\psi}{FOS}\right)\right)}{1-\sin\left(\operatorname{atan}\left(\frac{\tan\phi}{FOS}\right)\right)\sin\left(\operatorname{atan}\left(\frac{\tan\psi}{FOS}\right)\right)}$$

因此，由于关联流动法则的折减系数 β 为 1，根据关联和非关联流动法则的减少的内聚力 *c*‘ 和减小的内摩擦角 ϕ' 改写方程 3。

结果与讨论

不同坡角的安全系数 (FOS) 如图 2 所示。不出所料， FOS 随着坡角的增大而减小。与非关联流动法则 （材料实例 1）相比，相同坡度的 FOS 总是小于关联流动法则 （材料实例 2），但非关联流动法则对所选参数的影响很小。图 2 给出的结果与参考资料 1 中图 4 给出的结果一致。图 3 显示了所有分析实例中，土堤的最大位移与 FOS 的函数关系，以验证已经达到了破坏的程度。

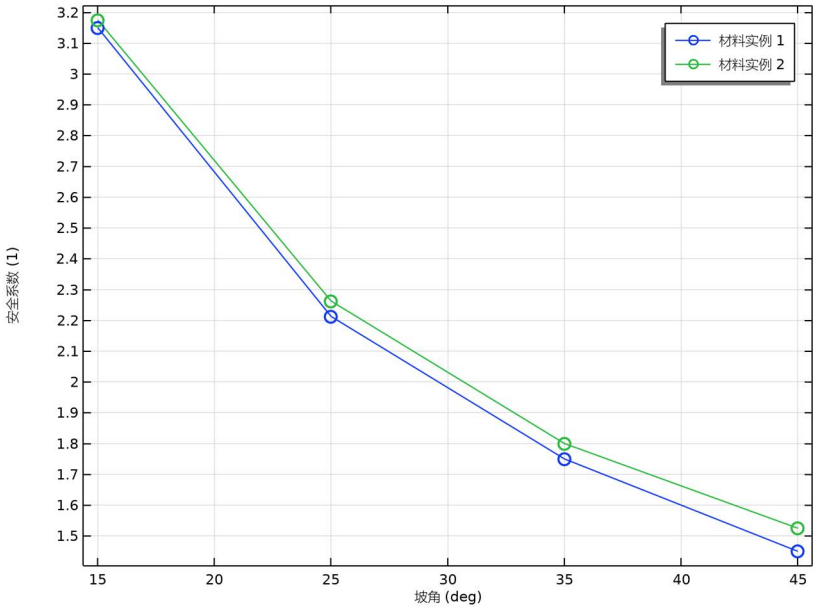


图 2：安全系数与坡角的关系。

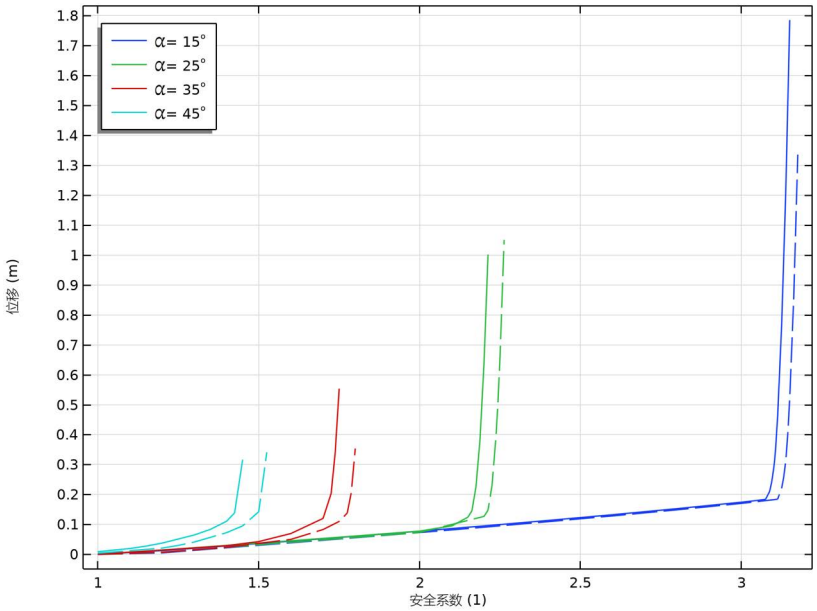


图 3：材料实例 1 （实线）和材料实例 2 （虚线）下土堤的最大位移与安全系数的关系图。

图 4 和图 5 显示两种材料集在失稳前不同坡角下的等效塑性应变。图中塑性应变的局部化现象指示不同坡角下的失效面。很明显，坡角较小的路堤中会出现多个失效面。

图 6 显示坡角等于 45° 时位移的三维可视化效果，与参考资料 1 中图 2 给出的结果定性一致。这些图还清楚地表明，材料变得不稳定后，滑移面外的路堤部分是如何开始滑移的。

