



钢桥的材料非线性分析

一. 概要

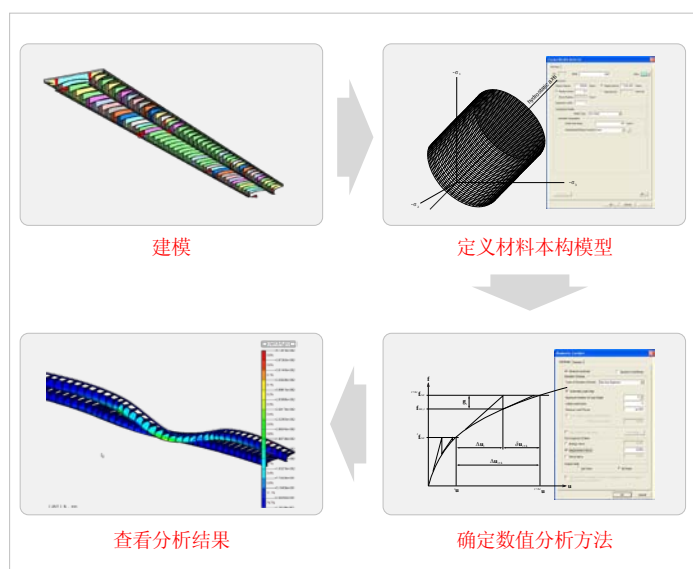
1. 分析概要

很多研究人员对钢结构的非线性特性提出了各种分析方法，以此为基础形成了明确的钢结构塑性理论。目前即便不做试验，以塑性理论为基础的材料非线性分析也能相对准确的反应钢结构的非线性特性，既节省了时间也节省了费用。另外，通过不断变换各种结构参数进行分析，可以确定结构在不同参数状态下的响应，这也为结构方案的优化提供了依据。

2. 分析步骤

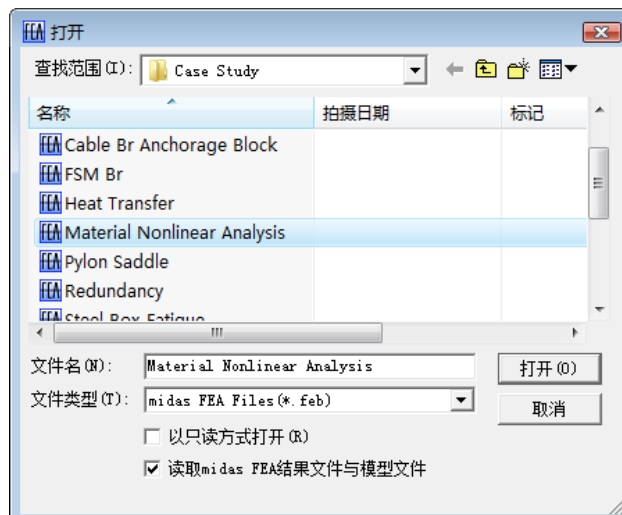
本例题将介绍midas FEA的材料非线性分析的步骤和方法。例题中除了介绍钢结构的材料非线性分析功能，还会介绍分析过程中应注意的事项。

midas FEA中钢结构的材料非线性分析步骤如下：



二. 建立基本模型

1. 打开结构模型

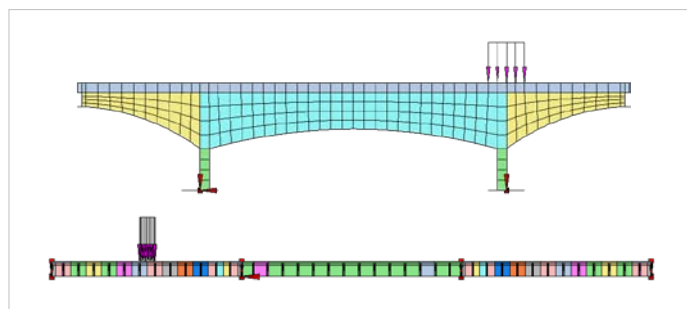


操作步骤

文件 > 打开...

