



# 分层壳在 RC 剪力墙非线性分析中的应用与对比

筑信达 刘慧璇

分层壳可以将面对象沿厚度方向分为若干层，每层独立定义相应的材料和行为，通过平截面假定将各层连接在一起。分层壳可以模拟复杂的壳行为。本文将以一钢筋混凝土剪力墙为例，介绍通过分层壳模拟剪力墙的建模流程和结果查看方式，并与墙较模型进行对比。

## 1. 分层壳的基本概念

分层壳可以考虑面内弯曲、面内剪切、面外弯曲之间的耦合作用，能比较全面地反映壳体结构的空间力学性能，在剪力墙抗爆分析、组合楼板分析、连体结构架空连廊的模拟、温度应力分析、隔震层楼板开裂分析等方向广泛应用。

本文重点介绍分层壳在剪力墙中的应用。钢筋混凝土剪力墙通常看作由若干混凝土层和钢筋层构成。实际工程中，可以根据剪力墙厚度、配筋、钢筋分布形式、材料等级，定义不同的分层壳单元，来模拟不同位置的墙肢或连梁的线性或者非线性行为。钢板组合剪力墙、组合楼板等构件的定义与其类似，本文不展开阐述。

## 2. 分层壳的定义

下图为分层壳的定义窗口，在“分层数据”中设置各层厚度与材料，“统计信息”中将显示该分层壳的层数、截面总厚度、各层重叠厚度等。“分层数据”中各参数含义如表 1 所示<sup>[1]</sup>。通过图 1 右下角“快速开始”一栏中的“参数化定义”，可以基于配筋信息自动生成分层数据，该功能一般适用于均匀配筋的面对象。

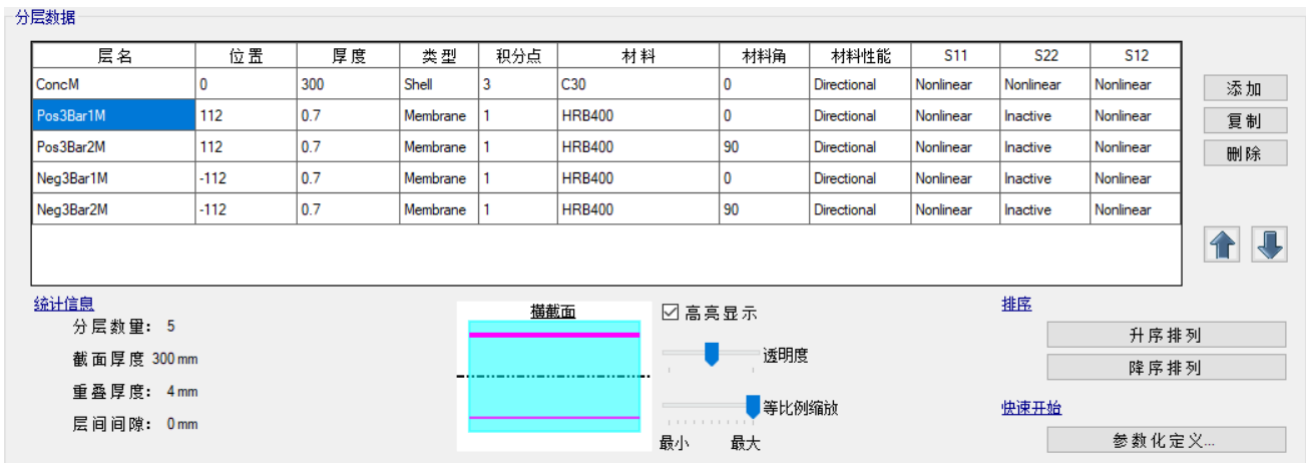


图 1 分层壳定义

表 1 分层数据参数含义

| 参数 | 解释  |
|----|---|
| 层名 | 本层名称。同一截面内层名不应重复。   |
| 位置 | 沿着单元+3 轴方向，该层到层中心（横截面示意图中点划线处）的距离。  |
| 厚度 | 该层的厚度。对于钢筋，需要将其等代为一个“平铺的薄层”。  |
| 类型 | 包含膜、板、壳三个类型。<br><b>Membrane 膜</b> : 仅考虑面内刚度;<br><b>Plate 板</b> : 仅考虑面外刚度;<br><b>Shell 壳</b> : 综合了膜和板行为，同时考虑面内和面外刚度。<br>需要注意的是，为了避免重复考虑板重，程序只考虑膜和壳类型的质量和重量，不考虑板类型的质量和重量。 |



