

文章编号:1671-2021(2008)01-0049-05

# 基于通用有限元程序和微平面模型分析 复杂应力混凝土结构

缪志伟<sup>1,2</sup>, 陆新征<sup>1,2</sup>, 李易<sup>1,2</sup>, 叶列平<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**目的 为了能准确模拟混凝土的各种复杂力学行为, 从而对复杂应力混凝土结构进行准确分析. 方法 基于微观层次的混凝土本构模型——微平面模型原理, 将其与具有优越非线性分析能力的通用有限元程序 MSC. MARC 相结合, 开发了相关程序, 并对混凝土在单轴、双轴、三轴、往复受力等各种应力状态下的行为和一片实际剪力墙的滞回加载进行了模拟分析计算. 结果 通过与相关试验结果比较, 验证了程序的可靠性, 并指出了现有通用有限元程序在模拟复杂应力混凝土受力行为上的问题. 结论 本程序可较好地应用于分析复杂混凝土结构.

**关键词:**混凝土有限元; 微平面模型; 宏观本构模型; 非线性分析

**中图分类号:** TU375      **文献标识码:** A

在钢筋混凝土结构的非线性分析中, 混凝土的本构模型对于分析结果有重大影响. 对于混凝土这样的脆-弹-塑性材料, 目前有两大类材料本构模型来模拟: 宏观模型和微观模型. 对于宏观模型, 最常用的就是经典的宏观弹塑性本构模型<sup>[1]</sup>. 虽然经过多年的研究, 这类模型取得了较大的进展, 但是在描述混凝土的复杂受力状态时, 往往不能给出准确地结果. 而微观模型则以 Bazant 和 Oh 所提的微平面模型 (microplane model) 为代表<sup>[2]</sup>. 经过 20 多年的研究, Bazant 和他的研究组已经逐步完善了这一模型, 使之从最初仅适用于受拉开裂情况的第一代, 发展到了现在能够较好地描述三轴受力等复杂应力应变状态的第四代模型 (M4)<sup>[3]</sup>. 微平面模型为开发新一代复杂应力条件下混凝土结构的受力分析程序奠定了基础, 但微平面模型也存在着数值计算量大和收敛过程复杂的问题. 笔者将微平面模型嵌入通用有限元程序, 使两者相结合, 利用通用有限元程序中的高效求解器和非线性数值解法, 有效扩大了微平面模型的应用范围, 使之可以用于诸如剪力墙

等复杂应力混凝土结构的计算分析, 并通过比较说明现有通用有限元程序中混凝土本构模型存在的问题, 显示了该模型的优越性.

## 1 微平面模型基本原理

作为一种复合的多相材料, 混凝土的内部结构非常复杂. 宏观本构模型将混凝土看作是均匀的各向同性材料, 以简化分析. 但是从微观层次来看, 混凝土是一种不均匀的多相材料, 材料内部存在着不少空隙与微裂缝, 特别是混凝土中的骨料与水泥胶体之间的交界面是一个薄弱环节, 对混凝土的力学性质有着重要影响. 微平面模型正是从混凝土材料的这种微观结构出发, 将材料内部存在于骨料和水泥胶体之间的各方向交界面定义为微平面 (见图 1(a)), 并将此作为直接研究对象而建立起非线性应力应变关系. 有关微平面模型的基本假定, 模型具体关系式以及该模型的研发改进历程的详细叙述可以参阅文献 [2-6], 笔者仅对模型的主要框架做一个大致介绍. 微平面模型的主要流程可以用图 2 表示. 取出材料的一个

收稿日期: 2007-07-15

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

作者简介: 缪志伟 (1981—), 男, 博士研究生, 主要从事结构抗震研究.

