

## 鋼・硬質ウレタン複合部材の局部振動特性

Characteristics of Local Vibrations in the Composite Members  
of Plate Girder and Rigid Urethane

岡村 美好\*・深澤 泰晴\*\*

Miyoshi OKAMURA and Yasuharu FUKASAWA

\* 正会員 工修 山梨大学助手 工学部土木環境工学科 (〒 400-8511 山梨県甲府市武田四丁目 3-11)

\*\* 正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒 400-8511 山梨県甲府市武田四丁目 3-11)

When the composite member of I-section steel member and rigid urethane vibrates, the independent modes of the rigid urethane are generated at high-frequency region and the such modes are supposed to give the vibration reduction effect. In this paper, natural vibration analyses on local vibration of the composite members are carried out and the characteristics of the independent modes of rigid urethane are clarified. The discrete model which is the combination of finite strip method and finite prism method is applied and the parametric analyses of dimensions and material values of the rigid urethane are carried out. Based on these results, the boundary frequencies which generate the independent modes of the rigid urethane are obtained.

**Key Words :** local vibration, composite member, rigid urethane, I-section steel member

## 1. まえがき

鋼薄肉断面部材では、高周波領域において部材を構成する薄板要素に面外曲げ変形を伴う局部振動が発生する。鋼鉄道橋におけるこのような局部振動は、薄肉断面の溶接部における疲労亀裂の発生や騒音放射の要因となることから、近年の列車走行の高速化に伴ってますます問題視されるようになってきている。

このような局部振動の低減方法の一つとして、コンクリートや樹脂等の制振効果がある材料と鋼部材を複合化した制振部材の使用を挙げることができる。鋼板と樹脂等の粘弾性体とのサンドイッチ制振鋼板についてはこれまでに多くの研究成果が報告<sup>2)~4)</sup>され、機械工学分野では自動車の内装等に用いられてきている。一方、これらの制振部材の土木構造物への適用例は少なく、山田ら<sup>4)</sup>や保坂ら<sup>5)</sup>によって実用化に向けた各種の検討が行われているが、その挙動については十分に解明されていない。

著者らも、局部振動の低減方法として鋼薄肉断面部材と硬質ウレタンを合成した複合部材に着目し、その制振効果および制振メカニズムを明らかにすることを目的とした研究を行っている<sup>6)~8)</sup>。制振効果については実験的に確かめつつある<sup>6)~7)</sup>が、制振メカニズムについては解析面からの検討を試み、その

第一段階として複合部材の波動伝播特性について解析を行い、複合化により低次の位相速度が大きくなること、高次の波動において硬質ウレタンの変形が卓越するモードが生じることなど、その特性を明らかにしている<sup>8)</sup>。そして、この硬質ウレタンの独自モードが卓越する振動では硬質ウレタンが複合部材の局部振動特性に大きな影響を与え、その結果として制振効果が現れるものと考えられる。

本論文では、鋼と硬質ウレタンを合成した複合部材の局部振動について固有振動解析を行い、特に、硬質ウレタンの変形が卓越するモードの分析を中心にその特性を明らかにする。解析には、有限帯板法と有限プリズム法を適用した離散化モデル<sup>8)</sup>を用い、硬質ウレタンとの複合化を行っていない鋼 I 形断面部材と比較することにより、その特性について検討を行う。また、硬質ウレタンの厚さおよび弾性定数や密度等の材料定数の違いによる影響についても検討し、硬質ウレタン独自の変形が卓越するモードが生じる振動数を明確にすることを試みる。

## 2. 解析断面

本研究では、鋼 I 形断面部材の上下フランジとウェブの間の空間に硬質ウレタンを充填して一体化

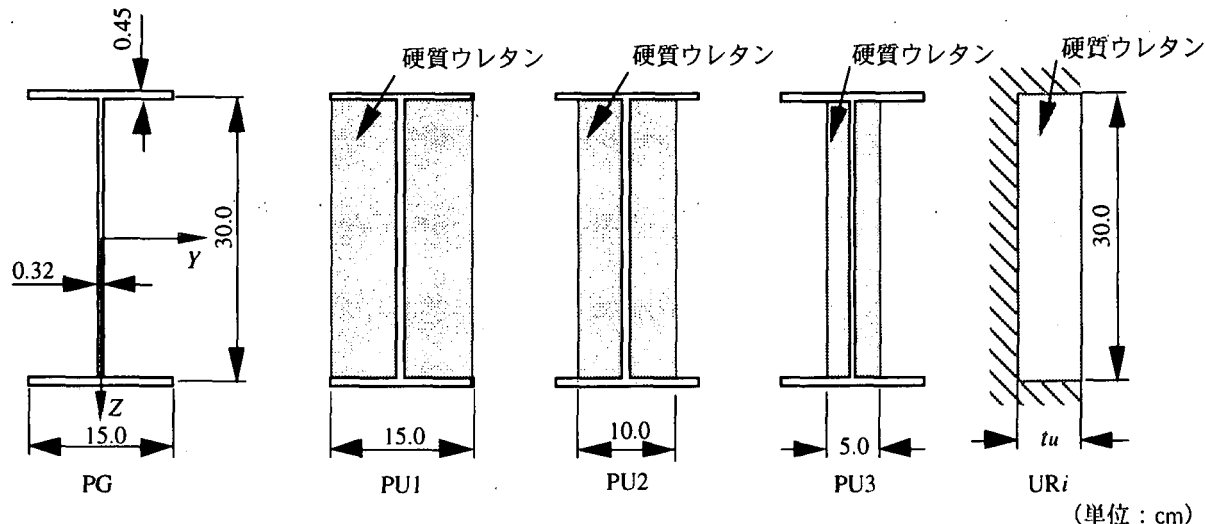


図-1 解析断面

した複合部材を対象とした。硬質ウレタンは弾性体・等方性材料で鋼 I 形断面部材に完全に付着していると仮定した。

解析は、図-1 に示す 4 種類の断面について行った。硬質ウレタンと合成しない鋼 I 形断面 (PG), 厚さの異なる硬質ウレタンと合成した複合断面 (PU1~3), および硬質ウレタンのみの断面 (URi) である。硬質ウレタンのみの断面 (URi) は複合断面のウェブ片側を取り出し、鋼 I 形断面に付着している面を固定支持としたもので、ウレタン厚  $t_u$  は  $PU_i$  ( $i=1\sim3$ ) の複合断面と同一とした。

