

文章编号: 1000-4750(2006)Sup.II-0131-10

混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例

*叶列平, 陆新征, 马千里, 汪训流, 缪志伟

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 结构在大震作用下会进入非线性并产生损伤, 准确预测地震荷载下钢筋混凝土结构的非线性行为, 对评估混凝土结构的抗震安全性具有重要意义。清华大学土木工程系近年来开发的适用于钢筋混凝土杆系结构的纤维模型 THUFIBER 程序, 适用于预应力混凝土杆系结构的纤维模型 NAT-PPC 程序, 以及适用于剪力墙结构的分层壳墙元模型的非线性分析程序。这些程序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, 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, 该程序可以准确模拟地震作用下结构的三维非线性地震响应, 也可模拟爆炸、倒塌等极端非线性行为, 通过一系列的数值分析与试验结果的对比和工程应用算例, 说明所研发程序的精度和计算能力。

关键词: 钢筋混凝土; 地震; 非线性; 杆件; 纤维模型; 剪力墙; 分层壳单元

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A

NONLINEAR ANALYTICAL MODELS, METHODS AND EXAMPLES FOR CONCRETE STRUCTURES SUBJECT TO EARTHQUAKE LOADING

*YE Lie-ping, LU Xin-zheng, MA Qian-li, WANG Xun-liu, MIAO Zhi-wei

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Structures may enter nonlinear stage in strong earthquake, precise prediction for the nonlinear behavior of reinforced concrete (RC) structures in earthquake is important to assess the earthquake resistant safety of the structures. This paper presents the programs recently developed by the Civil Engineering Department of Tsinghua University, which include the fiber model THUFIBER for RC frames, the program NAT-PPC for prestressed concrete (PC) frames, and the multi-layer shell element based shear wall program. These programs can connect the nonlinear nodal force/nodal displacement relationship of elements directly with the nonlinear stress/strain relationship of materials. Complicated cyclic behaviors and coupled axial force-biaxial bending-shear behaviors of RC structures can be correctly simulated. And furthermore, with the convenient pre/post processing and the nonlinear capacity of general finite element software, these programs not only can precisely simulate nonlinear seismic response of spatial structures, but also can simulate some extreme nonlinear problems such as blast or collapse. The precision and the capacity of the programs are illustrated in this paper with a series of applications.

Key words: reinforced concrete; seismic; nonlinear; beam-column element; fiber model; shear wall; multi-layer shell

收稿日期: 2006-06-19

基金项目: 教育部科技创新工程重大项目培育资金项目资助(704003)

作者简介: *叶列平(1960), 男, 浙江人, 教授, 博士, 博导, 主要从事混凝土结构和抗震、FRP 加固和 FRP 结构研究(E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn);

陆新征(1978), 男, 安徽人, 讲师, 博士, 主要从事结构非线性分析研究;

马千里(1983), 男, 江苏人, 博士生, 主要从事混凝土结构抗震研究;

汪训流(1977), 男, 湖北人, 博士生, 主要从事预应力混凝土结构研究;

缪志伟(1981), 男, 江苏人, 博士生, 主要从事混凝土结构抗震与抗剪研究。

混凝土结构是当今土木工程中应用最为广泛的结构形式。但是目前常用的结构线弹性分析方法,对日益大型化、复杂化的混凝土结构早已显得力不从心,因而针对混凝土结构的非线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非线性分析,对于准确预测地震荷载下混凝土结构的非线性行为,评估混凝土结构的抗震安全性具有重要意义。

传统的混凝土结构抗震非线性分析模型,主要有层模型和杆模型两大类。

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滞回模型来之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进行分析。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,虽然计算量较大,但相对于层模型而言,其优势仍十分明显^[1]。目前运用较多的基于截面恢复力模型的杆模型虽然比较简单实用,但在处理杆件所受轴力与弯矩耦合相关关系时遇到了很大困难,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。

剪力墙是混凝土结构另一常见构件形式,研究人员也提出了很多非线性分析模型,如墙柱单元模型、桁架模型、多垂直杆单元模型以及纤维墙元模型等,但这些方法对剪力墙剪切破坏行为的模拟都不甚理想,且难以考虑轴力、墙面内和墙面外的耦合力学行为。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,它可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。

本文介绍了清华大学土木工程系近年来开发的适用于混凝土杆系结构的纤维模型 THUFIBER 程序,适用于预应力混凝土杆系结构的纤维模型 NAT-PPC 程序,以及适用于剪力墙结构的分层壳墙元模型程序。并通过一系列的数值分析与试验结果的对比和工程应用算例,说明所研发程序的精度和计算能力。

1 杆系纤维模型程序 THUFIBER 和 NAT-PPC

1.1 概述

基于杆系结构力学和一维材料本构的纤维模型,是分析混凝土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:纤维模型将构件截面划分为若干混凝土纤维和钢筋纤维,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;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;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,如可模拟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经应用很多了^[2,3],但国内对该方法的研究还不多^[4,5]。清华大学土木工程系基于纤维模型原理,编制了 THUFIBER 程序^[6],通过引入更加完善的钢筋和混凝土本构,并将所编制的材料本构模型嵌入通用商用程序 MSC.MARC 结构分析软件,用于复杂受力状态下混凝土杆系结构及构件受力的数值分析。

1.2 混凝土本构模型

为合理反映受压混凝土的约束效应、循环往复荷载下的滞回行为(包括刚度和强度退化)以及受拉混凝土的“受拉刚化效应”,混凝土本构的受压单调加载包络线选取 Légeron&Paultre 模型^[7],可同时考虑构件中纵、横向配筋对混凝土约束效应的影响(见图 2a)。为反映反复荷载下混凝土的滞回行为,采用二次抛物线模拟混凝土卸载及再加载路径,并

