

異種材料領域を有する薄肉平板の動的応答特性を 利用した非破壊評価手法の検証

川上哲太朗*1・草加英之*2・青木由香利*2・山口 幸*2

Verification to Nondestructive Evaluation Method Using Characteristic of Dynamic Response for A Composite Thin Plate

Tetsutaro KAWAKAMI, Hideyuki KUSAKA, Yukari AOKI and Yuki YAMAGUCHI

Abstract

The dynamic properties of composite plates are analyzed by the boundary element method in this study. The composite plate is defined in this analysis by combining an infinite thin plate and a finite thin plate, that is casted into the infinite plate, and whose material properties are different from the infinite plate. To investigate the dynamic response of the composite thin plate, numerical analyses for some models are carried out. The results show the dynamic response of the composite plates well, and also confirm the usefulness of the proposed method for the composite plate applications. Furthermore, the proposed method was applied to numerical experiment of evaluation for a defect in thin plate. Results of numerical experiment on these models show that this nondestructive evaluation method has high appropriateness and usefulness to inspect defects in thin plate.

1. 序 論

土木、建築構造物において、鋼製部材は古くから多く用いられており、今日では高強度材料の実用化に伴いこれら部材の軽量薄肉化が進んでいる。

しかしながら、薄肉の鋼製部材を使用する場合、特に注意しなければならないことは、周辺環境や経年変化による腐食、劣化や微小欠陥が存在することで、繰り返し加重による疲労破壊や地震などの作用荷重により、構造物の倒壊など致命的な損傷を受ける可能性を有していることである。このような薄肉の鋼製部材の破壊を防ぐためには、周知のとおり構造物の維持管理の過程において、部材の劣化損傷を種々の非破壊検査により事前に検出する必要がある。

現状の非破壊検査法は放射線透過検査や超音波深傷検査が一般的であるが、これらの検査法においては比較的高度な検査技術や評価技術が必要となる。また、放射性物質の取り扱いなどの安全面、精密検査機器の使用に伴う経済性

の問題があると考えられる。さらに、補修保全が必要不可欠な時代をむかえ検査数そのものが増加し、検査法の改善、効率化が求められている。

本研究は、薄肉鋼製部材を対象に、その健全性を非破壊検査により評価するための簡便な一次的検査手法の開発を目的として、薄肉部材内に存在する劣化損傷部（表面からは目視できない裏面側に存在する腐食部や、表面塗装などで覆われている欠陥など）を、部材表面を伝播する波動の散乱状態の可視化により検出することを試みるものである。なお、本研究では簡便かつ経済的な検知手法の開発を目指すことから、波動源として超音波ではなく、小型振動モータなどによる低周波の波動を想定している。また、筆者らはこれまでに劣化損傷部を仮定した円形の異種材料領域（定式化上任意形状可能）を有する薄肉平板の基本的な波動伝播特性を数値解析により明らかにしている（川上・草加、2005）。そこで、本研究では特に、この波動伝播特性を利用した劣化損傷部検知手法の評価と劣化損傷度の評価法を具体的に提案し、その有用性を数値解析により定性的かつ定量的な検討を行う。

2006年1月16日受理

*1 東海大学海洋学部海洋土木工学科 (Department of Marine Civil Engineering, The School of Marine Science and Technology, Tokai University)

*2 東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻 (Graduate School of Marine Science and Technology, Tokai University)

平板の振動・動的問題は Rayleigh (1889), Lamb (1994) 以来, 平板の固有振動問題として, 解析的及び実験的に数多くの研究がなされてきた. 近年では有限要素法や境界要素法などの数値解析手法を用いた研究が行われており, 丹羽 (1980), Kitahara (1984) による境界要素法を用いた平板の固有振動問題の研究があげられる. 平板の振動問題を直接的な動的問題として取り扱った研究も, 例えば Danial and Rizzi (1996) の如く1980年代以降数値解析的アプローチを主体に行われている. これらの研究の多くは, 梁などで固定された平板や, 重ね継ぎ手を有する平板など種々の構造形態を対象に行われている. しかしながら, 本研究のように, 平板内に材料物性の異なる領域を有する複合材料としての研究はほとんど行われていない. また, 波動の散乱状態を変位応答などの物理量で, 定性的かつ定量的に解析した例や, 非破壊評価へ適用した例は極めて少ない.

数値実験における解析手法としては境界要素法を用いた. 数値解析手法の概要は次のとおりである. まず, 解析領域を, 劣化損傷部を仮定した異種材料平板 (内部領域) と異種材料平板と同形状の孔を有する無限母材平板 (外部領域) と定義する. この時, 内部領域と外部領域は共通の境界を有するものとする. 次に, 内部及び外部領域に対しては, 各々たわみに関する動的な支配方程式が定義される. さらに各領域における支配方程式は, Green の公式及び基本解によりたわみ及びたわみ角に関する積分方程式に各々変換され, さらに極限操作により境界積分方程式が定式化される. 各領域に対する境界積分方程式を離散化し, 数値積分を行い, 各領域共通の境界上で, たわみ, たわみ角, 曲げモーメント, せん断力に関する接続条件を導入することにより, 異種材料領域を有する無限平板の動的問題に対する連立一次方程式が得られる. 最終的には, 得られた連立一次方程式を数値的に解き, 境界上の物理量が得られ, さらに得られた境界上の物理量を積分方程式に代入することにより, 各領域の任意点での物理量を求めることができる. また入力振動としては, 無限母材平板内の任意点における調和振動荷重を考える.

