

硬質ウレタンを添加したプレートガーダーの波動伝播特性

CHARACTERISTICS OF WAVE PROPAGATION IN PLATE GIRDER
TO WHICH RIGID URETHANE WAS ATTACHED

岡村 美好*, 深澤 泰晴**, 太田 貞次***

Miyoshi OKAMURA, Yasuharu FUKASAWA and Teiji OHTA

* 工修 山梨大学助手 工学部土木環境工学科 (〒400 山梨県甲府市武田四丁目3-11)

** 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400 山梨県甲府市武田四丁目3-11)

*** 工修 (株) 宮地鐵工所課長 技術開発部 (〒103 東京都中央区日本橋小伝馬町15-18)

It is the purpose to investigate the characteristics of elastic wave propagation in the composite beam of plate girder to which rigid urethane was attached. Phase-velocity and group-velocity dispersion curves and mode distributions in a cross section are observed. Furthermore, the effects of material factors of rigid urethane on wave propagation are discussed. The discrete model which was composed of finite strip elements and finite prism elements is applied here. By comparing of the characteristics of elastic wave propagation in the composite beam and the plate girder, it is clarified that the rigid urethane of the composite beam have a remarkable effect as the wavelength is short and the order of mode of cross-sectional deformation is high.

Key Words : wave propagation, rigid urethane, plate girder, composite beam,

1. まえがき

列車荷重や衝撃荷重のような高周波外力を受ける鋼薄肉断面部材においては、断面変形をともなう局部振動が生じ、これによって薄肉断面の溶接部に疲労亀裂の発生や騒音の放射が生じる。このような局部振動に対する制振・吸音方法の一つとして、硬質ウレタンとプレートガーダーとの複合化を挙げることができる^{1) 2)}。

複合部材の波動伝播特性に関する研究は古くから行われ、最近では、鉄筋コンクリート部材や繊維強化複合材、積層複合材など各種の複合部材の特性が明らかにされてきている^{3) ~ 6)}。これらの複合部材は弾性定数比が10前後の材料を組み合わせたものであるが、プレートガーダーと硬質ウレタンの弾性定数の比は 10^4 レベルであり、このように弾性定数が大きく異なる材料を組み合わせた複合部材の波動伝播特性についてはほとんど検討されていない。また、硬質ウレタンはその生成法によって材料物性値が変化すること、多様な鋼薄肉断面部材と硬質ウレタンとの複合断面が考えられることを考慮すると、最適な硬質ウレタンの選定ならびに合理的な複合断面の開発のための基礎資料を得るうえで、このような複合部材の波動伝播特性を把握することは重要であると考えられる。

本論文では、プレートガーダーと硬質ウレタンを組み合わせた複合部材の波動伝播特性を明らかにすることを目的として、I形プレートガーダーに硬質ウレタンを添加した

複合部材の位相速度分散曲線、群速度分散曲線および断面変形モードについて、硬質ウレタンを添加しないプレートガーダーと比較することにより検討を行う。また、硬質ウレタンの弾性定数および密度の違いによる影響についても検討する。

解析には、有限帯板法と有限プリズム法を併用して、複合部材のプレートガーダー部分を帯板要素で離散化し、硬質ウレタン部分をプリズム要素⁷⁾で離散化したモデルを用いる。本解析モデルの有効性については、分割要素数および解析精度をプレートガーダー部分と硬質ウレタン部分の両者をプリズム要素で離散化したモデルと比較することにより検証する。

2. 解析の概要

2.1 解析断面

I形プレートガーダーの上下フランジとウェブの間の空間に硬質ウレタンを添加して一体化した複合断面を解析断面とする(図-1)。

硬質ウレタンは弾性体・等方性材料でプレートガーダーに強く密着しているものと仮定し、各材料の標準的な物性値として次の値を使用した。

プレートガーダー：

弾性定数 $E_p = 2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$

ポアソン比 $\nu_p = 0.3$

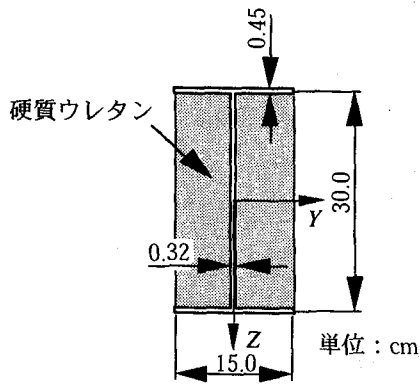
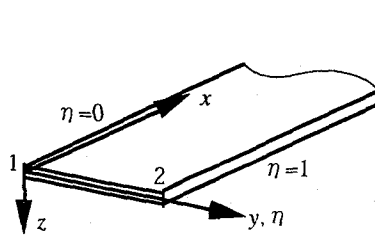
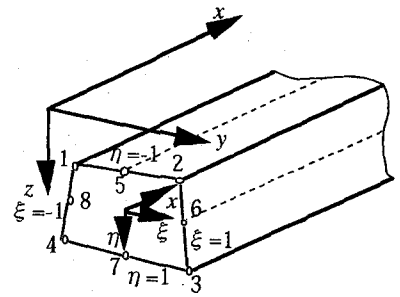


