

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

Numerical analysis on evaluation for defect using dynamic response of thin plate

川上哲太郎*・草加英之**

Tetsutaro KAWAKAMI and Hideyuki KUSAKA

*正会員 工博 東海大学教授 海洋土木工学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1)

**学生会員 東海大学大学院 海洋学研究科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1)

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 problems. 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 defect in thin plate.

Key Words : dynamic response, thin plate, boundary element method, nondestructive evaluation

1. 序論

土木・建築構造物、自動車、航空機、船舶などの広い分野で鋼製部材が多用されており、これら構造システムは、高強度材料の実用化に伴い軽量薄肉化が図られている。

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や地震などの予想外の加重により、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、部材の劣化損傷を放射線透過検査や超音波探傷検査などの非破壊検査により事前に検出する必要がある。

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の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発想したものである。また、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。

本研究では、この波動伝播特性を利用した非破壊手法の実用性を検討するために、まず、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確認した。さらに、このような波動伝播特性を利用した劣化損傷部の存在やその劣化損傷の度合いを評価する検知手法を提案し、その有用性を数値実験によって検証した。

平板の振動・動的問題は Rayleigh¹⁾、Lamb²⁾ 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³⁾、Kitahara⁴⁾ 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⁵⁾ 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。

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⁶⁾

等方、均質で一樣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、 $\mathbf{u}$ はたわみベクトル、 p は単位面積当たりの垂直荷重を表す。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、 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。

$$U(\mathbf{X}, \mathbf{Y}; \lambda) = -\frac{i}{8\lambda^2} [H_0^{(1)}(\lambda r) - H_0^{(0)}(i\lambda r)] \quad (4)$$

次に、平板の内部・外部領域及び境界等の定義を図-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。

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ようになる。

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

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

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。

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

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

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

図-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

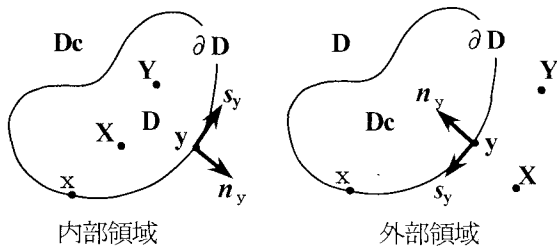


図-1 内部・外部領域及び境界の定義

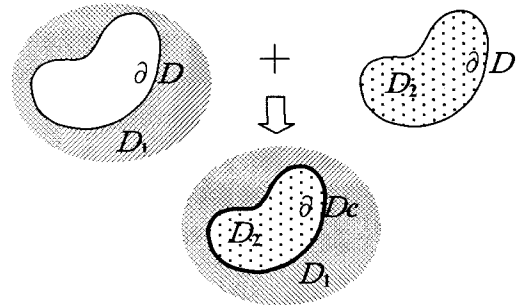


図-2 領域の接続に関する概念

∂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．

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

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)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とが一致する．

次に，式(6)，(8)，(9)，(10)に示され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. 数値実験

筆者らのこれまでの研究結果⁷⁾によると，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，一般的に図-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ることがあげられる．

そこで本研究では，上記の波動伝播特性を利用して，劣化損傷部の存在やその劣化損傷の度合いを評価することを考え，①全体的な異種材料領域を有する無限平板の波動伝播特性の把握，②実際の非破壊検査方法を想定した数値解析実験による本手法の評価を以下に行った．