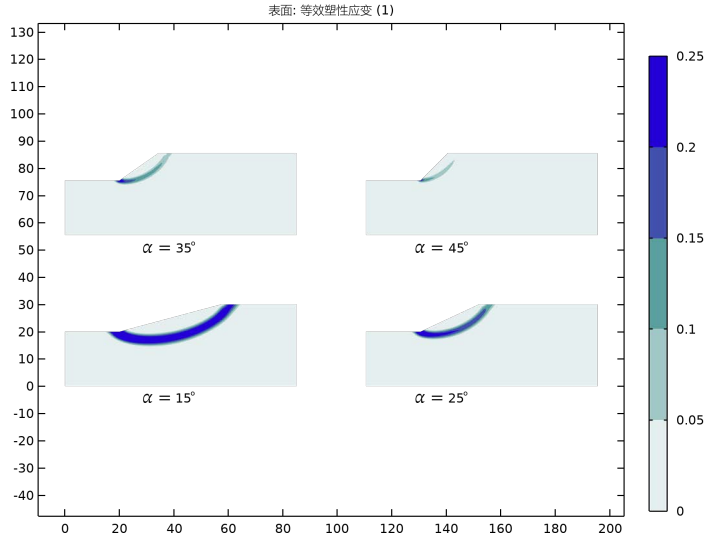


图 4：材料实例 1 坍塌前的等效塑性应变（非关联流动）。

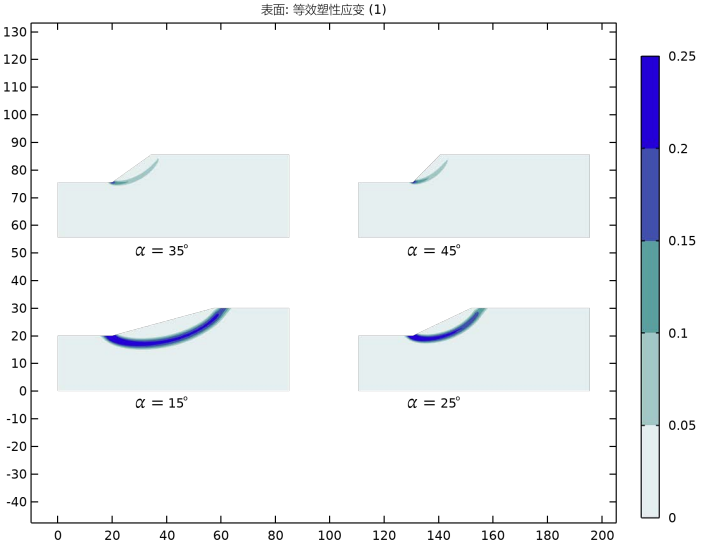


图 5：材料实例 2 坍塌前的等效塑性应变（非关联流动）。

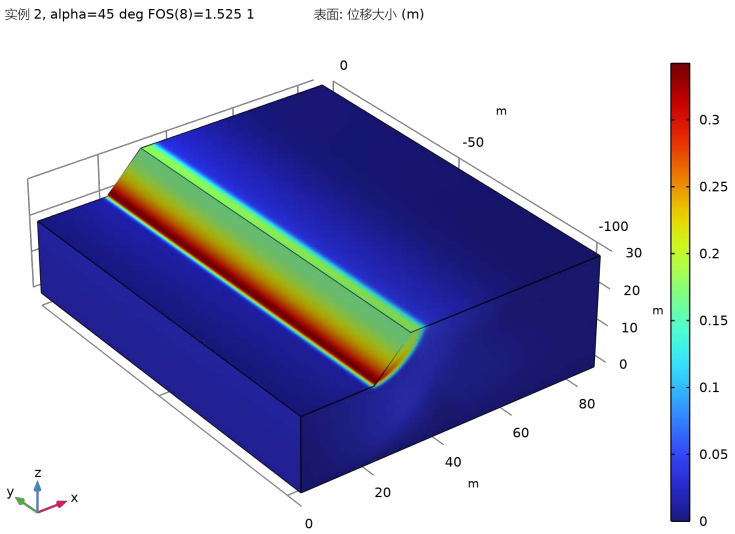


图 6：土堤的位移大小。

COMSOL 软件功能实现说明

添加两个稳态研究步骤。第一个研究步骤计算重力引起的原位应力。莫尔 - 库仑准则添加到第二个研究中，计算由于重力和强度折减的综合影响导致的弹塑性失效，其中第一步计算出的初始应力通过**初始应力和应变**节点包含在分析中。

还添加了两个外部参数化扫描来更改坡角和材料参数集。在连续参数扫描中添加了一个**停止条件**，这样，当路堤的最大位移超过斜坡长度的十分之一时，求解就会停止。

参考资料

1. H.F. Schweiger “Strength reduction technique with finite element method for slopes without stabilization measures,” *Benchmark, International Magazine for Engineers, Designers and Analysts from NAFEMS*, pp. 51–58, 2020.

2. S. Oberhollenzer, F. Tschuchnigg, and H.F. Schweiger “Finite element analysis of slope stability problems using non-associated plasticity,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 10, pp. 1091–1101, 2018.

案例库路径：Geomechanics_Module/Verification_Examples/strength_reduction_method

建模操作说明

从**文件**菜单中选择**新建**。

新 建

在**新建**窗口中，单击 **模型向导**。

模 型 向 导

1 在**模型向导**窗口中，单击 **二维**。

2 在**选择物理场**树中选择**结构力学** > **固体力学 (solid)**。

3 右键单击并选择**添加物理场**。

4 单击 **研究**。

5 在**选择研究**树中选择**一般研究** > **稳态**。

6 单击 **完成**。

