

ABAQUS在超高层结构动力弹塑性分析中的应用¹

阎红霞^{1, 2)} 杨庆山²⁾ 张丽英³⁾

1) 河北大学建筑工程学院, 保定 071002

2) 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100084

3) 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710068

摘要 本文概述了现有的弹塑性分析方法即静力和动力弹塑性分析方法, 并比较了其优缺点。同时, 应用大型有限元软件 ABAQUS 对西昌某超高层建筑进行了动力弹塑性时程分析, 对动力弹塑性时程分析方法在高层、特别是在超限高层分析中的推广和应用提供了有益的参考和借鉴。

关键词: 静力弹塑性分析 动力弹塑性分析 ABAQUS 超高层

引言

我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2001)指出, 高层建筑以“三水准设防目标, 两阶段设计步骤”进行设计, 即在第一设计阶段以结构在“小震”作用下的弹性分析进行结构截面承载力设计, 并用特定配筋以增强截面强度和构件延性, 从而达到结构“中震可修”和“大震不倒”的设防目标; 在第二设计阶段要求对结构进行罕遇地震下的弹塑性变形验算, 其中《建筑抗震设计规范》第 3.6.2 条规定: 不规则且具有明显薄弱部位可能导致地震时严重破坏的建筑结构, 应按本规范有关规定进行罕遇地震作用下的弹塑性变形分析; 《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3-2002) 第 5.1.13 条规定: 对于 B 级高度的高层建筑结构和复杂高层建筑结构, 宜采用弹塑性静力或动力分析方法验算薄弱层的弹塑性变形。但是, 目前对于复杂高层及超高层建筑, 如何进行罕遇地震下的弹塑性变形验算以实现“大震不倒”的设防目标, 仍是有待解决的问题。鉴于此, 本文基于大型通用有限元软件 ABAQUS, 利用其丰富的单元及材料库、强大的非线性计算功能, 对西昌某超高层结构进行了罕遇地震作用下动力弹塑性时程分析, 为结构在罕遇地震下的弹塑性变形验算提供了有益的参考和借鉴。

1 弹塑性分析方法

目前确定结构在大震作用下的弹塑性变形有 2 种方法: 静力弹塑性分析方法和动力弹塑

1 基金项目 河北大学校内基金项目 (2005Q22) 资助

[收稿日期] 2010-03-15

[作者简介] 阎红霞, 女, 生于 1976 年。博士研究生, 讲师。主要从事工程抗震方面的研究。E-mail: hongxiayan@126.com

性时程分析方法(王涛, 2006)。

1.1 静力弹塑性分析方法

基于美国 FEMA-273 抗震评估方法和 ATC-40 报告的静力弹塑性分析(PUSH-OVER ANALYSIS)方法, 理论核心是“目标位移法”和“承载力谱法”, 该方法介于弹性分析和动力弹塑性分析之间, 我国抗震规范也将该方法作为验算在罕遇地震下结构弹塑性变形的的方法之一。其具体步骤为: 对结构按照一定的水平加载方式施加单调递增荷载, 直到将其推至既定的目标位移或呈现不稳定状态为止, 然后分析结构进入非线性状态时的反应, 从而判断结构及其构件的变形受力是否满足设计要求。相比目前的承载力设计方法, 该方法可以估计结构和构件的非线性变形, 更接近实际; 而相对于动力弹塑性分析, 该方法的概念、所需参数和计算结果相对明确, 构件设计和配筋合理能够直观地判断, 而且可以花费相对较少的时间和费用得到较稳定的分析结果, 从而减少分析结果的偶然性, 达到工程设计所需要的变形验算精度。

但该方法也有很多不足的地方(尹华伟等, 2003): ①没有特别严密的理论基础, 它假定结构的响应与等效单自由度体系相关, 且结构沿高度的变形由形状向量表示并保持不变; ②梁柱采用集中塑性铰单元计算模型可以进行较为准确的模拟, 但是对于剪力墙一直没有理想的计算模型; ③水平荷载加载模式与实际地震作用模式不符, 进而由此确定的结构目标位移精度不高, 其确定方法也有待改进。总之, 将地震的动力效应近似等效为静态荷载, 只能给出结构在某种荷载作用下的性能, 无法反映结构在某一特定地震作用下的表现; 不能正确考虑地震作用下结构的滞回特性; 未必能发现结构倒塌的可能性; 以及由于地震的瞬时变化在结构中产生的刚度退化和内力重分布等非线性动力反应特性。因此, 静力弹塑性分析方法仅适用于层数不多、自振周期小于 2s、并且以第一振型为主的结构(缪志伟等, 2008), 而对于较高振型不容忽略(如较高的高层和具有局部薄弱部位的建筑)的建筑, 该方法将受到限制。正是由于这些缺点的存在, 对于目前工程中遇到的许多超限结构, 不宜应用该方法, 为此人们逐渐开始重视动力弹塑性分析方法的理论研究和工程应用。