図-1 解析断面



(a) 帯板要素



(b) 8節線プリズム要素

図-2 離散化要素と要素座標系

密度 $\rho_p = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
 硬質ウレタン：
 弾性定数 $E_u = 1.03 \times 10^7 \text{ Pa}$
 ポアソン比 $\nu_u = 0.0$
 密度 $\rho_u = 31.4 \text{ kg/m}^3$

このときの硬質ウレタンに対するプレートガーダーの弾性定数比および密度比は、それぞれ $E_p/E_u = 20000$, $\rho_p/\rho_u = 250$ である。

2.2 解析方法

解析には有限帯板法と有限プリズム法を併用したモデルを用い、プレートガーダー部分を帯板要素で、硬質ウレタン部分をアイソパラメトリック要素を適用した8節線プリズム要素で離散化する。

それぞれの要素について、図-2のように要素座標系を設定する。x, y, z軸方向の変位をu, v, wとして、x軸回りの回転角をθで表し、波動の角速度ω, 位相速度c, 部材軸方向の波長λとしたときの変位関数として、それぞれ次式を用いる。

帯板要素に対して

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle N_p \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle N_p \rangle & 0 \\ 0 & 0 & \langle N_b \rangle \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_i\} \\ \{V_i\} \\ \{W_i\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、

$$\langle N_p \rangle = \langle 1 - \eta \quad \eta \rangle \quad (2) \text{ a}$$

$$\langle N_b \rangle = \begin{bmatrix} 1 - 3\eta^2 + 2\eta^3 & y(1 - 2\eta + 2\eta^2) \\ 3\eta^2 - 2\eta^3 & y(\eta^2 - \eta) \end{bmatrix} \quad (2) \text{ b}$$

$$\{U_i\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \quad (3) \text{ a}$$

$$\{V_i\} = \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{Bmatrix} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \quad (3) \text{ b}$$

8節線プリズム要素に対して

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle N \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle N \rangle & 0 \\ 0 & 0 & \langle N \rangle \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_i\} \\ \{V_i\} \\ \{W_i\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに

$$\langle N \rangle = \langle N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_8 \rangle \quad (5)$$

$$\{U_i\} = \langle u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_8 \rangle^T \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \quad (6) \text{ a}$$

$$\{V_i\} = \langle v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_8 \rangle^T \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \quad (6) \text{ b}$$

$$\{W_i\} = \langle w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_8 \rangle^T \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \quad (6) \text{ c}$$

であり、式(5)の形状関数 N_i ($i=1, 2, \dots, 8$) はそれぞれ次のように表される。

$$\text{隅角節線: } N_i = \frac{1}{4} (1 + \xi \xi_i) (1 + \eta \eta_i) (\xi \xi_i + \eta \eta_i - 1) \quad (7) \text{ a}$$

$$\text{節線 } \xi_i = 0: N_i = \frac{1}{2} (1 - \xi^2) (1 + \eta \eta_i) \quad (7) \text{ b}$$

$$\text{節線 } \eta_i = 0: N_i = \frac{1}{2} (1 + \xi \xi_i) (1 - \eta^2) \quad (7) \text{ c}$$

式(1), (4)の変位場を仮想仕事式に適用することにより、各要素に対する運動方程式を求めることができる。これをすべての要素について重ね合わせるにより、系全体に対する運動方程式が次のように求められる。

$$-\left(\frac{2\pi}{\lambda} c\right)^2 [M] \{d\} + [K] \{d\} = \{f\} \quad (8)$$

ここに、 $[M]$, $[K]$ は質量マトリクス、剛性マトリクスであり、 $\{d\}$, $\{f\}$ は節線変位ベクトル、節線外力ベクトルを表

表-1 位相速度の分散特性の比較 (縦波動, $\nu=0.3$)

rb	Fraser	Nigro	田中	岸 (4節線プリズム要素)			8節線プリズム要素		
			second	48div.	24div.	8div.	12Div.	8div.	4div.
0.1	1.6120	1.6120	-----	1.6120	1.6120	1.6120	1.6122	1.6122	1.6122
0.5	1.5996	1.5996	1.5997	1.5996	1.5996	1.5993	1.5999	1.5999	1.5999
1.2	1.5150	-----	1.5149	1.5149	1.5147	1.5122	1.5152	1.5152	1.5153
1.6	1.4048	-----	-----	1.4046	1.4041	1.3989	1.3928	1.3929	1.3935
2.0	1.2743	1.274	1.2743	1.2741	1.2734	1.2661	1.2745	1.2745	1.2749
2.6	1.1285	-----	1.1285	1.1283	1.1275	1.1196	1.1287	1.1288	1.1294
3.2	-----	-----	1.0469	1.0466	1.0459	1.0384	1.0470	1.0471	1.0483
3.8	-----	-----	1.0022	1.0019	1.0013	0.9945	1.0023	1.0025	1.0048
5.0	0.962	0.962	0.9619	0.9617	0.9612	0.9563	0.9621	0.9625	0.9681
7.0	0.942	0.942	0.9418	0.9416	0.9416	0.9394	0.9422	0.9438	0.9561
10.0	0.934	0.936	0.9345	0.9345	0.9350	0.8494	0.9361	0.9405	0.9618
14.0	0.931	0.939	0.9316	0.9318	0.9330	0.6942	0.9366	0.9460	0.9728