2. 平板の動的問題の定式化 (川上・小倉, 2002)

等方, 均質で一様な厚さの線形弾性薄肉平板の時間調和振動に関する運動方程式は, 次の様に表せる.

$$(\Delta^2 - \lambda^4) u(\mathbf{X}) = (\Delta - \lambda^2)(\Delta + \lambda^2) u(\mathbf{X}) = \frac{p(\mathbf{X})}{K} \quad (1)$$

ここに, Δ はラプラシアン, u はたわみ, p は単位面積当たりの垂直荷重, \mathbf{X} は運動方程式が定義される領域内の点を表す. また, ρ を密度, h を平板の厚さ, ν をポアソン比, E をヤング率, 角周波数を ω として, 板剛性 K および入射波波数 λ は次式により与えられる.

$$K = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2) \quad \lambda^4 = \frac{\omega^2 \rho h}{K} \quad (3)$$

ここで, $u_p(\mathbf{X})$ は入力振動を表す. さらに, \mathbf{U} は基本解を表し, $H_0^{(1)}$ を第1種0次ハンケル関数として次の様に表される.

$$U(\mathbf{X}, \mathbf{Y}; \lambda) = -\frac{i}{8\lambda^2} [H_0^{(1)}(\lambda r) - H_0^{(1)}(i\lambda r)] \quad (4)$$

ここで, \mathbf{Y} は \mathbf{X} と同様に領域内の点を表し, $r = |\mathbf{X} - \mathbf{Y}|$ である. 次に, 平板の内部・外部領域及び境界等の定義を Fig. 1 に示す. 図中において, D は平板の支配方程式が定義されている内部領域, D_c はその補領域である外部領域を表す. また, \mathbf{n} は外向き単位法線ベクトル, \mathbf{s} は接線ベクトルである. 平板のたわみとたわみ角に関する積分表現は, Green の公式と基本解より, 領域内および境界上の4つの物理量すなわち, たわみ $u(\mathbf{X})$, たわみ角 $\partial u(\mathbf{X})$, 曲げモーメント $\mathbf{M}u(\mathbf{X})$, 等価せん断力 $\mathbf{V}u(\mathbf{X})$ を用いて定式化される. \mathbf{M} , \mathbf{V} は, 曲げモーメント及び等価せん断力に関する演算子を表す.

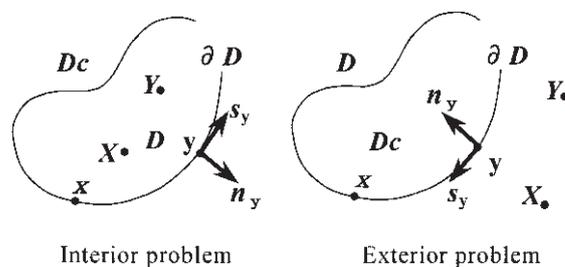


Fig. 1 Definition of interior problem and exterior problem

外部問題におけるたわみ及びたわみ角に関する積分方程式および境界積分方程式は次式のようなになる.

$$\begin{aligned} & -\int_{D_c} U(\mathbf{X}, \mathbf{Y}; \lambda) \frac{p(\mathbf{Y})}{K} dA_Y - \int_{\partial D} [U(\mathbf{X}, \mathbf{y}; \lambda) \{ \mathbf{V}_n u(\mathbf{y}) \} \\ & + \{ \partial_{n_x} U(\mathbf{X}, \mathbf{y}; \lambda) \} \{ \mathbf{M}_{n_x} u(\mathbf{y}) \} - \{ \mathbf{M}_{n_y} U(\mathbf{X}, \mathbf{y}; \lambda) \} \{ \partial_{n_y} u(\mathbf{y}) \} \\ & + \{ \mathbf{V}_{n_y} U(\mathbf{X}, \mathbf{y}; \lambda) \} \{ u(\mathbf{y}) \}] ds_y \\ & = -u_p(\mathbf{X}) - [\mathbf{S}(\mathbf{V}_n u)](\mathbf{X}) + [\mathbf{D}(\mathbf{M}_{n_x} u)](\mathbf{X}) \\ & - [\mathbf{M}(\partial_{n_x} u)](\mathbf{X}) + [\mathbf{V}(u)](\mathbf{X}) \\ & = \begin{cases} u(\mathbf{X}) & \mathbf{X} \in D \\ 1/2 u(\mathbf{x}) & \mathbf{X} = \mathbf{x} \in \partial D \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & -\partial_{n_x} u_p(\mathbf{X}) - [\partial_{n_x} \mathbf{S}(\mathbf{V}_n u)](\mathbf{X}) + [\partial_{n_x} \mathbf{D}(\mathbf{M}_{n_x} u)](\mathbf{X}) \\ & - [\partial_{n_x} \mathbf{M}(\partial_{n_x} u)](\mathbf{X}) + \partial_{n_x} [\mathbf{V}(u)](\mathbf{X}) \\ & = \begin{cases} \partial_{n_x} u(\mathbf{X}) & \mathbf{X} \in D \\ 1/2 \partial_{n_x} u(\mathbf{x}) & \mathbf{X} = \mathbf{x} \in \partial D \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

外部問題と同様に, 内部問題におけるたわみ及びたわみ角に関する境界積分方程式は次の様になる.

