

STRAT 结构几何稳定性分析

(几何非线性)

(上海佳构软件科技有限公司, 2012/02)

序号	内容	页码
一	数据准备	1
二	Strat 计算	2
三	Plots 查看稳定分析结果	5
四	Archi 导入稳定分析单元内力	8
五	工程例题	9
附录	典型算例	12

STRAT 软件的几何非线性, 采用小应变、大变形理论, 采用弧长法控制加载, 以计算结构屈服峰值点, 并跟踪屈服后的结构受力、变形性能。

几何稳定性分析中, 对结构上施加的荷载, 首先分级增量加载。在每一级增量加载内, 进行迭代计算, 使外荷载与结构实际抗力达到平衡。在增量加载以及在一级增量内的迭代计算过程中, 程序会根据结构的刚度变化, 调整加载水平。基本上刚度大则加载幅度大, 进入非线性后刚度小则加载幅度小。这种与结构刚度、变形相关的增量加载幅度的调整, 依据弧长法确定。

几何稳定性分析中, 采用比例加载方法, 即每步加载均按照全部作用荷载的比例确定。已经施加的荷载与全部荷载的比例, 即为加载水平。

一、数据准备

稳定分析不需要特别的数据准备。在常规工程设计模型基础上不做任何改动, 即可进行几何稳定性分析。

结构数据方面:

工程模型中的自由度释放(铰接、二力杆等)、支座约束、节点弹簧等, 在稳定性分析中依然有效。模型中各类刚度调整系数, 包括扭转刚度折减、连梁刚度折减、楼板的翼缘作用, 由于是针对混凝土结构, 在稳定分析中均被忽略。

STRAT 可以对整体结构进行稳定性分析。网架、网壳、桁架等柔性结构, 一般均支撑于其它框架、剪力墙结构等主体结构之上。稳定分析中, 可以针对整个结构进行计算, 而不必建立针对柔性结构的单独模型。如下图各类结构, 均可直接计算。

荷载数据方面:

几何稳定分析忽略如下荷载: 1)水平动力反应谱、竖向动力反应谱; 2)忽略竖向荷载的分层模拟施工; 3)忽略移动荷载。

除此之外, 各类荷载均可以参与稳定性分析, 包括: 1) 直接导算到单元、节点荷载(恒活重力荷载、风荷载、水压、土压、不作为移动荷载的吊车荷载); 2)需要特别计算的荷载(温度荷载、预应力荷载)。

二、Strat 计算

菜单：非线性计算→几何非线性

按钮：

启动命令之后，首先弹出如下对话框，设置计算参数。



图 1、计算参数设置

2.1 计算参数设置

分级加载步数：该参数表示加载的一般幅度。首次增量加载采用该值，后续的计算会根据非线性变形状态动态调整加载幅度。如果结构进行非线性变形，实际的增量加载步数会大于该值。较大的分级加载步数，更有利于逼近峰值点和跟踪下降段。程序隐含步数是 20，如果计算不收敛，可以增大步数(如 50)。如果不需要逼近峰值点和跟踪下降段，或者估计全部加载后结构不会屈服，加载步数不宜过大，以节省计算时间。

荷载放大系数：结构模型中的荷载，一般是工程设计荷载。如果需要分析超过该荷载下结构是否会失稳，输入大于 1 的系数，则所有荷载均乘以该系数后再加载。

计算结束条件：这是重要的计算过程控制参数。当荷载较小，全部加载结束后结构仍然不会屈服，计算自然中止，则该参数不起作用。当荷载较大、加载过程中结构会屈服，通过该参数控制计算中止的条件。

1) **加载完毕。**结构屈服后继续计算，跟踪下降段，在结构大变形后新的稳定位形上继续加载，直到全部加载技术。需要注意，逼近屈服点和跟踪屈服后下降段，均需要很小的加载步长并反复迭代，需要耗费非常多的计算时间。除非特别需要，一般不需要选择该项。因为实际工程一般不容许结构失稳屈服，也不会利用屈服后的承载力。

2) **至屈服点。**如图 2 所示 A 点，即结构屈服临界点，该点一般可以代表工程结构的最大承载水平。一旦程序根据结构的刚度和变形，判断已经逼近屈服点，将中止计算，同时显示已经加载的水平。需要注意，接近屈服点时结构处于不稳定状态，需要极小的加载步长(程序自动调整)和较多的迭代步数。

3) **刚度降低。**如图 2 所示 B 点，B 点位于屈服点 A 之前。在 B 点中止计算可以避免逼近屈服点所耗费的计算时间，同时结构刚度已经大幅度降低产生较大变形而失去继续承载能力，可以作为实际工程结构的最大承载水平。确定 B 点的刚度是结构宏观切线刚度，降低的幅度隐含 $K_B / K_0 \leq 1/10$ ，