鋼 I 形断面部材および硬質ウレタンの標準的な材料定数として次の値を使用した。

鋼 I 形断面部材：

弾性定数  $E_p = 2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$   
 ポアソン比  $\nu_p = 0.3$   
 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鋼 I 形断面部材の弾性定数比および密度比は、それぞれ

$$\begin{aligned} E_p/E_u &= 20000 \\ \rho_p/\rho_u &= 250 \end{aligned}$$

である。

### 3. 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離散化モデルを用い、鋼 I 形断面部分を帯板要素で、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した。帯板要素とプリズム要素を結合した場合、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ないが、鋼 I 形断面の板厚が薄い場合には本解析モデルによる近似は十分可能である<sup>8)</sup>。

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し、 $x, y, z$  軸方向の変位を  $u, v, w$ ,  $x$  軸回りの回転角を  $\theta$ , 部材長を  $L$  で表す。部材の両端が単純支持されているとして、変位関数には次式を用いる。

帯板要素に対して

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{m=1}^r \begin{bmatrix} \langle N_p \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle N_p \rangle & 0 \\ 0 & 0 & \langle N_b \rangle \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_{i,m}\} \\ \{V_{i,m}\} \\ \{W_{i,m}\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $r$  は Fourier 級数の採用項数であり、 $\langle \rangle$  は列ベクトル、 $\{ \}$  は行ベクトルを表す。さらに

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

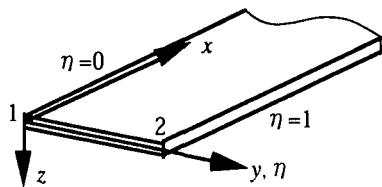
$$\langle N_b \rangle = \begin{bmatrix} 1 - 3\eta^2 + 2\eta^3 & \eta(1 - 2\eta + 2\eta^2) \\ 3\eta^2 - 2\eta^3 & \eta(\eta^2 - \eta) \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$\{U_{i,m}\} = \begin{Bmatrix} u_{1,m} \\ u_{2,m} \end{Bmatrix} \cos\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \quad (3a)$$

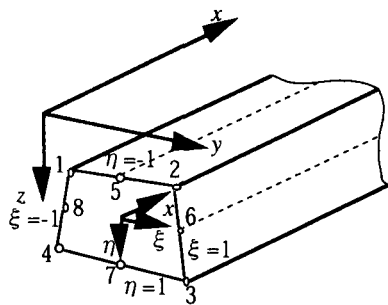
$$\{V_{i,m}\} = \begin{Bmatrix} v_{1,m} \\ v_{2,m} \end{Bmatrix} \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \quad (3b)$$

$$\{W_{i,m}\} = \begin{Bmatrix} w_{1,m} \\ \theta_{1,m} \\ w_{2,m} \\ \theta_{2,m} \end{Bmatrix} \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \quad (3c)$$

ここに、 $m$  は部材軸方向半波数である。



(a) 帯板要素



(b) プリズム要素

図-2 離散化要素と要素座標系

8節線プリズム要素に対して

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{m=1}^8 \begin{bmatrix} \langle N \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle N \rangle & 0 \\ 0 & 0 & \langle N \rangle \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_{i,m}\} \\ \{V_{i,m}\} \\ \{W_{i,m}\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに

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

$$\{U_{i,m}\} = \langle u_{1,m} \quad u_{2,m} \quad \dots \quad u_{8,m} \rangle^T \cos\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \quad (6a)$$

$$\{V_{i,m}\} = \langle v_{1,m} \quad v_{2,m} \quad \dots \quad v_{8,m} \rangle^T \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \quad (6b)$$

$$\{W_{i,m}\} = \langle w_{1,m} \quad w_{2,m} \quad \dots \quad w_{8,m} \rangle^T \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \quad (6c)$$

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。

隅角節線：

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

節線  $\xi_i = 0$ ：

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

節線  $\eta_i = 0$ ：

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

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ことにより、系全体に対する固有方程式を求める。

要素分割は、著者らが先に行った解析精度の検討

結果<sup>8)</sup>を参考に行い、PU1を基本として鋼I形断面部分を帯板要素48分割（フランジ12分割×2，ウェブ24分割），硬質ウレタン部分を8節線プリズム要素6×12分割とし，その他の断面についてはこれに準じるものとした。

## 4. 解析結果

数値解析においては，部材長を固定せずに部材軸方向半波長  $l (=L/m, m$  は部材軸方向半波数) を変化させて固有振動数の算出を行った。また，図-1に示した解析断面は2軸対称であることから，固有振動数および振動モードは強軸回りの曲げ振動，弱軸回りの曲げ振動，ねじり振動および縦振動の4タイプに分類して検討を行った。