3. 1 波動伝播特性の把握

数値計算モデルとしては図-4 に示すような，無限平板内の任意点に板剛性の異なる円形の異種材料領域が存

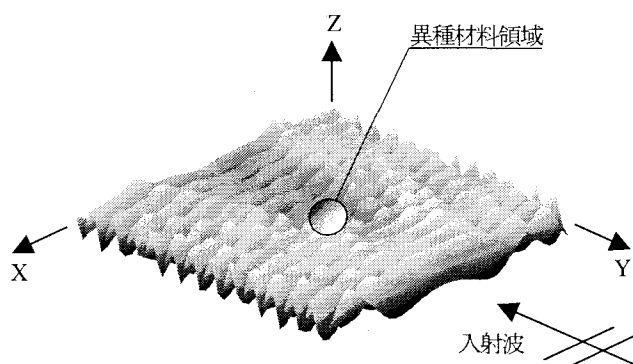


図-3 一般的な異種材料領域を有する平板のたわみ振幅の応答分布

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原点を置いた．

数値解析パラメータとしては板剛性比 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

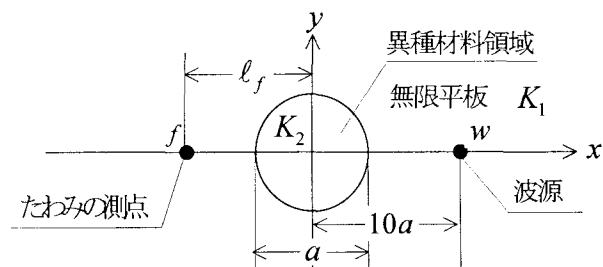
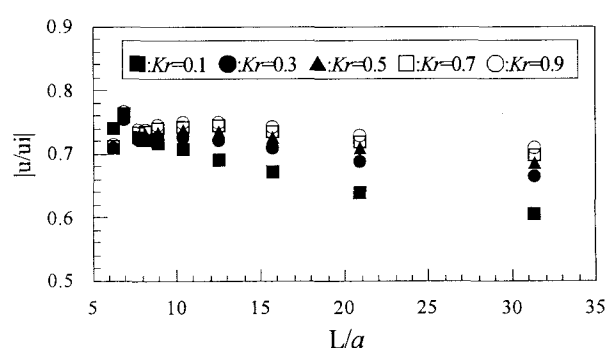


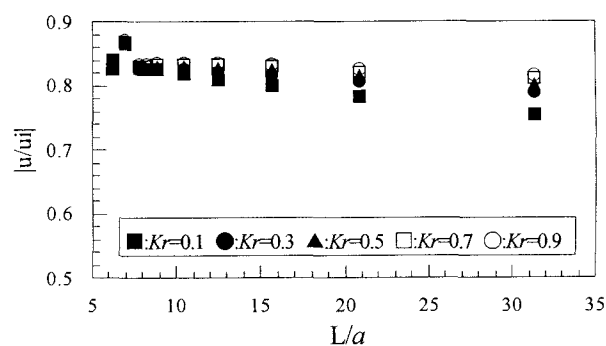
図-4 波動伝播特性把握のための基本的数値解析モデル

表-1 材料物性値および解析パラメータ

a (mm)	2.0
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 (N/m ²)(mm ³)	1.87×10^4
$Kr = K_2/K_1$	0.1~0.9
h_1 (mm)	1.0
p (N)	1.0
λ (mm ⁻¹)	0.1~10.0



(a) $l_f/a = 2.5$



(b) $l_f/a = 20$

図-5 L/a と応答比 $|u/|u||$ の関係

射波波数 λ ，無次元化計測位置 q/a とした。

数値計算結果より，定常状態における波動散乱場のたわみ振幅 $|u|$ を算定し，波動伝播特性をたわみの応答比 $|u/u_i|$ と入射波波長 L を a で無次元化した L/a から系統的に判断することとした。ここでの u_i は無限平板内に異種材料領域がない場合のたわみ振幅を表す。

解析で使用した材料物性値および解析パラメータを表-1に示す。また本解析では，調和振動荷重を異種材料領域より $x=10a$ の位置に一点設定した。円形境界(異種材料領域と母材領域との共通境界)の要素分割数は120とし，一定要素を用いた。

数値計算結果として， L/a と応答比 $|u/u_i|$ との関係を，図-5に示す。ここでは，本研究の主旨である比較的低周波の波動の利用を考慮して， $\lambda=1.0\sim0.1$ の範囲での結果を中心に考察する。なお，図中の無次元化波長 $L/a=5\sim35$ は波数 $\lambda=0.628\sim0.090$ ，周波数 $f=3064\sim63\text{Hz}$ に相当する。

