

佳构 STRAT 软件模拟框架倒塌试验模型竞赛结果

清华大学有关机构，完成一项混凝土框架结构拟静力倒塌试验，以期当前各类结构分析软件和方法，与试验结果进行对比。我们用通用建筑结构 STRAT 软件的大震弹塑性分析功能，尝试模拟试验模型，得出初步结果。作者非常感谢试验者无偿公开试验数据。

1、STRAT 技术条件

1、单元。基于积分算子法的非线性纤维梁柱单元。梁柱截面细分成混凝土纤维、钢筋纤维，纤维为单向拉压杆，由基本材料的单轴应力-应变关系确定。平截面假定基础上的纤维束确定截面的双向偏压、轴向拉压的非线性性能。纤维沿纵向细分，细分位置不受积分点限制，可以任意加密以适应塑性区的刚度突变。单元截面的非线性性能，通过积分算子法集成单元刚度矩阵、荷载矩阵。

2、混凝土模型：**Kend-Park** 模型，考虑约束混凝土的强度、延性提高。下降段可选择曲线、直线*。卸载可选择指向原点、二折线(焦点模型)、有残余应变的直线下降*(混凝土规范提供)多种模式。考虑初始状态的混凝土抗拉，一旦开裂后将不再考虑抗拉。

3、钢筋：考虑 **Bausinger** 效应的滞回模型、随动强化 **Clough** 二折线模型、随动硬化曲线模型*。

4、粘结滑移：可选择考虑粘结滑移反复屈服引起刚度的退化*。

注：带*的为本次计算所采用的条件。

2、STRAT 软件模型

用一个梁柱单元模拟进行拟静力试验的悬臂柱，如下图 1 所示。为模拟位移加载过程，悬臂梁顶端设 $K_z=10^9\text{kN/m}$ 弹簧，试验实测的位移曲线放大相应倍数后，作为荷载加在悬臂梁顶端。由于弹簧的刚度远大于悬臂梁本身的抗侧刚度，在放大后的外荷载作用下位移一定，等效于在悬臂梁端作用给定位移。

截面细分混凝土纤维数 24×12 ，钢筋纤维位于表面保护层以内，为有宽度的微钢筋片。纤维延纵向等分 10 段。如下图 2 所示。

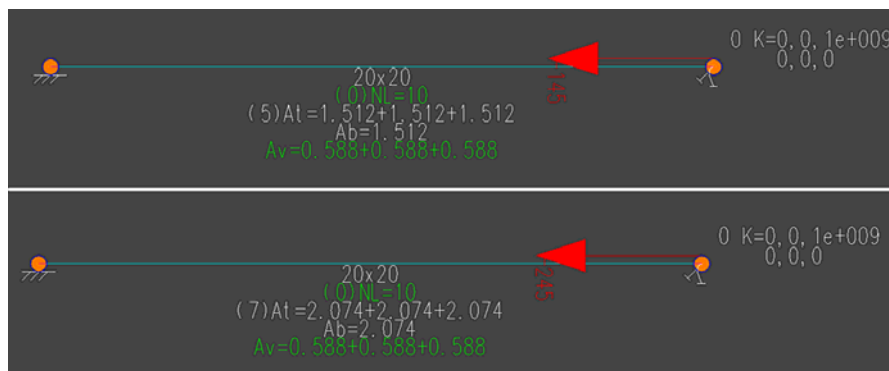


图 1、计算简图（上边柱，下中柱）

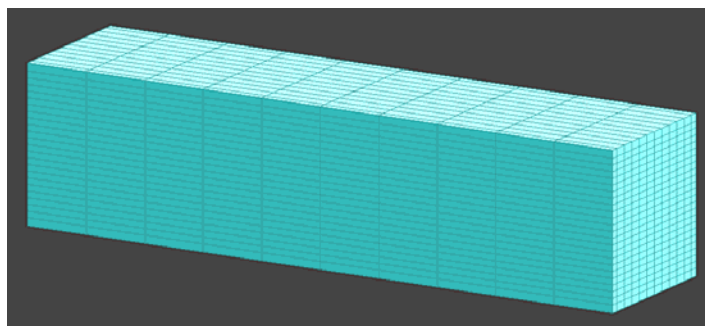


图 2、纤维细分模型(边柱、中柱相同)

3、STRAT 软件计算参数设定

1、材料参数

混凝土实测立方强度与标准 C30 混凝土接近，直接采用相关规范的参数。在 STRAT/Prep 材料对话框中选择标准 C30 混凝土即可。

钢筋的强度、弹性模量采用实测值。其中钢筋的强度，在 STRAT/Archi 中计算混凝土构件配筋时输入。程序能自动将该参数值，传递到前处理 Prep 中的非线性模型的钢筋参数中。