表-2 位相速度の比較 (強軸回りの曲げ波動)

(a) $\alpha=0.5$

No	帯板要素+プリズム要素		プリズム要素のみ	
	32+4x8div.	48+6x12div.	18+4x8div.	26+6x12div.
1	0.16029	0.16023	0.16996	0.16580
2	0.32697	0.32687	0.33250	0.33238
3	0.38156	0.38128	0.38825	0.38795

(b) $\alpha=10$

No	帯板要素+プリズム要素		プリズム要素のみ	
	32+4x8div.	48+6x12div.	18+4x8div.	26+6x12div.
1	0.11950	0.11618	0.11934	0.11604
2	0.12157	0.11807	0.12147	0.11798
3	0.12563	0.12131	0.12563	0.12131

す。

位相速度は、式 (8) において節線外力ベクトル $\{f\}$ を零として、以下のような固有値方程式を解くことによって求められる。

$$\det \left[[K] - \left(\frac{2\pi}{\lambda} c \right)^2 [M] \right] = 0 \quad (9)$$

3. 数値解析精度の検討

3.1 8節線プリズム要素の解析精度

本解析で硬質ウレタン部分の離散化に使用する8節線プリズム要素の解析精度について、岸ら⁹⁾が示した4節線プリズム要素による計算結果と他の解析解との比較表を参考にして検討を行った。

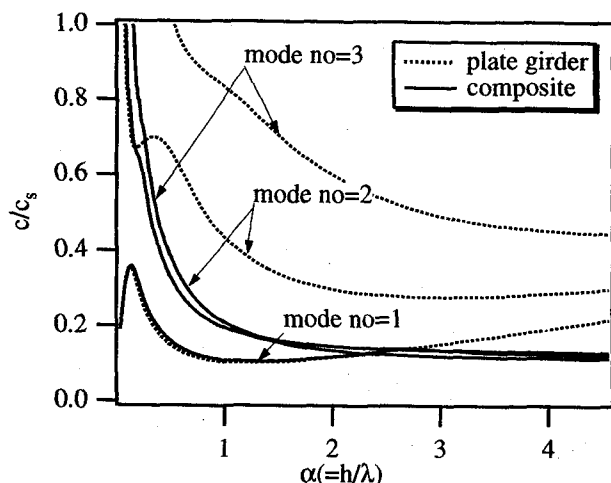
表-1は、ポアソン比 $\nu=0.3$ の正方形部材における縦波動の位相速度について、8節線プリズム要素による計算結果とFraser⁸⁾、Nigro⁹⁾、田中ら¹⁰⁾、岸らによる計算結果の比較を示したものである。表の r は $2\pi/\lambda$ (λ は波長)、 b は断面の幅を表し、位相速度はせん断波速度 ($=\sqrt{G/\rho}$, G : せん断弾性定数, ρ : 密度) で無次元化している。8節線プリズム要素による計算結果は、 12×12 分割で他の結果とほぼ一致し、 12×12 分割と 8×8 分割の差は $rb > 7.0$ で1%以下である。 $rb=14.0$ の 12×12 分割は4節線プリズム要素の 48×48 分割と比較して0.5%増であり、少ない要素数で高精度の結果が得られていることがわかる。また、4節線プリズム要素による結果は小さい値から収束するのに対し、8節線プリズム要素では大きい値から収束している。

3.2 離散化モデルの妥当性と解析精度

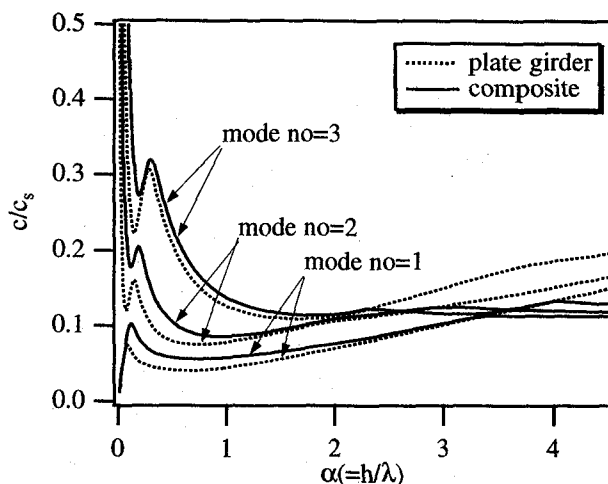
有限帯板法と有限プリズム法を併用した離散化モデルにおいては、帯板要素では板厚中央で変位が定義され、プリズム要素では要素表面で変位が定義されるため、これらの

要素の境界における変位の連続性は厳密には保証されていないが、プレートガーダーの板厚が薄い場合には本解析モデルによる近似が十分可能であると考えられる。そこで、本解析モデルの有効性を検証するため、複合部材のプレートガーダー部分を帯板要素、硬質ウレタン部分を8節線プリズム要素で離散化したモデル (併用モデル) とプレートガーダー部分も8節線プリズム要素で離散化したモデル (単独モデル) による解析を行い、分割要素数および解析精度の比較を行った。

