

09/06/17:2009年度第1回材料モデリング分科会資料

金属弾塑性ユーザサブルーチン 作業部会の計画

三菱マテリアル(株) 中央研究所: 瀧澤英男
takizawa@mmc.co.jp

Slide #2

汎用コードでの弾塑性モデル

LS-Dyna (v972)の金属塑性

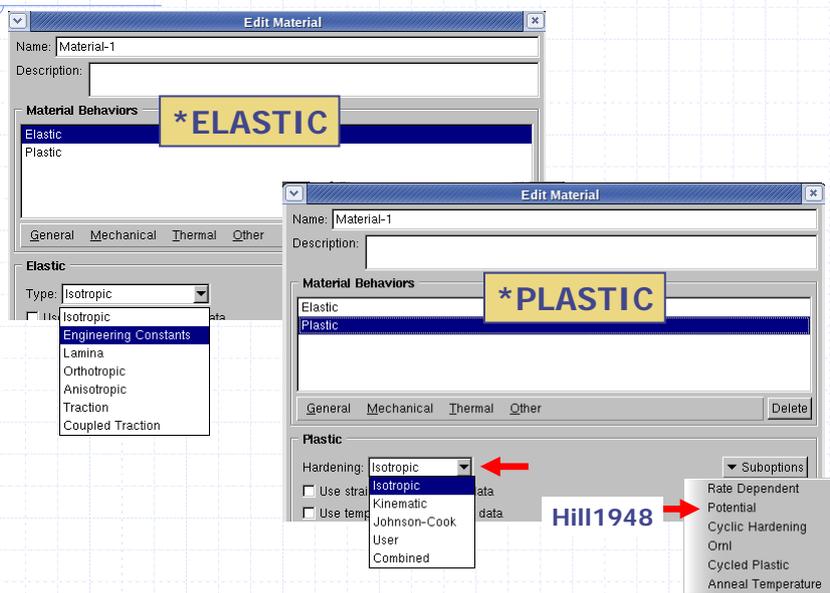
- ◆ TYPE 3 : *MAT_PLASTIC_KINEMATIC
 - 直線硬化特性を持つvonMises複合硬化
- ◆ TYPE 12 : *MAT_ISOTROPIC_ELASTIC_PLASTIC
 - 直線等方硬化vonMises(ソリッド要素向け単純Radial return)
- ◆ TYPE 24 : *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
 - 多直線等方硬化vonMises
- ◆ TYPE 33 : *MAT_BARLAT_ANISOTROPIC_PLASTICITY
 - Barlat(1991),Swift型変形抵抗(または多直線),等方硬化
- ◆ TYPE 33 : *MAT_BARLAT_YLD96
 - Barlat(1996),Swift型変形抵抗(または多直線),等方硬化
- ◆ TYPE 36 : *MAT_3-PARAMETER_BARLAT
 - Barlat(1989),面内三方向r値入力,Swift型変形抵抗(または多直線),等方硬化
- ◆ TYPE 37 : *MAT_TRANSVERSELY_ANISOTROPIC_ELASTIC_PLASTIC
 - Hill(1948),面内等方性,線形硬化(または多直線),等方硬化
- ◆ TYPE 39 : *MAT_FLD_TRANSVERSELY_ANISOTROPIC
 - 上記のFLD付
- ◆ TYPE 103 : *MAT_ANISOTROPIC_PLASTIC
 - Hill(1948)面内異方性
- ◆ TYPE 122 : *MAT_HILL_3R
 - Hill(1948)面内異方性
- ◆ TYPE 133 : *MAT_BARLAT_YLD2000
 - Barlat(2000),複合硬化モデル,swift/voce/多直線硬化
- ◆ TYPE 41-50 : *MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS
 - ユーザ定義のサブルーチン利用