$$\begin{aligned} & -u_p(\mathbf{X}) + [\mathbf{S}(\mathbf{V}_n u)](\mathbf{X}) - [\mathbf{D}(\mathbf{M}_{n_x} u)](\mathbf{X}) \\ & + [\mathbf{M}(\partial_{n_x} u)](\mathbf{X}) - [\mathbf{V}(u)](\mathbf{X}) \\ & = 1/2 u(\mathbf{x}) \quad (\mathbf{X} = \mathbf{x} \in \partial D) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 & -(\partial_{nx}u_p)(\mathbf{X}) + [\partial_{nx}S(\mathbf{V}_n u)](\mathbf{X}) - [\partial_{nx}D(\mathbf{M}_n u)](\mathbf{X}) \\
 & + [\partial_{nx}M(\partial_n u)](\mathbf{X}) - \partial_{nx}[V(u)](\mathbf{X}) \\
 & = 1/2 \partial_{nx}u(\mathbf{x}) \quad (\mathbf{X} = \mathbf{x} \in \partial D)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

ここで、式(7)~(10)における略式記号 S , D , M , V は式(5), (6)の定義に従うものである。

Fig. 2に、領域の接続に関する概念を示す。 D_1 は ∂D を境界とする孔を有する無限平板を表し、 D_2 は ∂D を境界とする有限平板を表す。したがって、領域 D_1 では外部問題となり、境界 ∂D 上において、境界積分方程式、式(6)及び式(8)が成立する。また、領域 D_2 では内部問題となり、境界 ∂D 上において境界積分方程式、式(9)及び式(10)が成立する。この2つの領域 D_1 と D_2 は、同一形状の境界 ∂D を有し、また境界上の物理量も同じであることから、この共通の境界上で各領域を接続し重ね合わせることが可能である。この接続を行った共通の境界を ∂D_c と新たに定義する。領域の接続条件は、境界 ∂D_c 上で次の関係を満足するように与えられる。

$$\begin{aligned}
 u_1(\mathbf{x}) &= u_2(\mathbf{x}), \quad \partial_n u_1(\mathbf{x}) = \partial_n u_2(\mathbf{x}), \\
 \mathbf{M}_n u_1(\mathbf{x}) &= -\mathbf{M}_n u_2(\mathbf{x}), \quad \mathbf{V}_n u_1(\mathbf{x}) = -\mathbf{V}_n u_2(\mathbf{x})
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

上式の添字1, 2は領域 D_1 と領域 D_2 に関する量であることを示す。また、式(11)における外向き法線ベクトルは、内部領域(または外部領域)に対するものである。上記の接続条件により接続された新たな領域は、異種材料領域を有する無限平板を表すことになる。また、接続境界 ∂D_c 上において、境界積分方程式、式(6), 式(8)及び式(9), 式(10)が成立し、境界上の未知量は式(11)に示された、たわみ、たわみ角、曲げモーメント、等価せん断力であることから、境界上で定義される未知数の数と方程式の数が一致する。

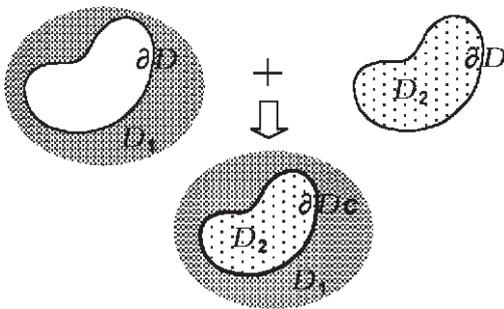


Fig. 2 A coupling of infinite plate and finite plate

次に、式(6), (8), (9), (10)に示された境界積分方程式を接続条件の下に解くために境界を離散化し、数値積分を行い、連立一次方程式に変換する。最終的には連立一次方程式を解き、境界上の物理量を求め、式(5), 式(7)に、この物理量を代入し、内部領域における物理量を求める。

3. 実際の欠陥検知法を想定した数値実験

筆者らのこれまでの研究結果(川上・小倉, 2003)によると、円形の異種材料領域を含む無限平板内におけるたわみ振幅の応答分布は、一般的にFig. 3のようになることがわかっている。特に特徴的なこととして、無限平板内に異種材料領域が存在すると異種材料領域後方(入射波に対して透過側)でたわみ振幅が低くなる領域が現れ、前方には反射波によりたわみ振幅が高くなる領域が現れることがあげられる。

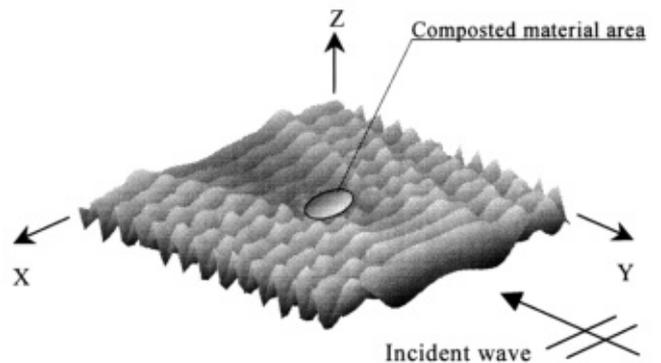


Fig. 3 Dynamic response of deflection for composite thin plate

本研究では、上記の一般的な異種材料領域を有する平板の波動伝播特性に基づき、実際の非破壊検査方法を具体的に提案し、その有用性を数値実験により定性的かつ定量的に評価することとした。

3.1 数値実験モデル

実際の非破壊検査手法を想定した数値実験モデルとして、Fig. 4に示すような、無限平板の任意点に板剛性の異なる円形の劣化損傷部と仮定した異種材料領域が存在する場合を仮定する。ここでは便宜上円形の異種材料領域の中心に直交座標系の原点を置いた。次に図中に示すような配置で波源 w 、計測点 m_1 , m_2 の相対位置を固定し、各々