### 4.1 固有振動数と振動モード

図-3は，鋼I形断面部材 (PG) と複合部材 (PU1) の固有振動を4つの振動タイプに分け，断面変形次数6次までの固有振動数と部材軸方向半波長の関係と比較したものである。縦軸は振動数  $f$  (Hz)，横軸はウェブ高さ  $h$  に対する部材軸方向半波長  $l$  の比  $l/h$  で，片対数目盛で表している。実線が複合部材の固有振動数曲線，点線が鋼I形断面部材の固有振動数曲線であり，鋼I形断面部材の各曲線には断面変形次数を  $PG(s)$  ( $s$  は断面変形次数を表す) で表して書き添えた。

また，複合部材 (PU1) の強軸回りの曲げ振動とねじり振動における振動モードを図-4～7に示す。図-4, 5は， $l/h=20.0, 1.0, 0.25$  における複合部材の強軸回りの曲げ振動の断面変形モードと部材軸方向変形モードをそれぞれ断面変形次数6次まで示したものであり，図-6, 7は， $l/h=20.0, 1.0, 0.25$  における複合部材のねじり振動の断面変形モードと部材軸方向変形モードをそれぞれ断面変形次数6次まで示したものである。断面変形モードは半波長中央断面の変形を表している。部材軸方向変形モードは半波長端断面の変形であり，最大値を1として1から-1までの変形を0.2刻みの等高線で表している。

図-3 (a) の強軸回りの曲げ振動において，鋼I形断面部材の固有振動数曲線は4500Hz以下の範囲では3次までが現れている。図-4に示す断面変形モードと照らし合わせて複合部材の固有振動特性を分析してみると，両図から以下のことが読みとれる。

①複合部材と鋼I形断面部材の断面変形1次の固有振動数曲線同士を比較すると， $l/h$  の全範囲にわたって特に顕著な差異はみられない。このように鋼I形断面部材の固有振動数曲線とほぼ並走している場合は，鋼材と硬質ウレタンがかなり一体と

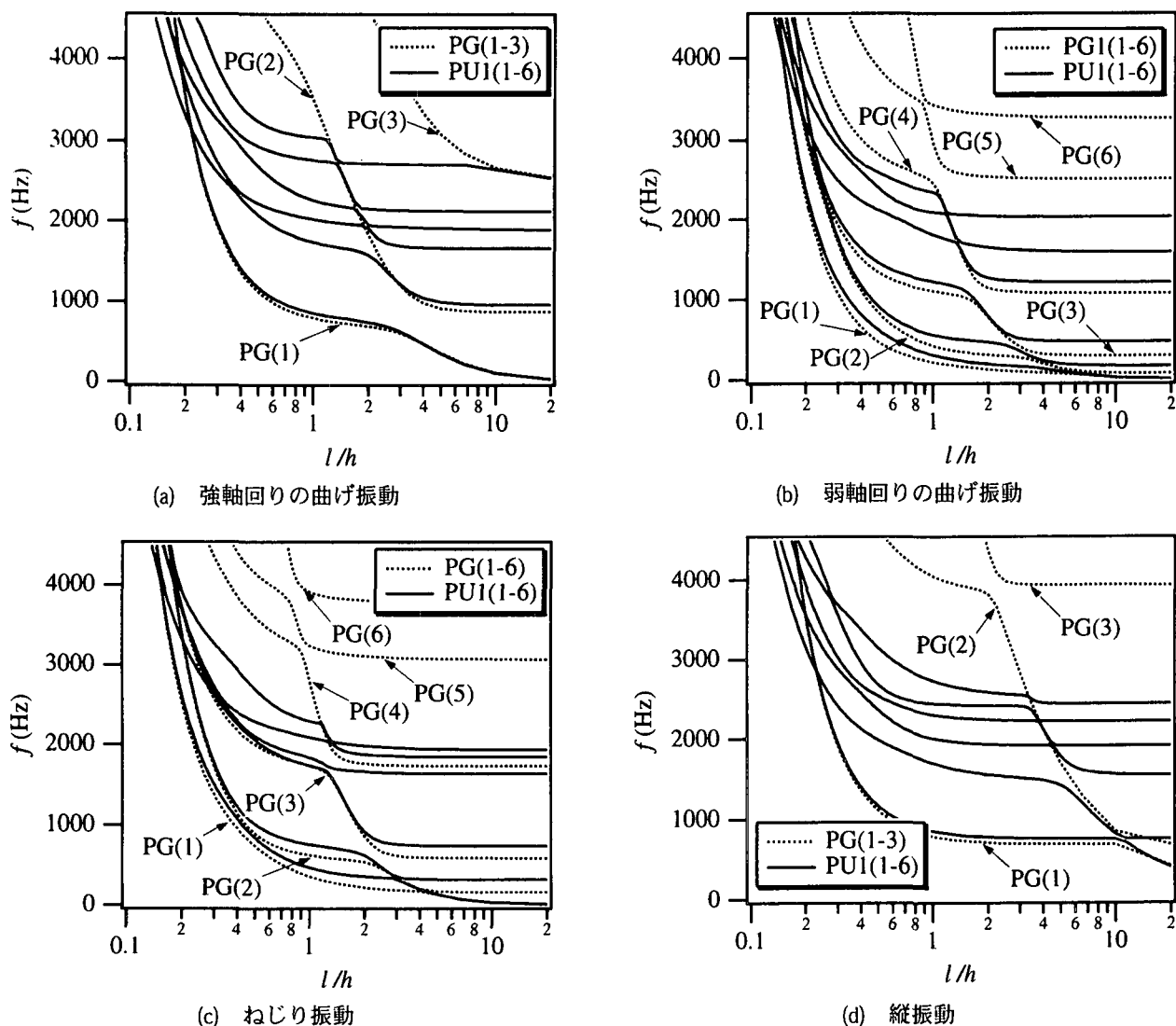


図-3 断面変形モード6次までの固有振動数曲線の比較 (1)

