

塑性履歴による切り欠き部の残留応力の発生機構とその疲労強度への影響 について

Residual stresses due to overload
and their effects on fatigue strength of notched elements

小畑 誠*, 後藤芳顕**, 峯村 充***, 松浦 聖****

by Makoto Obata, Yoshiaki Goto, Mitsuru Minemura, Sei Matsuura

The properties of fatigue strength are investigated both experimentally and analytically with the emphasis on the effect of overload. Experiments show that the inelastic deformation due to overload works in favor of the fatigue strength. It is, however, also revealed that excessive overload degrades the fatigue strength. These properties are well explained in terms of the compressive residual stresses. FEM analysis shows how the residual stresses are caused by overload and how the compressive residual stresses tend to disappear with larger inelastic deformation.

1. はじめに

過載移動荷重や、地震荷重といった一時的な過載荷の鋼構造物の疲労寿命への影響は構造物中に既に疲労亀裂が存在している場合の疲労亀裂進展寿命に対するものと、それ以前の疲労亀裂発生寿命に対するものに大きく分類できる。前者は疲労亀裂先端部に発生する過大な塑性変形による残留応力場が亀裂進展に及ぼすものであり、広く溶接残留応力場での事例も含めて既に数多くの報告がなされている。¹⁻⁷⁾ 後者は応力集中部に引き起こされる塑性変形による残留応力の影響であると考えられ、著者らによってもこのような塑性変形が主として亀裂発生寿命に有利に働くことが実験的に確認されている。⁸⁾ しかしながら、過載荷により応力集中部に生ずる塑性変形の大きさと、疲労寿命との関係は必ずしも単純ではなく、大きな塑性変形の下では疲労亀裂発生寿命の向上は頭打ちになり逆に低下する事が明らかになっている。このような場合における疲労寿命の挙動とその支配的要因は必ずしも明確にはされていないとはいいたい。そこで本研究では、著者らの前回の実験結果をふまえ、塑性変形の大きさの疲労寿命への影響をより詳細に把握するための実験を行った。また、この疲労寿命の挙動と残留応力との関連を明らかにするため、有限変形を正確に考慮した有

-
- | | | | | | |
|------|------|---------|---------|-----|-----------------------|
| * | Ph.D | 名古屋工業大学 | 社会開発工学科 | 助手 | (〒468 名古屋市昭和区御器所町) |
| ** | 工博 | 名古屋工業大学 | 社会開発工学科 | 助教授 | (〒468 名古屋市昭和区御器所町) |
| *** | 工修 | 愛知県庁土木部 | | | (〒460 名古屋市中区三ノ丸3-1-2) |
| **** | 工博 | 名古屋工業大学 | 副学長 | | (〒468 名古屋市昭和区御器所町) |

有限要素法による弾塑性解析を行なった。この解析により、切り欠き部断面での残留応力の発生、分布状態を求め、実験結果とあわせて比較検討を試みた。

2. 試験方法

実験に用いた鋼材はSS41でミルシートによる機械的性質とその化学的成分は表1に与えられる。試験片の形状については図1に示すように、ロール方向を長手方向とし、長さ337mm、幅32mm、厚さ8mmの鋼材の中央部に長さ100mm、幅25mmの部分を設けさらにその中央の両側に、応力集中部として深さ3mm角度90°の切り欠きを付けた。切り欠き底での曲率半径は0.5mmとし、全体の加工精度は0.1mm以上を確保した。境界要素法によって行なった弾性解析によると、この試験片の形状で切り欠き底での応力集中係数は4.75である。また、これらの試験片は著者らの前回の実験⁹⁾と同様のものである。

表1. 鋼材の機械的性質と化学的成分

MECHANICAL PROPERTY				
Y. P. kg/mm ²	T. S kg/mm ²	EL %		
29	47	28		
CHEMICAL COMPOSITION (%)				
C X100	Si X100	Mn X100	P X1000	S X1000
11	20	68	13	2