用户可调整。

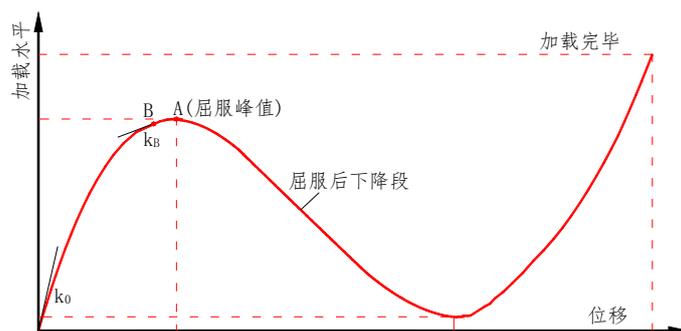


图 2、结构非线性变形曲线及控制点

工况参与系数：结构稳定性分析，可以针对单个荷载工况，也可以几个工况的组合。列表框中显示了工程中已经设定的所有荷载工况，在一次分析中，设定各类工况的参与系数，实现多个工况的组合。程序隐含的工况系数是《荷载规范》规定的该类荷载的**准永久值系数**。一般情况下，可以直接采用程序隐含的各工况参与系数，并通过**荷载放大系数**放大 2~3 倍进行稳定性分析，以判断结构在最常见的受力状态下，是否会失稳。

包含初始位移/包含初始内力：研究表明，初始位移和初始内力对结构稳定性能影响显著。初始位移产生的原因是尺寸偏差、结构安装过程的误差。初始内力也称初始应力，构件焊接、制作都会在截面内产生残余应力。

实际工程中的初始位移、初始内力的分布非常复杂，并且离散具有偶然性，为了方便工程实用，软件采用与结构荷载、模态相一致的变形和内力作为初始值。

选中**包含初始位移**，下面的控件将被激活。

1) 选中**工况变形**，采用恒、活、风等静力工况产生的变形作为初始变形，这时需要选择一个工况。程序会自动读入此前计算的工况内力和变形，这就要求事先弹性计算(命令：连续计算 )。

2) 选中**振型模态**，采用结构振型模态作为初始变型，这时需要选择一个振型。同样，要求先弹性计算，并且包含“动力反应谱”计算(Prep→荷载→总体参数设置)。

程序读入工况变形、振型模态后，按照一定的比例缩放。选中**缩放比例**则按设定缩放比例。选中**最大(m)**项，则按变形、振型的最大平动位移分量(d_x, d_y, d_z 三者之中的最大值)为设定的值，确定整个变形、振型的缩放比例。如果采用振型模态作为初始变形，必须选择“最大(m)”项，因为振型中的位移数值大小只有相对意义，不能直接采用(多数被输出的振型都是经过归一化处理，使最大值为 1.0)。

如果需要设定不与工况、振型相关的初始位移，在 Prep 建模时，直接挪动结构的节点，形成初始位形缺陷。例如对称的穹顶结构，为了得到不对称的初始缺欠，可以将穹顶一侧的节点挪动设定的距离，使结构不对称而处理较为不利的受力状态。

初始内力的操作类似，但只可以选择工况内力作为初始内力。

2.2 参数自动保存

程序自动保存设置的参数到硬盘文件中。再次进行稳定分析时，如检测到该文件存在，将提示读入，以免每次均需要重新设置参数，以方便操作。存储的文件名为“NAME.geoOut”。

2.3 计算过程

点**确定**退出对话框，程序将开始计算。软件显示计算过程参数，如图 3 所示。**增量步**指增量加载的步数，**迭代步**指一次增量加载过程的迭代次数，**加载水平**指结构上已经施加荷载占总荷载的比例。

请注意计算过程参数的特点：

1) 加载水平所表现的每级加载增量，并不与设定的“分级加载步数”确定的加载增量一致。结构进入非线性之后，刚度降低，每次的加载增量会减小。

2) 当逼近峰值点时，每级加载增量将是一个非常小的数值，屏幕显示加载水平的数值不改变。只要增量步数在增加，表明加载仍在继续。

3) 进入屈服后下降段之后，加载水平的数值会减小。越过屈服后下降段、结构进入新的平衡，加载水平的数值会再次上升。

4) 同一级增量步会重复出现。这是由于结构逼近屈服点，或者位于下降段，一次增量加载的不成功，程序会缩短加载增量的步长，重新计算，直到在该级加载增量的情况下迭代收敛。

程序即时记录计算过程参数，如果计算**非正常中断**，仍可以通过 Plots 查看已经计算各加载增量的结果。

结构的屈服、屈服后性能非常复杂。对于实际的工程，往往屈服点即为结构的最大承载力点。屈服后的承载力低于屈服点承载力，不一定能够做到屈服后大变形后达到新的平衡点而使承载能力再次上升。在这种情况下，选择加载完毕的计算结束条件，往往导致计算永远不能结束。程序隐含有最大增量加载步数，至此强制停止。用户也可以判断根据屏幕提示的加载水平值判断，强制中止程序的运行。**强制中止运行后，已经计算的各级增量计算点依然有效，可以通过 Plots 查看。**

