

# 某钢框架偏心核心筒弹塑性分析

缪志伟<sup>1</sup>, 陆新征<sup>1</sup>, 王 载<sup>2</sup>, 黄盛楠<sup>1</sup>, 叶列平<sup>1</sup>

(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. 中国建筑研究院结构院第七设计工作室, 北京 100044)

**摘 要:** 结构在大震作用下会进入弹塑性并产生损伤, 准确预测地震荷载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。总结了现有的一些结构弹塑性分析模型, 并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。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, 对一个实际工程结构进行了静力弹塑性分析和动力弹塑性时程分析, 表明这些分析模型可以较好地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

**中图分类号:** TU313.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-1933(2008)03-005-06

## Elasto-plastic analysis for a steel frame-core wall structure with an eccentric tube

MIAO Zhiwei<sup>1</sup>, LU Xinzheng<sup>1</sup>, WANG Zai<sup>2</sup>, HUANG Shengnan<sup>1</sup>, YE Lieping<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Structures will enter nonlinear stage during strong earthquakes. Hence accurate prediction for the structural nonlinear behaviors is important to the safety and loss assessment during earthquakes. This paper reviews the existed nonlinear analytic models for structures and presents some novel models for structural nonlinear analysis that recently developed by the Tsinghua university. With these models, the material stress-strain relationship can be connected directly with the force-displacement behavior of the structural elements. So that the complicated coupled axial force-bending moment-shear force behaviors can be properly simulated, as well as the corresponding cycle behaviors. With the secondary development user subroutines, convenient pre and post process functions and extinct nonlinear capacity of general purpose FE software of MSC MARC, the spatial seismic responds of structures can be precisely simulated. A steel frame-core wall structure with an eccentric tube is analyzed with static pushover and dynamic time-history analysis to demonstrate the applications of the new models.

**Key words:** nonlinear analysis; structure; seismic; fiber model; shear wall; multi-layer shell

## 0 引 言

我国目前的结构抗震设计采用三水准设防目标、二阶段设计方法。在大震作用下, 结构构件会出现屈服、破坏, 结构进入弹塑性阶段。但是, 目前常用的结构分析计算多为线弹性分析方法, 对日益大

型化、复杂化的结构早已显得力不从心, 因而, 弹塑性分析方法得以迅速发展并发挥出巨大作用, 尤其是大震作用下的结构弹塑性分析, 对于准确预测地震荷载下结构的非线性行为, 把握结构在大震作用下的性能、状态, 评估结构的抗震安全性具有重要意义。

对于框架结构, 传统的结构抗震弹塑性分析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

收稿日期: 2007-07-24

作者简介: 缪志伟 (1981-), 男, 江苏如东人, 博士研究生, 研究方向: 结构抗震。

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划 (2006BAK01A02-09); 清华大学基础研究基金 (JC2007003)

E-mail: miaozhiwei00@mails.tsinghua.edu.cn

假定,又可细分成剪切型、弯曲型、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,经过很大的简化处理,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。

杆模型则以杆件为基本计算单元,主要针对框架结构或以框架为主的结构。杆模型一般假定楼板平面内无限刚性,楼层质量集中于楼板位置,结构刚度矩阵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,结果相对精确,相对于层模型而言,杆系模型的优势十分明显<sup>[1]</sup>,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(图 1),即假定构件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分布时,这种假定则会造成分析结果的很大误差。为解决该问题,可采用更为精确的分布刚度模拟计算,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,这样,就可以适用于任意内力分布杆件的弹塑性分析。

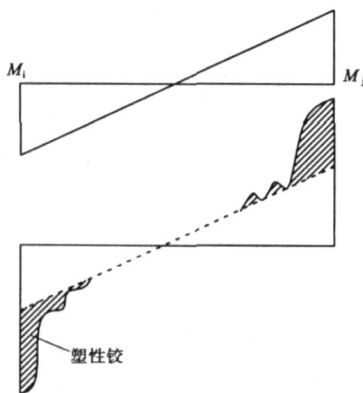


图 1 经典的集中塑性铰杆模型

Fig 1 Typical concentrated plastic hinge model

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,即直接根据试验的弯矩曲率关系加以简化得到数值模型的截面弯矩曲率关系。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武器。

