

高速移動荷重によって鋼薄肉材構成板に生じる局部振動波の特性

Characteristics of Local Vibration Wave caused by High-speed Moving Loads
in Component Plates of Thin-walled Steel members

岡村 美好*, 深沢 泰晴**

Miyoshi OKAMURA and Yasuharu FUKASAWA

* 正会員 博士(工学) 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)

On the thin-walled steel members of railway bridges, it has been clarified by measuring the vibration of a railway bridge actually that local vibration of the members increases suddenly with speeding up of train. This paper aims to elucidate the mechanism of the sudden increase of the local vibration. Firstly, the phase velocity and group velocity of the local vibration in steel component plates of thin-walled steel members are computed. Secondly, the dynamic responses of the steel component plates under high speed moving loads are analyzed. The relation the local vibration with the speeding up of the moving loads are investigated on wave form, time histories, reflection and propagation of local vibration of the plates.

Key Word : steel component plate, high speed train, local vibration, wave propagation

1. はじめに

列車走行による鉄道橋の動的挙動については、松浦によるBernoulli-Eulerのはり理論と2軸ボギー車両を用いた連成振動解析¹⁾を基礎として、各種の拡張を行った研究^{2)~4)}が報告されている。これらの研究からは、列車の規則的な車軸間隔と列車速度から得られる荷重周期と桁の基本固有周期の関係がある条件を満たす場合には共振現象が生じること、共振時の応答倍率は列車速度の増加に伴って大きくなること、等が明らかになっている。

一方、近年の列車の高速化に伴って、鉄道橋を三次元有限要素や有限帯板要素でモデル化した解析^{5), 6)}や、境界要素法を用いた解析⁷⁾も行われるようになり、従来のはり理論による解析では解明できない局部振動問題についての検討も行われてきている。

鋼鉄道橋の局部振動問題に関しては、杉本ら⁸⁾が鋼箱桁の実橋測定を行い、高速走行下では水平方向の部材振動およびウェブの面外曲げ振動が生じること、ウェブの面外方向振動加速度は列車速度がある値より大きくなると急激に増大すること等を明らかにしている。また、岸⁹⁾は、1点集中移動荷重が作用する箱形ばりについて動的応答解析を行い、荷重の走行速度がは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。

著者らも、杉本らが示した、ウェブの面外方向振動加速度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鋼箱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ている⁹⁾。そして、列車速度が位相速度分散曲線の極値に一致すると桁の局部振動が急激に増加すること、また、そのときの列車速度は実測値とほぼ一致すること等を明らかにした。

しかし、この研究⁹⁾では、実際の鋼箱桁を対象としているために、局部振動は鋼箱桁を構成する板要素の複雑な連成振動となり、局部振動波の位相速度分散特性と移動荷重によって桁に生じる局部振動の関連について十分に解明できたとは言い難い。また、荷重も単一移動荷重を用いているために列車の規則的な車軸間隔による荷重周期の影響についても明らかにできていない。

そこで、本研究では、鋼薄肉材を構成する板要素についてさらに詳細な検討を行うことにより、桁の局部振動が特定の荷重速度で急激に増大するメカニズムについて、桁の位相速度分散特性との関連において解明することを試みた。

具体的には、2辺単純支持他辺自由の構成板要素について、その位相速度分散特性を明らかにするとともに、単一高速移動荷重および高速移動荷重列による動的応答解析を行って、その局部振動特性を明

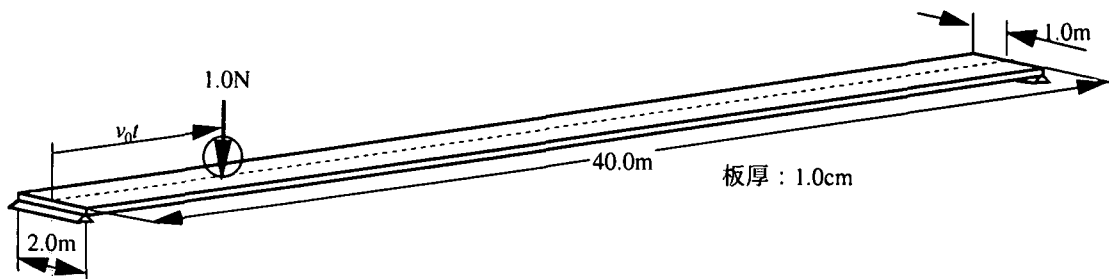


図-1 解析モデル

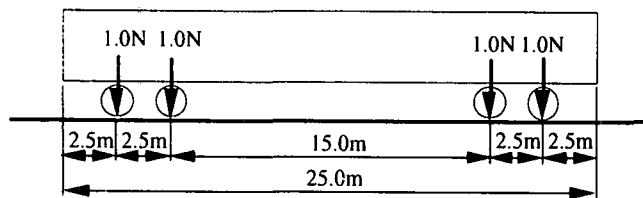
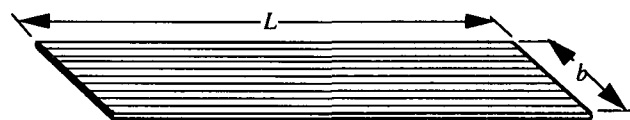
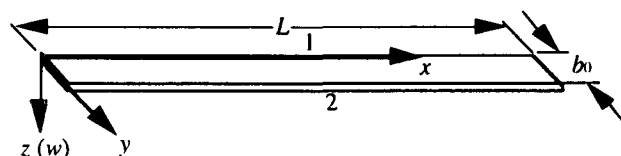


図-2 一車両分の連行荷重

らかにした。そして、これらの解析結果をもとに、高速移動荷重によって鋼薄肉材構成板に生じる局部振動特性とその位相速度分散特性の関連について検討を行った。



(a) 要素分割



(b) 帯板要素 \$i\$

図-3 有限帯板モデル

2. 解析モデルと解析方法

2.1 解析モデル

図-1に、解析モデルを示す。これは鋼薄肉材の構成板要素であり、支持条件は他の構成板要素との接合辺を自由とし、その他は単純支持とした。

鋼板の材料特性は、以下の値を用いた。

ヤング率	$E=206\text{GPa}$
ポアソン比	$\nu=0.3$
単位体積質量	$\rho=7850\text{kg/m}^3$
減衰定数	$h=0.0$

荷重は鋼板面に直角に作用する集中荷重で、鋼板の幅方向中央断面に沿って部材軸方向に移動する単一移動荷重と列車荷重を想定した移動荷重列の2種類について解析を行った。単一移動荷重の大きさは1.0N、移動荷重列は大きさ1.0Nの集中荷重を列車の車軸間隔と同じ間隔で配置した(図-2)。

2.2 解析方法

応答解析は、有限帯板法¹⁰⁾にモード解析法を適用して行った¹¹⁾。

図-3に鋼板の有限帯板モデルを示す。鋼板の幅方向について分割を行い、その一つを帯板要素*i*とする。帯板要素の変位場は、荷重が鋼板面に直角に作用することから、面外変形による変位成分のみを考慮して、帯板幅方向を多項式で、部材軸方向をFourier級数で近似した。帯板要素*i*の任意点の*z*軸方向の変位成分*w*は、両端単純支持を仮定して、次式を用いる。

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

ここに、 $\{ \}$ は列ベクトル、 $\langle \rangle$ は行ベクトルを表し、 $\{ W_m \}$ 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。節線1での第*m*項に対する*z*軸方向変位成分の振幅を $w_{1,m}$ 、*x*軸回りの回転角の振幅を $\theta_{1,m}$ とすれば、 $\{ W_m \}$ は次のように表される。

$$\{ W_m \} = \langle w_{1,m} \quad \theta_{1,m} \quad w_{2,m} \quad \theta_{2,m} \rangle^T \quad (2)$$

