

I - 28 とがり型構成則を用いた繰り返し荷重下でのひずみ集中化解析

東海旅客鉄道(株) 正員 庄司 朋宏

名古屋工業大学 正員 小畑 誠

名古屋工業大学 正員 後藤 芳顯

1. はじめに

構造物の性能は単に耐荷力だけではなくその変形能も含めて評価されなければならないが、構造物の応力集中部においては低サイクルの繰り返し载荷によって疲労破壊が生じる場合がある。この時、応力集中部での破壊形式が多くの場合ひび割れなどを含むものであることから、それには大変形によるひずみの集中化などが大きな役割をはたしていることが原因の一つとして予想される。このようなひずみの集中化の解析には構成方程式が大きな影響を与えることは既に広く知られているが、近年、強力な汎用解析プログラムが普及しているにもかかわらず使用可能な構成方程式は比較的初歩的なものにすぎず、ひずみ集中化解析の現実的な三次元解析を行えるものは皆無に等しい。本研究では、このような問題の解析手段の確立をめざして、ひずみの集中化解析に適切なとがり型構成方程式を用いた繰り返し荷重下でのひずみ集中化数値シミュレーションを行う。

2. 構成方程式

鋼材の構成方程式としては一般的に J_2 流れ理論とその拡張が用いられる。塑性ひずみ増分 D_p^e が降伏曲面に垂直でありしたがって応力状態だけで D_p^e が決定できるとするこれらの流れ理論は塑性変形に対する拘束が強くひずみの集中化の解析を行う上で適切でない場合がある。また鋼材の塑性変形の結晶レベルでの微視的なメカニズムを考えると理想化されたなめらかな降伏曲面を前提とするこれらの理論は現実的とは言えない。そこで本研究では構成則として単結晶のすべりを基礎とし塑性変形の微視的なメカニズムを考慮することにより負荷点においてとがりをもち D_p^e の自由度を高めた流れ理論のひとつである J_2 コーナー理論¹⁾の繰り返し载荷に関する簡単な拡張を用いる。

繰り返し载荷への拡張では、降伏曲面上のとがりの発達に関係した τ として現時点での降伏曲面の中心からの距離をとる²⁾ことも考えられるが、ここでは多結晶塑性モデルによる簡単なシミュレーション結果に基づき単調载荷時に J_2 コーナー理論と一致するように降伏が開始した時点での降伏曲面の中心からのものを与えるものとする。したがってとがりのモデルは図1のように初期降伏では応力空間中の原点 O から、除荷後の再降伏の時点では除荷時点での降伏曲面の中心点 O' からの距離になる。いずれの場合もとがりの発達はBudianskyに従って 0.75π までとした。以上の定式化では、単調载荷時には J_2 コーナー理論に一致し降伏条件に関しては移動硬化則も含めた構成則になっている。

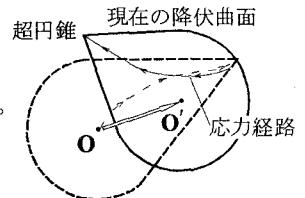


図1 繰り返しにおけるとがりのモデル

3. 数値計算例

構成方程式によるひずみ集中の相違を見るために、今回繰り返しにまで拡張した J_2 コーナー理論と J_2 流れ理論による比較も含めた三次元での一軸引っ張り問題と二次元平面ひずみ問題での繰り返し問題の解析を行った。塑性における加工硬化則は以下のSwiftの修正べき乗則を用いた。

$$\tau = H(\epsilon^n + \alpha)^n \quad (1)$$

ここで、 H は加工硬化係数、 n, α は定数である。数値解法としては更新ラグランジュの方法で定式化した有限要素法を用いている。離散化には二次元平面ひずみ条件において定ひずみ3角形要素を、次元解析ではアイソパラメトリック6面体要素を用い数値積分には積分点8個のガウス積分を用いた。

a) 三次元単純引っ張り解析

図2に示すような解析モデルに対し変形の対称性を考慮して1/8ブロックを数値解析の対象とした。ここで、幾何形状として $H_0 = L_0/3$, $T_0 = L_0/10$ である。本解析では不均一な変形の成長を調べることを目的とするため拘束を受けない自由表面上の $ABB'A'$ 及び $A'B'B''A''$ 間にそれぞれ初期不整を与えている。

