

关于错层结构的建模与计算

前言

首先，我们提出两个问题：

1. 什么情况下要考虑错层？
2. 错层要不要分层建？

第一节 错层对计算有哪些影响

较大的错层会导致平面楼板不连续，这种情况在统计指标时不能再简化为一个平面刚体，而应考虑错层对于指标统计的不利影响。

《抗规》在相关章节也有提及：

续表 3.4.3-1

不规则类型	定义和参考指标
凹凸不规则	平面凹进的尺寸，大于相应投影方向总尺寸的 30%
楼板局部不连续	楼板的尺寸和平面刚度急剧变化，例如，有效楼板宽度小于该层楼板典型宽度的 50%，或开洞面积大于该层楼面面积的 30%， <u>或较大的楼层错层</u>

3.4.4 建筑形体及其构件布置不规则时，应按下列要求进行地震作用计算和内力调整，并应对薄弱部位采取有效的抗震构造措施：

- 2) 凹凸不规则或楼板局部不连续时，应采用符合楼板平面内实际刚度变化的计算模型；高烈度或不规则程度较大时，宜计入楼板局部变形的影响；

3.6.4 结构抗震分析时，应按照楼、屋盖的平面形状和平面内变形情况确定为刚性、分块刚性、半刚性、局部弹性和柔性等的横隔板，再按抗侧力系统的布置确定抗侧力构件间的共同工作并进行各构件间的地震内力分析。

错层处多会形成短柱，**短柱的抗剪验算为关键控制环节，应引起设计师重视！**

回看咱们提出的第一个问题：

什么情况下要考虑错层？

要回答这个问题，我们要对规范中错层的定义做进一步解释。

楼板局部不连续	楼板的尺寸和平面刚度急剧变化，例如，有效楼板宽度小于该层楼板典型宽度的 50%，或开洞面积大于该层楼面面积的 30%，或较大的楼层错层
---------	---

规范中所谓的较大错层，多大才算是较大呢？

我们翻开规范的条文说明，其中对于较大错层有更详细的解释。

NEHRP 规定，限 1.4。

对于较大错层，如超过梁高的错层，需按楼板开洞对待；当错层面积大于该层总面积 30% 时，则属于楼板局部不连续。楼板典型宽度按楼板外形的基本宽度计算。

上层缩进尺寸超过相邻下层对应尺寸的 1/4，属于用尺寸衡量的刚度不规则的情况。侧向刚度可取地震作用下的层剪力与层

这也很好理解，当错层超过梁高时：

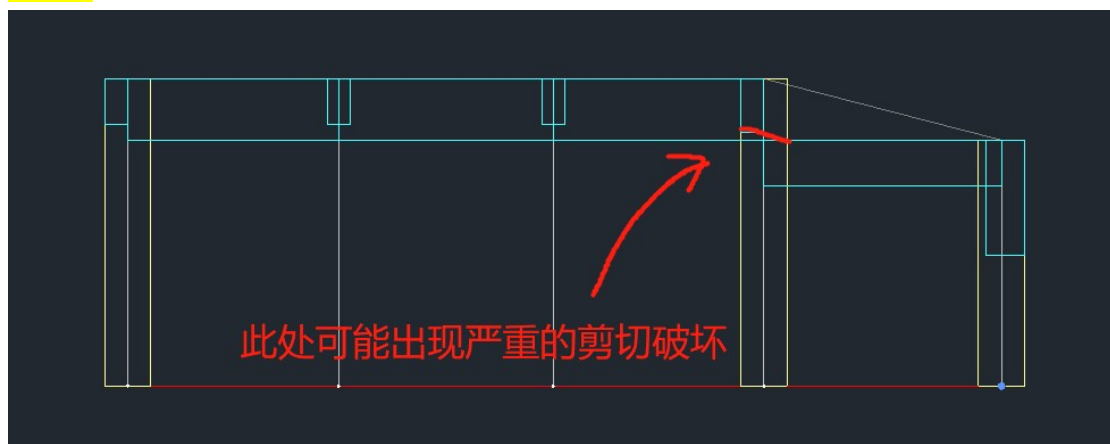
- 1) 错层两侧楼板间缺少了直接的传力途径；
- 2) 错层处会形成实质的短柱。

因此应考虑错层对结构的影响。

那么反过来说，当错层小于梁高时，我们是忽略错层影响的。此时就可以对模型做合理简化，按平层来计算和设计。这样既简化了建模操作，也不会影响结果的精度。

由此得出结论：当错层超过梁高（与错层处竖向构件连接的所有梁中最小的梁高）时，应考虑错层。

但是按照这个原则设计，我们又会遇到一些模棱两可的情况。比如，当错层 800 处梁高刚好为 800，此时对于错层处的剪切验算可能是最不利的情况，应在方案上尽量避免（比如加大梁高）



因此，笔者个人建议：**错层小于 500 可简化模型处理（一般框架梁高都大于 500）。对于错层超过 500 的情况都要真实考虑其影响。**

那么新的问题又来了：**如何建模才能真实考虑错层的影响？**

第二节 如何在 YJK 中真实考虑错层

1. 楼板的属性——刚性板 or 弹性膜

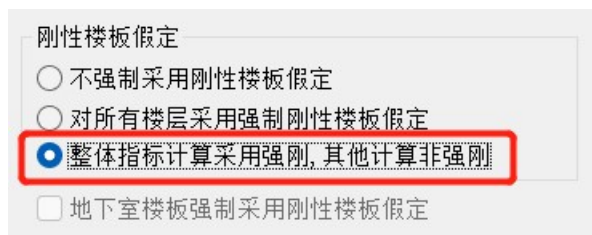
对于平面规则结构而言，我们可以按刚性板假定来简化计算模型，此时用于指标统计和构件计算的模型可以采用相同的刚性楼板假定。这也是为什么 YJK 中对于楼板的默认属性设定为刚性板。