1.2 动力弹塑性时程分析

动力弹塑性时程分析是将结构作为弹塑性振动体系直接将地震波数据输入, 通过积分运算求得在地面加速度随时间变化期间内, 结构的内力和变形随时间变化的全过程, 该方法也称为弹塑性直接动力法。由于计算中输入的是地震波的整个过程, 因此该方法可以反映出各个时刻地震作用引起的结构响应, 包括结构的变形、应力、损伤形态(开裂和破坏)等。总之, 静力弹塑性分析通常只能对结构进行定性分析, 而动力分析不仅能对结构进行定性分析, 同时又可以给出结构在大震下的量化性能指标。

动力弹塑性分析方法对结构的简化假定较少, 分析精度高, 是计算结构在地震作用下弹塑性变形的较准确方法。但由于地震输入本身的不确定性; 结构弹塑性分析建模的复杂性、数据前后处理繁琐和计算代价偏高; 对计算人员要求其具有有限元、材料本构关系、损伤模型等相关理论知识, 因此该方法在实际中广泛应用还有一定的困难。但随着理论研究的不断发展, 计算机软硬件水平的不断提高, 该方法已经开始应用于少数超高层和复杂的大型结构分析中(王传甲等, 2006)。

1.3 国内外动力弹塑性时程分析的软件

近几十年来, 各国研究者一直在研制结构弹塑性分析的计算机软件。在国外 DRAIN-2D 是最早的平面结构弹塑性分析程序, 而 DRAIN-3D、IDAR 就是在 DRAIN-2D 基础上发展出

来的, 它们可以完成静力和动力弹塑性分析, 但前后处理功能较弱, 恢复力模型比较粗糙, 不能完整地反映混凝土的滞回特性。李唐宁博士开发了 CANNY 程序, 采用两端带弹簧的等效梁单元或塑性铰梁单元模拟框架梁柱、多弹簧模型模拟剪力墙、刚性板单元模拟混凝土楼板, 该程序可进行振型分析、弹塑性静力分析、拟动力分析、动力时程反应分析等。ETABS/SAP2000 软件采用塑性铰模型来模拟框架梁柱及剪力墙, 也提供了结构静力和动力弹塑性分析功能。在通用有限元软件 ABAQUS 中, 混凝土损伤模型 (Lee 等, 1998; 张劲, 2008; Yan 等, 2009) 对于模拟循环荷载下混凝土的破坏具有较好的性能, 是适于对复杂结构进行动力弹塑性分析的有限元软件平台 (王传甲等, 2006)。在国内清华大学开发了弹塑性地震反应分析程序 NTAMS, 采用塑性铰模型模拟框架梁柱、采用可以考虑弯曲屈服和剪切屈服的多弹簧模型模拟剪力墙, 能完成高层建筑静力和动力弹塑性分析。中国建筑科学研究院 PKPMCAD 工程部开发的弹塑性动力反应分析软件 EPDA, 采用纤维模型模拟钢及钢筋混凝土梁柱和支撑, 采用弹塑性壳单元模拟剪力墙, 能完成高层建筑静力和动力弹塑性分析。

2 ABAQUS 在实际工程中的应用

鉴于有限元软件 ABAQUS 中混凝土损伤塑性模型对模拟混凝土循环荷载下的破坏具有较好的性能, 以及该软件强大的非线性显示算法, 应用该软件对四川省西昌某 20 层弧形框架-剪力墙建筑结构 (图 1) 进行动力弹塑性时程模拟分析, 以探讨复杂建筑的动力弹塑性时程分析。该结构总高度 74.4m, 超过了《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3-2002) 中的 A 级高度高层结构最大适用高度, 因此该建筑为超高层结构。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2001) 规定, 该超高层结构抗震设防烈度不低于 9 度, 设计基本地震加速度值不小于 0.40g, 设计地震分组为第一组, 场地类别 III 类, 对该结构在初步设计阶段应进行弹塑性动力分析计算, 以达到如下目的: 根据结构主要构件的塑性损伤情况和整体变形情况评价罕遇地震下结构的弹塑性行为, 确认结构是否满足“大震不倒”的设防水准要求; 研究高度超限对结构抗震性能的影响, 包括在罕遇地震下的最大顶点位移, 最大层间位移以及最大基底剪力; 根据分析结果, 可针对结构薄弱部位和薄弱构件提出相应的加强措施, 为工程结构设计提供参考。该超高层建筑的 ABAQUS 有限元模型如图 2 所示, 梁柱和钢筋分别采用实体 C3D8R 单元和桁架 T3D2R 单元进行了分离式建模, 并用 EMBED 技术进行自由度耦合; 剪力墙采用壳单元模拟, 采用 REBAR 技术进行剪力墙双向配筋。按照工程场地条件以及相关规范规定, 对结构输入 El-Centro (NS) 的加速度记录, 峰值加速度调整为 620gal 不予调频, 地震波持续时间 10s, 如图 3 所示。对于混凝土损伤塑性模型, 弹性阶段通过定义混凝土的弹性模量和极限弹性拉、压应力来实现, 弹塑性阶段采用《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002) 附录 C 确定。混凝土拉伸损伤变量与压缩损伤变量采用张劲 (2006) 的建议值。