计算结束之后，程序会提示计算结束条件，并提示结束时的加载水平。如图 3 所示计算过程，在屈服点结束计算，屈服点的加载水平为 0.424583。

计算过程中屏幕提示信息，同时输出到文件 NAME.ifo，为文本文件，可打开查看。



图 3、Strat 计算过程提示参数

2.4 结果输出

程序输出稳定分析每级增量加载迭代平衡后的位移、内力、应力，在 Plots 中通过各类图形、图表显示。结果文件非文本文件，不直接打开。

三、Plots 查看稳定分析结果

Plots 模块涉及稳定分析结果查看的操作有 4 项，分别显示统计结果和变形曲线、梁柱内力、板应力、变形等。各种过程内力、应力、位移，均可以动画显示。

3.1 稳定分析结果统计

菜单：稳定分析→稳定分析结果统计。按钮：。F5 热键图形设置

该功能在查看单元内力、加载水平与节点位移之间的变化曲线，形成图表，直观显示结构随着荷载增加所体现的非线性性能。启动命令后按 F5 热键，调用图形参数对话框，如图 4 所示，选择输出的图形内容。



图 4、稳定分析统计图形设置

输出的图表一变形为 X 轴。需要指定一个节点号，并且选择该节点的变形分量。

图表的 Y 轴有两项：

1) **加载水平**，即已经施加荷载与全部荷载的比值。

2) **截面内力**，指梁柱的截面内力，或者墙、板的节点内力。此时需要指定单元序号，可以在 Plots 计算简图模式下按 F5 热键，显示各类单元的编号。当选择了一种单元，下面的选择框内将显示该单元对应截面(节点)序号，和该单元的内力类型。

梁柱单元：首先选择起端、末端截面，然后选择截面内力类型。N 为轴力，Q2/Q3 为局部 2/3 轴的剪力，T 为扭矩，M2/M3 为绕局部 2/3 轴的弯矩。

墙单元：可选择底面(起端)、顶面(末端)截面的内力。各内力意义同梁柱。

板单元：首先选择一个节点序号，然后选择该节点的内力类型。 M_x/M_y 为绕板局部 x/y 轴的弯矩， M_{xy} 为扭矩， Q_x 可以理解为平行于局部 y 轴的板边的平面外剪力， Q_y 为另外边剪力。这五种属于板单元平面外内力。 S_x/S_y 则是板平面内的拉压应力， S_{xy} 为平面内剪应力。

图 5 所示曲线以位移为 X 轴，以加载水平为 Y 轴。

曲线上可以显示加载点的序号。当图形参数对话框(视图→图形参数；按钮)选中“显示节点编号”时，将在曲线上显示加载点的序号，可以直观看出各加载点的位置。

所有图表，均可 Dwg 图形输出，作为计算报告的材料。

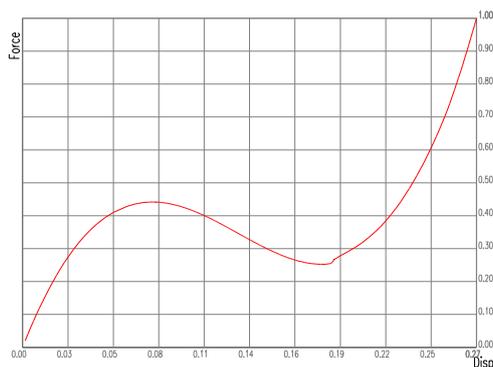


图 5、稳定分析过程变形-加载水平曲线

图表设置

用户通过调整图表的各项参数，使显示的曲线图表清晰、美观。STRAT 开发有通用图表显示系统，采用统一的格式，各类类型计算结果的图表操作方式相同。

所谓图表，都是由两类参数分别作为 X、Y 轴，这两类参数的相对比例，即确定图表的长宽比，而参数的绝对值则确定图表输出图形的大小。

START 图表系统，对时间、位移、力、弯矩等均设定统一的比例系数，各参数乘以该系数后作为图表的 X 坐标或 Y 坐标。

可以调整图表的刻度线数量。

字体的大小需要调整，使图表刻度标注不重叠，也不至于过小。程序会根据标注数值的大小，自动调整显示的类型。绝对值小于 0.01 或大于 1000 采用指数显示，其他采用小数显示。还会根据数值大小调整保留的小数位数，不至于使显示数值过长导致重叠。

自适应比例：完全由用户通过各变量的比例系数调整图表，有时较为麻烦，尤其是同一类参数在不同节点、不同截面数值大小差别显著，均需要调整系数。选中自适应比例项，则程序自动调整两个分量的相对比值，并自动选择合适的字体大小，使图表处于最佳的显示状态。

