

高速移動荷重による鋼薄肉材構成板の局部振動に対する横補剛材の影響

Effects of Transverse Stiffeners on Local Vibrations of Component Plates
of Thin-Walled Steel Members Caused by a High-Speed Traveling Load

岡村美好 *
Miyoshi OKAMURA

* 正会員 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)

This paper aims to clarify the effects of transverse stiffeners on local vibrations in component plates of thin-walled steel members caused by a high-speed traveling load. The dynamic responses of the component plates with a transverse stiffener are calculated by means of finite strip method. The component plates and the transverse stiffeners are divided into a number of finite strips which are at right angles to the longitudinal direction of the component plate. The results from the analyses are as follows: 1) the local vibrations of the component plates are reflected in the transverse stiffener; 2) the maximum amplitude of the local vibrations of the component plates with the transverse stiffener increases when the speed of the traveling load approaches the minimum value of the phase velocity curve.

Key Words : thin-walled steel member, transverse stiffener, local vibration, traveling load

1. はじめに

近年、鋼橋においては、設計の合理化や施工の省力化が進められ、少数主桁橋の架設が行われるようになってきている¹⁾。これらの橋梁形式では、構造がシンプルで部材片数が少ないこと、主桁断面の大型化や補剛材の省略が図られていること、等が大きな特徴となっている。そのため、これらの構造においては、走行車両によって桁を構成する板要素に局部振動が生じ易くなり、これを要因とする騒音放射や疲労破壊が問題となる可能性がある²⁾。

特に、近年、列車の高速化が計画されている鋼鉄道橋においては、高速列車走行下における局部振動挙動を解明することは、今後、重要な課題となるものと考えられる。

このような鋼鉄道橋の局部振動問題に関しては、杉本ら³⁾が新幹線における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。

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⁴⁾。そして、荷重速度が鋼箱桁の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、そのときの荷重速度は杉本らによる実測値とほぼ一致すること等を明らかにしている。

しかしながら、この時の解析モデルでは水平補剛材は考慮しているが、垂直補剛材やダイヤフラムなどの部材軸方向に直交する横補剛材は考慮しておらず、高速列車走行によって実際の鋼鉄道橋に生じる局部振動挙動を解明するためにはこれらの横補剛材を考慮した解析が必要となる。

そこで、本研究は、高速列車走行によって実際の鋼鉄道橋に生じる局部振動挙動を解明するための基礎資料を得ることを目的として、横補剛材を有する鋼薄肉材構成板を対象に高速移動荷重によって生じる局部振動挙動について解析的に検討したものである。横補剛材は、局部振動波の伝播に対する影響が明確に把握できるように、構成板の部材軸方向中央断面に一本だけ配置した。荷重は、荷重速度と局部振動の関連に着目して、単一集中移動荷重を作用させた。構成板の解析モデルには有限帯板法を適用し、部材軸方向に直交する横補剛材も容易に扱えるように、部材軸方向に直角な方向の節線を有する帯板要素により鋼薄肉材構成板と補剛材を離散化した。

解析は、まず、構成板の位相速度分散曲線を求めて、局部振動の増大が予想される荷重速度を把握し

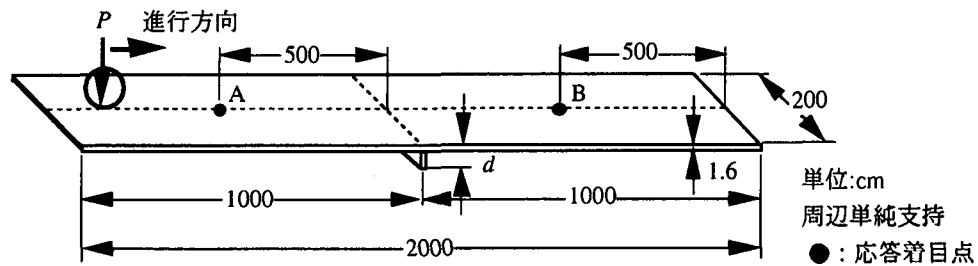


図-1 横補剛材を有する鋼薄肉材構成板

表-1 解析モデル

解析モデル名	補剛材幅 d (cm)	備 考
PL-0	0.0	拘束無し
PL-15	15.0	板厚1.6cm
PL-30	30.0	板厚1.6cm
PL-S	0.0	補剛材設置位置を単純支持（面外方向たわみを拘束）

