

I-196 繰り返し荷重下の切欠き部の残留応力解析

名古屋工業大学 学生員 小井手 秀 人

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

名古屋工業大学 正 員 松 浦 聖

1 はじめに

地震荷重あるいは、過載移動荷重など構造物に働く突発的な過荷重によって、ノッチ、ホールといった応力集中部に、永久的な塑性変形が局所的に生じ、その結果、そこに残留応力を生じる。残留応力は、それが溶接によるものにせよ、構造物の疲労寿命に影響を及ぼすことは、多くの事例で知られており、それについての研究也多岐にわたっている。さき以後藤らは、切欠きを持つ部材に対して過荷重がおおむね疲労強度に対して好意的に作用することを示したが、与える過荷重の大きさと疲労強度との関係は、必ずしも単純ではなく、明確な解析的説明を要求するものであった。本報告は、大変形弾塑性解析により発生する残留応力を推定し、これら複雑な挙動を解明しようとするものである。

2 解析法

切欠きなどの応力集中部において局所的に生ずる大きな変形を解析するためには、微小変位、微小ひずみを仮定した線形解析は不适当であり、大変形を正確に考慮する必要がある。ここでは、複雑な材料挙動(例えば、種々の歪硬化仮説など)そのものには深く立ち入らず、いわゆる弾性法則としては重弾性を、塑性理論としては von Mises の降伏関数を用いた関連塑性流れ理論を用いた。以下にその概要を示す。

まず、速度勾配テンソル L_{ij} はその対称部分 D_{ij} と非対称部分 W_{ij} とに分解することができる。すなわち

$$L_{ij} = D_{ij} + W_{ij}$$

また一方で、その対称部分は弾性変形に寄与する部分と塑性変形に寄与する部分に分解することができる。

重弾性の定義に従うと弾性変形に寄与する部分は次のように客観応力速度と関係づけられる。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = L_{ijkl} D_{kl}$$

ここに $\dot{\epsilon}$ は Kirchhoff の応力の Jaumann 変化率、上付き添え字 e は弾性変形寄与分を表すものとする。

材料が降伏し続けるとき、関連塑性流れ理論によると塑性変形寄与分は

$$D_{ij}^p = \frac{1}{H} \frac{\partial f}{\partial \tau_{ij}} \frac{\partial f}{\partial \tau_{kl}} \dot{\epsilon}_{kl} \quad f = \sqrt{\frac{3}{2} (\tau'_{ij} - \alpha'_{ij}) (\tau'_{ij} - \alpha'_{ij})}$$

H は加工硬化係数であり応力と同じ次元を持つ。ここではいわゆる複合硬化則を考え H を等方硬化を示す h_i と移動硬化を示す h_k との和とみなす。ここで h_i 、 h_k はそれぞれ τ 、 ϵ^p を相当応力、相当塑性ひずみとして次の関係を示すパラメーターである。

$$h_i = \frac{d\tau}{d\epsilon^p} \quad \dot{\alpha}_{ij} = \frac{h_k}{\tau} (\tau_{ij} - \alpha_{ij}) d\epsilon^p$$

また、 $\dot{\alpha}_{ij}$ は客観的变化率を示す。数値解析は、以上の有限変形弾塑性理論をいわゆる Updated Lagrange 流に定式化し、定ひずみ三角形要素を用いた有限要素法により行った。

3 結果および考察

計算に用いた有限要素分割、境界条件、ヤング率その他の材料定数を図1に示す。非常に大きなひずみの範囲での鋼材の塑性挙動については、多くのパラメーターを用いれば、より現実的なシミュレーションを行うことが可能であるが、ここでは加工硬化係数はもっとも単純に定数とし、ふたつの例についての解析結果を示す。すなわち、(1) $h_i/\sigma_y = 5$ 、 2 、 $h_k/\sigma_y = 0$ の等方硬化のみの場合と、(2) $h_i/\sigma_y = h_k/\sigma_y = 2$ 、 6 の複合硬化の場合である。過荷重に対応するものとして、図1に示す斜線部の要素がそれ