Abaqus (6.8.4)の金属塑性

- ◆ *MATERIAL
- ◆ *ELASTIC
 - TYPE=ISOTROPIC : 等方弾性特性の定義
 - TYPE=ORTHOTROPIC : 直交異方弾性特性の定義
 - TYPE=ANISOTROPIC : 完全異方弾性特性の定義
- ◆ *PLASTIC
 - HARDENING=ISOTROPIC : 等方硬化
 - HARDENING=KINEMATIC : 移動硬化
 - HARDENING=COMBINED : 複合硬化
 - HARDENING=USER : UsrSubで定義
- ◆ *POTENTIAL : Hill(1948)
- ◆ *USER MATERIAL
 - 構成式をUserSubroutineで指定する場合は, UsrSub: UMAT/VUMATを参照する.

Abaqus (6.8.4)の金属塑性

Slide #5



▲ MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION

MITSUBISHI

MSC.Marc (2008r1)の金属塑性

Slide #6

- ◆ 材料モデルオプション : 材料特性の定義
 - ISOTROPIC : 弾性特性の等方性
 - ORTHOTROPIC : 弾性特性の直行異方性
 - ANISOTROPIC : 弾性特性をUsrSubで決める.
- ◆ 3rd Card series / 2nd Data : 降伏曲面関数の定義
 - VON MISES : von Mises等方材
 - HILL : Hill(1948)
 - BARLAT : Barlat(1991)
 - GEN-PLAST : 一般化塑性モデル
- ◆ 3rd Card series / 3rd Data : 硬化則の定義
 - ISOTROPIC : 等方硬化
 - KINEMATIC : 移動硬化
 - COMBINED : 複合硬化
- ◆ 4th Card series / 6th Data : 複合硬化の場合のパラメータ
 - F : 複合硬化の場合のパラメータ
 - F=0で等方硬化, F=1で移動硬化, この中間の値で複合硬化挙動を指定.
- ◆ HYPOELASTIC
 - 構成式をUserSubroutineで指定する場合は, 亜弾性体としてUsrSub : HYPELA2を参照する.

▲ MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION

MITSUBISHI

MSC.Marc (2008r1)の金属塑性

材料モデルオプションの選択
ここでの等方性・異方性は「塑性」での特性

塑性特性の入力

降伏曲面

硬化則

ANSYS(11)の金属塑性

- 非弾性
 - 速度非依存性
 - 等方硬化則塑性
 - ミーゼス塑性
 - 2直線近似
 - 多直線近似
 - 非線形
 - ヒル塑性
 - 2直線近似
 - 多直線近似
 - 非線形
 - 一般化異方性ヒルポテンシャル
 - 移動硬化則塑性
 - 移動と等方硬化則の組合せ塑性
 - 速度依存性

- ◆ User Subroutine
 - 構成式をUserSubroutineで指定する場合は、UsrSub : USERMATを参照する。

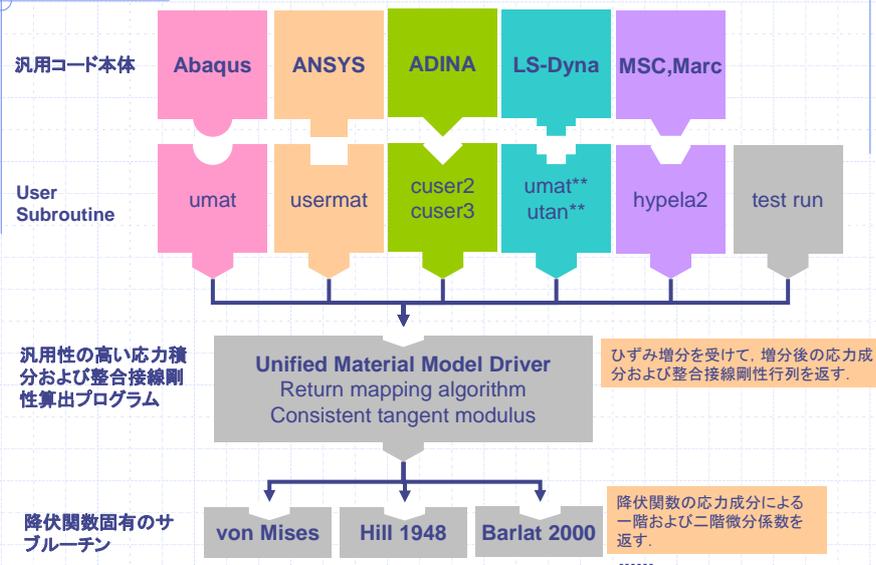
WGの取り組み Background(2008アンケートより)