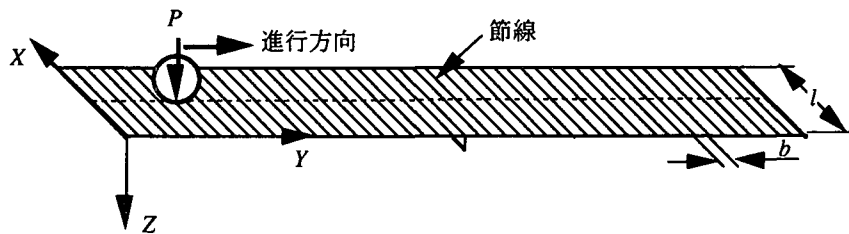


図-2 帯板要素による離散化モデル

た。次に、単一移動集中荷重が作用する鋼薄肉材構成板について局部振動の増大が予想される荷重速度を中心に動的応答解析を行い、時刻歴応答および応答分布を求めて横補剛材の影響について検討した。さらに、横補剛材幅の異なる構成板についても解析を行い、横補剛材の幅の影響についても検討を行った。

2. 解析モデル

図-1に、解析の対象とした横補剛材を有する鋼薄肉材構成板を示す。構成板の支持条件は他の構成板要素による拘束を考慮して周辺単純支持と仮定した。荷重の載荷方向から構成板は鋼薄肉材の上フランジ部分を対象にしていると考えられることができるが、本解析によって得られる移動荷重によって生じる面外曲げ波の伝播特性はウェブ部分においても同様に得られるものと予想される。

横補剛材は、上フランジでは通常図-1よりも密に配置されるが、移動荷重によって生じる局部振動波の伝播に対する影響を明確に把握するために構成板の長手方向中央断面1カ所だけに配置し、横補剛材の板厚は構成板と一致させた。

荷重は、荷重速度と局部振動の関連を明確にする

ために質量やバネを考慮しない単一集中荷重（大きさ1.0N）を適用し、構成板の左端から構成板の幅中央線に沿って長手方向に移動させた。また、図中のA、Bの2点は、時刻歴応答解析における応答の着目点である。

表-1に、解析の対象とした構成板を示す。PL-0は補剛材のない構成板、PL-15、PL-30は補剛材の幅 d が15cm、30cmの構成板であり、PL-Sは補剛材は設置せずに設置断面を単純支持（面外方向たわみのみを拘束）した構成板である。

構成板および補剛材の材料定数には以下の値を使用し、減衰は無視した。

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

解析は、有限帯板法にモード解析法を適用⁴⁾して行った。帯板要素による離散化は、鋼薄肉材の部材軸直角方向に配置された横補剛材を容易に考慮できるように、補剛材と平行な方向に節線を設定して行った（図-2）。

図-3に帯板要素 i を示す。有限帯板法における変

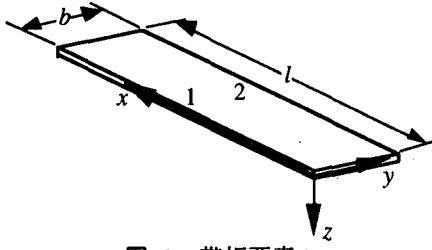


図-3 帯板要素 i

位場は、帯板幅方向を多項式で、帯板長手方向を Fourier 級数で近似した。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（構成板幅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 級数の採用項数でそれぞれ節線 1, 2 における変位成分を用いて以下のように表すことができる。