而对于平面不规则结构，楼板的面内刚度对结构的内力计算会有显著影响，因此规范中明确规定应考虑楼板的面内真实刚度。此时在计算前需对计算参数和特殊构件属性做合理设定。

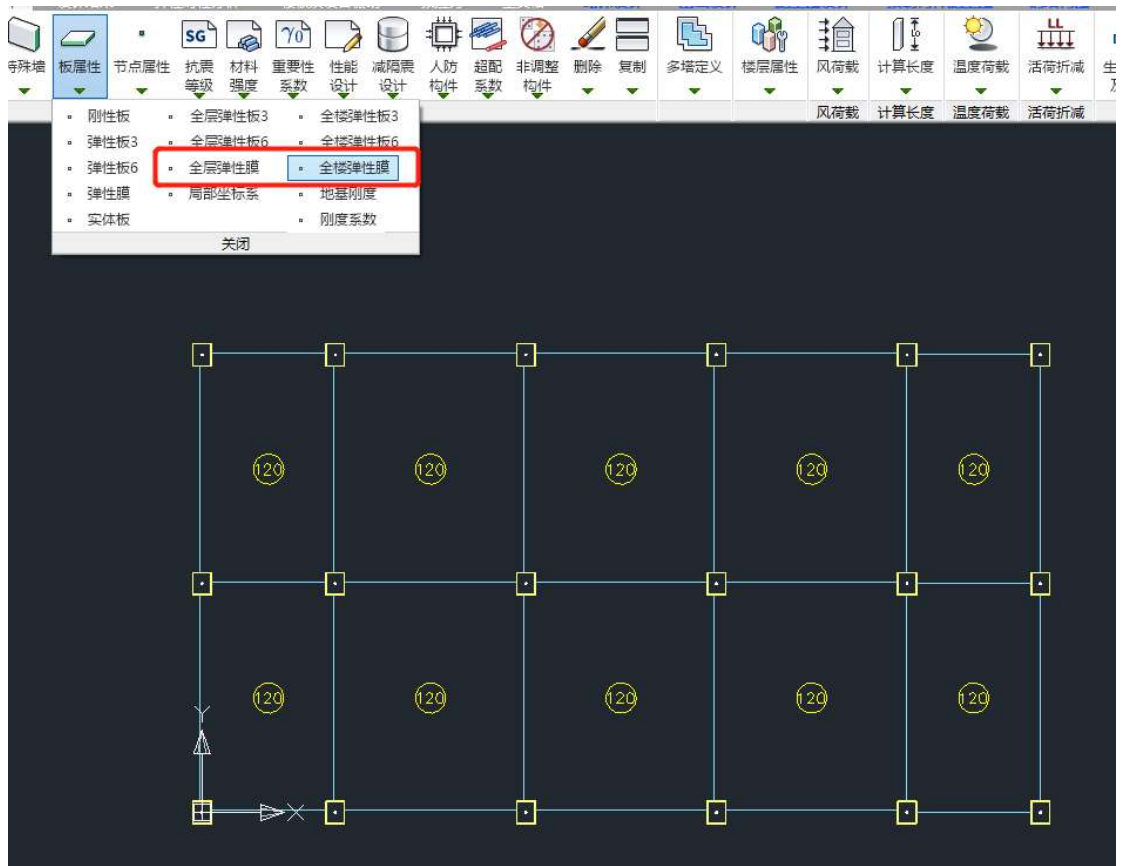
3.4.4 建筑形体及其构件布置不规则时，应按下列要求进行地震作用计算和内力调整，并应对薄弱部位采取有效的抗震构造措施：

2) 凹凸不规则或楼板局部不连续时，应采用符合楼板平面内实际刚度变化的计算模型；高烈度或不规则程度较大时，宜计入楼板局部变形的影响；

1) 刚性楼板假定设为第三项：此时软件对指标采用**强制刚性板（注 1）**模型计算，对构件内力配筋按用户设置的楼板属性计算。



2) 特殊板中设置弹性膜属性：此处建议整层定义。

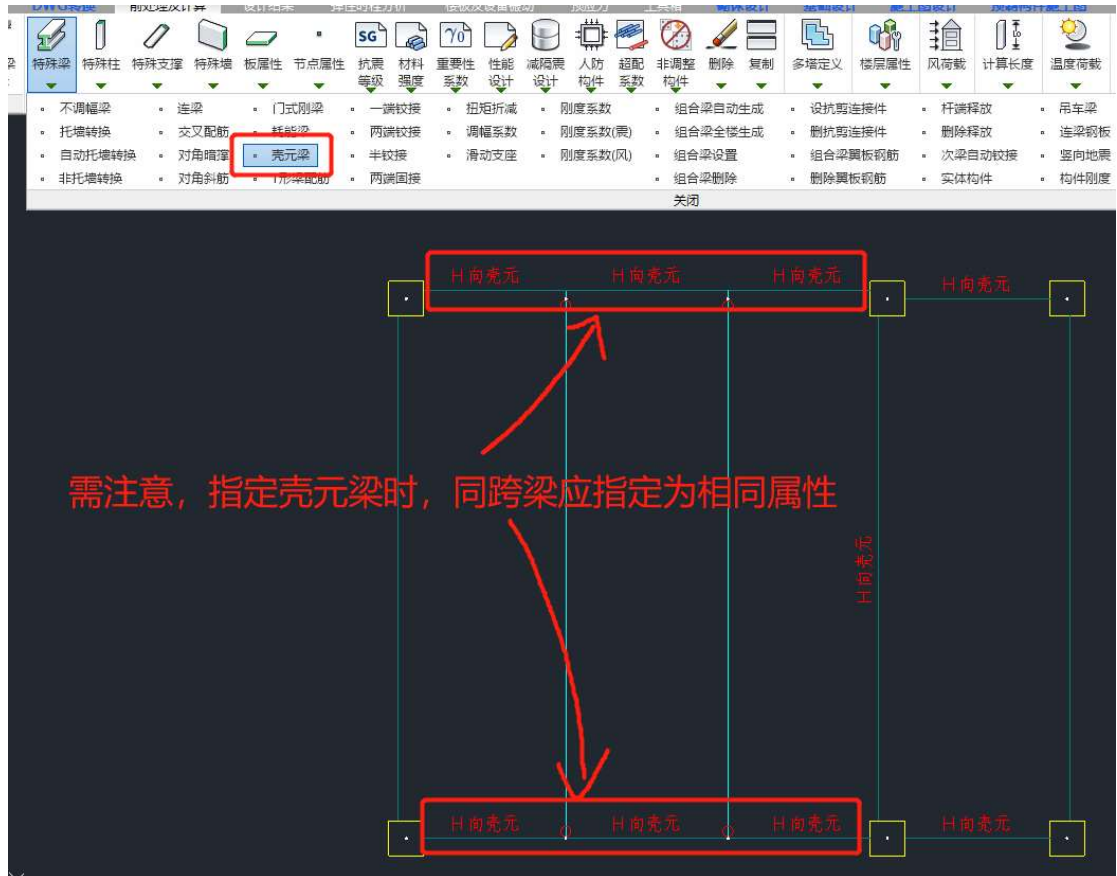


2. 梁的属性——杆元 or 壳元

由于错层值的大小往往和梁高很接近,此时我们习惯的杆元模型精度已经触及了力学模型几何精度的边界(注2),因此应采用更加精细的壳元模型假定,否则将高估错层处短柱的抗剪能力,导致设计偏于不安全。

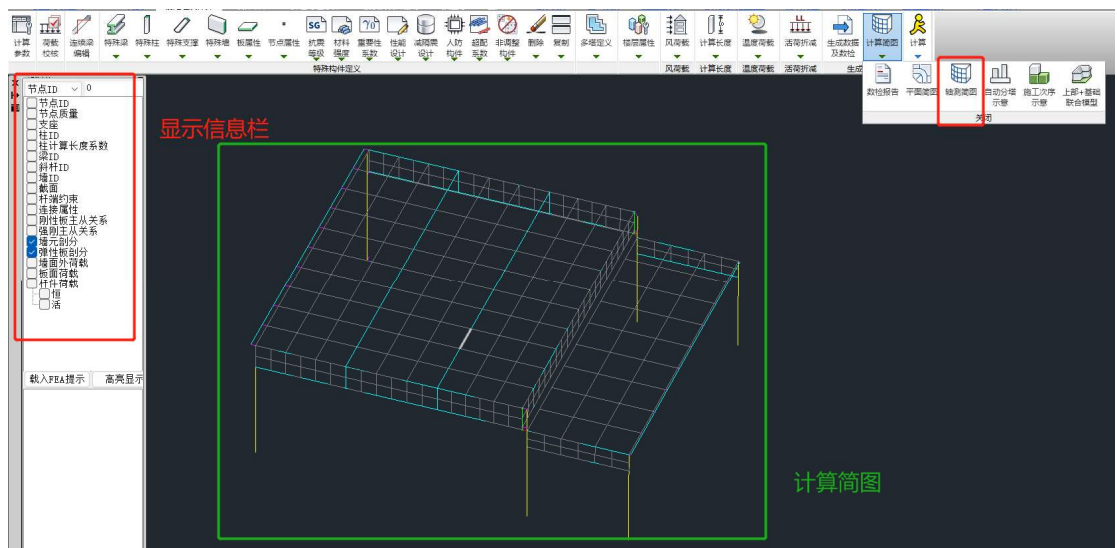
具体操作如下:

在特殊梁中找到壳元梁定义,将错层处梁指定为壳元。

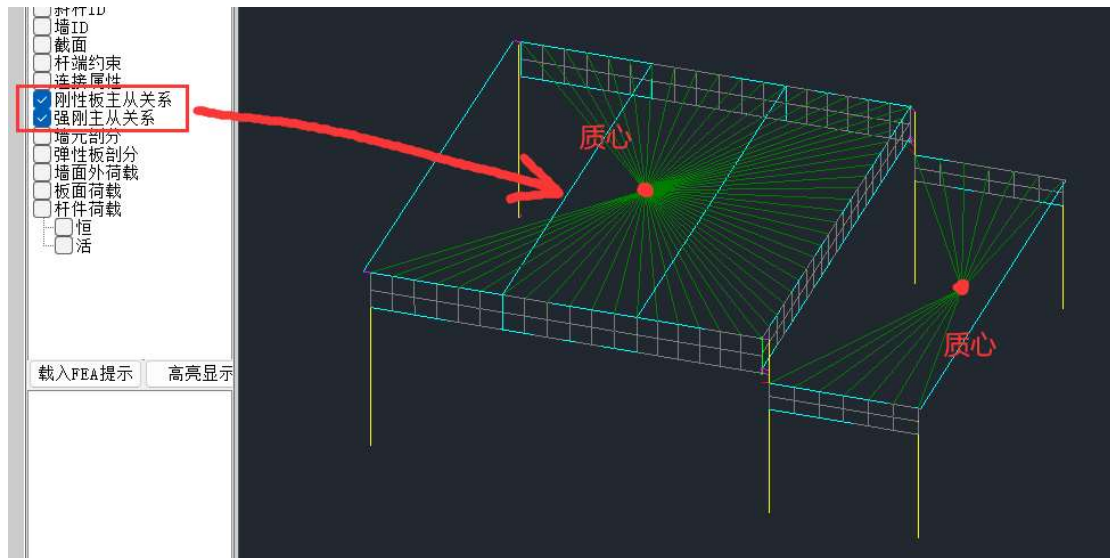


3. 最终计算模型的检查

设定好后可以在轴侧简图中检查最终的计算模型



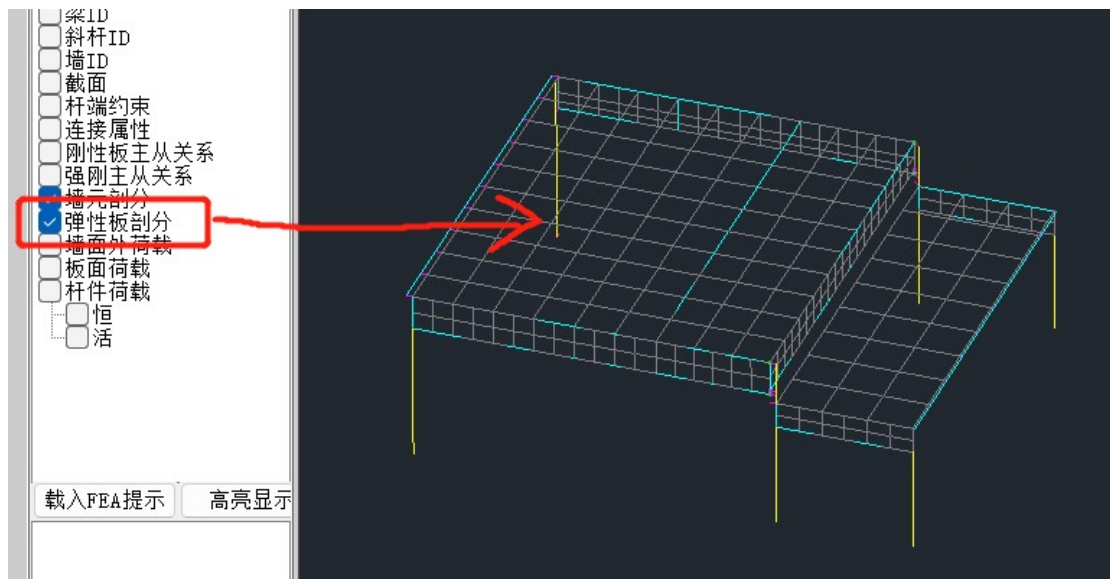
1) 刚性板示意:



如上图可见，刚性板是通过描述楼板平面内各质点与楼层质心的刚性连接关系来考虑的。其面内为无限刚性。

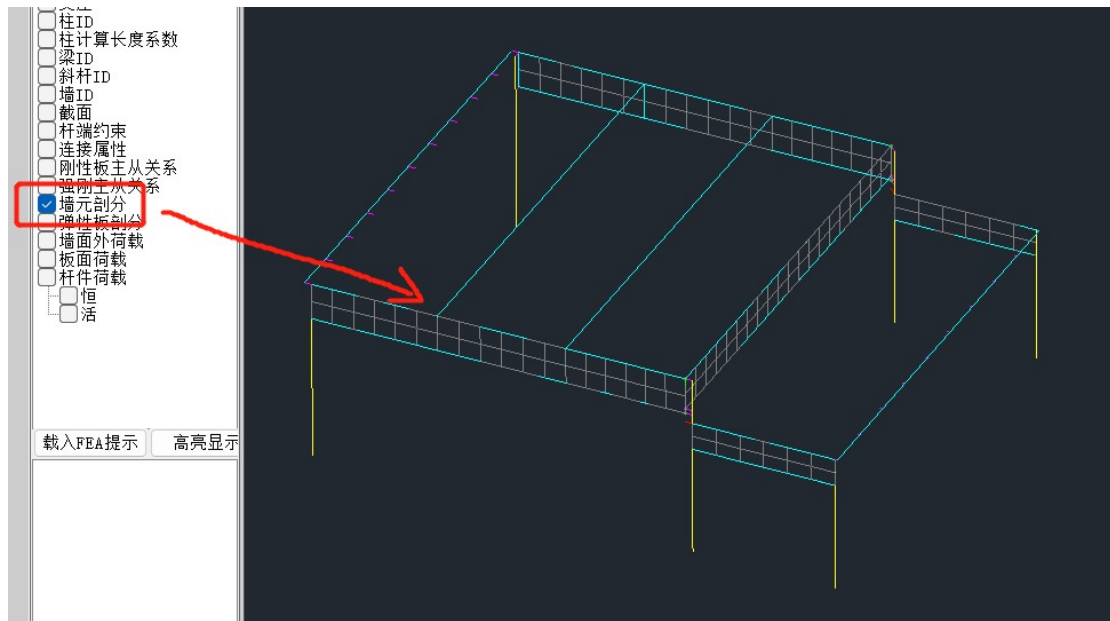
另外，我们也看到，对于错层结构，软件会自动考虑分块刚性板（注3）的处理，这与规范的条文也是一致的。