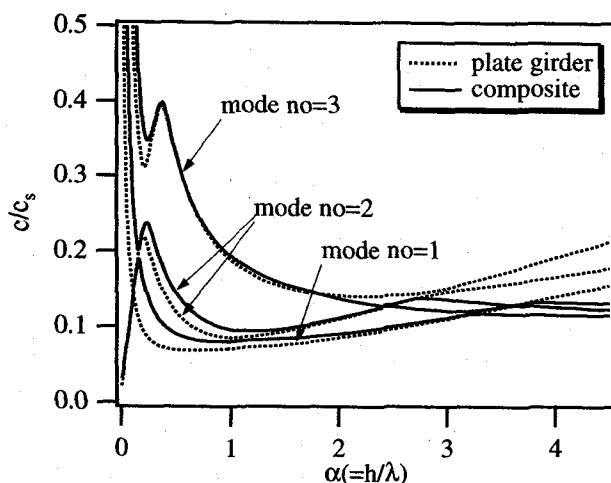
表-2は、図-1の解析断面について、併用モデルと単独モデルの強軸 (図-1, Y軸) 回りの曲げ波動の第1次から第3次までの位相速度を比較したものである。要素分割は、それぞれのモデルについて硬質ウレタン部分の分割数を一致させるものとして、併用モデルでは帯板要素数32 (フランジ 8×2 , ウェブ16) + プリズム要素数32 (4×8) と帯板要素数48 (フランジ 12×2 , ウェブ24) + プリズム要素数72 (6×12)、単独モデルではプリズム要素数50 (フランジ 5×2 , ウェブ8, 硬質ウレタン部分 4×8) と98 (フランジ 7×2 , ウェブ12, 硬質ウレタン部分 6×12) の場合の結果を示している。表の α は波長 λ に対する桁高 h の比 h/λ を表



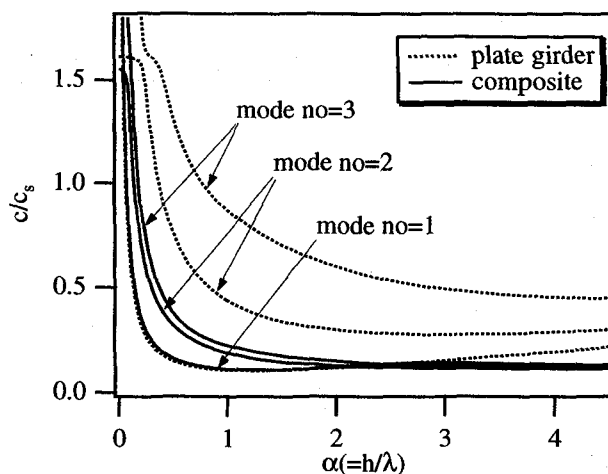
(a) 強軸回りの曲げ波動



(b) 弱軸回りの曲げ波動



(c) 曲げねじり波動



(d) 縦波動

図-3 位相速度分散曲線の比較

し、位相速度はプレートガーダーのせん断波速度で無次元化している。

$\alpha=0.5$ では、併用モデルと単独モデルの差は、第1次モードがもっとも大きく、硬質ウレタン部分の要素分割が 4×8 分割で6%、 6×12 分割で3%である。要素数による差は、併用モデルはいずれも1%以下であるが、単独モデルでは第1次モードがもっとも大きく約3%となっている。 $\alpha=10$ では、モデルによる差は1%以下であり、要素数による差は両モデルとも約3%となっている。

これらの検討結果より、以下の解析においては、図-1の解析断面について、プレートガーダー部分を帯板要素48分割、硬質ウレタン部分を8節線プリズム要素 6×12 分割で離散化した解析モデルを適用することとした。

4. 波動伝播特性

4.1 位相速度分散特性と断面変形モード分布

図-1に示した複合部材と硬質ウレタンを添加しないプレートガーダーの位相速度分散曲線の比較を図-3に示す。図には、強軸(Y軸)回りの曲げ波動、弱軸(Z軸)回りの曲げ波動、曲げねじり波動、縦波動についてそれぞれ第3次までの位相速度分散曲線を示している。横軸は波長 λ に

対する桁高 h の比 $\alpha (=h/\lambda)$ であり、縦軸は位相速度 c をプレートガーダーのせん断波速度 c_s で無次元化して表している。実線が硬質ウレタンを添加した複合部材の位相速度分散曲線、点線がプレートガーダーの位相速度分散曲線を表す。

強軸回りの曲げ波動と縦波動では、第1次位相速度分散曲線は $\alpha < 2.5$ でプレートガーダーと複合部材のほぼ一致した形状であるが、波長が短くなると複合部材の位相速度はプレートガーダーのように増加せず波長とは無関係にほぼ一定値を示し、波長が短くなるほどプレートガーダーとの差は大きくなっている。複合部材の第2次、第3次位相速度分散曲線は双曲線的な変化を示し、第1次位相速度分散曲線に比べて長い波長でプレートガーダーよりも小さい値を示し始め、さらに波長が短くなると第1次位相速度分散曲線に沿ったものとなっている。

