

I-28

波形解析を応用した塑性域進展の追跡に関する研究

北見工業大学	正員	山崎 智之
北見工業大学	正員	菅原 登
(株)サクラダ		黒田 隆博
北見工業大学	正員	大島 俊之

1. まえがき

近年、橋梁などの鋼構造物の架け替えや補修が盛んに行われている。このため供用されている構造物の安全性や健全度を現地で評価しなければならないが、その項目の一つとして隅角部や亀裂周辺部の応力集中による塑性域進展の状況を把握することが上げられる。これまで、筆者らはV型切欠きを設けた鋼材に引張荷重を載荷させた状態で超音波探傷を行い、得られた超音波反射エコーの音圧強度を画像化して弾塑性状態での材料変化を検出するための実験を行ってきた。本研究では、この画像における変化と鋼材の塑性域の範囲について、より精度良く正確に把握し、その現象の要因を把握するため、超音波反射波形を記録し超音波の伝播速度や鋼材の厚さの変化を正確に測定する実験を行った。また、有限要素法による弾塑性解析を行い、計算応力との比較を行った。

2. 超音波反射波形による超音波伝播時間と板厚の測定

実験に使用した供試体は、図-1のような長さ300mm、幅80mm、厚さ6mmの鋼材に長さ方向の中心部に切欠き角度90°、切欠き深さ20mmであるV型切欠きを人為的に設けたものを作製した。この供試体の長手方向に万能試験機で引張荷重9t fまで載荷させ、除荷したものを使用した。

図-2は、超音波探傷映像装置（日立建機社製AT-5000、焦点型探触子25MHz、水浸法）で得られた供試体底面の超音波反射波強度を画像化したものである。

(a)は無載荷の状態で、(b)は引張荷重9t onまで載荷し、除荷した状態のときに得られた画像である。9t f 載荷の画像には弾性域と塑性域の境界と考えられる変化が現れている。

超音波伝播時間及び板厚の測定範囲は、供試体形状が対称形であることより図-5のような供試体中心で4分割し、中心から長さ方向30mm、幅方向30mmの範囲を測定した。測点の間隔は幅方向をLINE NUMBERとし長さ方向をPOINT NUMBERとしてLINE間隔2mmで16LINE、POINT間隔1mmで31POINT（切欠き部分は除く）とし、計460点（図の点線の交点）とした。

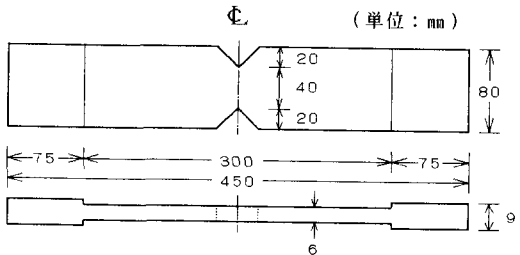


図-1 テストピース

(1) 板厚の測定

測定機器は以下のような精度を有するポイントマイクロメーターとリニアゲージセンサーを使用した。

Study on the Pursuit of Plastic Zone Propagation by Using Waveform Analysis
by Tomoyuki YAMAZAKI, Noboru SUGAWARA, Takahiro KURODA, Toshiyuki OSHIMA

ポイントマイクロメーターの最小測定単位

: 0.01mm

リニアゲージセンサーの最小測定単位

: 0.004mm

測定方法は測定範囲の四隅の厚さをマイクロメータで測定し、残りの測点は厚さはゲージセンサーで表面及び底面の凹凸を測定し計算により厚さを算出した。

(2) 超音波伝播時間の測定

超音波反射波の記録には、上記の超音波探傷映像装置より得られる反射波形を波形記録装置デジタル・ストレージ・オシロスコープ(DSO、フィリップス社製)によりコンピュータ(NEC 9801)フロッピーディスクに記録した。DSOの性能は以下のとおりである。

サンプルレート : 500MSample/sec

垂直軸の分解能 : 10ビット

垂直軸の周波数帯域 : 300MHz

サンプル個数 : 4096個

(512個のサンプルを補間により4069個とする)

伝播時間は図-3のように得られた波形の

表面反射波と底面反射波の最大振幅の受信時間間隔を測定した。したがって、得られた伝播時間は板厚を往復した伝播時間である。なお、ノイズによる誤差を少なくするため、測定されたデーターによる最大振幅時の前後20~30個のデーターを抜粋し最小二乗法により曲線近似を行い、その最大値における時間を最大振幅受信時間とした。

(3) 測定結果

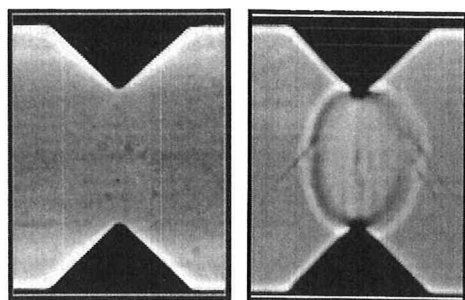
図-4は測定した板厚、表面反射波と底面反射波の伝播時間間隔の結果と、その結果から算出した超音波速度の一例である。(a)はLINE3、(b)はLINE9の結果である。横軸は供試体中心からPOINTまでの距離を表している。また、塗りつぶしたマーク●■▲は載荷荷重が9tfの場合で、中抜きマーク○□△は無載荷(荷重0tf)の場合である。