附加的文本文件中提供了模型几何、材料和求解器的参数。

全 局 定 义

几何和求解器参数

1 在**模型开发器**窗口的**全局定义**节点下，单击**参数 1**。

2 在**参数**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “几何和求解器参数”。

3 定位到**参数**栏。单击 **从文件加载**。

4 浏览到该 App 的 “案例库” 文件夹，然后双击文件 strength_reduction_method_parameters.txt。

材料参数

1 在**主屏幕**工具栏中单击 **参数**，然后选择**添加** > **参数**。

2 在**参数**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “材料参数”。

3 定位到**参数**栏。单击 **从文件加载**。

4 浏览到该 App 的 “案例库” 文件夹，然后双击文件 strength_reduction_method_material_parameters1.txt。

5 在**主屏幕**工具栏中单击 **参数实例**。

6 在**主屏幕**工具栏中单击 **参数实例**。

7 在**实例**的**设置**窗口中，定位到**参数**栏。

8 单击 **从文件加载**。

9 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 `strength_reduction_method_material_parameters2.txt`。

定义

为莫尔 – 库仑准则定义参数化的内聚力和内摩擦角。

变量 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**组件 1 (comp1)** > **定义**节点。

2 右键单击**定义**并选择**变量**。

3 在**变量**的**设置**窗口中，定位到**变量**栏。

4 在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
beta_f	cos(atan(tan(phi)/FOS))* cos(atan(tan(psi)/FOS))/(1- sin(atan(tan(phi)/FOS))* sin(atan(tan(psi)/FOS)))		折减因子
c_r	beta_f*c	Pa	折减内聚力
phi_r	atan(beta_f*tan(phi))	rad	折减摩擦角
c_p	c_r/FOS	Pa	参数化内聚力
phi_p	atan(tan(phi_r)/FOS)	rad	参数化摩擦角