$$\{U_m\} = \langle u_{1,m} \quad u_{2,m} \rangle^T \quad (2a)$$

$$\{V_m\} = \langle v_{1,m} \quad v_{2,m} \rangle^T \quad (2b)$$

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

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

$$\langle N_p \rangle = \langle 1 - \eta \quad \eta \rangle \quad (3a)$$

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

である。

ここで、要素 i の Fourier 級数の第 m 項に対応する節線変位ベクトルを

$$\{d_m^{(i)}\} = \langle u_{1,m} \quad v_{1,m} \quad w_{1,m} \quad \theta_{1,m} \quad u_{2,m} \quad v_{2,m} \quad w_{2,m} \quad \theta_{2,m} \rangle^T \quad (4)$$

と定義すれば、集中荷重 P が要素 i の座標 (x_c, y_c) に位置するときの要素 i の節線外力ベクトルは $\eta_c = y_c/b$ とすれば次式で与えられる。

$$\{f_m^{(i)}\} = P \sin\left(\frac{m\pi}{l}x\right) \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 - 3\eta_c^2 + 2\eta_c^3 \\ y_c(1 - 2\eta_c + \eta_c^2) \\ 0 \\ 0 \\ 3\eta_c^2 - 2\eta_c^3 \\ y_c(\eta_c^2 - \eta_c) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

仮想仕事式に式(1)および式(5)を適用して、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で、構造全体に対する運動方程式を以下のように誘導した。

$$[M]\{\ddot{d}\} + [K]\{d\} = \{f\} \quad (6)$$

ここに、 $[M]$, $[K]$ はそれぞれ質量マトリクス、剛性マトリクスを、 $\{d\}$, $\{\ddot{d}\}$, $\{f\}$ はそれぞれ節線変位ベクトル、節線加速度ベクトル、節線外力ベクトルを表し、減衰は考慮していない。

帯板要素への要素分割は、固有振動数の収束性を検討した結果、構成板を 160 要素に分割し、横補剛材は PL-15 では帯板要素 1 要素に、PL-30 では帯板要素 2 要素に分割した。また、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、構成板長手方向のモードを 100 次まで、構成板幅方向のモードを 11 次まで採用した。

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、時間刻みはモード解析法で採用した固有モードの最小固有周期の 1/10 で行った。また、荷重が構成板左端に位置する状態を時刻 $t=0$ として、その時、構成板は静止状態にあるとした。

4. 位相速度分散特性

補剛材のない構成板 PL-0 と同じ断面の無限長鋼板について、部材軸方向の面外曲げ波動の位相速度分散曲線および群速度分散曲線を求めた。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 a に対する構成板の幅 l の比 l/a で表している。実線は位相速度分散曲線で 3 次モードまでを示している。点線は群速度分散曲線であり、周辺単純支持平板の群速度分散曲線は波動モードに関係なく求められるので、一つの直線で表されている。また、図中の数字は、各位相速度分散曲線の極小点（位相速度分散曲線と群速度分散曲線の交点）

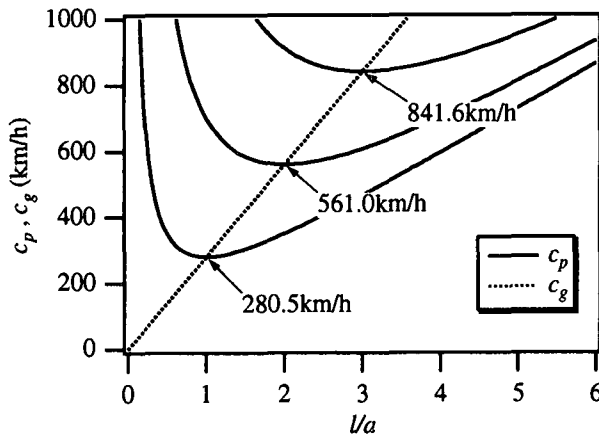


図-4 位相速度分散曲線，群速度分散曲線 (PL-0)