弱軸回りの曲げ波動と曲げねじり波動では、 $\alpha < 2.5$ の長い波長の位相速度分散曲線はいずれも複合部材とプレートガーダーで同様の形状を示しているが、プレートガーダーよりも複合部材の値のほうが大きく、次数が高いほどプレートガーダーとの差は小さくなっている。なお、ここには示していないが、さらに高次の位相速度分散曲線では強

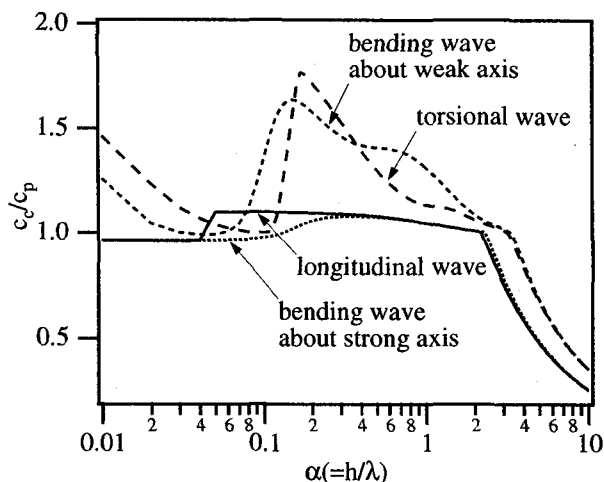
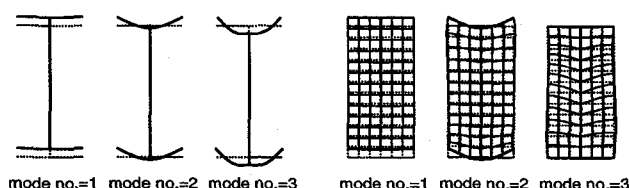
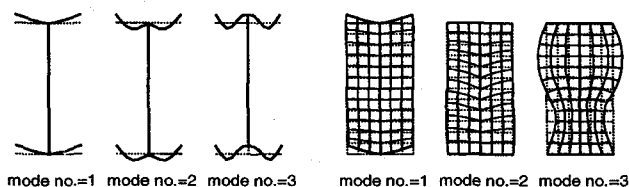


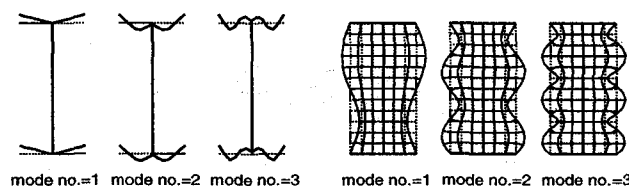
図-4 第1次位相速度分散曲線における硬質ウレタンの影響



(a) $\alpha = 0.05$



(b) $\alpha = 1.0$

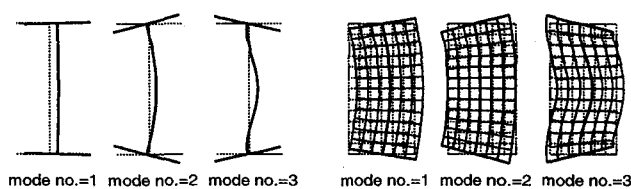


(c) $\alpha = 6.0$

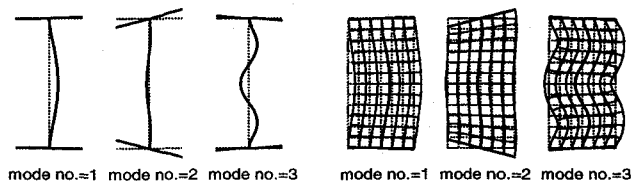
図-5 強軸回りの曲げ波の断面変形モードの比較

軸の曲げ波動や縦波動の第2次、第3次位相速度分散曲線のように複合部材のほうがプレートガーダーよりも小さい値を示すことを確認している。一方、波長の短い領域では、強軸回りの曲げ波動や縦波動と同様に複合部材の位相速度分散曲線は波長に関係なくいずれもほぼ一定の値を示している。これらの値は、硬質ウレタンのせん断波速度よりも小さく、波動パターンに関係なくほぼ一致した値であり、さらに波長が短くなると Rayleigh 波速度に収斂していくものと考えられる。

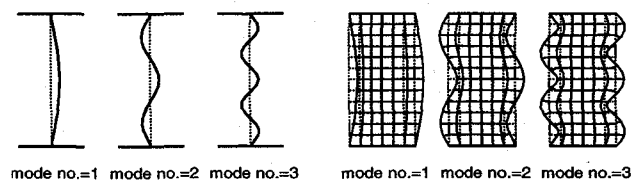
プレートガーダーと複合部材の位相速度分散曲線の差を検討するため、図-3における各波動パターンの第1次位相速度について、プレートガーダーの位相速度 c_p に対する複合部材の位相速度 c_c の比 c_c/c_p を求めた (図-4)。図では、長