疲労試験に先立って与える塑性変形については前回の実験で切り欠き部断面中央で2.8%と7.5%の2種類のひずみを与えたものについて行ない、2.8%の塑性履歴で明確な向上を示す疲労亀裂発生寿命が7.5%で逆に低下するという結果を得た。そこでここでは、そのような大きな塑性変形の下での疲労亀裂発生寿命の特性をより詳細に検討するため、前回行なった2種類に、6.0%のひずみを与えるものを追加した。そして、比較のために塑性変形を与えないものも含めて次の4種類の大きさの塑性変形を与えたものについて実験を行なうものとした。すなわちcase1: 塑性変形無し、case2: 切り欠き部断面中央で2.8%、case3: 同6.0%、case4: 同7.5%。塑性変形を与える手段としては、変位、ひずみ制御の併用により、試験片を静的に引っ張り、塑性ひずみゲージから得られた値が所定のひずみの値になるようにした。ひずみゲージの貼付位置は図2に示すように、平滑部および切り欠き部断面中央の荷重方向中心線

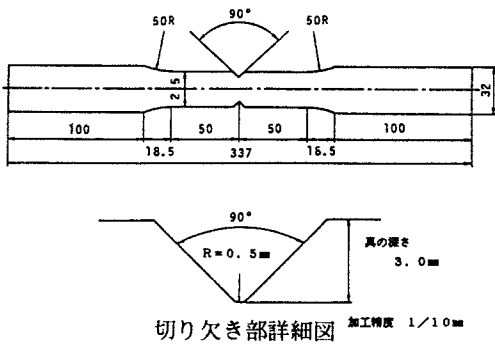


図1 試験片の形状と寸法

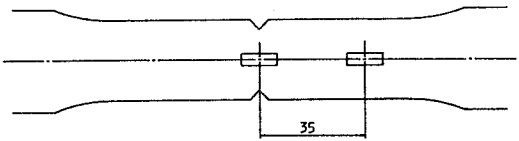


図2 ひずみゲージの貼付け位置

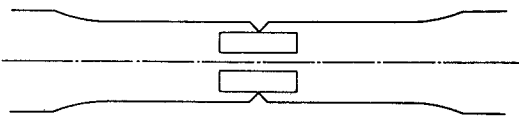


図3 クラックゲージの貼付け位置

上である。case 3、4のような場合には、切り欠き底部でのひずみは非常に大きく場合によっては既に亀裂が発生している可能性もあるため、この2ケースについては、塑性変形を与えた後カラーチェックを行ない、微小クラックがないことを確認した。

疲労試験において、切り欠き部断面に与える平均応力としては最大値を降伏応力 (σ_y) を用いて、 σ_y 、 $\sigma_y/1.7$ 、 $\sigma_y/2.0$ の3種類とした。一方、最小値については、試験片装着部の構造上の制約からすべての場合について 3 kg/mm^2 とした。疲労試験は最大荷重 $\pm 12.5 \text{ t}$ の MTS 社製電気油圧式動的試験機を用い、載荷波形はサイン波とし周波数は、 5 Hz とした。

それぞれの大きさの塑性履歴、応力振幅につき、亀裂深さ (mm)

3体から4体の試験片に対して疲労試験を行なった。そのうち1体の試験片表面には図3に示すように両側の切り欠き底から 0.5 mm のところに1本目の抵抗線がくるように2枚の抵抗線間隔 0.2 mm のクラックゲージをはりつけ、疲労亀裂の進展状況もあわせて観察した。

3. 実験結果

疲労試験の結果はそれぞれの大きさの塑性履歴、応力振幅について試験片の疲労寿命の平均値をとり、そのうち平均値に近い2つのデータを用いて図4に示す $S-Nf$ 線図を得た。この $S-Nf$ 線図は最小自乗法により求めた50%破壊確率を表わす。クラックゲージを貼付した試験片については 0.2 mm ごとの疲労亀裂進展状況を図5に示した。

4. 弾塑性有限変形解析による切り欠き部の残留応力の解析

応力集中部である切り欠き底部では、本実験で与えるような塑性変形のもとでは最大では数10%ものひずみに達するため、この種の解析は必然的に有限変位、有限ひずみを考慮したものでなければならない。ここでは、Updated Lagrange の手法によりこれを考慮した。構成方程