1. 选择的 [Material Nonlinear Analysis.feb]

2. 结构模型简介

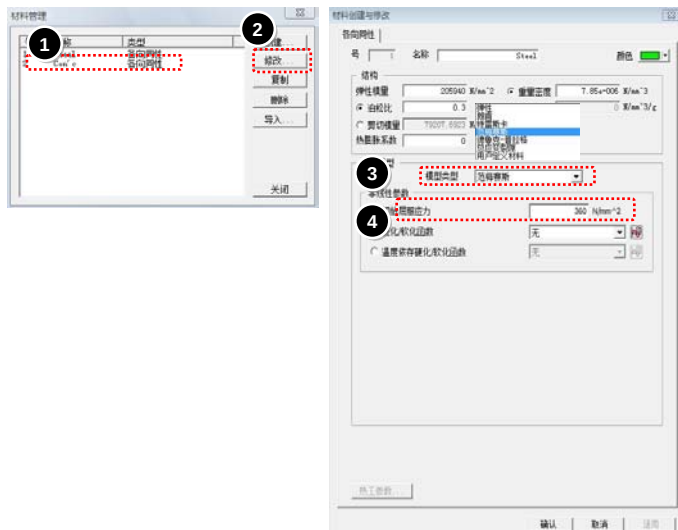


本例题是为了介绍钢结构材料非线性分析的步骤及确认结果的方法，所以将省略建立结构模型的过程，直接打开已经建立的模型。

如上图所示，本例题模型是由两根纵梁组成的三跨梁桥。桥面板使用了实体单元，其它部位采用了板单元。为了计算结构在极限荷载作用下的响应，在第一跨的右边梁跨中加载了大小为1MPa的均布荷载。

三. 定义材料本构

1. 定义非线性材料本构模型



操作步骤

分析 > 材料...

- | | |
|---------------|----------------------|
| 1. 选择 [steel] | 3. 在本构模型中选择 [范梅塞斯] |
| 2. 点击 [编辑] | 4. 初始屈服应力: "360 MPa" |

■ 定义材料本构模型的方法

在midas FEA中的分析 > 材料...中定义非线性材料本构模型。材料对话框分为两部分。在对话框的上半部分的“结构”中输入一般线弹性材料特性。弹性分析时使用在这里输入的材料特性。

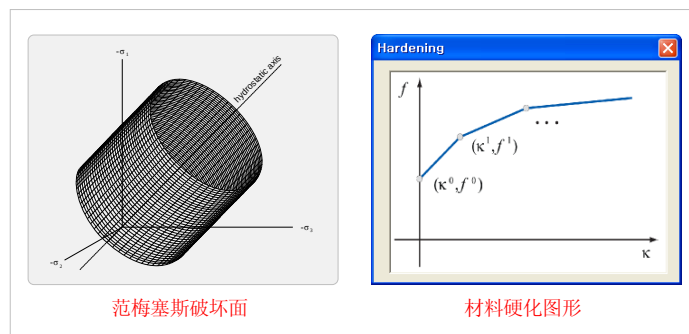
材料在屈服后进入塑性阶段时使用的材料特性在对话框的“本构模型”中输入。选择本构模型后，需要输入相应的一些参数。midas FEA中提供了丰富多样的材料本构模型。

本例题分析模型为钢桥，因此选择了范梅塞斯本构模型。范梅塞斯(Von Mises)本构模型是金属材料中使用较多的材料本构模型，比较适合钢桥的材料非线性分析。

范梅塞斯材料本构参数比较简单，首先在初始屈服应力中输入钢材的屈服应力。本例题的材料屈服强度360MPa。屈服后的特性在“硬化/软化函数”中定义。如果是完全塑性，则不定义函数直接选择“无”。本例题假设钢材为完全塑性材料。