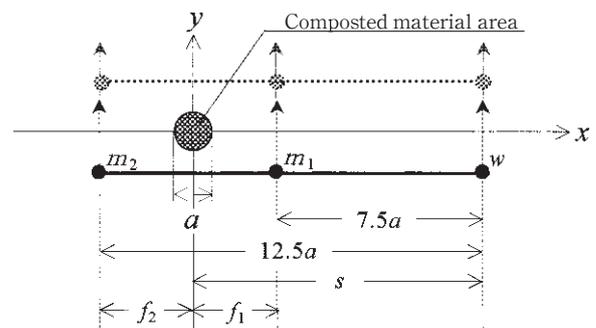


Fig. 4 Numeric model for proposed nondestructive evaluation method

同時に y 軸方向に平行移動する方法で劣化損傷部の検知を考えた。

数値実験結果としては、計測位置 f_1/a , f_2/a が y 軸方向に平行移動する軌跡とする測線 y を a で無次元化した y/a と、定常状態における波動散乱場のたわみ振幅 $|u|$ と入射波のたわみ振幅 $|u_i|$ の比 $|u/u_i|$ を求めた。その応答比の分布形状の特性より劣化損傷部の検知を定性的に試みることにした。

解析パラメータおよび材料物性値を Table 1 に示す。数値解析パラメータとしては、 Kr (無限平板の板剛性 K_1 と異種材料領域の板剛性 K_2 との比 K_2/K_1)、入射波波数 λ を a で無次元化した $a\lambda$ 、波源位置 s を a で無次元化した s/a 、無次元化計測位置 f_1/a , f_2/a とした。なお、 $a\lambda$ のパラメータはこれまでの研究で得られた結果を参考にし、事前に要求される検知対象とする劣化損傷部の代表寸法 a と入射波波数 λ との比 $a\lambda$ が 0.2~2.0 (入射波波数 λ を周波数に換算すると 3046~63Hz) の範囲から選定したものであり、Fig. 3 で示された特徴が最も顕著に表れている代表的な 2 ケースである。

Table 1 Material properties and analysis conditions

a	(mm)	2
E_1	(N/mm ²)	2.1×10^5
ν_1		0.25
$\rho_1 = \rho_2$	(kg/mm ³)	7.85×10^{-6}
K_1	(Nmm)	1.87×10^4
h_1	(mm)	1
p	(N)	1
$Kr = K_2/K_1$		0.1~0.9
$a\lambda$		0.6, 1.0
s/a		17.5~-7.5
f_1/a		10~-15
f_2/a		5~-20

解析ケースとしては Kr が 5 ケース、 $a\lambda$ が 2 ケース、 $(s/a, f_1/a, f_2/a)$ の組み合わせが 14 ケースとして総計 140 ケースである。

Table 2 に数値計算結果の代表例として、Figs. 5~9 に示す数値計算ケースの $(s/a, f_1/a, f_2/a)$ と劣化損傷部をモデル化した異種材料領域との位置関係を示す。ケース分けされた応答比の分布の形状や、大きさを整理し、その特徴を把握し劣化損傷部の検知を行うこととする。

Table 2 に示す case 1 は、異種材料領域より波源位置、計測位置が左にある場合、case 2 は、異種材料領域が波源位置 s/a と計測位置 f_1/a の間に存在する場合、case 3 は、計測位置 f_1/a と f_2/a の間に異種材料領域がある場合、case 4 は、異種材料領域が計測位置 f_2/a より左にある場合、case 5 は、計測位置が異種材料領域内を通過する場合

Table 2 Case of numeric calculation results

case	$(s/a, f_1/a, f_2/a)$
1	$(-2.5, -10, -15)$
2	$(2.5, -5, -10), (11.25, 3.75, -1.25)$
3	$(10, 2.5, -2.5), (11.25, 3.75, -1.25)$
4	$(15, 7.5, 2.5)$
5	$(7.5, 0.0, -5), (12.5, 5, 0.0)$

である。

3.2 数値実験結果

(1) 劣化損傷部検知手法の評価

Fig. 5 に、Table 2 における case 1 の代表的な応答比 $|u/u_i|$ の応答分布を示す。この場合、計測位置 f_1/a , f_2/a は基本的に反射波の影響を受けることとなる。 $a\lambda = 0.6$, 1.0 とともに、異種材料領域付近で応答比 $|u/u_i|$ が約 1.1 になっており、反射波の影響が現れていることがわかる。

なお、case 1 において波源位置 s/a が -7.5 以上離れている場合は、異種材料領域による波動伝播への影響を顕著に確認することができなかった。これは異種材料領域による反射波が減衰により無くなり、入射波の波動しか確認できないためである。Fig. 6 に、Table 2 における case 2 の代表的な応答比 $|u/u_i|$ の分布を示す。計測位置 f_1/a , f_2/a はいずれも透過側に位置しており、応答比 $|u/u_i|$ が小さい領域を計測することになると考えられる。数値計算結果に

