

高速列車荷重による鋼箱桁の局部振動に関する一考察

A study on dynamic behavior of a box girder caused by a high speed train

岡村美好*, 深沢泰晴**

Miyoshi Okamura, Yasuharu Fukasawa

* 工博 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4-3-11)

** 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4-3-11)

The purpose of the paper is to grasp the characteristics of local vibration of a plate girder caused by a high speed train. At first, the characteristics of wave propagation in a box girder are clarified. Next, the dynamic response of the box girder under a high speed moving load is analyzed, and the relation between the speed of the moving load and the local vibration of the box girder is investigated.

Results obtained from these analyses are as follows: 1) the local vibration of the box girder with horizontal stiffeners is depended on the out-of-plane vibration of the web plate between a horizontal stiffener and a lower flange; 2) the acceleration of out-of-plane vibration of the web plate increase particularly when the speed of the moving load is equal to the velocity of the intersection of the phase velocity curve and the group velocity curve.

Key Word : steel box girder, high speed train, local vibration, wave propagation

キーワード: 鋼箱桁, 高速列車荷重, 局部振動, 波動伝播

1. はじめに

列車走行によって鉄道橋に生じる動的挙動の影響は、衝撃係数として設計に取り入れられている¹⁾。衝撃係数は、当該区間を運行する列車の最高速度、桁の振動特性および支間から求められるが、設計に用いられる最高速度は、在来鉄道における電車・内燃動車では160km/h、新幹線では300km/h程度とされている。

しかし、最近では、磁気浮上式鉄道に代表されるような列車の高速走行が計画され、300km/h以上の高速域における鉄道橋の動的挙動を解明することが必要となってきた。このような高速列車走行による鉄道橋の動的挙動については、松浦²⁾を初めとするいくつかの研究³⁾⁻⁵⁾が報告され、列車走行による橋梁の衝撃係数の増大は、列車の有する規則的な軸配置により生じる荷重周期と橋桁との共振による影響が顕著であること等が明らかになっている。

これらでは、桁の局部変形を無視したはり理論に基づいた解析が行われているが、プレートガーダーのような薄肉鋼部材においては、列車速度が速くなるほど部材を構成する板要素の面外曲げ振動の影響が無視できなくなり、局部振動を考慮した検討が必要になると考えられる。

このような局部振動を考慮した部材の動的応答解析は、

岸⁶⁾や白旗⁷⁾によって試みられている。岸は、有限帯板法を用いることにより、箱形ばりの波動伝播解析および1点集中移動荷重による動的応答解析を行い、荷重の走行速度がばりの極小位相速度に達するとフランジの応答倍率が急激に大きくなることを明らかにしている。また、白旗らは、桁の局部振動を考慮した動的応答解析方法として境界要素法を適用した方法を提案している。

一方、杉本⁸⁾は、新幹線における鋼箱桁について実橋測定を行い、高速走行下では桁全体の横方向の振動およびウェブの面外曲げ振動が生じること、ウェブの面外振動は列車速度がある値より大きくなると急激に増加すること、桁を構成する板要素の挙動は列車荷重列の軸距や速度の影響を強く受けること、等を示している。

そこで、著者らは、杉本らが示した桁の局部振動が列車の特定の速度で急激に増大する点に着目し、そのメカニズムについて桁の波動伝播特性との関連において明らかにすることを試みた。

具体的には、水平補剛材を有する鋼箱桁について、局部振動を対象とした位相速度分散曲線および群速度分散曲線を求めた。続いて、高速移動荷重が作用する場合の局部変形挙動について動的応答解析を行った。これにより、鋼箱桁の波動伝播特性を明らかにするとともに、局部振動が急

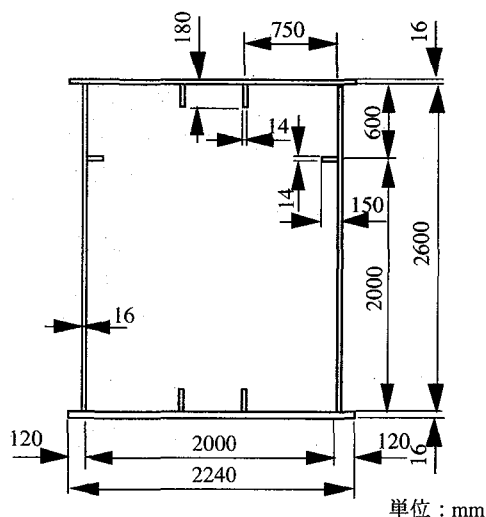


図-1 解析断面

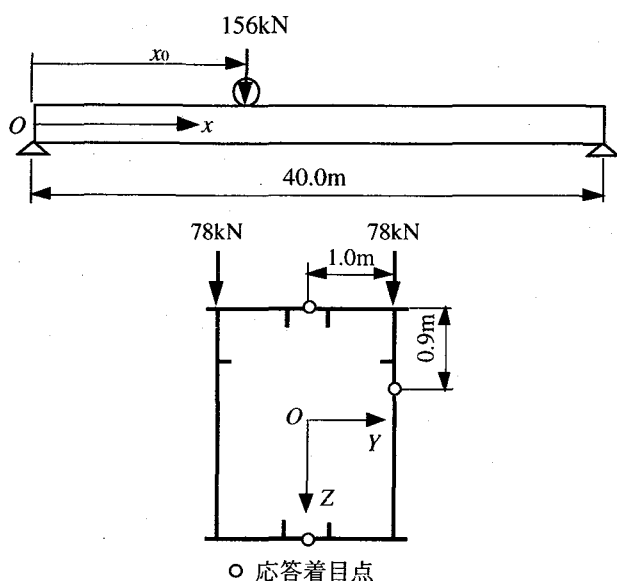


図-2 載荷荷重と応答着目点

激に増大する時の荷重速度と桁の位相速度ならびに群速度との関連について検討を行った。

2. 解析モデル

解析モデルは、杉本ら⁹⁾が実橋測定を行った鋼箱桁を参考にして、図-1に示す断面を設定した。鋼箱桁は、スパン40mの両端単純支持桁で、上下フランジに各2本、ウェブに各1本の水平補剛材を有するものとする。なお、中間補剛材は無視する。

荷重は、軸重156kNの1車軸が上フランジ上を移動する場合を想定して、図-2に示すように大きさ78kNの集中移動荷重を上フランジとウェブの接合辺上に載荷した。応答解析は桁としてのたわみ振動とウェブの面外曲げ振動に着目して行い、図-2に示した上下フランジ中央点およびウェブ上部の面外方向変位と加速度、さらに、これらの3箇所における面外の曲げモーメントを求めた。

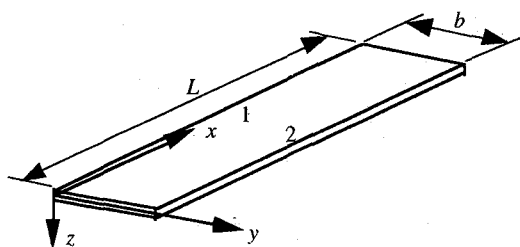


図-3 帯板要素*i*

なお、鋼箱桁の材料定数には以下の値を使用した。

ヤング率	$E = 206 \text{ GPa}$
ポアソン比	$\nu = 0.3$
単位質量	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