2. 非线性材料特性

■ 范梅塞斯本构模型



模型特性

范梅塞斯本构模型是金属材料中使用最频繁的材料模型，公式如下：

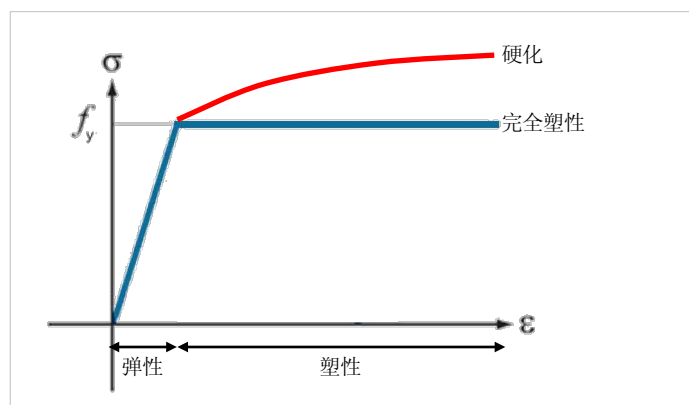
$$f(\sqrt{J_2}) = \sqrt{3}\sqrt{J_2} - Y(\kappa) = 0$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

非线性分析中一般会将总荷载分成几个步骤逐渐加载，在各荷载步中为了得到收敛结果会采用反复计算方法。在线性阶段一般不需要反复计算，但是在非线性阶段至少需要2次或以上的反复计算。在每个荷载步的反复计算过程中，不仅会体现材料的本构关系，还会根据上面的公式随时验算材料是否发生了屈服。在此 $Y(\kappa)$ 为单轴屈服强度，即用户在初始屈服强度中输入的值。

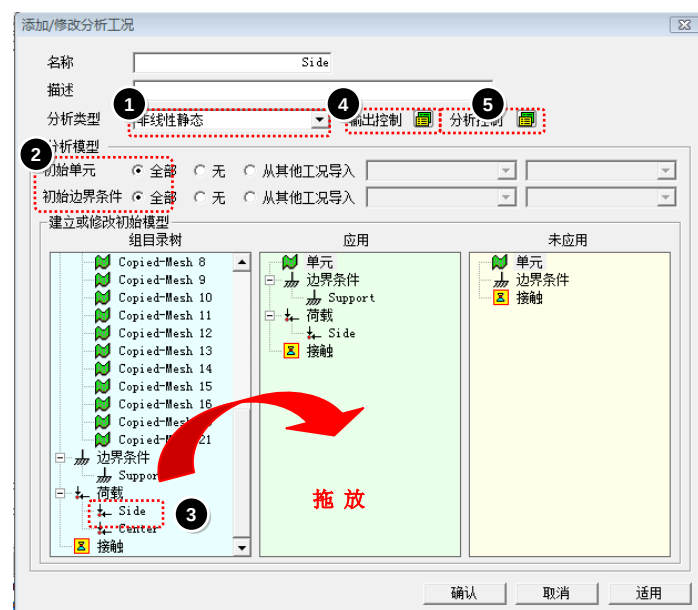
硬化现象

材料硬化是表示材料在发生屈服后，屈服强度继续增加的现象。上图的材料硬化图形表现的是硬化特性的输入方法。图中的 $k^0, k^1 \dots$ 值为塑性应变， $f^0, f^1 \dots$ 是塑性应力。输入材料试验中获得的材料屈服以后的应变和对应的应力即可。如果材料是完全塑性材料，可以不定义函数，直接选择“无”就可以得到下图中完全塑性本构模型。



四. 定义分析工况

1. 定义分析工况



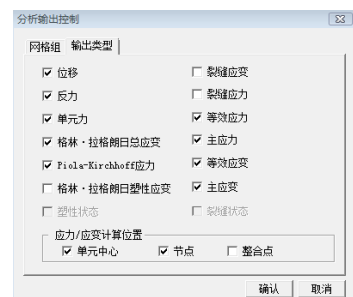
操作步骤

分析 > 分析工况...

1. 选择 [非线性静态]
2. 在初始单元和初始边界中选择 全部
3. 拖放荷载组 [Side]
4. 点击 [输出控制]
5. 点击 [分析控制]

对输出控制功能的说明

在输出控制中用户可以选择要输出的各种分析结果。midas FEA中默认输出所有的分析结果，但是在模型比较大时，用户为了节省计算时间和减小模型文件的大小，可以有选择地输出分析结果。