- ◆ 対象金属:
 - 汎用材としてのアルミと鉄鋼から選択.

- ◆ 高度な異方性降伏関数
 - 汎用コードのBuild-inはHill(1948)まで,
 - LS-Dynaのみ先行の傾向あり.
 - 研究ベースではBarlat YLD2000-2D/YLD2004-18pなど.

- ◆ ユーザサブルーチンへのコーディング
 - 多くの参加者が興味を持っているが、ややハードルが高い.
 - しかしゴム分科会の先行した取り組みで土壌はできつつある.
 - ◆ 2008年度の各ベンダー/ユーザのUS作成活動など.
 - プログラム作成や詳細解説は理論の勉強の成果として明解.

開発サブルーチンのイメージ



計画:内容

◆ 作業部会

- 理論からコードへの落とし込みの勉強会: 輪講形式
 - ◆ FEM固有の考え方やロジック
- プログラム作成
 - ◆ Outlineは運営サイドで軌道に乗せる.
 - ◆ 降伏関数ルーチンの作成: von Mises/Hill48/etc...
 - ◆ 汎用コードI/Fの作成: MSC.Marc/Abaqus/LS-Dyna/etc...
- Verification
 - ◆ Verification std. model の設定.
 - ◆ Von Mises/Hill48 : Built-in構成則との比較(Code to Code)
 - ◆ 理論解との比較

◆ 分科会本会

- 背景となる理論の勉強会
- 進捗状況の報告, テストデータ, サブルーチンの公開.

計画: Schedule

2009年度



2010年度(詳細未定)



作業部会の進め方

◆ 日程:

- 平日 or 休日 時間帯検討中
- 前半: 輪講形式
 - ◆ テキスト案:
 - Introduction to Computational Plasticity
 - ◆ ご指導: 吉田純司先生, 他
- 後半: プログラム解説
 - ◆ 理論からコードへの落とし込み.
 - ◆ 検証モデルの提案と結果報告

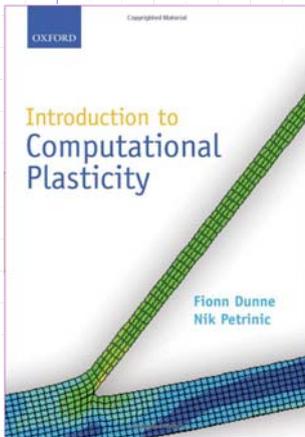
◆ 場所:

- 東京近郊の貸会議室
- 東京農工大の会議室など.

輪講編: テキスト

◆ Introduction to Computational Plasticity

- Fionn Dunne & Nik Petrinic/OXFORD Univ. Press/ISBN 978-0-19-856826-1
- <http://www.amazon.co.jp/dp/0198568266/>
- ¥15,370(09/06/15@amazon.jp), 258 pages



1.6. Implicit and explicit integration

The plastic multiplier given in Equation (5.5) was obtained to ensure that at time t , the yield condition in (5.1) is satisfied. However, the forward integration process does not ensure that the yield condition is also satisfied at time $t + \Delta t$, and as a result, it is possible for the solution, over many time steps, to drift away from the yield surface. This is overcome by means of implicit integration of the equations which has the additional advantage of being unconditionally stable. The accuracy remains dependent, however, on the time step size. We introduce an implicit scheme, known as the radial return method for von Mises plasticity, in Section 5.2.1.