なって変形している場合である。その中でも、 $l/h=20.0$ の1次モードのように梁の全体振動に支配される場合には複合化による固有振動数の変化はほとんどないが、フランジやウェブに面外曲げ変形を生じる局部振動に支配される場合には硬質ウレタンの剛性が加わることにより固有振動数が若干大きくなる。

②断面変形2次の固有振動数曲線は、 $l/h > 2.4$ の範囲ではほぼ並走しているが、 $l/h < 2.4$ の範囲では $l/h$ の減少につれて大きく乖離している。後者の場合は、硬質ウレタンの独自モードが卓越している場合である。

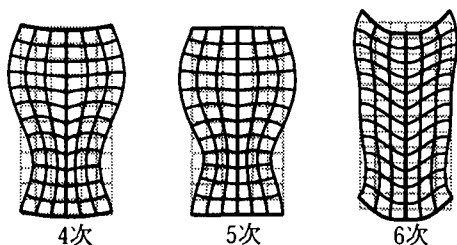
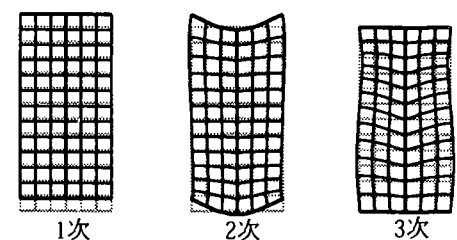
③複合部材の断面変形3～5次の固有振動数曲線は $1.5 < l/h < 2$ の範囲で鋼I形断面部材の断面変形2次の曲線と部分的に並走しているが、その他の範囲ではこれらの曲線に対応するものは鋼I形断面部材には現れない。後者の場合は、硬質ウレタンの独自モードが卓越している場合である。

④複合部材の断面変形6次の固有振動数曲線は、

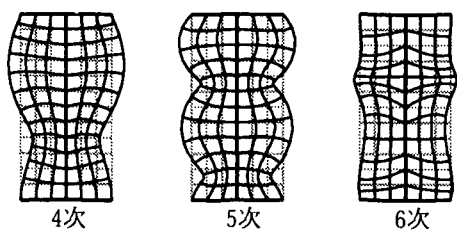
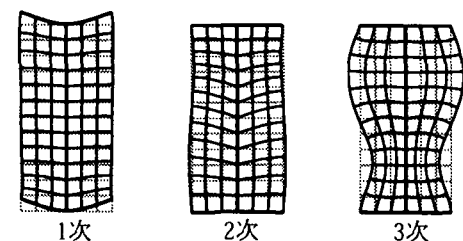
鋼I形断面部材の断面変形3次の固有振動数曲線と $l/h > 9$ の範囲ではほぼ並走しているが、 $l/h < 9$ の範囲では $l/h$ の減少につれて大きく乖離している。上述の場合と同様に、前者は鋼材と硬質ウレタンがほぼ一体となって変形している場合であり、後者は硬質ウレタンの独自モードが卓越している場合である。

また、強軸回りの曲げ振動の部材軸方向変形モード(図-5)は、全体振動に支配される $l/h=20.0$ の1次モードでは鋼材と硬質ウレタンは一体となった変形を示している。しかし、 $l/h$ が小さくなるとウレタン部分の変形は局所的になり、 $l/h=0.25$ の2、4次モードのように断面変形モードにおいて硬質ウレタンの表面に曲げ変形を伴う独自モードが卓越する場合には、硬質ウレタンの半波長端断面の軸方向変形は自由表面に集中したものとなっている。

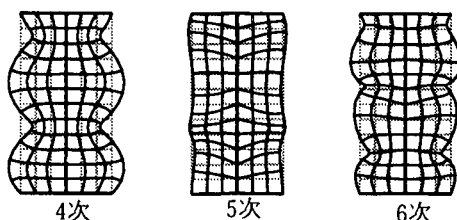
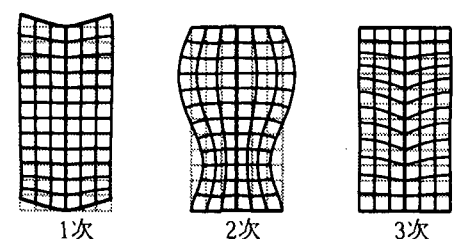
図-3(c)のねじり振動についても、図-6に示す断面変形モードと照らし合わせて複合部材の固有振動特性を分析してみると以下のことがわかる。



(a)  $l/h = 20.0$

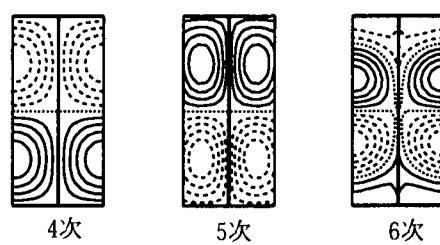
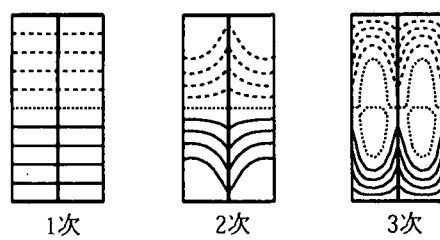


(b)  $l/h = 1.00$

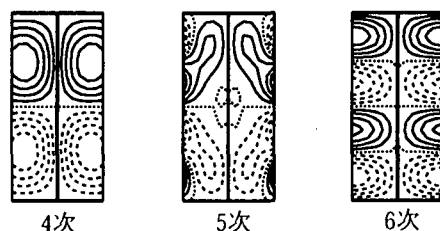
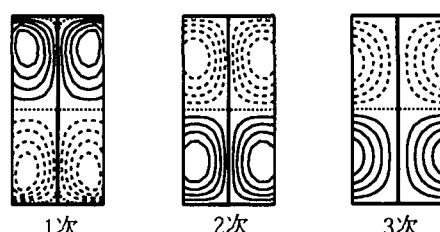