微元体,将其视为由一系列具有不同方向的微平面按照一定排布方式组成(见图1(b)),其中,每个微平面的方向可以由一个单位法向矢量  $n$  表示.首先,通过投影关系(见图1(c))建立了微元体的宏观应变张量  $\epsilon_{ij}$  和其各个微平面上的微观应变分量  $N, M, L$  之间的关系;然后在各微平面上的微观应变分量  $N, M, L$  和微观应力分量  $N, M, L$  之间建立非线性的应力应变关系;这样在求得各微平面的微观应力分量之后,可通过虚功原理建立这些微观应力分量和宏观应力张量之间的关系,从而得到宏观应力张量  $\sigma_{ij}$ .其中值得注意的是,在建立各微平面上的微观应变和应力分量之间的非线性应力应变关系时,该模型还采用了应力边界的概念,即对于每种应力分量,如果当前值没有超过对应于该应力分量的应力边界,则该应力分量处于弹性范围;若当前值超过相应的应力边界,则该分量加载时沿着该应力边界进行,从而反映出混凝土的非线性应力应变关系特性.

发,将混凝土材料内部存在于骨料和水泥胶体之间的各方向薄弱界面作为直接研究对象,通过定义在这些微平面上的非线性应力应变,描述材料受力过程中发生在这些薄弱面上的滑移、拉伸开裂、侧向约束等现象,进而获得宏观的应力张量和应变张量.故微平面模型相对于宏观弹塑性模型而言概念上更为清晰明确;(2)非线性应力应变关系直接定义在各微平面上的微观应力和微观应变分量之间,相对于宏观本构模型中在宏观应力和应变张量之间建立关系,表达上要简单清晰很多;(3)在加载过程中,各微平面上的应力应变相对独立地发展,而且各应力分量都有自己独立的应力边界来区分弹性和塑性阶段,相当于可以同时考虑很多个加载(屈服)面,而目前常用的宏观本构模型只能考虑有限的几个加载(屈服)面,因此,该模型可以更准确的模拟混凝土在复杂受力状态下的力学行为.

## 2 微平面模型在通用有限元程序中的集成

微平面模型固然有着诸多优点,但同时也存在计算量较大、数值收敛过程复杂的缺点.而通过将其与高性能的非线性通用有限元程序相结合,利用通用程序计算效率高、数值稳定性好、前后处理方便的特点,不仅可以有效地促进微平面模型成果的实用化,而且大大简化了程序开发工作量.笔者利用 MSC 公司开发的具有优越非线性分析能力和良好二次开发能力的通用有限元程序 MSC. MARC 来完成微平面模型的集成.在 MARC 的 user subroutine 中,提供了多种添加材料本构模型的子程序,利用其中的子程序 HYPLEA2 来完成微平面模型的集成<sup>[7]</sup>.

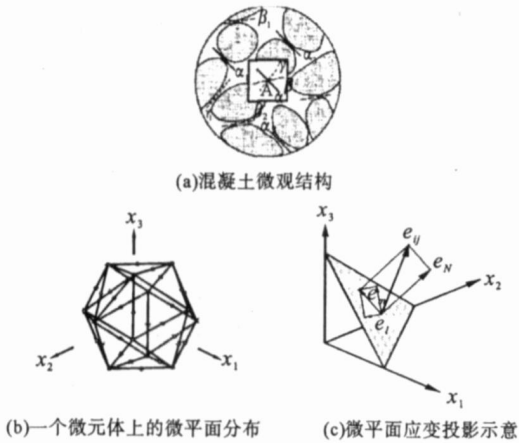


图1 微平面模型示意图

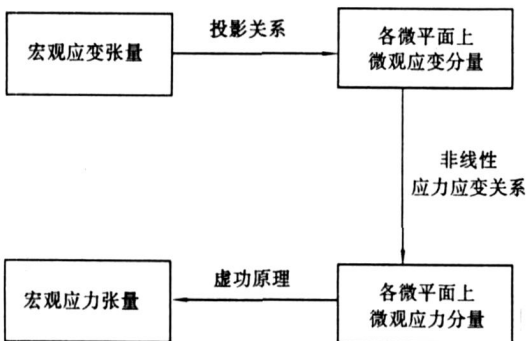


图2 微平面模型流程图

相对于宏观本构模型,微平面模型在模型机理上有以下优势:(1)从混凝土材料的微观结构出

## 3 程序验证及应用

### 3.1 模型验证

为验证微平面模型在混凝土有限元分析计算应用中的有效性,利用微平面模型对混凝土在三轴、双轴、单轴等各种应力状态下的行为进行了模拟分析计算,并与相关的试验结果<sup>[8]</sup>进行了比较.结果如图3~图9所示.

