

# 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟

陆新征, 缪志伟, 江见鲸, 叶列平

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘要:** 在 MSC Marc 有限元分析软件程序的基础上, 开发了针对钢筋混凝土杆系结构的钢筋混凝土纤维模型程序 THUFBER。在该程序中, 结构构件中的混凝土和钢筋分别用不同的纤维来模拟, 从而使得材料滞回特性得到较准确的表达。为了验证本程序的计算能力, 本文针对一个钢筋混凝土高层框架结构进行了静力弹塑性分析和动力时程分析, 结果表明, THUFBER 具有出色的分析非线性问题的能力, 可以进行结构倒塌模拟。

**关键词:** 地震; 纤维模型; 混凝土; 倒塌模拟

**中图分类号:** P315.9 **文献标志码:** A

## 0 引言

对建筑结构在地震作用下的倒塌破坏模式进行模拟和预测, 对于研究建筑物的安全性以及评估地震损失有重大意义。但是, 在目前的模拟中, 为了克服建筑物倒塌时严重的非线性所带来的数值计算上的问题, 必须进行大量简化假设, 这可能使得分析结果与实际情况有所差异<sup>[1-3]</sup>。在 MSC Marc 2003 有限元分析软件程序的基础上, 开发了针对钢筋混凝土杆系结构的钢筋混凝土纤维模型程序 THUFBER。在该程序中, 结构构件中的混凝土和钢筋分别用不同的纤维来模拟, 从而使得材料滞回特性得到较准确的表达<sup>[4]</sup>。以一个钢筋混凝土高层框架结构静力弹塑性分析和动力时程分析为例, 说明 THUFBER 程序的分析能力。

## 1 截面纤维划分及纤维本构模型

在 THUFBER 程序中, 每个钢筋混凝土杆件截面被划分成 36 个混凝土纤维和 4 个钢筋纤维 (见图 1)。用户可以分别定义每个纤维的位置、截面积和本构关系。程序自动根据平截面假定得到每个纤维的应变, 并迭代计算确保截面应力平衡。

THUFBER 提供的混凝土本构关系 (见图 2), 用户需要输入 5 个变量定义混凝土的单轴应力应变行为:

图 1 截面纤维划分

Fig. 1 Division of section fiber

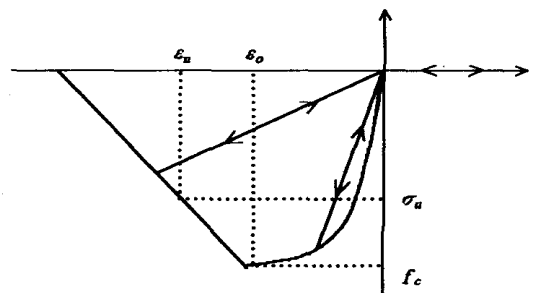
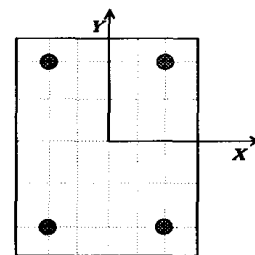


图 2 程序中的混凝土本构关系

Fig. 2 Constitutive relation of concrete in the program

收稿日期: 2005-12-05; 修回日期: 2006-01-20

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20040003095) 及教育部科学技术研究重点 (重大) 项目 (No. 704003) 资助。

作者简介: 陆新征 (1978-), 男, 安徽省芜湖人。2005 年毕业于清华大学土木工程系, 博士, 讲师;

缪志伟 (1981-), 男, 江苏省南通人。清华大学土木工程系在读博士研究生;

江见鲸 (1938-), 男, 江苏省常州人。1963 年毕业于清华大学土木工程系, 教授, 博士生导师;