2、荷载曲线

试验加载位移曲线通过文件的方式，读入 STRAT 地震波库。如图 3 所示波库中，Rcyc1_CLV 是试验边柱的加载曲线，Rcyc2_ZZV 是试验边柱的加载曲线。为了使用方便，同时读入 xyz 三个分量，计算时根据需要再取舍。读入地震波的同时，按前面图 1 中设定弹簧值，乘以放大系数。

试验中施加的轴向力，作为恒定荷载输入，见图 1。

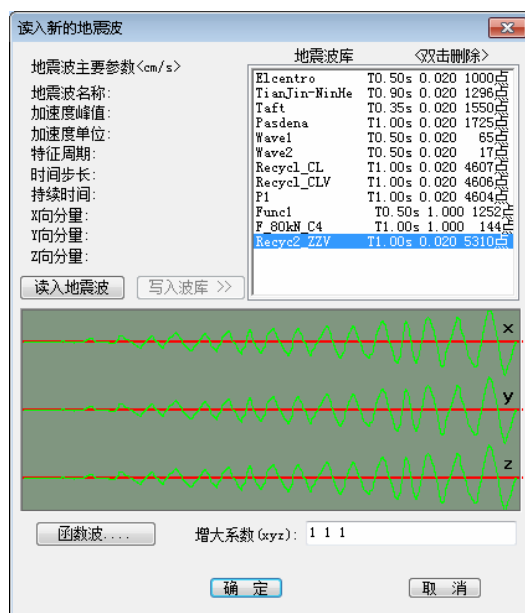


图 3、加载曲线(形成 STRAT 荷载波)

3、计算设置

在 Prep 建立模型，生成“计算_Sta 文件”后，进入计算 Strat 模块。点击“弹塑参数”按钮设置计算选项。

在第一个标签内选择地震波，如图 4(a)所示。从波库中双击选择 Rcyc2_ZZV 波，取消 XY 分量，保留 Z 分量。其它参数采用隐含不变，对于非地震加载，这些参数不起作用。

点击左下侧“阻尼、激振设置”，弹出图 4(b)对话框。选择“多点激振”，并输入荷载曲线的作用点序号 2。

在第二个标签内设置时程参数，如图 4(c)所示。首先选择“静力响应”，表明是拟静力加载。选则整体不平衡迭代，可以不选择单元不平衡迭代，可以不计算裂缝。为了查看全部计算结果，“输出单元内力”栏内选择“全部”。其它参数采用隐含值。