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<sup>[2]</sup>。因此,新的剪力墙有限元模型——基于分层壳模型的剪力墙有限元模型应运而生,它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和预测。

本文介绍了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,并应用这些工具对某实际工程结构进行了弹塑性分析。

## 1 杆系纤维模型

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(图 2)。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(单向和双向)和弯矩的相互关系;

(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

以采用更加符合材料受力状态的单轴本构关系。如钢筋混凝土构件中,可以对保护层混凝土和核心约束区混凝土分别给予不同的单轴本构关系。

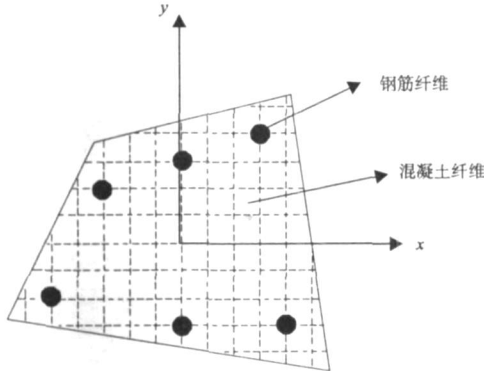


图 2 纤维模型的截面划分 (钢筋混凝土构件)  
Fig 2 Section division in fiber model (reinforced concrete element)

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<sup>[3-4]</sup>,但国内对该方法的研究还不多<sup>[5-7]</sup>。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。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,可以较为准确地模拟框架梁、柱构件的实际刚度分布。

## 2 分层壳剪力墙模型

### 2.1 概述

为了较好地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。

分层壳剪力墙单元是将一个壳单元划分成很多层(图 3),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,进而由各层的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<sup>[8]</sup>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—面内剪切—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。

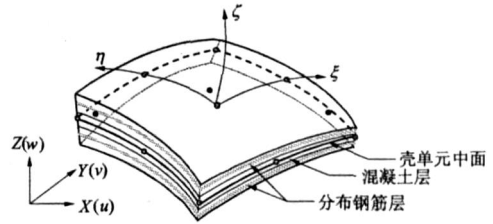


图 3 分层壳单元  
Fig 3 Multi-layer shell element

### 2.2 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 4)。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。

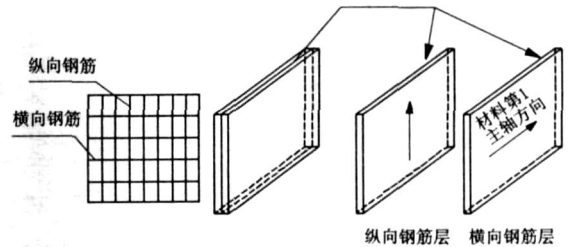


图 4 分层壳模型中钢筋层设置示意  
Fig 4 Rebar layers in multi-layer shell element

### 2.3 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。如果需要更精确地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<sup>[10]</sup>所开发的基于 microp lant 模型的混凝土本构模型,从而能够更好地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外,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,证明其可以用于复杂受力剪力墙结构的破坏模拟。

## 3 结构分析

### 3.1 结构建模

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弹塑性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 m。

如图 5 所示,在所建立的结构有限元模型中,外钢框架构件采用前述基于纤维模型的 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 5 中没有显示楼板单元。首先,通过模态分析得到了结构的第一振型对应的自振周期为:  $T_1 = 1/f_1 = 0.81 \text{ s}$ 。这是由于该结构为偏心结构,剪力墙布置不对称,因此结构的一阶振型以扭转为主,抗震很不利,故进行弹塑性时程分析以检验其抗震性能很有必要。第二振型为沿短跨方向的平动振型,对应的自振周期为:  $T_2 = 1/f_2 = 0.67 \text{ s}$ 。