考虑反复受力过程中材料的刚度和强度退化。为模拟混凝土裂缝闭合带来的裂面效应，在混凝土受拉、受压过渡区，采用线性裂缝闭合函数模拟混凝土由开裂到受压时的刚度恢复过程。在受拉区，采用江见鲸模型^[8]模拟混凝土受拉开裂及软化行为，以考虑“受拉刚化效应”(见图 2b)。

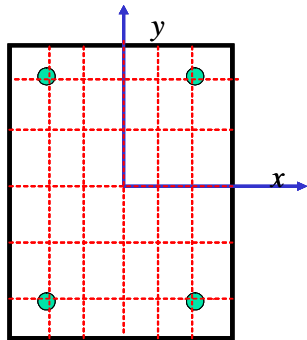
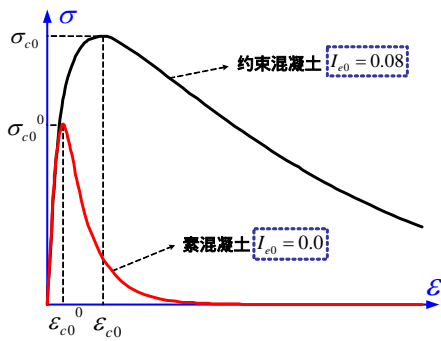
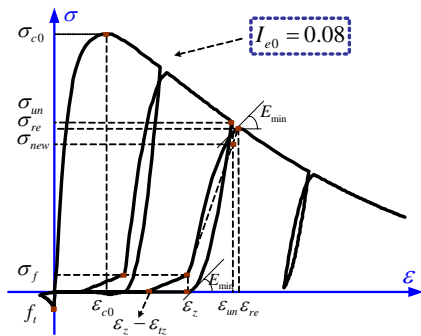


图 1 纤维模型截面划分示意
Fig.1 Section mesh for fiber model



(a) 受压单调加载曲线



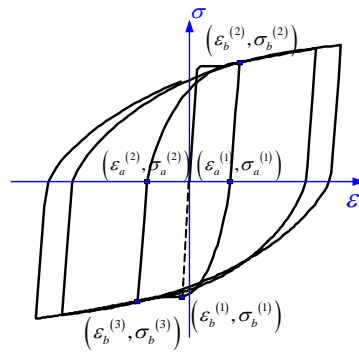
(b) 往复加载曲线

图 2 混凝土应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of concrete

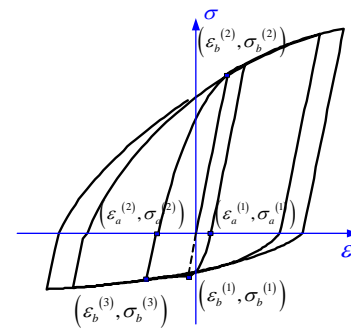
1.3 钢筋本构模型

钢筋本构基于 Légeron 等模型，再加载路径考虑了钢筋的 Bauschinger 效应^[9]。为反映钢筋单调加载时的屈服、硬化和软化现象，并使钢筋本构更加通用，本课题组在 Légeron 等模型的基础上进一步

作出修正，将钢筋本构模型扩展为可以分别模拟具有屈服平台的普通钢筋和拉压不等强的没有明显屈服平台的高强钢筋或钢绞线的通用模型(见图 3)。



(a) 普通钢筋



(b) 硬钢或钢绞线

图 3 钢筋反复拉压应力-应变曲线

Fig.3 Cyclic tension-compression stress-strain curves of steel

1.4 算例

采用 THUFIBER 对 2 根往复荷载下混凝土压弯柱试件(S-1^[10]、YW0^[11])进行了数值模拟(见图 4，图 5)，通过比较可以看出，由于较好地反映了复杂受力状态下混凝土的实际受力变形特性以及钢筋的硬化特性和 Bauschinger 效应，本程序对试件在反复荷载下的承载力、往复荷载下滞回特性以及卸载后的残余变形均具有较高预测精度。

基于 THUFIBER 程序，本课题组还开发了预应力混凝土杆系结构的数值分析程序 NAT-PPC。NAT-PPC 中，预应力混凝土构件被划分成普通钢筋混凝土部分和预应力筋部分(图 6) 两部分均采用梁单元模拟，单元截面特性由纤维模型程序 THUFIBER 确定，其中预应力通过初始应力法施加。对于曲线预应力筋情形，可采用足够数量的梁单元先将预应力筋分段折线化，之后即可按同样原理进行建模。

利用 NAT-PPC 程序，对文献[10]的一根无粘结

预应力混凝土压弯柱试件及文献[12]的一榀无粘结预应力混凝土框架试件(UB-2)进行了模拟计算,结果分别如图7和图8所示,可见在正向加载情况,除第一个荷载循环外,计算曲线与试验曲线都几乎重合,最大承载力和相应的变形,以及最终残余位移的预测误差均小于5%;在负向加载情况,虽然加载后期预测精度下降,但最大承载力和相应的变形,以及最终残余位移的预测误差均小于10%。