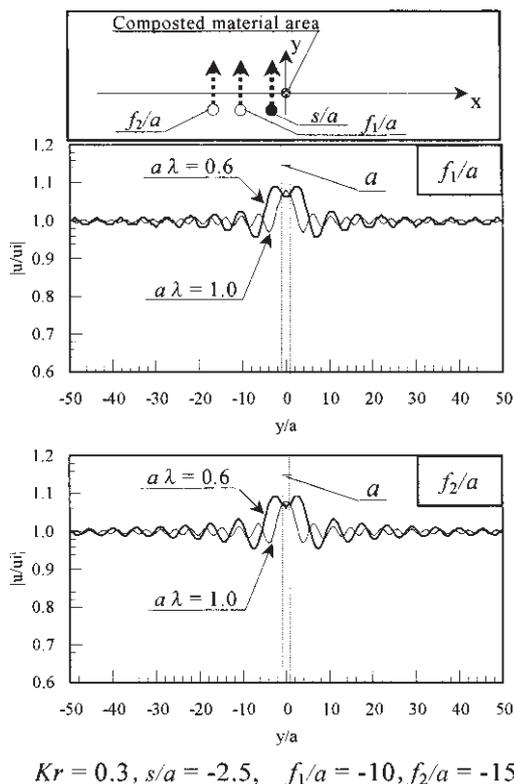
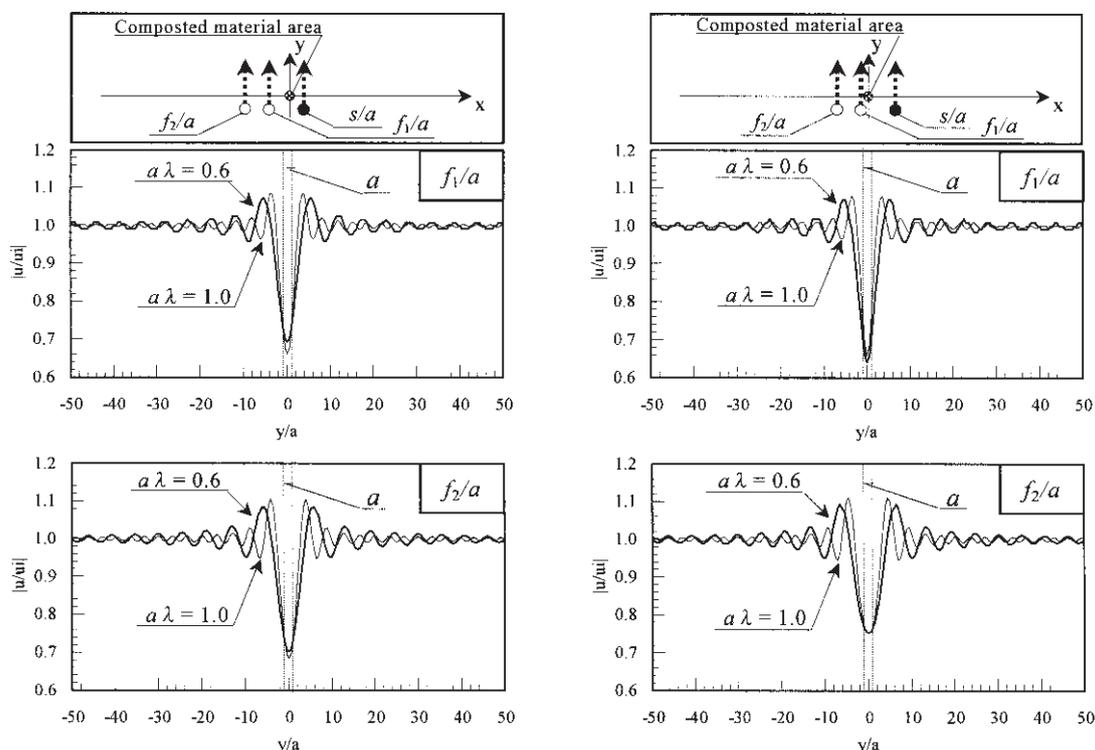


Fig. 5 Distribution of deflection response ratio in case 1

おいては, Fig. 6(a) より, $a\lambda = 0.6, 1.0$ で計測位置 f_1/a , f_2/a とともに, 異種材料領域付近で応答比 $|u/u_i|$ は小さくなり, 異種材料領域の中心位置において応答比 $|u/u_i|$ は最小値となっていることがわかる. 次に, Fig. 6(a) と Fig. 6(b) を比較する. 両図における解析パラメータの違いは, Fig. 6(b) の方が異種材料領域に f_1/a がより近いことである. Fig. 6(a), (b) の f_1/a における結果を比較すると, 明らかに Fig. 6(b) の方が異種材料領域付近での応答比の低下が大きくなっていることがわかる. さらに, Fig. 6(b) の $f_1/a, f_2/a$ を比較してみると, f_1/a の方が, 異種材料領域付近での応答比の低下範囲が狭くなっている. 以上より, f_1/a が異種材料領域に近いほうが, 計測位置 f_1/a と f_2/a の応答比の分布形状に顕著な差が現れることがわかった. なお, 透過波側の低い応答比を測定した場合, 全てのケースにおいて応答比は約 0.7 前後を示している.