同时,考虑到目前比较常用的几种商业有限元分析软件 MSC. MARC, ABAQUS, ANSYS 中集成了很多成熟的基于塑性理论的宏观本构模

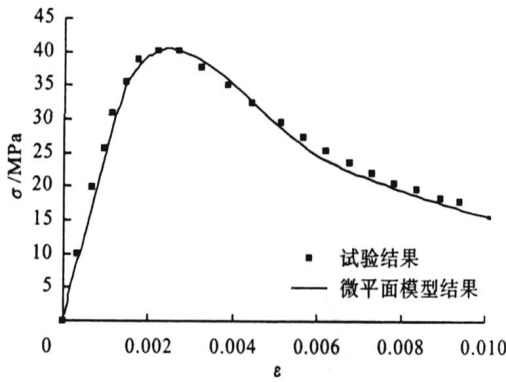


图 3 单轴应力压缩

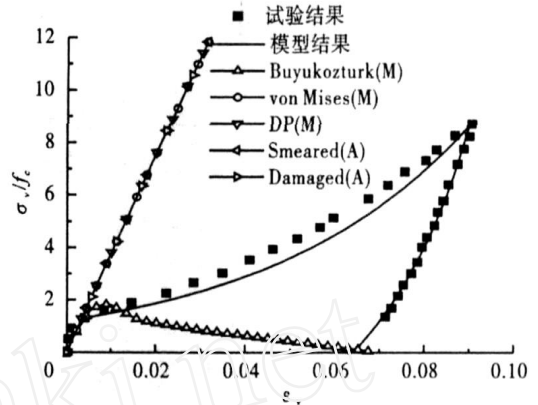


图 7 静水压缩不同模型计算结果

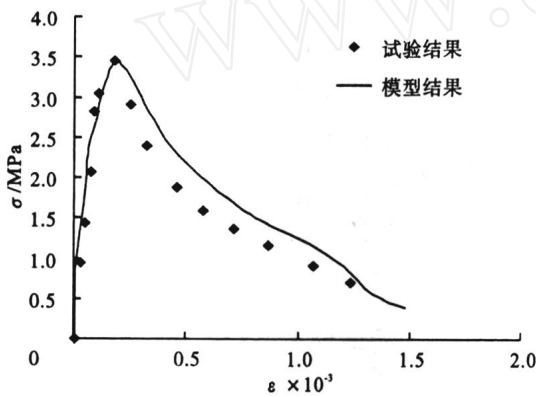


图 4 单轴应力受拉

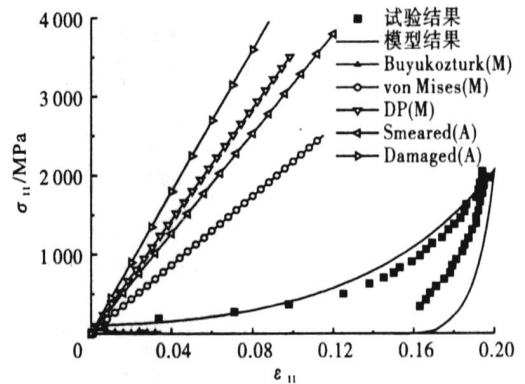


图 8 单轴应变压缩不同模型计算结果

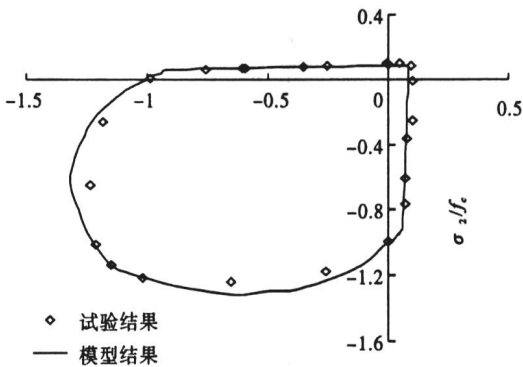


图 5 双轴应力作用下混凝土强度

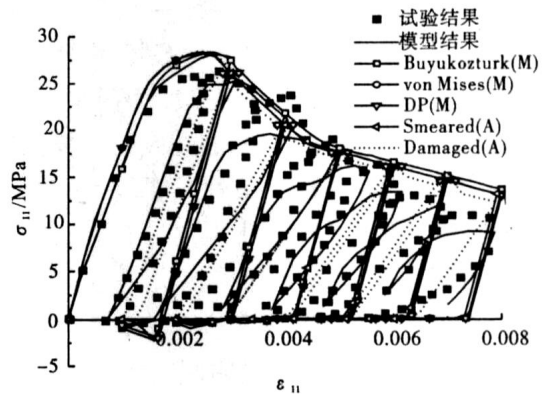


图 9 单轴受压往复加载不同模型计算结果

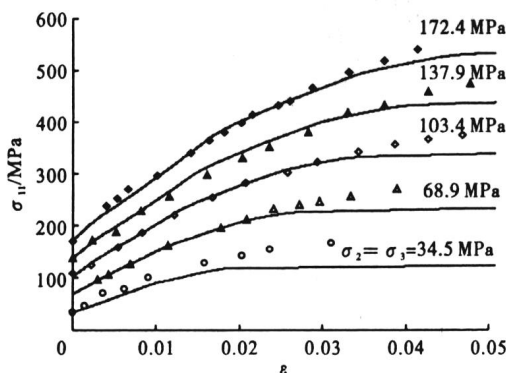


图 6 三轴压缩(不同侧向围压下的本程序计算结果)

型<sup>[1]</sup>,为了对比说明微平面模型相对于这些宏观模型的优势,从这些软件中选取了几个具有代表性的混凝土宏观本构模型,也进行了混凝土三轴和单轴受压往复加载应力状态下的模拟分析,并与试验结果和相应的微平面模型计算结果进行了比较. MARC 中所选取的本构模型如下: von Mises Plasticity, Drucker-Prager plasticity 和 Buyukozturk Concrete 模型<sup>[1]</sup>. ABAQUS 中所选取的本构模型如下: Concrete smeared cracking 和 Concrete damaged plasticity 模型<sup>[1]</sup>. ANSYS 软件中提供的