|             |   |
|-------------|---|
| 积分点         | 每层厚度方向上的高斯积分点数，可输入 1~5 个点。一个积分点仅可考虑膜行为，两个点可考虑壳行为。可通过更多的积分点以捕捉顶面或底面附近的非线性行为。增加积分点数将增加分析时间，建议通过试算平衡计算精度与计算效率。                               |
| 材料          | 可选择已定义的材料属性。  |
| 材料角         | 与单元局部 1 轴的夹角。每层的材料角都可以不同。例如，可通过两个相差 90 度的钢筋层来模拟正交的钢筋网。  |
| 材料性能        | 可选择“方向性的 (Directional)”或“耦合的 (Coupled)”。ETABS 中耦合行为仅适用于混凝土材料，用于考虑轴向与剪切行为的耦合，该模型基于达尔文-佩克诺德模型，考虑 Vecchio-Collins 行为。                        |
| S11/S22/S12 | 可选“Nonlinear 非线性”、“Linear 线性”或“Inactive 无效”。<br>选择“非线性”时使用材料的非线性应力-应变关系，“线性”使用非耦合各向同性线性应力-应变准则，“无效”则该分量应力为 0。对于单轴材料（例如钢筋），只能考虑 S11 和 S12。 |

### 3. 某一字剪力墙示例

接下来分别用分层壳和墙铰模拟文献[2]中某一字墙在低周反复作用下的滞回行为，简要对比两种模拟方式下的计算结果。

一字墙示意图如图 2 所示。墙体高 2m，长 1m，厚度 0.125m，净保护层厚度 10mm。混凝土强度等级为 C40，钢筋 HRB400，两端的边缘约束区长度均为 200mm。边缘约束区布置 6 根 d10 的纵筋（单边 3 根），箍筋 d4@80。

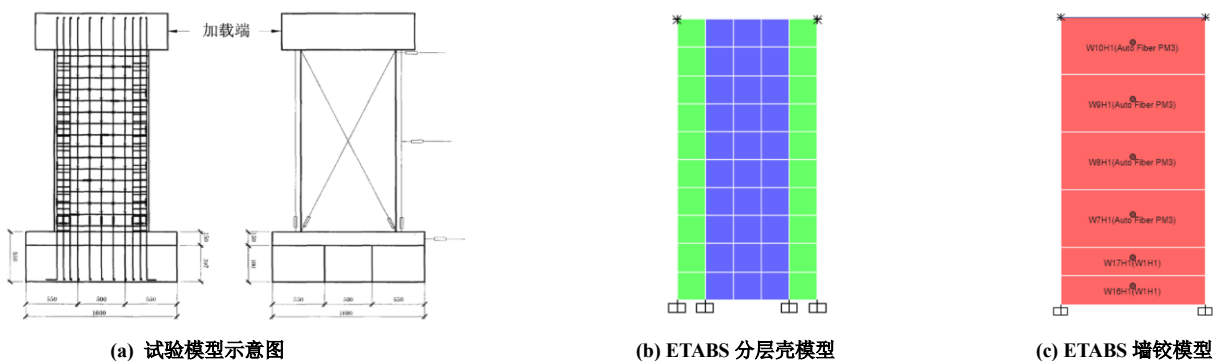


图 2 一字墙示意图

#### 3.1 分层壳模型

采用不同的分层壳截面模拟边缘约束区（图 2(b)中绿色区域）与中间分布区（图 2(b)中蓝色区域）。为了更精确地捕捉墙体局部非线性行为，需细分墙肢，本例采用的剖分尺寸为 0.2m。

