

I-8

欠陥を有する隅肉溶接部の応力波動伝播の解析

北見工業大学	正 員	菅原 登
北見工業大学	正 員	山崎 智之
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

供用中の構造部材あるいは構造物に対してその健全度を診断するために、非破壊検査の手法を用いることは、公共性を担う土木工学の重要な使命の一つである。非破壊検査の中でも近年特に注目を集めているのが超音波試験法である。超音波は人体には無害で扱いやすく、しかも物体中を伝播して欠陥などによって反射する性質をもっており、これによって物体内部の欠陥や inclusion を検出することができる。超音波による材料診断の精度は、材料表面から入射される応力波動伝播挙動の解析の精度に大きく依存しており、部材内部の欠陥や inclusion を検出するためには、入射波の特性をよく理解しておく必要がある。欠陥を有する部材中を伝播する超音波は、欠陥や inclusion によって応力波動としての散乱現象を発生し、波動モードの変換が複雑に生じる。本研究では、欠陥部における複雑な応力波動伝播現象を理解し解析する上で有効な Visual Simulation の応用を試みた。筆者らは、これまでモルタル製の供試体について応力波動伝播の解析を行ってきたが^{1) 2) 3)}、今回は鋼材を用いた T 形隅肉溶接部の内部にドリルホールを設けた供試体を用いて応力波動伝播の解析を行った。ここでは、FEM の解析手法によって求めた変位をデータとして Visual Simulation により、応力波動伝播の動的現象を視覚的に把握できることを示す。

2. 欠陥を有する隅肉溶接部の応力波動伝播挙動の Visual Simulation

1) 解析概要

まず、2次元のFEM解析によって時刻歴応答としてメッシュ節点における動的変位を求める。次にコンピュータグラフィックス(CG)のソフトウェアを用いて Scientific Visual Analysis (SVA)を行い、最後に欠陥部における応力波動伝播現象を2次元カラー表示する。

数値計算モデルとしては、隅肉溶接を施した鋼製の供試体を用い、溶接内部に欠陥のないもの及び欠陥としてドリルホールを設けたものについて解析を行う。大きさ及び形状は図1及び図2に示すとおりである。また、このうち図1.(b)及び図2.(b)はメッシュ分割図を示しており、構造上の対称性を考慮に入れ計算は部材全体の1/2について行い、計算機の容量の限界から実際の供試体モデルのうち重要視される部分を適切に抽出して解析を行った。なお、図1.(b)は節点数=1491、要素数=1410、図2.(b)は節点数=1491、要素数=1402で分割している。

また、計算には式(1)のような粘性の減衰項を有する振動系の運動方程式を用いる。

$$[M] \{\ddot{\delta}\} + [C] \{\dot{\delta}\} + [K] \{\delta\} = \{P\} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに $[M]$ = 質量マトリックス、 $[C]$ = 減衰マトリックス、 $[K]$ = 剛性マトリックス、 $\{\delta\}$ = 変位ベクトル、 $\{P\}$ = 外力ベクトルである。

Analysis of the Stress Wave Propagation for Fillet Weld Joint with Defect
by Noboru SUGAWARA, Tomoyuki YAMAZAKI, Masato HISATSUNE, Toshiyuki OSHIMA

なお、数値計算に用いた材料定数は鋼板及び溶接部とも次のように定めている。

弾性係数 $E = 21 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$
せん断弾性係数 $G = 8.08 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$
ポアソン比 $\nu = 0.30$
重量密度 $\rho = 7.85 \text{ tf/m}^3$
である。

また、減衰については、本解析に使用した総合解析プログラム I S A P で使用している Rayleigh 減衰の減衰マトリックス [C] を

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

..... (2)

とすると、
 $\alpha = 167550$ 、 $\beta = 2.1221 \times 10^{-3}$
と設定している。

外力としては、部材上縁の一点から集中荷重を作用させており、入射波の波形としては図3のような波形を用いた。数値的には振動数 $f = 1\text{MHz}$ 、時間ステップ $\Delta t = 0.02 \mu\text{s}$ 、継続時間 $t = 2 \mu\text{s}$ とした。

変位応答計算については $0.1 \mu\text{s}$ 間隔で $5 \mu\text{s}$ まで実行している。得られた結果は、コンピュータグラフィックスのソフトウェアを用いて可視化する。それらの一例を図5から図7に示すように、2次元カラー表示することができる。

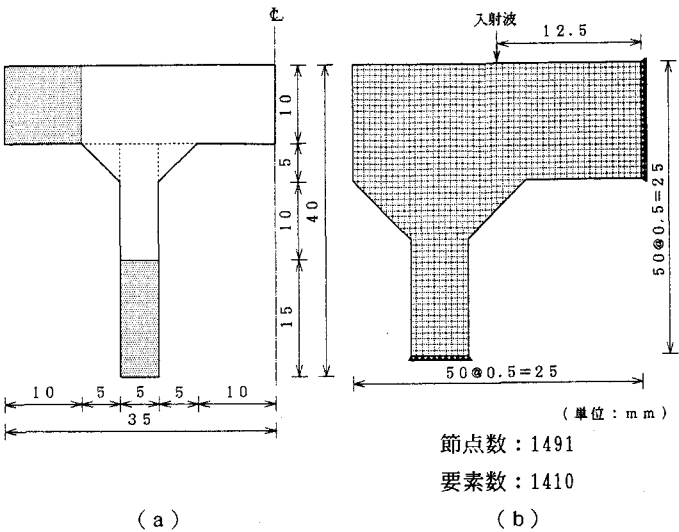


図1 計算モデル (欠陥なし)