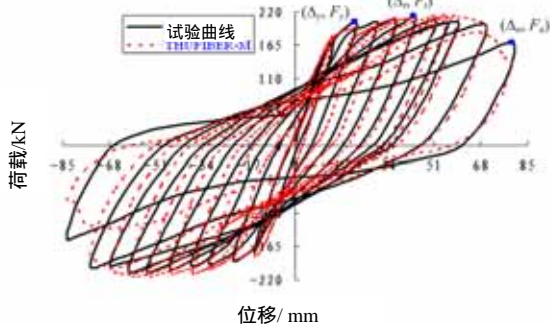


图4 S-1 计算结果与试验结果比较
Fig.4 Comparison for S-1, test vs. computation

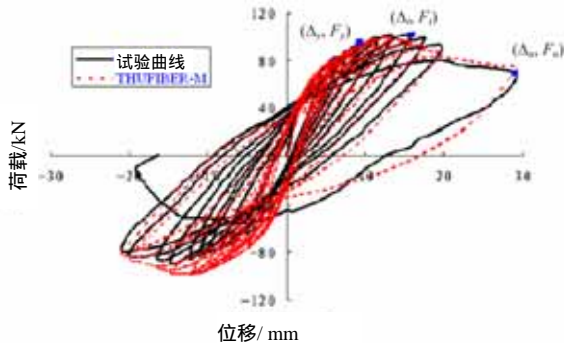
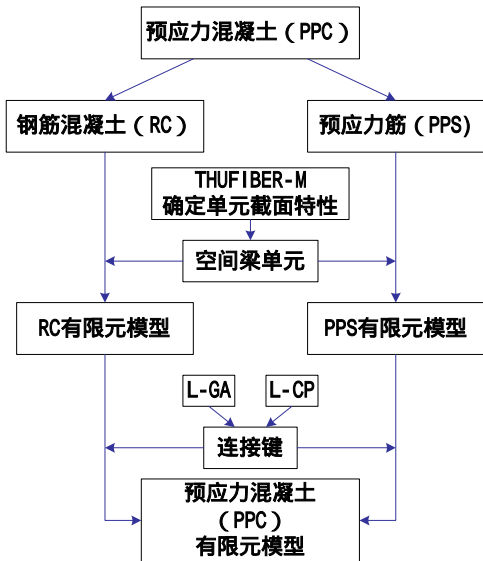
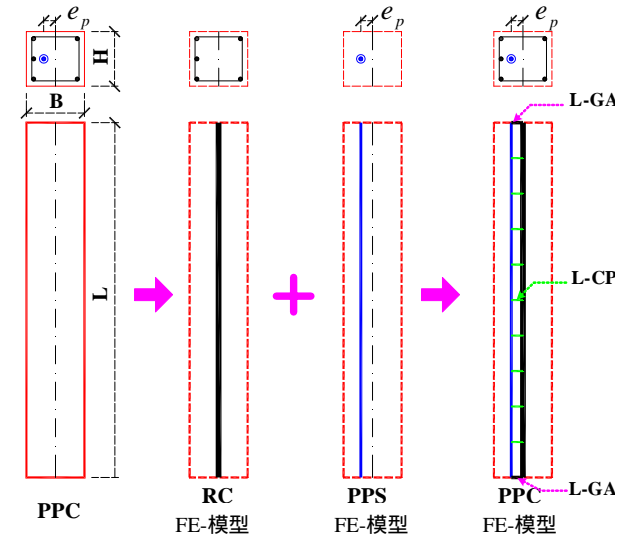


图5 YW0 计算结果与试验结果比较
Fig.5 Comparison for YW0, test vs. computation



(a) NAT-PPC 有限元建模流程图



(b) 有限元模型示意图

图6 NAT-PPC 有限元建模

Fig. 6 Finite element implementation of NAT-PPC

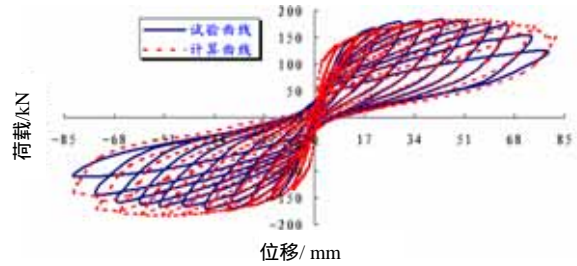


图7 S-2 计算结果与试验结果的对比
Fig.7 Comparison for S-2, test vs. computation

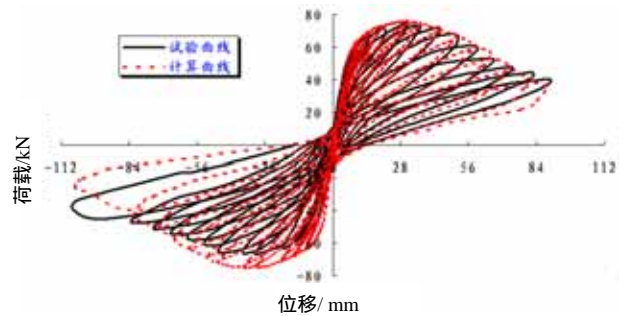


图8 UB-2 计算结果与试验结果的对比
Fig.8 Comparison for UB-2, test vs. computation

2 分层壳剪力墙模型

2.1 概述

剪力墙是高层混凝土结构的重要抗侧力构件,目前已有的剪力墙有限元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，有些模型无法考虑面内弯矩与轴力和面外弯矩的耦合，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，但在模拟剪力墙受剪行为时仍不够成熟^[13]。本课题组基于复合材料力学原理，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(见图9)，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^[8]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。