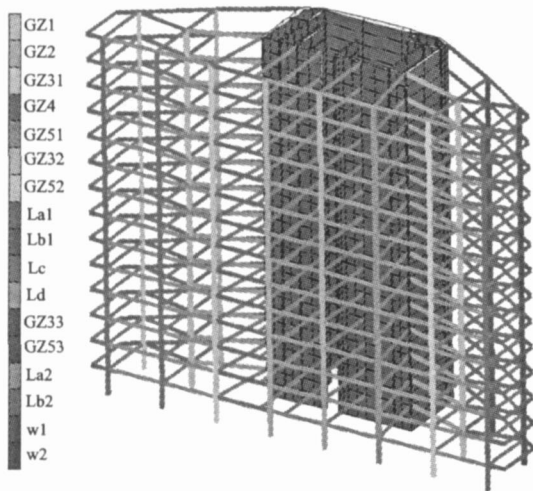


图 5 结构三维有限元模型示意

Fig 5 Three dimensional FE model of the structure

### 3.2 静力弹塑性分析

为了把握结构的抗震整体性能,对该结构进行了静力弹塑性分析 (Pushover)。由于该结构很不规则,刚度偏心较大,用 Pushover 来定量评价其抗震性能不是很适合,但是 Pushover 流程简单,有助于了解结构是否存在薄弱部位,并检验有限元建模的正确性。

首先对结构施加自重荷载,而后对结构沿短跨方向作用倒三角分布的侧向荷载。本次 Pushover 分析以最终剪力墙受压侧混凝土达到压碎应变作为分析结束点,主要结果如图 6~10 所示。

由图 7,8 可见,到达极限状态时,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。这是由于本结构中,筒体剪力墙是结构抗侧的主要构件,在底部,剪力墙承受绝大部分剪力,结构侧向变形为弯曲型,剪

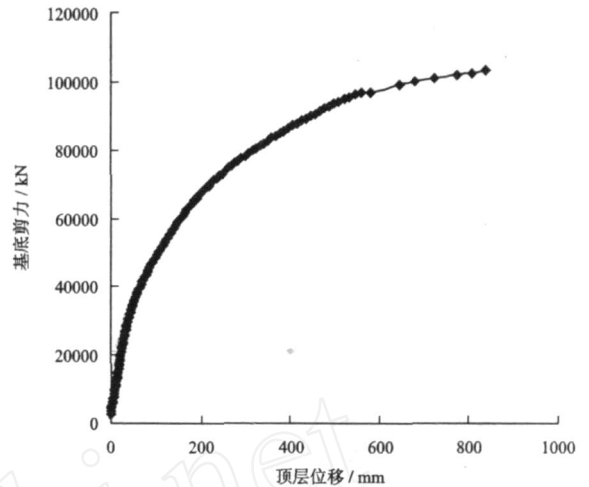


图 6 基底剪力—顶层位移关系 (Pushover)

Fig 6 Relationship between bottom shear force and top displacement (Pushover)

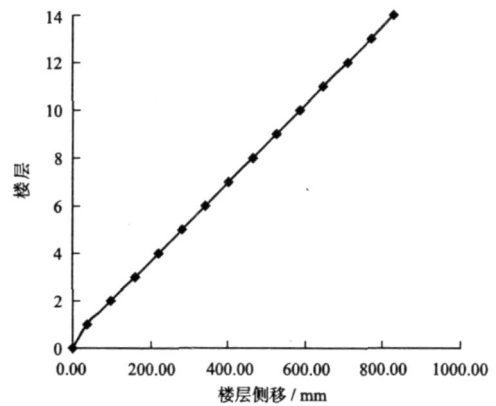


图 7 极限状态楼层侧移分布 (Pushover)

Fig 7 Story displacements at ultimate state (Pushover)

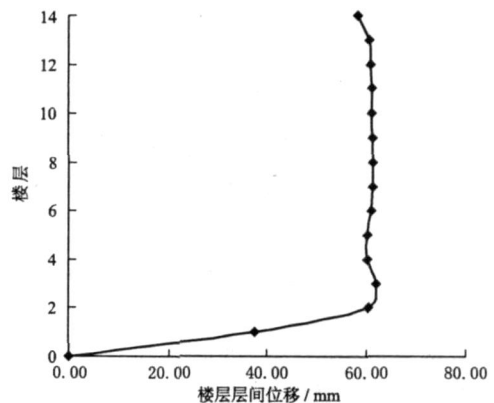


图 8 极限状态楼层层间位移分布 (Pushover)

Fig 8 Story drifts at ultimate state (Pushover)