図-5(a)より，異種材料領域の比較的近傍においては，全体的な傾向として， L/a が大きくなるにつれて $|u/u_i|$ の値が小さくなっていることがわかる。また， L/a が大きいほど Kr の違いによる $|u/u_i|$ の差異が顕著になっていることがわかる。 Kr の違いによる $|u/u_i|$ の値を見てみると， Kr の値が大きいほど $|u/u_i|$ の値も大きくなっており，入射波は異種材料領域の板剛性が低いほど，異種材料領域による散乱などの影響を受けやすくなることがわかる。

この Kr の値が大きいほど $|u/u_i|$ の値が大きいこと， L/a が大きいほど Kr の違いによる $|u/u_i|$ の差異が大きいことを利用すれば，劣化損傷の度合い(Kr が1.0に近いほど劣化損傷度は小さい)をある程度評価することが可能であると考えられる。

次に，図-5(a)と(b)を計測位置の違いで比較する。

図-5(a)と同様に，図-5(b)においても全体的には L/a が大きいほど $|u/u_i|$ の値が小さく， Kr の違いによる $|u/u_i|$ の差異が大きいこと，さらに， Kr の値が大きいほど $|u/u_i|$ の値が大きいことがわかる。しかし，図-5(a)の方が図-5(b)より $|u/u_i|$ の値が小さく， Kr の違いによる $|u/u_i|$ の値の差異も大きいことから，異種材料領域に近い方が，入射波が異種材料領域によって受ける影響をより把握しやすいといえる。本節の結果を以下のようまとめる。

- (1) 比較的低周波の範囲では， L/a が大きいほど応答比の値が小さく， Kr の違いによる $|u/u_i|$ の値の差異が大きい。
- (2) 比較的低周波の範囲では，入射波は板剛性比 Kr が小さい方が，異種材料領域の存在による散乱の影響を受けやすい。
- (3) 異種材料領域に近い方が，入射波が異種材料領域によって受ける影響をより把握しやすい。

3. 2 実際の非破壊検査手法を想定した数値実験

ここでは，前節で得られた結果を利用し，実際の劣化損傷部の検知を想定した数値解析実験について述べる。

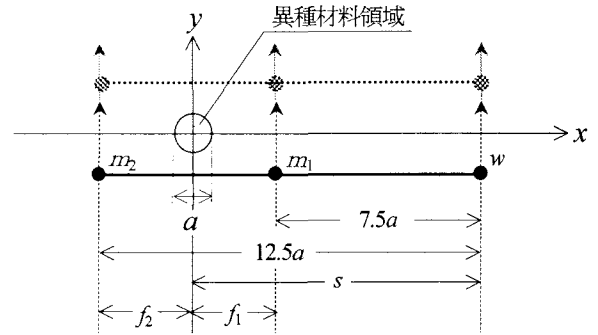


図-6 実際の非破壊検査方法を想定した数値実験モデル

表-2 数値実験解析パラメータ

$a\lambda$	0.2, 0.6, 1.0, 2.0
s/a	17.5 ~ -7.5
f_1/a	10 ~ -15
f_2/a	5 ~ -20

表-3 数値計算結果のケース分け

ケース	$(s/a, f_1/a, f_2/a)$
1	$(-2.5, -10, -15)$
2	$(2.5, -5, -10), (6.25, -1.25, -6.25)$
3	$(10, 2.5, -2.5), (11.25, 3.75, -1.25)$
4	$(15, 7.5, 2.5)$
5	$(7.5, 0.0, -5), (12.5, 5, 0.0)$

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、図-4と同様な形で劣化損傷部と仮定した異種材料領域に対して、図-6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、各々同時に y 軸方向に平行移動する方法を考えた。

