

钢框架核心筒结构弹塑性时程计算模型

缪志伟¹ 陆新征¹ 王载² 黄盛楠¹ 叶列平¹

(¹清华大学土木工程系, 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京, 100084

²中国建筑设计研究院结构院, 第七设计工作室, 北京, 100044)

摘要: 在大震作用下, 结构进入弹塑性阶段, 表现出非线性受力特性。准确预测地震作用下结构的非线性行为, 对评估结构的抗震安全性具有重要意义。本文总结了现有的一些结构弹塑性分析模型, 并着重介绍了清华大学土木工程系近年来以通用有限元程序 MSC.Marc 为平台所开发的一些新的结构弹塑性分析模型——杆系纤维模型和分层壳剪力墙元模型。这些模型可以直接将构件的非线性节点力(轴力、剪力和弯矩)、节点变形(平动和转动)和材料的非线性应力-应变行为联系起来, 可以模拟各种复杂受力构件的滞回行为和轴力-双向弯曲-剪切耦合行为。同时, 借助通用有限元程序方便的前后处理功能和非线性计算功能, 这些模型可以准确模拟地震作用下结构的三维非线性地震响应。利用这些工具, 本文对一个实际钢框架核心筒结构进行了动力弹塑性时程分析, 结果表明这些分析模型可以较好的模拟实际工程结构中的各种弹塑性行为, 供科研和工程人员参考。

关键词: 弹塑性分析, 结构非线性, 地震, 纤维模型, 剪力墙, 分层壳单元

Elasto-plastic time-history computational model for steel frame-core wall structures

Miao Zhiwei¹, Lu Xinzheng¹, Wang Zai², Huang Shengnan¹, Ye Lieping¹

(¹Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing, 100084, ²China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044)

1. 引言

在大震作用下, 结构构件会出现屈服, 破坏, 结构整体进入弹塑性阶段, 表现出非线性受力特性。但是目前常用的结构分析计算多为线弹性分析方法, 故必须通过弹塑性时程计算来研究结构在大震下的抗震性能。

对于框架结构, 弹塑性计算模型主要有层模型和杆系模型两大类。层模型把整个结构等效为一根悬臂杆件, 每个楼层等效成一个集中质点, 楼层刚度则集中反映于质点之间的杆中, 根据不同的结构变形特点和简化假定, 又可细分成剪切型、弯曲线型、弯剪型和等效剪切型等。层模型自由度少, 计算量较小, 可以方便快捷地得到层剪力、位移等, 但层模型各层单元刚度和弹塑性滞回模型来自于本层所有杆件的组合, 过于简化, 分析只能获得结构整体地震响应结果, 无法简单得到结构各杆件的内力和变形, 计算结果比较粗糙。而杆模型则以杆件为基本计算单元, 结构计算模型相对层模型更加明确且易于确定, 除了能够确定杆件和楼层的位移, 杆件的内力和变形随时间变化的全过程都可以计算得到, 相对于层模型而言, 杆系模型的优势十分明显^[1], 但目前应用杆系模型进行结构弹塑性分析仍存在两个主要问题。

一方面, 在杆件刚度的计算上, 大多数采用集中塑性铰模型, 即假定构件的塑性变形都集中在两端塑性铰区, 而中间段构件保持弹性。对于构件受力时反弯点在中间, 塑性铰在两端的情况下这种假定比较合适, 但是当构件受力比较复杂, 不容易估计其反弯点及塑性铰的分布时, 这种假定则会造成分析结果的很大误差。更为精确的刚度计算方法是采用分布刚度模拟计算, 根据一定数量的计算截面的刚度结果拟合刚度分布曲线, 然后积分求解整个杆件的刚度矩阵。

另一方面, 在确定恢复力模型时, 目前运用较多的是基于截面层次的恢复力模型, 即直接根据试验的

* 基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(No. 2006BAK01A02-09)和清华大学基础研究基金(No. JC2007003)

