

XXX 总：

您好！上次电话讨论大震计算问题，颇受教益。

讨论到 STRAT 连梁没有考虑剪切屈服，Abaqus 软件的个别微小单元致使速度极慢、墙细分导致相连框架梁刚度下降，等等。讨论结果，好像各软件互有优缺点，各擅胜场。——可能不应这样简单地看，因为这涉及到技术发展前后相继的过程。（注：梁元同样可以考虑剪切屈服）。

建筑结构大震分析从力学角度是典型的材料非线性问题(选波、结果评估等也很重要)。材料非线性比几何非线性更为复杂，体现在各构件、各截面、截面上的每个点，力学性能均不同，均需要记录其全部受力过程。要达到必须的计算精度，必须记录点(即细分纤维或积分点)非常密集，也就是细分。有两种层次的细分：**单元细分**和**单元内部细分**。

1) 单元细分。单元细分后整体计算量增加，将导致计算量大、耗时长，效率降低。一般而言，计算量与单元数成平方关系。一片墙加密一倍，单元数为 4 倍，其计算量将达到 10 倍以上。

2) 单元内部细分。例如细分成纤维，加密积分点。单元内部细分不影响整体计算量。且单元内部的计算属于代数计算，本身非常快。

看起来，单元内部细分具有绝对优势。但是，单元内部细分有前提条件，其前提是：**有专门的高性能单元，并具有相应的算法，能够将内部的细分点的材料本构特性，真实体现在单元刚度、单元应力等计算要素上。**

ABAQUS 基本采取的是单元细分的技术路线，其技术是**成熟的、传统的，也是低效率的**。这不是我个人的看法，而是学界的普遍看法(参见下面的文献摘录)。我在 MIT 的时候，就与 K.J.Bathe 教授讨论过这个问题。

技术总是在发展的，并且已经得到发展——ABAQUS 没有体现这些发展方向。下面就建筑结构大震分析所涉及到的主要单元、主要算法，作简要介绍。

一、梁柱单元问题

ABAQUS 大震计算中的梁柱单元是刚度法单元(基于位移插值)。这类单元对于材料非线性问题的局限性已是共识(见后面文献摘录)。工程应用中，需要单元细分，并且需要很高密度的细分才能达到理想的计算精度。

为解决梁柱单元的材料非线性问题，柔度法得到发展。较为突出的是 1990 年 Berkely 的 Filippou 等人将纤维细分与柔度法相结合的研究(Fiber beam-column model for non-linear analysis of R/C Frames, Earthquake eng. and struct. dynamics, V25,711-725,1996)，这项研究成果形成了 CSI 公司的 Perform3D 的技术基础。Filippou 的纤维单元有其局限性，作为很纯粹的柔度法需要较多的迭代计算，单元纵向 Gauss-Lobatto 积分，位置固定、数量有限的积分点限制了单元精度。

对于 Perform3D 而言，虽有较好精度的梁柱纤维单元，但剪力墙却较为简化的双向多竖杆模型。此外，该软件的整体技术也限制了工程应用。(例如一个超高层工程，常规计算 STRAT 仅 2 分钟，CSI 系列需 1~2 小时，在这种技术差距下，大震计算 STRAT 需 2 小时——Perform3D 需 2 天，也就不足为奇了)。

我于 2000 年提出针对材料非线性梁柱单元的积分算法，并于 2008 年将积分算法扩展到几何非线性问题。积分算法克服了 Filippou 纤维单元的缺陷。虽然本质为柔度法，但直接给出单元刚度矩阵。给出任意单元分布荷载的通用公式，特别适合不平衡内力的处理。单元纵向采用代数积分，避免 Gauss-Lobatto 积分点数限制，可以任意加密以提高精度。积分算法发展了柔度法，使纤维单元的应用达到一个新高度。

一些研究认为柔度法存在这样那样的问题，我们在应用中也有发现。但这些新技术发展过重自然伴随的问题，是可以克服的和完善的。

在刚度法的局限性广泛认知、柔度法得到充分发展的情况下，ABAQUS 软件仍采用刚度法，实在不应该盲目认为它是先进的。实际上，工程 ABAQUS 往往达不到必要的单元细分，计算精度并不高，并且导致几天、十几天的计算耗时。

二、剪力墙单元问题

分层壳模型对于剪力墙，并不是一个充分的计算模型——这是一个需要澄清的问题。因为墙以平面内受力为主，需要的是平面内的细分，而不是厚度细分。分层壳模型本身没有解决剪力墙非线性计算问题，需要单元细分才能模拟剪力墙。

