K5-39

自然歪を用いた有限変形の弾塑性解析 単純剪断の予変形後に得られる硬化係数の分布と降伏曲面について

Finite Deformation Analysis using Natural Strain

Yield Surface and Distribution of Hardening Modulus obtained after Pre-deformation of Large Simple Shear

塚原 矩 ៎, トラン ド ゥック トゥアン ៎, 大塚 悠司 ², 風間 晶博 ², 加藤 保之 ³ Tadashi TSUKAHARA¹, Thuan TRAN DUC ҆, Yuji OTSUKA², Akihiro KAZAMA², Yasuyuki KATO³

Abstract: The Natural Strain is obtained by integrating an infinitesimal strain increment on identical line element. Hence, this theory has merits that can remove the rigid body rotation from the rotating angle of a line element and it can satisfy the addition rule of strain on an identical line element. In our previous report, the configuration of the yield surface obtained after giving the pre-deformation of uni-axial tension has been examined by performing the proportional loading tests for tension and torsion. In this paper, the modulus of strain hardening h for various directions are investigated to the pre-deformation of large simple shear and the configuration of the yield surface is estimated.

1.緒言

これまでの研究では,自然歪理論を用いて単軸引張の予変形に対して予変形後に得られる降伏曲面の形状を調べ,異方性の発達のメカニズムを明らかにしてきた.本論文では,さらに変形の増加にともなって剛体回転が発生する単純剪断の予変形に着目し,その降伏曲面の形状を調べる.ここでは,従来の耐力による降伏応力の推定方法ではなく,予変形を与えた試験片に対して応力空間内の任意の方向に比例負荷を加えて得られる偏差主応力偏差主歪線図の接線係数から降伏前後の歪硬化係数 h を求めて降伏応力の値を推定する.

2. 歪硬化係数 hの算出と降伏曲面の決定方法

単純剪断の大きな予変形を与えた試験片に対し,引張と剪断の比率を種々に変えて得られる応力と歪の測定値を基にして偏差主応力-偏差主歪線図を描き,歪硬化係数hならびに 降伏応力の値を決定する方法について述べる。図1は,予変形後の比例負荷実験の中でも,応力主軸の方位が45[deg.](すなわち,逆方向の単純剪断)の場合の偏差主応力-偏差主歪線図を模式的に描いたものである.この図のように降伏の直前に偏差応力-偏差歪線図は,緩やかな曲線を描くため,降伏応力を明確に決定することはできない.

そこで一般に,残留歪(図中の e_{r_1})の値をある値に定めて降伏応力を決定する耐力による方法がとられている.しかしながら,この降伏応力の決定方法では,逆方向の単純剪断(応力主軸の方位が 135~[deg.]) 側では,更に緩やかな曲線となり,図中のC'点のように降伏応力を小さな値に推定してしまい現実の降伏の現象を的確に表し

ているとはいえない.

まずここでは,曲線領域の偏差応力の実験式を以下のように定式化する.

$$S_1 = a \left(1 - exp \left(be_1 \right) \right) + c e_1 + d$$
 (1)

ここで,式(1)を微分すると次式となり,

$$\frac{dS}{de} = -ab \exp(be) + c \tag{2}$$

歪硬化係数 h を式 (3) のように求めることができる.

$$h = \frac{2G}{\frac{dS_1}{de_1}} - 1 \tag{3}$$

このh の値が予変形時(図1の緑色の線)の既いの降伏応力に基づいて推定したある値以上になった時の応力をもって、降伏応力と定義することにする(ただし、式(1)中の係数a,b,c,dの値は、実験値より決定し、式(3)中のG は、変形の初期の段階(微小変形下)で得られる剪断弾性係数とする).