自适应比例时，程序以一个轴为基准轴，调整另外轴的比例。**楼层统计**(楼层内力、位移)、**滞回曲线**(力-位移，应力-应变)、**稳定分析**(变形-加载水平)等图表，以 Y 轴为基准。结构动力相应分析中的位移、节点力随时间的**响应曲线**，以及**地震波波**形，以 X 轴为基准。但自适应比例下的图表过大、过小时，可以调整基准轴参数的比例系数。

3.2 稳定分析内力图

菜单：稳定分析→稳定分析内力图。按钮：。F5 热键图形设置。切换显示前/后加载点。动画显示。

该功能在查看梁柱单元、墙单元，在稳定分析各级加载下的内力图。程序输出了全部单元、全过程的内力。

启动命令后按 F5 热键，调用图形设置对话框，如图 6 所示。显示内力有三类：

最大内力：全部计算过程中，各单元、各截面内力的最大值(绝对值)。图形显示之前需要针对所有点统计，如果计算点数较多则可能统计时间较长。

最终累积内力：即计算结束后最终的内力值，相当于过程内力中的最后计算点。

过程内力：计算过程中任意计算点的内力，这时需要选择计算点。

内力通过图形显示。当选择**直方图**时，图形高度有两种确定模式。**最大高度**则按绝对值最大内力值为设定高度确定图形比例，在不同的计算点显示比例会改变，会即时显示在固定比例框内。该模式使图形保持在合适高度范围，但不能直观反映内力的变化情况。**固定比例**保持显示比例不改变。**(技巧)**：可以先选择设定最大高度，使图形处于合适的比例。然后选择固定比例，按/按钮动态观

察内力的变化情况)

内力图同时显示该计算点的变形。变形的缩放比例在变形图(见 3.3 条)参数对话框中设置。如果不希望同时显示变形，将变形缩放比例设为 0。

内力通过图形显示。当选择**直方图**时，图形高度有两种确定模式。**最大高度**则按绝对值最大内力值为设定高度确定图形比例，在不同的计算点显示比例会改变，会即时显示在固定比例框内。该模式使图形保持在合适高度范围，但不能直观反映内力的变化情况。**固定比例**保持显示比例不改变。

显示稳定分析内力图时，按按钮，将动画显示内力随加载的变化过程。启动动画之前，可先选择固定比例模式。



图 6、稳定分析内力图设置

3.3 稳定分析变形图

菜单：稳定分析→稳定分析变形图。按钮：。F5 热键图形设置。切换显示前/后加载点。动画显示。

该功能在查看各类单元，在稳定分析各级加载下的变形。程序输出了全过程的节点变形。启动命令后按 F5 热键，调用图形设置对话框，如图 7 所示。

稳定分析变形图也有最大值、累积值、瞬时值，意义同 3.2 条内力图。

显示数值：当显示xyz位移，或绕xyz转角时，标注各点的变形数值。当显示**最大位移/转角**时，不标注数值。

单方向位移：当显示xyz位移，或绕xyz转角时，只保留选中的位移值、其它值设 0，以显示结构在单个方向的变形。同样，当显示**最大位移/转角**时该选项不起作用。

其它操作可参考 3.2 条。



图 7、稳定分析变形图设置

3.4 稳定分析应力图

菜单：稳定分析→稳定分析应力图。按钮：。F5 热键图形设置。/  切换显示前/后加载点。 动画显示。

该功能在查看板单元(4点/3点)，在稳定分析各级加载下的弯矩、剪力、应力。程序输出所有单元全过程的节点应力值。

变形。启动命令后按 F5 热键，调用图形设置对话框，如图 8 所示。



图 8、稳定分析应力图设置

四、Archi 导入稳定分析单元内力

菜单：文件→导入其它内力→几何稳定分析内力

该功能导入几何稳定分析中梁柱单元、墙单元的内力，用于结构设计，使几何稳定分析结果得到直接的应用。启动命令后弹出图 9 对话框。

可以读入两种内力类型。

采用最大值：取稳定分析所有计算点内力的最大值(绝对值最大，但保留正负号)，由于需要读入所有计算点内力判断，大工程需要一些时间。

采用累积值：取即计算结束后最终的内力值，也就是最后一个计算点的内力值。

实际工程设计中，具体选择哪一种内力值，需要结合 Strat 计算结束条件(见 2.1 条)。稳定分析采用比例加载，一般而言，荷载比例越大相应单元内力也大，作为构件设计内力也就更趋于安全，因此需要选择加载水平较高处的内力。对于计算结束条件为**至屈服点、刚度降低时**，宜选择最终的累积值。当计算结束条件为**加载完毕时**，且加载过程中结构大变形屈服，则可能计算结束时结构的位形已经与最初始位形有很大的偏差，其内力分布已经不能反映结构的特点，此时需要选择最大值，取全部加载过程的内力包络值。

Archi 读取稳定分析内力后，替换一个静力工况的内力，将作为一个静力工况的内力参与构件设计。对话框底部列出了该工程的所有静力工况，选择一种替换，例如选择恒载或活载。替换静力工