(a) $\alpha = 0.05$



(b) $\alpha = 1.0$



(c) $\alpha = 6.0$

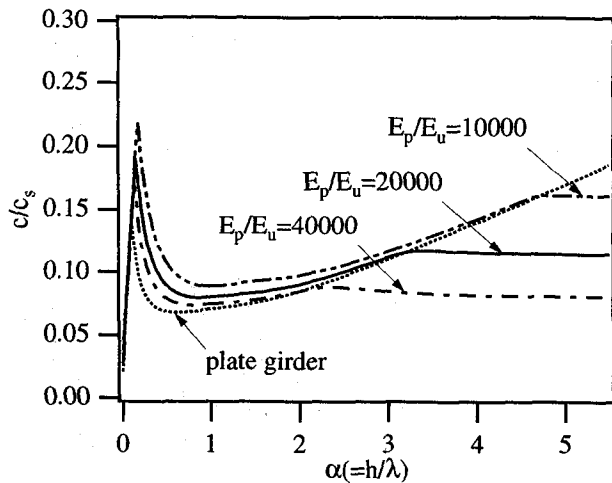
図-6 弱軸回りの曲げ波の断面変形モードの比較

い波長における特性を明確にするため、横軸を対数で表している。プレートガーダーに比べて位相速度が急激に低下する短い波長の領域では、強軸回りの曲げ波動と縦波動、弱軸回りの曲げ波動と曲げねじり波動でそれぞれほぼ一致した曲線を示している。また、長い波長におけるプレートガーダーとの差は、強軸回りの曲げ波動と縦波動では約10%、弱軸回りの曲げ波動と曲げねじり波動では最大約70%であり、波動パターンによって硬質ウレタンの影響が異なることがわかる。

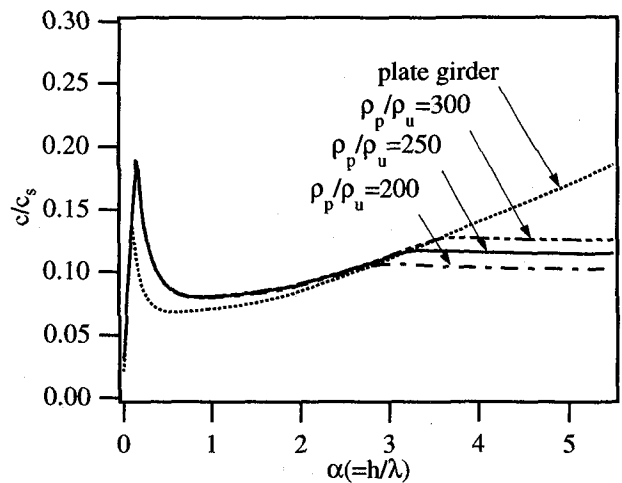
これらの特性を踏まえて、 $\alpha=0.05$, 1.0, 6.0のときの波動モードについて、複合部材とプレートガーダーの比較を行った。

図-5に、強軸回りの曲げ波の第3次までの断面変形モードを示す。 $\alpha=0.05$ の第1次モードは断面変形がほとんどなく、硬質ウレタンの影響は見られない。第2次モードは、複合部材の硬質ウレタン部分はプレートガーダー部分と同様の変形を示し、第3次モードでは、複合部材のプレートガーダー部分のフランジはほとんど変形せず、硬質ウレタン部分だけに変形が生じている。 $\alpha=1.0$ の第1次モードは $\alpha=0.05$ の第2次モードと同様の断面変形を示しているが、第2次、第3次モードおよび $\alpha=6.0$ の複合部材はいずれもプレートガーダー部分がほとんど変形せず硬質ウレタン部分だけに断面変形が生じている。図-3を参照すると、このように硬質ウレタン部分だけが変形しているモードの位相速度はプレートガーダーに比べて大幅に減少していることがわかる。また、 $\alpha=1.0$ の第3次モードと $\alpha=6.0$ の第1次モードを比較すると、波長が短いほうが硬質ウレタン部分の変形が表面部分に集中しており、さらに波長が短くなると Rayleigh 波が生じることが予想される。