における位相速度を表している。以下では、これらの極小点の位相速度を極小位相速度と称することにする。

各次の位相速度分散曲線は、部材軸方向半波長 a に対する構成板の幅 l の比 l/a が 1, 2, 3 の時に極小値を示している。これは、構成板幅方向における変形モードを考慮すれば、部材軸方向の波長と幅方向の波長が一致するときに各次の位相速度分散曲線が極小値をとり、構成板には分散性のない波が生じることを表している。

これより、荷重速度が 280.5, 561.0, 841.6 km/h の場合には、構成板の応答振幅が顕著に増大することが予想される。

以下の解析では、最小極小位相速度 280.5 km/h を中心に、荷重速度が 400 km/h 以下の場合を対象に検討を行うこととする。

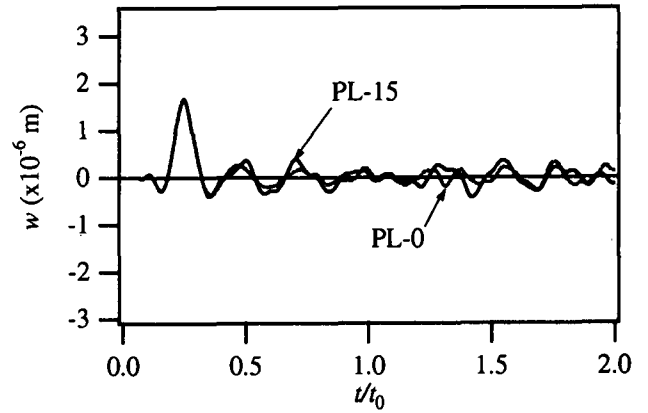
5. 移動荷重による応答特性

補剛材のない構成板 PL-0 および幅 15 cm の補剛材を有する構成板 PL-15 について、移動荷重が作用した時の時刻歴応答曲線および時間の経過に伴う応答波形の変化を求めて補剛材の有無による応答の違いを比較することにより、補剛材の影響について検討を行った。

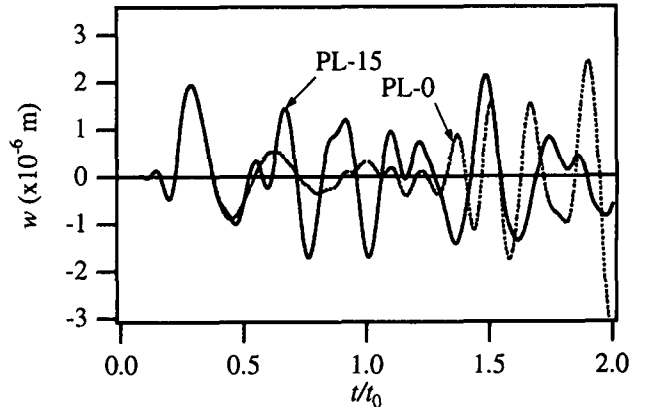
5.1 時刻歴応答

構成板 PL-0 および PL-15 について、移動荷重の速度を変化させて図-1 に示した A, B 点における時刻歴応答の比較を行った。

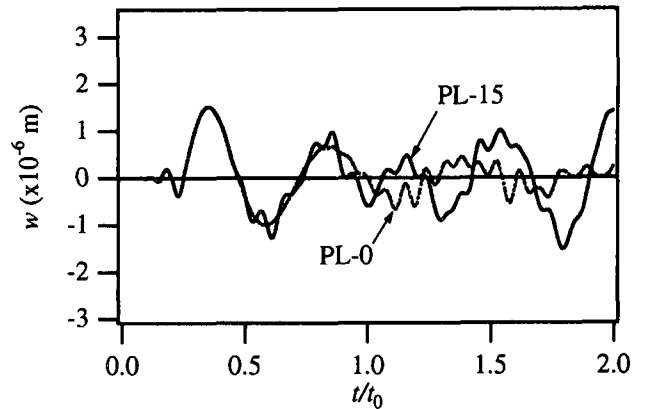
荷重速度 v_0 が 200.0, 280.5, 400.0 km/h の時の A・B 点におけるたわみの時刻歴応答の比較を図-5, 6 に示す。縦軸はたわみ w であり、横軸は荷重が構成板の左端を出発してから経過時間 t を荷重が構成板を通過するのに要する時間 t_0 で無次元化して表している。また、実線が PL-15、点線が PL-0 の応答を表