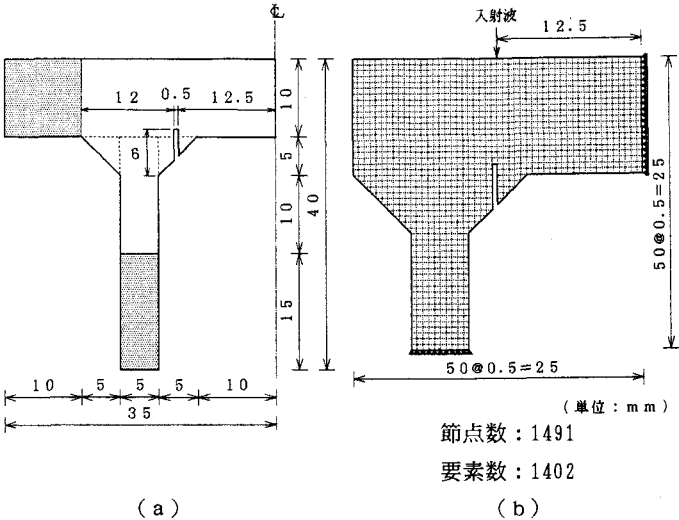


図2 計算モデル (ドリルホール)

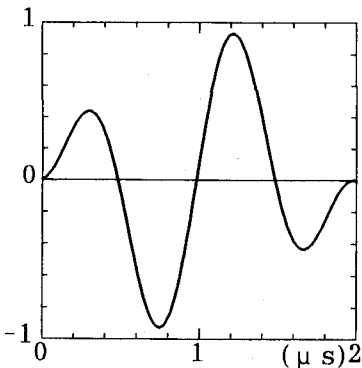


図3 入射波形

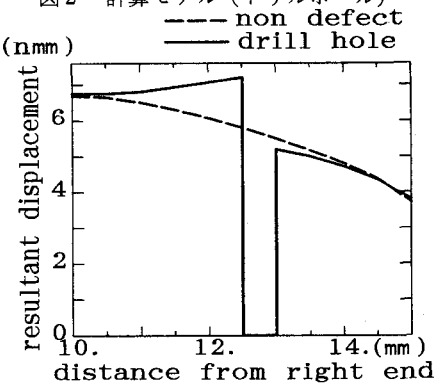
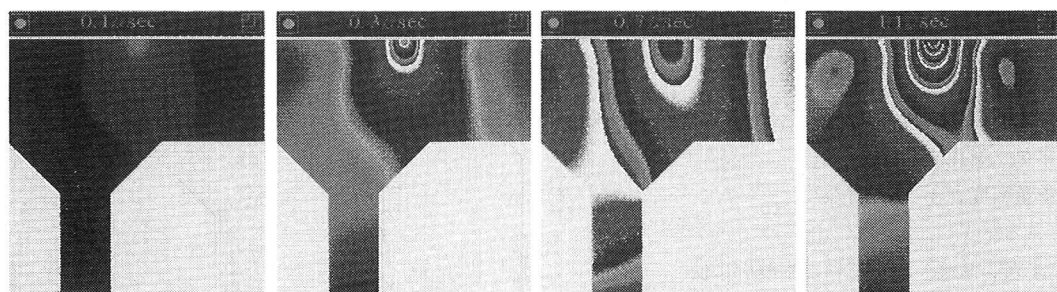
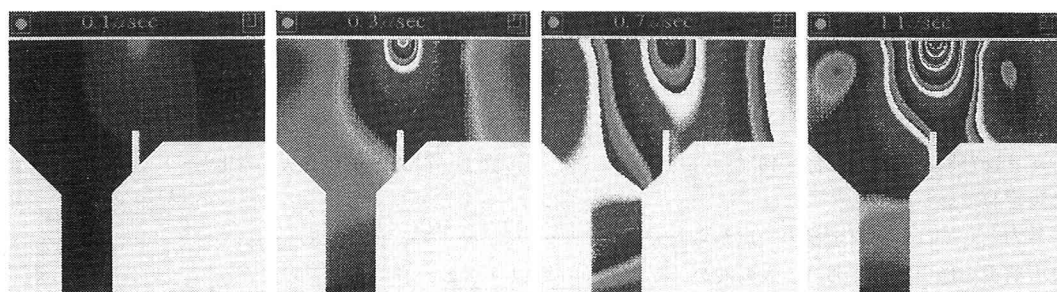