数値解析パラメータとしては板剛性比 Kr 、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。

数値実験としては、計測位置 f_1/a 、 f_2/a が y 軸方向に平行移動する軌跡を側線とし、定常状態における波動散乱

場のたわみ振幅 $|u|$ の応答分布を求めた。そのたわみ振幅の応答分布の特性より劣化損傷部の検知、劣化損傷度の評価を試みることにした。

解析パラメータを表-2に示す。なお Kr の値、材料物性値は表-1と同様とした。数値解析ケースとしては、 Kr が5ケース、 $a\lambda$ が4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280ケースである。

(1) 劣化損傷部の検知

表-3に数値計算結果の代表例として、図7~11に示

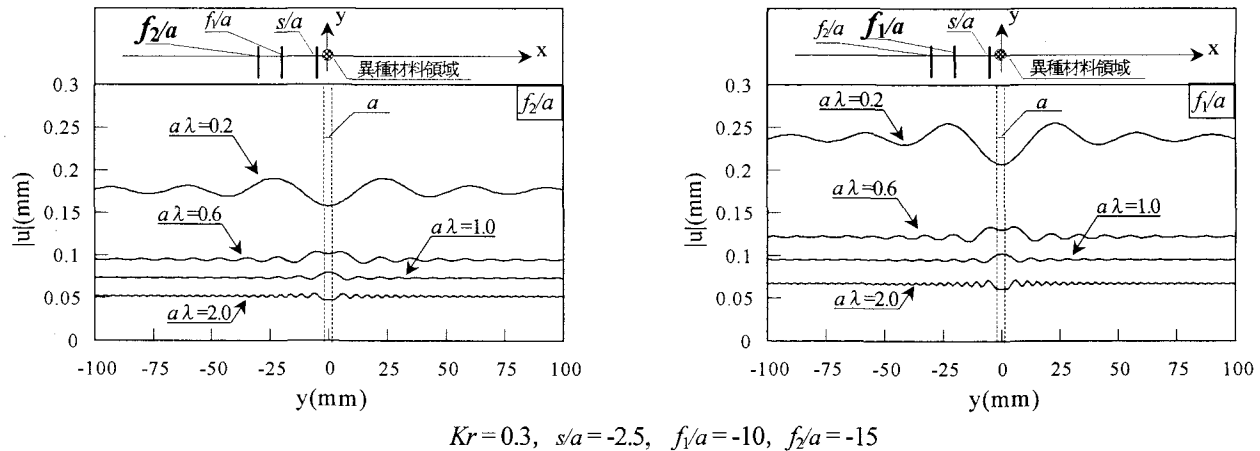


図-7 ケース1におけるたわみ振幅の応答分布