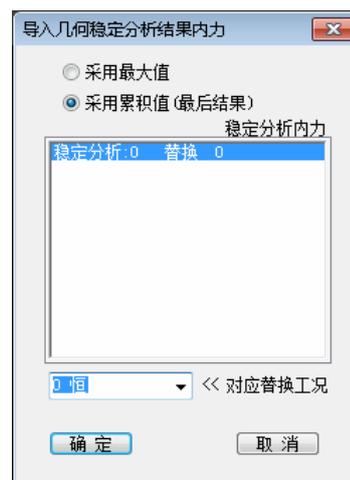


图 9、Archi 导入稳定分析内力

况，将稳定分析内力，替换内力文件中的相应工况(梁柱 F0.00 文件，墙 F1.00 文件)。需要注意，一旦工况内力被替换将不能恢复，如欲恢复需要重新计算。

如果稳定分析采用几个工况的组合，这样可能需要有多次稳定分析，得到多组内力。这时需要注意如下几点：

1) 稳定分析的内力组数，可能超过静力工况的数量。这时可以返回 **Prep**，预设多个空的荷载工况(没有实际荷载)，用这些空的工况接受稳定分析内力。

2) 组合稳定分析得到的内力，是并列的，也就是说这些内力不会同时出现，这需要利用 **STRAT** 软件荷载组合机制。在 **Archi** 荷载组合对话框中，设这些稳定内力的工况类型为“可变”，并设这些可变荷载为“互异”，则这些稳定内力分别与其它类型荷载组合，但相互之间不组合。

五、工程例题

例题 1：折梁 (geo_BeamArc._Pre)

图 10 所示折线梁，跨度 20.0m，中间起拱 0.6m，截面及材料见图 10，两端嵌固约束。中间拱顶点作用集中力 400kN，不计梁柱自重。每个梁细分 4 段，总共 8 个梁单元。取消 **Prep** 刚性楼层假定、基底嵌固假定。

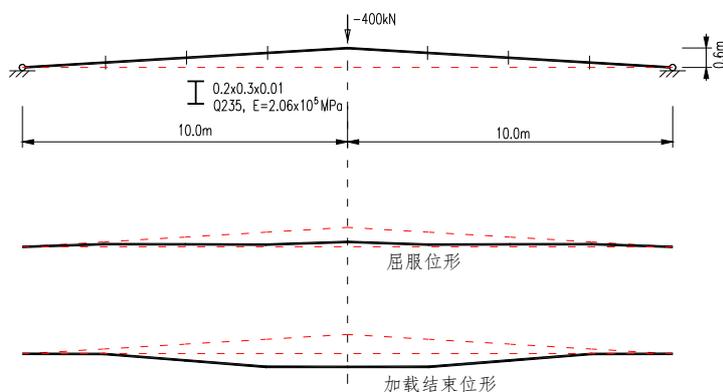
Strat 稳定分析分级加载步数分别采用 20 步、50 步计算，也分别采用 3 种计算结束条件(见 2.1 条)，其它参数采用隐含值。计算过程参数见表 1，部分结果示于图 10。

两种分级加载步数，均可以正确逼近屈服点，并跟踪屈服后下降段。表明 **STRAT** 软件几何非线性单元及算法的稳定性、可靠性。

加载完毕后顶点挠度为 1010.86mm，向上起拱的折梁，变成向下起拱的折梁。在考虑几何大变形情况下，折梁由稳定状态，进入屈服不稳定状态，越过不稳定屈服顶点后向下起拱，再次进入稳定状态，并可以继续承载。

表 1、计算过程参数

分级加载步数	增量加载次数			结束时加载水平		
	1/10 刚度	至屈服点	加载完毕	1/10 刚度	至屈服点	加载完毕
20 步	99	119	259	0.615	0.640	1.0
50 步	263	294	594	0.619	0.644	1.0



a) 计算模型和位形 (图示位形未经放大，是实际位形)

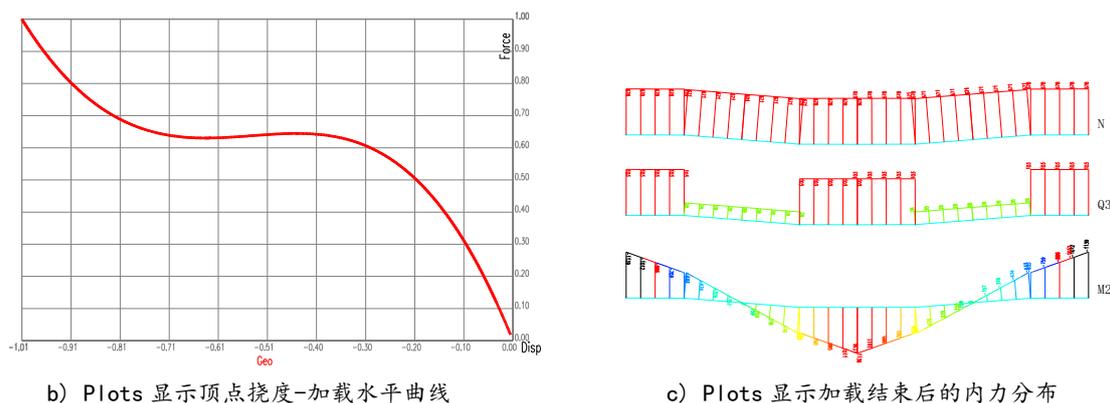


图 10、折梁的几何稳定非线性分析

例题 2：单层穹顶网壳 (geo_Shell._Pre)