(c)  $l/h = 0.25$

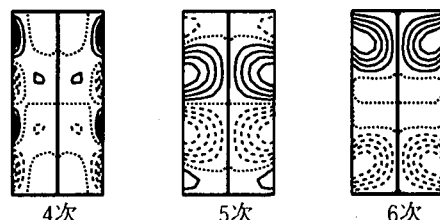
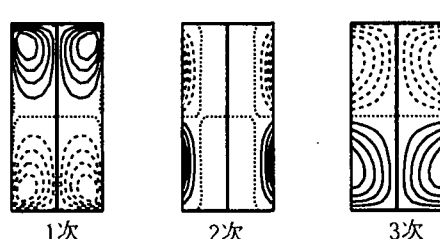
図-4 強軸回りの曲げ振動の断面変形モード



(a)  $l/h = 20.0$



(b)  $l/h = 1.00$



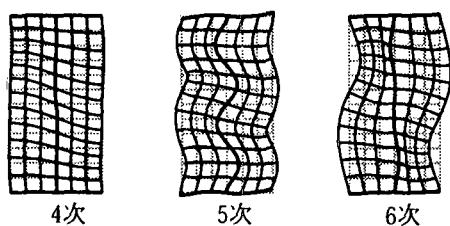
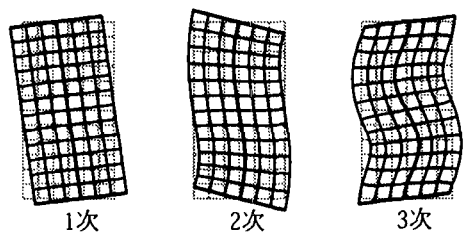
(c)  $l/h = 0.25$

図-5 強軸回りの曲げ振動の部材軸方向変形モード

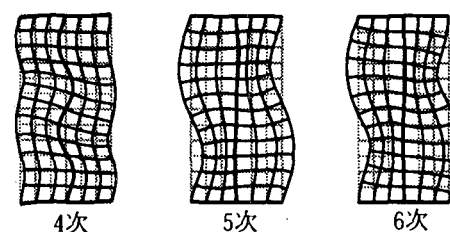
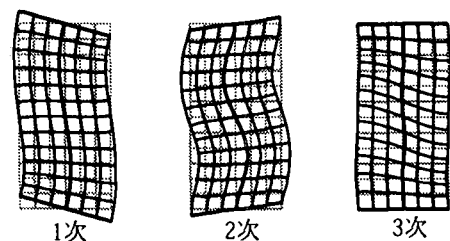
①複合部材と鋼 I 形断面部材の断面変形 1, 2 次の固有振動数曲線は、 $l/h$  の全範囲にわたって特に顕著な差異はみられない。強軸回りの曲げ振動と同様に、鋼 I 形断面部材の固有振動数曲線とほぼ並走している場合は、鋼材と硬質ウレタンがほぼ一

体となって変形している場合である。

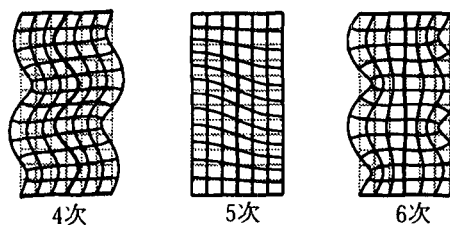
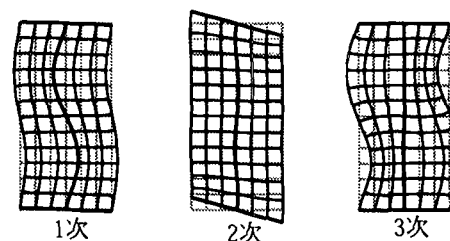
②断面変形 3 次の両曲線は、 $l/h$  の全範囲にわたってほぼ並走しているが、 $l/h$  の値によって特性が異なる。 $l/h > 1.0$  の範囲は鋼材と硬質ウレタンがほぼ一体となって変形している場合であり、 $l/h$



(a)  $l/h = 20.0$

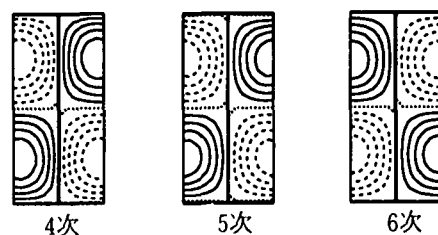
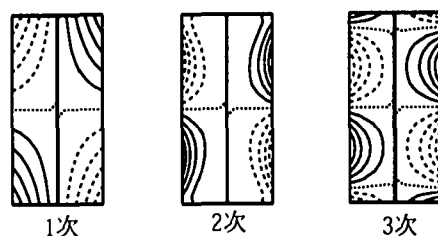


(b)  $l/h = 1.00$

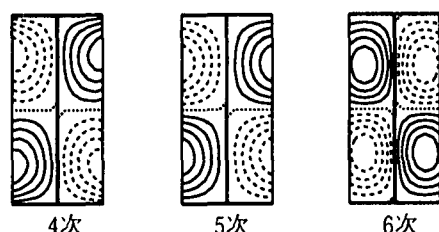
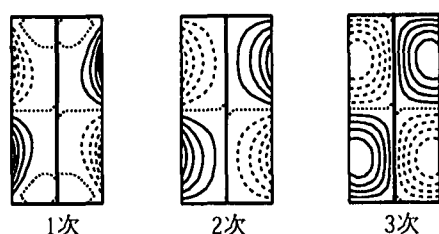