几何 1

多边形 1 (pol1)

1 在**几何**工具栏中单击 **多边形**。

2 在**多边形**的**设置**窗口中，定位到**坐标**栏。

3 从**数据源**列表中选择**矢量**。

4 在 **x** 文本框中键入“`0, L1,L1,L2+Lslope,L2,0`”。

5 在 **y** 文本框中键入“`0, 0, H1+H2,H1+H2,H1,H1`”。

6 单击 **构建选定对象**。

固体力学 (SOLID)

线弹性材料 1

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)** 节点下，单击**线弹性材料 1**。

2 在**线弹性材料**的**设置**窗口中，定位到**正交设置**栏。

3 选中**减缩积分**复选框。

土壤塑性 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **属性**，然后选择**土壤塑性**。

2 在**土壤塑性**的**设置**窗口中，定位到**土壤塑性模型**栏。

3 从 F_f 列表中选择**莫尔 - 库仑**。

4 单击以展开**非局部塑性模型**栏。从列表中选择**隐式梯度**。

5 在 l_{int} 文本框中键入 “0.1”。

线弹性材料 1

在**模型开发器**窗口中，单击**线弹性材料 1**。

初始应力和应变 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **属性**，然后选择**初始应力和应变**。

添加两个研究步骤来分析重力引起的原位应力。将第一个研究步骤中计算出的原位应力添加为第二个研究步骤的初始应力。您可以使用 `withsol` 算子来获取这些应力，如下所示：

2 在**初始应力和应变**的**设置**窗口中，定位到**初始应力和应变**栏。

3 将 S_0 矩阵指定为

`withsol('sol2', solid.sxx)`	`withsol('sol2', solid.sxy)`	`withsol('sol2', solid.sxz)`
withsol(sol2 ,solid.sxy)	`withsol('sol2', solid.syy)`	`withsol('sol2', solid.syz)`
withsol(sol2 ,solid.sxz)	withsol(sol2 ,solid.syz)	`withsol('sol2', solid.szz)`

重力 1

在**物理场**工具栏中单击 **全局**，然后选择**重力**。

辊支承 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**辊支承**。

2 选择 “边界” 1 和 6。

固定约束 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**固定约束**。

2 选择“边界”2。

材料

土壤材料

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，右键单击**材料**并选择**空材料**。

2 在**材料**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“土壤材料”。

3 定位到**材料明细**栏。在表中输入以下设置：

属性	变量	值	单位	属性组
杨氏模量	E	E_soil	Pa	杨氏模量和泊松比
泊松比	nu	nu_soil	1	杨氏模量和泊松比
密度	rho	rho_soil	kg/m³	基本
初始内聚力	cohesion0	c_p	Pa	土壤材料
摩擦角	phis	phi_p	rad	土壤材料

网格 1

映射 1

在**网格**工具栏中单击 **映射**。

大小 1

1 右键单击**映射 1** 并选择**大小**。

2 在**大小**的**设置**窗口中，定位到**单元大小**栏。

3 单击**定制**按钮。

4 定位到**单元大小参数**栏。

5 选中**最大单元大小**复选框。在关联文本框中键入“0.75”。

6 在**模型开发器**窗口中，右键单击**网格 1** 并选择**全部构建**。

借助 FOS 参数对材料强度进行参数化处理，并在第二个研究步骤中为 FOS 添加辅助扫描。

添加两个**参数化扫描**节点，以更改坡角和材料参数。

研究 1

步骤 1：稳态

1 在**模型开发器**窗口的**研究 1** 节点下，单击**步骤 1：稳态**。

2 在**稳态**的**设置**窗口中，定位到**物理场和变量选择**栏。

3 选中**修改研究步骤的模型配置**复选框。

4 在树结构中，选择**组件 1 (comp1) > 固体力学 (solid) > 线弹性材料 1 > 土壤塑性 1** 和**组件 1 (comp1) > 固体力学 (solid) > 线弹性材料 1 > 初始应力和应变 1**。