また、 $\langle N \rangle$ は帯板の面外変形に対する内挿関数であり、帯板要素の幅を b_0 、 $\eta=y/b_0$ とすれば、次のように表すことができる。

$$\langle N \rangle = \langle 1-3\eta^2+2\eta^3 \quad y(1-2\eta+\eta^2) \quad 3\eta^2-2\eta^3 \quad y(\eta^2-\eta) \rangle \quad (3)$$

式(1)の変位場を仮想仕事式に適用すれば、要素質量マトリクスおよび要素剛性マトリクスが求められる。これらをすべての帯板要素について重ね合わせることで、鋼板全体に対する運動方程式が次のように得られる。

$$[M]\{\ddot{d}\} + [K]\{d\} = \{F\} \quad (4)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[K]$ は質量マトリクス、剛性マトリクスであり、 $\{\ddot{d}\}$ 、 $\{d\}$ 、 $\{F\}$ は節線加速度ベクトル、節線変位ベクトル、節線外力ベクトルを表す。

節線変位ベクトル $\{d\}$ は、振幅 $\{d_0\}$ 、振動数*f*、波

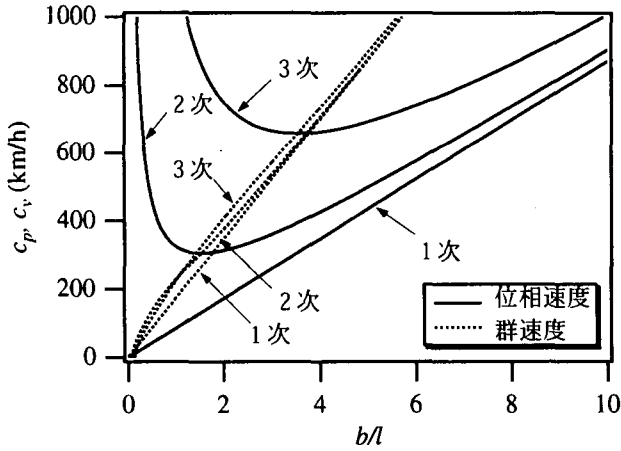


図-4 位相速度分散曲線および群速度分散曲線

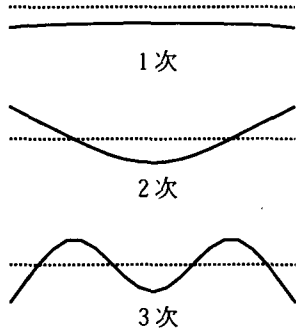


図-5 断面変形モード (\$b/l=1.0\$)

数 k で部材軸方向に進行する正弦波であるとすれば、次式で表すことができる。

$$\{d\} = \{d_0\} \sin 2\pi(kx - ft) \quad (5)$$

ここに、 t は時間を表す。その部材軸方向の位相速度 c_p は次式で表される。

$$c_p = \frac{f}{k} \quad (6)$$

位相速度 c_p は、部材軸方向に伝播する正弦波の半波長を l とすれば、式(4)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。

$$\det \left[[K] - \left(\frac{\pi}{l} c_p \right)^2 [M] \right] = 0 \quad (7)$$

また、部材軸方向の群速度 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¹²⁾。

$$c_g = c_p - l \frac{dc_p}{dl} \quad (8)$$

解析は、解析モデルおよび載荷状態が左右対称であることから、半分の断面について要素数10の帯板要素に分割して、対称条件を考慮して行った。

モード解析法における採用モード次数は、振動加速度応答に関して収束性の検討を行った結果、断面変形モードを8次まで、部材軸方向モードを250次ま

表-1 位相速度分散曲線における諸値

(a) 第1次位相速度分散曲線

b/l (l)	c_p (km/h)	f (Hz)
0.05 (40.0m)	4.18	0.0145
0.10 (20.0m)	8.37	0.0581
0.15 (13.3m)	12.6	0.131
0.20 (10.0m)	16.8	0.233
0.25 (8.0m)	21.0	0.364

(b) 第2次・第3次位相速度分散曲線の極小点

	c_p (km/h)	l (m)	f (Hz)
第2次位相速度	305.7	1.316	32.3
第3次位相速度	657.6	0.566	161.2

でとした。また、応答計算における時間積分は、ニューマークの β 法 ($\beta=0.25$) を用いて行った。

3. 局部振動波の位相速度

図-1に示した断面の無限長鋼板における部材軸方向の位相速度および群速度を、式(7)、(8)を用いて求めた。その結果を図-4に示す。縦軸は位相速度 c_p および群速度 c_g であり、横軸は部材軸方向半波長 l に対する鋼板幅 b の比 b/l である。前述のとおり、本研究では断面変形が左右対称のモードのみを対象としているので、第1次～第3次位相速度分散曲線における断面変形モードは図-5のようになる。

第1次位相速度分散曲線は、 b/l の増加に伴って直線的に増大し、はりとしての曲げ波動の伝播特性を示している。これは、図-5において第1次位相速度分散曲線では断面変形がほとんど生じていないことからわかる。第2次・第3次位相速度分散曲線は、それぞれ $b/l=1.5, 3.5$ で極小値を取り、 b/l が大きくなると直線的に増加する傾向を示している。

第1次群速度分散曲線は、第1次位相速度分散曲線の2倍の傾きで、 b/l が増加するのに伴って直線的に増大する。第2次・第3次群速度分散曲線は、第1次群速度分散曲線とほぼ一致し、各位相速度分散曲線の極小点と交差している。これより、群速度は波動次数にはほとんど関係なくほぼ部材軸方向の波長のみで決まることがわかる。

図-4の第1次～第3次位相速度分散曲線から主要な点における位相速度、軸方向半波長、および振動数を求めると表-1のようになる。なお、これらの振動数は各波動モードに対応する固有振動数である。

表-1(a)は、第1次位相速度分散曲線において、部材軸方向半波長が $40.0\text{m}/n$ ($n=1, 2, \dots, 5$)の時の位相速度と振動数を求めたものである。これより、本