5.2.1 Implicit integration: the radial return method

Figure 5.1(a) shows a von Mises yield surface with a schematic representation of the explicit integration method described above. A step forward in time takes the updated stresses outside of the yield surface. Figure 5.1(b) shows a representation of an implicit scheme. A trial stress increment is chosen which again takes the updated stresses, σ_{i+1}^* , outside of the yield surface. The stress is then updated with an elastic correction to bring it back onto the yield surface at time $t + \Delta t$. In deviatoric stress space, the plane stress von Mises ellipse becomes a circle, and the elastic correction term is always directed towards the centre of the yield surface (the origin of the von Mises ellipse). The technique has therefore come to be known as the radial return method. In what follows, we shall take all quantities to be those at the end of the time step, $t + \Delta t$, unless specifically stated. So, the stress at $t + \Delta t$ is just σ and at the beginning of the time step, at time t , is σ^* .

We may write Hooke's law in multiaxial form in terms of stress and strain increments as

$$\sigma = 2G\epsilon^e + \lambda \text{Tr}(\epsilon^e)I.$$

Implicit and explicit integration of constitutive equations 147

The elastic strain at the end of the time step may be written as

$$\epsilon^e = \epsilon^* + \Delta\epsilon^e = \epsilon^* + \Delta\epsilon - \Delta\epsilon^p$$

so that

$$\sigma = 2G(\epsilon^* + \Delta\epsilon - \Delta\epsilon^p) + \lambda \text{Tr}(\epsilon^* + \Delta\epsilon - \Delta\epsilon^p)I$$

and so

$$\sigma = 2G(\epsilon^* + \Delta\epsilon) + \lambda \text{Tr}(\epsilon^* + \Delta\epsilon)I - 2G\Delta\epsilon^p \quad (5.7)$$

Elastic predictor Plastic corrector

Since $\text{Tr}(\Delta\epsilon^p) = 0$, the trial stress, is denoted by

$$\sigma^* = 2G(\epsilon^* + \Delta\epsilon) + \lambda \text{Tr}(\epsilon^* + \Delta\epsilon)I \quad (5.8)$$

that from (5.7),

$$\sigma = \sigma^* - 2G\Delta\epsilon^p = \sigma^* - 2G\Delta\epsilon^p. \quad (5.9)$$

The stress may be written as

$$\sigma = \sigma^* - 2G\Delta\epsilon^p = \frac{1}{3}\sigma^* I - 2G\Delta\epsilon^p. \quad (5.10)$$

The stress may be expressed in terms of its deviatoric and mean as

$$\sigma = \sigma' + \frac{1}{3}\sigma I; \quad (5.11)$$

so that with (5.10) we obtain

$$\sigma' + \frac{1}{3}\sigma I = \frac{1}{3}\sigma^* I - 2G\Delta\epsilon^p. \quad (5.12)$$

and rearranging gives

$$\left(1 + \frac{2G\Delta\epsilon^p}{\sigma}\right)\sigma' = \frac{1}{3}\sigma^* I - 2G\Delta\epsilon^p. \quad (5.13)$$

With some algebra, using Equation (5.8), we show that $\sigma^* = \frac{1}{3}(\sigma^* : I)I$ is just the deviatoric of the trial stress, σ^{*e} as follows, where K is the elastic bulk modulus.

$$\sigma^* - \frac{1}{3}(\sigma^* : I)I = 2G(\epsilon^* + \Delta\epsilon) + \lambda \text{Tr}(\epsilon^* + \Delta\epsilon)I - K(\epsilon^* + \Delta\epsilon) : I$$

$$= 2G(\epsilon^* + \Delta\epsilon) + \lambda \text{Tr}(\epsilon^* + \Delta\epsilon)I - K(\epsilon^* + \Delta\epsilon) : I$$

$$= 2G(\epsilon^* + \Delta\epsilon) + (\lambda - K)I(\epsilon^* + \Delta\epsilon) : I = \sigma^{*e}.$$