3. 解析方法

応答解析は、有限帯板法にモード解析法を適用⁹⁾して行った。

有限帯板法における変位場は、帯板幅方向を多項式で、部材軸方向を Fourier 級数で近似した。図-3に示した帯板要素*i*の任意点の x, y, z 軸方向の変位成分 u, v, w は、両端単純支持を仮定して、それぞれ次式を用いた。

$$u = \sum_{m=1}^r \langle N_p \rangle \{ U_m \} \cos\left(\frac{m\pi}{L} x\right) \quad (1a)$$

$$v = \sum_{m=1}^r \langle N_p \rangle \{ V_m \} \sin\left(\frac{m\pi}{L} x\right) \quad (1b)$$

$$w = \sum_{m=1}^r \langle N_b \rangle \{ W_m \} \sin\left(\frac{m\pi}{L} x\right) \quad (1c)$$

ここに、 $\{ \}$ は列ベクトル、 $\langle \rangle$ は行ベクトルを表し、 $\{ U_m \}$ 、 $\{ V_m \}$ 、 $\{ W_m \}$ は帯板要素*i*の Fourier 級数の第 m 項（部材軸方向のモード次数に相当）に対する節線変位ベクトル、 r は Fourier 級数の採用項数である。また、 $\langle N_p \rangle$ 、 $\langle N_b \rangle$ は帯板の面内変形および面外変形に対する内挿関数であり、 $\eta = y/b$ とすれば

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

$$\langle N_b \rangle = \left\langle 1 - 3\eta^2 + 2\eta^3 \quad y(1 - 2\eta + \eta^2) \right. \\ \left. 3\eta^2 - 2\eta^3 \quad y(\eta^2 - \eta) \right\rangle \quad (2b)$$

である。

式(1)の変位場を仮想仕事式に適用して、帯板要素に対する運動方程式を求めた。これらの局所座標系に関する各マトリクスを全体座標系に関する量に変換し、変位の適合条件と力のつり合い条件にしたがってすべての帯板要素について重ね合わせることにより、構造全体に対する運動方程式を以下のように誘導した。

$$[M]\{\ddot{d}\} + [C]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = \{f\} \quad (3)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ は質量マトリクス、減衰マトリクス、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す。また、 $\{\ddot{d}\}$ 、 $\{\dot{d}\}$ は節線加速度ベクトルおよび節線速度ベクトルを表す。

節線変位ベクトル $\{d\}$ は、部材軸方向に進行する正弦波であるとすれば、その振幅を $\{d_0\}$ 、振動数を f 、波数を k 、時間を t として、次式で表すことができる。

$$\{d\}=\{d_0\}\sin 2 \pi(k x-f t) \quad(4)$$

その位相速度 c_p は次式で表される。

$$c_p=\frac{f}{k} \quad(5)$$

位相速度 c_p は、半波長を l とすれば式(3)より、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。

$$\det \left[[K]-\left(\frac{\pi}{l} c_p\right)^2[M]\right]=0 \quad(6)$$

また、群速度 c_g は、位相速度 c_p と半波長 l を用いて次式で求められる¹⁰⁾。

$$c_g=c_p-l \frac{d c_p}{d l} \quad(7)$$

モード解析法における採用モード次数は、応答量の収束について検討を行い、部材軸方向モードを100次までとし、各部材軸方向モードについて10次までの断面変形モードを採用した。応答計算における時間積分は、ニューマークの β 法($\beta=0.25$)を用いて行い、減衰は全てのモードについて一定であるとして、モード減衰定数0.01を仮定した。

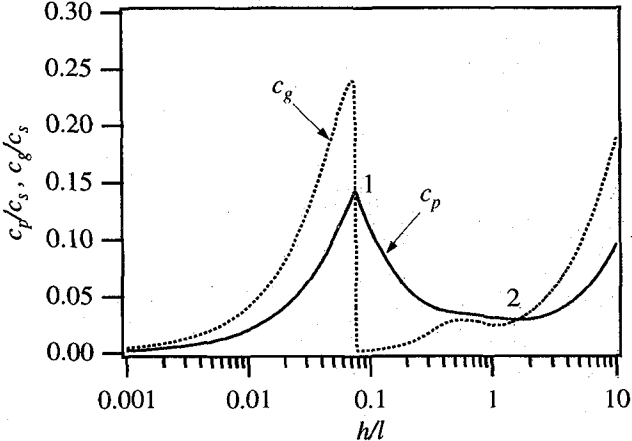
帯板要素への要素分割は、上下フランジをそれぞれ10要素、ウェブを11要素に分割し、水平補剛材は帯板要素一要素で置き換えた。

4. 局部振動波の伝播特性

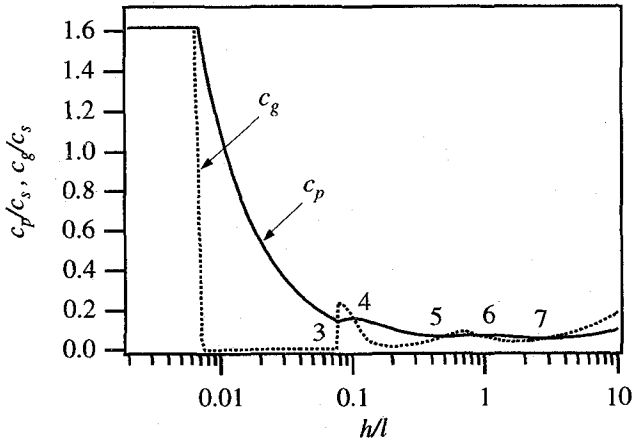
図-1に示した断面の無限長のはりについて、断面変形が左右対称な場合の位相速度分散曲線、群速度分散曲線および断面変形モードを求め、波動伝播特性について検討を行った。

図-4に第1次、第2次位相速度分散曲線および群速度分散曲線を示す。縦軸は位相速度 c_p および群速度 c_g をせん断波速度 $c_s(=\sqrt{G / \rho}=3176 \mathrm{m} / \mathrm{s}, G$:せん断弾性定数、 ρ :単位質量)で無次元化したものであり、横軸は半波長 l に対する桁高 h の比 h / l を対数目盛で示している。実線が位相速度分散曲線、点線が群速度分散曲線であり、それぞれ c_p 、 c_g で表している。なお、図中の番号は、位相速度分散曲線と群速度分散曲線の交点につけたものであり、これらの交点における位相速度、半波長、および振動数を表-1に示している。

第1次位相速度分散曲線は、 h / l の増大に伴って $c_p \cong 0$ から増加し、 $h / l=0.077$ 付近で極大値を示した後に減少して再



(a) 第1次波動



(b) 第2次波動

図-4 位相速度・群速度分散曲線

表-1 交点の位相速度、半波長、振動数

	1	2	3	4	5	6	7
c_p (km/h)	1635.0	331.4	1642.7	1814.6	708.2	798.6	606.1
l (m)	33.68	1.61	33.68	26.00	5.31	2.95	0.91
f (Hz)	6.7	28.6	6.7	9.7	18.5	37.6	92.5

び増大している。第2次位相速度分散曲線は、 $h / l<0.007$ で棒の縦振動の位相速度を示している。その後、 h / l の増大に伴って減少し、 $h / l=0.077$ 付近で極小値を取った後、増加と減少を繰り返して、 $h / l>3$ で増加している。

群速度分散曲線は、(7)式からも明らかであるが、位相速度分散曲線の極大点および極小点で位相速度分散曲線と交差し、 h / l の値によって位相速度との大小関係が変化している。第1次群速度分散曲線は、 $h / l<0.077$ および $h / l>1.61$ の範囲で第1次位相速度分散曲線よりも大きな値を示している。第2次群速度分散曲線は、 $h / l<0.007$ では第2次位相速度分散曲線と一致し、 $h / l>2.86$ の範囲で第2次位相速度分散曲線よりも大きな値を示している。

通常、観測される波は様々な波長の正弦波が重なり合った波の群であり、その伝播特性は波の群を構成する純粋な正弦波（以下、正弦波と言う）の波長と位相速度によって異なる。観測している波が位相速度の異なる正弦波で構成