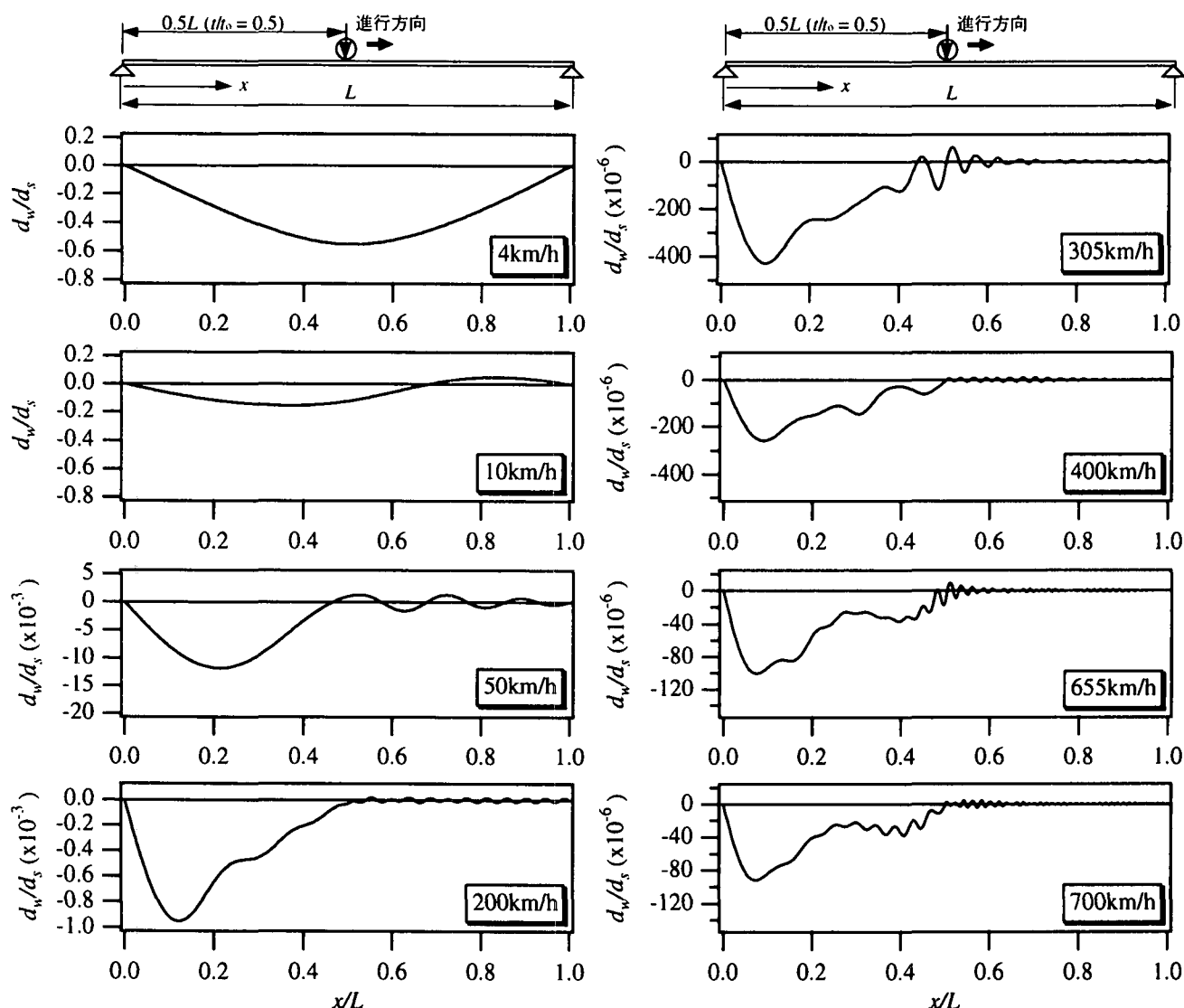


図-6 荷重速度による変位波形の比較 ($t/t_0=0.5$)

解析モデルの最小固有振動数は0.0145Hzであることがわかる。

表-1(b)は、第2次・第3次位相速度分散曲線の極小点における位相速度、軸方向半波長および固有振動数である。第2次・第3次位相速度分散曲線の極小位相速度は305.7、657.6km/hであり、著者らの先の研究⁹⁾によれば、移動荷重の速度がこれらの値に近づくとき、荷重点近傍の局部振動が顕著な増大を示すことが予測される。

4. 単一移動荷重による応答

4.1 局部振動波の波形

移動荷重による応答を波動伝播の観点から考察するために、移動荷重が鋼板中央点に位置する瞬間の鋼板幅方向中央断面における鉛直方向の変位 d_w 、振動速度 v_w 、および振動加速度 a_w の波形について、荷重速度を変化させて比較した。荷重速度は、第3次位相速度分散曲線の極小位相速度との関連まで検討

できるように、700km/h以下を対象とした。

荷重速度による変位波形の比較を図-6に示す。縦軸は変位応答量 d_w を鋼板中央断面の静的変位 d_s ($=0.03874\text{m}$) で無次元化し、横軸は部材軸方向の位置 x をスパン L で無次元化して表している。荷重速度の増加に伴って変位量は非常に小さくなるため、縦軸の数値は統一せずに各荷重速度毎に分布形状が把握しやすい値で表している。

荷重速度 4km/h では荷重の前後の変位波形はほぼ一致している。しかし、荷重速度が増加すると荷重の前後の変位波形は異なり、荷重後方では波長が長く、振幅も大きな変位波形を示すのに対して、荷重前方では振幅の小さい正弦波的な波形を示している。また、荷重速度 305、655km/h の場合には、荷重位置付近の振幅が大きくなっているが、これは荷重速度が第2次・第3次位相速度分散曲線の極小位相速度に近づいたことによるものである。

次に、荷重速度による振動速度波形の比較を図-7に示す。

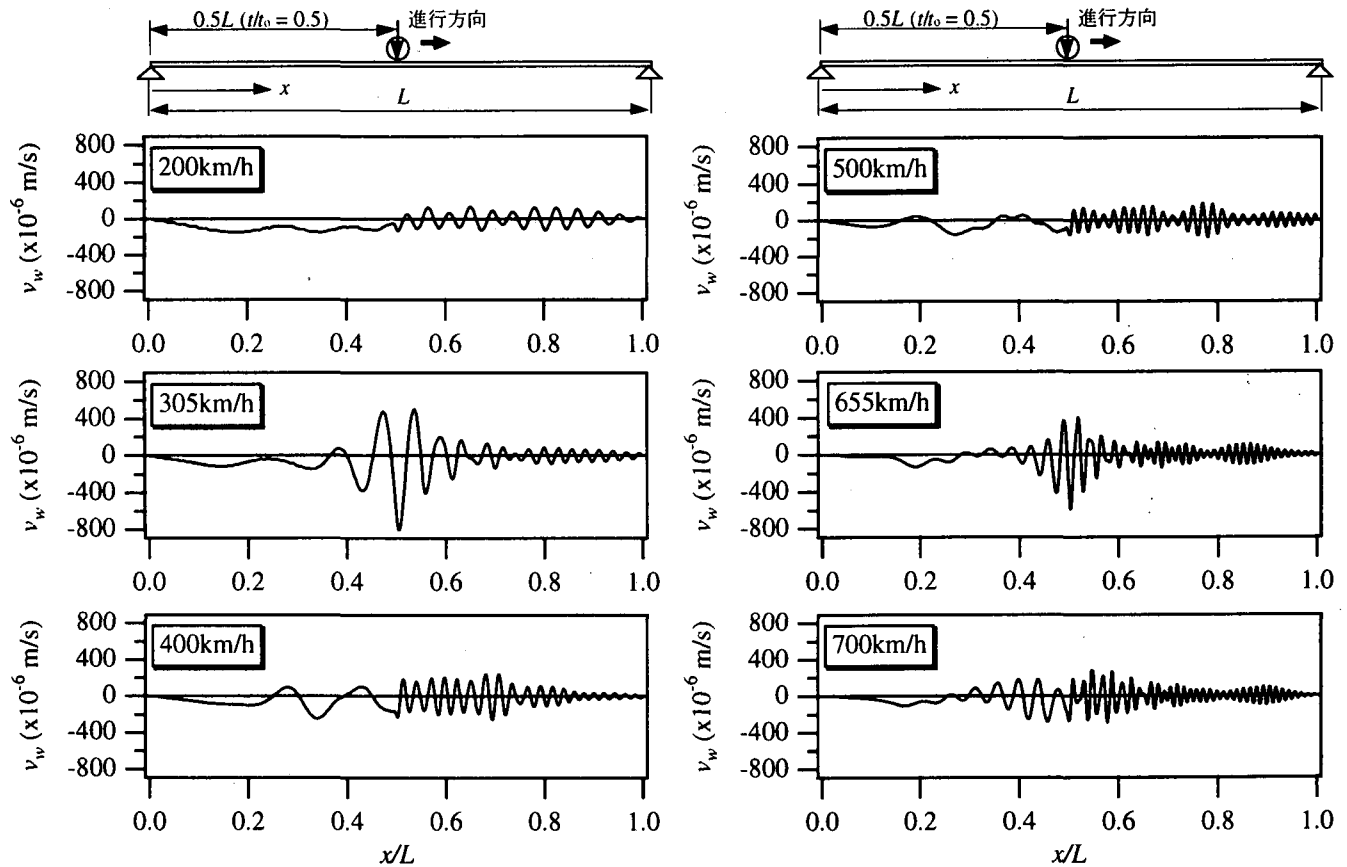


図-7 荷重速度による振動速度波形の比較 ($t/t_0=0.5$)