力墙开裂之后,裂缝不断扩大,受压侧残余混凝土越来越少(图 9, 10),最终达到压碎应变,结构损伤集中在底层剪力墙,因而形成上部结构以底部为中心的刚体转动变形。

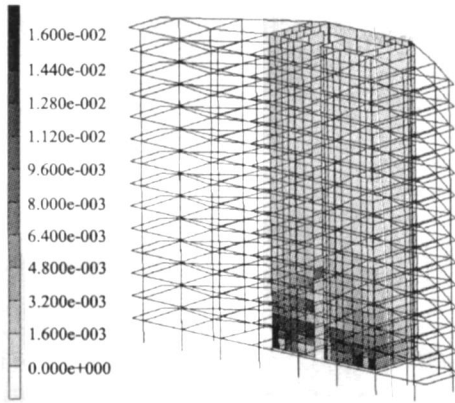


图 9 极限状态剪力墙裂缝分布 (Pushover)

Fig 9 Cracks in shear wall at ultimate state (Pushover)

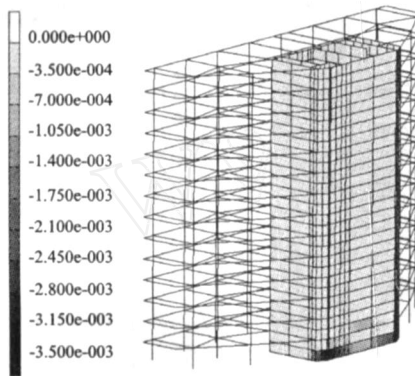


图 10 极限状态剪力墙受压应变分布 (Pushover)

Fig 10 Compressive strain in shear wall at ultimate state (Pushover)

### 3.3 弹塑性动力时程分析

弹塑性动力时程分析是最能真实反映结构物抗震性能的计算方法。相关规范对时程分析的流程、地震波的选择、输入方向等都做了明确规定。本文由于篇幅限制,仅介绍沿短跨方向施加 EL-Centro EW 地震动加速度时程作用时的计算结果。地震峰值加速度设置为 400 gal(对应于抗震设计规范的 8 度大震)。计算得到结果如图 11~16 所示。