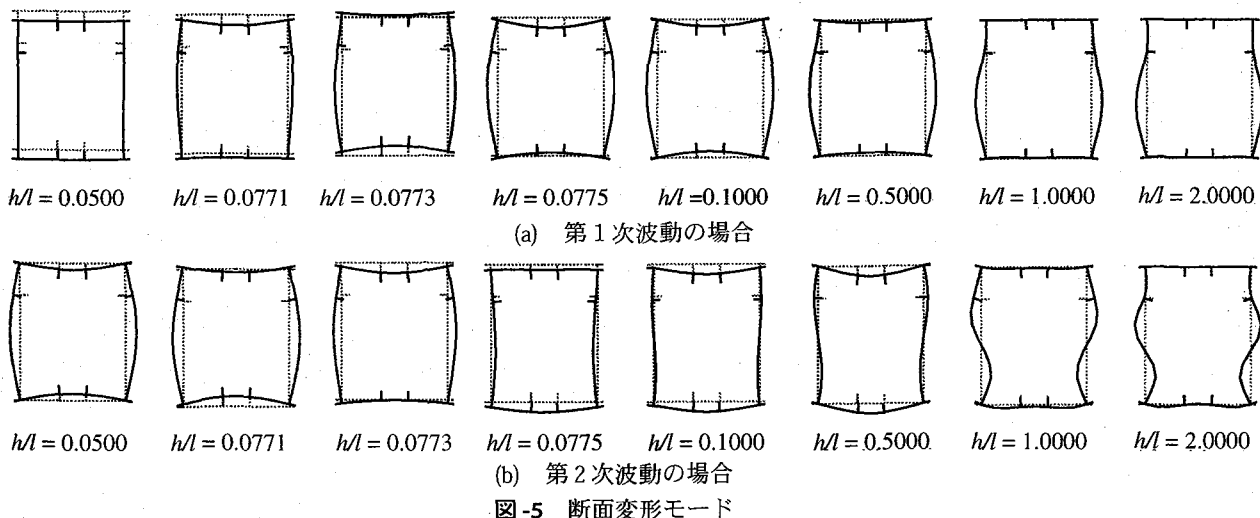


図-5 断面変形モード

される場合には、各正弦波は異なった速度で伝播するので、波の群は時間とともにその形状が変化する。これに対して、位相速度が同じ正弦波で構成される場合には、各正弦波は分散しないので、波の群はその形状を維持したまま正弦波と同じ速度で伝播する。

表-1より、位相速度分散曲線と群速度分散曲線の交点における振動数は、波長が短くなるのに伴って大きくなる傾向にあることがわかる。交点1, 3, 4を除いた交点は半波長10m以下、振動数18Hz以上の短波長・高周波領域で生じており、その中で位相速度が最も小さいのは交点2であり、その値は331.4km/hである。

図-5は、これらの位相速度分散曲線における断面変形モードを示したものである。断面変形の対称性¹⁾から、 $h/l \leq 0.0771$ の範囲では、第1次波動は桁の曲げ振動に、第2次波動は桁の縦振動に支配され、 $h/l \geq 0.0773$ になると、第1次波動と第2次波動のモード形状が入れ替わっていることがわかる。また、第1次波動の $h/l=0.05$ 以外のモードは、フランジやウェブの面外曲げ変形が生じているが、 h/l が大きくなると、水平補剛材と下フランジの間のウェブに大きな面外曲げ変形が現れている。これより、波長が短くなると水平補剛材の影響が現れて、フランジやウェブの薄板要素全体の面外曲げ波動から、水平補剛材で区切られた薄板要素の一部分の面外曲げ波動に支配されるようになることがわかる。

図-6に、水平補剛材の有無による鋼箱桁の第1次、第2次位相速度分散曲線の比較を示す。実線は水平補剛材がある場合、点線は水平補剛材が無い場合の位相速度分散曲線を表す。

第1次、第2次位相速度分散曲線は、水平補剛材が無い場合には $h/l \approx 0.077$ で接するが、水平補剛材がある場合には接していない。これは、水平補剛材を有する鋼箱桁では、水平補剛材の存在によって、断面の2軸対称性が失われるためと考えられる。また、水平補剛材の有無による違いは、 h/l が第1次、第2次位相速度分散曲線の接点より小さい場合にはほとんど生じていないが、 h/l が大きくなると顕著に

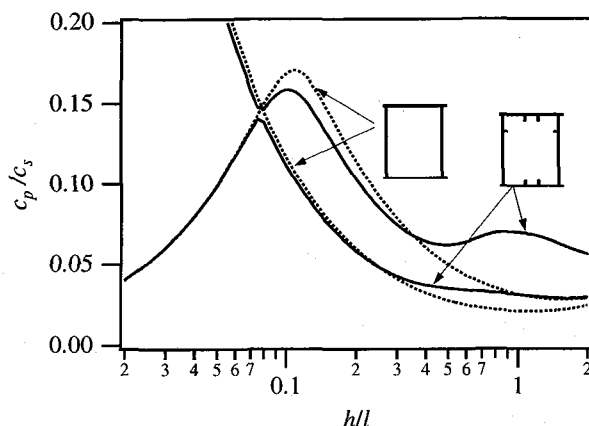


図-6 補剛材の有無による位相速度分散曲線の比較

現れ、特に、第2次位相速度分散曲線で大きくなっている。これらの差は、短波長領域の波動は局部振動が支配的となるために、水平補剛材の影響が現れたものと考えられる。また、第2次波動は高次の断面変形が生じることから断面内における波長が短くなり、水平補剛材の影響がより大きく現れたものと考えられる。

5. 移動荷重による局部振動特性

5.1 荷重速度による時刻歴応答の比較

図-1、図-2に示した鋼箱桁について、移動荷重が作用した場合の動的応答解析を行った。

図-7、図-8は、移動荷重の走行速度を変化させたときのスパン中央断面におけるウェブの面外方向振動加速度 a_w 、上フランジのたわみ d_{uf} 、ウェブの単位幅当たりの面外の曲げモーメント M_x 、 M_y について、応答の違いを比較したものである。横軸は時間 t であり、移動荷重が鋼箱桁全体を通過する時間 t_0 で無次元化して表している。また、荷重速度は、実際の車両速度を考慮して600km/h以下を対象としている。