(a) $v_0=200.0$ km/h



(b) $v_0=280.5$ km/h



(c) $v_0=400.0$ km/h

図-5 たわみ時刻歴に対する横補剛材の影響 (A 点)

している。

A 点の時刻歴応答は、いずれの荷重速度においても、荷重が補剛材位置を通過するまで ($t/t_0 < 0.5$) は補剛材の影響はほとんど現れていない。荷重が補剛材位置を通過した後は、PL-0 と PL-15 の応答に違いが現れ、補剛材を有する PL-15 の振幅が大きくなっている。これは、補剛材によって生じた反射波の影響と考えられる。また、荷重速度 280.5 km/h の場合に PL-0 と PL-15 の差が大きいのは、荷重速度が極小位相速度に一致する時に生じる波は分散性がないので構成板内に分散せずに集中して伝播しているためと考えられる。

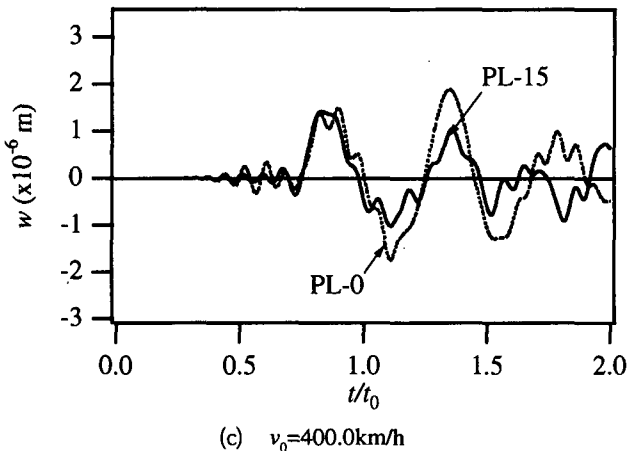
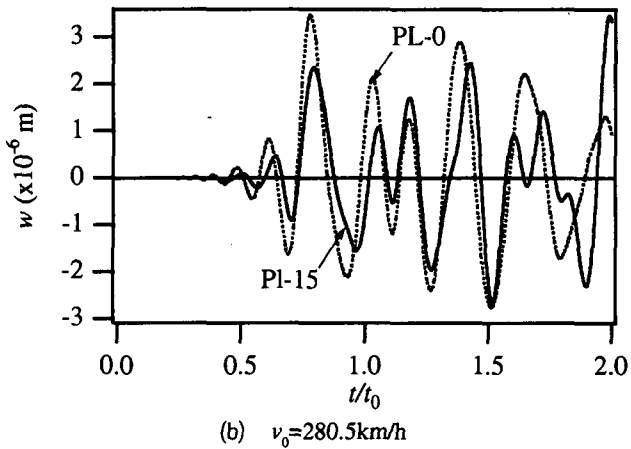
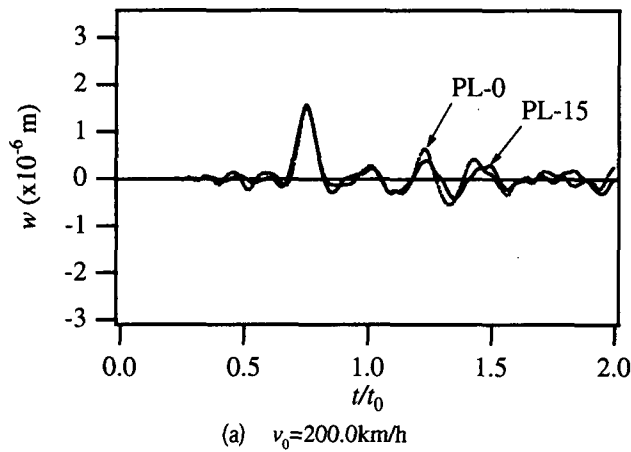