对结构进行动力分析得到结构前三阶振动周期依次为: 1.14s (纵向振动)、1.12s (横向振动) 和 0.98s (扭转)。在 9 度抗震设防烈度的多遇地震作用下, 由于结构从首层到 4 层主体结构外围的裙房作用, 使结构弹塑性层间位移角 (图 4) 很小, 而第 5 层开始没有裙房结构刚度较第 4 层减小, 因此弹塑性层间位移角在第 5 层突然增大, 且结构从 6 层以上其值变化, 最大层间位移角在 15 层为 1/862; 在 9 度抗震设防罕遇地震作用下, 结构弹塑性层间位移角 (图 5) 在各楼层分布很不均匀, 总体趋势是下部楼层小、上部楼层大, 顶层层间弹塑性位移角最大为 1/124, “大震” 下的层间位移角都没有超过《建筑抗震设计规范》

(GB50011-2001) 规定的限值 1/100, 按规范要求该超高层结构满足“大震不倒”的要求。

在罕遇地震下, 将假定结构弹性变形和结构弹塑性变形的顶点位移时程(图 6)和结构基底剪力时程(图 7)两者经过比较可以发现, 结构从地震波输入的第 1.2s 开始进入弹塑性变形。根据弹塑性时程分析的结果, 可知塑性铰首先出现在纵向(环向)抗震墙的连梁端部第 3 层 L8-3 连梁端部(图 8), 而图 9 所示的结构等效塑性应变能较清楚的显示出该塑性铰分布, 且从图 9 中还可以发现: 结构从第 11 层以上大多连梁塑性应变为零, 仅有个别连梁进入塑性状态, 剪力墙部分基本保持弹性。随后, L8-3 位置上层和下层连梁依次出现塑性区域, 与抗震墙相连的框架梁端部、部分框架梁也先后出现塑性铰。最终, 伴随着连梁两端出现很大的塑性应变后(L8-3 连梁等效塑性应变达到最大值 0.03796), 底部楼层(3 至 5 层)连梁两端区域的剪力墙也出现较大塑性变形。在罕遇地震作用下, 大多数楼层的 L8 和 L11 连梁塑性开展充分, 塑性应变也最大, 而且率先进入屈服, 延缓两侧联肢墙的塑性开展, 是结构的薄弱部位或者构件。从整体上来看, 剪力墙内侧部分塑性应变开展较外围部分严重, 纵向墙体和连梁塑性开展较横向墙体和连梁严重。带有剪力墙的结构在弹塑性变形下的层间位移角满足规范的限值时, 底部墙体(3 至 5 层)被压屈服, 且屈服区域贯穿整个墙体将失去承载能力, 具有造成倒塌的可能性, 这又与前面的“大震不倒”结论相矛盾, 因此, 对于超高层的框架-剪力墙结构仅仅依靠弹塑性层间位移角来判断超高层的抗倒塌能力是否十分可靠, 还有待研究。

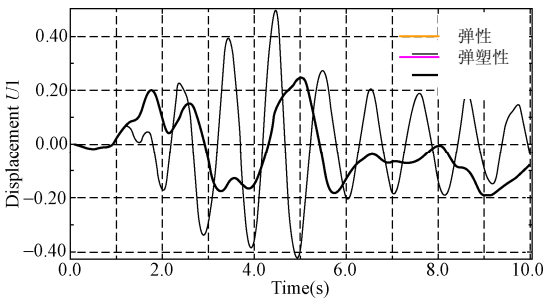


图 6 罕遇地震下顶层弹性和弹塑性位移曲线
Fig.6 Displacement history curve of elastic and elasto-plastic top under rare earthquakes