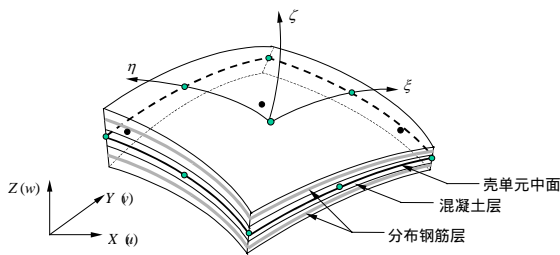


图 9 分层壳单元
Fig.9 Multi-layer shell element

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。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^[14]。

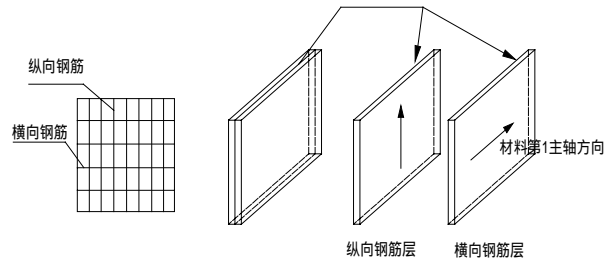


图 10 分层壳模型中钢筋层设置示意图
Fig.10 Rebar layers in multi-layer shell model

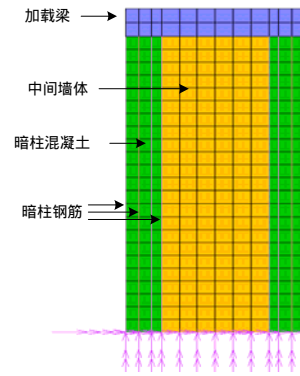


图 11 剪力墙有限元计算模型
Fig.11 Finite element model for shear wall

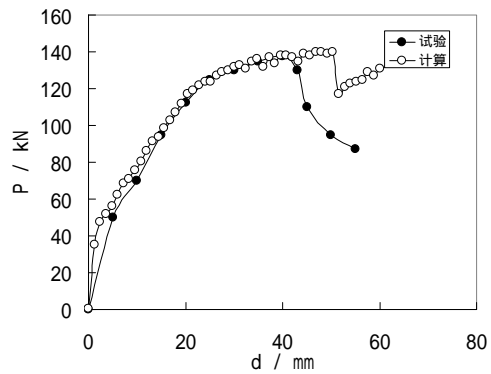
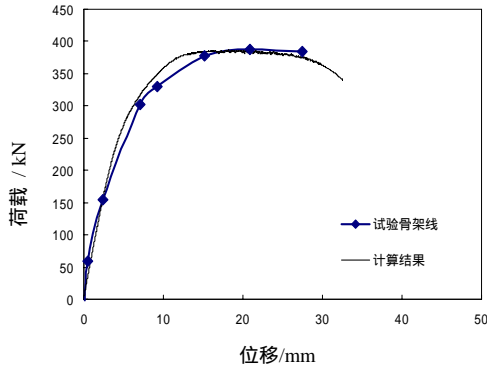


图 12 面内弯曲破坏剪力墙计算与试验结果对比(文献[14])
Fig.12 Comparison for in-plane flexural failure of shear wall (Ref. [14])

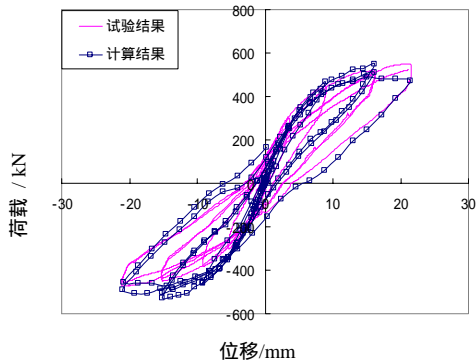
2.3 混凝土层本构模型

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，本课题组还基于 Bazant 等人的研究^[15]，开发了基于 microplane 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

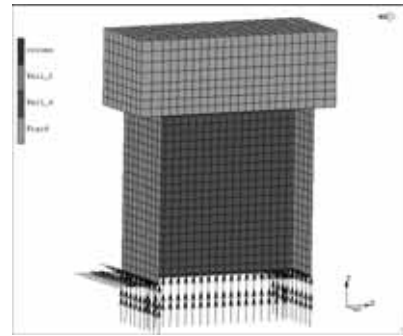
模型中，边缘约束构件和中间墙体的混凝土可以分别采用不同的本构模型，以考虑边缘约束构件受到的约束作用(图 11)。除钢筋混凝土剪力墙，模型也可以模拟钢骨(管)混凝土剪力墙。