弯矩曲率关系加以简化得到模型截面弯矩曲率关系。虽然这种方法比较简单实用,但是它只适用于弯曲破坏为主,轴力变化不大或者轴力影响可以预测的情况。当轴力变化较大,需要考虑杆件所受轴力与弯矩耦合相关关系时则遇到了很大困难。因此近年来基于材料层次本构关系的杆系纤维模型日益受到密切关注,它可模拟空间杆系结构的复杂受力行为,为结构非线性分析提供了有力工具。

剪力墙是高层结构中的重要抗侧力构件,目前已有的剪力墙分析模型主要分为宏观模型和微观模型两类。宏观模型主要有,等效柱模型、桁架模型、三竖杆单元模型、多竖杆单元模型、二维墙板单元模型、空间薄壁杆件模型以及三维壳元模型等,这些模型的力学概念都比较简单,但往往过于简化,且对试验结果经验拟合依赖较大,有些模型无法考虑轴力、墙面内和墙面外的耦合力学行为,在三维结构非线性分析时可能会有较大误差;微观模型则根据混凝土和钢筋的材料本构关系,对墙体直接建立有限元模型进行分析,主要有平面应力膜单元模型和板壳单元模型等。微观模型虽然求解精度较高,但计算量较大,不过随着计算机能力的迅速提高,此类方法也日益受到重视。吕西林等基于框架杆系纤维模型提出了纤维墙元模型对剪力墙进行非线性分析,但在模拟剪力墙的受剪行为时仍不够成熟^[8]。因此仍然需要发展新的能对剪力墙的剪切破坏行为、轴力和墙面内外耦合力学行为进行较为准确的模拟的有限元分析模型。

下面本文将着重介绍适用于框架结构的杆系纤维模型以及清华大学土木工程系开发的适用于剪力墙结构的分层壳墙元模型程序,并应用这些新的弹塑性分析工具对某实际钢框架核心筒结构进行了动力弹塑性时程分析。

2. 杆系纤维模型

2.1 模型简介

基于杆系结构力学和一维材料本构的纤维模型,是分析框架结构非线性行为较好的数值模拟方法。所谓纤维模型,就是将杆件截面划分成若干纤维,每个纤维均为单轴受力,并用材料单轴应力应变关系来描述该纤维材料的受力特性,纤维间的变形协调则采用平截面假定。对于长细比较大的杆系结构,纤维模型具有以下优点:①纤维模型将构件截面划分为若干纤维,通过用户自定义每根纤维的截面位置、面积和材料的单轴本构关系,可适用于各种截面形状;②纤维模型可以准确考虑轴力和(单向和双向)弯矩的相互关系;③由于纤维模型将截面分割,因而同一截面的不同纤维可以有不同的单轴本构关系,这样就可以采用更加符合构件受力状态的单轴本构关系,如钢筋混凝土构件中,可模拟混凝土构件截面不同部分受到侧向约束作用(如箍筋、钢管或外包碳纤维布)时的受力性能。

基于纤维模型的结构非线性分析方法在国外已有很多应用^{[2][3]},但国内对该方法的研究还不多^{[4][5][5]}。本文的结构弹塑性分析以通用商用程序 MSC.MARC 结构分析软件为平台,采用其中的不考虑截面翘曲的 14 号梁单元来模拟实际结构中的框架梁,柱构件(图 1)。该单元在计算过程中采用了以上的纤维模型原理,并且在杆件刚度的计算上,采用分布刚度计算,同时通过更为精细的单元划分,可以较为准确的模拟框架梁,柱构件的实际刚度分布。

2.2 算例

图 2 和图 3 给出了采用 14 号梁单元模拟一个受压弯作用的工字形截面钢柱分别在水平单向和往复加载作用下的计算结果,可见,由于采用了纤维模型计算原理,该梁单元可以准确考虑轴力和弯矩的相互耦合作用,因此采用该单元模拟实际结构中的框架梁,柱构件是合适的。