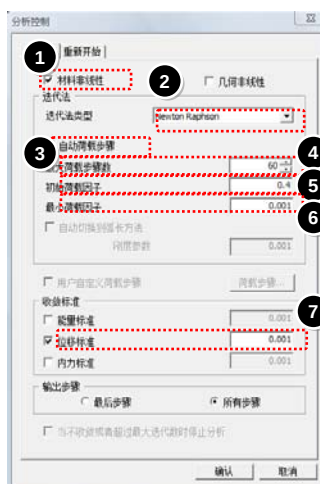
2. 分析控制

分析控制 > 非线性

用户选择的分析类型不同，分析控制对话框中的参数也不同。本例题是进行材料非线性分析，所以在分析控制对话框中选择“材料非线性”。如果要同时考虑大变形，可以同时勾选“几何非线性”。反复计算的方法可以选择收敛性较好的Newton Raphson方法，并同时勾选自动调整荷载步选项。

midas FEA中提供能量标准、位移标准、荷载标准三种收敛标准。收敛

标准可以重复选择。本例题使用位移标准的收敛条件。

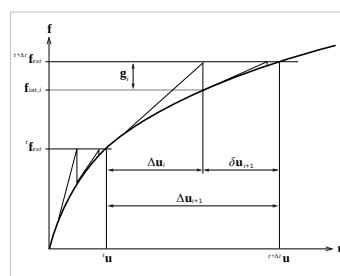


操作步骤

分析 > 分析工况...

1. 选择 [材料非线性]
2. 选择 [Newton Raphson]
3. 勾选 [自动调整荷载步]
4. 最大荷载步数: “60”
5. 初始荷载系数: “0.4”
6. 最小荷载系数: “0.001”
7. 勾选 “位移标准”

Newton Raphson 方法介绍

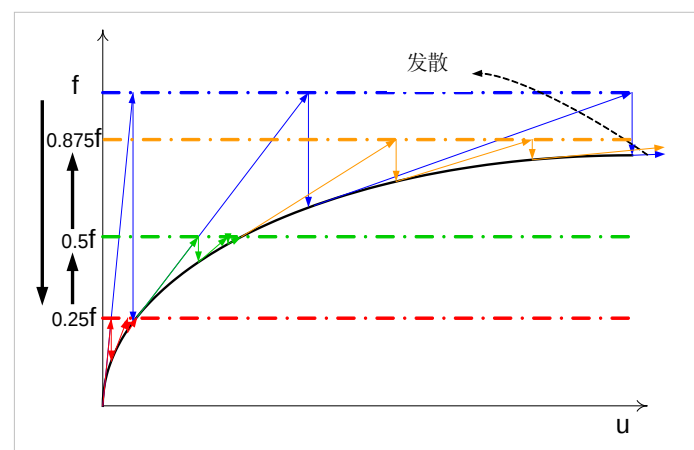


如左侧图形所示Newton-Raphson方法在每个迭代计算过程中都使用更新的切线刚度，所以收敛速度较快。

当分析模型较大时，Newton-Raphson方法在计算切线刚度时需要较多的计算。当最初迭代计算阶段得到的解与最终得到的解相差较大时，可能发生不收敛。所以，New

ton-Raphson方法虽然在收敛计算中所需的迭代计算次数较少，但是在各迭代计算次数中花费的计算费用较高时间较长。对于其它迭代计算方法，可参考程序的分析手册。

3. 自动调整荷载步的概念



自动调整荷载步

非线性分析的收敛性能随着结构的不同会有较大差异。同时荷载步的荷载增量较大时，在荷载步中可能会不收敛。特别是与初始刚度相比结构的刚度衰减较大时，即便在较小的荷载增量中也需要进行更多次的迭代计算，有时需

要更加细分荷载增量。因为结构的不同，收敛的特性千差万别，因此在分析前很难确定适当的增量是多少。

在midas FEA中为了解决非线性分析中收敛问题，提供了能自动调整荷载增量的自动调整荷载步的功能。即在线性特点较为明显的区域自动减小荷载增量；相反在线性特性不是很明显的区域自动加大荷载增量。该功能不仅可以减少分析时间，还可以提供非线性特性比较明显区域的更详细的分析结果。目前，该功能不能与非线性分析的接续计算功能同时使用。