図-6 たわみ時刻歴に対する横補剛材の影響 (B点)

B点のPL-15では、どの荷重速度でも荷重が補剛材位置を通過する前から応答が現れており、荷重が補剛材に到達するまでに発生した波が補剛材を透過して伝播していることがわかる。また、荷重が応答着目点を通過した直後の応答は、荷重速度200.0km/hの場合にはPL-0とPL-15の差がほとんど生じていない。これは、荷重速度が遅いので動的影響が小さいためと考えられる。荷重速度280.5、400.0km/hの場合にはPL-15の方が振幅が小さくなる傾向にあり、荷重速度280.5km/hの場合ではPL-15の応答振幅はPL-0の70%以下になっている。これは、PL-15では、荷重が補剛材位置に到達するまでに生じた波の多く

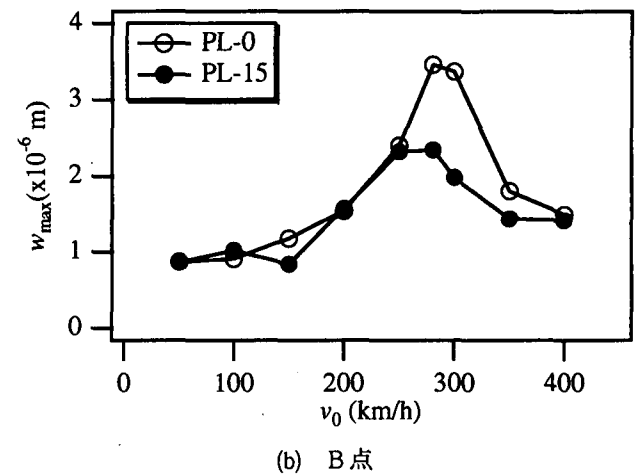
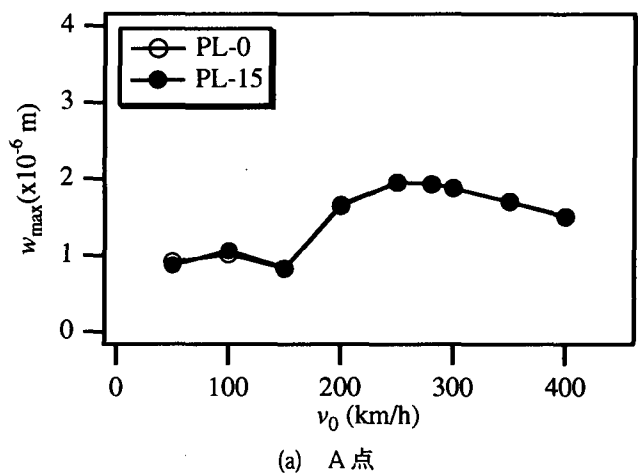


図-7 荷重速度と絶対最大たわみの関係
(荷重が構成板上を通過する時)

が補剛材によって反射するために、それまでに荷重から構成板に供給されたエネルギーが補剛材を越えてB点側に移らないことによるものと考えられる。

図-5と図-6より、荷重が構成板上にあるときのA、B点における絶対最大たわみと荷重速度 v_0 との関係を求めると図-7のようになる。●がPL-15の結果を表す、○がPL-0の結果を表す。

A点の絶対最大たわみは、いずれの荷重速度でもPL-0とPL-15ではほぼ一致しており、横補剛材の影響はほとんど現れていない。

B点の絶対最大たわみは、PL-0、PL-15ともに荷重速度がほぼ280.5km/hでピークを示しているが、PL-15の方がピーク時の荷重速度が低下する傾向を示している。また、ピーク時の絶対最大たわみは、PL-0、PL-15ともにA点よりも大きい、PL-15はPL-0の70%以下であり、補剛材を設置したことで30%以上低下したことがわかる。