図4 合変位最大値の比較



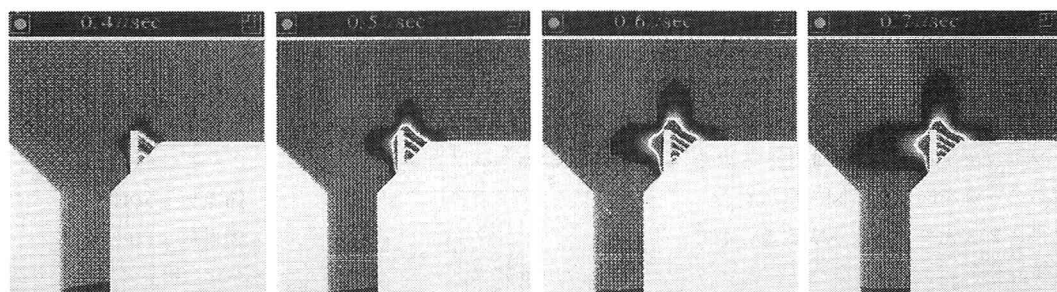
(a) $t = 0.1 \mu s$ (b) $t = 0.3 \mu s$ (c) $t = 0.7 \mu s$ (d) $t = 1.1 \mu s$

図5 欠陥のないモデルの波動散乱現象の Visual Simulation



(a) $t = 0.1 \mu s$ (b) $t = 0.3 \mu s$ (c) $t = 0.7 \mu s$ (d) $t = 1.1 \mu s$

図6 ドリルホールモデルの波動散乱現象の Visual Simulation



(a) $t = 0.4 \mu s$ (b) $t = 0.5 \mu s$ (c) $t = 0.6 \mu s$ (d) $t = 0.7 \mu s$

(e) $t = 1.0 \mu s$ (f) $t = 1.1 \mu s$ (g) $t = 1.2 \mu s$ (h) $t = 1.3 \mu s$

図7 差分データによる Visual Simulation

2) 解析結果

計算モデル図1及び図2について、Visual Simulationをした結果の比較を、図5及び図6に時刻(a)0.1 μ s、(b)0.3 μ s、(c)0.7 μ s、(d)1.1 μ sにおける水平及び鉛直変位応答成分の合変位の大きさの分布を、2次元表示する形で示している。この場合、色の明るい部分ほど合変位の振幅が大きいことを示している。どちらの場合にも、部材上縁から入射された応力波動が、時間の経過とともに一様に拡がって伝播していく様相が把握できる。しかし、ドリルホール欠陥のあるモデルの場合には、欠陥付近での合変位の大きさが、欠陥のない場合と比較すると多少大きいことがわかる。そのことを具体的に把握するため、図4に溶接表面における合変位の最大値に着目して、横軸に部材の右端からの距離、縦軸に合変位の最大値をとって2つのモデルについて比較した。図4から明らかに欠陥のある場合の方が合変位の振幅が大きいことがわかる。すなわち、ドリルホール付近で局部的に波動エネルギーが集中していることがわかる。また、ドリルホールの右側と左側では、明らかに振幅の差に違いが見られるが、これは回折現象によって波動エネルギーが、欠陥部において散乱するからであると考えられる。また、図7は欠陥のある供試体のデータから、欠陥のない供試体のデータを引いた数値データをもとにして作成したシミュレーション図で、さらに色の配色の仕方も変えて表示したものである。なお、図7.(a)から(d)及び図7.(e)から(h)は、それぞれ0.1 μ sの時間ステップで連続的に表示している。この場合、色の明るい部分ほど合変位の振幅は小さいことを示している。図7から、やはり欠陥付近の合変位の振幅が大きくなっていることがわかる。さらに、時間を追って見てみると、欠陥付近から波動が反射現象および回折現象をして伝播していく様子がより明白に確認できる。

3. あとがき

以上のように、SVAを利用すれば、応力波動伝播の複雑な物理現象を可視化し、動的現象を把握することが可能である。これらを実際に計測して得られた波形と共に用いれば、部材内部の欠陥を逆解析する際の実用的な指針となる。また、実験計画を立てる場合においても、センサーの配置及び選択、或いは結果の予測等が、それらの実験実施以前に可能になる。

今回FEMとSVAにより、隅肉溶接内部の欠陥部において発生する複雑な波動散乱現象を把握する基礎的なVisual Simulation結果が得られた。ただし、対象とする供試体の種類も少なく、具体的な検討を行うまでには至っていない。今回の数値計算に当たっては、鋼材と溶着金属の材料定数に同じ数値を用いたが、厳密には異なると考えられる。また、この理論計算とは別に実験も行っており、実験値との比較検討を予定している。

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。また、SVA関連処理については北見工大の三上修一氏（現在、北大工学部国内留学中）のお世話になりました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 菅原、山崎、久恒、大島：欠陥を有する部材中の応力波動伝播の Visual Simulation、土木学会第48回年次学術講演会概要集、1993
- 2) 菅原、山崎、寺田、大島：欠陥を有する応力波動散乱の解析、土木学会北海道支部論文報告集 第49号、1993
- 3) 三上、大島、クリッツ、菅原：積層複合ばりを伝播する応力波動と Energy Flux 分布の研究、構造工学論文集、Vol.39A、1993
- 4) 田中、三枝：振動モデルとシミュレーション、応用技術出版、1984