混凝土本构模型也是基于 von Mises 或 Drucker - Prager 塑性准则,和 MARC 相应计算结果基本一致,这里不再赘述。

图 3 ~ 图 9 中的计算结果表明,微平面模型对混凝土在单轴,双轴,三轴受力等各种应力状态下的行为都可以进行较好的模拟,计算结果与试验结果吻合良好。而目前通用有限元分析软件中常用的几个宏观本构模型,计算混凝土在空间复杂应力状态特别是高静水压作用下的受力行为时,存在很大的缺陷,分别说明如下

(1) 图 7 中,在静水压缩作用下,采用除 Buyukozturk 外的几种模型计算均得到线弹性的反应曲线,而采用 Buyukozturk 模型的计算结果显示混凝土在很小的静水压力下,就会被压坏,这显然都是不符合实际试验结果的。主要原因是 von Mises, Drucker - Prager 以及 Concrete smeared cracking 和 Concrete damaged plasticity 模型的屈服面沿着负静水压轴的方向是开口的,不存在帽盖,而静水压缩加载是沿着负静水压轴方向进行的,这样导致加载永远不会达到屈服面,所以采用这几种模型计算,混凝土的反应始终处于线弹性段。但采用 Buyukozturk 模型时,其屈服面表达式如下

$$\sqrt{3} I_1 + I_1^2 + 3J_2 - \dots^2 = 0. \quad (1)$$

这样的屈服面在子午面上的投影曲线为一个椭圆,其与负静水压力轴的交点即为静水压缩加载下的屈服荷载。因此采用 Buyukozturk 模型时,混凝土在静水压力作用下很快屈服,而该模型采用的强化法则又是强化软化型的,因此混凝土承载力很快达到峰值并进入下降段。