Abaqus 采用分层壳模型，受其单元性能制约。当前墙单元平面内的部分，即具有旋转刚度的膜单元(membrane element with drilling degrees)，属于 Allman 类型单元。1980 年代,D.J. Allman 首先通过平面单元附加旋转位移场，构造出具有转角刚度的平面单元。1990 年代，Ibrahimbegovic 通过建立独立的附加旋转位移场与反对称应变梯度的约束关系，显著提高了 Allman 类型单元的性能。国内外有很多学者从事此领域研究，但大致按照这一技术思路。Allman 单元的本质，仍是双线性插值的平面单元，单元内部的应变是线性的。如果单元内细分，其效果等同于平截面假定下的多竖杆模型，这是 Abaqus 软件采用单元细分、而不是内部细分的原因。

本人于硕士期间即通过工程应用发现墙单元普遍存在的问题，并进行相关研究(J.Z. Xie, Research on Local Deformation of Shear-wall Structures, The 5th Int. Conf. on Tall Buildings, 1998, HK)。经历多次尝试后，于 2001 年左右成功研发出新的墙单元类型。STRAT 墙元采用一种全新的单元构造方式，完全不同于 Allman 单元，突出的特点是可靠计算梁、墙直接连接节点，算例表明优于已有各类软件的墙元。STRAT 另外一个特征，其本身是个高次单元，具有高于一次的应变场。

STRAT 墙元的高次应变场为大震分析提供了良好的载体。可以采用单元内部细分的方式，提高非线性计算精度，同时降低整体计算量。这就是 STRAT 剪力墙平面纤维模型的技术背景。

由于墙元的细分是二维细分，墙网格加密一倍、单元数增加 4 倍、计算量达 10 倍以上。——提高单元本身的性能，单元层次不细分、或者少细分，效率将是惊人的！所以有 40 小时比 0.15 小时这种让人震惊的悬殊差距！

三、隐式积分、显式积分的问题

两者的不同：隐式积分需总刚分解，但计算步长较大(如 0.02s)；而显式积分不需总刚分解，但计算步长极小(如 10^{-5} s)。简而言之，隐式总刚分解费时，显式计算步数多。两种因素的消长，决定两种算法的效率。

早期的总刚矩阵采用一维变带宽存储，总刚包含大量非 0 元素，体量大、分解效率低。在这一时期，显式积分具有绝对优势。

后来的稀疏存储技术，大量压缩总刚 0 元素，分解效率有数十倍提高。稀疏存储也不能完全消除 0 元素，因为 LDL^T 分解过程会产生大量新的非 0 元素(可以达到 80%以上)。这一阶段，显式、隐式计算效率已没有明显差距。

隐式积分中的迭代法，拉近了与显式积分的距离。迭代法由于不需要 LDL^T 分解，总刚完全排除 0 元素，与显式积分完全相同。迭代法需要多次迭代，而显式积分需要加密积分步长，而一次迭代的计算量与一次显式积分的计算量相同。

虽然迭代法并不总是比 LDL^T 分解速度快，但对于大震弹塑性时程这一动力响应过程，通过 STRAT 软件 PCG 迭代法(预处理共轭梯度迭代法)应用表明，收敛速度极快，显示出绝对优势。因为迭代收敛速度依赖荷载向量本身的特征，大震分析中荷载向量与质量成比例、与刚度分布间接相关，使得较少的迭代步即可达到需要精度。基于迭代法的隐式积分，已经具有高于显式积分的计算效率。

对于建筑结构大震分析，显式、隐式计算精度上没有差异。如果说，显式积分能够避免计算发散——结构部分屈服、刚度降低而导致振幅放大、进而导致发散，这是自然现象(如同鞭梢效应、悬挂减震)，如果不能模拟这点，只能说没有正确激发出这种效应，是缺点而不是优点。

四、其它问题

例如，高斯(Gauss)积分的问题。我们通过编程实践发现高斯积分在材料非线性问题中的系统误差，因此 STRAT 的梁柱、墙完全不用高斯积分。而 ABAQUS 梁柱截面、纵向无一例外都是基于高斯积分，(Perform3D 纤维梁纵向 Gauss 积分，截面代数积分)。

再如，裂缝计算的损伤力学模型。损伤模型在弥散裂缝之后发展起来的，属于一种宏观等效模型，是一种较为成熟的技术。STRAT 软件发展到直接计算裂缝宽度和间距，体现了技术进步。

上面从大震分析各个方面，介绍相关技术发展的沿革过程。很遗憾以一个软件开发者的身份评价另外软件，但所阐述的是学术理论和工程技术本身而不是其它。**如果技术评价需要相应的“资格”的话，以我们理论研究的深度、编程实践的广度，以及大量的工程实践，应该具备这种“资格”，并且这种“资格”是全面的、而不是片面的！**