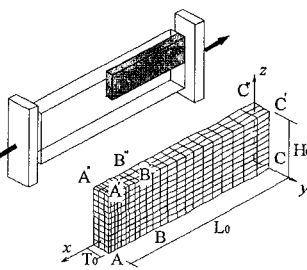


図2 解析モデルと1/8ブロックの要素分割及び初期形状

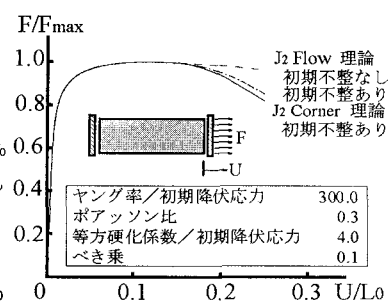
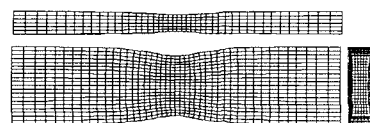


図3 単調引っ張り解析の荷重変位曲線

荷重変位曲線を図3に示す。最大荷重をすぎた付近まで3つのモデルは一致しているが変形が進むと不整を持つモデルの荷重が大きく低下し、 J_2 コーナ理論が著しいのがわかる。さらに全体的な変形状態は二つの理論による大きな差異はなく両方ともに拡散くびれが生じているため $U/L_0 = 0.25$ において J_2 コーナ理論の変形状態を図4に示す。

図4 $U/L_0 = 0.25$ における変形図

b) 二次元平面ひずみ条件での繰り返し解析

図5に示すような解析モデルに対し変形の対称性を考慮して1/4ブロックを数値解析の対象とした。ここで、幾何形状として $H_0 = L_0/3$ である。三次元における解析と同様に自由表面であるAE間に初期不整を与えている。繰り返し計算は $U/L_0 = \pm 0.025$ において変位制御し、6サイクル目に変位を引っ張り方向に進めた。図6,7は J_2 コーナ理論と J_2 流れ理論の荷重変位曲線である。ともにバウシinger効果の影響により引っ張り側と圧縮側で降伏荷重が違っている。 J_2 コーナ理論では6サイクル目において荷重の急激な低下が起るが J_2 流れ理論では起きないことがわかる。また、変形状態では J_2 コーナ理論においてせん断帯の発生が確認できた。

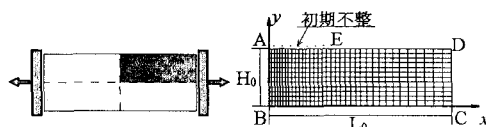
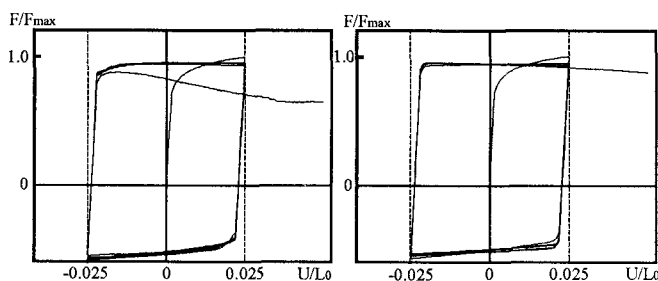


図5 解析モデルと1/4ブロック及び初期形状

ヤング率/初期降伏応力	700.0
ポアソン比	0.3
移動硬化係数/初期降伏応力	2.0
べき乗	0.1

図6 荷重変位曲線 (J_2 コーナ理論)図7 荷重変位曲線 (J_2 流れ理論)

4. まとめ

J_2 コーナ理論を簡単な仮定により繰

り返し載荷も含めた形に拡張し、それを三次元有限要素法解析に適用した。さらに、二次元平面ひずみ問題において繰り返し解析もおこなった。いくつかの基本的な例により、通常の J_2 流れ理論によるものとは明白にひずみの集中の様子が異なることを確認した。

参考文献

- 1) Christoffersen, J., and Hutchinson, J.W., J.Mech.Phys.Solids, pp.465-487, 1979.
- 2) 富田佳宏、進藤明夫、金英錫、道浦克彦、機会学会論文集A、Vol.52、No.476、pp.989-996、1986.