ぞれ工学ひずみでそれぞれ（a）2.8%、（b）6.0%、（c）7.5%になるまで伸びを与えたあと、完全に除荷した時の切欠き断面での残留応力分布をふたつの例についてそれぞれ図2、3に示した。また、等方硬化のみの場合については、残留応力の二次元的な広がりをも図4に示した。この図では除荷した時の切欠き付近（図1、A部分）の相当応力 τ の値を表している。図2、3より明かなように、いずれの場合も塑性履歴の最も小さいものが、最も大きな圧縮残留応力を切欠き付近で得ている。また、図4からも明かなように塑性履歴の最も小さい場合が、残留応力分布の広がりも大きい。複合硬化の場合にも同様な結果が得られた。このような残留応力の分布は、先に後藤らが行なった疲労試験結果を非常によく説明している。さらに、切欠き断面での平均応力が降伏応力程度の繰返し荷重を与えても、もはや残留応力は消失しないことが確かめられた。

<参考文献> 後藤、柴山、長谷川、松浦、構造工学論文集 vol.32A, 1986

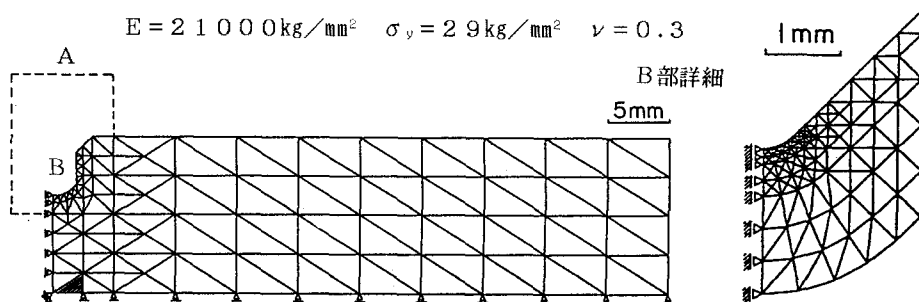


図 1 要素分割と境界条件

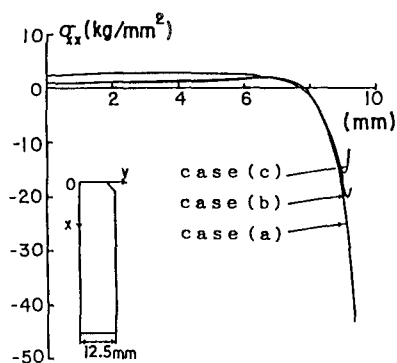


図 2 残留応力の分布 (1)

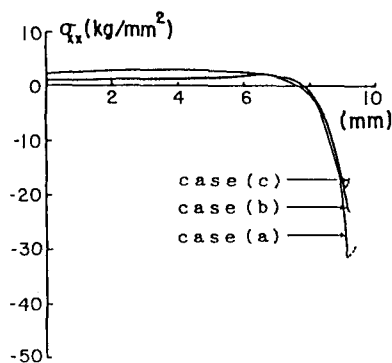


図 3 残留応力の分布 (2)

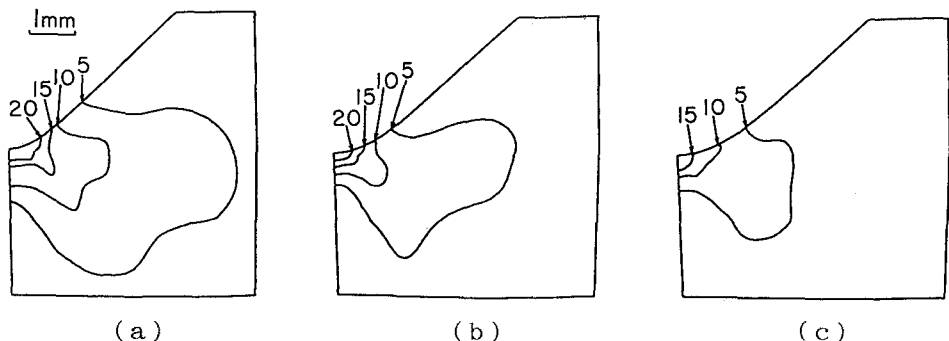


図 4 残留相当応力の分布

単位 (kg/mm²)