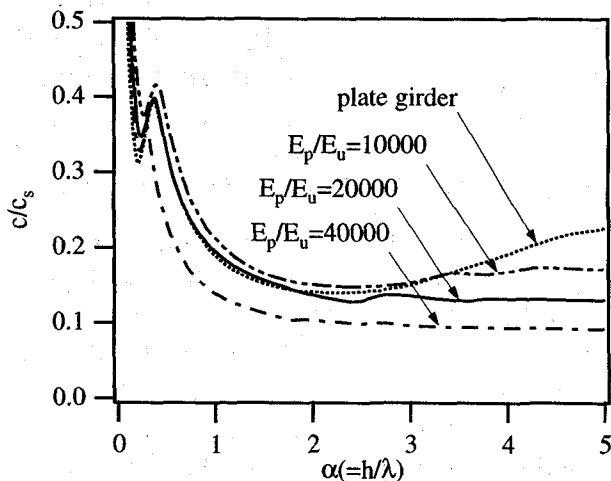
図-6は、弱軸回りの曲げ波の第3次までの断面変形



(a) 第1次位相速度分散曲線

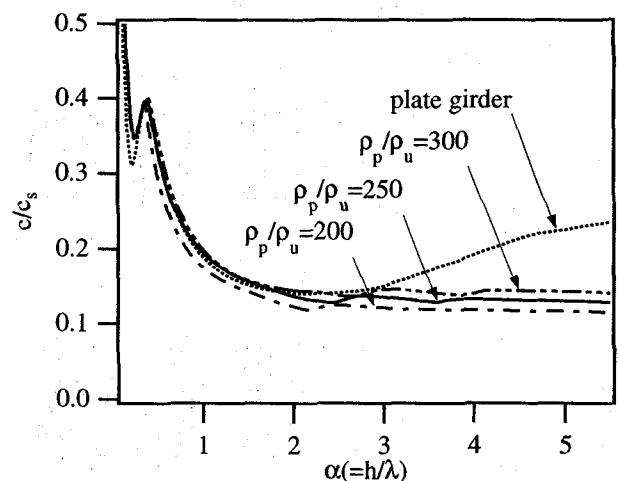


(a) 第1次位相速度分散曲線



(b) 第3次位相速度分散曲線

図-7 曲げねじり波の位相速度分散曲線に与える弾性定数比の影響



(b) 第3次位相速度分散曲線

図-8 曲げねじり波の位相速度分散曲線に与える密度比の影響

モードである。 $\alpha=0.05, 1.0$ は、どのモードもプレートガーダーと複合部材のプレートガーダー部分の断面変形はほぼ一致し、複合部材の硬質ウレタン部分もプレートガーダー部分のウェブの曲げ変形と一体となった変形を示している。 $\alpha=6.0$ では、複合部材のプレートガーダー部分はどのモードもほとんど変形せず、硬質ウレタン部分の表面に変形が生じている。強軸回りの曲げ波動と同様に、プレートガーダー部分はほとんど変形せずに硬質ウレタン部分だけが変形するモードにおいて、複合部材の位相速度がプレートガーダーに比べて大幅に減少し、波長に関係なくほぼ一定値を示すことがわかる。

なお、曲げねじり波動や縦波動の断面変形モードについての検討結果からも、高次モードおよび波長の短い領域で硬質ウレタン部分だけが変形するモードが生じ、その時の位相速度はプレートガーダーに比べて大幅に減少することが明らかになった。また、軸方向モードについても検討を行ったが、断面変形モードにおいて硬質ウレタン部分だけに変形を生じる場合には軸方向モードにおいても硬質ウレタン部分が顕著な変形を示すことがわかった。

4.2 硬質ウレタンの材料物性値の影響

硬質ウレタンの材料物性値はその生成法によって変化することに着目し、硬質ウレタンの弾性定数および密度の違いが位相速度分散曲線に与える影響について検討を行った。

図-7は、硬質ウレタンに対するプレートガーダーの弾性定数比が $E_p/E_u=10000, 20000, 40000$ と変化したときの曲げねじり波の第1次および第3次位相速度分散曲線を比較したものである。図には、硬質ウレタンを添加しないプレートガーダーの位相速度分散曲線も示している。複合部材の位相速度は、弾性定数比が小さくなるのにもなってどの波長でも大きくなり、一定値を示し始める波長は短くなっている。また、第3次位相速度分散曲線においては、 $E_p/E_u=40000$ の複合部材が $\alpha > 0.3$ でプレートガーダーより小さい位相速度を示しており、弾性定数比が大きくなるすなわち硬質ウレタンの弾性定数が小さくなると波長の長い領域でも高次の位相速度はプレートガーダーよりも低下することがわかる。

図-8は、硬質ウレタンに対するプレートガーダーの密度

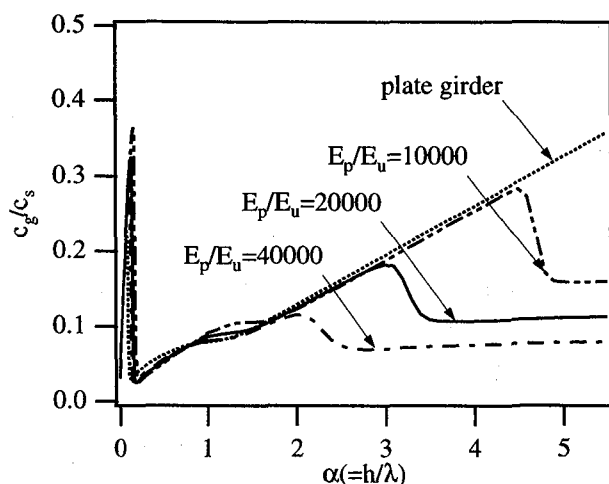


図-9 曲げねじり波の第1次群速度分散曲線

比が $\rho_p/\rho_u=200, 250, 300$ と変化したときの曲げねじり波の第1次および第3次位相速度分散曲線を比較したものである。第1次位相速度分散曲線では、複合部材の位相速度分散曲線は波長の長い領域ではほぼ重なっており、密度比の影響はほとんど現れていない。これに対して、波長が短く複合部材の位相速度分散曲線がほぼ一定値を示す領域では密度比の影響が現れ、密度比が小さくなるすなわち硬質ウレタンの密度が大きくなるのにもなって複合部材の位相速度は小さい値となっている。また、第3次位相速度分散曲線では、 $\rho_p/\rho_u=200$ の複合部材の位相速度が $\alpha > 0.4$ でプレートガーダーよりも小さくなっており、密度比が小さい場合にも長い波長の高次モードの位相速度において硬質ウレタンの影響が現れることがわかる。