(2) 图 8 中,在单轴应变压缩状态下,由于混凝土在竖向压力作用下产生的侧向膨胀受到刚性约束,使其可以承受较高的压力,最终在较高的围压下发生屈服及剪缩现象。由图示结果可以看出,与静水压缩作用的计算结果类似,采用其他几种模型计算得到线弹性的反应曲线,而采用 Buyukozturk 模型的计算结果显示混凝土在较小的轴向压力下,就会被压坏,显然都不符合实际试验结果。造成这些结果的原因仍然是由于这些模型中的屈服面及强化法则不符合混凝土在高静水压下的力学特性。

(3) 图 9 中,结果表明微平面模型可以较好地考虑混凝土材料在往复加载过程中的强度退化和刚度退化,损伤累积等特征,计算结果与试验结果

吻合较好,因此,可以用于混凝土结构的滞回加载分析计算,而其他几种宏观本构模型则大多数均不能考虑混凝土在往复加载中的损伤累积等特征,仅有 Concrete damaged plasticity 模型可以部分考虑这些效应。

### 3.2 模型应用

以上算例结果表明,微平面模型可以对混凝土在单轴,双轴,三轴,往复加载等各种应力状态下的行为进行精确的模拟,因而可以用于诸如剪力墙等复杂应力混凝土结构的分析计算中。笔者结合清华大学土木系所开发的分层壳剪力墙单元<sup>[9]</sup>,并利用微平面模型对一片钢筋混凝土剪力墙进行了静力往复加载分析。本算例模型取自清华大学所做的混凝土高墙试验<sup>[10]</sup>,试件高 1 900 mm,宽 1 000 mm,厚 100 mm,剪跨比为 1.9,其他参数详见文献[10]。结构有限元计算模型和计算结果分别如图 10 ~ 11 所示。

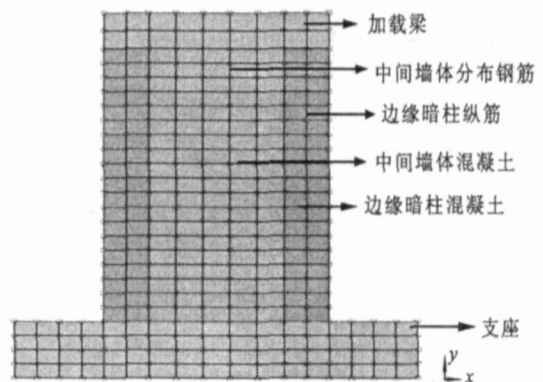


图 10 剪力墙有限元计算模型

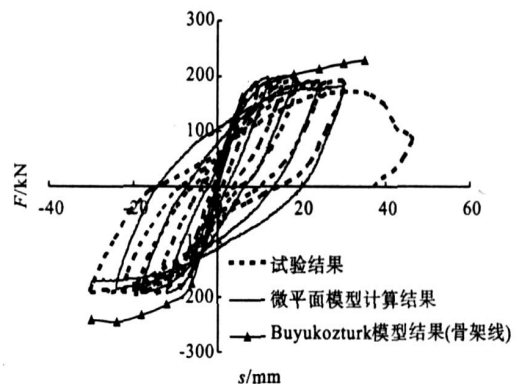


图 11 剪力墙计算结果(荷载 - 位移关系)

其中,图 11 中还同时给出了采用常用的 Buyukozturk 混凝土模型的计算结果(骨架线)作为对比。作为一种二维平面受力构件,剪力墙与梁、柱等细长构件相比,截面尺寸大,受力变形行为比较复