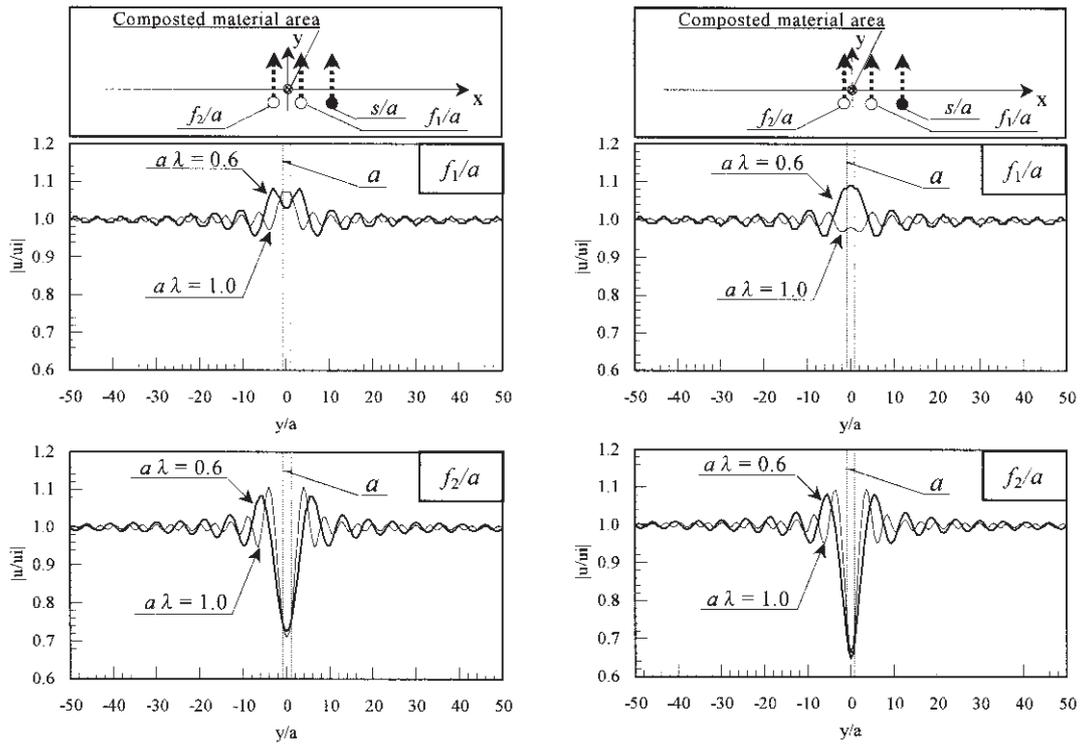
Fig. 7 に, Table 3 における case 3 の代表的な応答比 $|u/u_i|$ の応答分布を示す. この場合, 計測位置 f_1/a は反射波の影響を受けた応答比 $|u/u_i|$ を, 計測位置 f_2/a は透過側の影響を受けた低い応答比 $|u/u_i|$ が得られることとなる.

Fig. 7(a), (b) の計測位置 f_1/a では, 反射波の影響を受けていることから, Fig. 5 と同様に $a\lambda = 0.6$ では, 異種材料領域付近でたわみ振幅が若干大きくなっていることがわかる. また, 計測位置 f_2/a は透過側の低いたわみ振



(a) $Kr = 0.3, s/a = 2.5, f_1/a = -5, f_2/a = -10$ (b) $Kr = 0.3, s/a = 6.25, f_1/a = -1.25, f_2/a = -6.25$

Fig. 6 Distribution of deflection response ratio in case 2

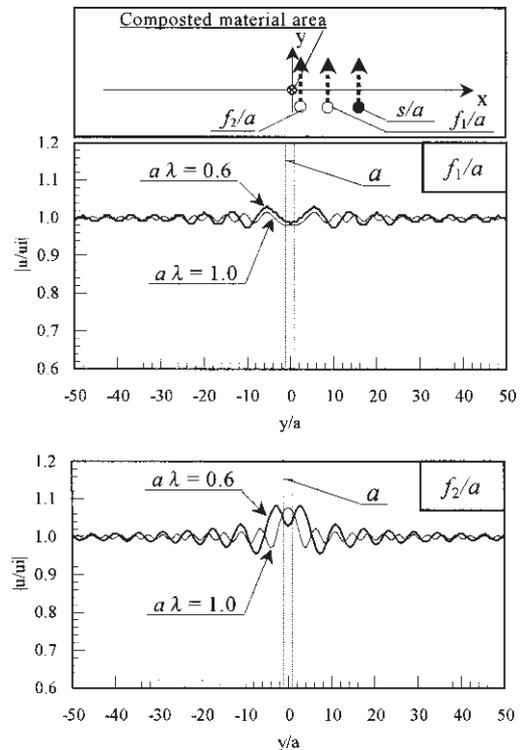


(a) $Kr = 0.3, s/a = 10, f_1/a = 2.5, f_2/a = -2.5$ (b) $Kr = 0.3, s/a = 11.25, f_1/a = 3.75, f_2/a = -1.25$

Fig. 7 Distribution of deflection response ratio in case 3

幅を計測しており、異種材料領域付近でたわみ振幅が小さくなっている。また、Fig. 7(a), (b)を計測位置 f_2/a の位置で比較すると、より計測位置に近い Fig. 7(b)の方が、異種材料領域に近づくとつれ、たわみ振幅が小さくなる特徴が顕著に現れている。

Fig. 8に、Table 2における、case 4の代表的な応答比 $|u/|u_1|$ の応答分布を示す。この場合、計測位置 $f_1/a, f_2/a$ はともに反射波の影響を受けた応答比 $|u/|u_1|$ が得られることとなる。Fig. 8より、 f_1/a では $a\lambda = 0.6, 1.0$ とも、異種材料領域付近で、応答比 $|u/|u_1|$ が若干大きくなっていることがわかるが、顕著な反射波の特徴が現れているとはいえない。 f_2/a については $a\lambda = 0.6, 1.0$ ともに異種材料領域付近で、応答比 $|u/|u_1|$ が約 1.1と反射波の影響を受けていることがわかる。なお、本ケースにおいて波源位置 s/a が 17.5以上離れている場合は、異種材料領域による波動伝播への影響を顕著に確認することができなかった。これは case 1と同様の理由と考えられる。Fig. 9に、Table 2における case 5の代表的な応答比 $|u/|u_1|$ の応答分布を示す。Fig. 9(a), (b)より異種材料領域上を計測点が通過した場合は、 $a\lambda = 0.6, 1.0$ とも異種材料領域の中心に近づくとつれ極端に応答比 $|u/|u_1|$ が小さくなっていることがわかる。また、異種材料領域中心での応答比 $|u/|u_1|$ のピーク先端の幅と、異種材料領域の直径がほぼ同じであることもわかった。なお、本解析では異種材料領域の直径 a と解析ピッチの関係上、異種材料領域内に一点しか解析点がな