(c)  $l/h = 0.25$

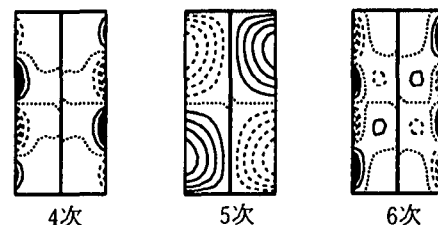
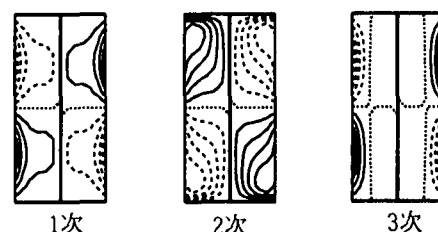
図-6 ねじり振動の断面変形モード



(a)  $l/h = 20.0$



(b)  $l/h = 1.00$



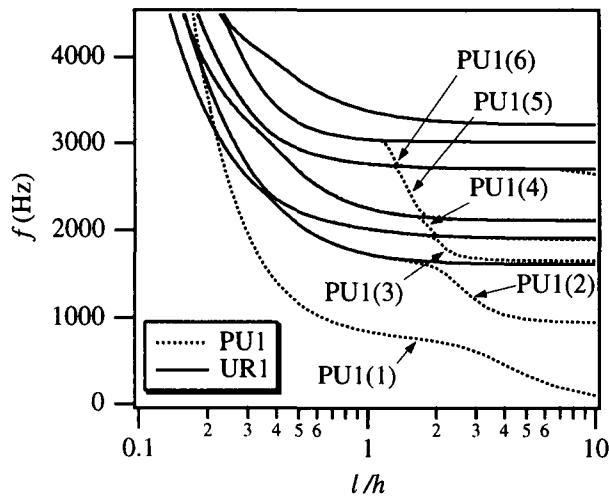
(c)  $l/h = 0.25$

図-7 ねじり振動の部材軸方向変形モード

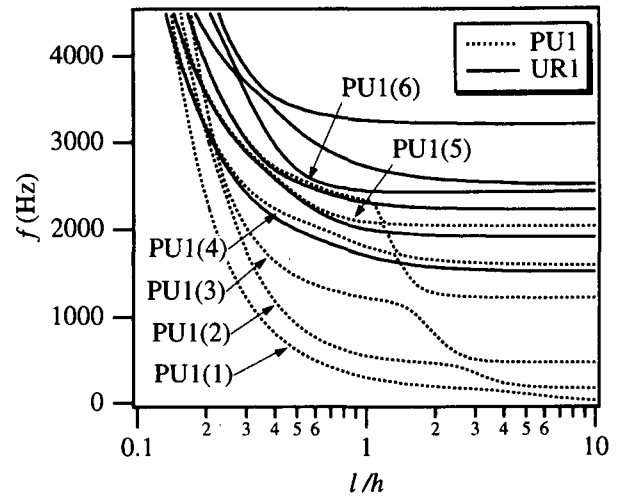
<1.0 の範囲は硬質ウレタンの独自モードが卓越している場合である。 $l/h < 1.0$  の範囲では、これらの曲線と並走している複合部材の断面変形 4 次の曲線が鋼材と硬質ウレタンがほぼ一体となって変形している場合に対応する。高次の局部振動に支

配される場合には、鋼 I 形断面部材の固有振動数曲線と並走していても硬質ウレタンの独自モードが卓越する場合がある。

③複合部材の断面変形 5, 6 次の曲線は、 $l/h > 1.5$  の範囲で鋼 I 形断面材の断面変形 4 次の曲線とほ



(a) 強軸回りの曲げ振動



(b) 弱軸回りの曲げ振動

図-8 断面変形モード6次までの固有振動数曲線の比較 (2)

ば並走し、 $l/h < 1.5$  の範囲では  $l/h$  の減少につれて大きく乖離している。 $l/h > 1.5$  の範囲では複合部材の断面変形5次が鋼材と硬質ウレタンがほぼ一体となって変形する場合に対応する。複合部材の断面変形6次は、上述の場合と同様に、鋼 I 形断面部材の曲線と並走していても硬質ウレタンの独自モードが卓越する場合である。

また、図-6より、鋼材と硬質ウレタンがほぼ一体となって変形しているモードでウェブに曲げ変形が生じる場合にはウェブの変形量よりも硬質ウレタン表面の変形量が小さくなっており、複合化による制振効果が現れたものと考えられる。また、部材軸方向変形モード(図-7)においては、強軸回りの曲げ振動と同様に  $l/h$  が小さくなるにつれてウレタン部分のみが局所的に変形するモードが現れている。

弱軸回りの曲げ振動および縦振動においても、それぞれねじり振動、強軸回りの曲げ振動と同様の傾向を示している。また、図-3において  $l/h$  を固定して硬質ウレタンの独自モードが卓越する場合の最低次固有振動数を4つのタイプについて比較するとほぼ一致しており、 $l/h=1$  のときには約1700Hzとなっている。これは、複合部材の固有振動特性はある振動数を境に2つに分けることができ、これより低い振動数では鋼材と硬質ウレタンが一体となって変形するモードのみが生じ、これより高い振動数では鋼材と硬質ウレタンが一体となって変形するモードだけでなく硬質ウレタンの変形が卓越するモードも生じることを表している。さらに、その境界の振動数は振動パターンに関係なく  $l/h$  の値に応じて決まることわかる。