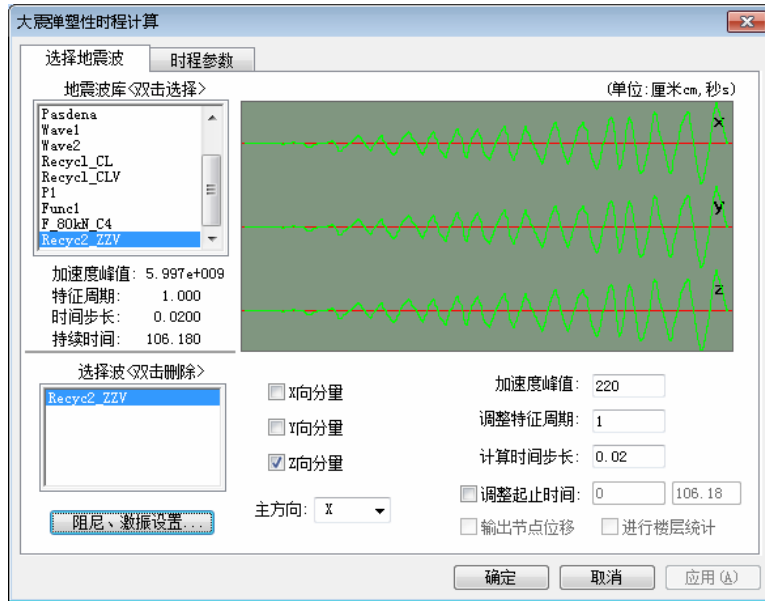


图 4(a)、计算设置/选择地震波

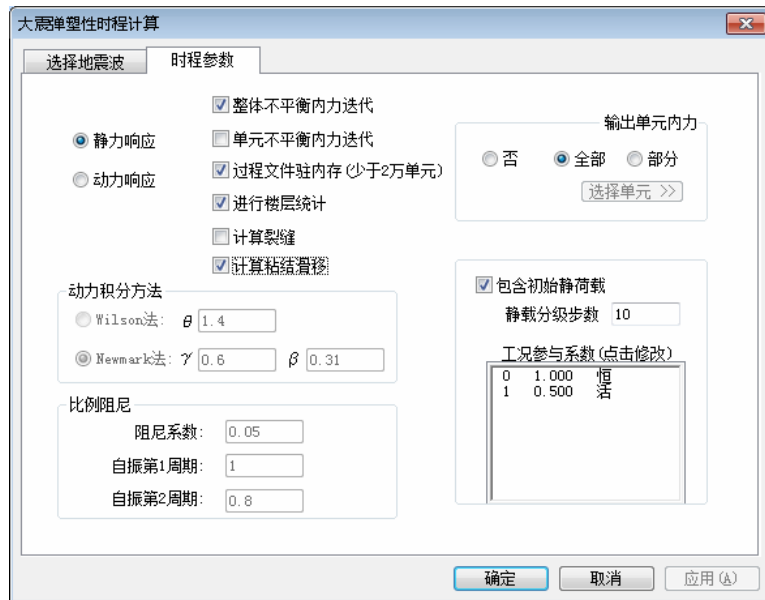


图 4(b)、计算设置/时程参数

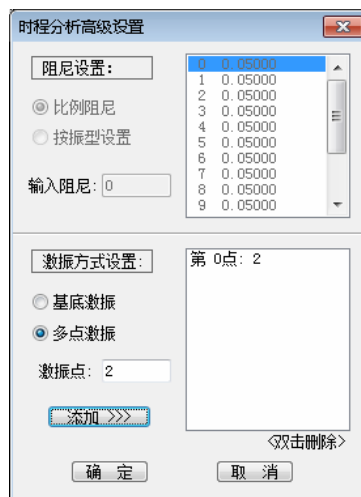


图 4(c)、计算设置/激振方式

4、STRAT 计算及结果查看

按前面第 3 条设定参数后，点 STRAT/Strat 中“弹塑时程”按钮，将完成计算。
计算结果的查看在通用后处理 Plots 模块。在“非线性分析”菜单内。

4.1 “弹塑性时程统计图”显示计算过程的各项统计结果。

图形选项如 5 所示(通过 F5 热键调用该对话框)，左侧一列是能够显示图形的类别。这里我们主要用到三项，下面分别介绍。

右侧设置显示图形的比例。通过设定时间、位移、力等参数的相对缩放比例系数，确定图形纵横比。如选择“自适应比例”，程序将根据图形最适合显示状态设定个参数的缩放比例，并自动确定标注字体的高度。



图 5、显示选项

1) 节点位移曲线。在中间“选项”内输入需要输出的节点号，如果输出水平位移则同时输出 xy 两方向的值(并列两个图表)，输出竖向位移则仅输出变形的 z 向分量的曲线。如图 6 所示，显示了第 1 节点的竖向变形时间过程曲线。

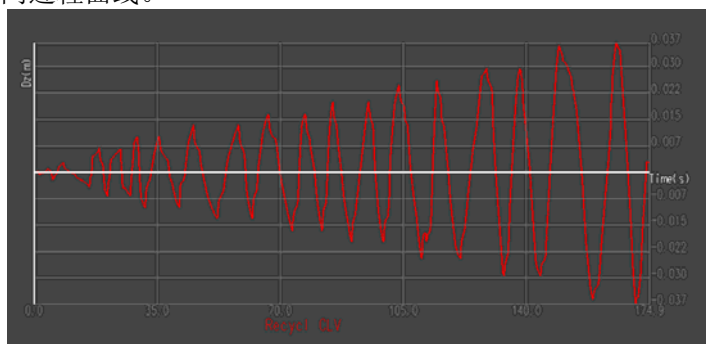


图 6、节点位移曲线

2) 滞回曲线(位移-内力)，以给定节点的位移为水平轴，以给定单元的内力为竖直轴，绘制响应的时程。如图 7 所示，第 1 节点的位移的 z 分量，与第 0 单元的起端剪力 Q_x ，得到的滞回曲线。特别注意：在计算过程中，所有节点位移均输出，但单元内力只是在设定之后才输出，见图 4(b)对话框。