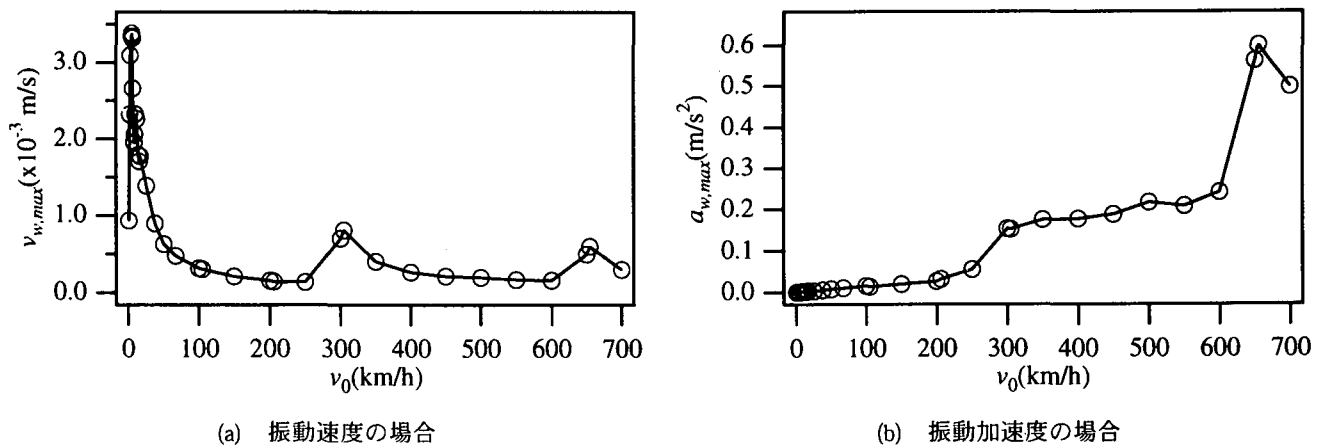


図-8 荷重が鋼板中央点に位置する瞬間の最大振幅と荷重速度の関係

いずれの荷重速度の場合でも荷重の前後で波長が異なり、荷重後方には波長の長い波が分布しているが、荷重前方の波の波長は短く、荷重から離れるほど短くなっている。荷重速度 305, 655km/h の時に応答振幅が増大する傾向は変位波形よりも顕著に現れている。また、荷重前方にはほぼ一定の波長が分布している荷重速度 200, 400, 500km/h の場合について、荷重前方の波の半波長と鋼板幅との比を求めると 2.4, 4.0, 5.0 となる。これらの値を図-4 と比較すると、第1次位相速度分散曲線の位相速度 200km/h の b/l は 2.3 であり、荷重速度 200km/h における荷重前方の波の半波長と鋼板幅との比にはほぼ一致している。

また、第2次位相速度分散曲線の位相速度 400, 500km/h の b/l はそれぞれ 0.64 と 3.6, 0.46 と 5.0 で、これらのうち大きい方の値 (3.6, 5.0) が荷重速度 400, 500km/h における荷重前方の波の半波長と鋼板幅との比にほぼ一致している。これより、移動荷重前方には荷重速度にほぼ一致した位相速度の波（ただし、同一位相速度の波長が複数ある場合には短い波長の波）が伝播することがわかる。

これらの移動荷重が部材中央断面に位置する瞬間の振動速度波形および振動加速度波形から最大振幅と荷重速度の関係を求めると図-8 のようになる。

振動速度の最大振幅は、荷重速度 4, 12, 305, 655km/h

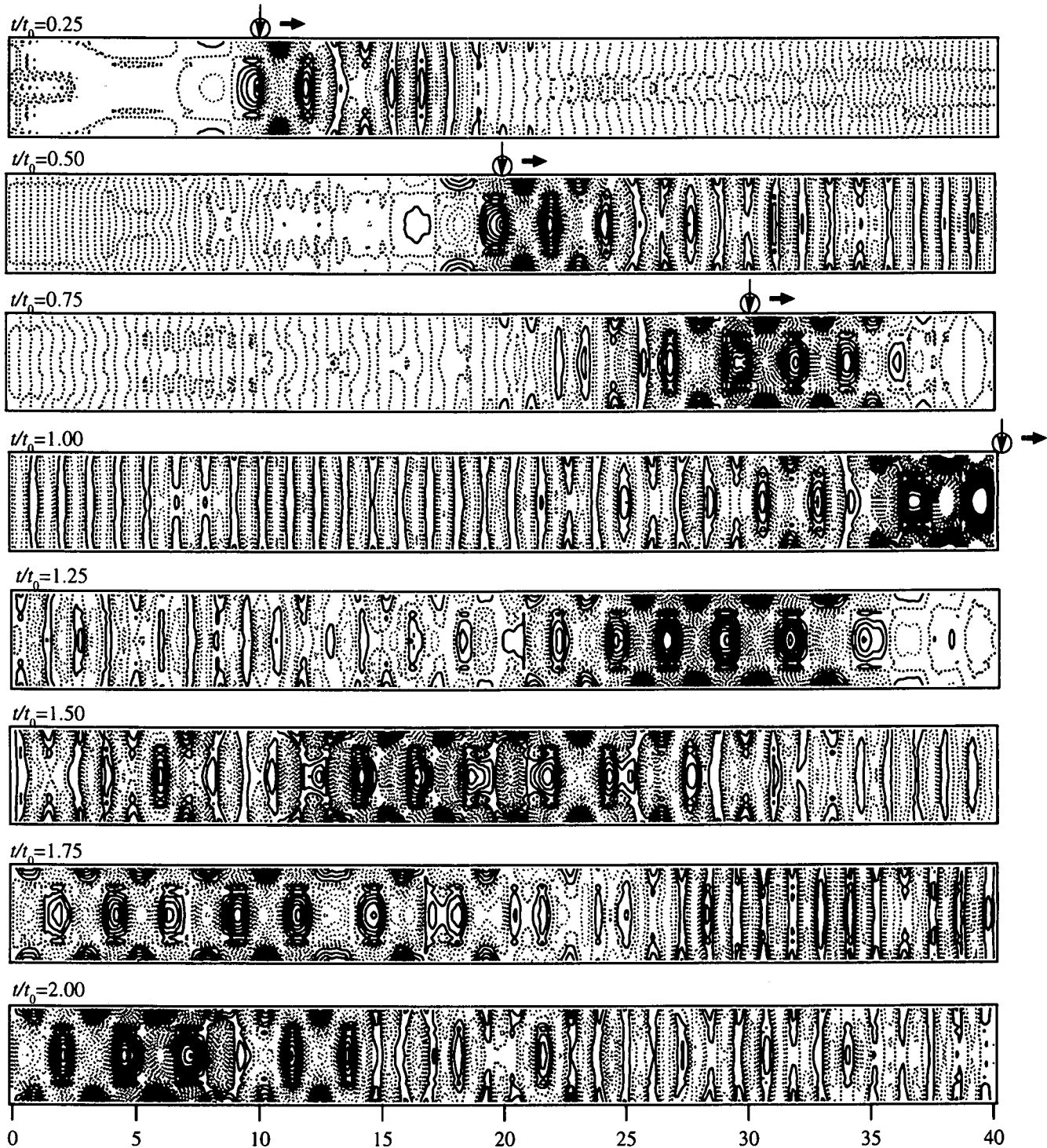


図-9 荷重進行による振動加速度波形の変化 ($v_0=305\text{km/h}$)

h 付近で大きくなり、荷重速度 4km/h のときの振幅が最も大きくなっている。振動加速度の最大振幅は、荷重速度が増加するのに伴って増大する傾向を示し、荷重速度 $305, 655\text{km/h}$ 付近で急激に増加している。荷重速度 $4, 12\text{km/h}$ 付近のピークは、断面変形モードが1次で軸方向モードが第1次、第3次の時の各位相速度に荷重速度が近づいたために生じた共振現象によるものであり、荷重速度 $305, 655\text{km/h}$ 付近の最大振幅の急激な増加は、第2次・第3次位相速度の極小値に荷重速度が近づいたことによって生じた共