叶列平 (1960-), 男, 浙江省温州人。1988 年毕业于东南大学土木工程系, 博士, 教授, 博士生导师。

混凝土的初始弹性模量,混凝土峰值抗压强度  $f_c$  及其压应变  $\epsilon_c$ , 极限抗压强度  $\sigma_u$  及其压应变  $\epsilon_u$ 。其骨架线分为两段, 上升段的表达式为式(1)<sup>[5]</sup>, 下降段为直线, 滞回关系为原点指向型, 不考虑混凝土的抗拉强度。通过修改混凝土的极限抗压强度( $\sigma_u$ ), 可以模拟普通混凝土、约束混凝土等多种混凝土的材料行为。

$$\sigma = f_c \left[ 2 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right) - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

THU FBER 提供的钢筋本构模型为理想弹塑性模型, 当钢筋拉应变达到断裂应变后发生破坏退出工作。

该程序可以较好地模拟钢筋混凝土柱在不同轴压条件下的弯矩曲率关系, 以及相应的软化行为。图3为一悬臂柱在不同轴压条件下的杆端水平力-杆端侧移关系, 可见该程序可以较好地得到构件的软化行为。如果将图3得到的构件最大弯矩和相应的轴压绘制成轴压-极限弯矩相关关系图, 则见图4。可见该相关关系和现有理论吻合很好。

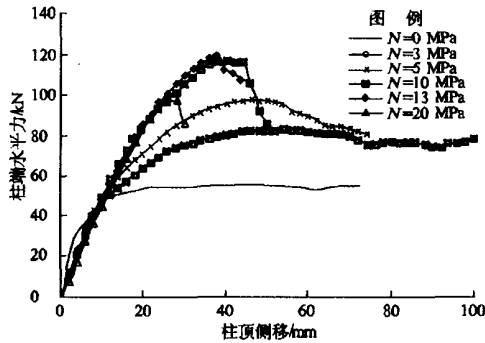


图3 悬臂柱杆端水平力-杆端侧移关系

Fig. 3 Horizontal force of rod end of cantilever column versus side displacement of rod end

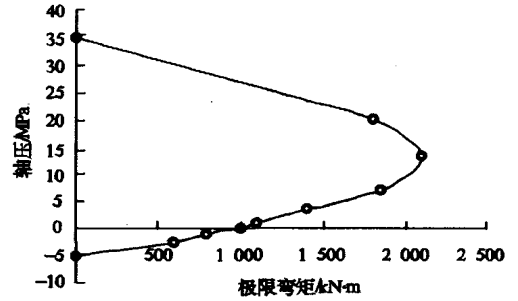


图4 极限弯矩—轴压关系

Fig. 4 Limit bending moment versus axis pressure

## 2 建筑物模型及分析参数

为了验证 THU FBER 程序的计算能力, 对一个钢筋混凝土高层建筑模型进行了静力弹塑性分析(pushover)和动力时程分析。建筑物模型为一规则框架结构, 其截面参数见表1, 柱距均为5m, 层高一层为4.5m, 其他为3m。柱脚假设理想固结于地面。各榀框架以及柱脚编号见图5。材料参数取混凝土弹性模量  $E_0 = 30 \text{ GPa}$ , 抗压强度  $f_c = 30 \text{ MPa}$ , 峰值压应变  $\epsilon_c = 0.002$ , 极限抗压强度  $f_u = 20 \text{ MPa}$ , 极限抗压应变  $\epsilon_u = 0.004$ 。钢筋弹性模量为  $E_s = 200 \text{ GPa}$ , 屈服强度  $400 \text{ MPa}$ , 拉断应变2%。