2) 弹性膜/板示意

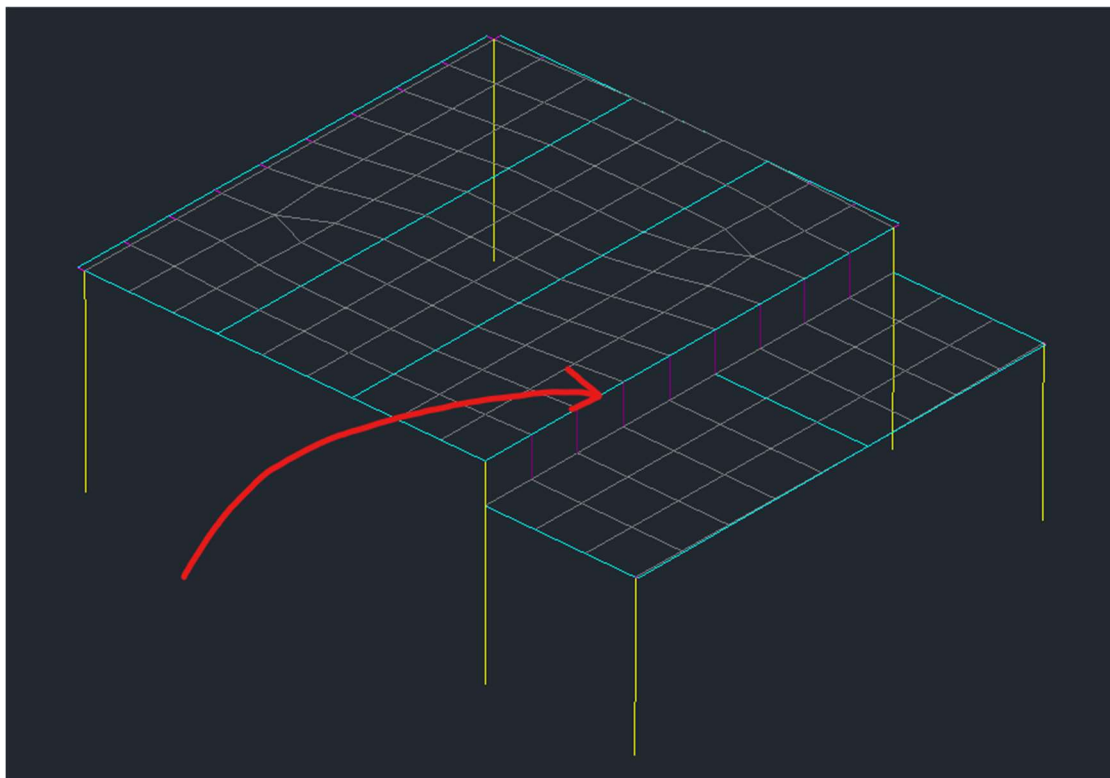


勾选后可显示弹性膜/板剖分的情况。弹性膜可考虑楼板面内的真实刚度，面外刚度为0（弹性板6同时考虑了板的面外真实刚度，此时板会分担一部分梁的弯矩，这导致梁配筋减小，与我们传统的计算理念不同，因此对于平面不规则的情况并不建议大家用弹性板6）

3) 壳元梁示意



4) 刚性连接



错层处会自动生成刚性连接，保证错层梁板的协调变形（注4）。

下面来讨论我们前面提到的第二个问题：

错层要不要分层建？

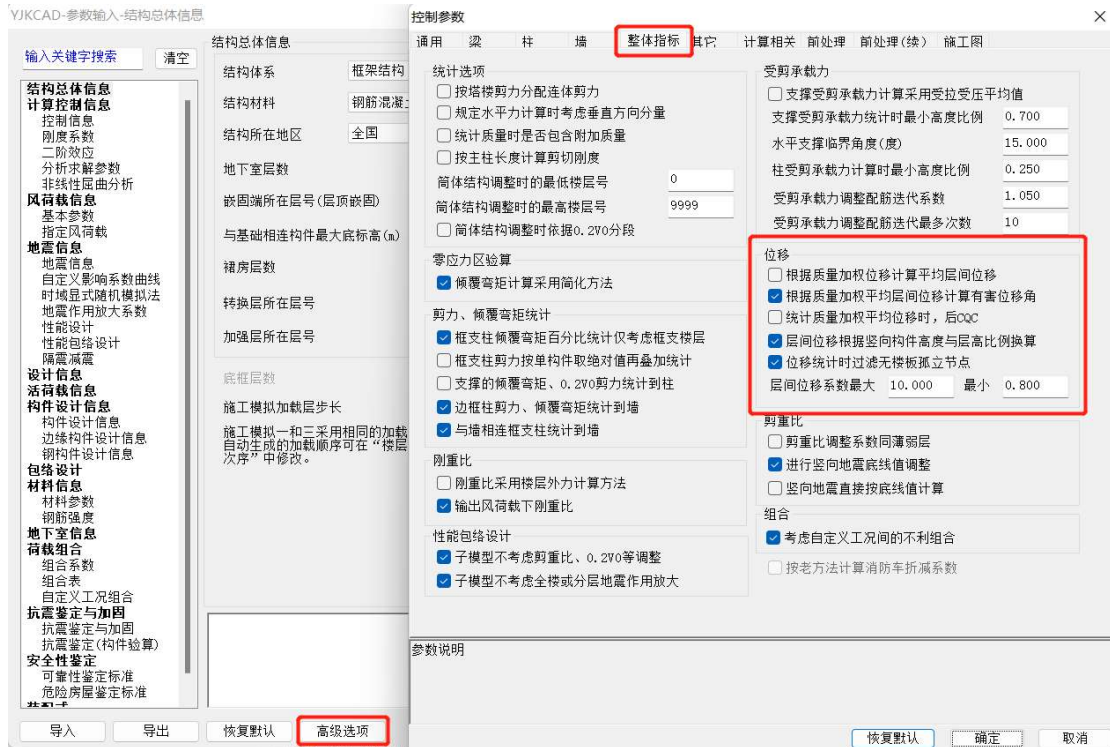
对此笔者个人的观点是：当错层小于 1500 时候，合为一层建；大于 1500 则分层建。（在实践中也应同时考虑错层面积占该层总面积的比例 以及 错层值与上下层层高值的比例，合

理确定分层方案，在此不做进一步讨论)

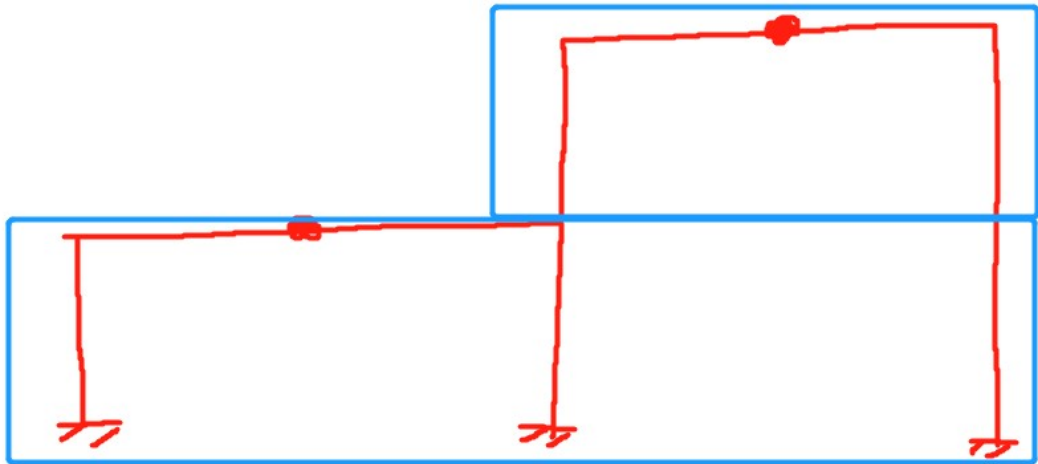
首先分层与否对于力学计算上来说几乎是没有影响的(注5)，我们要关注的是指标统计。对于错层值较小的情况，在合并一层建模时，软件内部会对统计数据做合理的折算，即将与楼层表中定义的层高不同的构件指标通过线性放缩修正到层高处。由此得到比较合理的结果。