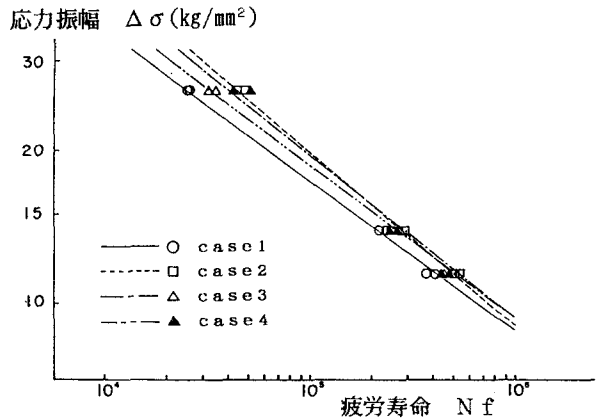
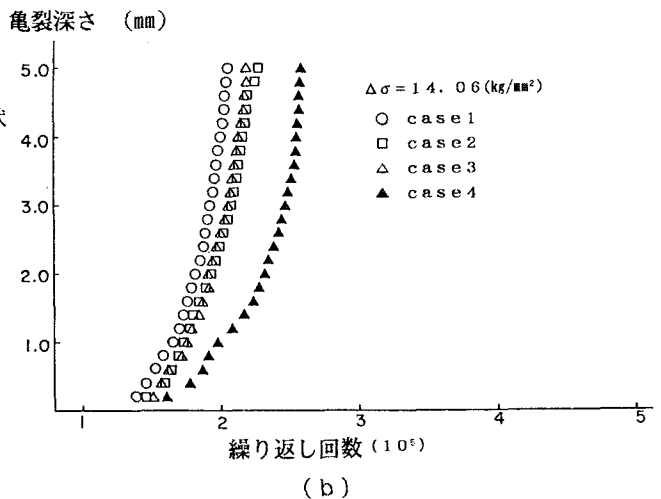
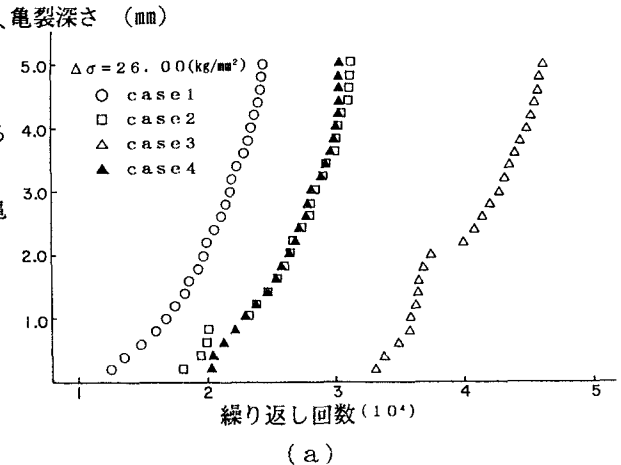


図4 S-Nf 線図



式として弾性変形については、Kirchhoff 応力 亀裂深さ (mm)

の Jaumann 変化率と変形率テンソル (速度勾配テンソルの対称部分) の弾性部分との間に等方な線形関係を仮定し、また変形率テンソルの塑性部分については von Mises の降伏関数を用いた associated flow rule によって決定した。また塑性ひずみ硬化則としては等方硬化則を用いた。数値解法としては 3 角形定ひずみ要素を用いた有限要素法によった。解析において使用した要素分割を図 6 に、またヤング率 (E)、ポアソン比 (ν)、降伏応力 (σ_y)、ひずみ硬化係数 (H)、相当応力 (σ)—相当塑性ひずみ (ϵ_p) 関係を図 7 に示す。これらの材料パ

ラメーターは、供試体のミルシートの値と切り欠きのない平滑材を用いた静的引っ張り試験の結果に基づいている。なお有限要素解析は試験片の平滑部に対し対称性を考慮し、4 分の 1 の部分に対して行なっている。与えるひずみの大きさは図 6 の斜線で示す要素のひずみの値で決定した。

図 8 は塑性変形を与えた後、完全に除荷した時の切り欠き部断面での残留応力分布の解析結果を示したものである。横軸は断面中央よりの距離、縦軸は疲労亀裂の発生及び進展に最も影響の大きい残留応力の成分 (σ_{xx}) の大きさである。ここでは三角形定ひずみ要素を用いているので、残留応力は各要素の重心での値をプロットして示してある。いずれの場合も塑性変形を受けることにより切り欠き底部には圧縮残留応力が発生していることがわかるが、case 3、4 に相当する大きな塑性変形を与えた場合には、case 2 に比較して切り欠き底部では逆に圧縮残留応力が著しく小さくなっていることがわかる。これは切り欠き部の断面全体が大きく塑性変形することによって変形がより一様に近いものとなり残留応力が減少する傾向を示

