

倒塌分析中框架及土体的模型

陆新征

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要: 以有限元软件 MSC Marc 为平台, 利用其方便的二次开发功能, 开发钢筋混凝土框架结构和土体的计算模型. 框架梁柱采用钢筋混凝土杆系结构的纤维模型 THUFIBER 模拟, 地基土则采用一种改进的 Drucker-Prager 模型来模拟. 计算结果表明, 基于 MSC Marc 出色的非线性分析能力和二次开发能力, 可以很好进行结构倒塌过程中上部结构和土体关系的模拟.

关键词: MSC Marc; 钢筋混凝土框架; 纤维模型; 土体模型; 有限元

中图分类号: TP391.9; O241.82; TU398.1

文献标志码: A

Frame and Soil Model in Collapse Analysis

LU Xinzheng

(Dept. of Civil Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the common finite element software MSC. Marc, with the convenient secondary development capacity, the special models for reinforced concrete frame and soil are developed, in which the reinforced concrete beams and columns are simulated with the fiber model based program THUFIBER, while the soil is simulated with a modified Drucker-Prager model. The computational results show that with the outstanding nonlinear capacity and secondary development function, the superstructure and soil can be properly simulated.

Key words: MSC Marc; reinforced concrete frame; fiber model; soil model; finite element

0 引言

在地震、火灾等自然和人为灾害下, 钢筋混凝土框架结构可能会发生倒塌, 并进而对地下结构产生影响. 因此, 为评估结构的安全性和估计灾害损失, 需要正确模拟上部结构的倒塌过程及其对下部结构产生的影响. 结构倒塌分析是一个具有很高难度的研究课题, 清华大学土木工程系基于 MSC Marc 软件优异的非线性分析能力和二次开发能力, 开发了用于分析钢筋混凝土框架结构的纤维模型程序 THUFIBER 和改进的 Drucker-Prager 土体模型程序. 可以真实模拟钢筋混凝土结构的破坏过程, 现分别介绍如下.

1 杆系纤维模型程序 THUFIBER

基于杆系结构力学和一维材料本构的纤维模型是分析钢筋混凝土框架结构非线性行为较好的数

值模拟方法.^[1,2] 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, 并用单轴应力应变关系描述该纤维材料的特性, 纤维间的变形协调则采用平截面假定.

为合理反映受压混凝土的约束效应、在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^[3], 同时考虑钢筋混凝土中纵、横向配筋对混凝土约束效应的影响(见图 2). 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的主体部分, 并合理考虑反复受力过程中的刚度和强度退化. 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^[4]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2)

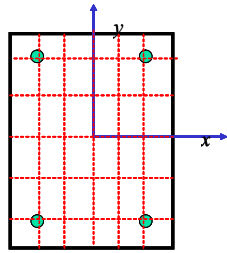


图1 纤维模型截面划分示意图

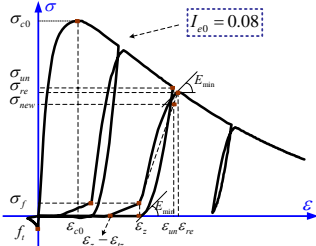
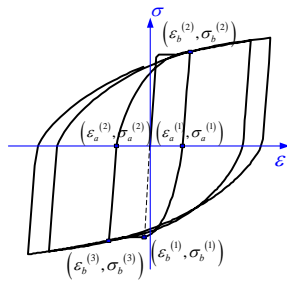
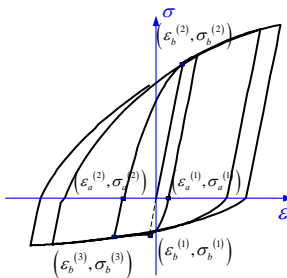


图2 混凝土应力-应变曲线

钢筋本构基于 Légeron 等模型,在再加载路径上合理考虑钢筋的 Bauschinger 效应,并与钢筋的材性试验结果吻合良好.[3] 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,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

2 改进的 Drucker-Prager 模型

本文所采用的改进的 Drucker-Prager 模型的主要特点有(以下描述中应力的方向采用土力学中的规定):

(1) 采用 Drucker-Prager 屈服准则描述土在剪切作用下的弹塑性行为,屈服函数表示为:

$$f_{DP} = \sqrt{J_2} - \alpha_0 I_1 - \sigma_{eq} = 0 \quad (1)$$

式中: I_1, J_1 分别为第一应力不变量和第二偏应力不变量; α_0 和 σ_{eq} 是与土体粘聚力 c 和内摩擦角 φ 相关的常数。

(2) 如果土体本构模型采用关联流动法则,那么计算得出的剪胀将偏大,与事实不符,所以该本构模型采用非关联流动法则减小剪胀以符合实际情况,如图4所示. 塑性势的函数表达式为:

$$g_{DP} = \sqrt{J_2} - \alpha_1 I_1 \quad (2)$$

式中: I_1, J_2 分别为第一应力不变量和第二偏应力不变量, α_1 是与膨胀角相关的常数;