##### 3.1.1 边缘约束区

边缘约束区需考虑箍筋对混凝土的约束作用，因此需要定义约束混凝土本构。程序可以基于带配筋的框架截面自动生成约束混凝土本构。

定义约束混凝土本构的操作流程如下：

(1) 定义框架截面，截面尺寸和配筋同边缘约束区，如图 3；

(2) 如图 4 的①~③步，新建 C40 混凝土材料，本例中滞回类型采用默认的“混凝土”类型，本构类型修改为“Mander 约束混凝土”，在【显示应力-应变曲线>框架截面】中选择之前定义的框架截面，图中可以看见程序基于箍筋信息自动生成的约束混凝土应力-应变曲线（红色），注意，该曲线仅用于显示；

(3) 如图 4 的④步，点击【转换为用户自定义】保留窗口中显示的约束混凝土曲线数据，完成定义。



图 3 定义框架截面

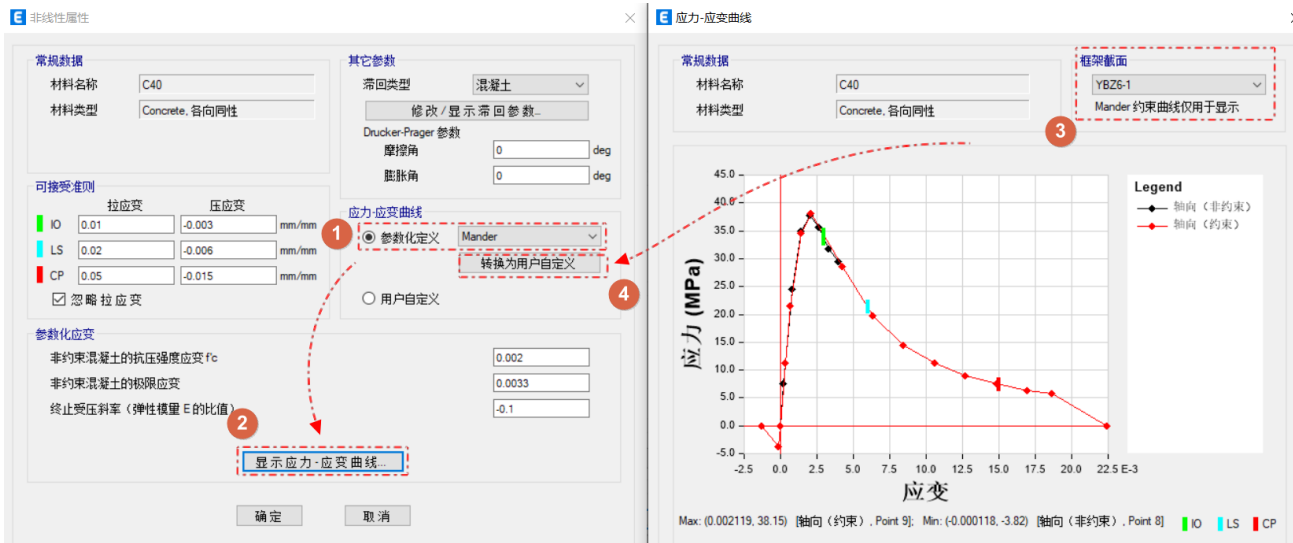


图 4 基于框架截面定义约束混凝土本构

接着定义约束区分层壳截面，如图 5。

对于钢筋层，箍筋主要提供对混凝土的约束作用，已经在约束混凝土本构中考虑，因此仅需在分层壳截面中定义纵向钢筋层。根据保护层厚度计算钢筋层位置为 47.6mm。根据纵筋直径和根数，计算得出单边钢筋层厚度= 配筋率 × 墙厚 =  $210 / (125 * 200) * 125 = 1.1mm$ 。仅考虑纵筋的轴向受力，积分点取 1 即可，层类型选膜，非线性行为仅考虑 S11。纵筋与墙肢 1 轴（水平向）呈 90 度夹角，故钢筋材料角取为 90。