如前图所示，自动调整荷载步功能是根据迭代计算的次数调整荷载增量。针对荷载f进行迭代计算，如果在16次迭代计算次数内没有收敛(蓝线)时，则将增量减少至25%，使用0.25f重新进行分析(红线)，如果对荷载增量(0.25f)在5次迭代计算内收敛时，表明该荷载增量比较容易收敛。同理，当连续2次在5次迭代计算内收敛时(红色及绿色)，程序将自动将荷载增量增加50%(黄色)。另外，在当前荷载增量的收敛计算中迭代计算次数超过10次时，自动用当前荷载增量75%作为下次荷载步的荷载增量。这样的自动增量调整最多进行5次，当5次调整也不能收敛时将终止分析。

自动调整荷载步选项中要输入的参数如下：

最大荷载步数

输入将最大荷载分割的步数。当用户没有输入数据时，程序自动按10000计算，到荷载系数为1时终止计算。

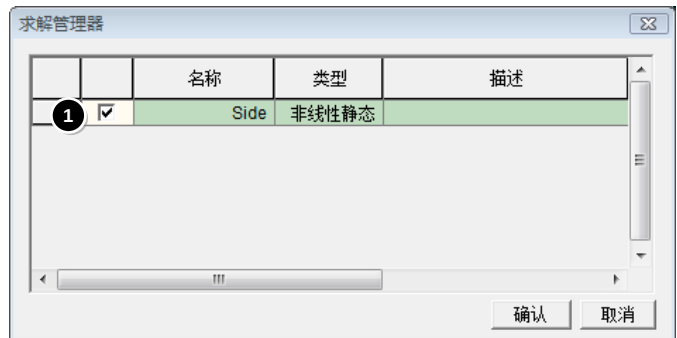
初始荷载系数

决定第一次迭代计算使用的荷载大小。该系数为总荷载的比例系数，如果输入1，则表示使用一个荷载步。midas FEA中虽然将该值默认设为1，但是选择适当的值会减少分析时间。

最小荷载系数

迭代计算时，当荷载增量与初始荷载的比小于该系数时，自动停止分析。

五. 运行分析



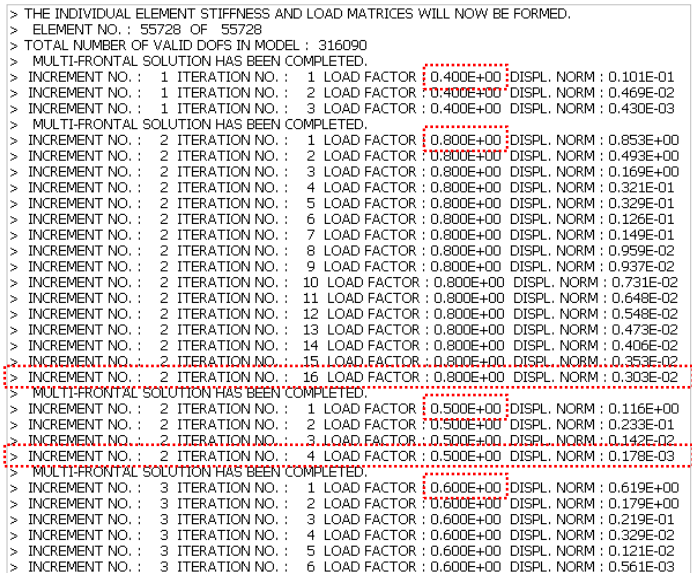
操作步骤

分析 > 运行分析...

1. 选择 [Side]分析工况

2. 点击 [确认]

■ 分析过程信息窗口



在midas FEA中运行分析后，如上图所示分析过程将显示在信息输出窗口中。通过输出的信息，用户可以确认是否在正常运行，如果结果不正常可以强制终止分析。

如上面的信息窗口所示，在第一次迭代计算中使用的荷载系数是在初始荷载系数中输入的0.4，并对相当于0.4倍总荷载的荷载增量迭代计算了3次，收敛误差范数小于用户输入的收敛条件0.001，所以进行了对下一个荷载步的分析。