ここには、曲げねじり波の結果しか示していないが、曲げ波動および縦波動においても曲げねじり波動と同様に弾性定数比が大きい場合ならびに密度比の小さい場合には、波長が短い領域および高次モードにおいて硬質ウレタンの影響が顕著に生じることが確かめられた。

4.3 群速度分散曲線

位相速度と同様に波動伝播の特性を表す群速度についても硬質ウレタンの影響を検討した。位相速度が単一波の伝播速度であるのに対し、群速度は波の群の伝播速度であり、波の群のエネルギーの伝播速度を表す。群速度 c_g は、位相速度 c と波長 λ に対する桁高 h の比 α を用いて次式で求められる。

$$c_g = c + \alpha \frac{dc}{d\alpha} \quad (10)$$

図-9に、硬質ウレタンに対するプレートガーダーの弾性定数比 $E_p/E_u=10000, 20000, 40000$ の複合部材およびプレートガーダーの曲げねじり波の第1次群速度分散曲線を示す。横軸は波長 λ に対する桁高 h の比 α であり、縦軸は群速度 c_g をプレートガーダーのせん断波速度 c_s で無次元化して表している。どの群速度分散曲線も、長い波長の急激な増大と減少を示した後、直線的に増加している。プレート

ガーダーの群速度分散曲線はそのまま増加するが、複合部材では急激に減少してからほぼ一定の値を示す。複合部材の群速度分散曲線は、弾性定数比が大きいほど長い波長で減少し始め、一定値はより小さい値となっている。

5. まとめ

プレートガーダーと硬質ウレタンを組み合わせた複合部材の波動伝播特性を明らかにすることを目的として、I形プレートガーダーに硬質ウレタンを添加した複合部材について、有限帯板法と有限プリズム法を併用した離散化モデルを適用した解析を行った。I形プレートガーダーと複合部材の位相速度分散曲線、断面変形モード、および群速度分散曲線について比較を行い、硬質ウレタンの影響について検討した。

その結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 複合部材の位相速度は、波長が短い波動および高次の波動においてプレートガーダーよりも小さな値を示す。波長が短く次数が高いほどプレートガーダーとの差は大きくなり、強軸の曲げ波動および縦波動においてその傾向は顕著に現れる。また、低次の波動においては、波長の長い領域でプレートガーダーよりも大きな値を示し、その差は弱軸回りの曲げ波動と曲げねじり波動において顕著なものとなる。
- (2) 複合部材の位相速度がプレートガーダーよりも減少する場合の断面変形モードは、プレートガーダー部分はほとんど変形せず、硬質ウレタン部分だけが変形したものとなる。
- (3) プレートガーダーに硬質ウレタンを添加した影響は、硬質ウレタンの弾性定数が小さい場合ならびに密度が大きい場合に顕著となり、波長の短い領域および高次の波動において位相速度の低下が生じる。
- (4) 複合部材の群速度は、長い波長ではプレートガーダーとほぼ一致するが、波長が短くなると急激に減少し、さらに波長が短くなると波長が変化してもほぼ一定の値を示すようになる。硬質ウレタンの弾性定数が小さくなると、長い波長で群速度が減少し始め、より小さい値に収斂する。

なお、本論文を論文をまとめるにあたり、種々助言をいただいた室蘭工業大学の岸徳光助教授に感謝致します。

参考文献

- 1) 太田貞次, 深澤泰晴, 松貝勇: 硬質ウレタンを充填した合成型枠橋の開発研究, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1279~1288, 1993.
- 2) 太田貞次, 深澤泰晴, 小川夏樹: 硬質ウレタン添加によるプレートガーダーの制振・消音, 第21回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, I-29, 1994.
- 3) 大島俊之, 能町純雄: 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, pp.47~57, 1980.

- 4) 岸徳光, 松岡健一, 能町純雄: 有限プリズム法を用いた単鉄筋RC梁の位相速度分散曲線とモード分布, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.785~793, 1989.
- 5) 松岡健一, 菅田紀之, 能町純雄, 木田哲量: 二層複合部材を伝播する弾性波に対する境界面の影響, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.775~784, 1989.
- 6) 三上修一, 大島俊之, ロナルド・クリッツ, 菅原登: 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, pp.435~444, 1993.
- 7) Cheng, Y. K. : Finite Strip Method in Structural Analysis, PERGAMON PRESS, 1976.
- 8) Frasn, W. B. : Stress Wave Propagation in Rectangular Bars, Int. J. Solids & Struct., Vol.5, 1969.
- 9) Nigro, N. J. : Steady-State Wave Propagation in Infinite Bars of Noncircular Cross Section, J. Acous. Soc. Amer., Vol.40, No.6, 1996.
- 10) 田中吉之助, 岩橋嘉生: 長方形断面棒を伝わる弾性波の分散関係, 機械学会論文集 (第一部), 第364号, pp.3771~3779, 1976.
- 11) 能町純雄, 角田与史雄, 岸徳光: 薄肉H型断面ばりの弾性波の位相速度について, 土木学会論文報告集, 第244号, pp.37~46, 1975.

(1996年9月6日受付)