

## I-27 複合材料部材の応力波速度と 老朽構造物の健全度評価への応用

日本大学 生産工学部 正員 能町 純雄  
北見工業大学 工学部 正員 大島 俊之  
北見工業大学 工学部 正員 三上 修一  
北見工業大学 工学部 学生員 重清 浩司

### 1. まえがき

本研究では、複合材料中を伝播する応力波速度の母材と補強材の弾性係数比・密度比の違いによる影響、補強材の形状の違いによる影響を解析し、その応用として、構造物の健全度を評価するためのひび割れモデルについても検討した。複合材料中を伝播する応力波速度は、補強材と母材の弾性係数比・密度比などによって変化し、部材の寸法と波長の比、補強材の大きさと波長の比などによって分散することが知られている。<sup>1),2)</sup>したがって、動的応答解析を実行する場合には、複合材料についてこれらの関係を検討する必要がある。また、近年、老朽化した構造物の維持補修・改築の必要度の評価判定が要求されてきている。即ち、クラックの発生・進展などによる構造物の残存耐用寿命の減少度を定める方法・基準が必要となっている。本研究では、これらに関する基礎的データを得ることを目的としている。

### 2. 理論解析概要

本研究で取り扱った構造物は、図1に示すような、軸方向に不均一材料を配置した異方性円筒体である。解析にはガラーキン法により誘導した三角形プリズム要素法を適用した。解析に用いた仮定は、

- 各要素は要素の各節点によって結合している
- 変位は直線変位で中立軸に対して対称である
- 媒質中を伝播する応力波のうち、円筒体の長軸方向に調和進行する縦波動、曲げ波動を考える

である。このような仮定により、釣り合い式として二階偏微分方程式が得られ境界条件を考慮すれば、連立方程式が得られる。その係数行列は、位相速度に関する固有値行列となり、この固有値方程式を解くことにより位相速度を求めることができる。解析した位相速度  $c$  は、母材のせん断波速度で無次元化しており表、図中の結果はすべてこの表示法によっている。以下には、最低次モードについてのみ結果を示す。

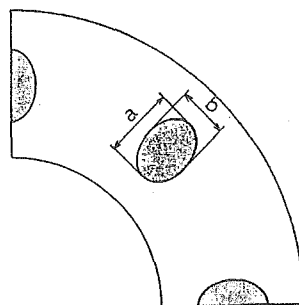


図1 異方性円筒体

### 3. 応力波速度に及ぼす補強材の影響

#### (1) 厳密解との比較

本研究に使用したプログラムの精度を検討するため、断面が一様な場合の縦波動、曲げ波動の厳密解<sup>2)</sup>と解析結果 ( $Af=0$ ) の比較を表1に示す。母材のポアソン比  $\nu=0.25$ 、円筒シェルの内径 100mm、肉厚  $h=50\text{mm}$  で計算した。なお、 $\ell$  は波長である。

波長が肉厚に比べ長い時、即ち  $h/\ell$  の値が小さく 0.05 以下の時は、両波動とも厳密解とほぼ一致している。波長が短くなり  $h/\ell$  の値が大きくなると厳密解との差があらわれるが、 $h/\ell$  の値が 1.0 以下の範囲であれば、両波動とも誤差が 1% 程度なので良い精度であるといえる。

(2) 縦波動に及ぼす補強材の影響

図2は、補強材と母材の密度比  $\rho_f/\rho=3$  とした場合について、補強材と母材の弾性係数比  $E_f/E$  を 3.5.10.20.100 と変化させた時の  $C/C_s$  の結果を示している。各弾性係数比の場合の共通な特徴は、波長が大きくなると平均的 bar velocity の値に近づくことである。また、補強材の弾性係数比による影響が大きいのは、 $h/l=0.5$  ぐらいまでで、波長を短くし  $h/l=2.0$  程度にすると、どの場合も  $C/C_s=0.94-0.95$  となり補強材の影響は見られない。

図3は、 $E_f/E=10$  とした場合について  $\rho_f/\rho$  を 1.3.5.10 と変化させた時の結果を示している。この場合も、波長が長くなると平均的 bar velocity に近づいている。さらに、 $C/C_s$  の最小値を与える  $h/l$  の値や、 $C/C_s$  の収束値も弾性係数比を変化させた場合とほぼ同じとなっている。しかし、密度比が大きくなるにつれ、 $C/C_s$  の値は小さくなり、収束のしかたも遅れ補強材の影響が広範囲に及ぶことを示している。