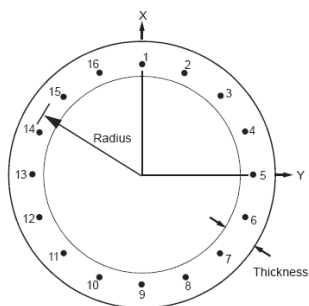


图 1 MARC 的 14 号梁单元示意图

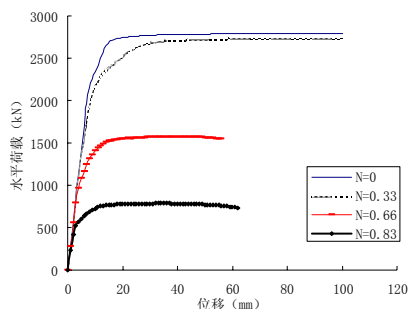


图 1 14 号梁单元单向水平加载结果

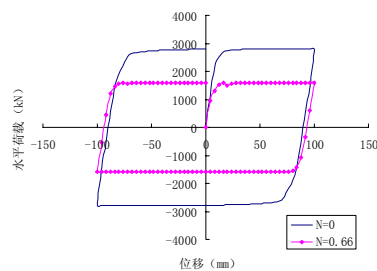


图 2 14 号梁单元往复水平加载结果

3. 分层壳剪力墙模型

3.1 概述

为了较好的解决结构弹塑性分析计算中关于剪力墙的模拟问题，清华大学土木工程系以通用有限元程序 MSC.Marc 为平台，提出了适用于剪力墙结构非线性分析的分层壳墙单元模型^[9]。

分层壳剪力墙单元是将一个壳单元划分成很多层（图4），各层可以根据需要设置不同的厚度和材料性质（混凝土、钢筋）。在有限元计算时，首先得到壳单元中心层的应变和曲率，然后根据各层材料之间满足平截面假定，就可以由中心层应变和曲率得到各钢筋和混凝土层的应变，进而由各层材料本构方程可以得到各层相应的应力，并积分得到整个壳单元的内力。与已有的剪力墙计算模型^[7]相比，分层壳剪力墙单元可以直接将混凝土和钢筋的本构行为与剪力墙的非线性行为联系起来，可以考虑面内弯曲一面内剪切一面外弯曲之间的耦合，因而在描述实际剪力墙复杂非线性行为方面有着明显的优势。

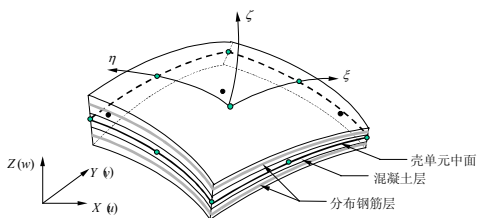


图 4 分层壳单元

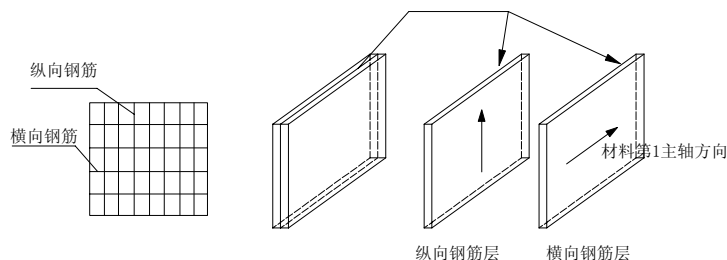


图 5 分层壳模型中钢筋层设置示意图

3.2 钢筋层本构模型

在分层壳单元中，钢筋材料被弥散到某一层或某几层中(图 5)。各种钢材本构模型均可在分层壳模型中使用，一般常用的有理想弹塑性本构模型。对于纵横配筋率相同的墙体，可设为各向同性钢筋层；对于纵横配筋率不同的墙体，可分别设置不同材料主轴方向的正交各向异性的钢筋层来模拟^[9]。