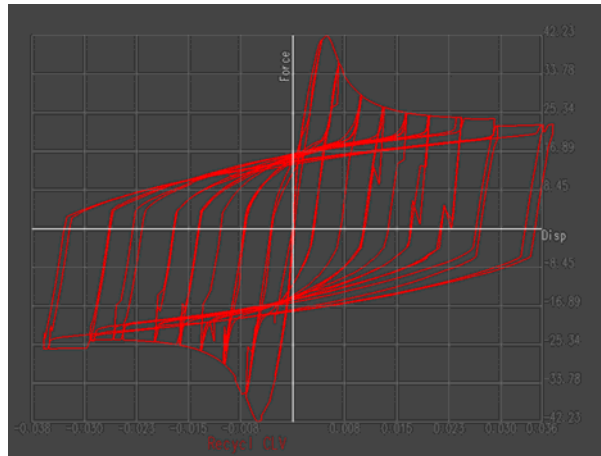


图 7、滞回曲线(位移-内力)。

3) 滞回曲线 (纤维应力-应变)，绘制选择混凝土纤维、钢筋纤维的应力-应变时间历程曲线。只有被输出的单元，其纤维的应力、应变才被输出到文件，才能绘制滞回曲线。混凝土纤维的编号，从截面的左上侧开始，先水平，在竖直。钢筋纤维的编号在基本混凝土纤维编号之后。图 8 是一根钢筋纤维的应力-应变滞回曲线。

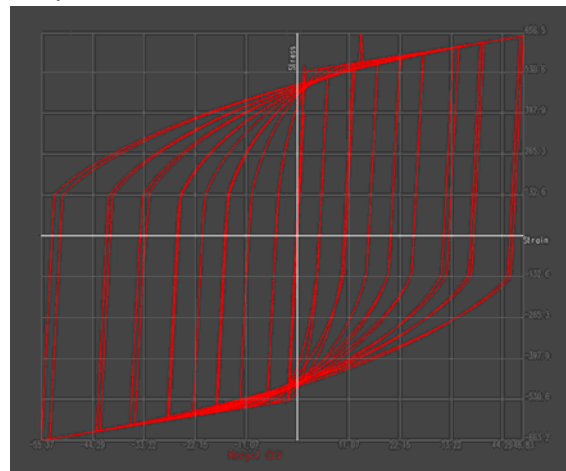


图 8、滞回曲线(纤维应力-应变)

4.2 “弹塑性时程内力图”显示构件的非线性过程截面内力、截面状态、纤维应力、纤维状态等参数。如图 9 即为显示的钢筋、混凝土纤维的应力。

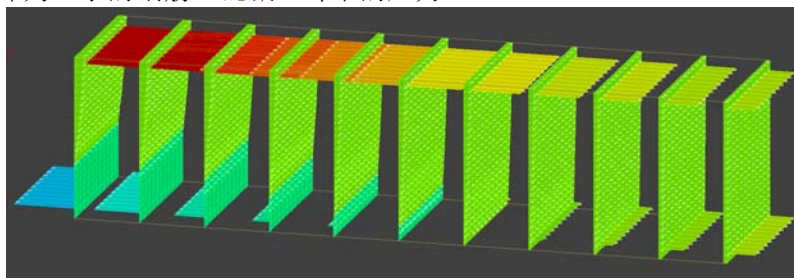
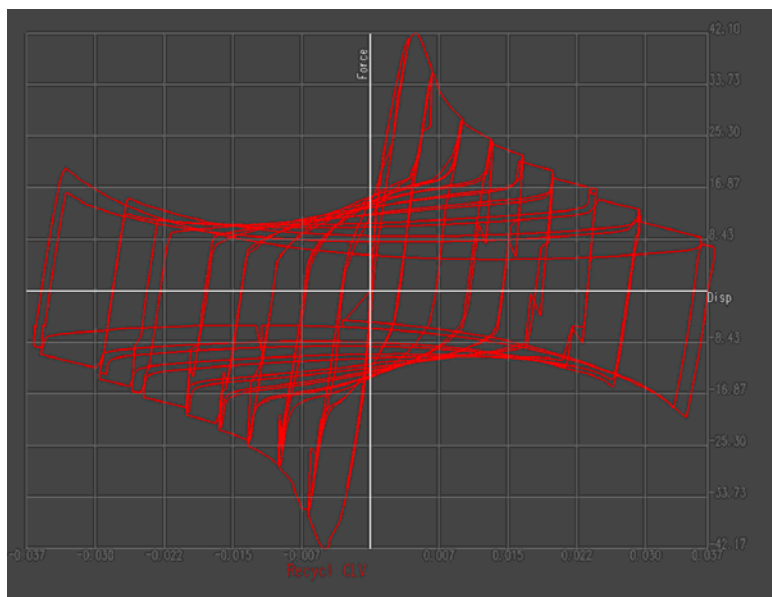