您可以通过高级参数来调节修正的规则：



对于错层值较大的情况，由于质心在竖向有明显的偏移，此时我们还按一层来统计指标，某些指标可能就不合理了(比如质量比)。因此建议分层建。



而对于指标统计，软件中有很多工具可以帮助您更加灵活的控制指标的统计方式。我们可以利用这些工具得到我们想要的统计结果。

1) 指标统计楼层合并

楼层信息

材料标号 混凝土构件抗震等级 钢构件抗震等级 钢筋标号 实配钢筋超配系数 整体控制选项

	1塔			
	统计层指标	结构重要性系数	塔高(mm)	指标统计层号
1层(1标准层)	<input checked="" type="checkbox"/>	1	3300	1
2层(2标准层)	<input checked="" type="checkbox"/>	1	4500	2
3层(3标准层)	<input checked="" type="checkbox"/>	1	4000	2
4层(4标准层)	<input checked="" type="checkbox"/>	1	4000	3

注：本表支持多选修改

确定 取消 自动调节后续指标层号

通过此功能，您可以将任意两层或多层模型合并一层统计，在结果中会同时输出分层与合并楼层的统计结果，根据您的需要来使用。

```

*****
相邻层侧移刚度比 (指标统计合并层)
*****
Floor No : 层号
Tower No : 塔号
Ratx, Raty : X, Y 方向本层塔侧移刚度与下一层相应塔侧移刚度的比值(剪切刚度)
Ratx1, Raty1 : X, Y 方向本层塔侧移刚度与上一层相应塔侧移刚度70%的比值或上一层平均侧移刚度80%的比值中之较小者
Ratx2, Raty2 : X, Y 方向本层塔侧移刚度与上一层相应塔侧移刚度90%、110%或者150%的比值。110%指当本层层高大于相邻上层层高1.5倍时, 150%指嵌固层
RJX1, RJY1, RJZ1 : 结构总体坐标系中塔的侧移刚度和扭转刚度(剪切刚度)
RJX3, RJY3, RJZ3 : 结构总体坐标系中塔的侧移刚度和扭转刚度(地震剪力与地震层间位移的比)
*****
Floor No. 1 Tower No. 1
Ratx = 1.0000 Raty = 1.0000
Ratx1= 1.7042 Raty1= 14.2363
RJX1 = 1.6952E+006 (kN/m) RJY1 = 6.4418E+006 (kN/m) RJZ1 = 0.0000E+000 (kN/m)
RJX3 = 1.1198E+006 (kN/m) RJY3 = 1.9139E+006 (kN/m) RJZ3 = 1.0015E+008 (kN*m/Rad)
-----
Floor No. 2 Tower No. 1
Ratx = 1.5876 Raty = 0.1671
Ratx1= 2.4534 Raty1= 0.8827
RJX1 = 2.6912E+006 (kN/m) RJY1 = 1.0766E+006 (kN/m) RJZ1 = 0.0000E+000 (kN/m)
RJX3 = 4.4924E+005 (kN/m) RJY3 = 1.1299E+005 (kN/m) RJZ3 = 6.9916E+007 (kN*m/Rad)
-----
Floor No. 3 Tower No. 1
Ratx = 0.1880 Raty = 0.6240
Ratx1= 1.0000 Raty1= 1.0000
RJX1 = 5.0586E+005 (kN/m) RJY1 = 6.7187E+005 (kN/m) RJZ1 = 0.0000E+000 (kN/m)
RJX3 = 1.8802E+005 (kN/m) RJY3 = 1.1003E+005 (kN/m) RJZ3 = 1.3935E+007 (kN*m/Rad)
-----
X方向最小刚度比: 1.0000(3层1塔)
Y方向最小刚度比: 0.8827(2层1塔)
*****
楼层抗剪承载力验算 (指标统计合并层)
*****
Ratio_X, Ratio_Y: 表示本层与上一层的承载力之比
层号 塔号 X向承载力 Y向承载力 Ratio_X Ratio_Y
3 1 1.0869E+004 1.2332E+004 1.00 1.00
2 1 2.7749E+004 2.4663E+004 2.55 2.00
1 1 4.5879E+003 5.9784E+003 0.17 0.24 薄弱层且与上层之比<0.65

```

2) 围区统计

软件对于围区统计支持单层围区和多层围区两种模式。

单层围区:



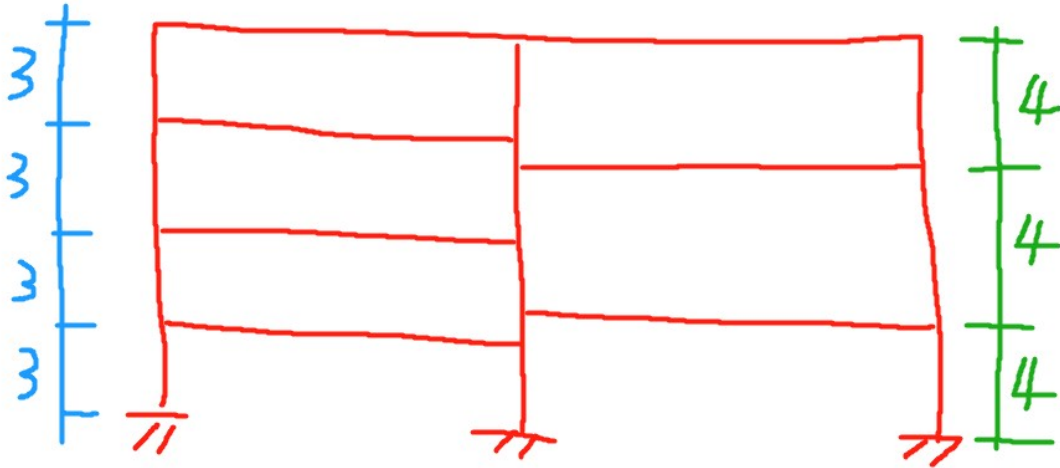
多层围区:



我们可以分别围选错层两边的结构统计各自的层指标。

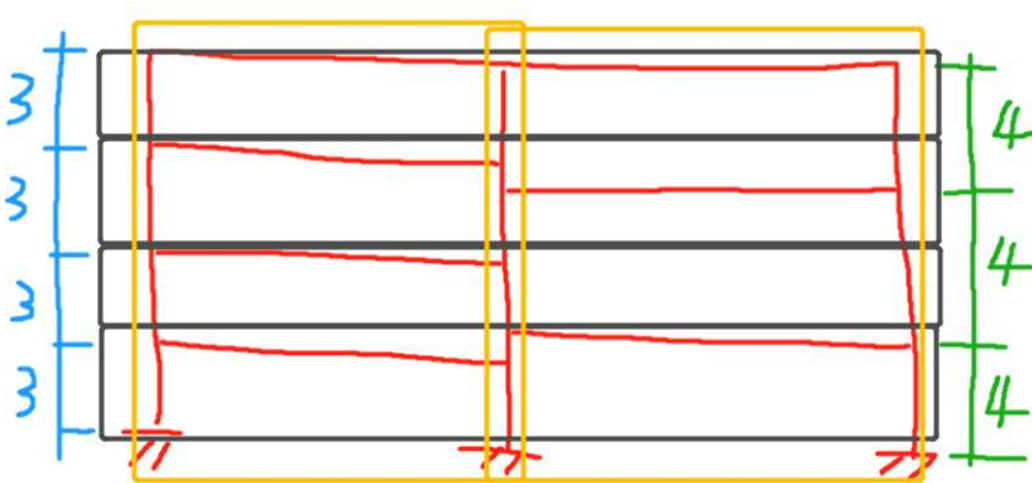
最后我们来讨论一种复杂情况：

如下结构，左侧 3 米层高，右侧 4 米层高。



对于这种情况，我们按照前面总结的建模方式来处理。

小于 1500 的错层合为一层，超过 1500 的分层，两侧围区统计。就得到下面的结果。



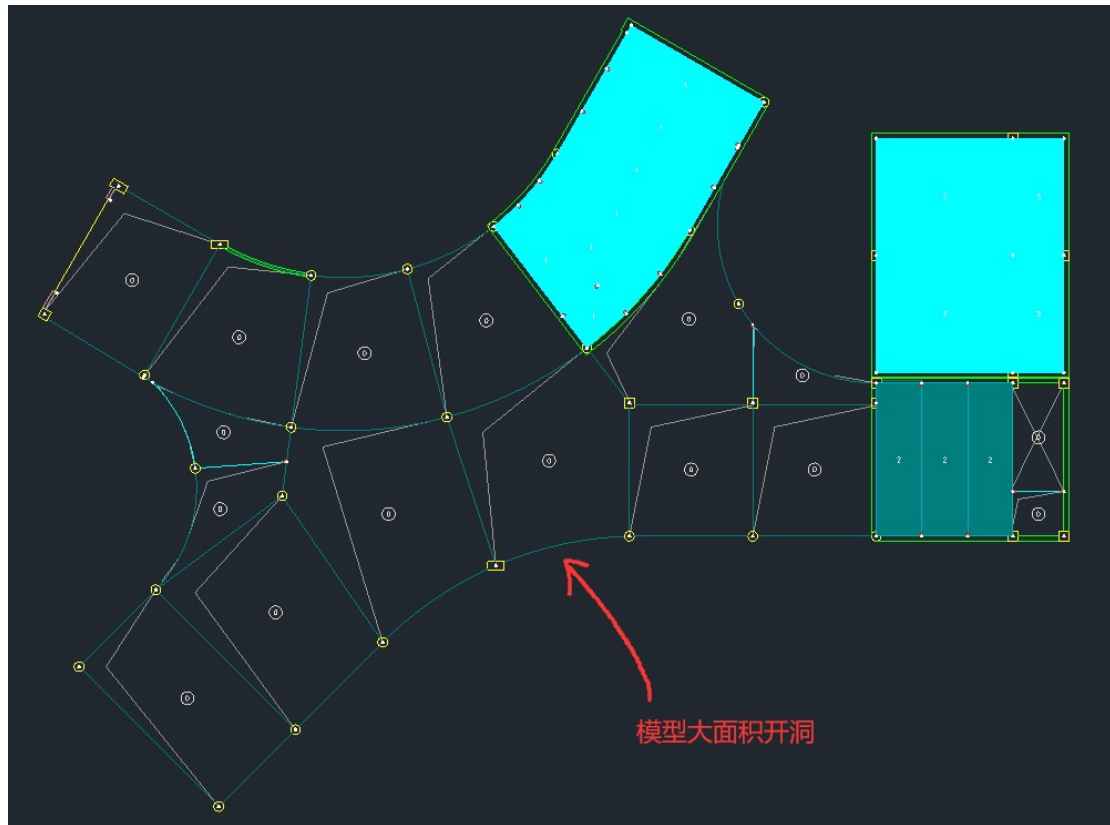
总结

1. 错层小于 500 时建议忽略错层，简化为平层计算。
2. 错层在 500~1500 时，建议通过调点高方式定义错层。
3. 错层大于 1500 时，建议分层定义错层。
4. 错层处应合理定义梁板属性，板属性定义为全局（或全楼）弹性膜；错层处梁定义为壳元梁。
5. 软件提供了合并楼层统计，围区统计的工具来实现对于错层处层指标的合理统计。

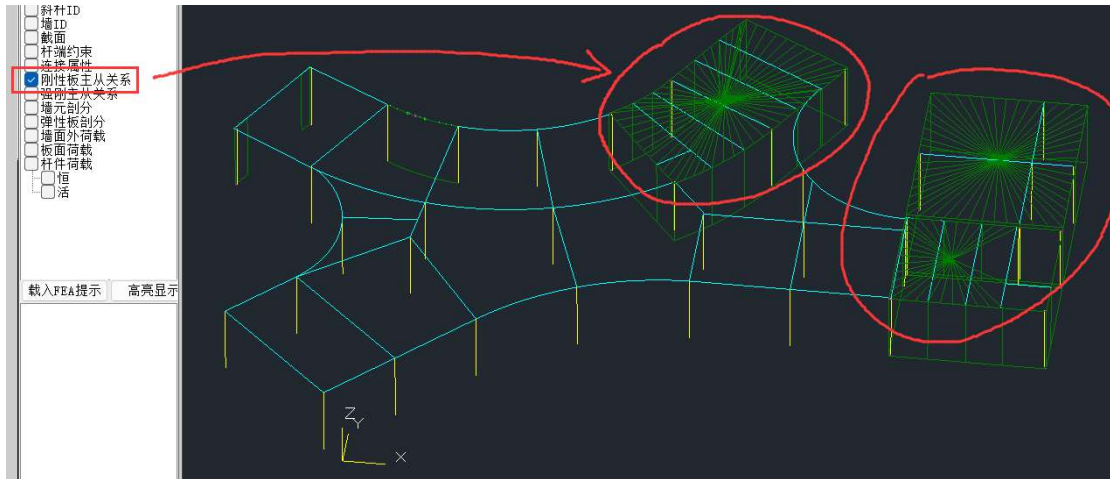
注释

注 1：关于强制刚性板模型与刚性板模型的差别

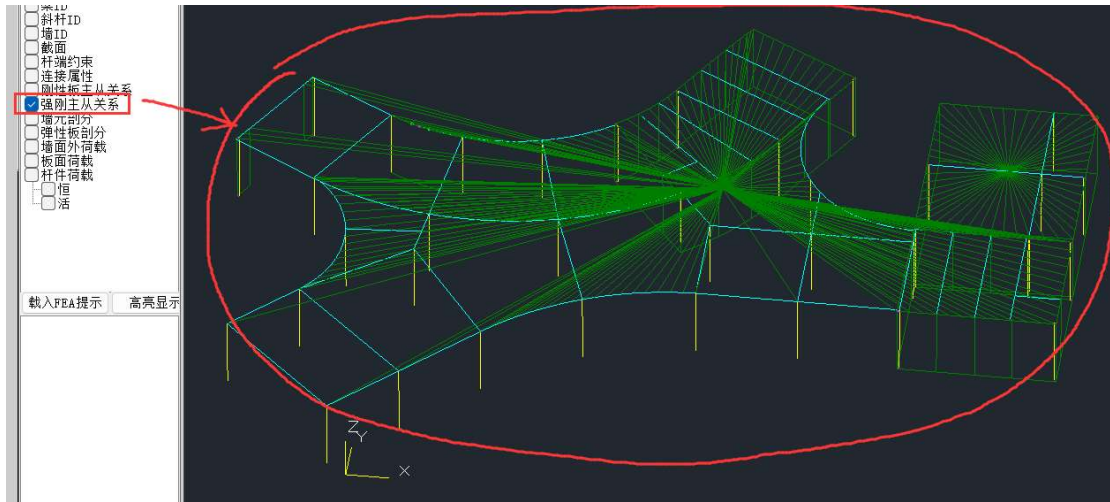
刚性板模型是软件默认的楼板模型；强制刚性板模型是通过参数生成的特定模型，用于指标统计。两者差异主要体现在有大面积楼板开洞的情况，如下图：