因为前一个荷载步在荷载系数0.4的情况下迭代计算满足了收敛条件，所以下一个荷载步的荷载增量使用了同样大小的荷载增量，所以荷载系数为0.8。第二个荷载步的迭代计算16次仍然没有满足收敛条件，将根据自动调节荷载步的功能，自动终止第二荷载步的收敛计算，同时将荷载系数由0.8下调到0.5后重新计算。荷载系数0.5是将前一荷载步的荷载增量0.4上增加了0.1(即0.4的25%)。从信息窗口中可以确认，调整后经过4次迭代计算满足了收敛条件。

因为结构的规模和形成文件的大小将影响运行时间，所以分析前要对模型进行充分的检查，以避免重新分析。

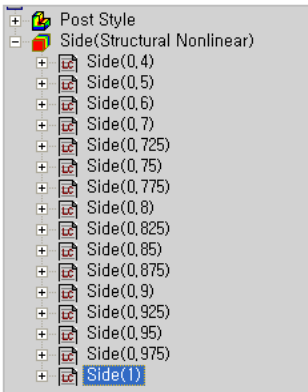
六. 查看分析结果

1. 分析结果内容

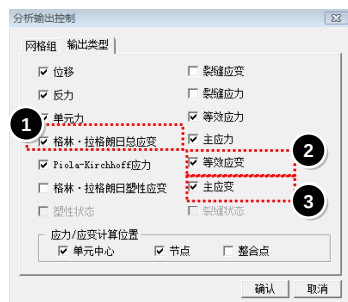
1) 应变结果

■ 分析结果

树形菜单中的后处理结果



如左侧图形所示, 分析结束后将在后处理树形菜单中列出分析的结果。因为本例题的分析各步都为收敛, 所以将输出到荷载系数为1的各步骤的结果。



应变名称约定:

单元阶数: 高阶单元(HI), 低阶单元(LO)
单元类型: Frame, Plate, Solid
板厚度方向位置: Top, Mid, Bottom
应变成分

这表示针对输入的荷载, 结构没有发生坍塌。如左侧树形菜单所示, 前4个荷载步的荷载系数增量为0.1, 而从第5个荷载步后, 荷载系数的增量变为0.025。

■ 分析结果 - 应变

应变种类

midas FEA提供多种应变结果, 输出的应变内容是用户分析前在分析输出控制对话框中选定的。

如上图所示, 各方向的应变(例如: LO-PLATE, BOT, 面-EXX)对应的是分析输出控制对话框中的“格林拉格朗日总应变”, 该应变结果为各方向上的法向应变和剪切应变。

范梅塞斯及体积应变(例如: LO-PLATE, BOT, 面-T 范梅塞斯)对应的是分析输出控制对话框中的“等效应变”。

主应变(例如: LO-PLATE, BOT, 面-T E1)对应的是分析输出控制对话框中的“主应变”。

实体单元的应变结果也可以按相同的方法确认。

2) 应力结果

■ 分析结果 - 应力

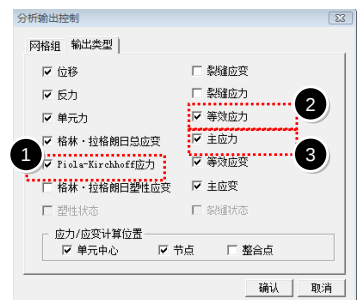
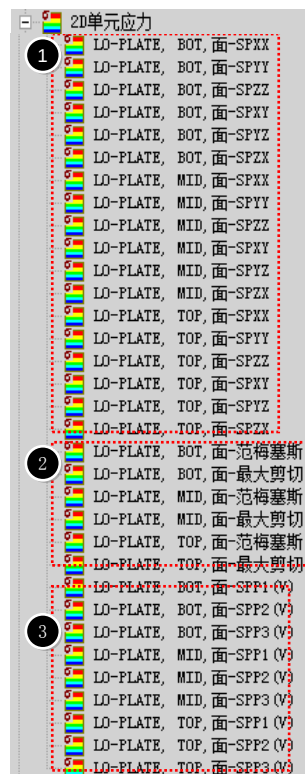
应力种类

midas FEA提供多种应力结果, 输出的应力内容是用户分析前在分析输出控制对话框中选定的。

如下图所示, 各方向的应力(例如: LO-PLATE, BOT, 面-SPXX)对应的是分析输出控制对话框中的“Piola-Kirchhoff 应力”, 该应力结果为各方向上的法向应力和剪切应力。