図-7において、左縦軸はウェブの面外方向振動加速度 a_w であり、右縦軸は上フランジのたわみ量 d_{uf} を集中荷重がス

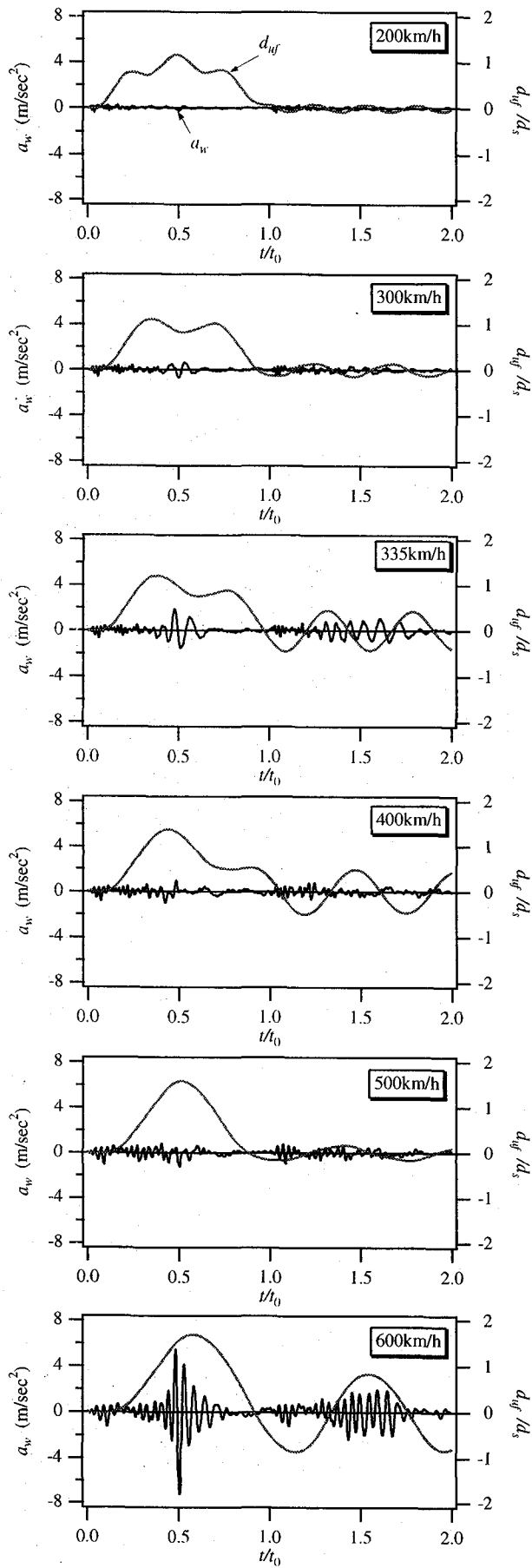


図-7 上フランジのたわみとウェブの振動加速度の
応答履歴 ($x=L/2$, t_0 : 車両の桁通過時間)

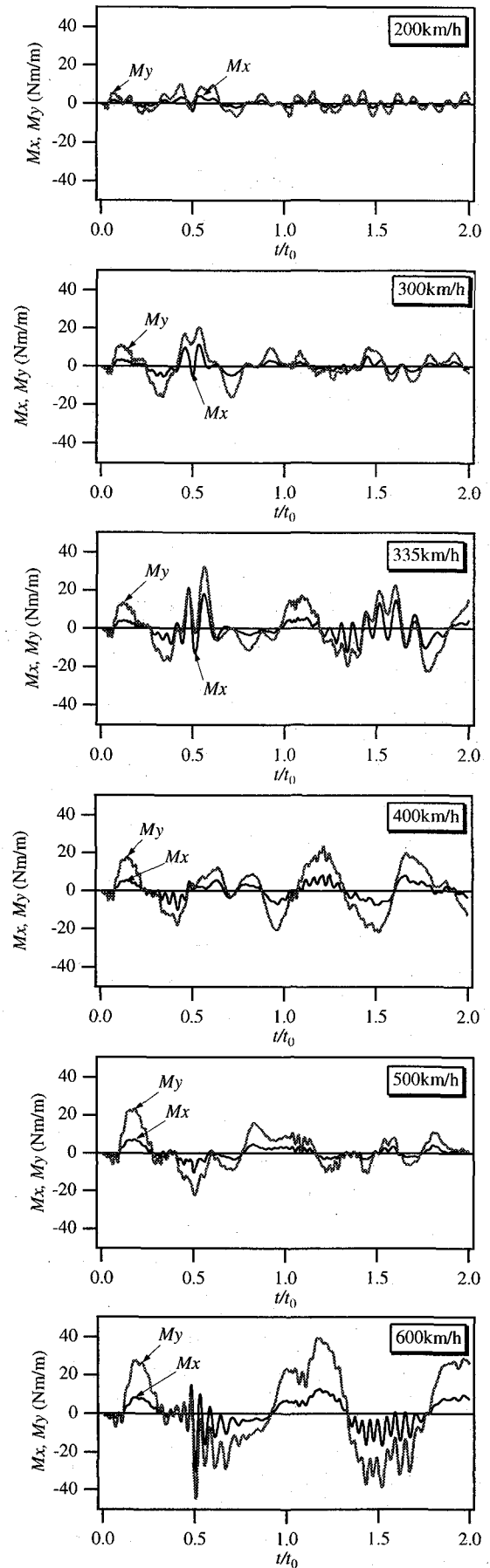
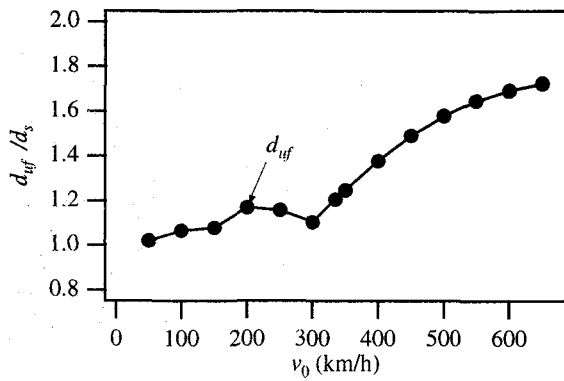
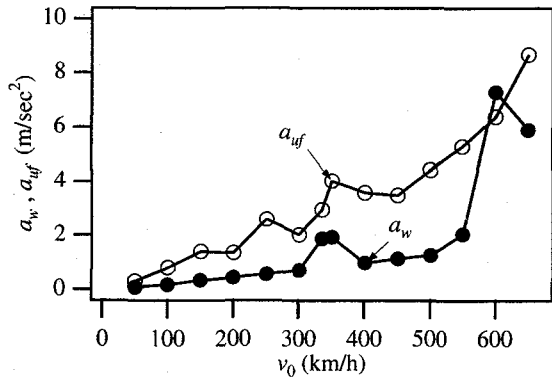


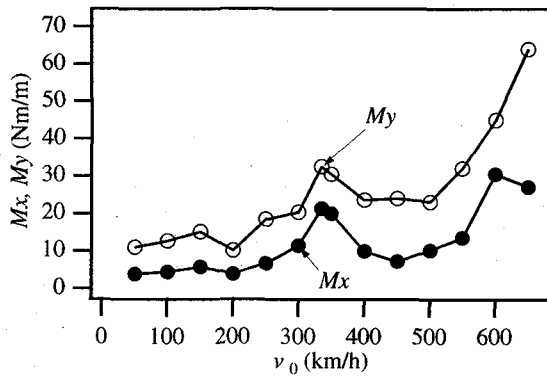
図-8 ウェブの曲げモーメントの応答履歴 ($x=L/2$)



(a) 上フランジのたわみ



(b) 上フランジ、ウェブの面外方向振動加速度



(c) ウェブの曲げモーメント

図-9 最大応答量と荷重速度の関係

パン中央断面に載荷されたときの同位置の静的たわみ量 d_s (=5.748mm)で無次元化して表している。

上フランジのたわみ応答は、桁全体のたわみ応答にほぼ一致し、その最大値は荷重速度が増加するのに伴って増大する傾向を示している。また、荷重速度335km/h、400km/h、および600km/hの時には、荷重が桁を通過した後の自由振動の振幅が大きくなっている。これは、桁の最低次固有周期が0.20secであり、荷重速度335、400、600km/hの時に荷重が桁を通過する時間が0.43、0.36、0.24secであることから、荷重の桁通過時間が桁の最低次固有周期の整数倍に近くなったことによって共振現象が生じ、振幅が大きくなったものと考えられる。