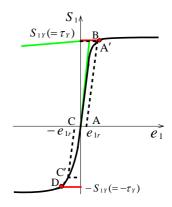


Fig.1 Relation between deviatoric stress and deviatoric strain after pre-deformation

3.実験方法

実験では、純度の高いタフピッチ銅(純度 99.999%)の焼き鈍し円筒試験片を採用している. 試験片に与える予変形量はすべての実験で同一値であり、単純剪断の変形の主値が $\lambda_{\ell}=1.4$ (剪断変形量K=0.8)まで与える. 予変形を与えた試験片に3軸ゲージを装着し、引張と捩りを同時に作用させて、応力主軸の方位を45,50,60,70,80,90,100,110,120,130,135[deg.] に固定して比例負荷実験を行う. それぞれの実験で得られた3軸ゲージの歪から自然歪理論に基づき主歪を求めて偏差主応力-偏差主歪線図を描き前述の方法に従って降伏前後の歪硬化係数 \hbar の分布を求め、応力空間内の降伏曲面の形状を推定する.

4.実験結果と考察

応力主軸を : 45[deg.](順方向の単純剪断), : 50[deg.], : 60[deg.], : 70[deg.], : 80[deg.], : 90[deg.] (単軸引張), :100[deg.], :110[deg.], :120[deg.], :135[deg.]は(逆方向の単純剪断)の比例負荷実験の中から, , , に対して偏差主応力 - 偏差主歪線図を描いたものが図 2 の(a),(b),(c),(d),(e)である., , , ,

の順に降伏の直前に緩やかな曲線を描く傾向は徐々に大きくなる. なお,それぞれの実験に対して2節で説明した式(1)の実験式の結果が,図中の実線(赤色の曲線)で描かれている.ここで(a)の45°の場合について更に詳しく説明すると,予変形より降伏応力値がすでに明らかとなっており,それを示したものがこの図の赤のプロット点である.実験式をもとにこの点の接線係数を求め,接線を描いたものが図中の水色の線であるが,この45°の場合と歪硬化係数hの値が同一(接線の傾きが同一)となるところの応力,つまり(b)の赤のプロット点が,50°における降伏応力値と推定する.同様の方法に基づいて定めた降伏応力の推定値が,(c),(d),(e)のそれぞれの図中の赤のプロット点である.

次に,歪硬化係数を式(3)より求め, から 迄のすべての方位の降伏応力を推定した結果を図7に示す.また,この図には,降伏曲面の内部の接線係数を調べて,同一の h の値を連ねて描いた曲線が示されている.

:45[deg.]の方位側(図中の上側)では,分布曲線は密集し, h は切り立った分布になっているのに対し, :135[deg.] の方位側(図中の下側)では,分布曲線の間隔は広く緩やか な分布となり異方性が形成されていることがわかる.

5. 結 言

本報では,単純剪断の予変形に対して降伏応力を調べてきたが,今後は,更に引張と剪断の複合変形に対して解明していく予定である.

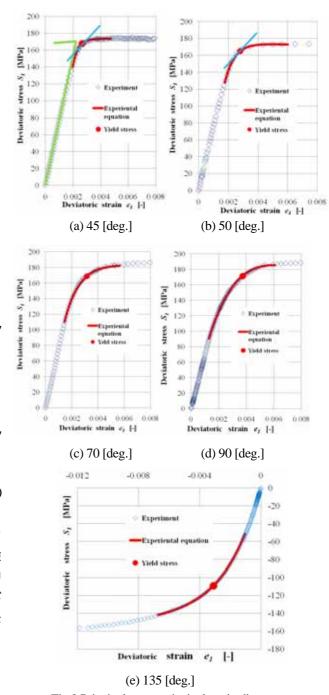


Fig.2 Principal stress-principal strain diagram

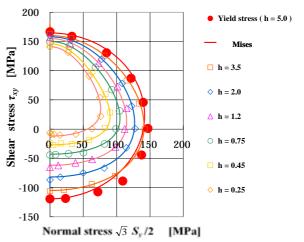


Fig.3 Estimation of yield stress and distributions of h