

I-7

超音波試験による切欠き先端の破壊プロセスゾーンの評価

北見工業大学 正 員 山崎 智之
北見工業大学 正 員 菅原 登
北見工業大学 学生員 久恒 雅人
北見工業大学 正 員 大島 俊之

1. まえがき

構造設計は、一般的に許容応力や安全率などを用いる設計手法によって行われ、そして、応力集中部がなく、潜在的な欠陥（溶接時や製作過程における欠陥）が存在しないという仮定で設計されている。そのため、十分に非破壊検査を行い欠陥が無いことを確認して施工している。近年では、大型で重要な構造物が数多く設計施工されており、この設計には損傷許容設計という考え方もしばしば使われていることや、また、その構造物の余寿命評価をする上で供用期間中における非破壊検査が重要となっている。

本実験では、非破壊検査の一つである超音波探傷試験により切欠き先端から生じる破壊過程を荷重段階で追跡し、超音波探傷から得られる反射エコー強度による画像での評価を行った。また、破壊進行のパラメータとして用いられるJ積分を有限要素法により計算して、超音波探傷画像との比較を行った。

2. 探傷画像による破壊の評価

超音波探傷試験に使用した被検材は一般構造用鋼材SS400（降伏強さ3100kgf/cm², 引張強さ4400kgf/cm²）で、テストピースの両側端面（長さ300mm, 幅80mm, 厚さ6mm）および片側端面（長さ300mm, 幅60mm, 厚さ6mm）にV型切欠きを人為的に設けたものを製作した。切欠きの種類は、両側切欠きについては切欠き角度が $\theta = 10^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ で深さ20mmの4種類、片側切欠きについては切欠き幅5mm深さ20mmの1種類とした。実験はテストピースの長さ方向に引張荷重を作用させた状態で超音波探傷映像装置（日立建機社製、AT5000）を使用して探傷画像（Cスコープ）を得た¹⁾。探傷に用いた探触子は周波数が25MHzと10MHzの水浸用焦点型垂直探触子である。画像は超音波探傷で得られる超音波反射エコー強度を256段階の数値データに変換し、白黒濃淡表示、及び16段階のカラー表示を行った。荷重載荷にはオイルジャッキを使用し、荷重の測定には簡便な圧力計でオイルの圧力を測定し、荷重に換算した。したがって、この荷重測定の精度は荷重段階の目安となる程度である。

図1は両側に切欠きを有するテストピースに引張荷重5tf, 7tf, 9tfを載荷したときの画像である。これらから、荷重増加にともない超音波反射エコーの変化が切欠き先端から部材中央に広がっており、荷重の増加に伴い変化する範囲が広がっているのが判る。この反射エコーの変化は応力集中により部材降伏応力を越える部分で金属結晶のすべり等により超音波を屈折あるいは減衰させているためと考えられる。したがって、この変化の範囲により塑性域の広がりを追跡できる。この結果は有限要素法による弾塑性解析の結果とほぼ一致している。また、切欠き先端の微小領域では反射エコーがほとんど無い部分があり、荷重増加にともないその範囲も徐々に広がっている。この部分は応力集中によりテストピース厚さ方向のひずみ変形が他の部分より極端に大きく、超音波の入射及び反射の状態が悪く受信音波がほとんど得られないためである。したがって、この微小領域では材料の破壊が進んでいると考えられ、微視的なき裂が発生しているものと思われる。載荷荷重5tf, 7tfでは片側の切欠きにしか変化が現れていないが、これはテストピースの対称性及び載荷装置の精度によると考えられる。

Evaluation of Fracture Process Zone Around a Crack Tip by Ultrasonic Testing
by Tomoyuki YAMAZAKI, Noboru SUGAWARA, Masato HISATSUNE, Toshiyuki OSHIMA