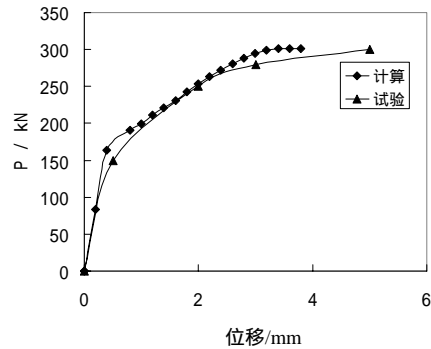
(a) 单向加载曲线比较



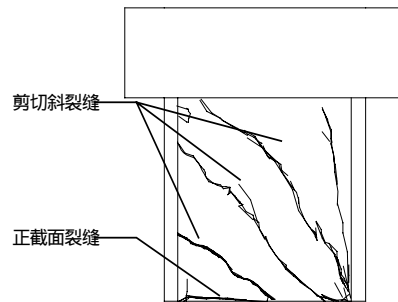
(b) 往复加载曲线比较



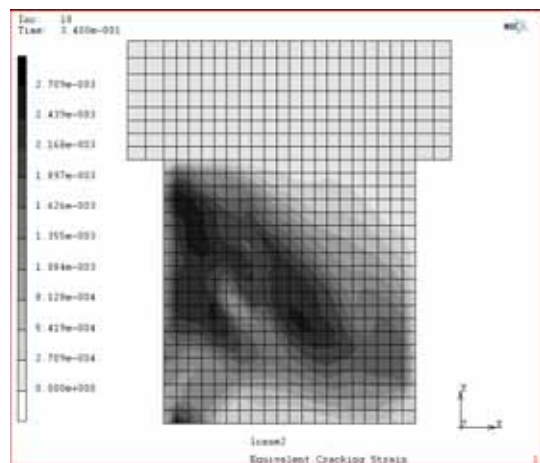
(a) 有限元模型



(b) 荷载位移曲线对比



(c) 试验裂缝分布



(d) 计算裂缝分布

图 13 面内弯曲破坏剪力墙计算与试验结果对比(文献[16])
Fig.13 Comparison for in-plane flexural failure of shear wall, test vs. computation (Ref. [16])

2.4 算例

为了验证剪力墙模型的有效性，对不同受力特性的剪力墙算例进行了计算，并与相应的试验结果进行了比较。图 12 所示为采用弹塑性+断裂混凝土本构模型，对一面内弯曲破坏剪力墙的计算结果与试验结果对比^[14]，图 13 所示为采用 microplane 混凝土本构模型，对一高墙试验的计算结果与试验结果对比^[16]，中间墙体和边缘约束构件的混凝土均采用分层壳墙单元模拟，边缘约束构件中的钢筋采用桁架单元模拟。比较图 12 和图 13 可知，程序计算结果与实验结果符合良好，较为准确地预测了剪力墙的面内弯曲的受力行为。

剪力墙的面内剪切行为的模拟一直是剪力墙分析中的一个难点问题。图 14 为所示采用分层壳模型对一矮墙试验进行的模拟^[14]，同样得到了很好的效果。试件刚度与承载力的计算结果与实验结果

图 14 剪力墙面内剪切破坏试验及计算结果对比
Fig.14 Comparison for in-plane shear failure of shear wall, test vs. computation

符合的很好，分析得到的开裂云图与实际裂缝开展情况也非常一致，可见分层壳墙单元模型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。

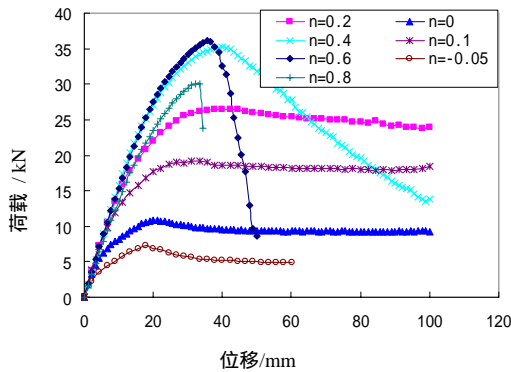


图 15 不同轴压比下荷载—位移关系
Fig.15 Load-displacement relationships of shear wall with different axial load ratio

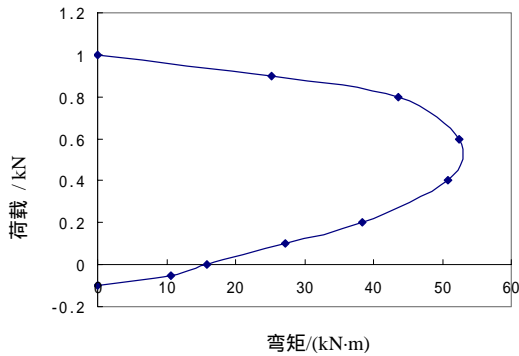


图 16 最大弯矩—轴压比关系
Fig.16 Relationship between maximum bending moment and axial load

实际结构中，剪力墙往往在纵、横两个方向均有布置。当结构在一个方向上受到侧向荷载作用时，与荷载作用方向垂直的剪力墙将发生面外弯曲。同时考虑剪力墙面内受力和面外弯曲耦合行为也一直是剪力墙非线性建模的难点所在。图 15 为模拟得到的不同轴压下的剪力墙面外弯曲行为，剪力墙顶部预先施加了不同的轴压力，在与墙平面垂直的方向上受侧向荷载作用。由于墙体的厚度与其高度相比很小，因此面外受力行为与一维梁柱构件的弯曲行为相近。由图 15 可见，分层壳剪力墙模型可以很好的模拟剪力墙在这种受力情况下的软化行为。随着轴压力的提高，墙体的最大承载力逐渐增加，在轴压比为 0.6 时达到峰值，然后又开始降低，而且随着轴压比增加，延性逐渐减小。图 16 给出的各种轴压比下的最大弯矩和相应轴压比的相关曲线，计算结果也与理论关系^[17]吻合得很好。