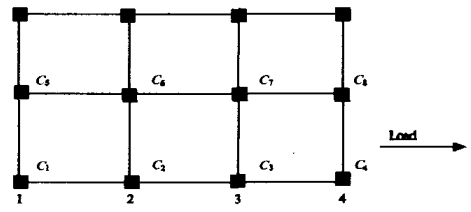


图5 各榀框架和柱脚编号

Fig. 5 Number of Each frame and base of column

表1 建筑物模型截面参数

Table. 1 Section parameters of building model

单位为平方毫米

项别	楼层	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
梁	截面	300 × 800	250 × 700	250 × 700	250 × 700	250 × 700	250 × 700	250 × 700	250 × 700	250 × 700	250 × 700
	配筋	4 000	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500
边柱	截面	700 × 700	700 × 700	700 × 700	700 × 700	600 × 600	600 × 600	600 × 600	500 × 500	500 × 500	500 × 500
	配筋	2 500	2 500	2 500	1 700	1 700	1 700	1 700	1 100	1 100	1 100
中柱	截面	700 × 700	700 × 700	700 × 700	700 × 700	600 × 600	600 × 600	600 × 600	500 × 500	500 × 500	500 × 500
	配筋	3 000	3 000	3 000	3 000	2 200	2 200	2 200	1 500	1 500	1 500

注: 梁柱皆为对称配筋, 表中所列钢筋面积为该截面钢筋面积的一半。

在考虑了楼板以及活荷载的影响后, 通过计算得到结构的第一振型自振周期为  $T_1 = 1/f_1 = 0.72 \text{ s}$ 。文献[6]给出的框架结构的自振周期经验公式为:

$$T_1 = 0.33 + 0.00069 \frac{H^2}{\sqrt{B}} \quad (2)$$

$$T_1 = 0.07 \sim 0.08 N \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)得到该框架结构的一阶自振周期应该在  $0.6\text{ s} \sim 0.8\text{ s}$  之间, 可见该有限元模型得到的结构自振周期在经验范围以内, 所以该模型参数具有较高的可信度。

### 3 静力推覆分析

为了深入了解结构的基本信息以及参数影响, 对上述结构进行了静力推覆分析(Pushover)。首先对结构施加自重荷载, 而后, 将均匀分布的点荷载施加于第1榀框架梁柱节点上(见图6)。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。计算得到的结构顶层变形和基底剪力的关系曲线(见图7)。

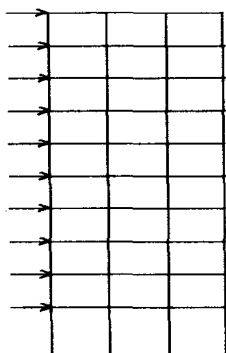


图6 静力推覆分析侧向力模式

Fig. 6 Pattern of side force for static push-over analysis

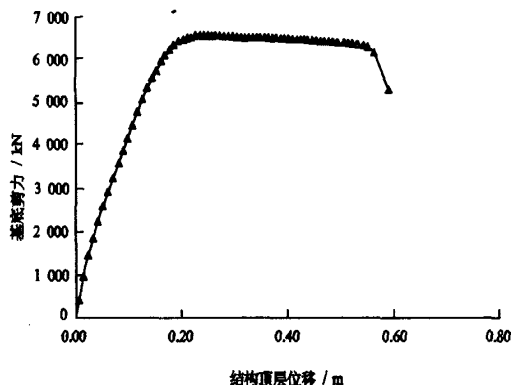


图7 基底剪力—顶层位移关系

Fig. 7 Shearing force base versus displacement of top floor

对应于最终状态(即结构承载力出现剧烈下降)的结构变形情况(见图8)。其变形和层间位移角分布见图9、图10。从图中可以看出, 结构底层柱子变形集中严重, 极限层间位移角大约是  $1/14$ 。