对于混凝土层，采用之前定义的约束混凝土材料，同时考虑面内两个方向的轴向受力和斜向受剪，故层类型选壳，非线性行为考虑 S11、S22 和 S12。为了更精确地捕捉层顶部、中部和底部附近的结果，积分点设置为 3 个。

| 层名        | 位置    | 厚度  | 类型       | 积分点 | 材料    | 材料角 | 材料性能        | S11       | S22       | S12       |
|-----------|-------|-----|----------|-----|-------|-----|-------------|-----------|-----------|-----------|
| ConcM     | 0     | 125 | Shell    | 3   | C40-1 | 0   | Directional | Nonlinear | Nonlinear | Nonlinear |
| Pos3Bar2M | 47.6  | 1.1 | Membrane | 1   | z10   | 90  | Directional | Nonlinear | Inactive  | Inactive  |
| Neg3Bar2M | -47.6 | 1.1 | Membrane | 1   | z10   | 90  | Directional | Nonlinear | Inactive  | Inactive  |

图 5 约束区分层壳数据

### 3.1.2 中间分布区

中间分布区分层壳定义如图 6 所示。混凝土层采用非约束混凝土材料。钢筋层考虑水平和竖向均匀布置，故材料角分别取 0、90 度，单侧钢筋层厚度= 配筋率 × 墙厚 =  $0.2\% / 2 * 125 = 0.125mm$ 。

| 层名       | 位置    | 厚度  | 类型    | 积分点 | 材料  | 材料角 | 材料性能        | S11       | S22       | S12       |
|----------|-------|-----|-------|-----|-----|-----|-------------|-----------|-----------|-----------|
| ConcS    | 0     | 125 | Shell | 3   | C40 | 0   | Directional | Nonlinear | Nonlinear | Nonlinear |
| Pos3Bar1 | 47.6  | 0.1 | Shell | 1   | g6  | 0   | Directional | Nonlinear | Inactive  | Inactive  |
| Pos3Bar2 | 47.6  | 0.1 | Shell | 1   | g6  | 90  | Directional | Nonlinear | Inactive  | Inactive  |
| Neg3Bar1 | -47.6 | 0.1 | Shell | 1   | g6  | 0   | Directional | Nonlinear | Inactive  | Inactive  |
| Neg3Bar2 | -47.6 | 0.1 | Shell | 1   | g6  | 90  | Directional | Nonlinear | Inactive  | Inactive  |

图 6 中间分布区分层壳数据

### 3.2 墙铰模型

根据文献[2]中试验数据，底部塑性铰区长度占总高度的比例为 1/5，建模时可将墙沿着竖向分割为 5 份，分别布置墙铰，若整片墙沿着墙高布置一个墙铰，将大大高估墙肢的承载力。本例中，为了更好地对比分层壳和墙铰模型的结果，将墙体底部进一步分割，使底部塑性区的剖分网格与分层壳模型一致，如图 4(c)所示。

程序可以基于材料本构和墙铰配筋自动生成墙铰纤维。对于墙铰模型，注意将混凝土材料的本构类型设置为“Mander 约束混凝土”，程序将基于墙铰配筋中的箍筋信息自动考虑约束混凝土本构。选中墙肢，通过【墙铰配筋】设置约束区和中间分



布区的钢筋直径、单层纵筋根数和分布筋间距（图 7）。然后布置 Auto Fiber P-M3 墙铰，程序将基于墙铰配筋自动生成墙铰纤维，可通过【定义>截面属性>框架铰/墙铰】查看离散生成的墙铰纤维，如图 8 所示，灰色为混凝土纤维，黄色为钢筋纤维。关于墙铰更详细的内容可参考文章《ETABS 对高层剪力墙弹塑性行为的模拟和评价》。

本例中，为保证分层壳和墙铰模型中材料本构的一致性，将约束区混凝土纤维材料手动调整为自定义的约束混凝土。

**边缘构件尺寸**

| 起点 X (mm) | 起点 Y (mm) | 终点 X (mm) | 终点 Y (mm) | 长度 (mm) | 厚度 (mm) | 起始区尺寸 (mm) | 终止区尺寸 (mm) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|------------|------------|
| 0         | 0         | 1000      | 0         | 1000    | 125     | 200        | 200        |