振現象によるものと考えられる。

4.2 局部振動波の伝播と反射

ここでは、荷重の進行に伴う鋼板の鉛直方向振動加速度 a_v の波形の変化について検討を行った。

図-9は、荷重速度 305km/h の時の荷重の進行による振動加速度波形の変化を等高線表示したものである。図中の t/t_0 は、荷重が鋼板に進入してから時間 t と荷重が鋼板を通過するのに要する時間 t_0 の比であり、 $t/t_0=0.25$ 間隔で $t/t_0=2.0$ までの変化を示している。

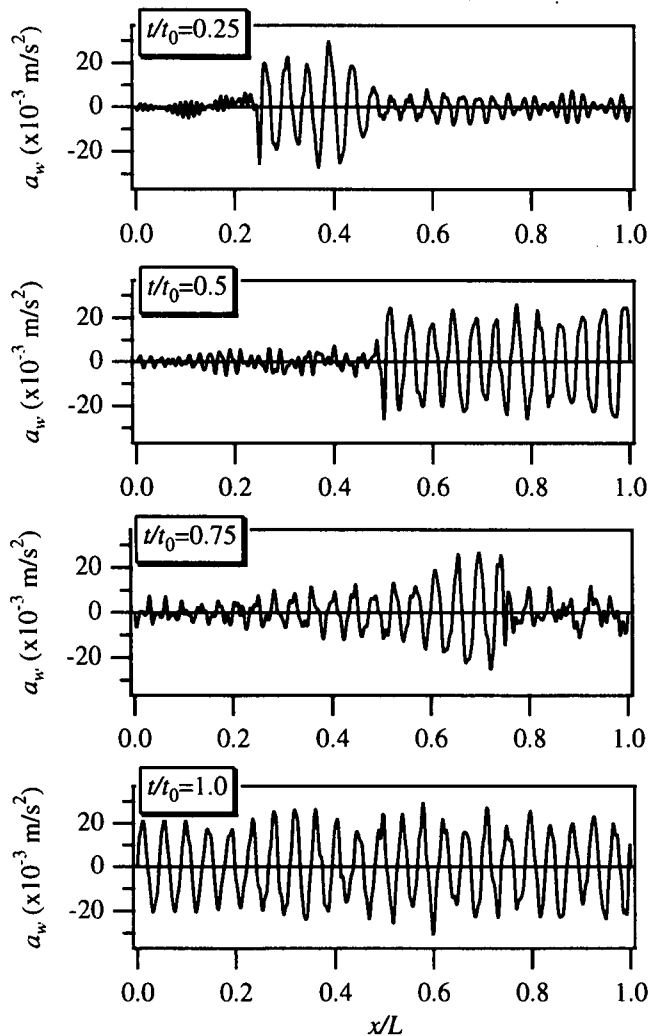


図-10 荷重の進行による振動加速度波形の変化
($v_0=200\text{km/h}$)

なお、等高線は 0.0001m/s^2 間隔で、実線が正の値を、点線が負の値を表し、下向きを正としている。

振幅の大きい波は、荷重が鋼板上にあるときには荷重近傍にだけ存在し、荷重と同じ速度で伝播していることがわかる。これらの波は、荷重通過後も鋼板内に存在し、鋼板右端で反射して荷重と反対方向に荷重と同じ速度で伝播する様子を表している。これは、荷重速度が位相速度分散曲線の極小値にほぼ一致する場合に生じる波は、群速度と位相速度が同じなので分散せずに荷重と一緒に伝播し、荷重が鋼板を通過した後も鋼板支持端で反射して荷重と反対方向にほぼ荷重と同じ速度で伝播することを表している。

このような振幅の大きい波群が荷重が鋼板を通過した後も鋼板内を反射・伝播する様子は、荷重速度 655km/h の時にも生じ、荷重速度が位相速度分散曲線の極小位相速度に近づいた場合に生じる分散性のない波群の大きな特徴である。

次に、荷重速度 200km/h の場合について、荷重の進行による鋼板幅方向中央断面における振動加速度波

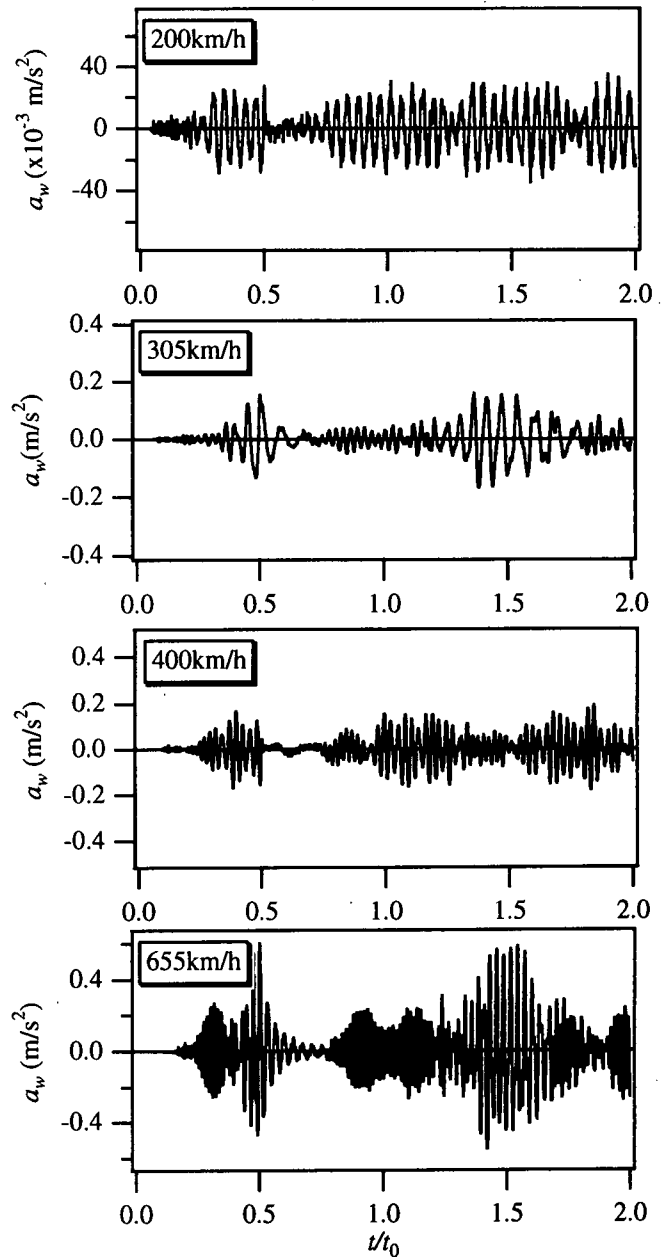


図-11 振動加速度時刻歴の荷重速度による比較
($x/L=0.5$)

形の変化を図-10に示す。

$t/t_0=0.25, 0.5$ では、荷重前方 $x/L=0.25 \sim 0.5$, $x/L=0.5 \sim 1.0$ の範囲で振幅が大きく正弦波に近い波形を示している。これらの平均半波長を図-10より求めると約 0.83m となり、図-4の第1次位相速度分散曲線における位相速度 200km/h の半波長とほぼ一致している。第1次群速度は第1次位相速度の2倍であることを考慮すると、これらの荷重前方の振幅の大きい波は群速度 400km/h の波群であると考えられる。