ABAQUS 本身是优秀软件，具有 STRAT 所不具备的强大功能。但就建筑结构大震分析这一领域而言，我们应该意识到其局限性。现在 ABAQUS 在国内具有异乎寻常的技术地位，这很不正常，不符合技术发展规律。其中原因，个人认为“**研究者不编程、编程者缺理论深度**”，从哪个方面看都是高不可攀的。这种现象的结果是，“**在高性能电脑旁边守候几天、十多天，虔诚地期待所谓‘权威’结果**”，而阻碍了技术更新和效率提高！

我们不能想当然地认为，这些国际级别的软件，都积极采用先进技术。我在 MIT 时了解到(Bathe 亲口告诉我)，ADINA 竟然没有带旋转刚度的膜单元(不能应用于建筑结构领域)，这让我很惊讶。再有，我在十多年前通过算例对比发现 Anasys 软件的膜单元性能很差(差不多是早期的 Al1man 单元)，至今仍未见有改善。

作为商业软件，STRAT 软件依赖强大的技术、可信可靠的结果、完善的服务赢得用户，并不依赖所谓“国内国外”的情绪因素。但是，在一定程度上，现在缺乏客观公正的氛围。往往对国外的东西“啧啧称羨、高山仰止”，不敢质疑，已知其缺陷也服从。而对国内技术，则是以己度人(能行吗?可能吗?是不是假的?)，或者虚无主义(没什么、差不多)。其实质是**缺乏判断能力、缺乏技术自信，刻薄点说是技术“奴性”!**国家倡导制度自信、道路自信，也需要逐步建立科学技术自信。

【文献摘录 1】 The first elements with distributed non-linearity were formulated with the classical stiffness method using cubic Hermitian polynomials to approximate the deformations along the element. Shear effects were first included in the model proposed by Bazant and Bhat. Menegotto and Pinto interpolated both section deformations and section flexibilities and accounted for the axial force-bending moment interaction. Recent efforts to develop more robust and reliable reinforced concrete frame elements have shown a trend toward flexibility-based formulations that permit a more accurate description of the force distribution within the element. Mahasuverachai and Powell” proposed flexibility-dependent shape functions that are continuously updated during the analysis. Kaba and Mahin presented a flexibility-based fibre element, that was later improved by Zeris and Mahin.

译文:最初的刚度非线性分布的单元采用刚度法,其挠度形函数场采用 3 次 Hermitian 插值多项式。Bazant and Bhat 首次在这里单元中包含了剪切变形, Menegotto and Pinto 对截面挠度和截面曲率同时形函数插值以考虑弯曲轴压的耦联作用。近期的发展趋势,是采用更能准确反映内力沿纵向分布的柔度法,能更为全面、有效地模拟钢筋混凝土框架。Mahasuverachai and Powell 提出了针对内力插值的形函数,并且在计算过程中即时更新。Kaba and Mahin 提出了基于柔度法的纤维单元,并由 Zeris and Mahin 改进提高。(Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol25, 711-725, 1996)

【文献摘录 2】 In nonlinear material analysis problems, the most popular method for analysis is the displacement method.Furthermore, significant mesh refinement is often required to capture the transition from elastic to plastic behavior. Consequently, a number of researchers (e.g., [8,9,11,14]) have directed their efforts toward the force method for

analyzing structural problems with nonlinear materials. The main unknowns in this method are the internal element forces instead of the nodal displacements as in the displacement method. In many cases, this provides a much more efficient representation for elastoplastic problems.

.....

The two problems will be solved by the LIM method and the finite element program ABAQUS [2] which utilizes the displacement method. We used the B23 element from the beam library in ABAQUS and a very fine mesh with an element length of 0.01m. Both problems will be loaded until the failure point. For the baseline analysis, a total of 25 integration points were employed through the beam depth in the ABAQUS analysis in order to obtain accurate results near the collapse load.

译文：在材料非线性分析中，最流行的方法是位移法(刚度法)。……更甚者，为了反映从弹塑性变形和受力特征，(刚度法)需要细分单元且足够精细。很多研究者致力于用柔度法(原文力法)解决材料非线性问题。在柔度法中，单元内力作为未知变量，替代了刚度法中的作为未知量的位移。在多数情况下，柔度法能更有效地解决弹塑性问题。

这两个问题分别用 LIM 法和 ABAQUS 软件分别计算，后者采用刚度法。选择 ABAQUS 单元库中的 B23 单元，并且按照 0.01m 长度进行单元细分。两个模型均加载到破坏。为了得到一个比较的基准，ABAQUS 中分析中梁截面采用 25 点数值积分，以提高接近破坏时的计算精度。(Computers and Structures, Vol183, 2453–2462,2005)