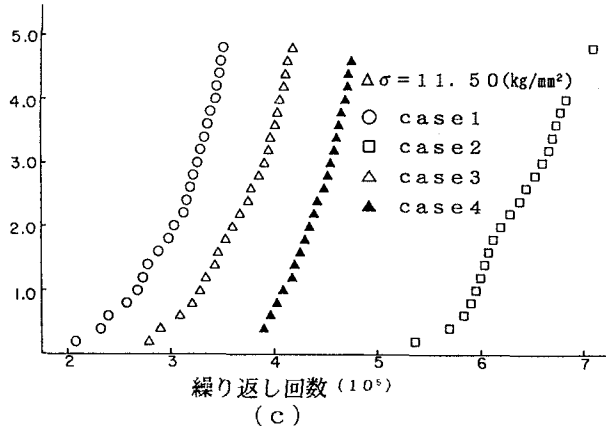
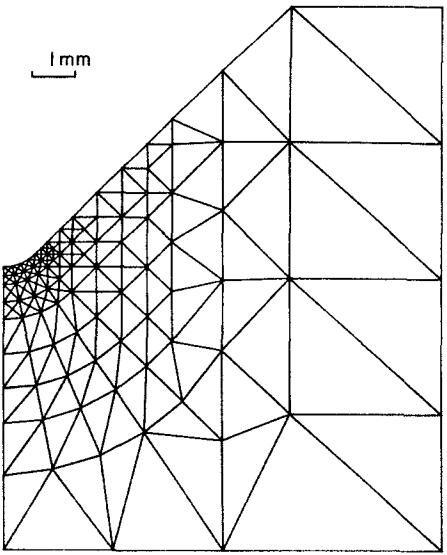


図 5 疲労亀裂進展曲線



詳細図

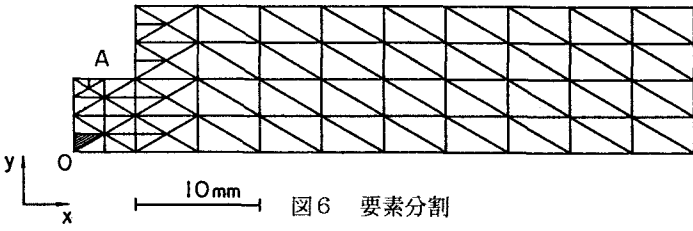


図 6 要素分割

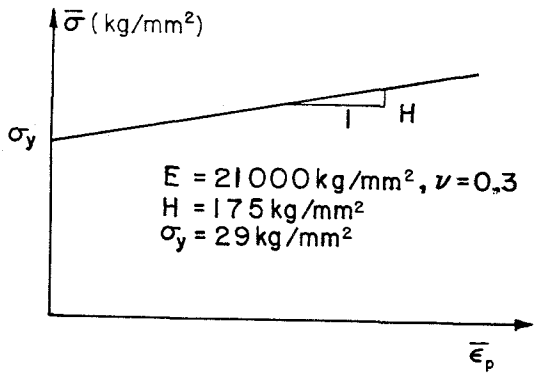


図 7 相当応力—相当塑性ひずみ関係

したためである。また、いずれの塑性変形を与えた場合にも圧縮残留応力の分布は切り欠き底部に近い幅の狭い範囲に限られて存在していることがわかる。図9は塑性変形を与える前後の切り欠き底部の形状の変化を示している。切り欠き部での変形は大きく、特に切り欠き底の曲率半径の増加が著しいため、与える塑性変形の数によって、応力集中係数が変形前の形状に対して与えられるものに比べてかなり減少していることが予想される。全体の相当応力-相当塑性ひずみ曲線については、ここで用いた型の他にも、降伏だなをもたせた piecewise-linear型のものでも解析を行なったが、残留応力の定性的な分布にはほとんど影響はなかった。これは、問題となる切り欠き底部の塑性ひずみがいわゆる降伏だなの範囲（2～3%）よりはるかに超えて大きいためである。