刚性板模型（开洞处不生成刚性板）



强制刚性板模型（全层都是刚性板）



注 2：关于力学模型的几何精度边界

并没有一个明确定义，它泛指力学模型的简化能否导致分析结果明显失真的界线。

模型简化指对分析对象的某些属性 细节的忽略 或 线性化的处理，如对地基土层的压缩属性简化为线性弹簧。

而我们今天讨论的是几何属性的简化，这种简化在结构力学分析中是普遍应用的，可以说任何一个力学模型都是对研究对象的抽象和简化，只不过其简化程度不同。

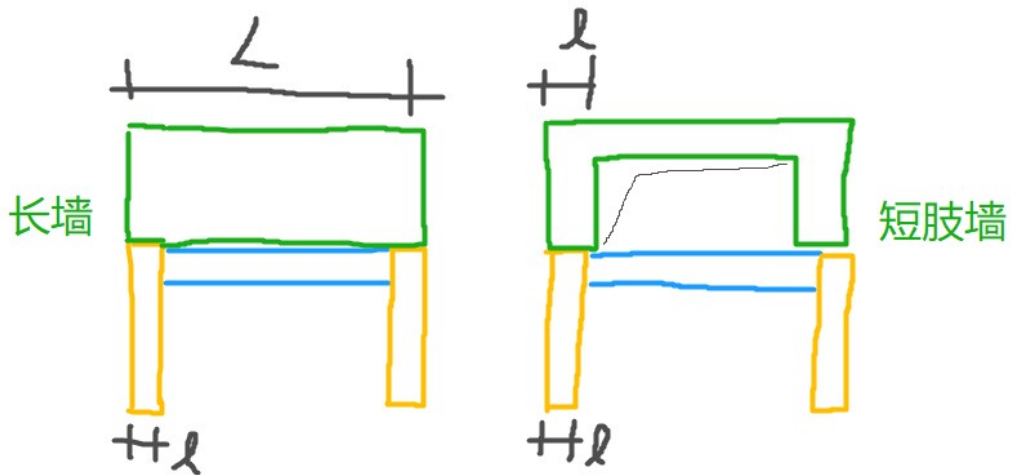
适当的模型简化可以提高计算效率，简化建模操作，同时得到接近客观实际的分析结果。但也要掌握简化的度，过度简化会导致计算结果严重失真。而这个度就是我们所谓的边界。

此处再举一个经典案例：

关于托墙转换结构是否要定义实体元

这就要看转换部位的几何细节是否达到了杆元模型的精度边界。

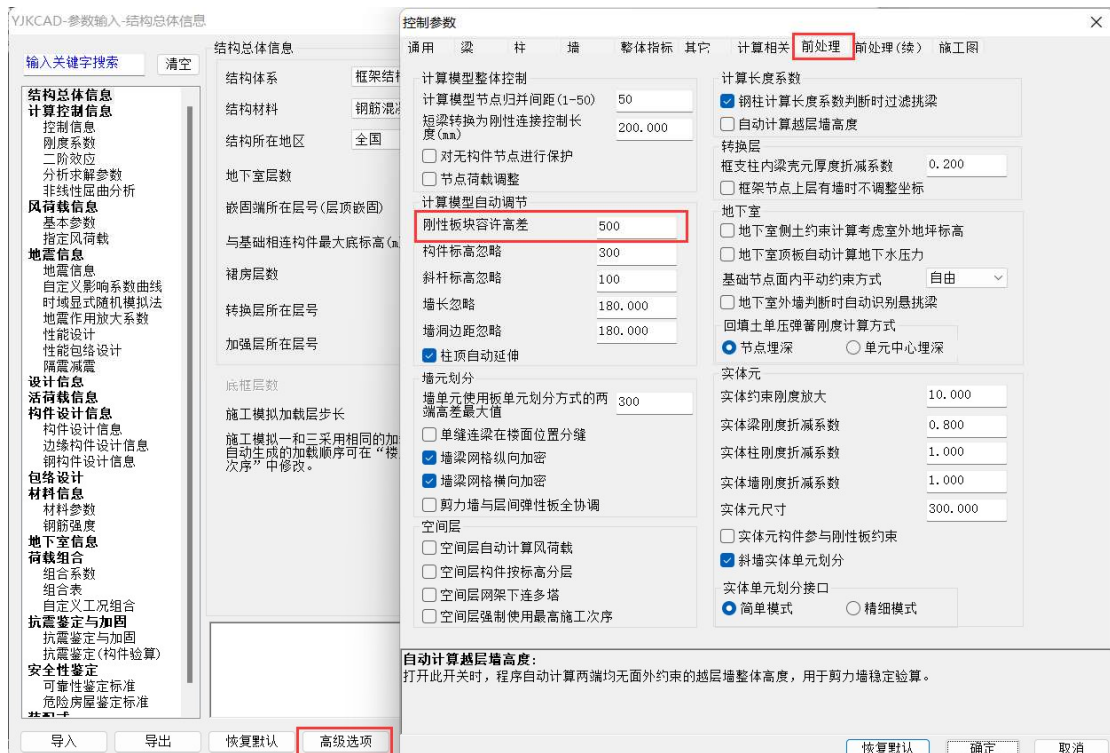
当墙长较长时，大部分墙是落在转换梁上的，此时柱的截面尺寸相比于墙长可以近似忽略。



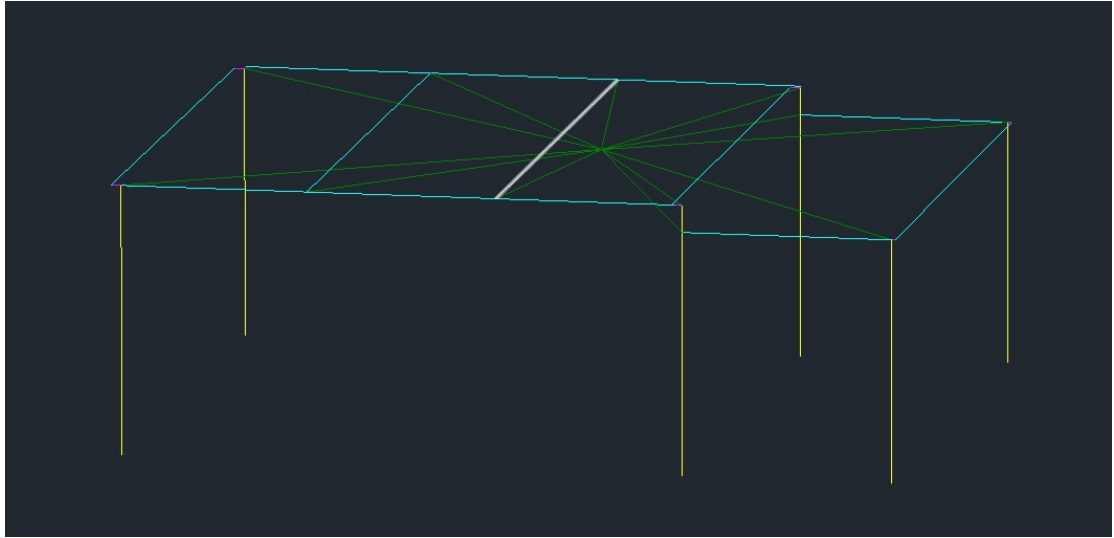
但如果是短肢墙呢？

此时墙长与柱宽接近，柱的截面尺寸就不能忽略了。如果柱仍按杆元简化，就会导致短肢墙的荷载过多的传给梁而引起梁端的承载力被低估，导致强梁弱柱，这是违背延性设计的原则的。此时就需要采用精度更高的实体元来处理转换结构以得到更真实的分析结果。