ウェブの面外方向振動加速度応答も、荷重速度が大き

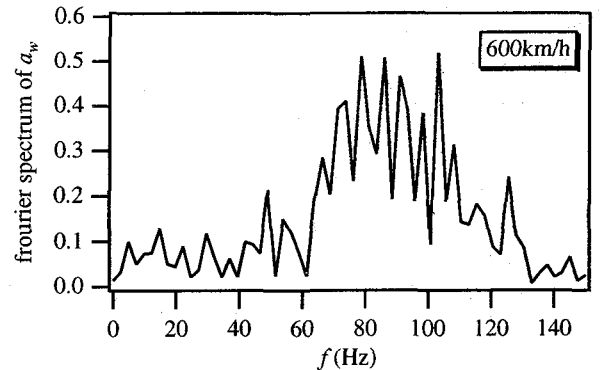
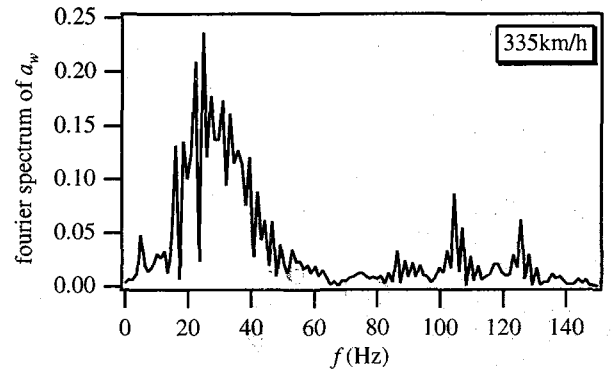


図-10 ウェブの面外方向振動加速度のFFTスペクトル

なるのに伴って増大する傾向を示している。しかし、荷重が着目断面を通過する際($t/t_0=0.5$)の加速度振幅は、荷重速度335km/hで一旦大きくなり、600km/hの時の振幅は更に大きなものとなっている。また、これらの荷重速度においては、荷重が鋼箱桁を通過した後も $t/t_0=1.5$ において振幅が大きくなっており、その他の荷重速度による応答とは異なった特徴を示している。

ウェブの面外の曲げモーメントにおいても(図-8)、荷重速度が大きくなるのに伴って応答振幅が増大する傾向が現れている。また、荷重速度が335km/hと600km/hの時には、図-7の加速度応答と同様に $t/t_0=0.5$ 、1.5において応答振幅が大きくなり、高周波成分の応答が現れている。

図-9は、移動荷重の走行速度を変化させたときのスパン中央断面における各応答量の最大値と荷重速度の関係を示したものである。図-9(a)は上フランジのたわみ d_{uf} 、図-9(b)は上フランジの上下方向振動加速度 a_{uf} とウェブの面外方向振動加速度 a_w 、図-9(c)はウェブの曲げモーメント M_x 、 M_y について荷重速度との関係を表している。

ウェブの面外方向振動加速度 a_w とウェブの面外の曲げモーメント M_x は荷重速度335km/hと600km/hの時に顕著な増大を示し、ウェブの面外方向振動加速度は上フランジの上下方向振動加速度と同レベルの値となっている。上フランジのたわみは、荷重速度300km/h以下では荷重速度による大きな違いは生じていないが、300km/h以上になると荷重速度が大きくなるのに伴って増大している。上フランジの上下方向振動加速度とウェブの面外の曲げモーメント M_y は、上フランジのたわみと同様の傾向を示すとともに荷重速度335km/hの時には応答量の増大を示している。これら

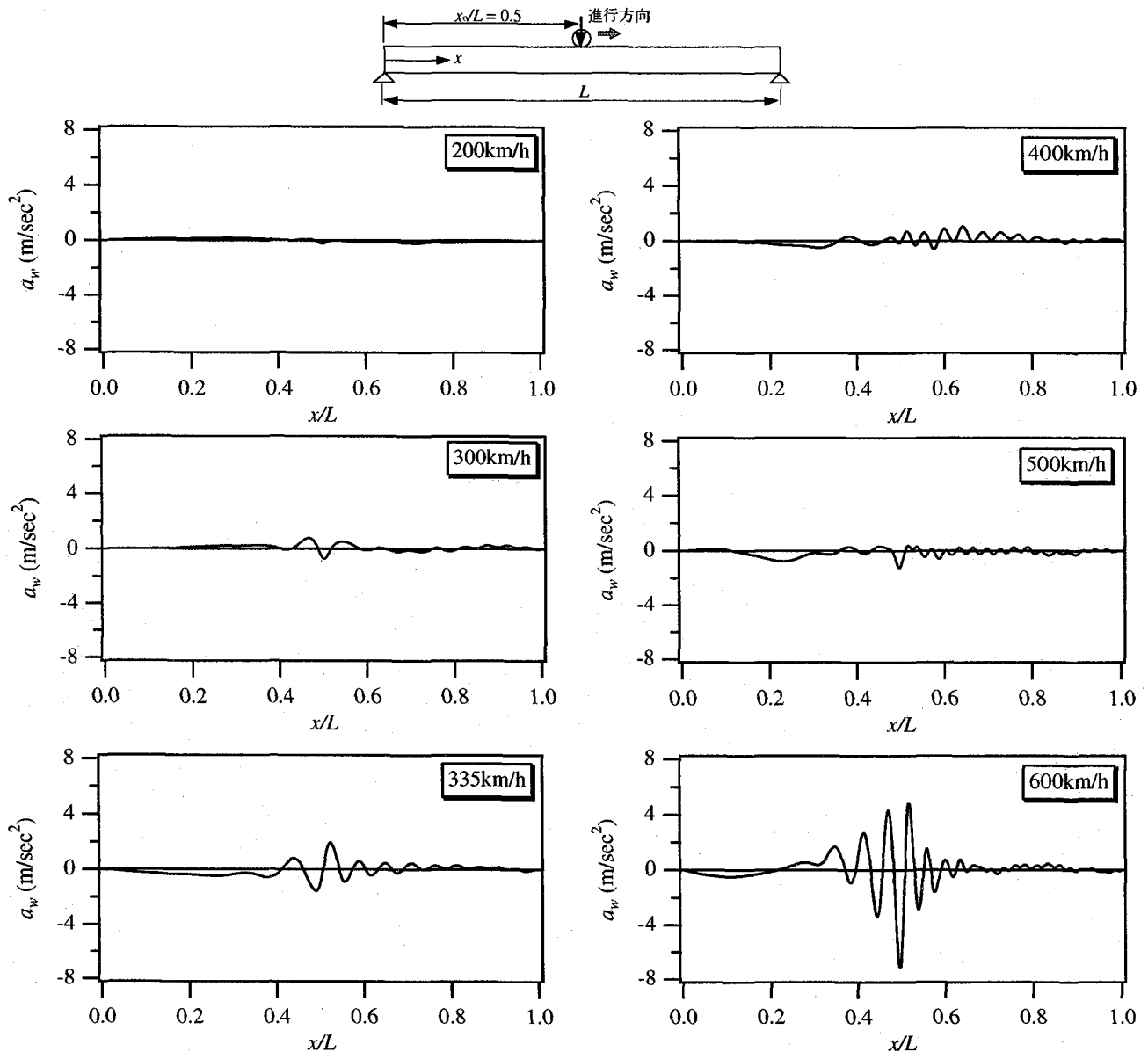


図-11 ウェブの面外方向振動加速度の分布 ($x_0=L/2$)

の荷重速度は、図-4、表-1に示した位相速度分散曲線と群速度分散曲線の交点2、7における速度にほぼ対応しており、荷重速度が位相速度分散曲線と群速度分散曲線の交点の速度に近づく、ウェブの面外振動の振幅が増大することがわかる。