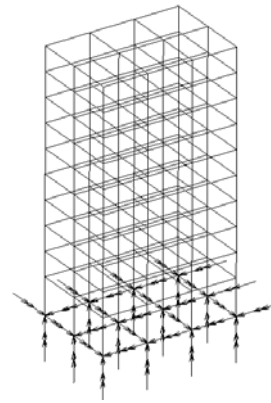


图 17 静力推覆框架模型
Fig.17 Frame model for pushover simulation

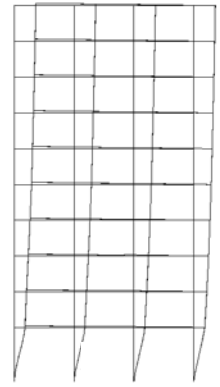


图 18 极限状态结构变形
Fig.18 Ultimate deformation of the frame

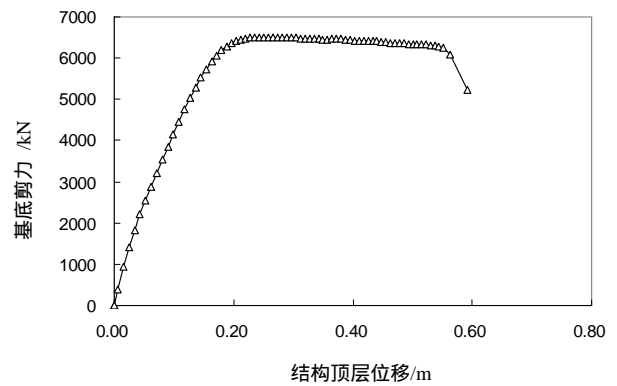


图 19 基底剪力—顶层位移关系
Fig.19 Relationship between bottom shear force and top displacement

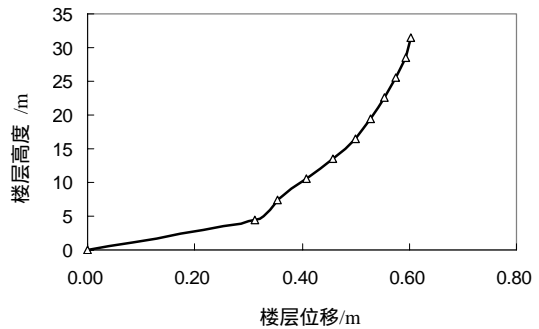


图 20 极限状态各楼层位移
Fig. 20 Displacement of various stories at ultimate state

3 结构分析

3.1 框架结构分析

为了验证上述模型的可靠性，本课题组采用 THUFIBER 程序对一钢筋混凝土高层框架结构进行了静力弹塑性分析(pushover)和动力时程分析^[6]。该框架结构的柱距均为 5m，一层层高为 4.5m，其他为 3m，柱脚假设理想固结于地面，详细参数参见文献[6]。静力推覆分析(Pushover)沿框架纵向采

用均布水平荷载,采用弧长法控制,逐步增大荷载,计算结构在静力作用下的变形和破坏行为。计算得到的极限变形状态如图 18,结构顶层变形和基底剪力的关系曲线如图 19 所示。从图 18 中可以看出,结构底层柱子变形集中严重,极限层间位移角大约是 1/14,极限变形和对应的层间位移角分布如图 20 和图 21 所示。计算得到的底层各柱内力 - 结构顶点位移曲线如图 22 所示。由图可见,由于纤维模型可以很好的考虑轴力和弯矩的耦合作用,受拉侧的柱 1 和柱 4 屈服弯矩明显小于受压侧的柱 4 和柱 8,与此同时,由于柱 4 和柱 8 的轴压比较高,所以其延性较差,受弯屈服后迅速进入软化段,并经历了一个复杂而完整的破坏软化过程,在最终状