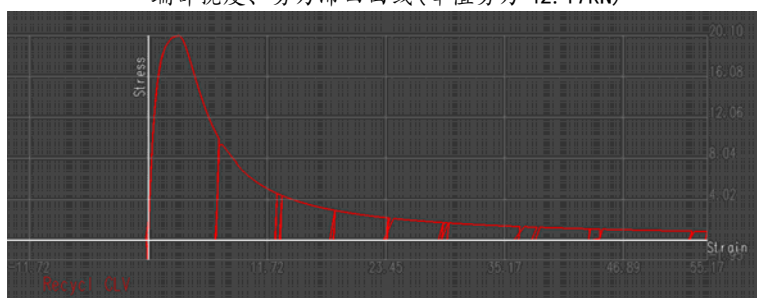
图 9、钢筋、混凝土纤维应力

5、STRAT 软件模拟结果

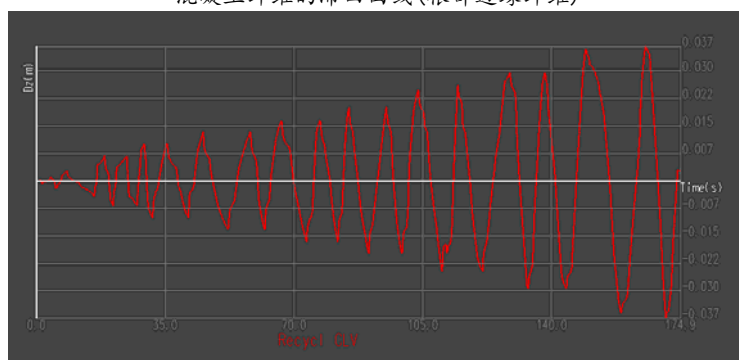
5.1 边柱



端部挠度、剪力滞回曲线(峰值剪力 42.17kN)



混凝土纤维的滞回曲线(根部边缘纤维)



加载点真实位移响应

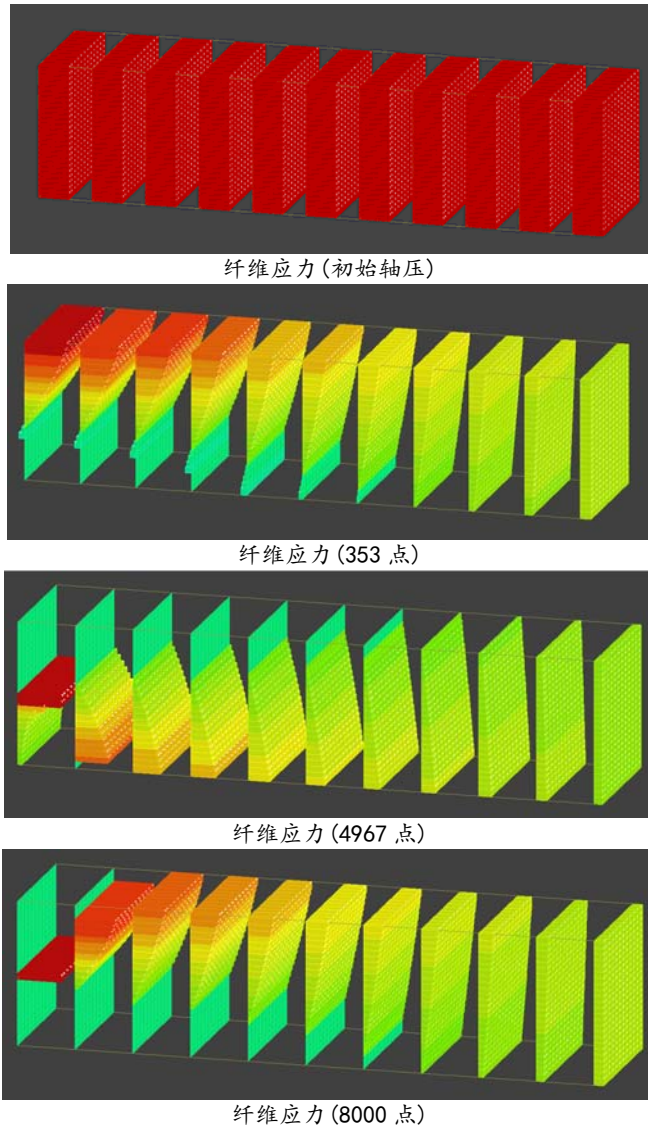
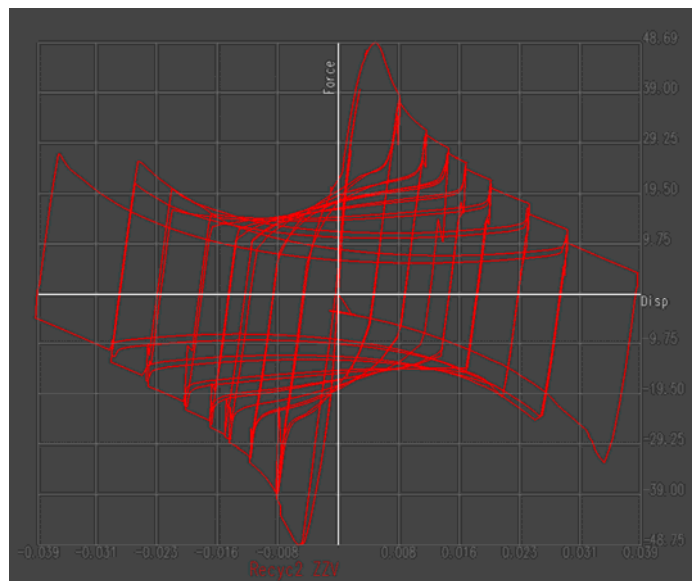