**单侧的纵筋信息**

| 位置 | 直径 | 间距 (mm) | 数量 |
|----|----|---------|----|
| 起点 | 10 |         | 3  |
| 中心 | 6  | 125     | 5  |
| 终点 | 10 |         | 3  |

**箍筋信息**

| 位置 | 直径 | 间距 (mm) | 箍筋  |
|----|----|---------|-----|
| 起点 | 4  | 80      | Yes |
| 中心 | 6  | 125     | No  |
| 终点 | 4  | 80      | Yes |

图 7 墙铰配筋

**纤维颜色**

材料属性相同颜色

全部纤维灰色显示

**纤维定义数据**

| Fiber | Area cm <sup>2</sup> | Coord2 mm | Material | Color |
|-------|----------------------|-----------|----------|-------|
| 1     | 61.4                 | -475      | C40      | 灰色    |
| 2     | 122.8                | -400      | C40      | 灰色    |
| 3     | 61.4                 | -325      | C40      | 灰色    |
| 4     | 2.2                  | -450      | z10      | 黄色    |
| 5     | 2.2                  | -350      | z10      | 黄色    |
| 6     | 93.3                 | -262.5    | C40      | 灰色    |
| 7     | 186.7                | -150      | C40      | 灰色    |
| 8     | 186.7                | 0         | C40      | 灰色    |
| 9     | 186.7                | 150       | C40      | 灰色    |

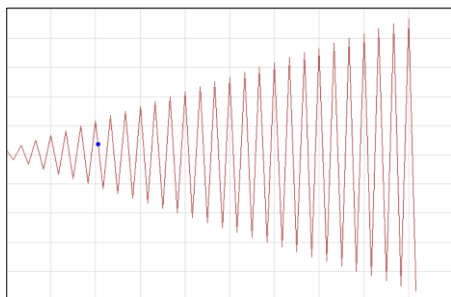
约束边缘区混凝土，程序自动考虑约束本构C40///SSC2

中间分布区混凝土，程序自动考虑非约束本构C40///SSC1

图 8 自动生成的墙铰纤维

### 3.3 加载

文献[2]试验采用拟静力试验加载装置加载，先施加竖向荷载至预定值，轴压比约为 0.3，再利用水平作动器施加反复水平荷载。本例采用图 9(a)所示的往复加载曲线模拟反复加载，用位移荷载模拟水平作动器作用，竖向荷载作为前置工况，使用非线性直接积分法分析模拟整个加载过程，工况定义如图 9(b)所示。



(a) 时程函数

**常规数据**

名称: LCase1

荷载工况类型/子类型: Time History / Nonlinear Direct Integrati

质量源: Previous

分析模型: Default

**初始条件**

零初始条件 - 无应力状态

非线性工况 (包括荷载)

工况名称: Pre

**施加荷载**

| 荷载类型         | 荷载名称  | 函数  | 比例系数 |
|--------------|-------|-----|------|
| Load Pattern | live2 | 001 | 1    |

