

繰り返し荷重下の切欠き部の弾塑性挙動

名古屋工業大学 正 員 小 畑 誠
 名古屋工業大学 学生員 小井手 秀 人
 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、過載移動荷重などにより構造物には突発的な過荷重が働くことがある。これらの過荷重はノッチ、ホールといった応力集中部に極めて限られた範囲ではあるが永久的な塑性変形を引き起こし結果としてそこに残留応力を生じせしめる。残留応力が、それが溶接によるものにせよ構造物の疲労寿命に少なからぬ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も非常に多岐にわたっている。さき以後藤らは、切り欠きを持つ部材に対して過荷重がおおむね疲労強度については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説明しようとするものである。

2 解析法

切り欠きなどいわゆる応力集中部では、全体の平均としての変形がそれほど大きくない場合であっても、局所的に大きく変形している。こういった挙動の解析には微小変位・微小ひずみを仮定した線形解析はきわめて不適当でありしたがって必然的に大変形を正確に考慮したものでなければならない。非常に一般的なひずみ履歴、応力状態での鋼材の弾塑性挙動を表わすことはきわめて困難であるが、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亜弾性を、また塑性理論としては、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、それぞれの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。亜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。

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

ここに τ_{ij} 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わすものとする。

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部分は

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

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 h_i と h_k 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。

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

従って、 h_i は等方硬化を示すものであり、 h_k は移動硬化を示すものである。 $\dot{\alpha}_{ij}$ は客観的变化率を示す。数値解法としては、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を用いた。

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。非常にひずみの大きな範囲での鋼材の塑性挙動については実験的にもまだ不明な点が多い。もちろんパラメーターを増やすことにより、限られた目的、あるいは適用範囲においてより現実的なシミュレーションを行なうことは可能であり、そのような努力が成功をおさめていることも事実であるが、現象学的なアプローチによる限り、より多くのパラメーターの導入がそれらの物理的意味を曖昧にして行くことは否めない。ここでは、加工硬化係数は最も単純に定数とみなし、ふたつの例について計算を行なった。ひとつは(1) $h_1/\sigma_y = 5.2$ 、 $h_k/\sigma_y = 0$ で等方硬化のみの場合。もうひとつは(2) $h_1/\sigma_y = h_k/\sigma_y = 2.6$ である。過荷重に対応するものとして図1に示す斜線の要素がそれぞれ工学ひずみで2.8%、6.0%、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り欠き断面での残留応力の分布をふたつの例についてそれぞれ図2、3に示した。なお、ここでは、平面応力を仮定している。これらの図より明らかなようにいずれの場合も塑性履歴のもっとも小さいものが最も大きな圧縮残留応力を切り欠き付近で得ている。ここに得られた残留応力の分布はさき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。図3に於てひずみ2.8%に対応するものは切り欠き付近で降伏した状態にある。切り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

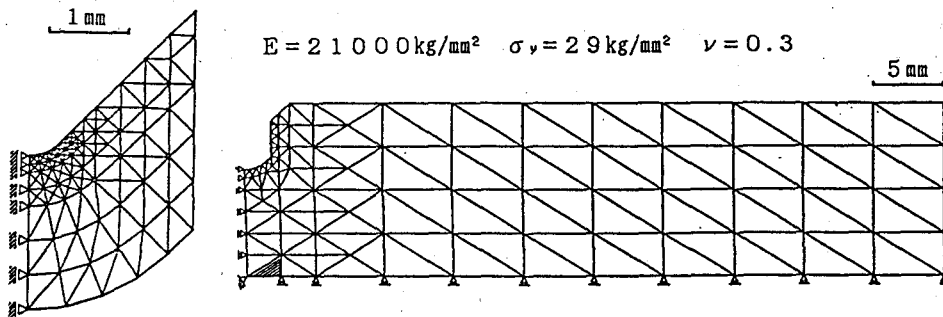


図 1 要素分割と境界条件

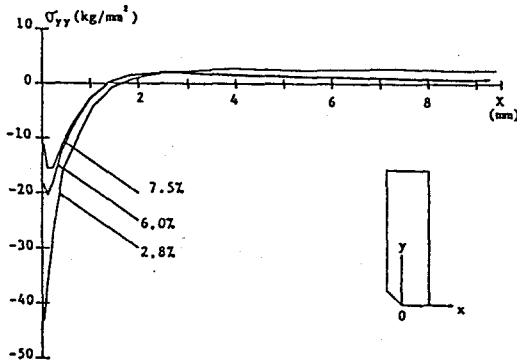


図 2 残留応力の分布 (1)

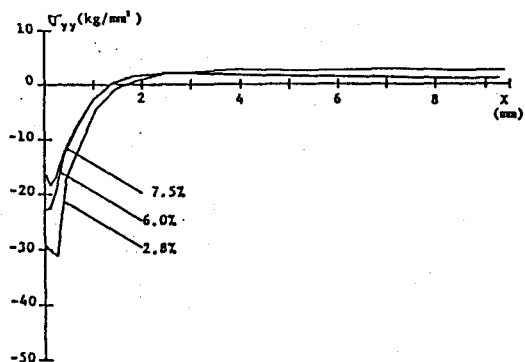


図 3 残留応力の分布 (2)