图 10、STRAT 模拟边柱模型结果

5.2 中柱



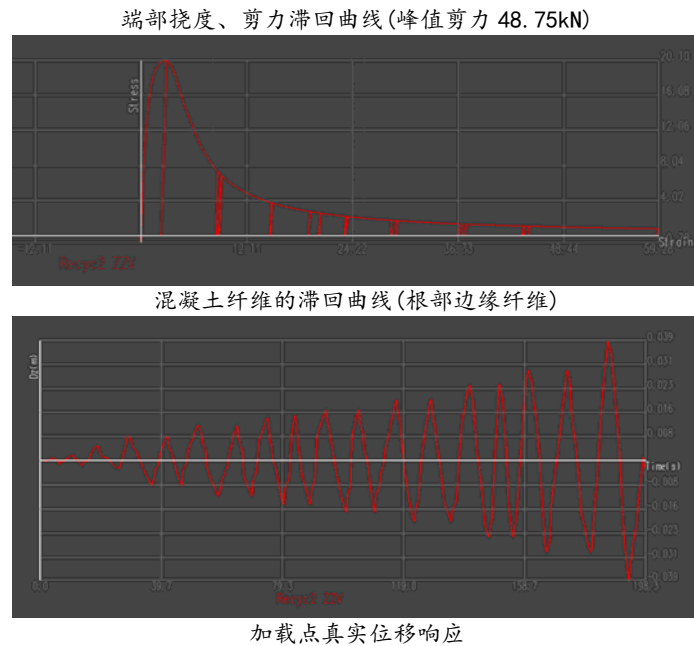


图 11、STRAT 模拟中柱模型结果

6、STRAT 模拟结果分析

1、STRAT 软件的模拟曲线，与试验得到的曲线形状基本一致。程序计算得到的剪力峰值，也与试验结果接近。

2、STRAT 软件完好地模拟了混凝土压弯构件的下降段，表明 STRAT 软件基于积分算子法的纤维单元，能正确处理负刚度问题，具有强大的适应性，是混凝土非线性问题的完备解决方案。这种下降段体现在两个层次上：

- 在多次循环荷载下，构件承载力与刚度均呈下降趋势，如下图曲线 A。
- 在一次单调加载过程中，混凝土屈服引起的承载力下降，如下图曲线 B。

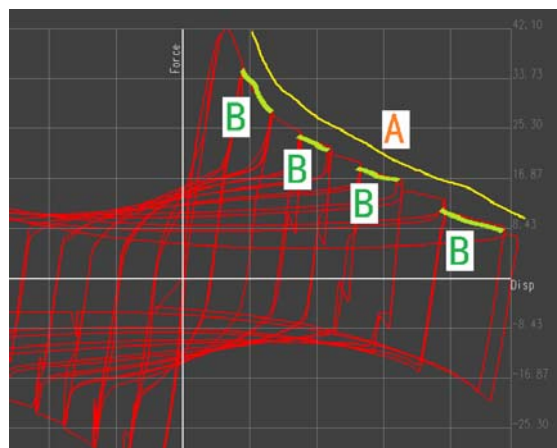


图 12、滞回曲线中两类下降段

3、STRAT 用一个单元，即可得到符合实际情况、反映趋势规律的单元非线性滞回性能，表明其所采用的算法及单元强大的能力。

7、结果讨论

该模型试验的具有其特点，即钢筋强度偏大、刚度偏大，且为光面圆钢，这样钢筋与混凝土之间的粘结滑移对结果影响较为显著。在钢筋、混凝土同时屈服且多次循环加载之后，钢筋与混凝土之间的粘结滑移也经历多次循环屈服，导致刚度和强度同时下降。实际上加载后期，混凝土经历多

次循环刚度退化后贡献已经极小，后几个滞回环的刚度退化，实际上是由于粘结破坏所产生的。

在 STRAT 软件中，如果不考虑粘结滑移的影响，计算中取消前面图 4(b)中“计算粘结滑移”选项，在其他参数不变的情况下，得到的滞回曲线如下。可以看出，在反复加载的后期，滞回曲线体现的是随动强化模型下钢筋的滞回性能，强度、刚度均趋于稳定，没有明显的下降与退化。这也是我们所见到的很多软件模拟的结果。