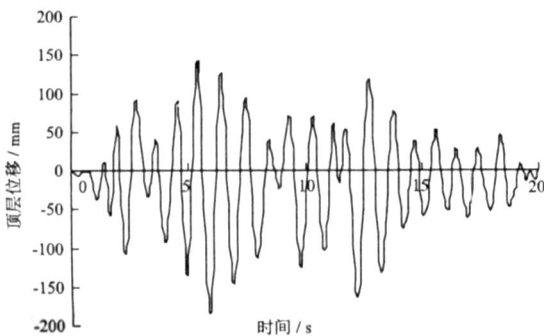


图 11 结构顶层位移时程曲线

Fig 11 Time history curve of top displacement

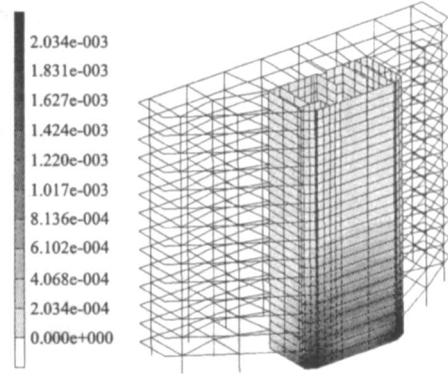


图 12 顶层位移最大时刻剪力墙裂缝分布

Fig 12 Cracks in shear wall at maximal top displacement

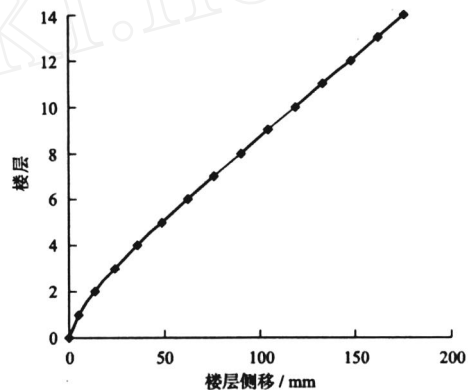


图 13 顶层位移最大时刻楼层侧移分布

Fig 13 Story displacements at maximal top displacement

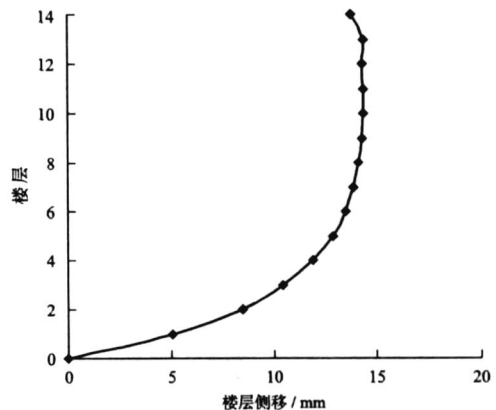


图 14 顶层位移最大时刻楼层层间位移分布

Fig 14 Story drifts at maximal top displacement

图 11 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,图中的结构顶层平动位移取的是楼层中间位置的侧移。由图 11 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 180 mm,顶点位移约 1/300。联系图 6 的静力弹塑性分析结果可知,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

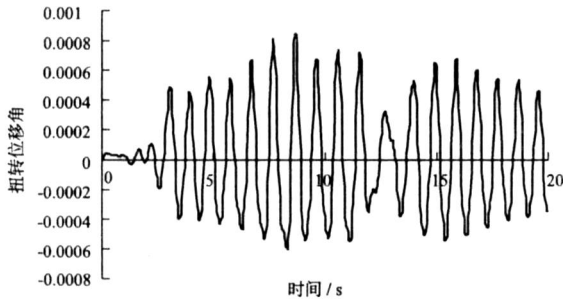


图 15 结构扭转位移角时程曲线

Fig 15 Time history curve of structural torsion angle



图 16 扭转变形最大时刻结构示意

Fig 16 Structure at maximal torsion deformation

移和层间位移都可以满足大震下的抗震性能要求。由图 12~14 可见,在结构顶层位移到达极限状态时,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。这仍然是由于前面所分析的本结构在地震作用下结构损伤集中在底层剪力墙的缘故。此外,图 15 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 15,16 可见,由于该结构的抗侧力结构平面布置不对称,虽然地震波为单向输入,但是还是造成在水平地震作用下结构受扭,其最大扭转角为 0.0009 rad。

为了把握结构经历大震后的动力特性,评估结构的损伤程度,本文对结构达到最大顶层位移后的状态再次进行了模态分析。结果表明,此状态下结构第一振型仍然是以扭转为主,但对应的自振周期增大为 1.07 s,第二振型仍然为沿短跨方向的平动振型,但周期增大为 0.98 s。这说明结构经历了大震作用后,进入了非线性阶段,产生了一定的内部损伤,使得整体刚度降低,从而自振周期相对于弹性状态下的结构自振周期要偏大。

最后需要补充说明的是,以上对本结构的模态分析和动力弹塑性时程分析结果均显示在地震作用下结构扭转效应比较明显,不满足抗震规范的相关要求。因此,在本工程最终方案中除了进行详细的地震弹塑性计算外,还对原结构设计进行了调

整,通过设置悬挑板等方式来减小刚度偏心,减少扭转作用以满足抗震规范的相关要求。

## 4 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计算分析模型。利用这些新的分析工具,本文对一个实际工程结构进行了静力弹塑性分析和动力弹塑性时程分析,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,可以较好地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。

**致谢:**感谢国家“十一五”科技支撑计划(2006BAK01A02-09)和清华大学基础研究基金(JC2007003)对本项目的支持。

## 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] 吕西林, 卢文生. 纤维单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.
- [3] Spaone 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.
- [4] D'Ambrisi A, Filippou F. Modeling of cyclic shear behavior in RC members [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(10): 1143-1149.
- [5] 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.
- [6] 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. D): 129-132.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 缪志伟, 陆新征, 叶列平. 分层壳单元在剪力墙结构有限元计算中的应用 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27(Sup. 2): 932-935.
- [10] Bazant Z P, Caner F C, Carol I, Adley M D, Akers S A. 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] 叶列平, 陆新征, 马千里, 汪训流, 缪志伟. 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例 [J]. 工程力学, 2006, 23(Sup.): 173-183.