Prep 导入穹顶模型(菜单：文件→接口输入→导入穹顶模型)。选择凯威特型，穹顶跨度 50，高度 9，网格长度 3，点显示按钮，左侧图形框即显示穹顶平、面图。设置构件截面为圆形，直径 0.18m 壁厚 0.005m，设材料为钢材。设置结果如图 11 所示。点确定退出，则一个直径 50m 的穹顶网壳结构模型即形成。

形成网壳曲面的网格荷载。网格导荷模式(菜单：特殊荷载→网格导荷模式，按钮)，选中“导算至节点”项。修改网格荷载的厚度为 0。导算网格荷载，输入 0 工况荷载-10，投影模式选择“(F) 面投影”，表明所加荷载沿斜面均布(图 12)，点确定退出后框择所有网格加载。取消隐含的刚性楼层假定、底部嵌固假定，不计算梁柱单元自重，底部一圈节点施加较支约束。穹顶网壳的计算模型即输入完毕，如图 13 所示。总计 756 梁柱单元，270 节点。

进入 Strat 模块运行几何稳定分析命令。设分级加载步数为 50，设荷载放大系数为 4，计算结束条件选择至屈服顶点，其它采用隐含值。稳定分析分级增量加载 56 步时达到屈服峰值，此时加载水平 $\lambda=0.7452$ 。

结合荷载放大系数，则可以确定，使该穹顶结构的达到屈服的极限均布荷载为 $q_u=10 \times 4 \times 0.7452=29.8 \text{ kN/m}^2$ 。网壳的屈服形态示于图 14，可见是由于局部凹陷导致屈曲。

需要指出的是，这类结构的屈服后行为极为复杂。在屈服后比例卸载的过程中，凹陷部位的节点与其它部位的节点变形趋势会有不同。使结构充分屈服变形，达到向下的拱形并重新区域稳定、使承载提升，将是一个非常长的计算过程，并且由于计算过程的累积误差，也不一定能够达到这一点。因此，如果选择结束计算条件为加载完毕，则计算时间非常长，且有可能不收敛。工程应用中，主要的目的是判定结构的屈服极限荷载，因此选择至屈服点、或者刚度降低较为合适。图 15 是该穹顶结构屈服后，在有限分级增量步内(3000 步)，位移-加载水平曲线。可以看出各节点屈服的位移趋势差别很大，甚至相反。