(3) 曲げ波動に及ぼす補強材の影響

縦波動同様、 $\rho_f/\rho=3$  とした場合について、 $E_f/E$  を 3.5.10.20.100 と変化させたものと、 $E_f/E=10$  とした場合について  $\rho_f/\rho$  を 1.3.5.10 と変化させた時の  $C/C_s$  の結果をそれぞれ、図4、図5に示す。両方の図から判断できることは、各分散曲線とも波長が長い時  $C/C_s$  は0に収束し、それより波長を短くしていくと  $h/l=0.03$  までは、ほぼ直線的に増加している。しかし、それ以外の範囲では、縦波動の場合と同じような変化を示し、特に  $h/l > 0.3$  の範囲では、解析結果がほぼ一致している。これは、ある程度波長が短くなると、縦波動と曲げ波動は表面波に近づき、同一のものになるためと思われる。なお、(2)、(3)の計算においては、補強材のポアソン比  $\nu_f=0.3$ 、補強材と母材の面積比  $\eta=0.11$  とした。また、図中の破線の分散曲線は、補強材のない場合である。

4. 補強材の形状の変化の影響

図1のように配置された、補強材の形状が

表1 厳密解との比較

h/l	縦波動		曲げ波動	
	Af=0	Matsuoka	Af=0	Matsuoka
0.005	1.5808	1.5808	—	—
0.01	1.5799	1.5798	0.1729	—
0.02	1.5756	1.5756	0.3184	0.3190
0.03	1.5672	1.5671	0.4280	0.4284
0.05	1.5203	1.5194	0.5621	0.5613
0.07	1.3491	1.3448	0.6268	0.6245
0.1	1.0179	1.0136	0.6608	0.6563
0.2	0.6780	0.6756	0.6592	0.6519
0.3	0.6885	0.6871	0.6988	0.6931
0.5	0.7825	0.7806	0.7914	0.7864
0.7	0.8414	0.8387	0.8474	0.8415
1.0	0.8870	0.8808	0.8907	0.8826
2.0	0.9360	0.9153	0.9358	0.9153
3.0	0.9521	—	0.9547	—

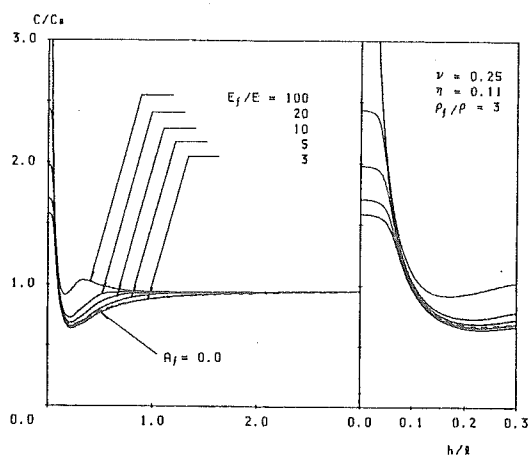


図2 弾性係数比による影響 (縦波動)

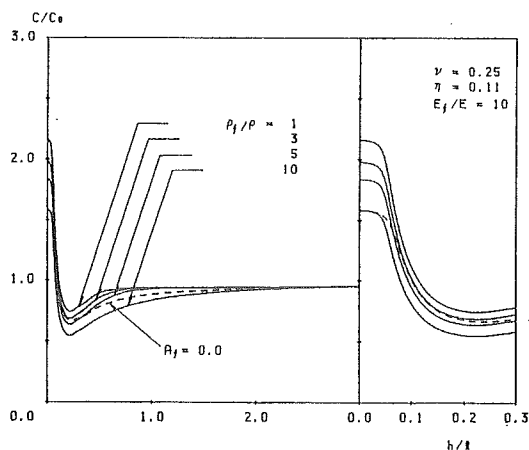


図3 密度比による影響 (縦波動)

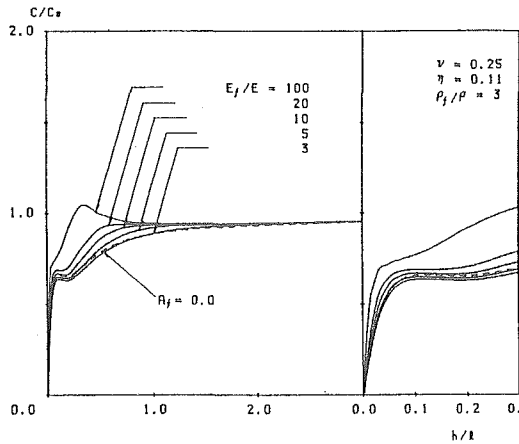


図4 弾性係数比による影響 (曲げ波動)