5. 考察

図4のS-N f線図に見られるように、いずれの大きさの塑性変形を与える試験片も、与えないものに比べて疲労寿命は明確に向上している。しかし塑性変形を与えたcase 2、3、4を比較すると、最も塑性変形の小さいcase 2の疲労寿命が最大となっており、より大きい塑性変形を与えた他のケースでは、著者らの前回の実験でも見られた疲労寿命の低下が本実験でも確認された。著者らは前回の報告で、この原因として、切り欠き部での過大な塑性変形による板厚断面減少、あるいは材料の劣化を推測したが、上で述べた有限要素法弾塑性解析による切り欠き部断面の圧縮残留応力の分布（図8）はこの疲労寿命の低下の支配的要因が残留応力の大きさであることを強く示唆している。すなわち過大な塑性変形によりかえって切り欠き部の残留塑性ひずみの incompatibility が打ち消され、疲労亀裂発生寿命の向上に好意的に作用した圧縮残留応力が減少したためと考えられる。case 3とcase 4との疲労寿命の差は顕著ではないものの応力振幅の大きい場合はcase 3が、また応力振幅が小さい場合はcase 4の疲労寿命がわずかに上回った。この2つのケースでは実験結果のばらつきも他に比べ大きかったが疲労寿命が応力比にも依存している可能性も見受けられた。

クラックゲージより読みとった0.2mmごとの疲労亀裂の進展の様子に関しては図5に示されているが、クラックゲージの貼付は各ケース1体のみとしたので結果のばらつきのため、図にあらわれている疲労寿命の順序は図4に示したものと必ずしも一致していない。図5に見えるように、与える塑性履歴の大きさと進展寿命との間には明確な相関関係は存在せず、疲労亀裂発生寿命と0.5mmまでの疲労亀裂進展寿命の合計は

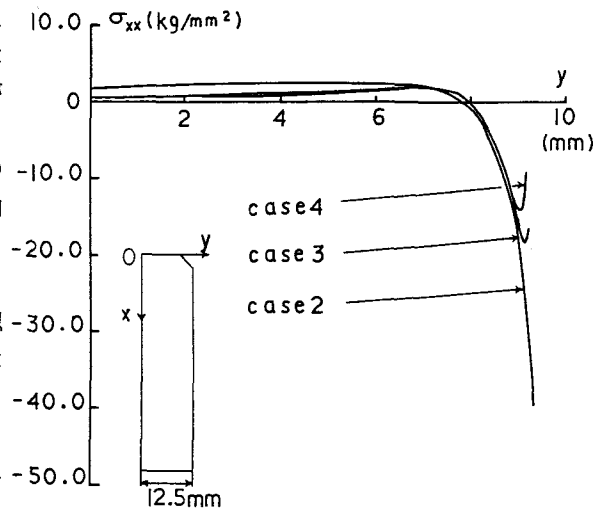


図8 残留応力分布

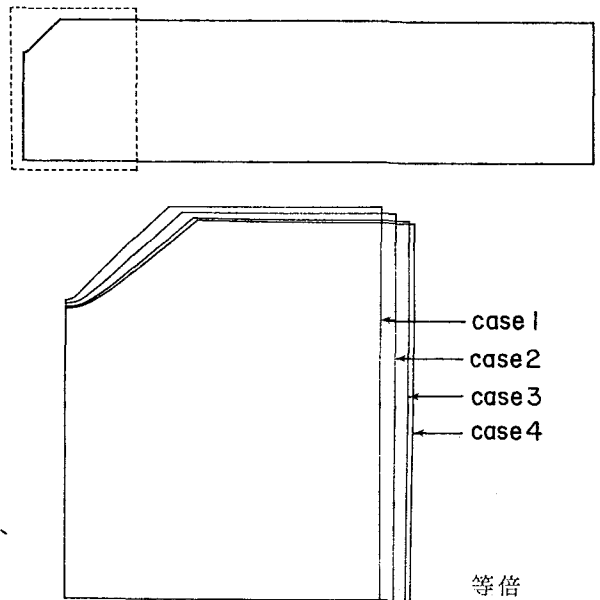


図9 切り欠き部の変形

全体の疲労寿命の順序は一致している。したがって疲労寿命は、主として亀裂発生寿命に支配されていることになる。この原因の一つとしては、図8に示されているように亀裂を防ぐうえで好意的な圧縮残留応力はどの場合でも切り欠き底部のかなりせまい範囲に限られて存在し、その他の部分の応力分布は塑性変形の大きさにあまり依存していないことが考えられる。