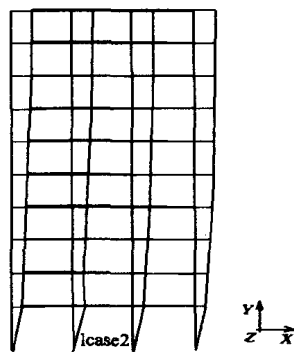


图8 极限状态结构变形

Fig. 8 Deformation of structure under limiting state

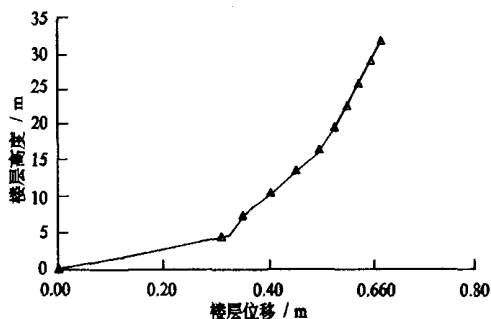


图9 极限状态各楼层位移

Fig. 9 Displacement of each floor under limiting state

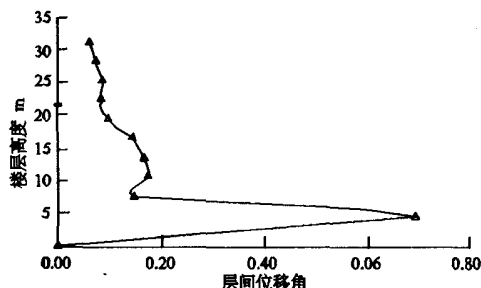
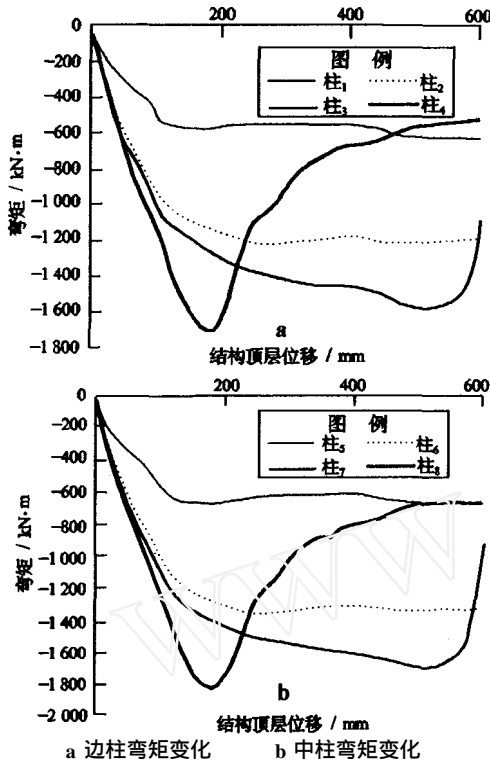


图10 极限状态各楼层层间位移角

Fig. 10 Displacement angle among each of floors under the limiting state

计算得到的底层各柱内力-结构顶点位移曲线见第10页图11。从图中可以看出, 底层的柱8在轴力和弯矩的共同作用下, 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%。从第10页图11中还可以进一步发现在水平荷载作用下, 框架整体受到一个弯曲作用。该弯曲作用表现在底层柱内力上为: 第1榀框架柱压力减小并过渡到受拉, 第4榀框架柱压力迅速增大, 且所有柱子的弯矩都有所增大。由于第1榀框架柱受拉, 其屈服弯矩降低, 故而首先屈服; 而第4榀框架柱受压, 屈服弯矩提高, 故而最后屈服。但是由于第4榀框架柱的

轴压比较大, 导致其延性较低, 屈服后承载力迅速下降, 并最终导致结构破坏。



a 边柱弯矩变化      b 中柱弯矩变化  
 图 11 底层各柱的内力结果 ( $f_u = 20 \text{ MPa}$ )  
 a Variation of bend moment of side column  
 b Variation of bend moment of middle column  
 Fig. 11 Internal force result of each column of the bottom floor ( $f_u = 20 \text{ MPa}$ )

根据上述计算结果, 可以得出以下结论。

- a) 基于M SC Marc 的纤维模型程序 THU F BER 可以较好地模拟结构在静力推覆荷载下的变形和破坏过程, 尤其是可以得到底层柱在轴力和弯矩共同作用下软化破坏过程; 而且计算过程稳定, 收敛迅速;
- b) 本框架结构的倒塌机理为: 第 4 榀框架柱由于轴压比大, 屈服后延性较差, 承载力下降迅速, 导致整个结构破坏。