3.3 混凝土层本构模型

剪力墙中的混凝土层一般处于二维，边缘约束构件甚至为三维受力状态，其本构模型相对纤维模型而言要复杂很多。对于一般工程应用而言，经典的混凝土弹塑性+断裂本构模型计算量较小且精度也可满足工程需要。如果需要更精确的考虑复杂往复应力下混凝土的损伤累计、刚度退化等行为，还可以选用更为精确的混凝土本构模型，如清华大学土木系基于 Bazant 等人的研究^[10]所开发的基于 microplane 模型的混凝土本构模型，从而能够更好考虑复杂应力历史的影响。另外，在分层壳剪力墙模型中，边缘约束构件和中间墙体的混凝土可以分别采用不同的本构模型，以考虑边缘约束构件受到的约束作用。除钢筋混凝土剪力墙，模型也可以模拟钢骨（管）混凝土剪力墙。

在文献[9, 11, 12]中, 对该分层壳剪力墙模型进行了大量的讨论和验证, 结果表明该分析模型不仅对模拟剪力墙的面内弯曲和面内剪切行为具有较高的精度, 而且可以模拟剪力墙面内受力和面外弯曲的耦合行为, 从而解决了高层建筑中应用十分广泛的筒体结构中剪力墙在纵横两个方向上建模分析的难点问题。因此, 分层壳剪力墙模型可以用于复杂受力剪力墙结构的非线性模拟。

4. 结构分析

利用上述结构弹塑性分析工具, 本文针对一个已设计完成的实际工程结构进行了三维空间有限元建模及分析计算。该工程为外钢框架偏心核心筒结构, 共14层, 总高度54.6米。

如图 6 所示, 在所建立的结构有限元模型中, 外钢框架构件采用其中的不考虑截面翘曲的 14 号梁单元来模拟, 核心筒剪力墙采用分层壳单元模拟, 各层楼板采用弹性壳单元模拟, 为了便于观察整个结构形式, 在图 6 中不显示楼板构件。

对上述结构沿短跨方向施加 EL-Centro EW 地震动加速度时程作用, 并将其峰值加速度设置为 400gal (对应于抗震设计规范的 8 度大震)。计算得到结果如下图 6~9 所示。