図-5は載荷荷重9tf場合、各LINEにおいて超音波速度が急激に変化しているPOINTを特異点とし、供試体の測定位置にプロットしたものである。

図-6は切欠き角度90°のテストピースについて有限要素法により弾塑性解析計算を行い、降伏応力(3100Kg/cm²)を越えた要素を黒塗りして表している。計算方法は荷重増分法により、総要素数508、総節点数293で計算を行い、載荷荷重9tf段階のでの塑性域の広がりを表している。

(4) 考 察

①板厚測定結果から載荷荷重0tfと9tfのデーターを比較する事により得られる塑性歪による板厚変化(板厚が薄くなっている部分)が弾性域と塑性域の範囲を示している。図-4より、LINE3ではPOINT18(供試体中心からの距離1.8cm)、LINE9はPOINT11(距離1.1cm)が弾塑性域の境界であることがわかる。



(a) 0tf (b) 9tf

図-2 荷重除荷後の画像
(60×82,pitch 0.2mm,scale 1→9.6mm)

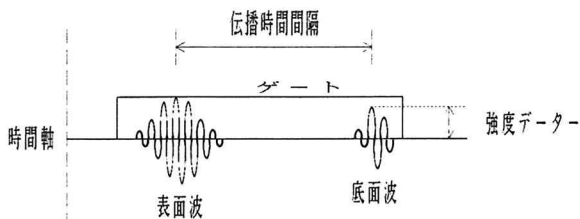
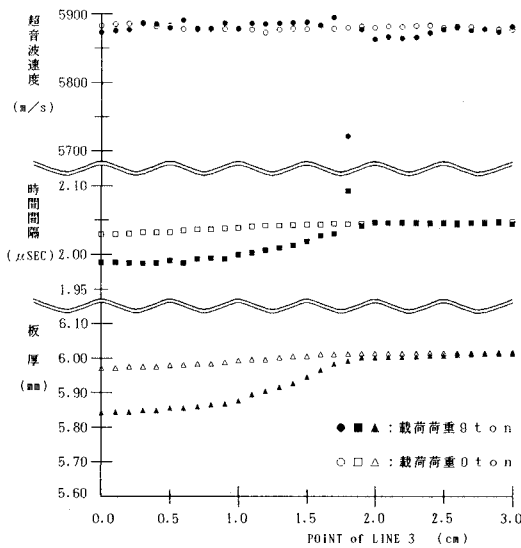
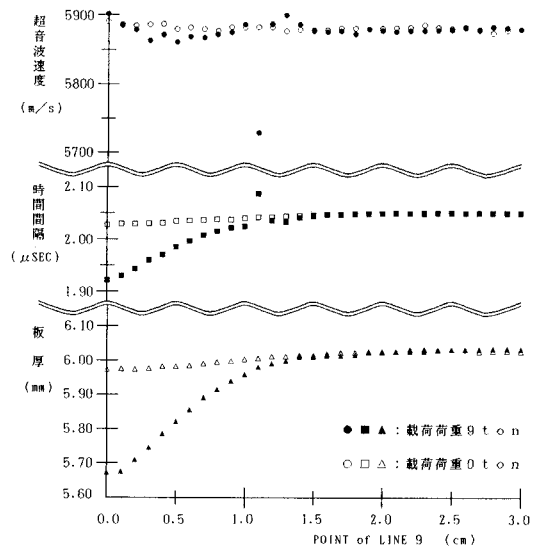


図-3 波形記録図



(a) LINE 3



(b) LINE 9

図-4 板厚、超音波伝播時間、超音波速度の測定結果

②同様に、伝播時間間隔についても板厚の変化の影響により時間間隔が短くなっている部分から塑性域の範囲を判断できる。図-4から、板厚測定の結果と同じPOINTが弾塑性域の境界となっている。また、弾塑性域の境界上のPOINTでは時間間隔が急激に長くなっている。

③一般的に引張応力作用下では超音波速度は遅くなる。しかし、板厚6mmでの残留応力の違いによる音速差はほとんど見られず、弾性域及び塑性域における超音波速度は $5880 \pm 10 \text{ m/sec}$ であった。また、時間間隔の影響により弾塑性境界上のPOINTでは急激に遅くなっている ($5720 \sim 5750 \text{ m/sec}$)。

以上の結果より、弾塑性境界の位置と図-2 (b) における探傷画像の変化の位置がほぼ一致していることから、超音波探傷で得られる底面反射波強度の変化が弾塑性域の境界を現していることがわかる。

また、超音波探傷における底面反射波強度の変化の要因は板厚や応力、弾塑性による材質の変化による影響は少なく、その一つとして弾塑性境界上であるため弾性分子と塑性分子の混在した分子組成による波動散乱の影響と考えているが、まだ確認はしていない。