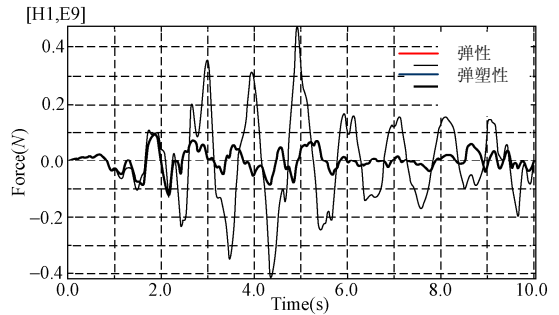


图 7 罕遇地震下弹性和弹塑性基底剪力曲线
Fig.7 Shear force history curve of elastic and elasto-plastic base under rare earthquakes

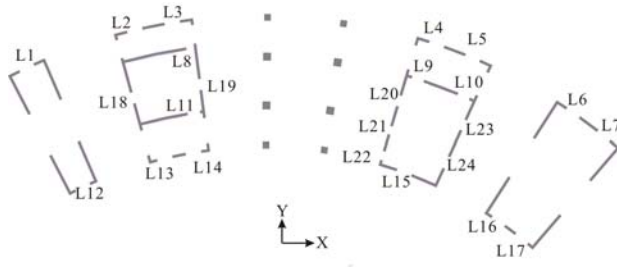


图 8 连梁编号示意
Fig.8 Numbering of coupling beam

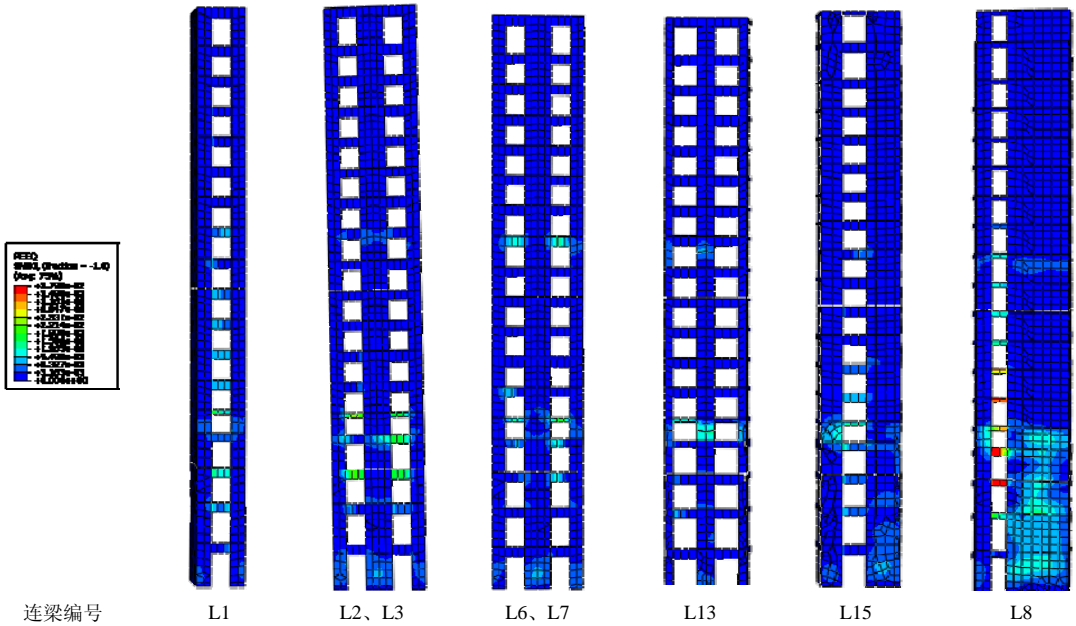
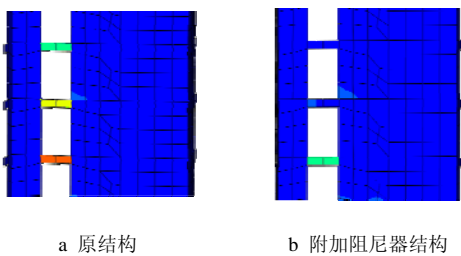