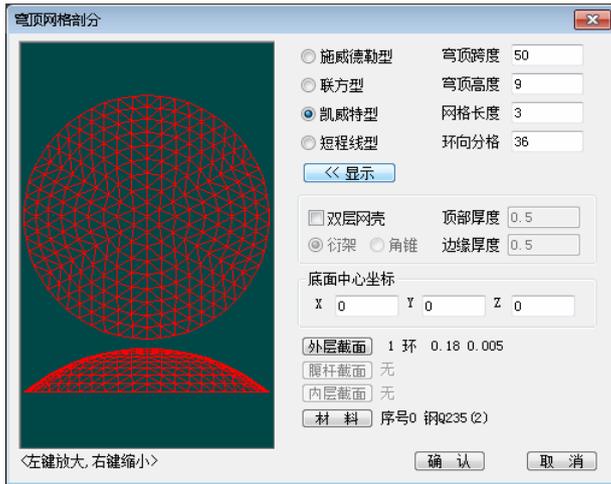


图 11、Prep 导入穹顶模型

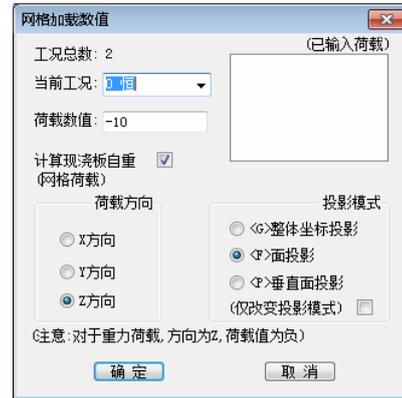


图 12、施加穹顶网格荷载

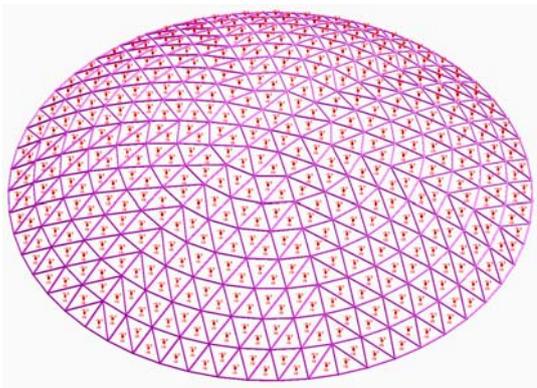


图 13、STRAT 穹顶网壳结构及荷载

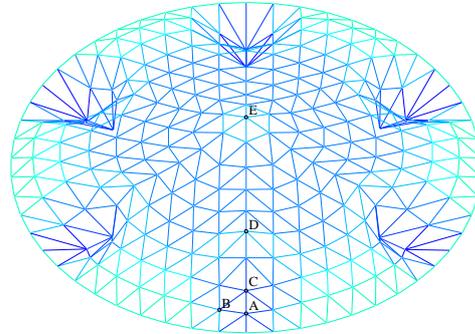


图 14、屈服形态

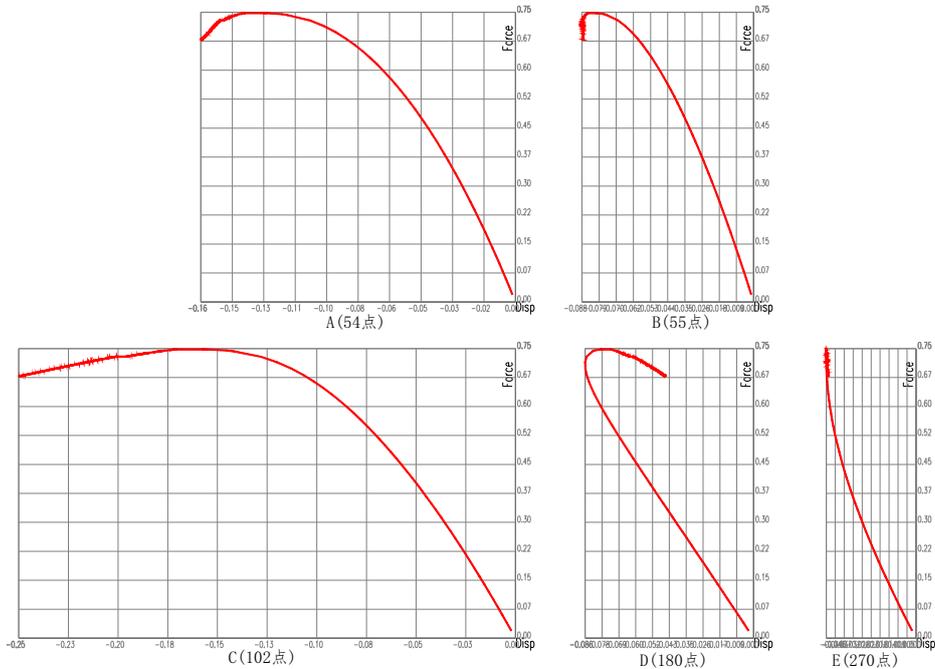


图 15、部分节点屈服后变形 (节点位置见图 14)

附录 A： 典型算例

这里通过一些典型的算例，验证 STRAT 几何非线性分析功能的正确性、精确性。

算例 1： Williams 双杆体系 (geo_Toggle._Pre)

两个斜梁组成的平面刚架，两端嵌固约束，尺寸及截面、材料见图。Williams 进行过理论和实验研究，此后多为研究者也进行过理论分析。计算中每半跨分成 5 个梁单元，STRAT 也同样处理，计算得到的挠度、加载水平曲线，示于图 A1，可见 STRAT 结果与此前的研究结果高度一致。

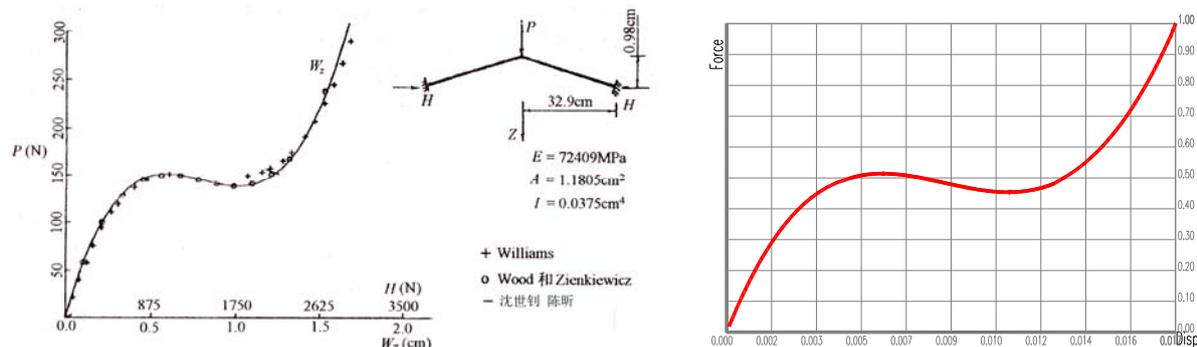


图 A1、Williams 双杆体系 (右侧为 STRAT 结果，加载水平 $\lambda=1$ 对应 $P=0.30\text{kN}$ ，)