范梅塞斯及剪切应力(EX. LO-PLATE, BOT, 面-范梅塞斯)对应的是分析输出控制对话框中的“等效应力”。

主应力(例如: LO-PLATE, BOT, 面-SPP1(V))对应的是分析输出控制对话框中的“主应力”。



2. 查看分析结果的方法

1) 应力结果

■ 查看分析结果的方法 - 应力

范梅塞斯应力

使用应力云图确认钢桥构件是否屈服以及应力状态。钢材的应力使用范梅塞斯应力。板单元的范梅塞斯应力公式如下:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

当使用该公式计算的范梅塞斯应力超过了范梅塞斯材料本构中的初始屈服应力时产生屈服。本例题中输入的初始屈服应力为360MPa, 并将材料定义为完全塑性,

所以分析结果中范梅塞斯应力最大能发展到360MPa，超过该值时将屈服。
上面公式中的 σ_1 , σ_2 , σ_3 代表主应力，因为板单元的“ $\sigma_3=0$ ”，所以板单元的范梅塞斯应力实际公式如下：

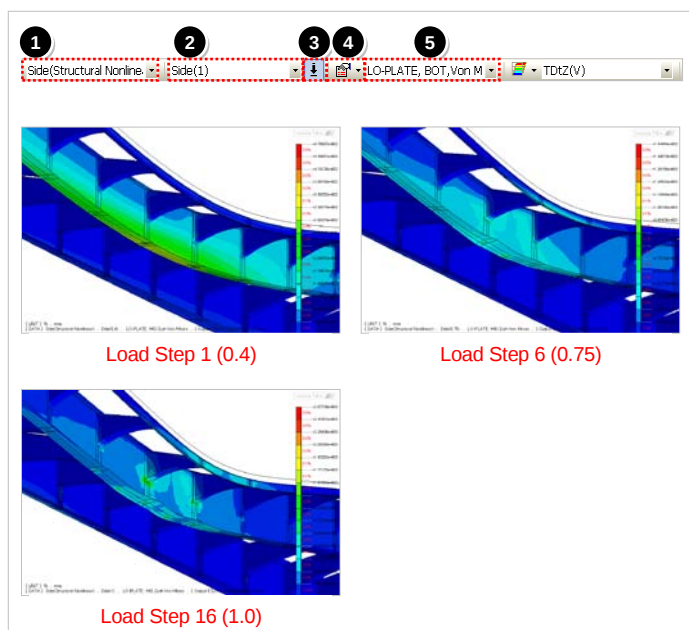
$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2}$$

■ 后处理数据表单

结果滑动条

非线性分析结果中提供各荷载步的分析结果。在树形菜单中逐个点击确认各种分析结果会很繁琐。

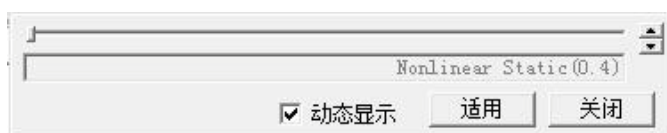
midas FEA中为了便于查看施工阶段分析以及非线性分析中各阶段的结果，提供了结果输出滑动条功能。



操作步骤

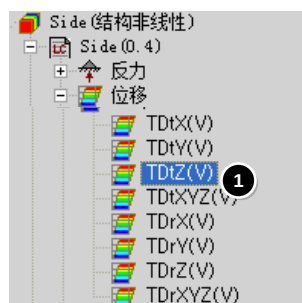
工具栏 > 后处理数据表单...