(3) 模型中需要定义一条静水压力与体应变的关系曲线,如图5所示. 在土体发生剪切屈服之前,加载时应力应变状态按照所定义的曲线发展变化,变形模量随应力水平的提高而增大;卸载时则按照所给定的卸载模量线性变化,从而能够反映土体静水压力作用下产生的不可恢复的体积变形,以及土体压缩过程中体变模量逐渐增大的强化特性。

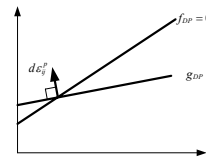


图4 非关联流动法则示意

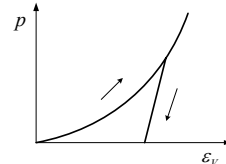


图5 静水压力与体应变的关系

对单个土体单元进行静水压力作用下的受压计算和考虑围压的拟三轴受力分析,结果证明本文建议的模型可以描述土体的多种复杂力学行为。

基于 THUFIBER 程序和土体本构模型,就可以在 MSC Marc 软件中建立上部结构和基础共同计算的模型,见图6。

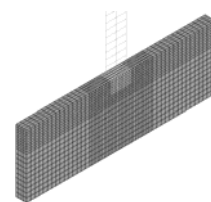


图6 上部结构和地基协同计算模型

3 算例

对一框架结构在基底输入 EL-Centro NS 波,并将峰值加速度提高到 2 000 gal (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 7 所示,首先在 2 s 左右结构的第 8 层柱子发生破坏,接着在 3 s 左右,底层柱子也发生破坏,最后结构在第 8 层和底层发生破坏而倒塌.如果对结构的第 8 层进行加强,则最后得到的破坏模式如图 8 所示.可见计算结果和理论分析得完全吻合,进一步证明本文提出模型的有效性.计算得到结构各层变形发展情况见图 9,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如图 10 所示,结构在 6 s 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.

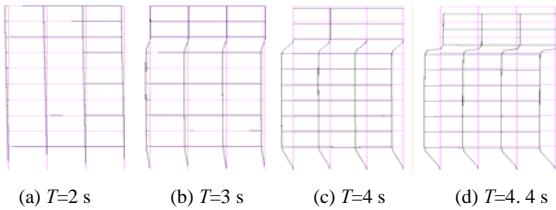


图 7 未加强结构倒塌过程

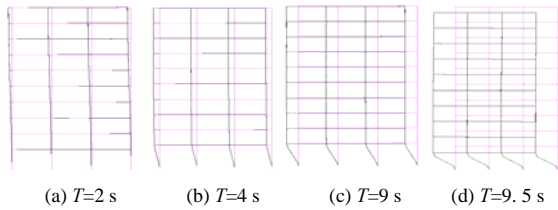


图 8 加强后结构倒塌过程

参考文献:

[1] 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.
 [2] 陆新征, 缪志伟, 江见鲸, 等, 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 (2): 7-11.
 [3] Légeron F, PAULTRE P, MAZAR J. Damage mechanics modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005 (6): 946-954.
 [4] ZATAR W, MUTSUYOSHI H. Residual displacements of concrete bridge piers subjected to near field earthquakes[J]. ACI Structural Journal, 2002 (6): 740-749.
 [5] 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[P]. 北京:清华大学, 2003.
 [6] 李广信编. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

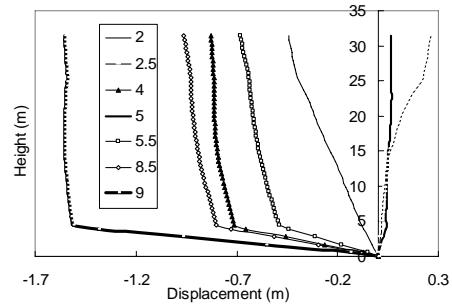


图 9 加强后结构层间位移变化

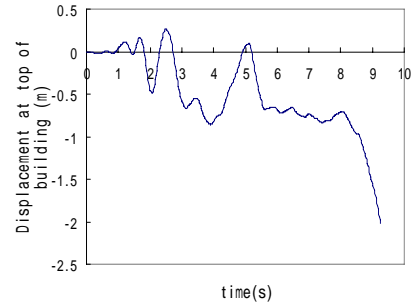


图 10 加强后结构顶点位移时程

4 结论

MSC Marc 软件具有很强的非线性分析能力和非常方便的二次开发能力,考虑到目前通用有限元软件一般缺少针对土木工程的适当模型,而专用土建结构分析软件的能力又往往非常有限,因此, MSC Marc 软件以及基于 MSC Marc 开发的一系列非线性分析程序,将是解决土木工程问题的有力工具.

(编辑 廖粤新)