硬質ウレタンの独自モードが卓越する場合の断面変形は鋼 I 形断面部分はほとんど変形せずに硬質ウレタン部分のみが変形することから、複合断面のウェブ片側の硬質ウレタンを取り出して鋼 I 形断面

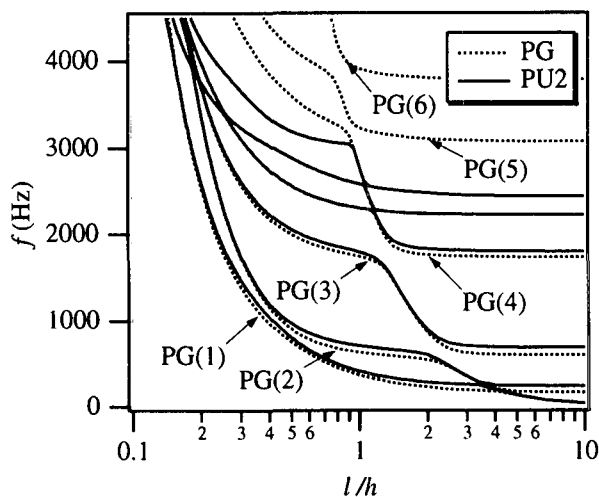
に付着している面を固定支持とした硬質ウレタン部分 (UR1) と複合部材 (PU1) について固有振動数の比較を行った。図-8に、強軸回りの曲げ振動と弱軸回りの曲げ振動における断面変形6次までの比較を示す。実線が硬質ウレタン部分の固有振動数曲線、点線が複合部材の固有振動数曲線を表している。また、複合部材の各曲線には断面変形次数を  $PU1(s)$  ( $s$  は断面変形次数を表す) で書き添えた。

図-3と比較すると、複合部材において硬質ウレタンの独自モードが卓越する場合の固有振動数曲線は硬質ウレタン部分の固有振動数曲線とほぼ一致していることがわかる。このことは、硬質ウレタンの独自モードが卓越する場合の固有振動数はウェブ片側の硬質ウレタンについて鋼 I 形部材と付着している面を固定支持としたときの固有振動数によって近似でき、前述の境界振動数は硬質ウレタン部分の最低次固有振動数を求めることにより推定できることを意味している。

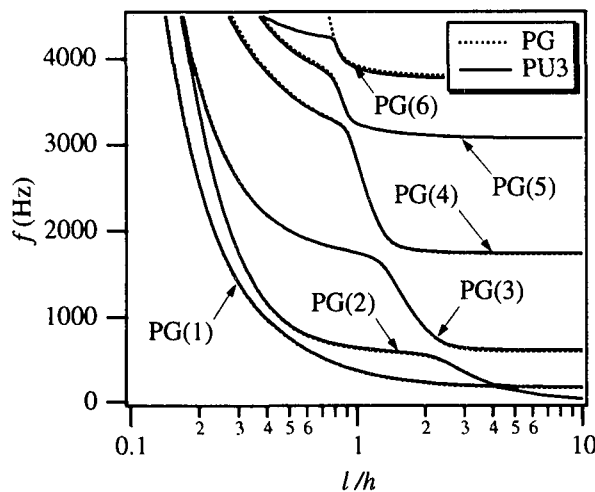
#### 4.2 ウレタン厚の影響

複合断面におけるウレタン厚の影響を明らかにするために、ウレタン厚の異なる複合部材PU2, PU3についても固有振動数を求め、鋼 I 形断面部材 (PG) との比較を行った。

図-9は、ねじり振動について、固有振動数と部材軸方向半波長の関係を断面変形次数6次まで示したものである。点線が鋼 I 形断面部材 (PG) の固有振動数曲線、実線が複合部材 (PU2, PU3) の固有振動数曲線を表し、PU2, PU3 のウレタン厚はそれぞれ5.0, 2.5cmである。PU2は約2000Hz以上、PU3は約4000Hz以上で硬質ウレタンの独自モードが現れており、ウレタン厚が厚いほうが硬質ウレタンの独自モードが生じる境界振動数が小さくなっている。また、ウレタン厚の薄いPU3では、4000Hz以下の曲線



(a) PU2



(b) PU3

図-9 ウレタン厚がねじり振動に与える影響

は鋼 I 形断面部材の曲線にほぼ重なっており、ある程度のウレタン厚がなければ剛性を高める効果もほとんどないことがわかる。

### 4.3 境界振動数の推定

4.1で述べたように硬質ウレタン部分について最低次固有振動数を求めることにより、硬質ウレタンの変形が卓越するモードが生じる境界振動数の推定を行った。鉛直補剛材間の局部振動を対象にして、 $l/h=1.0$ の場合について複合化する際の硬質ウレタンの厚さおよび生成法による材料定数の変化を想定してパラメトリック解析を行った。

図-10は、ウレタン厚の異なる硬質ウレタン断面UR1～3について境界振動数を比較したものである。ウレタン厚が厚くなることにより境界振動数は約4200Hzから約1700Hzに低下している。また、ウレタン厚による境界振動数の変化量はウレタン厚が厚くなるのにもなって小さくなる傾向が現れている。