态,其极限弯矩已经降低到不足其最大弯矩的 30%,充分显示出本课题组开发程序的计算能力和稳定性。

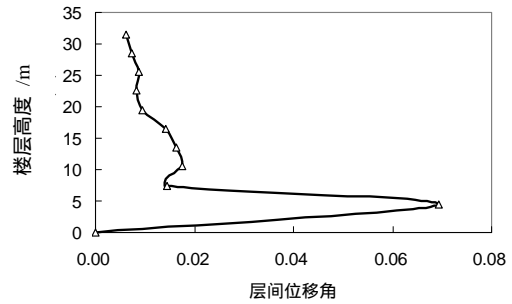


图 21 极限状态各楼层层间位移角
Fig.21 Drift distribution at ultimate state

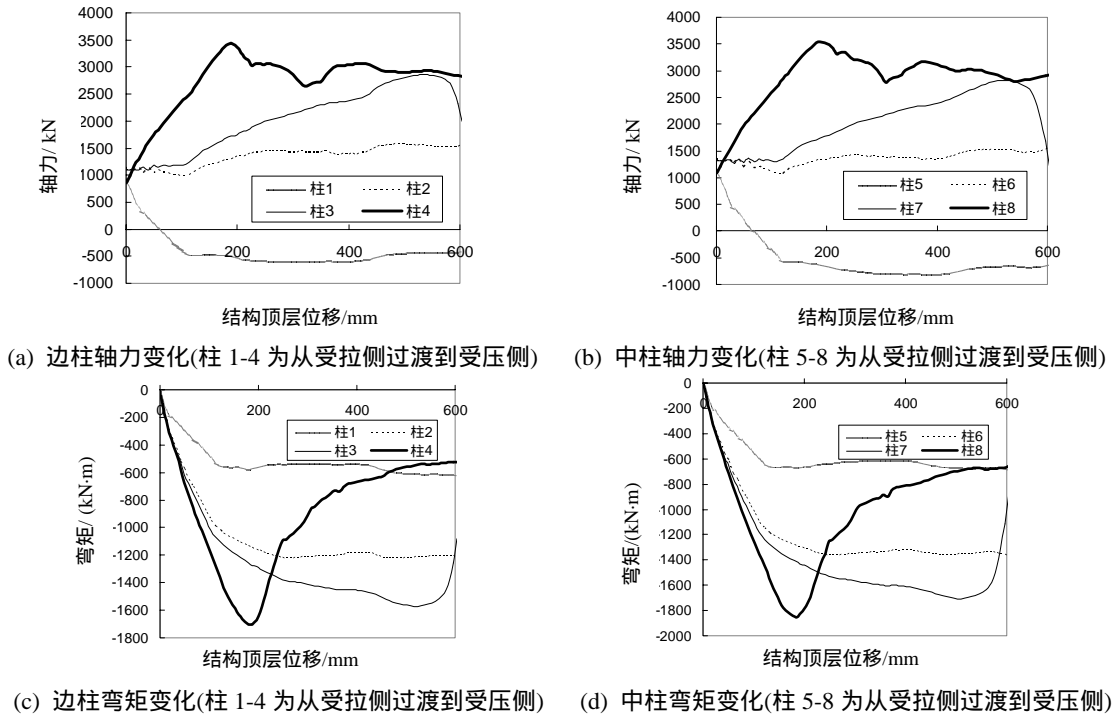


图 22 底层各柱的内力结果
Fig.22 Internal forces for the columns at the bottom story

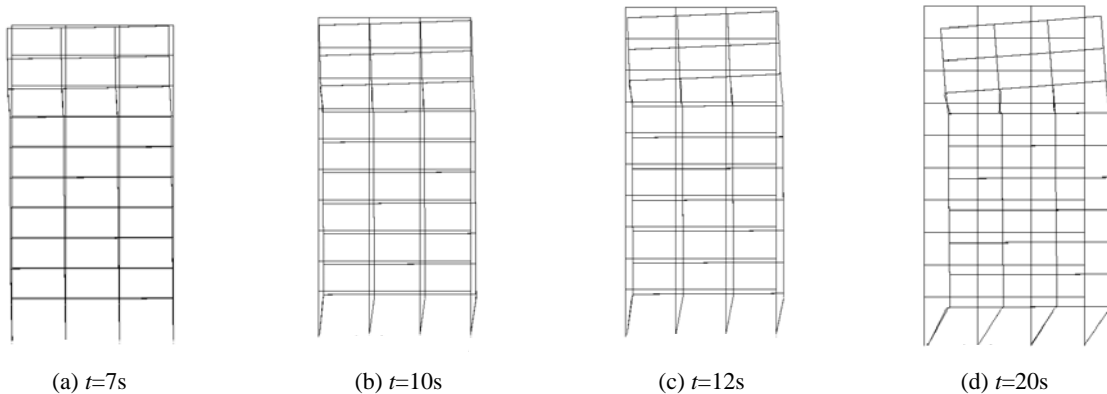


图 23 结构倒塌过程

Fig.23 Collapse process of the frame

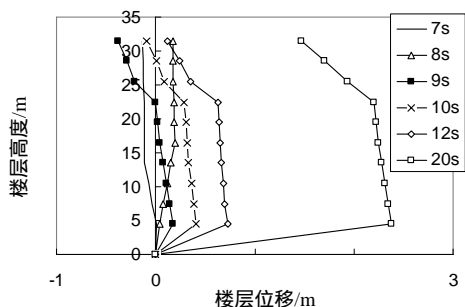


图 24 结构各层变形发展图

Fig. 24 Deformation development of the frame

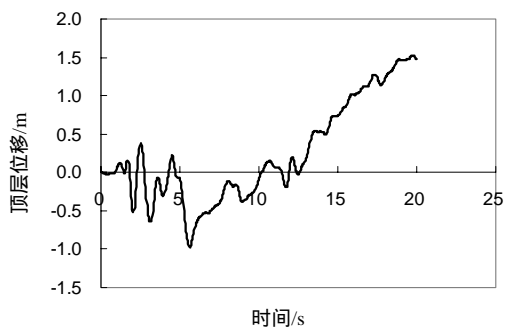


图 25 结构的顶层位移时程

Fig.25 Time history curve of the displacement at the top of the building

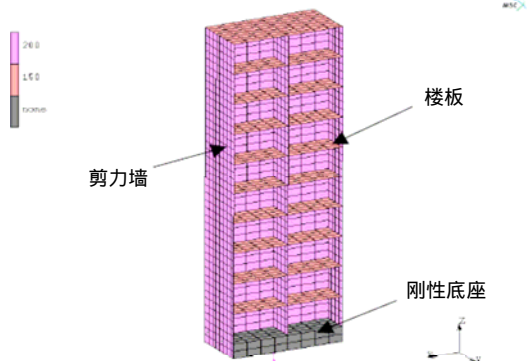


图 26 剪力墙结构示意图

Fig.26 Finite element model for the shear wall

对上述结构在基底输入 EL-Centro NS 波,并将峰值加速度提高到 2000gal(由于该结构比较坚固,所以地震峰值加速度取得足够大,使结构倒塌)。计算得到结构倒塌过程如图 23 所示,首先在 7s 左右结构的第 8 层柱子发生破坏,接着在 10s 左右,底层柱子也发生破坏,最后结构在第 8 层和底层发生破坏而倒塌。计算得到结构各层变形发展情况如图 24 所示,同样可以清楚的看出结构的破坏过程。结构的顶层位移时程曲线如图 25 所示,结构在 7s 后已经出现破坏,而后结构向 X 正方向倒塌,故而时程曲线一直发散。