基于上述计算结果, 将混凝土的极限抗压强度  $f_u$  做适当调整, 由  $20 \text{ MPa}$  提高到  $27 \text{ MPa}$ , (相当于在工程设计中, 采取增加箍筋的方法提高混凝土破坏的延性), 再次进行静力推覆分析, 计算得到的结构顶层位移和基底剪力的关系曲线见图 12。

从图 12 看出, 提高混凝土抗压延性后, 整个结构的延性得到很大提高, 极限顶点位移增加了  $1/3$  (从  $0.6 \text{ m}$  增加到  $0.8 \text{ m}$ )。提高混凝土的延性对承载力的影响很小, 这主要是因为本框架破坏时底层柱为大偏心破坏, 承载力主要由钢筋强度控制。

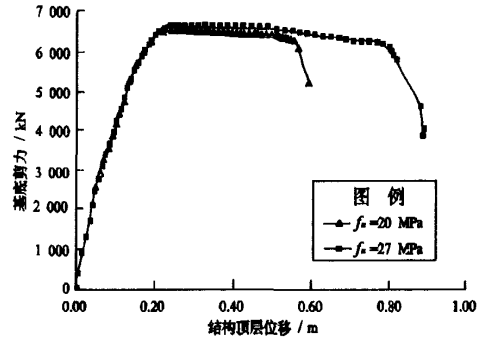
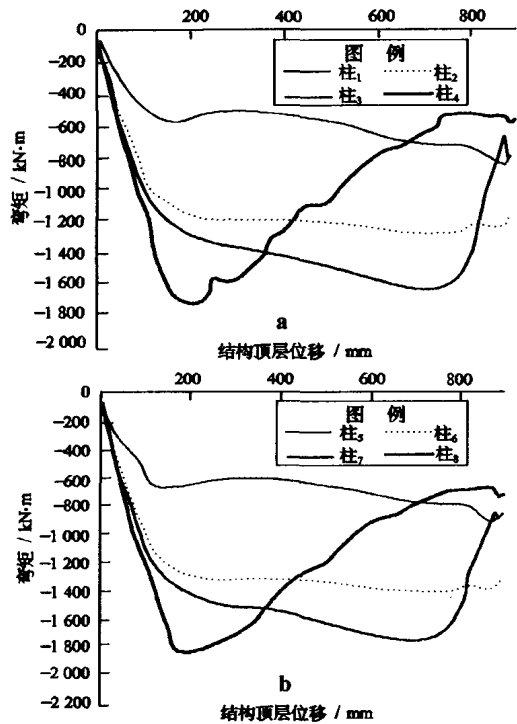


图 12 基底剪力—顶层位移关系  
 Fig. 12 Shearing force of base versus displacement of top floor

此时计算得到的底层柱脚的内力- 结构顶点位移曲线见图 13。破坏机理和  $f_u = 20 \text{ MPa}$  时的算例一样, 都是第 4 榀框架柱屈服后, 在轴力和弯矩的共同作用下承载力下降而破坏。只是由于此时混凝土延性较高, 故而承载力下降较慢, 结构的整体延性也表现得比较好。



a 边柱弯矩变化      b 中柱弯矩变化  
 图 13 底层各柱的内力结果 ( $f_u = 27 \text{ MPa}$ )  
 a Variation of bend moment of side column  
 b Variation of bend moment of middle column  
 Fig. 13 Internal force result of each column of the bottom ( $f_u = 27 \text{ MPa}$ )

### 4 地震倒塌分析

对上述结构施加 EL-Centro 波,并将峰值加速度提高到  $2\,000 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$  (由于该结构比较坚固,所以地震峰值加速度设得比较大以保证结构能够倒塌)。计算得到结构倒塌过程见图 14。从图 14 中可以得到结构的倒塌过程为:首先在 7 s 左右结构的第 8 层柱子发生破坏,接着,在 10 s 左右,底层柱子也发生破坏,最后结构在第 8 层和底层发生倒塌。