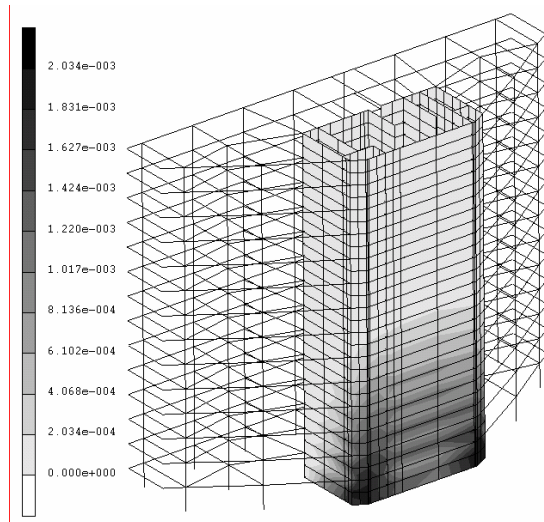


图6 顶层位移最大时刻剪力墙裂缝分布

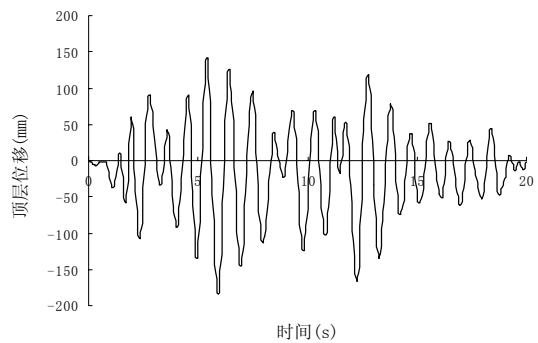


图7 结构顶层位移时程曲线

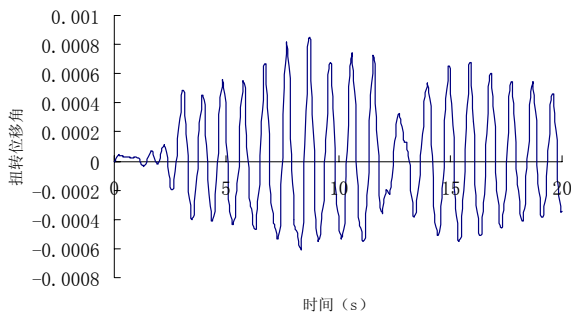


图8 结构扭转位移角时程曲线

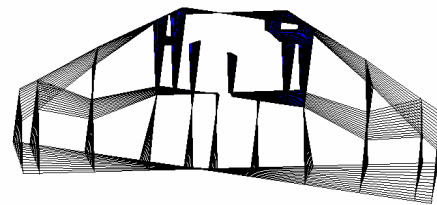


图9 扭转变形最大时刻结构示意图

图7为结构顶层位移时程结果, 由于本结构在地震作用下产生一定的扭转效应, 因此图中的结构顶层位移取的是楼层中间位置的侧移。由图7可见, 本结构在对应于抗震规范大震的地震作用下, 顶层最大位

移约为180mm, 顶点位移约1/300。此时结构已经进入弹塑性, 但是进入弹塑性的程度不大, 顶点位移和层间位移都可以满足大震下的抗震性能要求。由图5可见, 在结构顶层位移到达极限状态时, 由于剪力墙开裂、以及局部钢筋屈服引起刚度退化, 结构的变形模式为弯曲转动, 变形集中在底层, 上部结构基本上是以底部为中心的刚体转动变形。此外, 图8、9给出了定量描述结构扭转效应的计算结果, 这里的扭转位移角定义为楼层两端水平位移差与结构长度之比。由图8和图9可见, 由于该结构的抗侧力结构平面布置不对称, 造成在水平地震作用下结构受扭, 其最大扭转角为0.0009rad。

5. 结论

本文总结了现有结构弹塑性分析的一些分析模型, 并以通用有限元分析软件 MSC.Marc 为平台, 开发了具有较好通用性的框架结构和剪力墙结构弹塑性分析模型。利用这些新的分析工具, 本文对一个实际钢框架核心筒结构进行了动力弹塑性时程分析, 结果表明这些分析模型结合通用有限元程序强大的前后处理功能和非线性计算功能, 可以较好的模拟实际工程结构中的各种弹塑性行为, 供科研和工程人员参考。

参考文献:

- [1] 方鄂华, 高层建筑钢筋混凝土结构概念设计[M], 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] Spacone E, Filippou F, Taucer F, Fiber beam-column modeling for non-linear analysis of R/C frames [J] Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(7): 711~725.
- [3] D'Ambrisi A, Filippou F, Modeling of cyclic shear behavior in RC members [J] Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(10): 1143~1149.
- [4] 秦从律, 张爱晖, 基于截面纤维模型的弹塑性时程分析方法 [J], 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(7): 1003~1008.
- [5] 伍永飞, 周德源, 纤维模型在平面框架非线性静力分析中的应用 [J], 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(sup.I): 129~132.
- [6] 陆新征, 缪志伟, 江见鲸, 叶列平, 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟[J], 山西地震, 2006. 126(2): 7~11.
- [7] 江见鲸, 陆新征, 叶列平, 混凝土结构有限元分析[M], 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [8] 吕西林, 卢文生, 纤维墙元模型在剪力墙结构非线性分析中的应用 [J], 力学季刊, 2005, 26(1), 72~80.
- [9] 门俊, 陆新征, 宋二祥. 分层壳模型在剪力墙结构计算中的应用 [J]. 防护工程(已录用), 2006
- [10] Bazant ZP, Caner FC, Carol I, Adley MD, Akers SA. Microplane model M4 for concrete. I: formulation with work-conjugate deviatoric stress[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2000, 126(9): 944~953.
- [11] 魏勇. 外钢框架—混凝土核心筒抗震性能及设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [12] 方鄂华, 钱稼茹, 叶列平. 高层建筑结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.