プログラム解説編: Source code

◆ 2009年度のSample Codeより

```

C DETERMINE IF THE YIELD CONDITION IS SATISFIED
C
FYIELD = ESTRTRL - R - SIGYO
IF (FYIELD.GT.0.0D0) THEN
C
C USE NEWTON ITERATION TO DETERMINE EFF. PLAST. STRAIN INC.
R0 = R
DEPSTRAN = 0.0D0
DO ITER = 1,NITER
    RES1 = ESTRTRL - 3.0D0*NU*DEPSTRAN - R - SIGYO
    IF(ITER.EQ.1)RES0=RES1
    RES = DABS(RES1/RES0)
    PRINT*, 'ITERATION = ',ITER,'REDUAL NORM = ',RES
    IF(RES.LT.TOLER) EXIT
    DEPSTRAN = DEPSTRAN + RES1/(3.0D0*NU+H)
    R = R0 + H*DEPSTRAN
END DO
C
C DETERMINE TRIAL FLOW DIRECTION
C FOR USE WITH THE JACOBIAN
DO I = 1,3
    DO J = 1,3
        NDIR(I,J) = STRDEV(I,J)/ESTRTRL
    END DO
END DO
C
C DETERMINE THE INCREMENTS IN PLASTIC STRAIN
DO I = 1,3
    DO J = 1,3
        DPSTRAN(I,J) = 1.5D0*DEPSTRAN*NDIR(I,J)
    END DO
END DO
C
C WRITE THE STRAIN INCREMENTS IN VOIGT NOTATION (WITH ENGG
SHEARS)
C
DO K = 1,3
    WRK4(K) = DPSTRAN(K,K)
END DO
WRK4(4) = 2.0D0*DPSTRAN(1,2)
C
C CALCULATE THE ELASTIC STRAIN INCREMENTS
C
DO K = 1,4
    DESTRAIN(K) = DSTRAN(K)-WRK4(K)
END DO
C

```

**FORTRANを利用
実行環境があればBset**

作業部会参加方法と成果公開

◆ 参加申し込み

- 分科会への参加申し込みの際に、同時に申し込みを。
- 作業部会での参加は、原則として受け付けません。

◆ 成果物の公開

- 成果物:
 - ◆ ユーザサブルーチンのソースコード.
 - ◆ Verificationモデルデータ.
 - ◆ Documentation
- 作業部会での成果は分科会に帰属.
 - ◆ 2010/3末までの成果物は2011/4に一般公開する.
 - 汎用コードのVersion Upに配慮
 - ソースコードを公開. 自由に改変可能.

参考文献:

- ◆ 「非線形有限要素法の基礎と応用」(丸善)
 - 久田俊明, 野口裕久
- ◆ “Computational Inelasticity” (Springer)
 - J.C.Simo, T.J.R.Hughes
- ◆ “Introduction to Computational Plasticity” (Oxford)
 - Fionn Dunne, Nik Petrinic
- ◆ “Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity”
 - J.C.Simo, R.L.Taylor
 - Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. **48**(1985), 101-118.
- ◆ “A Return mapping algorithm for plane stress elastoplasticity”
 - J.C.Simo, R.L.Taylor
 - Int. J. Numeri. Methods Engrg. **22**(1986), 649-670.
- ◆ “Elasto-plastic finite element method based on incremental deformation theory and continuum based shell elements for planar anisotropic sheet materials”
 - J.W.Yoon, D.Y.Yang, K.Chung
 - Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. **174**(1999), 23-56.
- ◆ “Plane stress yield function for aluminum alloy sheets –part II: FE formulation and its implementation”
 - J.W.Yoon, Frederic Barlat, et al
 - Int. J. Plasticity **20**(2004), 495-522.