このことを考慮すると、 $t/t_0=0.75$ における荷重後方の振幅の大きい波は群速度 400km/h の波群が既に鋼板の右端で反射して荷重とは反対方向に伝播している状態であり、 $t/t_0=1.0$ の波形は鋼板右端で反射して荷重と反対方向に伝播した波群が鋼板左端に到達し

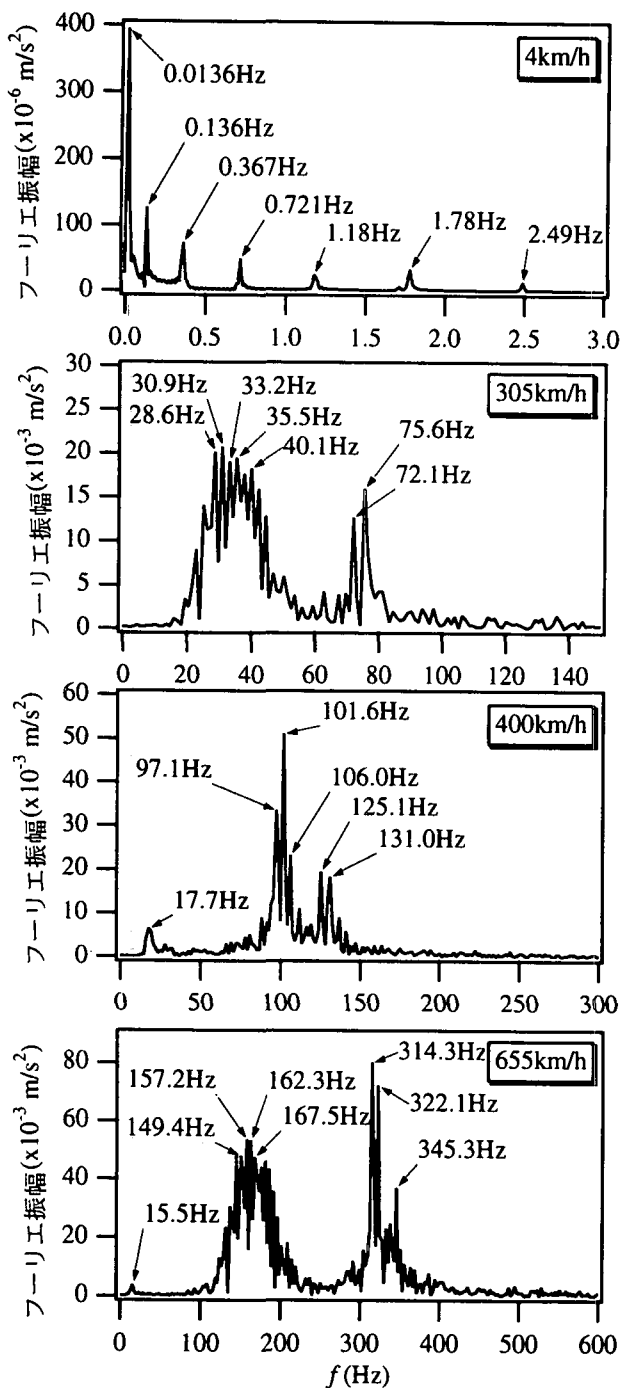


図-12 荷重速度による振動加速度時刻歴のフーリエスペクトルの比較 ($x/L=0.5$)

た状態であると推測される。

4.3 時刻歴応答

移動荷重による応答を振動の観点から考察するために、応答着目点を鋼板中央点に固定し、荷重速度による鉛直方向振動加速度 a_w の時刻歴の違いについて検討を行った。その結果の一例を図-11に示す。横軸の t/t_0 は、荷重が鋼板に進入してから時間 t と荷重が鋼板を通過するのに要する時間 t_0 の比を表している。

荷重速度 305, 655km/h の場合には、 $t/t_0=0.5, 1.5$ に

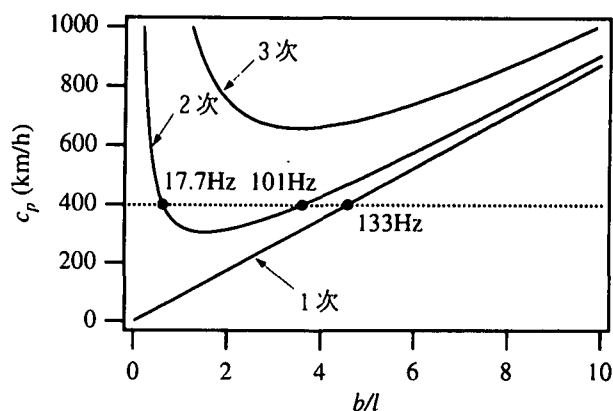


図-13 荷重速度と位相速度分散曲線における卓越振動数の関係 (荷重速度 400km/h の場合)

表-2 位相速度と固有振動数の関係

c_p (km/h)	次数	b/l	l (m)	f (Hz)
4.0	1	0.0478	41.8	0.0132
305.0	1	3.65	0.548	77.3
305.7	2	1.52	1.32	32.3
400.0	1	4.78	0.418	133
400.0	2	0.636	3.14	17.7
400.0	2	3.62	0.552	101
655.0	1	7.81	0.256	355
655.0	2	0.327	6.12	14.8
655.0	2	6.98	0.286	318
657.6	3	3.53	0.566	161.2

おいて大きな振幅を示している。これは、4.2で示したように、荷重速度が極小位相速度にほぼ一致した場合に生じる波には分散性がないために荷重通過後もその波群としての特性を維持することによる。また、荷重速度 200, 400km/h の場合は、 $0.25 < t/t_0 < 0.5$ と $t/t_0 > 0.75$ の範囲で周期と振幅が大きく、荷重が鋼板を通過した後の周期に大きな変化は見られない。これは、応答着目点には伝播速度が速い (周期が短い) 波から順次到達すること、また、荷重速度が極小位相速度とは異なる場合には荷重通過後の波は分散して低次モードの振動に移行していくことを表している。

図-12は、これらの振動加速度応答履歴において時間領域 $t/t_0 < 2$ を対象に 2 の累乗のデータ数についてフーリエスペクトルを求めたものである。

また、これらの卓越振動数と比較するために、鋼板の位相速度分散曲線より各荷重速度と同じ位相速度に対応した固有振動数を求める (図-13参照) と表-2 のようになる。

荷重速度 4km/h の場合、フーリエ振幅は鋼板の最小固有振動数とほぼ一致した振動数で最も大きくなっている。その他の卓越振動数は、表-1(a)と表-2より、断面変形モード次数が 1 で、軸方向モード次数が奇数のモードの振動数に対応していることがわ