ここで、構成板を横補剛材で2つに分けて考え、荷重の進行方向に倣ってA点側を補剛材後方の板要素、B点側を補剛材前方の板要素とすれば、補剛材後方の板要素の絶対最大たわみには補剛材の影響はほとんど生じないが、補剛材前方の板要素の絶対最

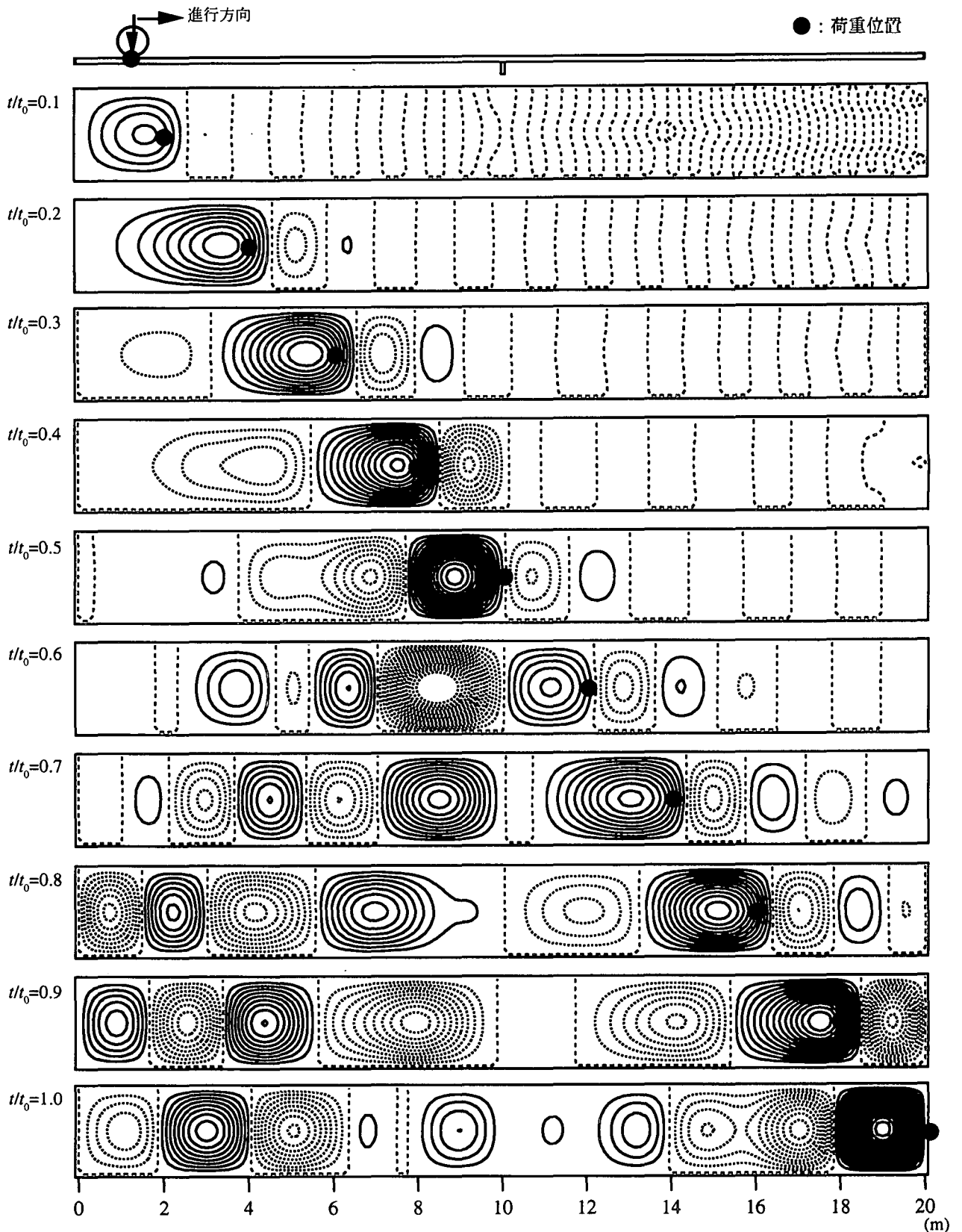


図-8 荷重移動によるたわみ分布の変化 (PL-15, $v_0=280.5\text{km/h}$, 