5 右键单击并选择**禁用**。

步骤 2：稳态 2

1 在**研究**工具栏中单击 **研究步骤**，然后选择**稳态 > 稳态**。

2 在**稳态**的**设置**窗口中，单击以展开**因变量值**栏。

3 找到**待求解变量的初始值**子栏。从**设置**列表中选择**用户控制**。

4 单击以展开**研究扩展**栏。选中**辅助扫描**复选框。

5 单击 ＋ **添加**。

6 在表中输入以下设置：

参数名称	参数值列表	参数单位
FOS (安全系数)	1 4	

参数化扫描

1 在**研究**工具栏中单击 **参数化扫描**。

2 在**参数化扫描**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 单击 ＋ **添加**。

4 在表中输入以下设置：

参数名称	参数值列表	参数单位
alpha (坡角)	range(15,10,45)	deg

参数化扫描 2

1 在**研究**工具栏中单击 **参数化扫描**。

2 在**参数化扫描**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 从**扫描类型**列表中选择**参数 switch**。

4 单击 ＋ **添加**。

5 在表中输入以下设置：

Switch	实例	实例数
材料参数	全部	range(1,1,2)

解 1 (sol1)

1 在**研究**工具栏中单击 **显示默认求解器**。

2 在**模型开发器**窗口中展开**解 1 (sol1)** 节点。

3 在**模型开发器**窗口中展开**研究 1**>**求解器配置**>**解 1 (sol1)**>**稳态求解器 2**节点，然后单击**参数化 1**。

4 在**参数化**的**设置**窗口中，定位到**常规**栏。

5 从**出错时**列表中选择**跳过参数步**。

6 单击以展开**连续**栏。选中**步长调节**复选框。

7 在**初始步长**文本框中键入 “0.2”。

8 在**最大步长**文本框中键入 “0.2”。

9 从**预测器**列表中选择**常数**。

10 单击以展开**输出**栏。从**要存储的参数**列表中选择**求解器采用的步长**。

添加**停止条件**，当路堤最大位移超过斜坡长度的十分之一时停止求解。

11 右键单击**研究 1**>**求解器配置**>**解 1 (sol1)**>**稳态求解器 2**>**参数化 1**并选择**停止条件**。

定义

最大值 1 (maxop1)

1 在**定义**工具栏中单击 **非局部耦合**，然后选择**最大值**。

2 选择 “域” 1。

研究 1

解 1 (sol1)

1 在**模型开发器**窗口的**研究 1**>**求解器配置**>**解 1 (sol1)**>**稳态求解器 2**>**参数化 1**节点下，单击**停止条件 1**。

2 在**停止条件**的**设置**窗口中，定位到**停止表达式**栏。

3 单击 **添加**。

4 在表中输入以下设置：

停止表达式	满足以下条件时停止	激活	描述
comp1.maxop1(comp1.solid.disp)>Lslope/20	True (>=1)	√	停止表达式 1

5 在**模型开发器**窗口的**研究 1**>**求解器配置**>**解 1 (sol1)**>**稳态求解器 2**节点下，单击**全耦合 1**。

6 在**全耦合**的**设置**窗口中，单击以展开**方法和终止**栏。

7 从**非线性方法**列表中选择**恒定 （牛顿）**。

8 在**最大迭代次数**文本框中键入 “8”。

9 在**研究**工具栏中单击 **计算**。

创建一个绘图，显示两组材料参数的 FOS 与坡角的函数关系。

结 果

计算组 1

1 在**结果**工具栏中单击 **计算组**。

2 在**计算组**的**设置**窗口中，单击以展开**格式**栏。

3 从**包含参数**列表中选择**关**。

全局计算 1

1 右键单击**计算组 1** 并选择**全局计算**。

2 在**全局计算**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**研究 1/ 参数化解 1 (sol3)**。