$Kr = 0.3, s/a = 15, f_1/a = 7.5, f_2/a = 2.5$

Fig. 8 Distribution of deflection response ratio in case 4

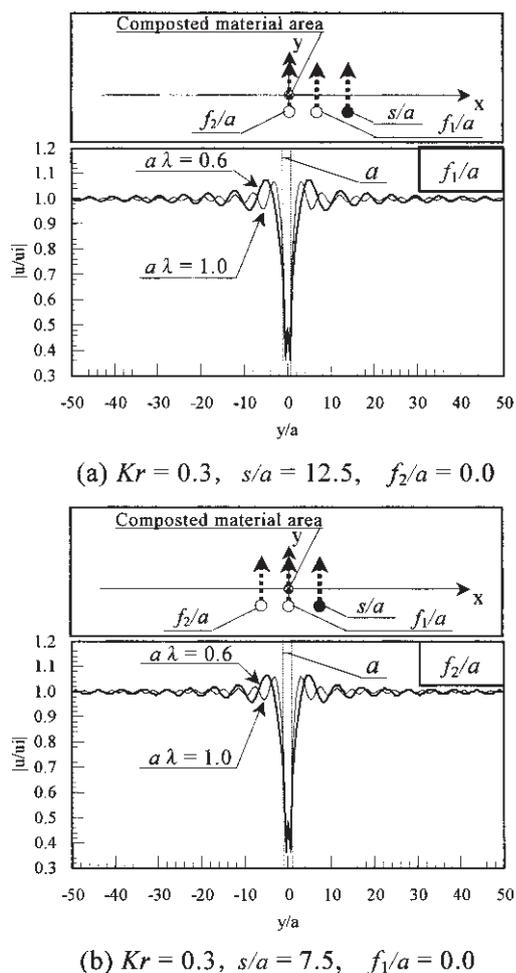


Fig. 9 Distribution of deflection response ratio in case 5

いためピーク先端の波形がWのようになっている。

なお、本節では解析結果として $Kr=0.3$ の場合のみを示して説明してきたが、他の Kr についても同様の結果が得られている。

以上、比較的低周波の波動伝播特性を用いた、劣化損傷部の検知手法の数値解析的検証を行った結果、応答比 $|u/u_i|$ の応答分布の特徴を捉えることにより、劣化損傷部の位置、代表的寸法の同定が可能だと考えられる。

具体的には、計測位置 f_1/a , f_2/a のたわみ振幅の応答分布の特徴から以下のように劣化損傷部が同定されると考えられる。

(1) 計測位置 f_1/a , f_2/a とともに、応答比 $|u/u_i|$ が大きくなる場合、劣化損傷部は f_1/a , f_2/a の応答比 $|u/u_i|$ が大きくなっている位置での波源位置と計測位置との直線上で、波源位置より右側あるいは、 f_2/a の左側にあると考えられる。

(2) 計測位置 f_1/a , f_2/a とともに、応答比 $|u/u_i|$ が小さくなる場合、劣化損傷部は f_1/a , f_2/a の応答比 $|u/u_i|$ が小さくなっている位置での波源位置と計測位置との直線上で、波源位置と計測位置 f_1/a の間にあると考えられる。

(3) 計測位置 f_1/a では応答比 $|u/u_i|$ が大きくなり、計測位置 f_2/a では小さくなる場合、劣化損傷部は、その位置での波源位置と計測位置との直線上で、計測位置 f_1/a , f_2/a の間にあると考えられる。

(4) 計測位置 f_1/a , f_2/a どちらかにおいて、急激に応答比 $|u/u_i|$ が小さくなる場合、その位置が劣化損傷部内であると考えられる。また、応答比 $|u/u_i|$ の低下範囲におけるピーク先端の幅が、劣化損傷部の代表的寸法を示しているものと考えられる。

さらに、異種材料領域中心付近で応答比 $|u/u_i|$ が最も反射波及び透過波の影響を受けている場合と比較してみると、反射波は位置によって応答比 $|u/u_i|$ の値に変動があり波動の散乱を顕著に捕らえられない場合があるが、透過波は本解析モデルの場合、応答比 $|u/u_i|$ の値が約 0.7 と一定値を示した。

(2) 劣化損傷度の評価

劣化損傷の度合いを評価するため、Fig. 7(a) での透過側計測位置 f_2/a の応答比の分布形状について Kr による比較を Fig. 10 に示す。

Fig. 10(a) より、透過側の計測位置の応答比の最小値は、 $Kr=0.3$ に比べて $Kr=0.7$ の方が若干高い値を示していることがわかった。Fig. 10(b) については異種材料領