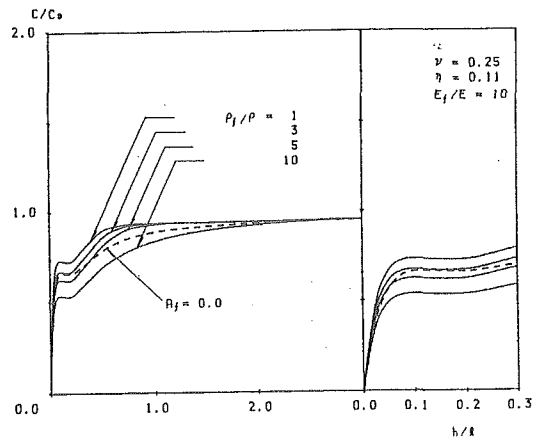


図5 密度比による影響 (曲げ波動)

縦波動，曲げ波動に及ぼす影響を示す。表中の比は，図1の楕円形補強材の半径方向の軸aとそれに直交する軸bとの比を表している。また，この時， $E_f/E=10$ ， $\rho_f/\rho=3$ とし，それ以外の条件は前節と同じである。表2は，縦波動に及ぼす影響を示している。これより， $h/l$ の値が0.03以下の範囲では，差はほとんどなく，楕円の形状は $C/C_s$ に影響を及ぼさないことがわかる。しかし， $h/l$ の値が0.05~0.1の範囲では， $a:b$ の比の値が小さくなるにつれ $C/C_s$ の値が大きくなっている。一方， $h/l$ の値が0.2~0.7の範囲では逆の変化を示している。さらに， $h/l$ の値が1.0以上では， $h/l=0.05\sim 0.1$ の場合と同じ変化を示している。このことから，楕円の形状が及ぼす縦波動への影響は，波長により変化することがわかる。また，表3は曲げ波動に及ぼす影響を示したものである。縦波動と違い，比較的波長の長い範囲( $h/l < 0.05$ )でも影響がみられる。しかしながら，波長を短くするとその影響は，縦波動の場合と類似した結果をもたらす。

表2 補強材の形状の変化の影響 (縦波動)

$h/l$	2:1	3:2	1:1	2:3	1:2
0.005	1.9668	1.9736	1.9771	1.9745	1.9678
0.01	1.9655	1.9722	1.9756	1.9730	1.9664
0.02	1.9592	1.9658	1.9692	1.9666	1.9600
0.03	1.9450	1.9514	1.9547	1.9523	1.9460
0.05	1.8070	1.8126	1.8194	1.8268	1.8302
0.07	1.4061	1.4106	1.4212	1.4410	1.4586
0.1	1.0204	1.0223	1.0288	1.0434	1.0566
0.2	0.7046	0.6981	0.6914	0.6896	0.6910
0.3	0.7473	0.7375	0.7245	0.7134	0.7086
0.5	0.8708	0.8648	0.8552	0.8437	0.8345
0.7	0.9232	0.9221	0.9215	0.9193	0.9144
1.0	0.9443	0.9453	0.9496	0.9559	0.9591
2.0	0.9506	0.9533	0.9583	0.9641	0.9678
3.0	0.9513	0.9572	0.9645	0.9704	0.9734

表3 補強材の形状の変化の影響 (曲げ波動)

$h/l$	2:1	3:2	1:1	2:3	1:2
0.01	0.2103	0.2111	0.2117	0.2120	0.2169
0.02	0.3726	0.3743	0.3765	0.3789	0.3815
0.03	0.4811	0.4836	0.4878	0.4933	0.4968
0.05	0.5938	0.5974	0.6045	0.6155	0.6221
0.07	0.6385	0.6422	0.6503	0.6639	0.6725
0.1	0.6578	0.6602	0.6670	0.6801	0.6890
0.2	0.6775	0.6718	0.6661	0.6650	0.6664
0.3	0.7571	0.7424	0.7297	0.7194	0.7144
0.5	0.8734	0.8685	0.8600	0.8489	0.8401
0.7	0.9153	0.9154	0.9169	0.9173	0.9145
1.0	0.9291	0.9303	0.9348	0.9421	0.9477
2.0	0.9344	0.9378	0.9438	0.9502	0.9553
3.0	0.9383	0.9452	0.9539	0.9610	0.9653

### 5. ひび割れモデルの解析

ひび割れモデルの縦波動，曲げ波動の数値計算結果をそれぞれ表5，表6に示す。ひび割れモデルの解析は，図1に示した補強材の部分のプリズム要素を取り除き，その形状を変化させて行なった。Case Aは，ひび割れのない場合( $A_f=0$ )，Case B. Case C. Case Dは母材とひび割れの断面積比がそれぞれ1.0%、5.0%、11.0%の場合である。なお，ポアソン比  $\nu=0.25$  である。