4 从**材料参数**列表中选择**来自列表**。

5 从**材料参数**列表中选择**实例 1**。

6 从**参数选择 (FOS)** 列表中选择**最后一个**。

7 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
alpha	deg	坡角

全局计算 2

1 右键单击**全局计算 1** 并选择**复制粘贴**。

2 在**全局计算**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。

3 在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
FOS	1	安全系数

全局计算 3

1 右键单击**全局计算 2** 并选择**复制粘贴**。

2 在**全局计算**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**材料参数**列表中选择**实例 2**。

4 在**计算组 1** 工具栏中单击 **计算**。

FOS vs. 坡角

1 在**结果**工具栏中单击 **一维绘图组**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “FOS vs. 坡角”。

3 定位到**绘图设置**栏。

4 选中 **y 轴标签**复选框。在关联文本框中键入 “安全系数 (1)”。

表图 1

1 右键单击 **FOS vs. 坡角**并选择**表图**。

2 在**表图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**源**列表中选择**计算组**。

4 定位到**着色和样式**栏。找到**线标记**子栏。从**标记**列表中选择**圆**。

5 单击以展开**图例**栏。选中**显示图例**复选框。

6 从**图例**列表中选择**手动**。

7 在表中输入以下设置：

图例
材料实例 1
材料实例 2

8 在 **FOS vs. 坡角**工具栏中单击 **绘制**。

创建一个绘图，显示所有分析实例中路堤最大位移与 FOS 的函数关系。

位移 vs. FOS

1 在**结果**工具栏中单击 **一维绘图组**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “位移 vs. FOS”。

3 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。

4 定位到**图例**栏。从**位置**列表中选择**左上角**。

5 定位到**绘图设置**栏。

6 选中 **x 轴标签**复选框。在关联文本框中键入 “安全系数 (1)”。

全局 1

1 右键单击**位移 vs. FOS** 并选择**全局**。

2 在**全局**的**设置**窗口中，单击以展开**图例**栏。

3 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**研究 1/ 参数化解 1 (sol3)**。

4 从**材料参数**列表中选择**来自列表**。

5 从**材料参数**列表中选择**实例 1**。

6 定位到 **y 轴数据**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
maxop1(solid.disp)	m	位移

7 定位到**图例**栏。从**图例**列表中选择 **eval 函数结果**。

8 在**图例**文本框中键入 “\alpha = eval(alpha,deg)<sup>\circ</sub>”。

全局 2

1 右键单击**全局 1** 并选择**复制粘贴**。

2 在**全局**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**材料参数**列表中选择**实例 2**。

4 单击以展开**着色和样式**栏。找到**线样式**子栏。从**线**列表中选择**虚线**。

5 从**颜色**列表中选择**循环（重置）**。

6 定位到**图例**栏。清除**显示图例**复选框。

7 在**位移 vs. FOS** 工具栏中单击 **绘制**。

添加多个绘图，以直观显示所有实例中的溃堤情况。

结果模板

1 在**结果**工具栏中，单击 **结果模板**以打开**结果模板**窗口。

2 转到**结果模板**窗口。

3 在模型树中选择**研究 1/ 参数化解 1 (sol3)** > **固体力学** > **等效塑性应变 (solid)**。

4 单击窗口工具栏中的**添加结果模板**。

5 在**结果**工具栏中，单击 **结果模板**以关闭**结果模板**窗口。

结果

等效塑性应变（实例 1）

1 在**二维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “等效塑性应变（实例 1）”。

2 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**无**。

3 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**定制**。

4 找到**解**子栏。清除**解**复选框。

5 定位到**绘图设置**栏。清除**绘制数据集的边**复选框。

6 单击以展开**绘图阵列**栏。选中**启用**复选框。

7 从**阵列形状**列表中选择**正方形**。

表面 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**等效塑性应变 （实例 1）**节点，然后单击**表面 1**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**研究 1/ 参数化解 1 (sol3)**。

4 从**材料参数**列表中选择**实例 1**。

5 从**参数值 (alpha (deg))** 列表中选择 **15**。

表面 2

1 右键单击**结果** > **等效塑性应变 （实例 1）** > **表面 1** 并选择**复制粘贴**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**参数值 (alpha (deg))** 列表中选择 **25**。