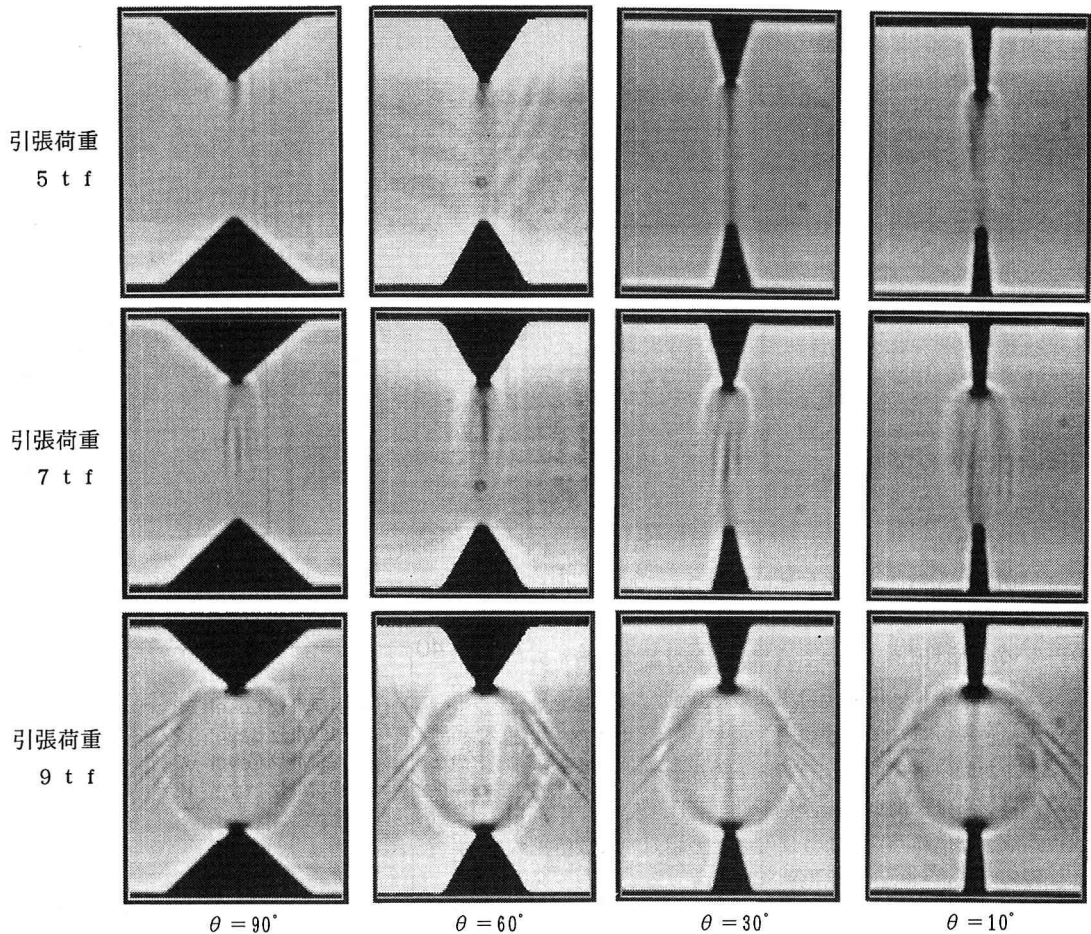


図1 両側に切欠き有するテストピースの探傷画像の一例(60×82mm, pitch 0.2mm, scale 1 9.6mm)

図2は片側だけに切欠きを有するテストピースに対する探傷画像である。結果は両側に切欠きを有するテストピースと同じで、塑性域の広がり、破壊が進行している微小領域が現れている。また、図3は切欠き先端における破壊領域と思われる微小領域を含む10mm四方の範囲を走査ピッチ0.05mmで精度良く探傷試験を行った場合の画像で、探触子は25MHzと10MHzを使用した。この画像における破壊領域と思われる超音波反射エコーの極端に低い部分について、画像面積に対する面積率として各荷重段階で表したグラフが図4である。

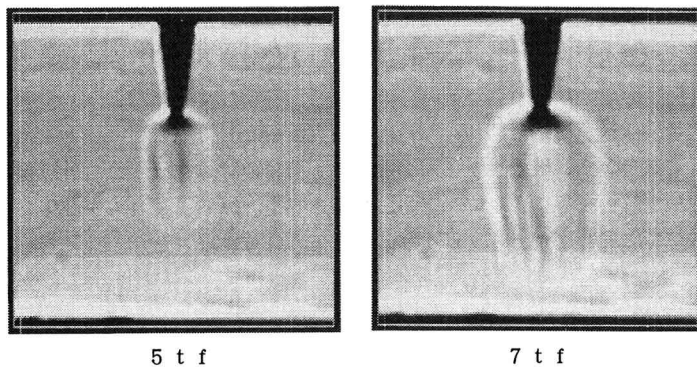


図2 片側切欠きを有するテストピースの探傷画像の一例
(60×61mm, pitch 0.2mm, scale 1 6.4mm)