算例 2： 扁拱 (geo_Arch._Pre)

两端铰接扁拱，STRAT 模型总共 8 个等长度直梁单元模拟，加载 $P=30\text{kN}$ 。多位研究者用位移增量法、荷载增量弧长法计算，模型及各研究得到的拱顶点挠度-加载水平曲线示于图 A2。图右侧列出 STRAT 计算结果，与此前研究结果高度一致。

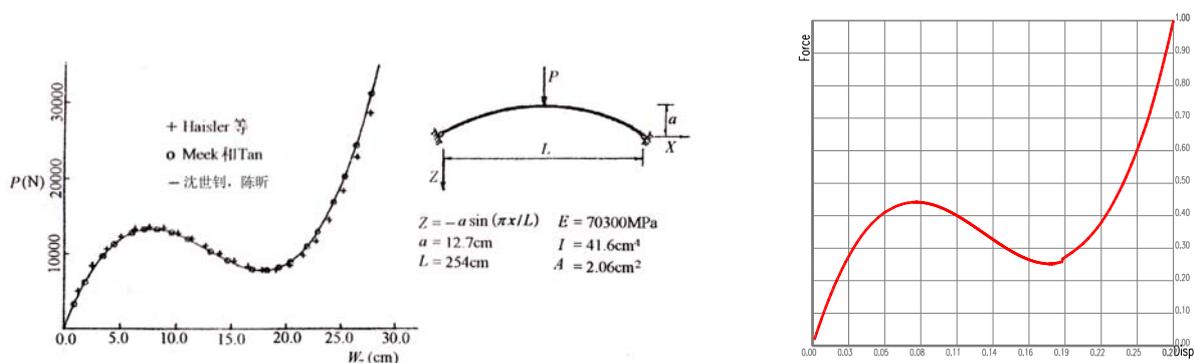


图 A2、扁拱 (右侧为 STRAT 结果，加载水平 $\lambda=1$ 对应 $P=30.0\text{kN}$)

算例 3： 六边形刚架 (geo_PolyArc._Pre)

六边形起拱刚架，底部节点水平面内滑动约束。刚架每边采用 4 个梁单元模拟。STRAT 模型加载 $P=0.8\text{kN}$ 。多为学者的研究结果及 STRAT 计算结果，示于图 A3，达到高度一致。

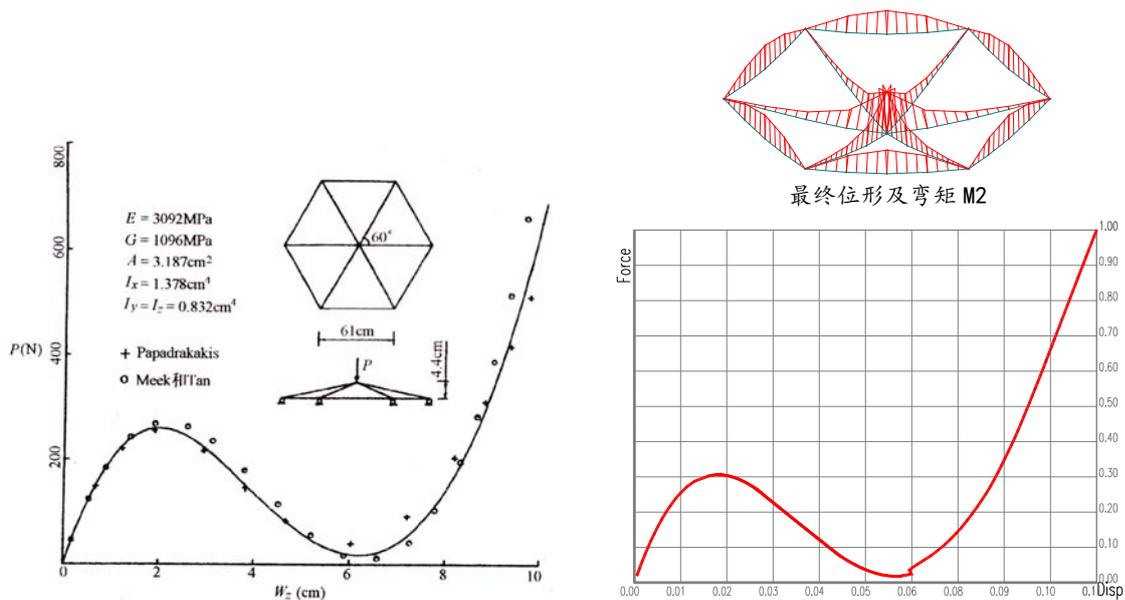


图 A3、六边形刚架（右侧为 STRAT 结果，加载水平 $\lambda=1$ 对应 $P=0.8\text{kN}$ ）