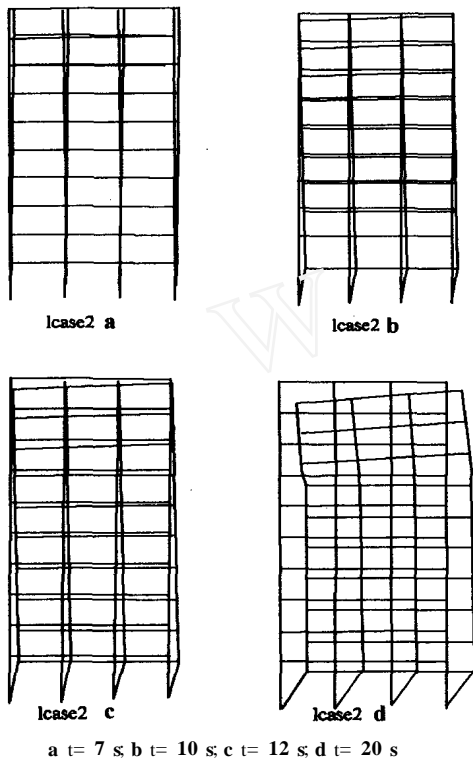


图 14 结构倒塌过程  
Fig. 14 Process of structure collapsing

计算得到结构各层变形发展情况见图 15,同样可以清楚地看出结构的破坏过程。结构的顶层位移时程曲线见图 16,结构在 7 s 后已经出现破坏,而后,结构向 X 正方向倒塌,故而位移时程曲线一直发散。

需要说明的是,在本次计算中,设定的计算收敛标准为力的相对误差小于 5% 或者位移的相对误差小于 0.5%。从计算结果看,一直计算到结构破坏都收敛得很好,这说明本程序具有较强的非线性分析能力。

### 5 结论

在 MSC Marc 2003 有限元分析软件程序的基础上开发的钢筋混凝土纤维模型 THUFIBER 可以较好

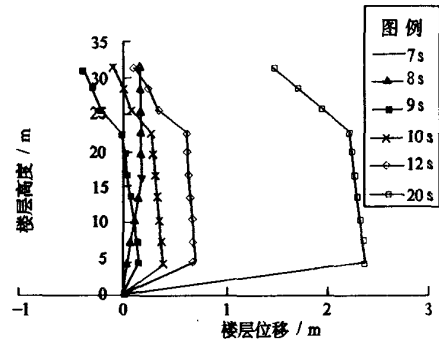


图 15 结构各层变形发展  
Fig. 15 Deformation development of each floor of structure

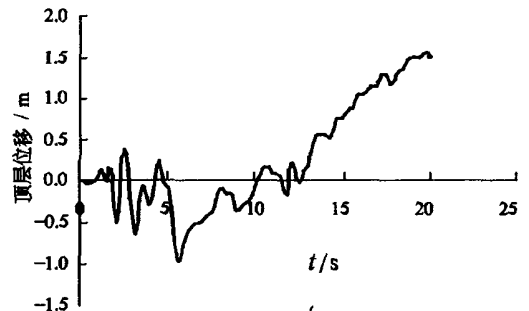


图 16 结构的顶层位移时程  
Fig. 16 Time process of displacement of top floor of structure

地模拟框架结构在静力推覆荷载和动力荷载下的变形和破坏过程。它可以得到底层柱在轴力和弯矩共同作用下软化破坏过程,清晰地显示框架结构的破坏机理,而且计算过程稳定,收敛迅速,这证明本程序有出色的非线性分析能力,可用于各种结构的倒塌分析。

### 参考文献:

- [1] Lu X. Z., Yang N., Jiang J. J. Application of computer simulation technology for structure analysis in disaster [J]. Automation in Construction, 2004, 13(5): 597-606
- [2] 陆新征,江见鲸. 世界贸易中心飞机撞击后倒塌过程的仿真分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 8-10
- [3] 周健,屈俊童,贾敏才. 混凝土框架倒塌全过程的颗粒流数值模拟[J]. 地震研究, 2005, 28(3): 289-293
- [4] 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
- [5] 叶列平. 混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社, 2002
- [6] 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