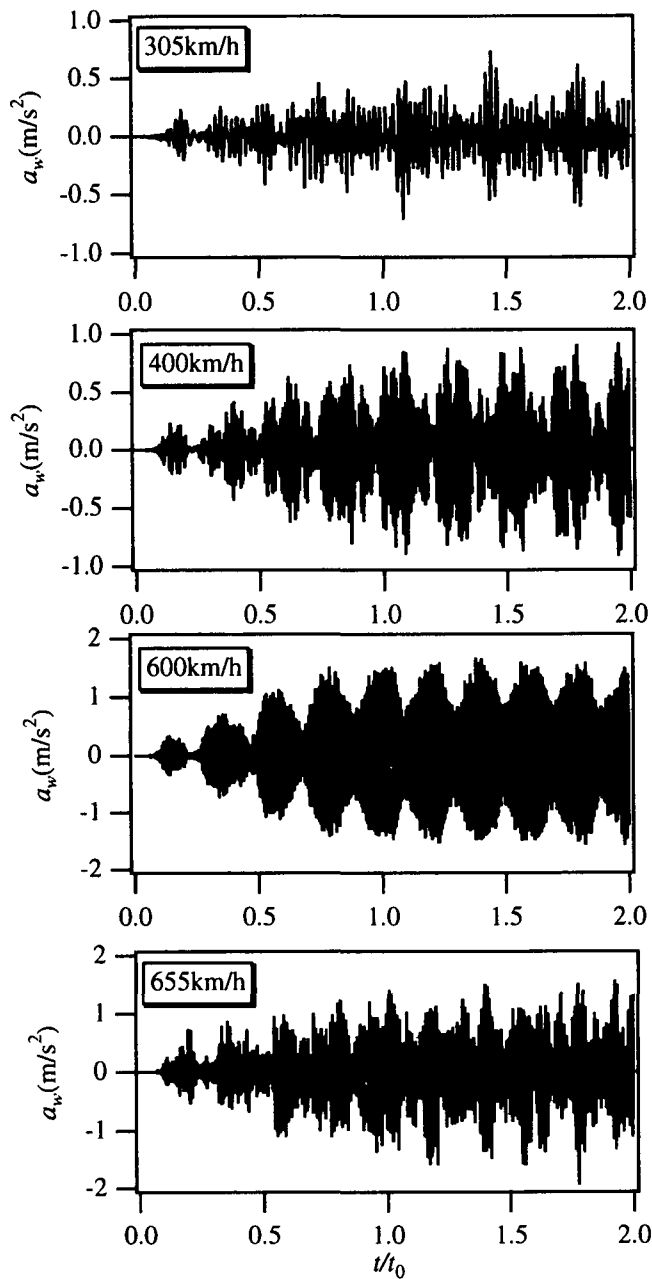


図-14 連行荷重による振動加速度時刻歴

かる。

荷重速度 400km/h の場合の卓越振動数は、表-2 より、各次の位相速度分散曲線において荷重速度と同じ位相速度に対応する固有振動数にほぼ一致していることがわかる。

荷重速度 305, 655m/h の場合も、各次の位相速度分散曲線において荷重速度と同じ位相速度に対応した固有振動数とほぼ一致した振動数の付近にピークが集中して現れている。特に、位相速度分散曲線の極小値に対応した固有振動数付近では、広い振動数範囲に多数のピークが集中している。これは、荷重速度が極小位相速度に近くなると、鋼板には波長はわずかに異なるが位相速度がほぼ一致した多数の正弦波が励起されることを表している。

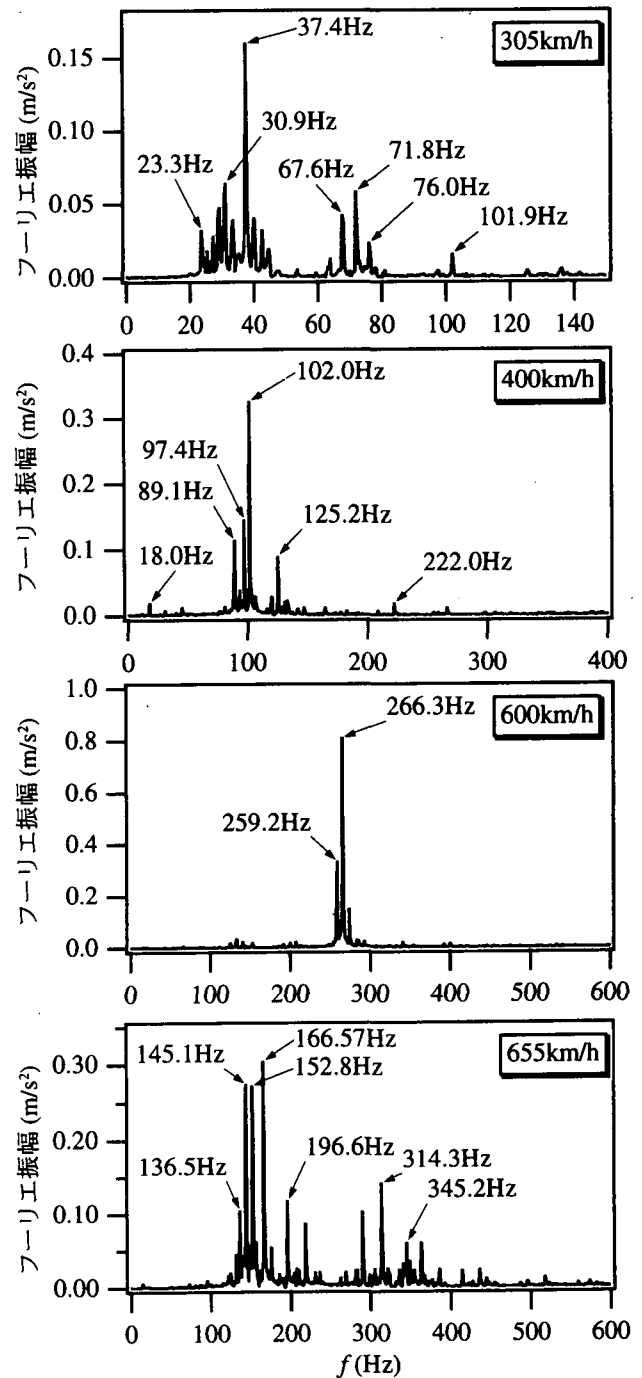


図-15 連行荷重による振動加速度時刻歴のフーリエスペクトル

5. 移動荷重列による動的応答

移動荷重として列車荷重が作用する場合、これまでの理論による解析からは列車の速度と車軸間隔から決まる荷重周期の影響が大きいことが明らかになっている。そこで、図-2 に示したような列車荷重が3両編成で通過する場合を想定した移動荷重列が作用する場合についても検討を行った。