**其它参数**

几何非线性: P-Delta

时间步-数量: 1100

时间步-步长: 1 sec

阻尼: 质量 11.3097; 刚度 0.0286; 模态: 否

积分方法: Hilber-Hughes-Taylor

非线性参数: 默认值 - 仅迭代

(b) 非线性时程工况

图 9 时程分析

### 3.4 结果查看

分层壳与墙铰模型的 ETABS 滞回曲线如图 10 所示。墙肢极限承载力约为 320kN，最大变形约为 15mm，两种模拟结果基本吻合。

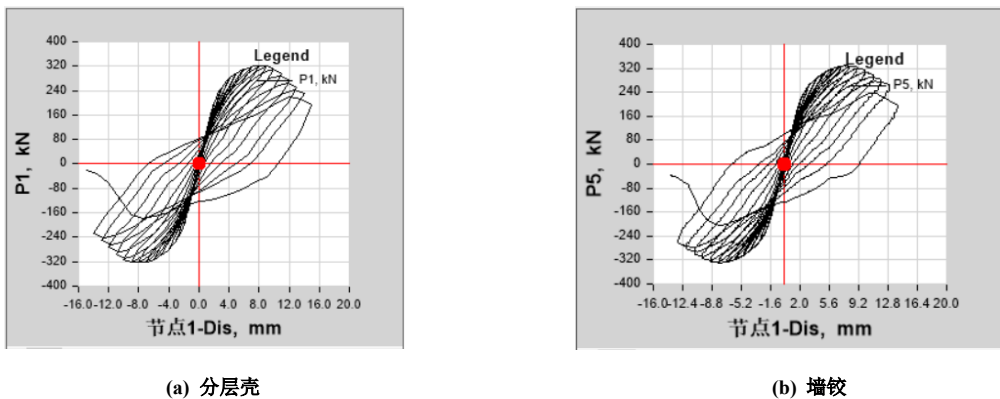


图 10 滞回曲线

分层壳可以输出混凝土层和钢筋层的应力、应变结果。如图 11 所示，可以选择按壳属性和层名进行显示，也可以按层名显示。“输出位置”中的“积分点”与截面定义的积分点数有关。本例中，混凝土层设置了 3 个积分点，那么程序将输出 -0.7746 IP1（高斯积分点 1）、0 IP2（高斯积分点 2）和 0.7746 IP3（高斯积分点 3）位置的结果，以及通过线性外插得到的 1.0000 顶面、-1.000 底面位置处的结果。

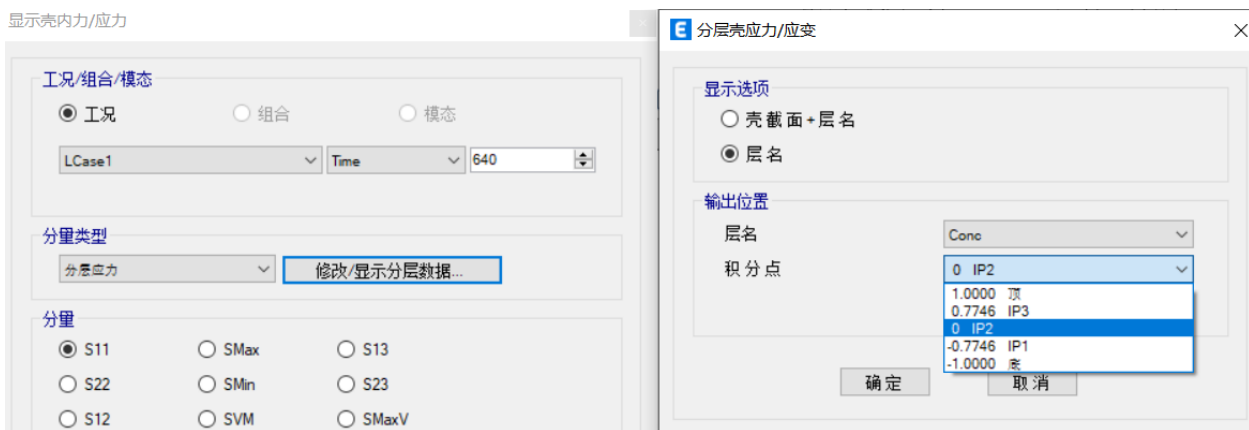


图 11 分层壳应力结果查看

若关心剪力墙平面内的压弯非线性行为，输出位置可选择混凝土层的 0 IP2（中间位置），分量可选择 S22。对于钢筋层，由于积分点为 1，输出位置可任意选择，查看的分量则与钢筋材料角有关。本例中竖向钢筋材料角为 90 度，查看 S22 分量，水平钢筋查看 S11 分量。图 12 给出了第 415 步的混凝土层和钢筋层应力分布，图 13 给出了相应的应变云图。可以看见该时刻墙肢左侧受压，右侧受拉，受压区约束边缘区应变达到 0.0039mm/mm，混凝土已经压溃，应力主要由钢筋承担，钢筋应力约为 390MPa，进入硬化段，受拉区混凝土退出工作，钢筋应力达到 420MPa。