杂,由图 11 结果可见,采用 Buyukozturk 混凝土模型计算得到的荷载 - 位移骨架线随着位移增大与试验结果相差增大,这说明往复加载过程中,由于结构内部损伤造成的强度退化在此模型中不能得到体现。而微平面模型的计算结果,则显示其能够考虑到往复加载过程中的混凝土强度退化,损伤累积等特征,从而较好地模拟剪力墙这类复杂结构构件的受力特性,因此可以推广应用于复杂受力状态的混凝土结构分析计算中。

#### 4 结 论

(1) 微平面模型从混凝土材料的微观结构出发,相对于宏观弹塑性模型来说,概念更为清晰明确,表达上更为简单。将微平面模型嵌入通用有限元程序,使两者相结合,利用通用有限元程序中的高效求解器和非线性数值解法,可以有效扩大微平面模型的应用范围。

(2) 应用微平面模型可以对混凝土在单轴、双轴、三轴往复加载等各种复杂应力状态下的行为进行较好的模拟。与目前通用有限元分析软件中常用的混凝土本构模型相比,具有更大的优越性。

(3) 微平面模型能够考虑到往复加载过程中混凝土的强度退化,损伤累积等特征,从而较好地模拟剪力墙其复杂结构构件的受力特性,可推广应用于复杂受力状态的混凝土结构分析计算中。

#### 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 ] Bazant Z P,Oh B H. Microplane model for progressive fracture of concrete and rock[J]. Journal of Engineering Mechanics,ASCE,1985,111(4):559 - 582.
- [ 3 ] Bazant Z P,Caner F C,Carol I,et al. Microplane model M4 for concrete. I:Formulation with Work - Conjugate deviatoric stressAlgorithm and calibration [J]. Journal of Engineering Mechanics,ASCE,2000,126(9):944 - 953.
- [ 4 ] Bazant Z P,Prat P C. Microplane model for brittle - plastic material. I:Theory[J]. Journal of Engineering Mechanics,ASCE,1988,114(10):1672 - 1688.
- [ 5 ] Bazant Z P,Xiang Y,Prat P C. Microplane model for concrete. I:Stress(strain boundaries and finite strain [J]. Journal of Engineering Mechanics,ASCE,1996,122(3):245 - 254.
- [ 6 ] Bazant Z P,Xiang Y,Adley M D,et al. Microplane model for concrete. II:Data delocalization and verification[J]. Journal of Engineering Mechanics,ASCE,1996,122(3):255 - 262.
- [ 7 ] 陆新征,江见鲸. 考虑不同破坏模式的二维混凝土本构模型[J]. 土木工程学报,2003,36(11):70 - 74.
- [ 8 ] Caner F C,Bazant Z P. Microplane model M4 for concrete. II:Algorithm and calibration[J]. Journal of Engineering Mechanics,ASCE,2000,126(9):954 - 961.
- [ 9 ] 叶列平,陆新征,马千里,等. 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.
- [ 10 ] 陈勤. 钢筋混凝土双肢剪力墙静力弹塑性分析[D]. 北京:清华大学土木工程系,2003.

## Analysis for Concrete Structures under Complicated Stress Conditions Based on General Purpose FE Software and Microplane Model

MIAO Zhiwei<sup>1,2</sup>, LU Xinzhen<sup>1,2</sup>, LI Yi<sup>1,2</sup>, YE Lieping<sup>1,2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing China, 100084; 2. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing China, 100084)

**Abstract:** In order to precisely simulate the complicated mechanical behavior of concrete so as to accurately model the real complex concrete structures, a novel concrete constitutive model - microplane model, is introduced and integrated into the general purpose finite element (FE) software of MSC. MARC which has outstanding nonlinear capacity. Concrete specimens under uniaxial, biaxial, triaxial and cycle loading are simulated with the proposed program as well as a reinforced concrete (RC) shear wall under cycle loading. Comparing the numerical predictions of proposed program with the test results, good agreements can be found. And the problems of concrete models in common FE software are pointed out, when they are used to simulate complicated concrete mechanical behaviors. The results show that the proposed program can precisely simulated the complicated concrete structures.

**Key words:** concrete finite element; microplane model; constitutive models; nonlinear analysis