注 3：关于分块刚性板，软件在高级参数中有边界控制



我们看到其默认的容差是 500，当错层小于 500 时 软件将把错层两侧的刚性板合并为一块。

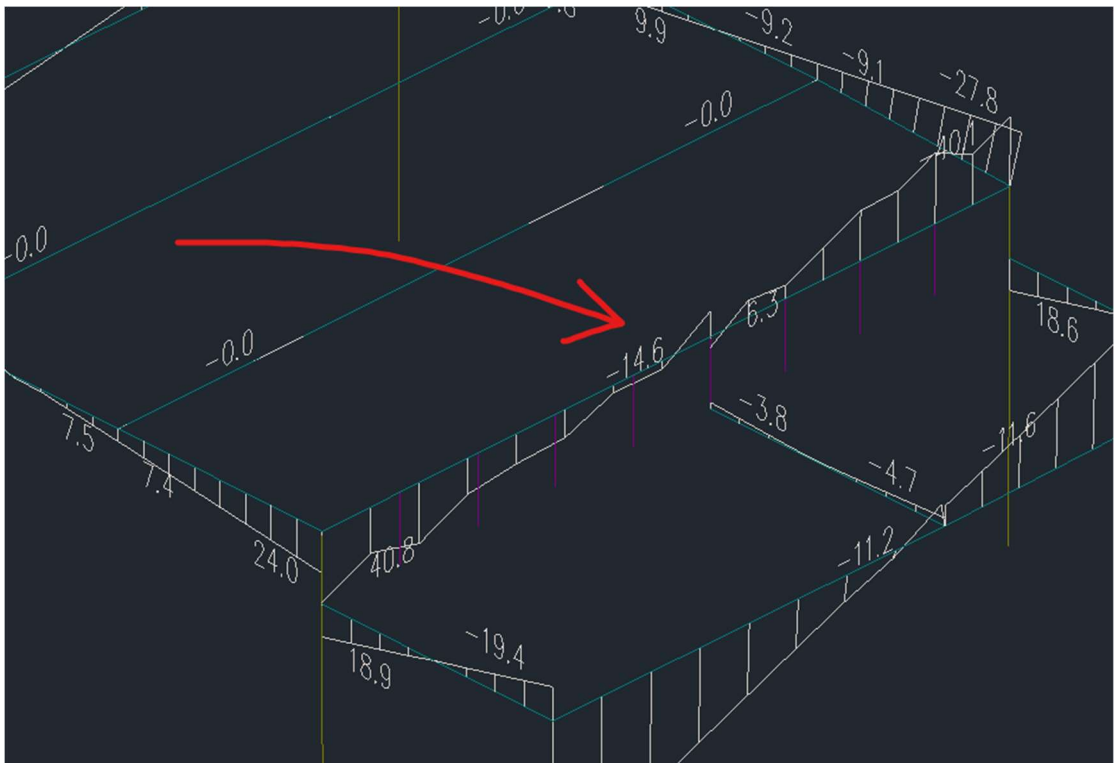


由图可见，此时刚性板不再是平面楼板了，它有了空间属性。这对于结构整体的刚度会有较大影响（有时候甚至会使结构从平动变为扭转）。

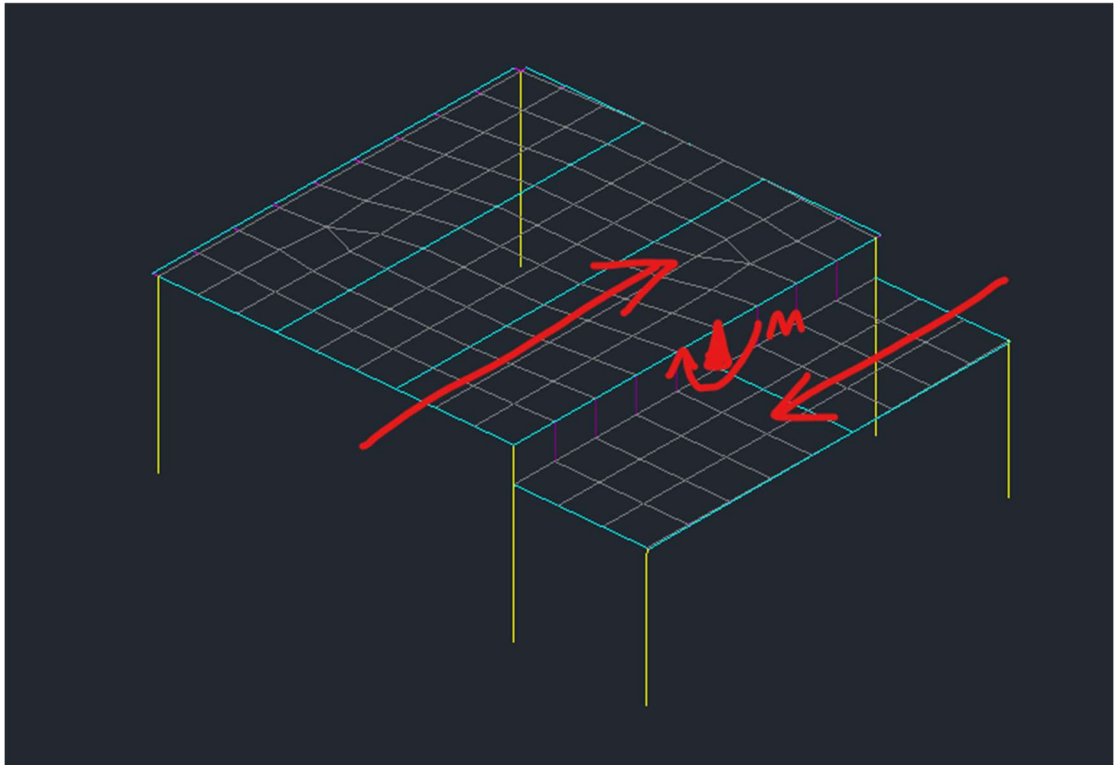
因此从这也看出，我们对模型做合理的简化是非常必要的。

注 4：关于主次梁的协调变形

除了保证次梁荷载能导算到主梁以外，还要考虑到错层连接对受力和变形模式的影响。



如上图，错层处主梁往往会出现弯矩突变的情况。这是由于错层两侧有相对错动，导致次梁对主梁产生了集中弯矩。



这种弯矩看似异常，但实际是真实的。只要您按上文所述合理定义模型就可以得到接近实际的弯矩结果。

错层梁截面连接刚性杆自动铰接

为了释放这个弯矩，软件设置了上面的参数，但本人不建议勾选。

注 5：分层对力学计算的影响

可以总结为以下几条：

- 1) **恒载下的施工模拟：**由于软件默认是根据楼层划分来确定施工步的，因此分层与否会影响的施工次序的结构。但对于本文讨论的错层情况属于平面不规则，而非竖向不规则，因此施工次序对力学计算的影响微乎其微，对于既存在错层又存在其他竖向不规则（如转换，悬挑等）时应注意施工次序的指定。
- 2) **风荷载的风压高度变化系数的计算：**软件中对于风压高度变化系数是根据每层顶标高来确定的，因此楼层划分不同会改变风压高度变化系数的结果，进而影响风荷载的计算。但考虑到多数错层结构其高差不会太大，因此此影响可以忽略不计。
- 3) **有限元模型的差异：**分层与否对于某些体形复杂模型细部的单元剖分和构件归并可能引起差异，进而影响力学计算结果。这种情况需根据具体模型专门分析，此处不做进一步讨论。