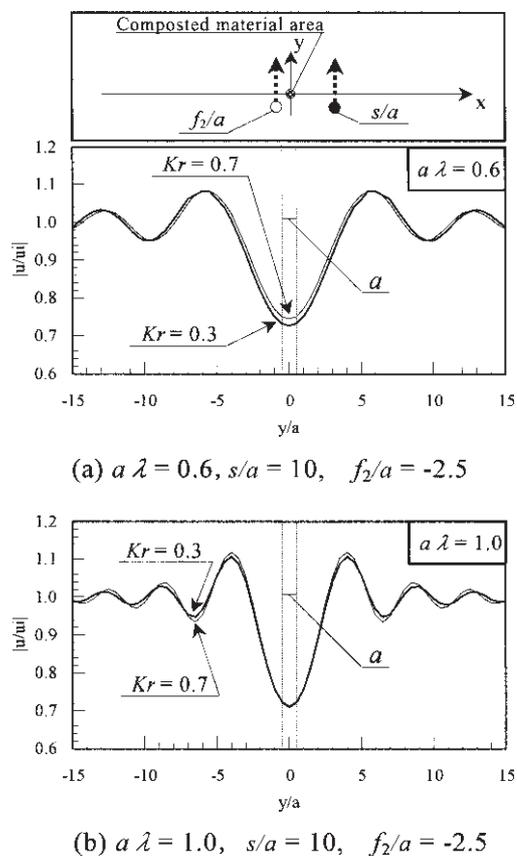


Fig. 10 Distribution of deflection response ratio compare with Kr

域中心付近で Kr の違いによる応答比の差はほとんど認められなかった。したがって、実際に劣化損傷部の検知を行う場合の計測精度やノイズ等の影響を考慮すると、劣化損傷の度合いを評価するにはあまり有意な差ではないと考えられる。

以上より本研究で提案、検証した劣化損傷部の検知手法では、明確に劣化損傷の度合いを評価することは困難であると考えられる。

4. 結 論

本研究は異種材料領域を有する無限平板の波動伝播特性を把握し、その特性を利用して劣化損傷部の検知手法を想定し、その有用性を数値解析的に検証を行ったものである。本研究において得られた結論を以下に示す。

(1) 平板内を伝播する波動散乱場をたわみ振幅分布として可視化することによる劣化損傷部の検知手法を具体的に提案することができた。

(2) 本研究の結果によれば、比較的低い周波数振動でも平板内に存在する劣化損傷部の位置および代表的寸法を同定できる。

(3) 本研究で提案した劣化損傷部の検知手法では、透過波に関する波動伝播特性を利用することが最も有効であることがわかった。

(4) 本研究で提案した劣化損傷部の検知手法で用いる振動波源としては、事前に要求される検知対象の劣化損傷部の代表的寸法 a と、入射波波数 λ との比 $a\lambda$ が $0.6 \sim 1.0$ の範囲が適当であると考えられる。

(5) 本検知手法では、平板内に存在する劣化損傷部の正確な形状および劣化損傷の度合いを評価することは難しいと考えられる。

参考文献

- Danial, A. N., Doyle, J. F. and Rizzi, S, A (1996): Dynamic Analysis of Folded Plate Structures, Journal of Vibration and Acoustics, Vol.118, pp.591-598
- Kitahara, M. (1984): APPLICATIONS OF BOUNDARY INTEGRAL EQUATION METHODS TO EIGENVALUE OF ELASTODYNAMICS AND THIN PLATES, 京都大学学位論文, pp.207-231
- Lamb, H. (1994): On wave in an elastic plate, Proc. Roy. Soc., London, Ser. A93, pp.114-128
- 川上哲太郎, 小倉洋一 (2002): 欠陥を有する薄肉平板の非破壊評価に関する基礎的研究, 東海大学紀要海洋学部, 第53号, pp.45-59
- 川上哲太郎, 小倉洋一 (2003): 異種材料領域を有する薄肉平板の動的問題に対する境界要素法の応用, 東海大学紀要海洋学部, 第1巻第1号, pp.9-16
- 川上哲太郎, 草加英之 (2005): 薄肉平板の動的応答特性を利用した劣化損傷部検知法に関する数値解析的検証, 応用力学論文集, Vol.1.8, pp.207-214
- 丹羽義次, 小林昭一, 北原道弘 (1980): 積分方程式による平板の固有振動数問題の解析, 土木学会論文報告集, 第304号, pp.1-16
- Rayleigh, L. (1889): On the free vibrations of an infinite of homogeneous isotropic elastic matter, Proc. Lond Math. Soc., Vol.20, pp.225-234

要 旨

現状の非破壊検査法は放射線透過検査や超音波深傷検査が一般的であるが、これらの検査法においては比較的高度な検査技術や評価技術が必要となる。また、放射性物質の取り扱いなどの安全面、精密検査機器の使用に伴う経済性の問題があると考えられる。さらに、補修保全が不可欠な時代をむかえ検査数そのものが増加し、検査法の改善、効率化が求められている。

本研究は、薄肉鋼製部材を対象に、その健全性を非破壊検査により評価するための簡便的な一次的検査手法の開発を目的として、薄肉部材内に存在する劣化損傷部（表面からは目視できない裏面側に存在する腐食部や、表面塗装などで覆われている欠陥など）を、部材表面を伝播する波動の散乱状態の可視化により検出することを試みるものである。

筆者らはこれまでに劣化損傷部を仮定した円形の異種材料領域（定式化上任意形状可能）を有する薄肉平板の基本的な波動伝播特性を数値解析により明らかにしている。そこで、本研究では特に、この波動伝播特性を利用した劣化損傷部の評価検知手法を具体的に提案し、その有用性を数値解析により定性的かつ定量的な検討を行ったものである。