4 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。

5 单击以展开**继承样式**栏。从**绘图**列表中选择**表面 1**。

表面 3

1 右键单击**表面 2** 并选择**复制粘贴**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**参数值 (alpha (deg))** 列表中选择 **35**。

表面 4

1 右键单击**表面 3** 并选择**复制粘贴**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**参数值 (alpha (deg))** 列表中选择 **45**。

等效塑性应变 （实例 1）

在**模型开发器**窗口中，单击**等效塑性应变 （实例 1）**。

表格注释 1

1 在**等效塑性应变 （实例 1）**工具栏中单击 **更多绘图**，然后选择**表格注释**。

2 在**表格注释**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**源**列表中选择**局部表**。

4 在表中输入以下设置：

x 坐标	y 坐标	注释
25	0	\[\alpha \;=\;15^\circ\]
125	0	\[\alpha \;=\;25^\circ\]
25	55	\[\alpha \;=\;35^\circ\]
125	55	\[\alpha \;=\;45^\circ\]

5 选中 **LaTeX 标记**复选框。

6 定位到**着色和样式**栏。清除**显示点**复选框。

将所有绘图设置为显示最后一个参数。

表面 1

1 在**模型开发器**窗口中，单击**表面 1**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**参数值 (FOS (1))** 列表中选择 **3.15**。

4 单击以展开**范围**栏。选中**手动控制颜色范围**复选框。

5 在**最大值**文本框中键入 “0.25”。

6 定位到**着色和样式**栏。在**频带数**文本框中键入 “5”。

表面 2

1 在**模型开发器**窗口中，单击**表面 2**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**参数值 (FOS (1))** 列表中选择 **2.2125**。

表面 3

1 在**模型开发器**窗口中，单击**表面 3**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**参数值 (FOS (1))** 列表中选择 **1.75**。

表面 4

1 在**模型开发器**窗口中，单击**表面 4**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**参数值 (FOS (1))** 列表中选择 **1.45**。

4 在**等效塑性应变 （实例 1）**工具栏中单击 **绘制**。

5 在**图形**工具栏中单击 **缩放到窗口大小**按钮。

为第二个材料参数实例创建一个绘图组副本。

等效塑性应变 （实例 2）

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**等效塑性应变 （实例 1）**并选择**复制粘贴**。

2 在**二维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “等效塑性应变 （实例 2）”。

表面 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**等效塑性应变 （实例 2）**节点，然后单击**表面 1**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**材料参数**列表中选择**实例 2**。

表面 2

1 在**模型开发器**窗口中，单击**表面 2**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**材料参数**列表中选择**实例 2**。

表面 3

1 在**模型开发器**窗口中，单击**表面 3**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**材料参数**列表中选择**实例 2**。

表面 4

1 在**模型开发器**窗口中，单击**表面 4**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**材料参数**列表中选择**实例 2**。

4 在**等效塑性应变（实例 2）**工具栏中单击 **绘制**。

5 在**图形**工具栏中单击 **缩放到窗口大小**按钮。

创建溃堤时堤坝位移的三维可视化效果。

二维拉伸 1

1 在**结果**工具栏中单击 **更多数据集**，然后选择**二维拉伸**。

2 在**二维拉伸**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**研究 1/ 参数化解 1 (sol3)**。

4 定位到**拉伸**栏。在 **z 最大值**文本框中键入 “L1+L2”。

5 找到**正在嵌入**子栏。从**将平面映射到**列表中选择 **xz 平面**。

位移

1 在**结果**工具栏中单击 **三维绘图组**。

2 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “位移”。

表面 1

右键单击**位移**并选择**表面**。

变形 1

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**表面 1** 并选择**变形**。

2 在**变形**的**设置**窗口中，定位到**比例因子**栏。

3 选中**比例因子**复选框。在关联文本框中键入 “1”。

4 在**位移**工具栏中单击 **绘制**。

5 在**图形**工具栏中单击 **缩放到窗口大小**按钮。