在另外试验中，如钢筋强度偏小、或者为粘结性能更好的非光面钢筋，粘结滑移的作用降低，这种曲线便更符合实际情况。

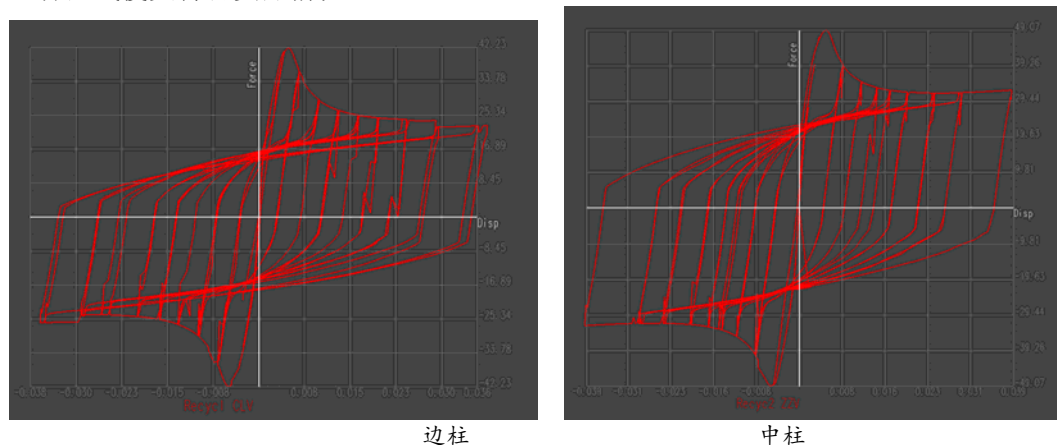


图 13、不考虑粘结损伤下的剪力-挠度滞回曲线

这就说明一个问题，对于特定结构或者试验模型，需要选取合适的混凝土、钢筋的本构模型，也需要合理地考虑需要包含的计算因素。

而 STRAT 作为面向工程的软件，所关注的不仅是选取几种滞回模型的组合得到与预期接近的结果，而是提供一种**先进的、高精度的、适应性强的**单元模型和算法，使对于任意选取的滞回模型，都能得到在数值上最精确的结果。

上面的算例结果，体现了 STRAT 基于积分算子法的纤维单元，在当前技术条件下的领先优势。

图示说明 STRAT 在混凝土弹塑性分析中的领先技术

1、单元层次

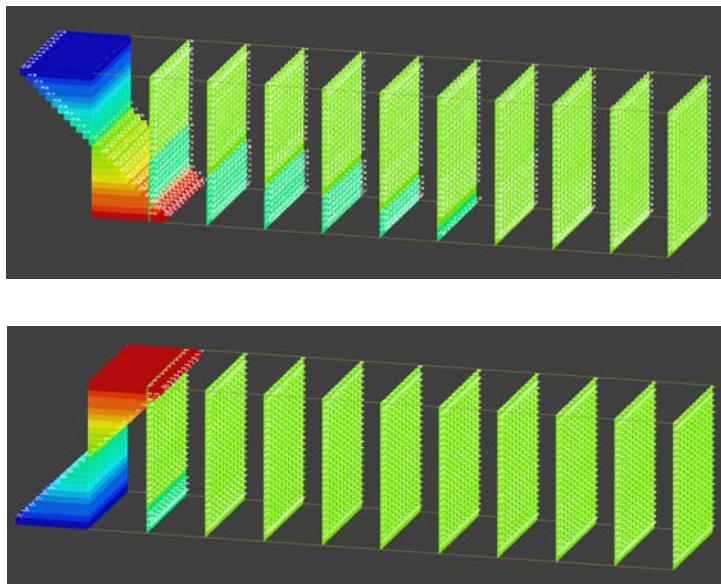


图 13、不考虑粘结损伤下的剪力-挠度滞回曲线

上图是经历屈服、循环后某一加载点处悬臂梁计算截面的应变。可以看出，柱根部截面屈服，应变极大，远大于相邻截面的应变。

如果采用刚度法单元模拟这个悬臂梁，我们知道应变是位移的导数，这种高度突变的应变场，单个单元根本无法模拟，这样就需要对梁细分。

STRAT 软件的纤维单元，基于积分算子法，其基础是内力的平衡。这样对于这种应变高度突变的情况，一个单元即可很好地模拟。上面针对悬臂柱试验的模拟，即是一个单元的计算结果。