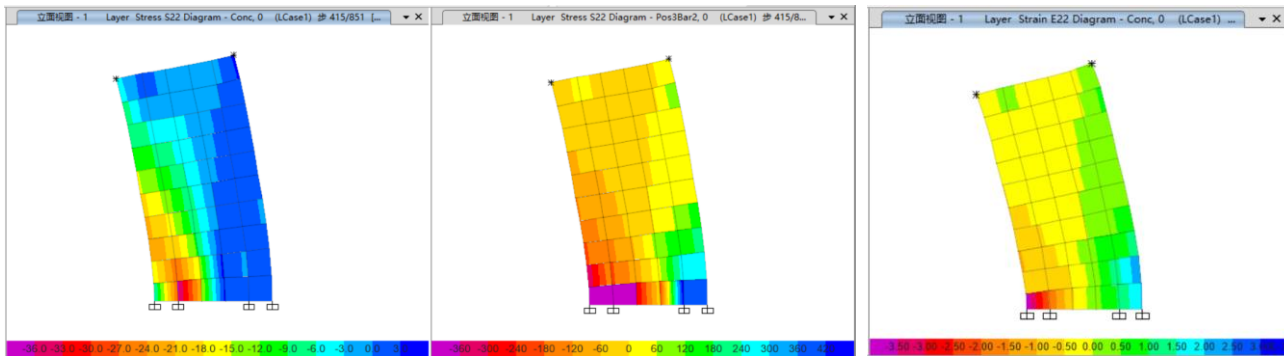


图 12 混凝土层应力分布（左）和钢筋层应力分布（右）

图 13 应变云图

墙铰模型出铰状态如图 14(a)所示，AB 段为弹性段，B 点对应屈服承载力，C 点对应极限承载力，E 点完全丧失承载力。



可以看见墙体下部 1/5 区域进入塑性，最底部为红色铰，表示破坏，绿色铰表示该区域已经屈服，其他区域未出铰，处于弹性状态，与试验结果一致。通过铰细节可查看单根纤维的塑性发展，如图 14(b)。

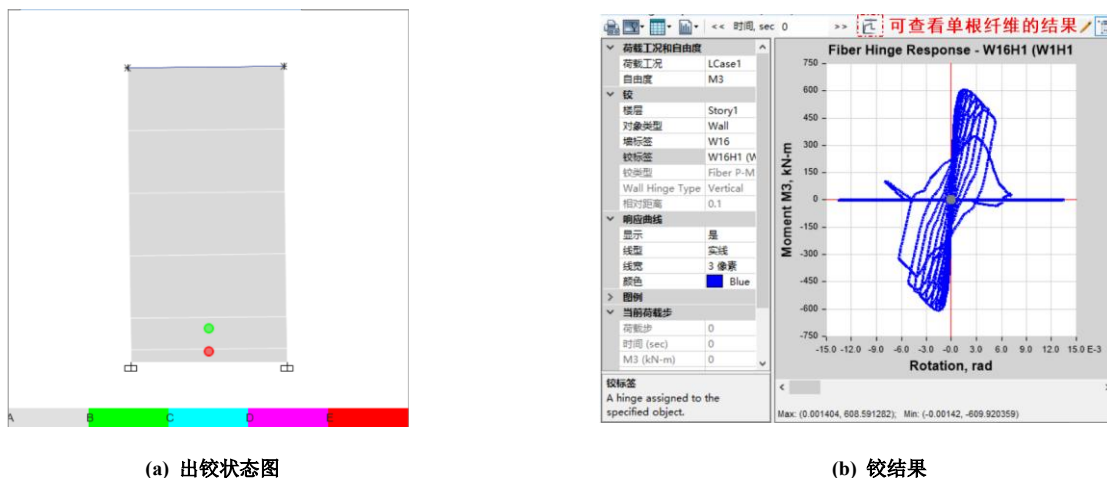


图 14 墙铰模型结果

以剪力墙底部左端区域为例，通过【显示表格>分析结果>单元输出>面输出>单元层应力/变-面壳】查看分层壳模型中该位置节点混凝土层的应力应变结果，与墙铰模型对应位置的混凝土纤维结果进行对比，两者结果如图 15 所示，基本吻合。