3. 超音波探傷による引張応力作用下の塑性域進展の追跡

実験に使用した超音波探傷映像装置は、前記実験2. と同じ装置を使用した。供試体も形状寸法は同じであるが、切欠き角度が 15° 、 30° 、 60° 、 90° の4種類について実験を行った。超音波探傷は水浸法で行い応力

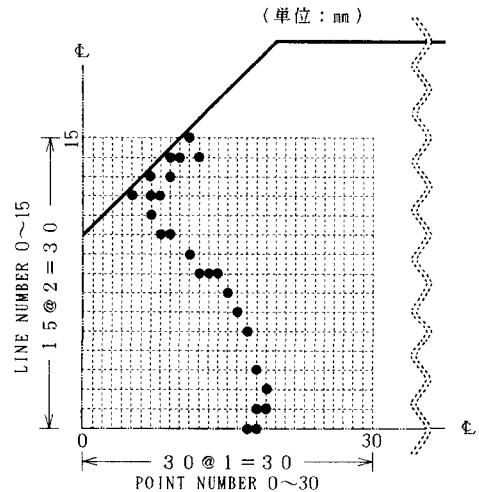


図-5 超音波速度における特異点

作用下の画像を得るため載荷装置にはオイルジャッキを用い、載荷荷重5 t o nから11 t o nまで1 t o n毎に超音波探傷を行った。

図-7は探傷画像一例で、供試体切欠き角度90°の各荷重段階での画像である。荷重増加にともなう画像の変化は有限要素により計算して得られた塑性域の範囲(図-6)とほぼ同じであり塑性域進展の状況が判る。

切欠き角度の違いによる変化は、荷重段階が初期である場合(荷重が小さい)切欠き角度が小さいほど塑性域の範囲が広い。言い替えれば、切欠き角度が小さいほど塑性域が生じる荷重段階が早いと考えられる。しかし、荷重段階が大きい場合には切欠き角度による違いはほとんど見られない。これは、荷重が進むにつれて切欠き先端の先鋭さが無くなり、同じ鈍化した形状となるためと考えられる。

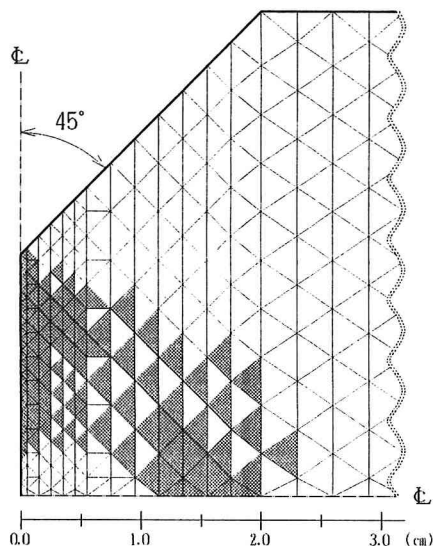


図-6 荷重増分法による弾塑性解析

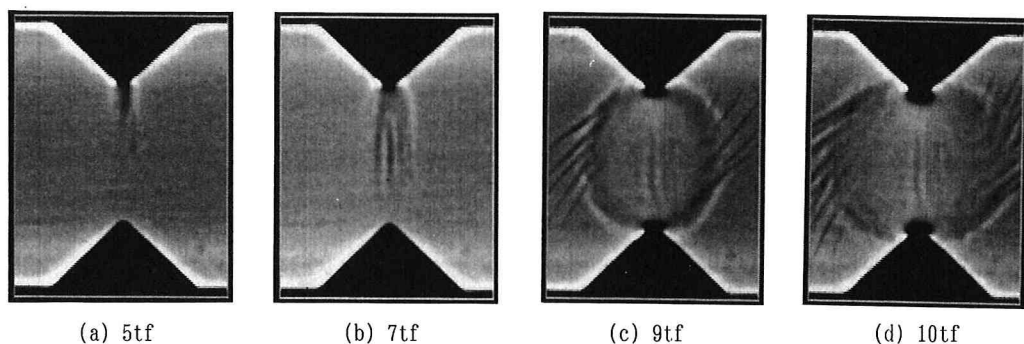


図-7 塑性域進展を現す超音波反射強度による画像の一例
(60×82, pitch 0.2mm, scale 1→9.6mm)

4. あとがき

部材の板厚や超音波の伝播時間、超音波速度を測定することにより弾塑性域の境界が顕著に現れ、塑性域の範囲を正確に表すことができた。また、超音波反射強度による画像でも板厚や伝播時間とほぼ同じ部分に変化が現れており、この画像からも十分に弾塑性域の境界を現していると考えられる。以上のことから、超音波反射波を利用した画像処理より構造部材の健全度評価の目安となる弾塑性域の境界を精度良く検出できる。

本研究の実験・解析に際して北見工業大学の小栗文泰君、北田健二君の両名に援助を受けたことをここに感謝します。

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.
- 2)山崎、菅原、大島、三上:画像処理を応用した切欠き周辺の塑性域進展の解析,土木学会第47回年次学術講演会,1992.