在针对实际工程的计算，由于 STRAT 高精度纤维单元，不再需要细分，一个梁柱一个单元模拟。这样计算容量、计算速度，都会数十倍提高。

2、截面层次

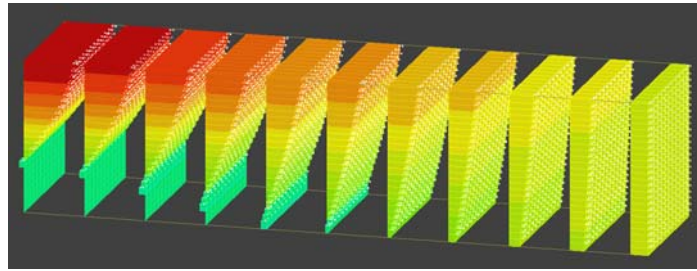


图 15(a)

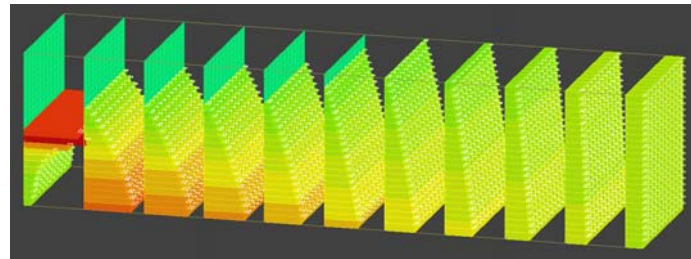


图 15(b)

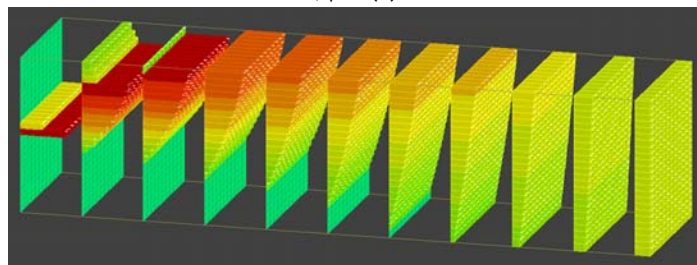


图 15(c)

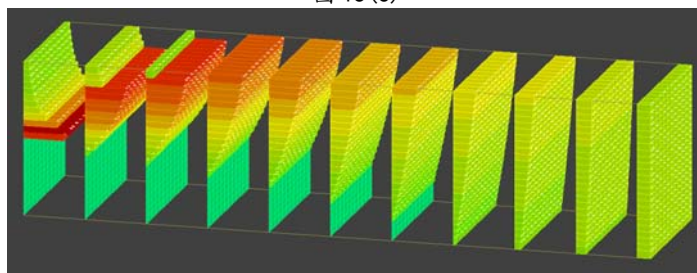


图 15(d)

上图是，混凝土纤维截面在不同加载状态下的应力分布图。图 15(a) 是较早期加载，开裂混凝土退出工作。图 15(b) 是多次循环后的再加载阶段，受拉混凝土退出工作，受压混凝土进入屈服，边缘应力小于中间应力。图 15(c) 是卸载到反向再加载阶段，第一截面混凝土基本完全退出工作，第二截面边缘屈服后卸载、中间是弹性卸载。图 15(d) 在图 15(c) 基础上继续反向加载，第一截面上半部继续出现受压残余应力。

可以看出，即便是在截面层次，混凝土分布极为复杂。一般软件，采用截面积分点方式，考虑不同部位混凝土分布特点。如图 16 所示复杂应力截面(图 15d 中的第二截面)，沿截面高度 5 点高斯积分。很明显，各积分点的值是随机、没有规律的。而根据高斯积分的意义，各积分点之间的值是连续的，很明显与实际应力分布不一致。因此，即便是最基本的截面层次，这种积分都存在显著的误差。

STRAT 软件，对截面进行纤维细分(如上面模型沿高度分成 24 段)，直接针对细分纤维积分，其精度明显远大于有限点的高斯积分。

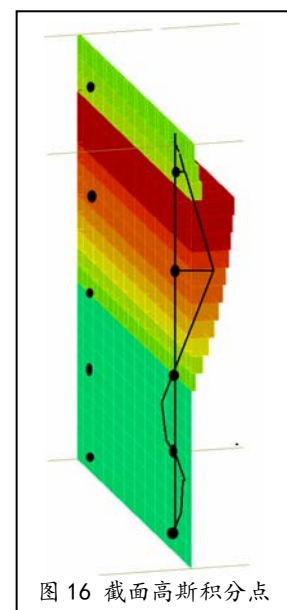


图 16 截面高斯积分点