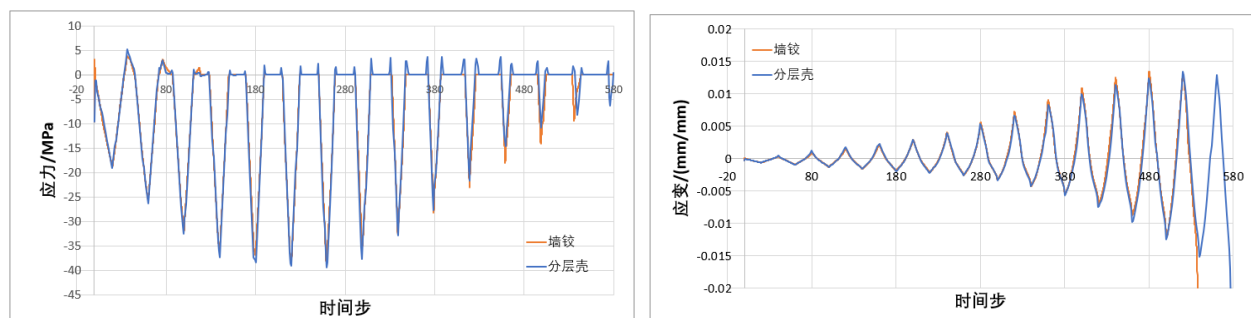


图 15 分层壳与墙铰模型的应力、应变对比结果

此外，可以通过位移计（Gauge）单元评估剪力墙剪切变形、转角等宏观层面的指标。本例在剪力墙底部塑性区布置了一个四点位移计，用于统计剪力墙转角。以分层壳模型为例，布置图如图 16 所示。分层壳与墙铰模型的墙肢转角结果如图 17 所示，基本吻合。

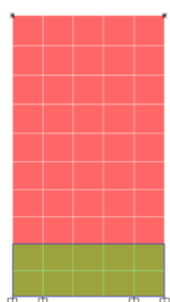


图 16 四点位移计布置图

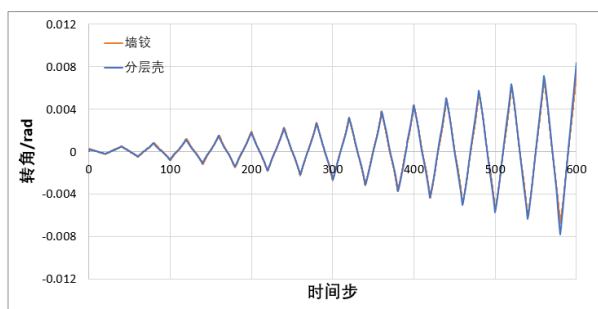


图 17 分层壳与墙铰模型的转角对比结果

#### 4. 结语

本文阐述了分层壳的定义方法，并通过一片钢筋混凝土剪力墙介绍了分层壳的建模流程及结果查看方式，与墙铰模拟结果进行了对比分析。墙铰主要用于模拟面内压弯行为为主的细长墙（高宽比大于 3），因其建模便捷、计算效率高且结果查看直观，适用于解决多高层结构中剪力墙性能评估问题。然而，墙铰在模拟剪切和面外受弯行为方面存在局限性。相比之下，分层壳能够考虑更精细的剖分网格，并通过设置更多的积分点精确捕捉壳体的面内面外行为，具有更强的通用性。本文算例



中的构件不属于严格意义的细长墙，且需要进行较精细的分析，因此对墙铰模型的塑性区进行了更细致的分割才得到与分层壳较吻合的结果。

基于分层壳的通用性，工程师可以根据具体需求灵活建立分层壳截面，考虑不同方向的线性和非线性行为，查看钢筋层、混凝土层的应力应变结果，判断混凝土受压区高度、中和轴位置、钢筋应力状态等，也可以通过 Gauge 单元评估构件层面的整体指标。借助分层壳，可以全面地判断构件的性能状态。

## 参考资料

[1] Computers & Structures Inc. CSI 分析参考手册. 2023.

[2] 章红梅. 剪力墙结构基于性态的抗震设计方法研究[D]. 2007, 同济大学(指导老师: 吕西林): 上海.

审定：吴文博、李立