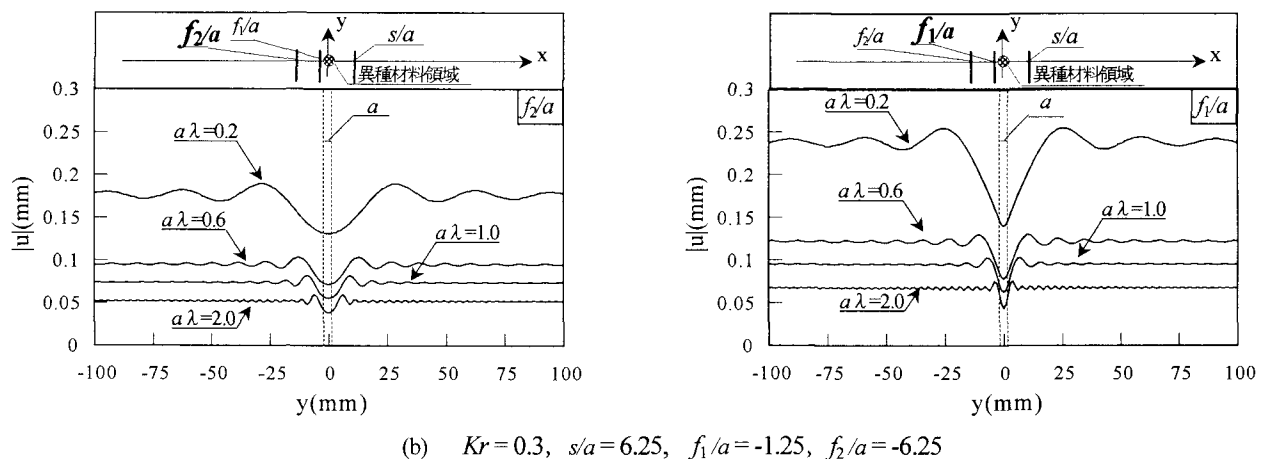
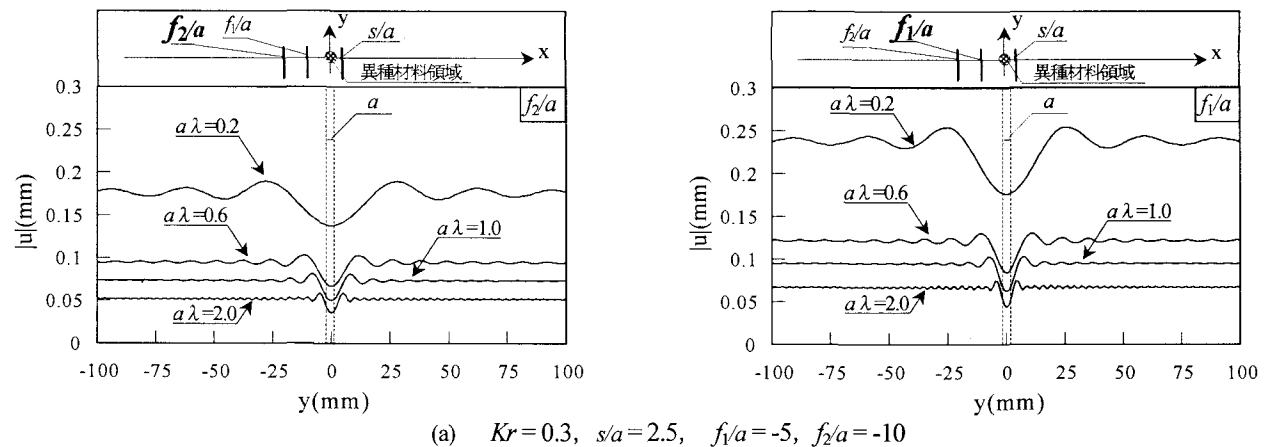


図-8 ケース2におけるたわみ振幅の応答分布

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。ケースわけされたたわみ振幅の応答分布の形状や、たわみ振幅の大きさを整理し、その特徴を把握し劣化損傷部の検知を行うこととする。

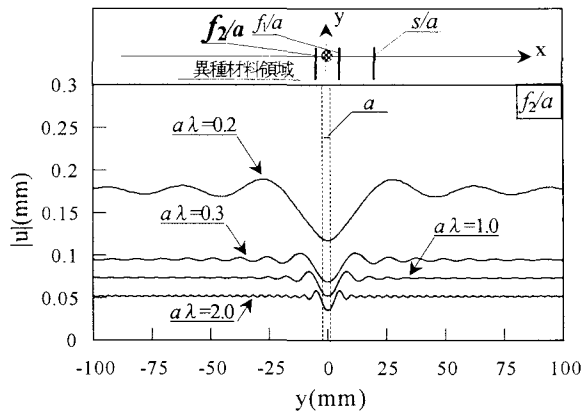
表-3に示すケース1は、異種材料領域より波源位置、計測位置が左にある場合、ケース2は、異種材料領域が波源位置 s/a と計測位置 f_1/a の間に存在する場合、ケース3は、計測位置 f_1/a と f_2/a の間に異種材料領域がある場合、ケース4は、異種材料領域が計測位置 f_2/a より左にある場合、ケース5は、計測位置が異種材料領域内を通過する場合である。