図-11, 12は、硬質ウレタン断面UR1について、密度比あるいはポアソン比を変化させたときの境界振

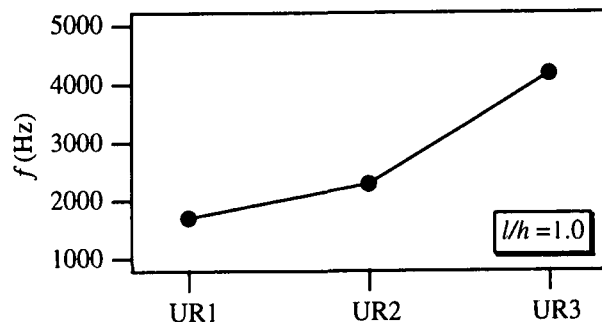


図-10 ウレタン厚による境界振動数の変化

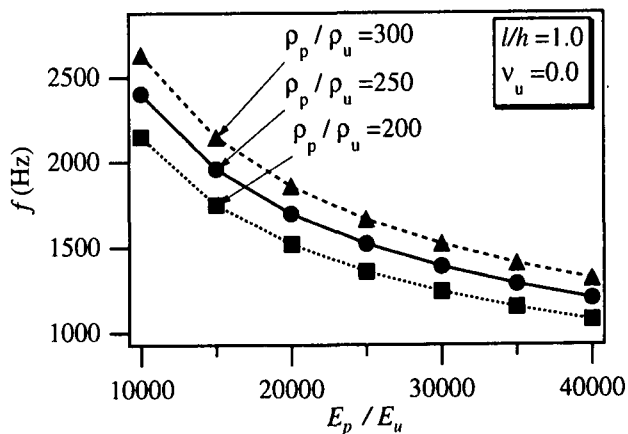


図-11 弾性定数比と境界振動数の関係 (1)

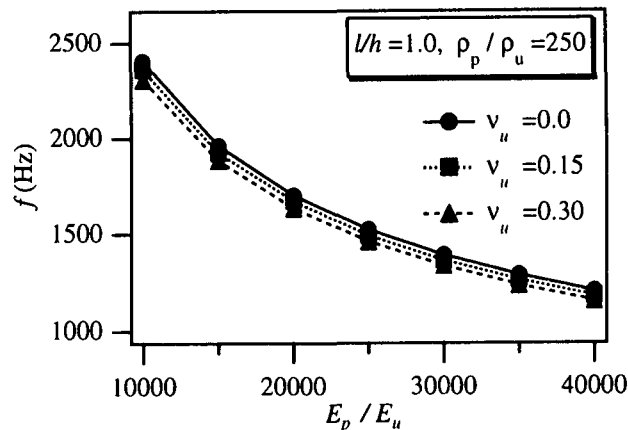


図-12 弾性定数比と境界振動数の関係 (2)

動数と硬質ウレタンの弾性定数の関係を示したものである。硬質ウレタンの独自モードが卓越する境界振動数は、硬質ウレタンに対する鋼 I 形断面部材の密度比が250、ポアソン比が0.0の場合には、硬質ウレタンに対する鋼 I 形断面部材の弾性定数比が10000から40000に増加するのに伴って約2400Hzから1200Hzに低下している。また、密度比が200から300に変化すると境界振動数は約250～500Hz大きくなり、弾性定数比が小さいほどその変化量は大きくなっている。ポアソン比が0.0から0.30と変化した場合には、境界振動数はポアソン比が大きくなるのにつれて低下し、50～100Hzの低下を示している。



## 5. あとがき

鋼 I 形断面部材と硬質ウレタンを合成した複合部材について、有限帯板法と有限プリズム法を適用した離散化モデルを用いた固有振動解析を行い、複合部材の制振効果に大きな影響を及ぼすと考えられる硬質ウレタンの独自モードが卓越する場合の分析を中心にその振動特性を明らかにすることを試みた。

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

(1) 梁としての全体振動に支配される場合には複合化の影響はほとんど生じない。複合化の影響が現れるのは局部振動においてである。

(2) ウェブ高さ  $h$  に対する部材軸方向半波長  $l$  の比  $l/h$  を変数として描いた複合部材の固有振動数曲線は、断面変形次数および  $l/h$  の値に対応して鋼 I 形断面部材のそれとほぼ並走する場合と大きく乖離する場合に分けられる。前者は、鋼材と硬質ウレタンがほぼ一体となって変形する場合であり、後者は硬質ウレタンの独自モードが卓越する場合である。

(3) 硬質ウレタンの独自モードが卓越する固有振動数は硬質ウレタン部分のみの固有振動数から推定できる。本研究で対象としたモデルにおいては、硬質ウレタンの独自モードが卓越する境界振動数は1000～2000Hz 以上となった。

具体的な動的応答解析を行い、硬質ウレタンによる制振メカニズムを検討した結果については稿を改めて報告する予定である。

## 参考文献

- 1) 杉本一朗, 三木千壽, 市川篤司, 伊藤裕一: 高速走行下での鋼鉄道橋箱桁の動的挙動と補剛材下端部の応力, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1003-1012, 1997.
- 2) Douglas, B. E. and Yang, J. C. S.: Transverse Compressional Damping in the Vibratory Response of Elastic-Viscoelastic-Elastic Beams, AIAA Journal, Vol.16, No.9, pp.925-930, 1978.
- 3) 高田省一: 有限要素法による積層制振梁の損失係数計算方法, 日本音響学会誌, Vol.51, No.4, pp.259-269, 1995.
- 4) 山田健太郎, 森野真之, 聖生守雄, 安波博道: サンドイッチ制振鋼板溶接継手の疲労特性, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.147-156, 1994.
- 5) 保坂鐵矢, 光木香, 西海健二, 中村俊一: 鋼とコンクリートを組み合わせた鉄道橋用主桁の騒音・振動低減効果に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.889~897, 1998.
- 6) 太田貞次, 深澤泰晴, 桧貝勇: 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.
- 7) 太田貞次, 深澤泰晴, 小川夏樹: 硬質ウレタン添加による I 形断面部材の制振・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.
- 8) 岡村美好, 深澤泰晴, 太田貞次: 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, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.73~80, 1997.

(1998 年 4 月 24 日受付)