図-10は、荷重速度335km/hおよび600km/hの時のスパン中央断面におけるウェブの面外方向振動加速度応答波形のスペクトルを示したものである。荷重速度335km/hの場合でスペクトル振幅が最も大きいのは25Hz付近であり、表-1に示した交点2における振動数28Hzに近い値となっている。なお、その他の卓越振動数は、固有振動数との比較により、部材軸方向モード次数が10以下のモードの固有振動数に対応しており、部材軸方向モード次数は異なるが断面変形モード次数が同じモードの固有振動数にほぼ一致していることがわかった。また、荷重速度600km/hの場合の卓越振動数は90Hz付近に生じており、表-1の交点7

における振動数92.5Hzに近い値となっている。その他の卓越振動数は、あまり明確ではないが、荷重速度335km/hの場合とほぼ同様の振動数が卓越した結果となっている。

これらの応答量と荷重速度の関係について、杉本ら⁹⁾による実橋の測定結果と比較・検討を行った。杉本らは、桁のたわみは荷重速度が270km/hを超えると増加するがその程度はわずかであること、ウェブの面外方向振動加速度は荷重速度が270km/hを超えると急激に増加し、下フランジの上下方向振動加速度よりも荷重速度の影響を強く受けること、等を示している。

本研究では、一車軸分の移動集中荷重を作用させているので、応答量について杉本らの結果と比較することはできないが、ウェブの面外方向加速度は荷重速度が300km/hを超えると急激に増加している(図-9(b))。応答振幅が増大する荷重速度は杉本らの値と10%程度の差があるが、応答量と荷重速度の関係は杉本らと同様の傾向を示している。

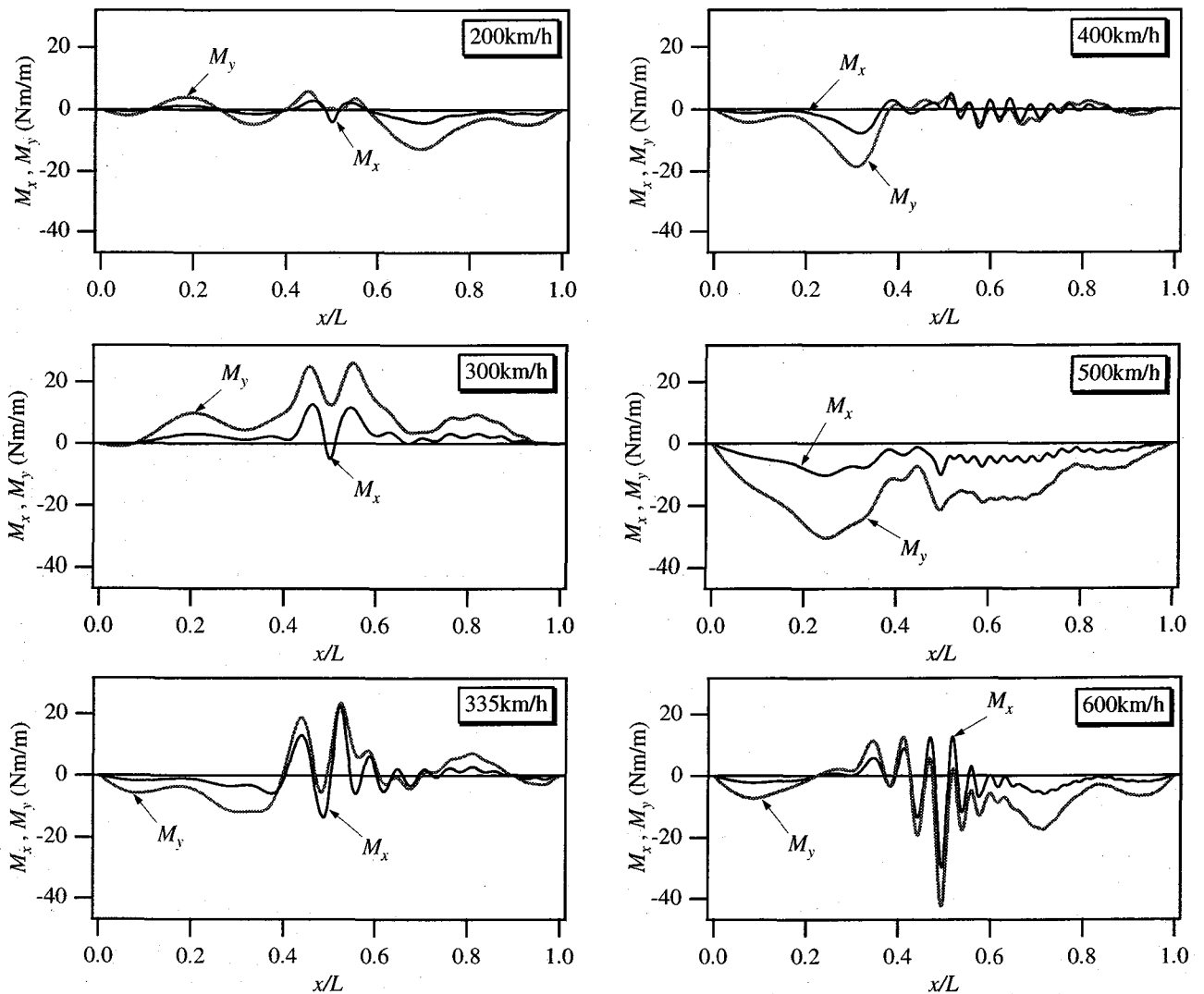


図-12 ウェブの曲げモーメントの分布 ($x_0=L/2$)

これより、車両速度の変化に伴うウェブの面外方向振動加速度の急激な増大は、列車の規則的な車軸配置による桁の共振現象だけでなく、桁の局部振動を考慮した波動伝播特性にも起因することが明らかになった。

そこで、本研究では、以後、これらの位相速度分散曲線と群速度分散曲線の交点の速度を臨界速度と表現することとし、荷重速度が臨界速度に近づいたときの局部振動挙動について詳細な検討を行った。

5.2 ウェブにおける局部振動の分布と伝播

図-11は、荷重がスパン中央断面を通過するときのウェブの面外方向振動加速度の分布について、荷重速度による違いを比較したものである。縦軸は振動加速度 a_w 、横軸は着目断面位置 x をスパン L で無次元化して表したものであり、 $x/L < 0.5$ が荷重後方、 $x/L > 0.5$ が荷重前方である。

荷重速度300km/h以下では、荷重付近のみにわずかな応答が生じている。荷重速度が335km/h以上になると、桁全体に応答が分布し、荷重速度が臨界速度に近い335km/h、600km/hの場合には荷重点近傍に大きな振幅の応答が生じ

ている。

この理由は、4.に示した波動伝播特性より、次のように考えることができる。移動荷重によって、桁には適当な位相関係を持った無数の正弦波が生じ、これらの正弦波は重なり合って荷重が作用する領域で互いに強め合う波の群となる。波の群を構成する正弦波は、時間の経過に伴ってそれぞれの位相速度で伝播し、荷重の移動によって新たに発生した正弦波と重なり合う。そして、荷重速度が臨界速度に一致した場合に生じる正弦波は波長によって位相速度がほとんど変化しないので分散性を示さず、波の群はその形状を保ったまま荷重速度で移動する。さらに、波のエネルギーは群速度で伝達するので桁全体に分散せずに荷重点付近に集中し、その周辺における加速度応答の振幅が大きくなる。一方、荷重速度が臨界速度と一致しない場合に生じる正弦波は波長によって位相速度が異なるので分散し、加速度応答の分布は一部分に集中せずに桁全体に生じる。