図-7に、表-3におけるケース1の代表的なたわみ振幅の応答分布を示す。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。 $a\lambda=0.6, 1.0$ の場合、異種材料領域付近でたわみ振幅が若干大きくなっており、反射波の影響が現れていることがわかる。しかしながら、 $a\lambda=0.2$ の場合では、異種材料領域付近でたわみ振幅が小さくなっている。この特徴は、一般的に考えられる透過側のたわみ振幅が低くなる特徴と一致することから、実際に劣化損傷の検知を行なう場合、例えば異なる周波数の入射波での確認などの注意が必要となる。なお、本ケースにおいて波源位置 s/a が-7.5以上離れてい

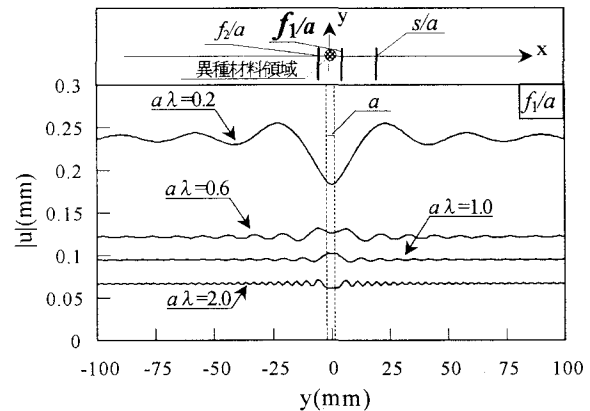
る場合は、異種材料領域による波動伝播への影響を確認することができなかった。

図-8に、表-3におけるケース2の代表的なたわみ振幅の応答分布を示す。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、たわみ振幅が低くなる領域を計測することになると考えられる。数値計算結果においても、図-8(a)より、全ての $a\lambda$ で計測位置 f_1/a , f_2/a とともに、異種材料領域付近でたわみ振幅は小さくなり、異種材料領域の中心位置においてたわみ振幅は最小値となっていることがわかる。次に、図-8(a)と図-8(b)を比較する。両図における解析パラメータの違いは、図-8(b)の方が異種材料領域に f_1/a がより近いことである。図-8(a), (b)の f_1/a における結果を比較すると、明らかに図-8(b)の方が異種材料領域付近でのたわみ振幅の低下が大きくなっていることがわかる。さらに、図-8(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たわみ振幅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 のたわみ振幅の応答分布に顕著に差が現れることがわかった。

図-9に、表-3におけるケース3の代表的なたわみ振幅の応答分布を示す。この場合、計測位置 f_1/a は反射波の影響を受けたたわみ振幅を、計測位置 f_2/a は透過側の低いたわみ振幅を計測することになる。図-9(a),(b)の