またここでは鋼材のひずみ硬化則として、降伏曲面が相似的に拡大を続ける等方ひずみ硬化を仮定したため、解析的に示すことはできなかったが、より現実的に降伏曲面の移動、変形をも考慮した場合、亀裂発生にいたるまでの繰り返し載荷でも切り欠き底部ではわずかながら塑性変形を起こしさらに残留応力分布の変化が起こることが容易に予想される。実際に極端な一例として、ひずみ硬化則として降伏曲面が拡大しないもので、Ziegler型の移動硬化⁹⁾を仮定すると、case 3、4に相当する塑性変形を与えた場合、過載荷後の除荷の過程でもさらに塑性変形が累積されることを確認した。現実の鋼材の塑性挙動はきわめて複雑であり、塑性変形にともない降伏曲面は単に拡大、移動だけではなく、大きく変形することが知られている¹⁰⁻¹²⁾。切り欠き部でのひずみは非常に大きく、そこでの残留応力状態の評価には、大塑性ひずみ領域での鋼材の挙動の適切な考慮が不可欠であると考えられる。

5. まとめ

疲労試験の結果から切り欠きなど応力集中部を持つ鋼材に塑性履歴を与えることにより主として疲労亀裂発生寿命が向上することが明らかになった。しかしながら、ある限度以上の塑性変形で疲労寿命の向上は頭打ちされそれ以上では逆に低下することが確認された。あわせて行なった有限要素法による弾塑性解析により、過大な塑性変形は切り欠き部断面での圧縮残留応力を消失させるように働くことが明らかになり、疲労寿命の低下が残留圧縮応力の挙動と密接に結びついていることが示された。したがってここで行なったような弾塑性解析は鋼材の疲労寿命を考える上で有用である。

一方、大きい塑性変形のもとでは鋼材のひずみ硬化の特性に依存して亀裂発生にいたるまでの繰り返し荷重がさらに残留応力に影響を及ぼすことが考えらるので、大きい塑性変形を与えた試験片では全般的な疲労挙動を正確に把握するためにはより合理的な鋼材の塑性挙動を考慮する必要があると思われる。

謝辞：本研究の数値計算に協力をいただいた名古屋工業大学大学院小井出秀人氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) Hudson, C.M. and Hardrath, H.F., Investigation of the effects of variable amplitude loadings on fatigue crack propagation pattern, NASA Technical Report D-1803 (1953)
- 2) von Euw, E.F.J., Hertzberg, R.W. and Roberts, R., Delay effects in fatigue crack propagation, ASTM STP436, pp.89-123. (1968)
- 3) Corbly, D.M. and Packman, P.F., On the influence of single and multiple peak overloads on fatigue crack propagation in 7075-T6511 aluminum, Engrg. Fract. Mech. 5, pp.479-497. (1973)
- 4) 松岡三郎、田中絃一、疲労き裂伝ばにおよぼす最大荷重の影響、日本機械学会論文集、44、pp. 375-382、(1978)
- 5) Horikawa, K., Sakakibara, A. and Mori, T., Effect of Residual stresses on threshold value for fatigue crack propagation, Trans. of JWRI, 12, pp.35-42, (1983)
- 6) Miki, C., Mori, T., and Tajima, J., Effect of stress ratio and tensile stress on near threshold fatigue crack growth, Proc. of JSCE, No. 368/I-5, pp.187-194, (1986)

- 7) 大野貴志、石黒幸文、山田健太郎、青木尚夫、応力集中部材の残留応力場における疲れ亀裂進展挙動、構造工学論文集、34A、pp. 459-468、(1988)
- 8) 後藤芳顯、柴山昌和、長谷川彰夫、松浦聖、塑性履歴を受けた鋼切欠き部および2、3の溶接継手の疲労強度、構造工学論文集、32A、pp. 1-9、(1986)
- 9) Ziegler, H., A modification of Prager's hardening rule, Quart. J. Appl. Math., 17, p.55-65, (1959).
- 10) Ohashi, Y., Kawashima, K. and Yokochi, T., Anisotropy due to plastic deformation of initially isotropic mild steel and its analytical formulation, J. Mech. Phys. Solids, 23, pp.277-294, (1975)
- 11) Iwakuma, T., and Nemat-Nasser, S., Finite elastic plastic deformation of polycrystalline metals, Proc. Roy. Soc. Lond., A394, pp.87-119, (1984)
- 12) Nemat-Nasser, S. and Obata, M., Micromechanics of plastic flow, Constitutive laws for engineering materials, Eds. C.S. Desai, E. Krempl, P.D. Kioussis and T. Kundu, Elsevier, New York, pp.195-206, (1987)

(1988年10月12日受付)