(英文摘要见第 18 页)

地区各观测井的异常指标进行评判, 结果表明, 多数观测井的异常指标已达到了评判标准, 表明其异常指标是可行的; c) 从山西各观测井的异常指标来看, 不同构造部位、井-含水层系统, 以及区域地震活动性、井孔映震能力等方面的差异, 所积累的震例数差别较大, 从而造成各观测井异常指标各不相同; d) 在进行地震预报时, 首先要以异常指标高的观测井作为主要依据, 异常指标较低的观测井仅作为参考; e) 单井预报具有较大的局限性, 研究单井异常指标是为了给多井、多观

测项目的综合预报提供良好的基础, 最终仍应走综合预报之路。因此, 建议各学科在进行地震预报之前, 首先对观测资料的异常指标进行综合评判, 这样可减少地震预报中的虚报、漏报等情况。

**参考文献:**

[1] 黄祖彭 单井异常指标的判定[M] 国家地震局监测预报司 实用化攻关研究文集(水位水化专辑). 北京: 地震出版社, 1990: 103-107.

**Synthetical Evaluation of Anomaly Index of Groundwater Level Shanxi Province**

ZHANG Shu-liang, SU Yan

(Earthquake Administration of Shanxi Province, Shanxi, Taiyuan 030021, China)

**Abstract** Based on the earthquake example data of underground water level on observation wells in Shanxi province accumulated since 1993, the anomalies during the period of time are combed one by one according to the experienced anomaly index which can be adopted. Then the  $M > 4$  earthquakes around observation wells are combed out according to each example earthquake, and two series of anomaly and earthquakes of some well during some period of time are gained finally. Synthetic judgment to anomaly index of single well is made based on calculation with related formula and the synthetic index of corresponding degree of anomaly of each observation well to earthquake is gained.

**Key words:** Underground water level; Anomaly index; Shanxi

(上接第 6 页)

**Huaxian, shaanxi Strong Earthquake Infrequent Secondary Disaster Chain Caused by the Earthquake in the World-Talk from Engineering Ground Condition**

WANG Ru-diao

(Earthquake Administration of Linfen City Shanxi Province, Shanxi Linfen 041000, China)

**Abstract** Research result from historical geography indicates that the long-term flooding of the small north main flow of the Yellow River after 1570 is triggered by the raise of riverbed of the Yellow River at Tongguan, Shanxi, which was caused by the 1556 Huaxian, Shaanxi, strong earthquake. The frequent flooding produced environment disaster on both two banks. Counties of Ronghe and Puzhou, Shanxi, and county of Chaoyi, Shaanxi in Ming dynasty, usually thought to be located at the alluvial flat of the Yellow River, as they are now, when the Huaxian earthquake occurred, finally abandoned due to the environment disaster for 400 years.

**Key words:** The Huaxian earthquake; Environment; Secondary disaster chain

(上接第 11 页)

**Collapse Simulation of High-Rise Structure of Concrete under the Action of Static and Dynamic Load**

LU Xin-zheng, Miao Zhi-wei, JIANG Jian-jing, YE Lei-ping

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

**Abstract** Based on program of MSC.Marc finite element analysis software, a program THUFIBER for fiber model of pole system structure of ferroconcrete is developed. In the program, concrete and rebar in component of construction are simulated separately by different fibers, expressing more accurately hysteretic property of material. In order to test calculation ability of the program, static elastic-plasticity analysis and dynamic time history analysis on a high-rise frame structure of reinforced concrete are carried out by using this program in the paper. The result indicates that THUFIBER has remarkable ability to analyze nonlinear problems and can simulate collapse of structure.

**Key words:** Earthquake; Fiber model; Concrete; Simulation of collapse