(a) $Kr=0.3$, $s/a=10$, $f_1/a=2.5$, $f_2/a=-2.5$



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

図-9 ケース3におけるたわみ振幅の応答分布

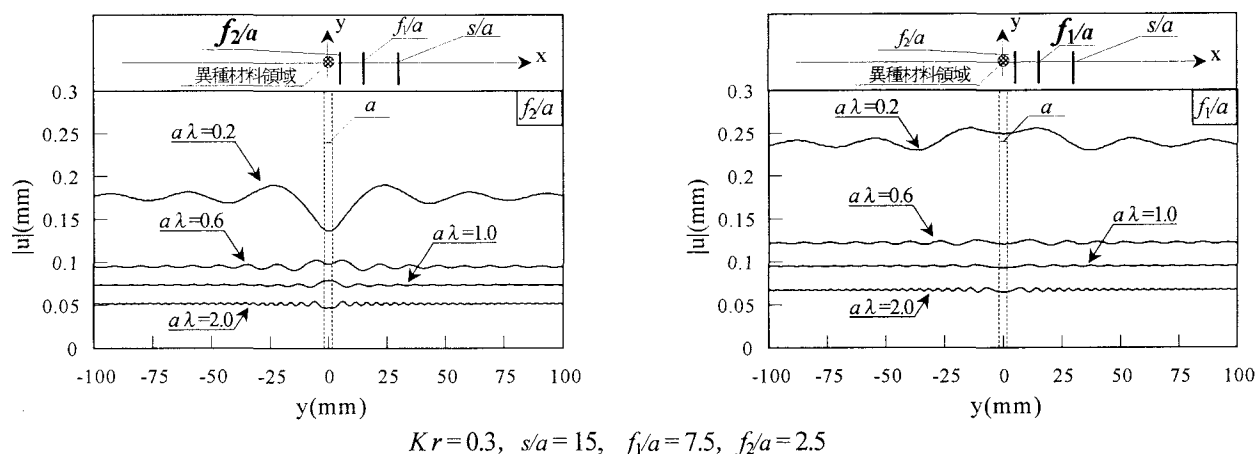


図 - 10 ケース 4 におけるたわみ振幅の応答分布

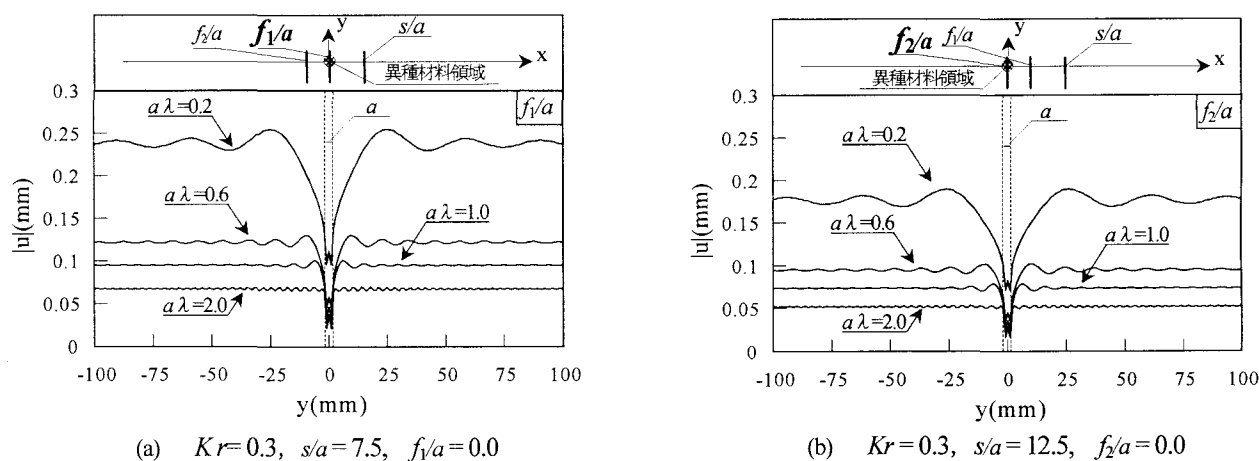


図 - 11 ケース 5 におけるたわみ振幅の応答分布

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、図-7 と同様に $a\lambda=0.2$ を除いて、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が、明確に反射波の特徴が現れているとはいえない。また、計測位置 f_2/a は透過側の低いたわみ振幅を計測しており、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、図-9(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図-9(b)の方が、異種材料領域に近づくにつれ、たわみ振幅が小さくなる特徴が顕著に現れている。

図-10 に、表-3 における、ケース 4 の代表的なたわみ振幅の応答分布を示す。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たわみ振幅を計測することになる。図-10 より、 f_1/a については、図-7, 9 と同様に $a\lambda=0.2$ を除いて、 f_2/a については全ての λ において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が、顕著な反射波の特徴が現れているとはいえない。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確認することができなかった。

図-11 に、表-3 におけるケース 5 の代表的なたわみ振幅の応答分布を示す。図-11(a), (b)より異種材料領域

上に計測位置が通過した場合は、すべての $a\lambda$ で異種材料領域の中心に近づくにつれ極端にたわみ振幅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たわみ振幅のピーク先端の幅と、異種材料領域の直径はほぼ同じであることもわかった。