1. 选择分析工况 [Side]
2. 选择荷载步
3. 选择荷载步滑动条
4. 点击数据过滤器并选择[2D 单元应力]
5. 选择 [Lo-PLATE, MID, 面-范梅塞斯]



点击上面后处理数据表单中第3项将激活结果输出滑动条(如上图所示)。点击上下键即可方便地查看各荷载步的分析结果。在确认同一个分析结果在各荷载步的变化趋势时非常有效。

2) 最大位移结果



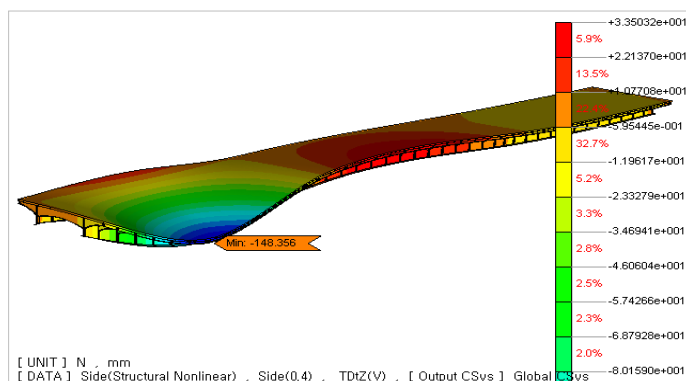
操作步骤

树形 > Side(0.4) > 位移

1. 点击 [TdtZ(V)]

后处理 > 查询结果

2. 点击 [最小]



■ 查看分析结果的方法 - 位移

指针标注

非线性分析中确认结构非线性响应的方法可以使用绘制指定点的荷载-位移曲线(P-δ Curve)的方法。绘制曲线时可以使用midas FEA中提供的指针标注结果和析取结果的方法。

首先要指定输出的位置，选择荷载作用方向上发生最大位移的节点。midas FEA提供的指针标注结果的方法可以方便地查找发生最大位移的节点。

本例题的荷载为竖向荷载，所以选择了Z方向发生最大位移的节点。对竖向位移TdtZ(V)的结果点击指针标注功能中的[最小]键，即可查到响应位置、节点号和位移值。

本例题模型在第1个荷载步时，在20645号节点发生了最大竖向位移，位移值为148.356mm(参见下图)。

3) P-D 曲线

■ 查看分析结果的方法 一荷载位移曲线

提取结果

为了绘制指定节点的荷载位移曲线使用提取结果的功能。将要输出的位移选择为竖向位移，然后选择所有的荷载步。输入要输出的节点号后点击表格键就可以输出该节点的荷载位移数据了。使用Excel绘制荷载位移曲线即可。曲线的X轴使用位移数据，Y轴使用荷载系数或者荷载值。

提取结果

输出数据

分析组Side (结构非线性)

步骤Side (0.4)

数据TDtZ (V)

步骤 : 数据

Side(0.4) : TDtZ(V)

Side(0.5) : TDtZ(V)

Side(0.6) : TDtZ(V)

Side(0.7) : TDtZ(V)

Side(0.725) : TDtZ(V)

Side(0.75) : TDtZ(V)

Side(0.775) : TDtZ(V)

Side(0.8) : TDtZ(V)

全部选

清除选择

顺序

步骤

节点

Global Rectangular

节点结果提取

用户定义

20645

排序

X

Y

Z

升序

最大

最小

绝对值最大

仅可见节点/单元

单元中提取位置

表格

关闭

No	步骤	步骤数值	节点:20645
1	Side(0.4) : TDt	0.400000	-148.356423
2	Side(0.5) : TDt	0.500000	-191.022620
3	Side(0.6) : TDt	0.600000	-270.032436
4	Side(0.7) : TDt	0.700000	-432.754246
5	Side(0.725) : T	0.725000	-495.039433
6	Side(0.75) : TDt	0.750000	-573.642532
7	Side(0.775) : T	0.775000	-668.544531
8	Side(0.8) : TDt	0.800000	-778.810203
9	Side(0.825) : T	0.825000	-903.670967
10	Side(0.85) : TDt	0.850000	-1038.986444
11	Side(0.875) : T	0.875000	-1184.296608
12	Side(0.9) : TDt	0.900000	-1338.382006
13	Side(0.925) : T	0.925000	-1501.130700
14	Side(0.95) : TDt	0.950000	-1671.458364
15	Side(0.975) : T	0.975000	-1848.094106
16	Side(1) : TDtZ	1.000000	-2030.071974

结果表格

Load/Force

Displacement(mm)

荷载-位移曲线

操作步骤

后处理 > 提取结果

1. 选择数据 [TDtZ(V)]

2. 点击 [全选] Button

3. 析取节点结果 > 用户定义: "20645"

4. 点击 [表格]

59