图 9 罕遇地震下塑性变形分布

Fig.9 Plastic deformation distribution under rare earthquakes

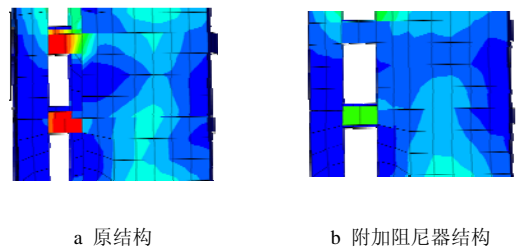
结构在“大震”作用下，同时在考虑重力二阶效应和大变形的情况下，经动力弹塑性分析后通过结构的塑性变形（图 9）可知，结构除了少部分承重墙肢外，未出现大面积塑性损伤，但是些连梁塑性变形偏大，如第 3 层连梁 L8-3 的最大等效塑性应变竟达 0.038。鉴于此，宜在塑性变形大的连梁上附加阻尼器以减轻连梁在大震作用下的损伤破坏，减少承重墙的塑性损伤面积。为此，对结构连梁添加阻尼器，并对此有限元模型再进行动力弹塑性时程分析，其结果表明：连梁的塑性变形明显变小(图 10)，其中连梁 L8-3 最大等效塑性应变由 0.038 降到 0.019（图 11）；承重墙的塑性损伤面积也有效地变小（图 11）。因此，附加连梁上的阻尼器能够有效减轻连梁在罕遇地震作用下的损伤破坏程度，并有效地保证了承重墙不会出现大面积的塑性变形。



a 原结构 b 附加阻尼器结构

图 10 连梁 L8-8~10 塑性应变对比

Fig.10 Plastic strain comparison of coupling beam L8-8~10



a 原结构 b 附加阻尼器结构

图 11 连梁 L8-3~4 塑性应变对比

Fig.11 Plastic strain comparison of coupling beam L8-3~4

3 结语

(1) 比较了静力弹塑性和动力弹塑性的优缺点, 指出对于超高层结构应进行动力弹塑性时程分析。

(2) 简要介绍了目前可用于分析罕遇地震下结构性能的程序和软件, 指出大型有限元软件 ABAQUS 是适用于对复杂结构进行动力弹塑性分析的。

(3) 在罕遇地震作用下, 超高层结构要达到不倒塌的设防目标, 弹塑性动力时程分析是一个比较有效而可靠的方法。ABAQUS 数值分析除了能够提供地震荷载作用下的常规结构反应外, 还可以实时地提供结构损伤分布及其演化信息, 即能够较为准确地判断高层结构在大震作用下的屈服顺序及薄弱部位, 为优化结构提供了信息, 这对于了解结构在地震作用下破坏机理意义重大, 也为将来指导抗震设计、规范方法实施提供了条件。

(4) 然而, 结构破坏评估还存在许多未解决的问题, 如材料损伤的定义、构件损伤中位移与累积耗能的组合形式、地震波的输入等, 都是目前具有争议的问题。

参考文献

- 缪志伟, 马千里, 叶列平, 陆新征, 2008. Pushover 方法的准确性和适用性研究. 工程抗震与加固改造, **30** (1): 55—59.
- 王涛, 2006. 钢筋混凝土框架-剪力墙结构弹塑性地震反应分析. 中国地震局工程力学研究所.
- 王传甲, 陈志强, 王庆扬, 张劲, 阎晓铭, 彪仿俊, 2006. 通用有限元软件 ABAQUS 在动力弹塑性时程分析中的应用. 建筑结构, **36** (增刊): 61—64.
- 尹华伟, 汪梦甫, 周锡元, 2003. 结构静力弹塑性分析方法的研究和改进. 工程力学, **20** (4): 45—49.
- 张劲, 王庆扬, 胡守营, 王传甲, 2008. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证. 建筑结构, **38** (3): 127—130.
- Lee J., Fenves G.L., 1998. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. ASCE Journal of Engineering Mechanics, **124** (3): 892—900.
- Yan H.X., Yang Q. S., 2009. Application of damaged plasticity model in elastic-plastic time-history analysis of RC structures. 4th International Symposium on Environmental Vibration: 1433—1439.

Application of ABAQUS in Dynamic Elasto-Plastic Analysis of Super High-Rise Building

Yan Hongxia^{1,2)}, Yang Qingshan²⁾ and Zhang Liying³⁾

1) Hebei University, Baoding 071002, China

2) Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

3) China Communications Construction Company Ltd. First Highway Consultants
Co. Ltd., Xi'an 710068, China

Abstract This paper summarizes both advantages and disadvantages static and dynamic elasto-plastic analysis methods. Then, the finite software ABAQUS is applied for the 3D elastic-plastic history dynamic numerical simulation of a super high-rise building in Xichang City, Sichuan Province. Our work in this paper provides helpful references and advices for the application of dynamic elasto-plastic analysis in super high-rise buildings in future.

Key words: Static elasto-plastic analysis; Dynamic elasto-plastic analysis; ABAQUS; Super high-rise building