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なった結果、たわみ振幅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と考える。

- (1) 計測位置 $f_1/a, f_2/a$ とも、たわみ振幅が大きくなる場合、劣化損傷部は $f_1/a, f_2/a$ のたわみ振幅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 $f_1/a, f_2/a$ とも、たわみ振幅が小さくなる場合、劣化損傷部は $f_1/a, f_2/a$ のたわみ振幅が小さくな

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 ではたわみ振幅が大きくなり、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、急激にたわみ振幅が小さくなる場合、その位置が劣化損傷部内であると考えられる。また、たわみ振幅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。

ここでは、本節で提案した劣化損傷部の検知手法における $a\lambda$ について検討する。本研究における数値実験によれば、 $a\lambda = 0.2$ の場合、計測位置が異種材料領域近傍にあるとき、一般的に考えられる波動の散乱現象とは異なる特徴を示すことが指摘されている。また、 $a\lambda = 2.0$ の場合は、異種材料領域による波動散乱場の影響を異種材料領域近傍の計測位置でしか検知できないことが確認されている。したがって、本数値実験の結果より、振動波源としては $a\lambda = 0.6 \sim 1.0$ (698~1940Hz, $L/a = 11 \sim 6$) の範囲が適していると考えられる。

(2) 劣化損傷度の評価

劣化損傷の度合いを評価するため、3.1 で述べた異種材料領域を有する無限平板の波動伝播特性を基に Kr の違いによるたわみ振幅の応答分布の比較を図 - 12 に示す。

これより、透過側の計測位置のたわみ振幅の最小値は、 $Kr = 0.1$ 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。しかしながら、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なったものである。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

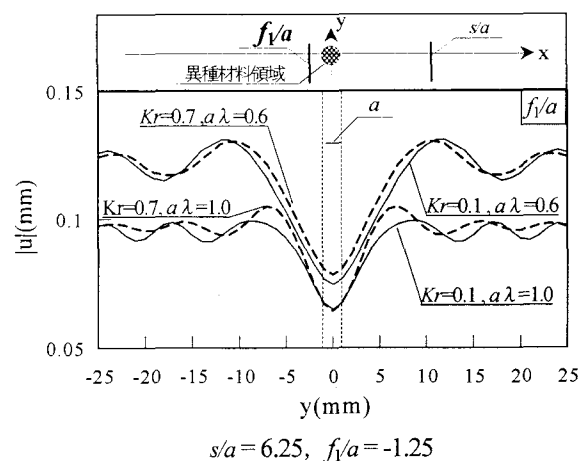


図 - 12 劣化損傷度を評価するためのたわみ振幅の応答分布

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、入射波波長 L との比 L/a が 6~11 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

- 1) Rayleigh, L. : On the free vibrations of an infinite of homogeneous isotropic elastic matter, Proc. Lond. Math. Soc., Vol.20, pp.225-234, 1889.
- 2) Lamb, H. : On wave in an elastic plate, Proc. Roy. Soc., London, Ser. A93, pp.114-128, 1994
- 3) 丹羽 義次, 小林 昭一, 北原 道弘 : 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, 1980
- 4) Kitahara, M. : APPLICATIONS OF BOUNDARY INTEGRAL EQUATION METHODS TO EIGENVALUE OF ELASTODYNAMICS AND THIN PLATES, 京都大学学位論文, pp.207-231, 1984
- 5) Danial, A. N., Doyle, J. F. and Rizzi, S. A. : Dynamic Analysis of Folded Plate Structures, Journal of Vibration and Acoustics, Vol.118, pp.591-598, 1996
- 6) 川上哲太郎, 小倉洋一 : 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, 2002
- 7) 川上哲太郎, 小倉洋一 : 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, 2003

(2005 年 4 月 15 日 受付)