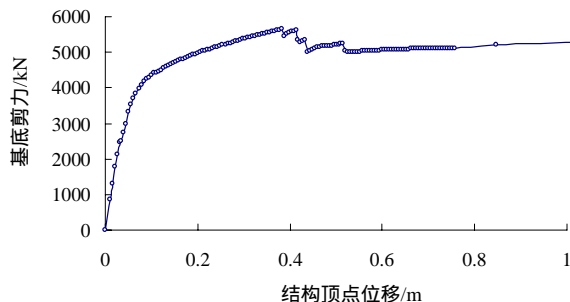
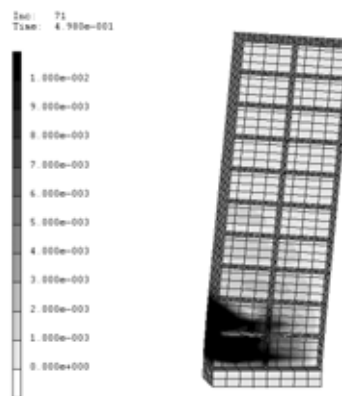
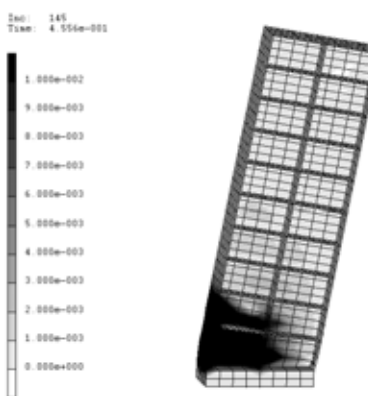


图 27 剪力墙结构受力与顶点位移曲线

Fig.27 Relationship between the bottom shear force and the displacement at the top of the building



(a) 峰值荷载裂缝分布



(b) 受压侧剪力墙压碎破坏

图 28 剪力墙结构裂缝分布

Fig. 28 Crack patterns in the shear wall

3.2 剪力墙结构分析

取一榀剪力墙模型如图 26 所示,其纵向长度为 10m,横向宽度为 5m,共 10 层,底层层高 4.5m,其他各层层高 3m。剪力墙厚度取 200mm,楼板厚度取 150mm。剪力墙和楼板皆为均匀配筋,单侧配筋率 0.5%。对该剪力墙结构进行静力推覆分析,沿剪力墙纵向施加倒三角形荷载采用弧长法加载,得到结构底部剪力与顶点位移曲线如图 27 所示。该剪力墙结构的变形主要是转动变形,集中在剪力墙

底部,上部结构基本上是以剪力墙根部为中心的刚体转动变形。达到最大承载力时,底部剪力为5650kN,相应的楼顶位移为0.382m,底部转角为1/83。此时,剪力墙底部大部分截面已经开裂(图28a),而后裂缝继续扩大,受压侧残余混凝土越来越少,结构承载力开始下降,最后受压侧混凝土在压力和剪力的共同作用下发生破坏,荷载迅速降低(图28b)。

4 结 论

清华大学土木工程系基于纤维模型和分层壳模型开发了具有较好通用性的框架结构和剪力墙结构非线性计算分析程序,并借助通用有限元程序强大的前后处理功能和非线性计算功能,可以准确模拟实际工程中的各种混凝土结构非线性行为,甚至包括爆炸、倒塌等极端非线性行为,可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.
Fang Ehua. Conceptual design for high rise RC structures [M]. Beijing: China Machinery Press, 2004. (in Chinese)
- [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.
Qin Conglu, Zhang Aihui. Nonlinear time history analysis based on section fiber model [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(7): 1003~1008. (in Chinese)
- [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.
Wu Yongfei, Zhou Deyuan. Application of fiber model in static nonlinear analysis for planar frame [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2005, 35(Sup. I): 129~132. (in Chinese)
- [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.
Lu Xinzheng, Miao Zhiwei, Jiang Jianjing, Ye Lieping. Collapse simulation of high-rise structure of concrete under action of static and dynamic load [J]. Earthquake research in Shanxi, 2006, 126(2): 7~11. (in Chinese)
- [7] Légeron F, Paultre P. Uniaxial confinement model for normal and high-strength concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005, 129(2): 241~252.
- [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.
Jiang Jianjing, Lu Xinzheng, Ye Lieping. Finite element analysis of concrete structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [9] Légeron F, Paultre P, Mazar J. Damage mechanics modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures [J] Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005, 131(6): 946~954.
- [10] Zatar W, Mutsuyoshi H. Residual displacements of concrete bridge piers subjected to near field earthquakes [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(6): 740~749.
- [11] 李静. 矩形截面 FS 约束混凝土柱抗震性能的试验研究与理论分析[D]. 北京: 清华大学, 2003.
Li Jing. Experimental investigation and theoretical analysis on seismic behavior of FS confined concrete columns [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese)
- [12] 苏小卒. 预应力混凝土框架抗震性能研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.
Su Xiaozu. Study on earthquake resistant behaviour of prestressed concrete frames [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1998. (in Chinese)
- [13] 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.
Lu Xilin, Lu Wensheng. Application of fiber wall element model in nonlinear analysis of shear wall structure [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(1): 72~80. (in Chinese)
- [14] 门俊, 陆新征, 宋二祥, 陈肇元. 分层壳模型在剪力墙结构计算中的应用[J]. 防护工程, 2006, 28(3): 9~13.
Men Jun, Lu Xinzheng, Song Erxiang, Chen Zhaoyuan. Application of multi-layer model in shell wall computation [J]. Protective Engineering, 2006, 28(3): 9~13. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] 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.
Wei Yong. Research on seismic behavior and design method for reinforced concrete core wall - steel frame hybrid structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
- [17] 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.
Fang E'hua, Qian Jiaru, Ye Lieping. Design for high-rise building structures [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese)

注: 该文在第十五届结构工程学术会议(2006 焦作)应邀作特邀报告