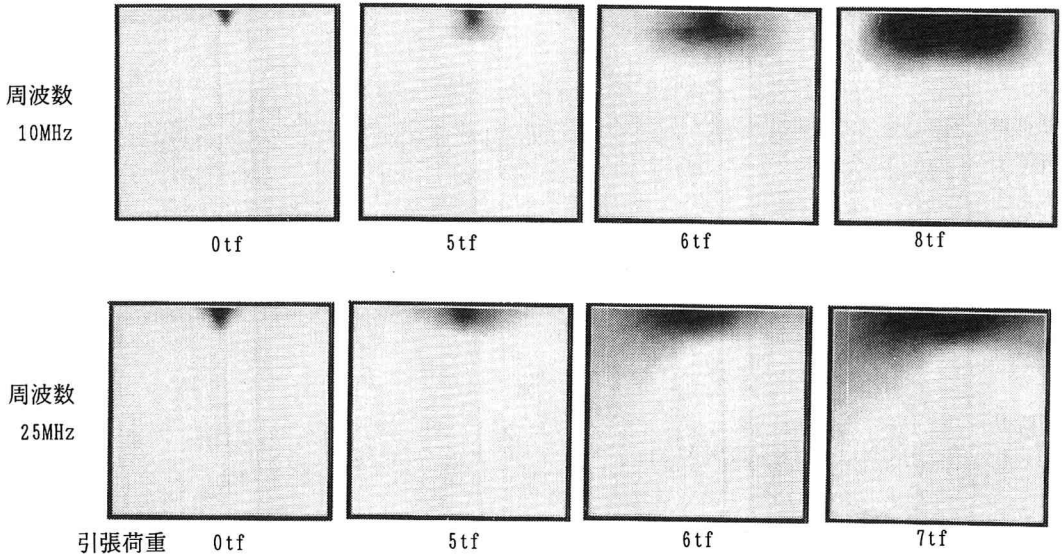


図3 切欠き先端における破壊領域部分の画像の一例(10×10mm, pitch0.05mm, scale 1→1.6mm)

グラフの縦軸は破壊領域の面積率、横軸は載荷荷重を表している。面積率は、探触子の周波数が10MHzと25MHzのものを使用して得られた二種類の画像において、反射エコー強度レベルが63以下の場合と127以下の場合について表している。この結果は探傷試験の設定条件（音圧増幅率ゲイン、焦点距離、探傷範囲）により異なるため相対的な数値であり、微妙な設定や変化にも影響されバラツキも多いと考えられる。

3. 弾塑性破壊のパラメータ

き裂を有する構造部材の破壊を表す基本的なパラメータとして応力拡大係数Kがある。このパラメータは高張力鋼や大規模構造物などで塑性域の範囲や破壊進行領域の大きさが、欠陥の長さや部材の幅に比べてはるかに小さいと見なせる場合（小規模降伏状態）に線形弾性体と仮定して計算できる。しかし、高韌性材料や中低強度鋼などは破壊に至るまでに大きな塑性変形を伴い、小規模降伏の条件が満たされないことから応力拡大係数を適用できない。このような大規模降伏状態下での破壊を特徴づけるパラメータとしてJ積分やき裂開口変位（C O D）などが上げられる。

超音波探傷試験に用いたテストピースは一般構造用鋼材SS400であり、室内実験用として小さい寸法としたため小規模降伏状態の条件が満たされないことから、破壊パラメータとしてJ積分の計算を行った。計算は有限要素法における荷重漸増法により弾塑性解析を行い、変位、応力、ひずみ等を計算し、これらを利用してJ積分の定義式(1)に従って経路積分を実行して求めるプログラム²⁾により計算を行った。

$$J = \int_{\Gamma} \left[W \, dX_2 - T_i \frac{\partial U_i}{\partial X_1} \, d\Gamma \right] \quad \dots \dots (1)$$