また、図-11では、荷重速度が335km/hを超えると、分布状態は荷重の前後で異なり、荷重の前方では波長の短

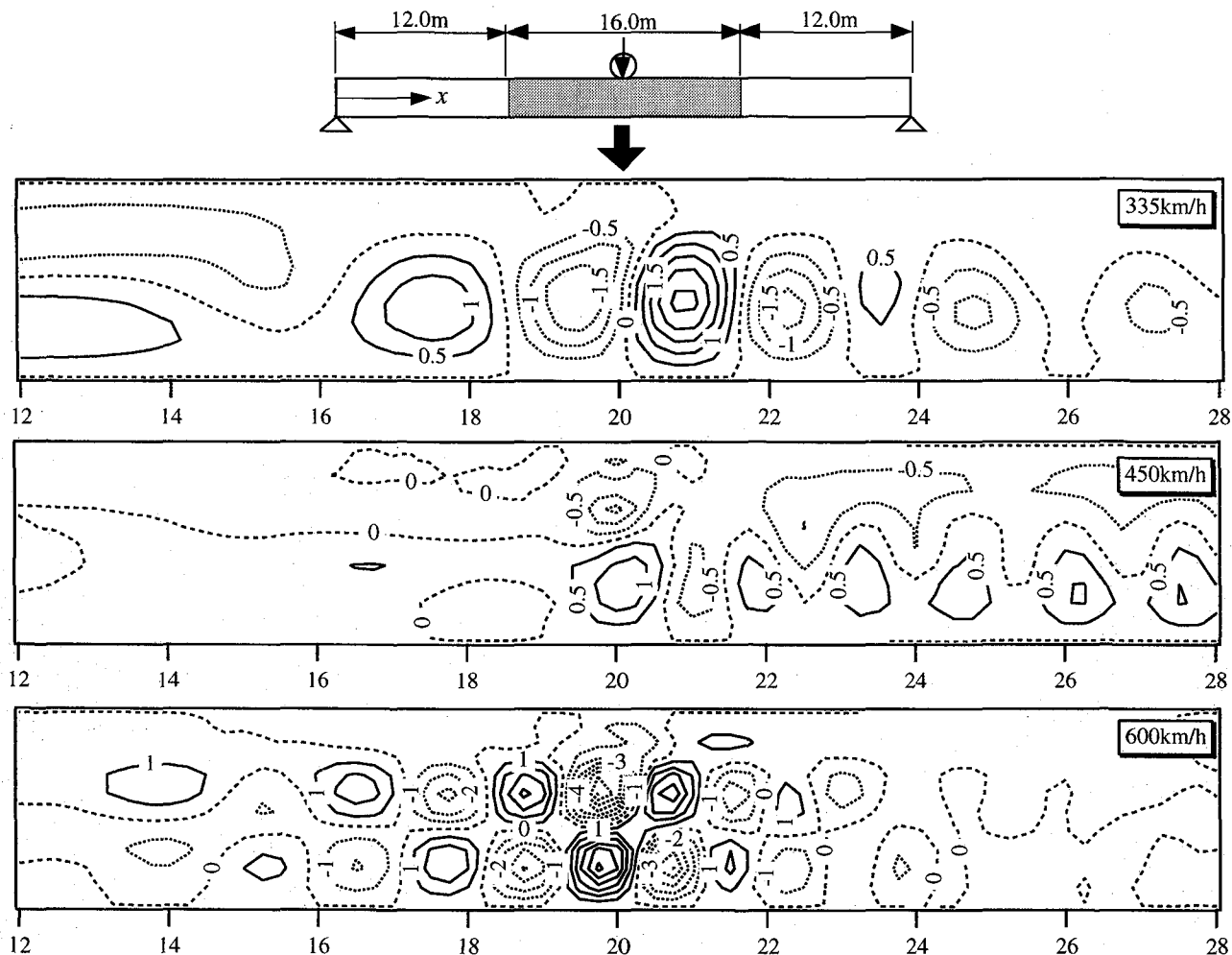


図-13 ウェブの面外方向振動加速度の等高線表示 ($x_0=L/2$, 単位: m/sec^2)

い正弦波のような応答が生じているのに対して、荷重の後方では波長の長い応答となっている。さらに、荷重前方の波数は荷重速度が大きくなるのに伴って短くなっているのがわかる。

このような高速移動荷重の前後における応答分布の違いは、図-4において臨界速度における波長を境に位相速度と群速度の大小関係が変化することに起因するものと考えられる。すなわち、荷重速度が速くなって波長の短い正弦波が生じるようになると、群速度が荷重速度より速い波長の短い正弦波は荷重の前後に伝播するが、群速度が荷重速度よりも遅い波長の長い正弦波は荷重の前方に伝播せずに後方だけに伝播するために荷重の前後で応答分布に差が生じるものと考えられる。

図-12は、荷重がスパン中央断面を通過するときのウェブの面外の曲げモーメントの分布を示したものである。これらにおいても、335km/h以上になると荷重の前後における分布状態の違いが顕著に現れ、振動加速度と同様の傾向を示している。 M_x と M_y の分布を比較すると、応答量は M_y の方が大きい、 M_x の方が高周波成分の影響が顕著に現れている。また、荷重速度が400km/h、500km/hの場合には、 M_y において荷重後方の振幅が大きくなっている。

図-13は、荷重速度335、450、600km/hの場合について、荷重がスパン中央断面を通過するときのスパン中央断面付近のウェブにおける面外方向振動加速度の分布を等高線表示したものである。

水平補剛材より上のウェブにおける振動加速度はいずれの荷重速度でもほとんど零となっている。しかし、載荷点近傍の水平補剛材より下のウェブにおける振動加速度分布は、荷重速度335km/hでは桁高方向には1次、部材軸方向半波長は約1.6mのモード、600km/hでは桁高方向には2次、部材軸方向半波長は約1.0mのモードとなっており、それぞれ表-1に示した臨界速度331.4km/h、606.1km/hにおける振動モードにほぼ対応している。荷重速度450km/hでは、桁高方向の振動加速度分布状態より、第1次波動から第2次波動への移行状態にあることがわかる。また、荷重速度450km/hの場合には、荷重後方の振動加速度はほとんど零となっているが、荷重前方には同波長の波が分布しているのがわかる。

図-14は、荷重速度600km/hの場合について、荷重位置によるウェブの面外方向振動加速度の分布の変化を、時間間隔 $0.25t_0$ (t_0 : 荷重の桁通過時間)で示したものである。実線が正、点線が負の加速度を表し、 1m/sec^2 刻みの等高線で