移動荷重列が作用する場合の動的挙動は鋼板に次々に載荷される荷重によって励起される波の重ね合わせになるため、4.2 で示したような明確な局部振

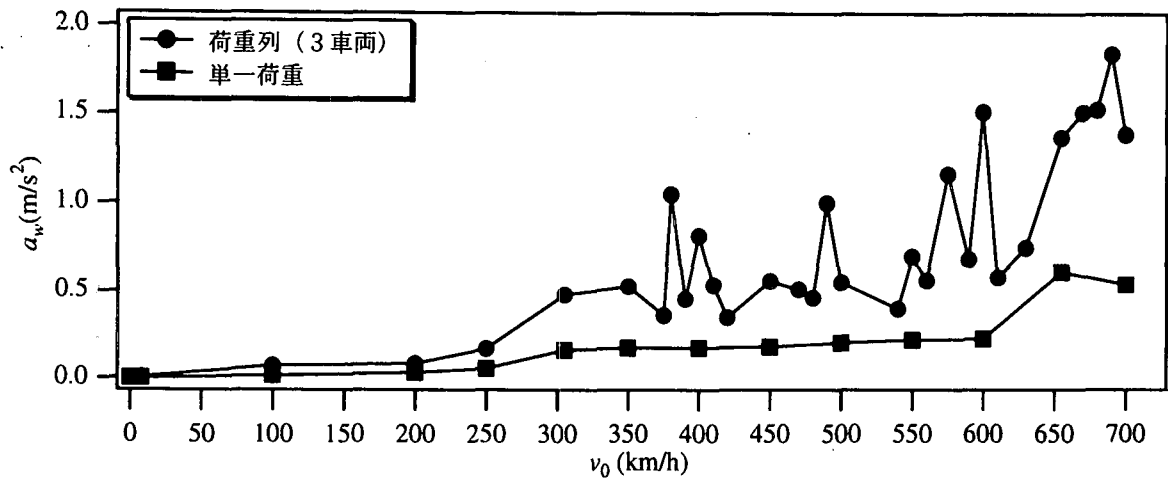


図-16 振動加速度時刻歴の最大振幅と荷重速度の関係

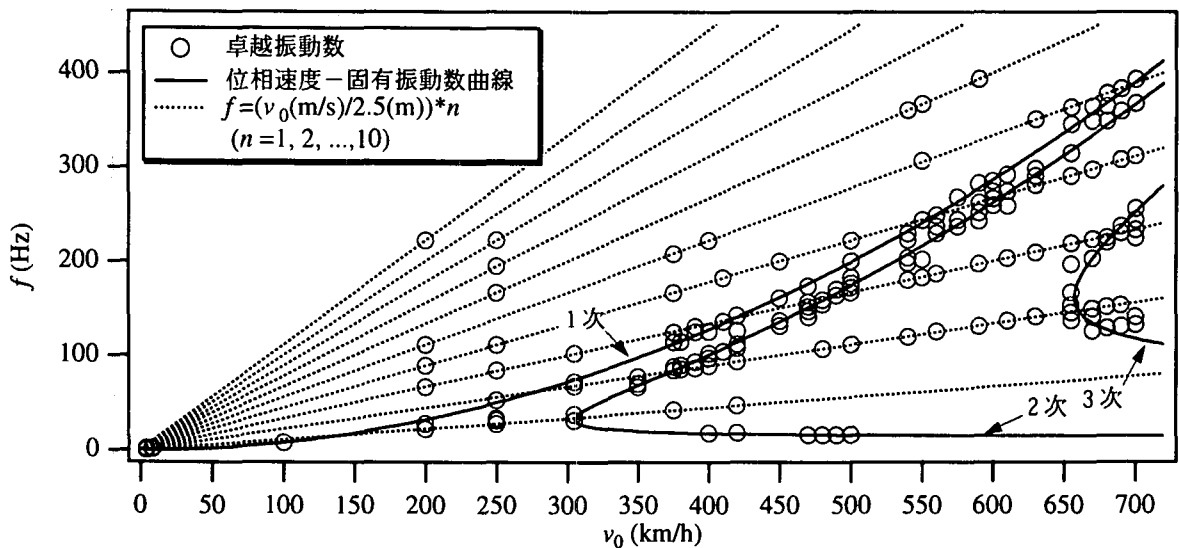


図-17 荷重列が作用する場合の卓越振動数と、荷重速度と荷重間隔から決まる振動数の関係

動波の伝播特性は現れてこない。そこで、荷重列の移動に伴う鋼板中央点の鉛直方向振動加速度 a_w の時刻歴について検討を行った。

荷重速度305, 400, 600, 655km/hの時の鋼板中央点の振動加速度時刻歴を図-14に示す。横軸は、先頭の荷重が鋼板に進入してから時間 t と先頭の荷重が鋼板に進入してから最後尾の荷重が鋼板を通過し終えるまでの時間 t_0 の比の t/t_0 で表している。

いずれも荷重列の通過に伴う応答の周期性が現れ、時間の経過に伴って応答振幅が大きくなる傾向を示している。この傾向は、荷重速度600km/hの場合に顕著に現れている。

これらの振動加速度時刻歴のフーリエスペクトルを図-15に示す。

図-12に示した単一移動荷重による振動加速度時刻歴のフーリエスペクトルと比較すると、荷重列が作用する場合でもピークが集中する振動数の範囲はほとんど変化していないことがわかる。しかし、荷重列が作用する場合の卓越振動数は単一荷重が作用

する場合よりも限定されたものとなっている。

荷重列が鋼板上を通過している間の振動加速度時刻歴における最大振幅と荷重速度の関係を図-16に示す。●は3車両分の荷重列が作用した場合、■は単一荷重が作用した場合の結果を表している。

単一荷重が作用した場合の最大振幅は、荷重速度が第2次位相速度分散曲線の極小位相速度に近づくとも増大し、第3次位相速度分散曲線の極小位相速度に近づくまではほぼ一定値となっている。これに対して、荷重列が作用した場合には、荷重速度が第2次位相速度分散曲線の極小位相速度より速くなると、最大振幅が顕著に増加する荷重速度が多数存在している。単一荷重が作用する場合に対する最大振幅の増加の割合は荷重速度600km/hの場合が最も大きく、約7倍となっている。

これらの各荷重速度における振動加速度履歴の卓越振動数と、荷重速度と荷重間隔から決まる振動数の関係を図-17に示す。縦軸は振動数、横軸は荷重速度であり、○は各荷重速度における鉛直方向振動加

速度時刻歴のフーリエスペクトル図から主要な卓越振動数を選んでプロットしたものである。また、実線は図-4の位相速度分散曲線から各位相速度に対応した固有振動数を計算して求めた位相速度-固有振動数曲線であり、点線は荷重速度 v_0 と最小荷重間隔 $l_0(=2.5\text{m})$ から決まる振動数 $f_0(=v_0/l_0)$ を n 倍($n=1, 2, \dots, 10$)したものである。

荷重速度が 250km/h 以下の卓越振動数は、荷重速度と荷重間隔から決まる振動数を整数倍した直線上にほぼプロットされており、従来のはり理論による解析結果と一致した結果を表している。荷重速度が 300km/h 以上になると、卓越振動数は、荷重速度と荷重間隔から決まる振動数を整数倍した直線上か、位相速度-固有振動数曲線上のいずれかにプロットされ、特に2つの線の交点付近に集中していることがわかる。

図-16を参照すると、荷重列が作用したことによって最大振幅が顕著に増大する荷重速度は、図-17において荷重速度と荷重間隔から決まる振動数を整数倍した直線と位相速度-固有振動数曲線の交点における荷重速度にほぼ一致することがわかる。荷重速度と荷重間隔から決まる振動数を整数倍した直線上では荷重周期に起因した共振現象が生じ、位相速度-固有振動数曲線上では荷重速度と位相速度の関連による共振現象が生じることから、これらの交点では2種類の共振現象が生じることにより応答振幅が増幅されと考えられる。

6. まとめ

高速列車荷重による鋼薄肉桁の局部振動が特定の荷重速度で急激に増大するメカニズムを解明することを目的として、鋼薄肉材構成板を対象に、その位相速度分散特性と高速移動荷重によって生じる局部振動特性との関連について検討を行った。

得られた結果をまとめると以下ようになる。

単一移動荷重が作用する場合、

(1) 荷重速度が極小位相速度に近づくと、鋼薄肉材構成板の荷重載荷点付近における面外方向の応答振幅は急激に増大する。この時の応答波形は、荷重が鋼薄肉材構成板の支持端を通過する時にその支持端で反射し、波形を維持したまま荷重と逆方向に鋼板内を伝播する。

(2) 鋼薄肉材構成板に生じる面外方向の振動加速度時刻歴の卓越振動数は、荷重速度と同じ位相速度に対応する固有振動数にほぼ一致する。

荷重列が作用する場合、

(3) 鋼薄肉材構成板には荷重速度と位相速度の一致による共振現象と規則的な荷重配置による共振現象が生じる。

(4) 荷重速度と同じ位相速度に対応する固有振動数と、荷重速度と荷重間隔から求められる振動数が一致する場合に、鋼薄肉材構成板の面外方向振動加速度時刻歴の振幅は顕著な増大を示す。この時の振動加速度の最大振幅の増幅割合は荷重速度 600km/h で最も大きくなり、単一移動荷重が作用する場合の約7倍となった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 涌井一，鳥取誠一，松本信之，奥田広之，渡辺忠朋：側壁ビーム方式ガイドウェイの構造と動的応答特性，鉄道総研報告，Vol.5，No.1，pp.25-33，1991.1.
- 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：高速列車荷重による鋼箱桁の局部振動に関する一考察，構造工学論文集，Vol.46A，pp.511-521，2000.3.
- 10) Cheung, Y. K. : Finite Strip Method in Structural Analysis, PERGAMON PRESS, 1976.
- 11) 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.
- 12) Y. C. ファン：固体の力学/理論，培風館，pp.335-338，1981.

(2000年4月21日受付)