W : ひずみエネルギー密度 , T_i : 表面力 , U_i : 変位

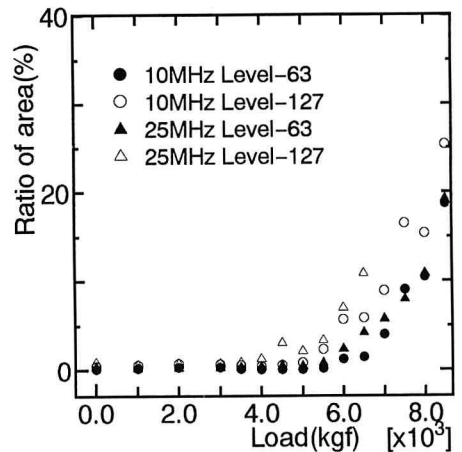


図4 画像における破壊領域の面積率

次に、計算に用いた材料定数や要素分割の詳細について説明する。計算の対象にしたテストピースは片側端面にV型切欠き（幅5mm、深さ20mm）を設けたものとし、材料定数は降伏応力 3100kgf/cm^2 、引張強さ 4400kgf/cm^2 、ポアソン比 $=0.3$ 、ひずみ硬化指数 $n=0.18$ 、塑性係数 $F=0.72\text{E}+4\text{kgf/cm}^2$ とした。図5は計算に用いた要素分割とJ積分の積分経路で、要素数306、節点数177、積分経路は7本とした。ただし、形状が対称性のためテストピース半分を取り出し、解析の条件は全ひずみ理論に基づき平面応力問題として解析を行った。

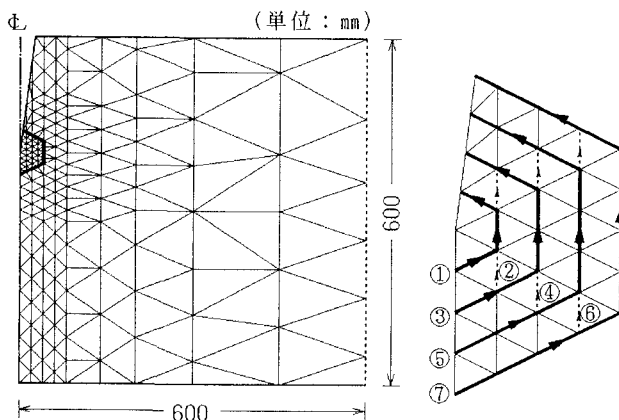


図5 要素分割と積分経路

図6に計算したJ積分の計算結果を表す。

図の縦軸にJ積分値、横軸に载荷荷重を表している。図には積分経路1, 3, 5, 7しか表していないが2, 4, 6については密集するため省略した。●は荷重が約500kgf増分したときの全積分経路の平均値である。

引張荷重が6000kgfを過ぎるあたりからJ積分値が急激に増加している。この結果は、図4の超音波探傷画像から得られた破壊領域を示す面積率の増加傾向に類似している。

4. あとがき

本実験の結果である超音波探傷画像から得られた情報は、降伏応力を越える部分で材料のすべり等による部材表面の変化から判断できる塑性域の進展と、厚さ方向のひずみが極端に大きい部分で超音波反射エコーの得られない破壊進行領域と考えられる部分の面積率である。破壊力学で言われている破壊進行領域はかなり微小な部分であり、画像から得られる領域は実験の設定により異なる相対的なもので単純な比較はできない。しかし、荷重増加に伴う画像における破壊領域の面積率の増加傾向とJ積分の増加傾向が類似していることは、どちらもひずみに関係しているためと考えられる。すなわち、J積分では(1)式から判るように「ひずみエネルギー密度W」の項が含まれており、画像については「厚さ方向の変化=ひずみ」が極端に大きい部分ということが対応している。

この画像における破壊領域の面積率の追跡による方法は相対的数値であり、より定量的な結果が得られるようにする必要がある。また、破壊領域内では微細なクラックが発生し、進展していると考えられる。本実験による超音波探傷では厚さ変化のため音波の屈折等によりクラックの発見はできなかった。今後、破壊進展状況を明確にするためクラックの進展を追跡する必要がある。

なお、本研究は平成5年度文部省科学研究費一般研究C（代表者・大島俊之）の補助を受けました。

参考文献

- 1) 菅原、三上、山崎、大島:波形解析を応用した超音波探傷法の微小欠陥検出精度向上に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 38A, 1992
- 3) 白鳥、三好、松下:数値破壊力学, 実数出版, 1980

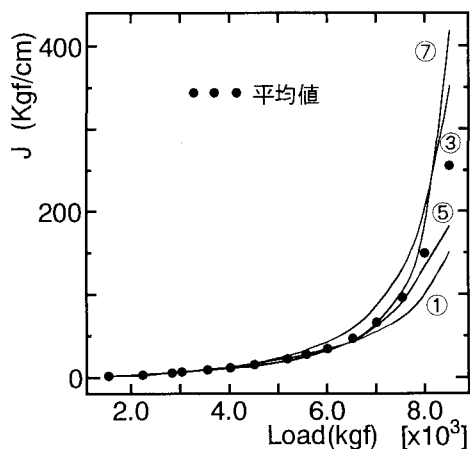


図6 有限要素法によるJ積分