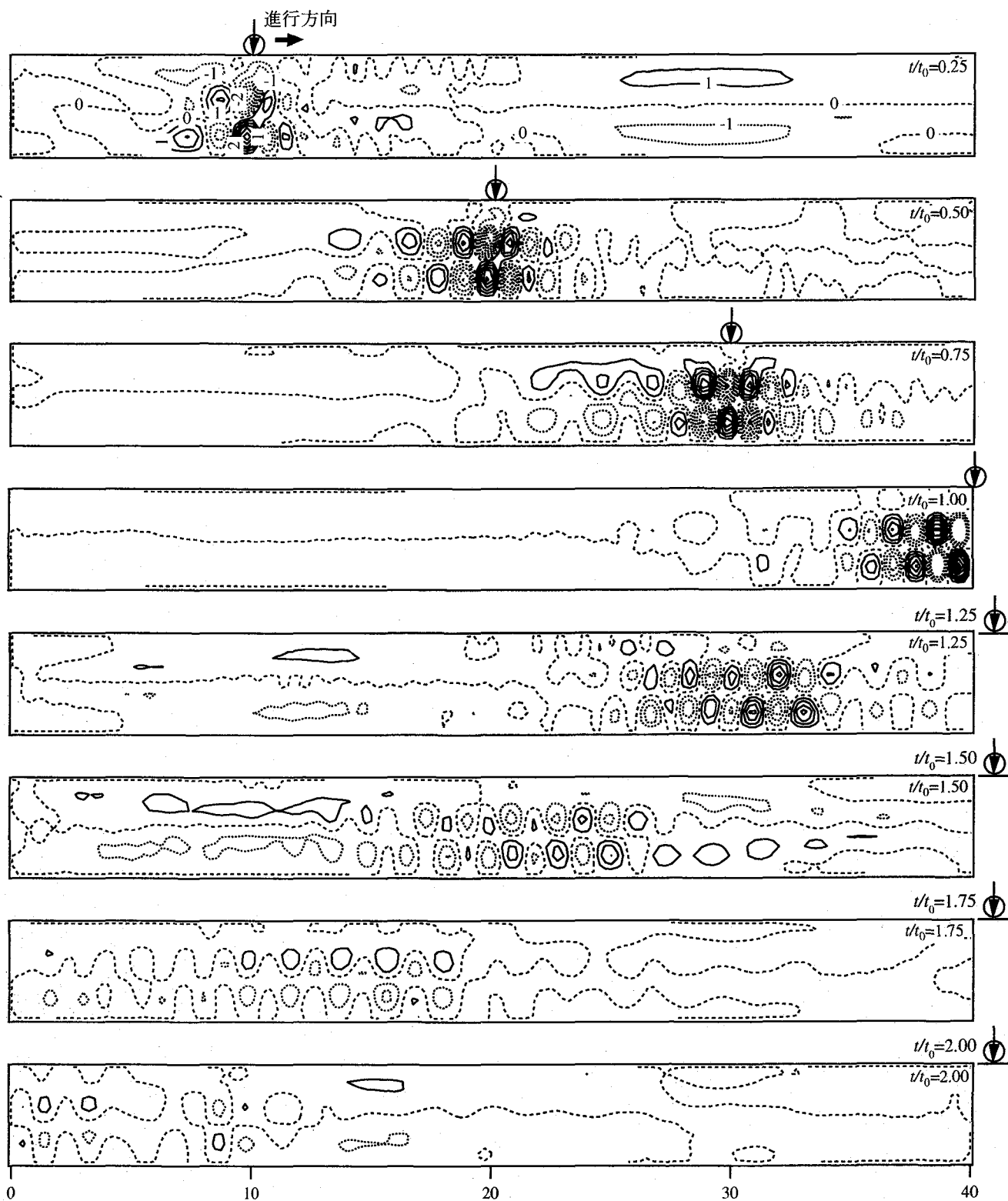


図-14 荷重移動によるウェブの面外方向振動加速度分布の変化 ($v_0=600\text{km/h}$, 等高線間隔 $=1\text{m/sec}^2$)

描いている。

荷重が鋼箱桁上を通過しているときには、荷重近傍に大きな振動加速度の波の群が生じ、荷重が移動してもその分布状態はほとんど変化していない。これらの波の群は、荷重が桁を通過した後も桁内に存在し、桁端で反射して荷重の進行方向とは反対方向にほぼ荷重速度で伝播し、時間の

経過に伴って振幅が減少するとともに部材軸方向に分散する様子を示している。

このような荷重通過後における波の群の挙動は、荷重速度が臨界速度に近づくときと顕著に現れ、その他の荷重速度では荷重が桁を通過した後の波の群は桁全体に分散してその位置も伝播方向も不明確なものとなった。これより、図-

7において、荷重速度335km/h、600km/hの時にウェブの面外方向振動加速度応答が荷重通過後にも増大したのは、このような波の群が着目断面を通過したためであることがわかる。

このように、荷重速度が臨界速度に近づくと荷重通過後も波の群がその状態を維持したまま荷重速度で桁内を伝播するという局部振動の挙動は、荷重速度が臨界速度に一致する時に発生する波は分散性を示さず、その形状を保ったまま荷重速度で移動する、という前述の波動伝播特性を裏付けている。

なお、本研究では中間補剛材は考慮していないが、中間補剛材を有する場合には、補剛材位置が局部振動の節となつて波長が固定され、振動モードが限定されることが予想される。したがって、臨界速度が小さい桁の場合には、位相速度分散曲線と群速度分散曲線の交点における半波長を考慮した中間補剛材の設計が必要となるものと考えられる。

6. まとめ

鋼箱桁について局部振動を対象とした波動伝播特性を把握するとともに、鋼箱桁に移動荷重が作用する場合の局部振動特性について荷重速度と桁の位相速度ならびに群速度との関連において検討を行った。

得られた成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 水平補剛材を有する鋼箱桁の波動伝播特性は波長によって異なり、第1次位相速度分散曲線は、波長が長い場合には桁の曲げ波動に支配され、波長が短くなると鋼箱桁を構成する薄板要素の面外曲げ波動に支配される。また、第2次位相速度分散曲線は、薄板要素の面外曲げ波動に支配され、波長が短くなると水平補剛材の影響が顕著に現れる。
- (2) 高速列車荷重が作用する鋼箱桁の動的挙動においては、局部振動の振幅が急激に増加する臨界速度が存在する。臨界速度は、局部振動波の位相速度分散曲線と群速度分散曲線の交点の速度である。
- (3) 荷重速度が臨界速度に近づくと、ウェブの面外方向振動加速度は載荷点近傍で顕著な増大を示し、荷重の前後における分布状態は異なる。このとき荷重点近傍に生じた波の群は、荷重が桁を通過した後も桁端で反射して荷重速度で桁内を逆方向に伝播する。
- (4) 荷重速度によるウェブの面外方向振動加速度の急激

な増加の要因としては、列車の規則的な車軸配置による桁の共振現象だけでなく、局部振動波の伝播特性の影響についても検討する必要がある。

本研究では、高速列車荷重による鋼箱桁の局部振動特性について、列車速度と局部振動の関係から明確にするため、列車荷重を一車軸に限定した集中移動荷重で置き換えて検討を行った。複数車両で編成された列車荷重を対象とした連行荷重が作用する場合には、鋼箱桁の局部振動への影響はより顕著に現れるものと考えられる。これらの影響については、稿を改めて報告する予定である。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説、鋼・合成構造物、pp.32-37、丸善、1998。
- 2) 松浦章夫：高速鉄道における橋桁の動的挙動に関する研究、土木学会論文報告集、第256号、pp.35-47、1976.12。
- 3) 涌井一、小林隆：高速鉄道におけるトラス橋部材の衝撃係数に関する理論的研究、鉄道技術研究報告、1982.7。
- 4) 竹森重英、平野尚、高橋安彦、稲熊弘：超高速走行列車による構造物の応答解析、平成8年度鉄道連合シンポジウム、pp.451-454、1997。
- 5) 涌井一、松本信之、松浦章夫、田辺誠：鉄道車両と線路構造物の連成応答解析法に関する研究、土木学会論文集、No.513/I-31、pp.129-138、1995.4。
- 6) 岸徳光：薄肉断面ばりの応力波の位相速度分散曲線とその応用に関する研究、北海道大学提出論文、pp.111-126、1977。
- 7) 白旗弘実、三木千壽、館石和雄：境界要素法による高速移動荷重列に対する橋桁の動的応答解析の試み、土木学会論文集、No.549/I-37、pp.107-114、1996.10。
- 8) 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、1997.3。
- 9) 岡村美好、深沢泰晴：鋼I形断面ばりの衝撃挙動に関する基礎的考察、構造工学論文集、Vol.40A、pp.749-758、1994.3。
- 10) Y. C. ファン：固体の力学/理論、培風館、pp.335-338、1981。
- 11) 能町純雄、角田与史雄、岸徳光：薄肉H形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.37-45、1975。

(1999年9月17日 受付)