ひび割れが縦波動に及ぼす影響は、 $h/\ell = 0.05$  付近より徐々に表れる。Case C, Case D は  $h/\ell = 0.1$  まで Case A と比較した  $C/C_s$  の減少率が増加し、その減少率は  $h/\ell = 0.1$  の時それぞれ 2.6%, 4.4% である。波長を短くしていくと、減少率は減少・増加を繰り返し  $h/\ell = 0.3$  の時 0.6%, 1.5% ,  $h/\ell = 1.0$  の時 1.8%, 5.3% とそれぞれなっている。しかし、Case B のようにひび割れの割合が非常に小さい場合、Case A と比較してもはっきりにした差は見られず、この程度のひび割れでは影響は表れないことがわかる。

曲げ波動に対するひび割れの影響は、 $h/\ell = 0.02$  付近から表れ、波長を短くするにつれ縦波動とほぼ同じような傾向をしめす。Case A と比較した Case C, Case D の減少率は、 $h/\ell = 0.1$  の時 2.9%, 3.1% ,  $h/\ell = 0.3$  の時 1.0%, 2.4% , また  $h/\ell = 1.0$  の時は、それぞれ 2.5%, 7.4% となっている。これらの値は、縦波動のものとは  $h/\ell = 0.1$  の時を除いて、約 1.5 倍になっており、波長が短くなると曲げ波動の方が、ひび割れの影響を大きく受けることがわかる。Case B に対する影響も、わずかながら縦波動よりも大きいものとなっている。

## 6. 結論

本研究の結果を要約すると次のようになる。

(1) 複合材の応力波速度に及ぼす補強材の影響は、縦波動、曲げ波動とも波長の長い範囲 ( $h/\ell < 0.5$ ) で顕著である。縦波動は、波長を長くすると平均的 bar velocity に近づく。また、 $h/\ell > 0.3$  の範囲では縦波動、曲げ波動とも補強材の影響は無くなる。

(2) 補強材の形状が応力波速度に及ぼす影響は波長により変化する。縦波動の場合、波長が大きい範囲 ( $h/\ell \leq 0.03$ ) では差がないが、 $h/\ell = 0.05 \sim 0.1$  および 1.0 以上では  $a/b$  が大きいほど  $C/C_s$  が大きく、 $h/\ell = 0.2 \sim 0.7$  の範囲では  $a/b$  が小さいほど  $C/C_s$  が大きくなる。

(3) ひび割れが応力波速度に及ぼす影響は、縦波動では  $h/\ell < 0.05$  の範囲では表れないが曲げ波動にはわずかながら見られ、全体的にみても縦波動より曲げ波動の方が大きい。また波長により  $C/C_s$  の減少率は変化する。

## 参考文献

- 1) 大島, 能町: 有限プリズム法による繊維強化複合材の縦波動伝播速度の研究, 土木学会論文報告集, 第297号, 1980, 5
- 2) 大島, 三上, 能町, 重清: 複合材中の応力波速度と構造物の健全度評価への応用, 構造工学論文集, Vol 32A, 1986, 3

表4 ひび割れモデルの解析結果 (縦波動)

$h/\ell$	Case A	Case B	Case C	Case D
0.005	1.5808	1.5808	1.5808	1.5808
0.01	1.5799	1.5799	1.5798	1.5798
0.02	1.5756	1.5757	1.5756	1.5756
0.03	1.5672	1.5673	1.5670	1.5668
0.05	1.5203	1.5201	1.5161	1.5124
0.07	1.3491	1.3471	1.3245	1.3052
0.1	1.0179	1.0159	0.9916	0.9729
0.2	0.6780	0.6781	0.6699	0.6646
0.3	0.6885	0.6889	0.6841	0.6784
0.5	0.7825	0.7823	0.7740	0.7577
0.7	0.8414	0.8408	0.8285	0.8033
1.0	0.8870	0.8861	0.8708	0.8400
2.0	0.9360	0.9356	0.9360	0.9209
3.0	0.9547	0.9545	0.9487	0.9380

表5 ひび割れモデルの解析結果 (曲げ波動)

$h/\ell$	Case A	Case B	Case C	Case D
0.01	0.1729	0.1729	0.1730	0.1731
0.02	0.3184	0.3182	0.3175	0.3170
0.03	0.4280	0.4274	0.4253	0.4237
0.05	0.5621	0.5605	0.5552	0.5510
0.07	0.6268	0.6246	0.6167	0.6104
0.1	0.6608	0.6582	0.6482	0.6406
0.2	0.6592	0.6575	0.6501	0.6432
0.3	0.6988	0.6976	0.6915	0.6822
0.5	0.7914	0.7895	0.7802	0.7621
0.7	0.8474	0.8448	0.8315	0.8037
1.0	0.8907	0.8879	0.8684	0.8248
2.0	0.9358	0.9345	0.9168	0.8836
3.0	0.9521	0.9514	0.9484	0.9276