等高線間隔 $= 1.0 \times 10^{-7}\text{m}$)

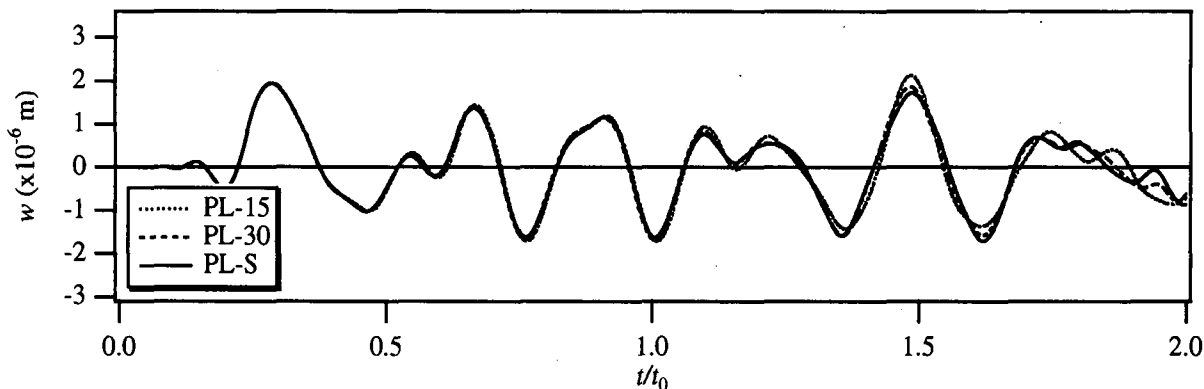
大たわみは補剛材の影響により30%以上低下すると言することができる。

5.2 応答波形

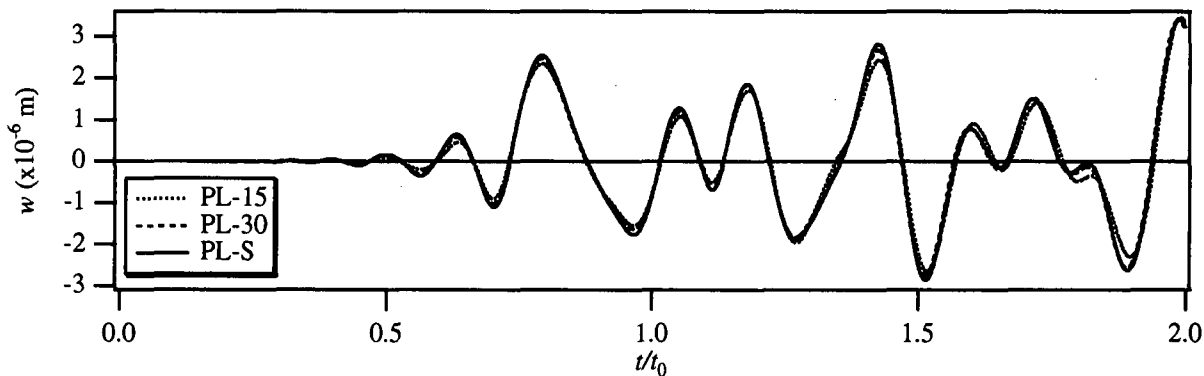
次に、荷重の移動に伴うたわみ応答分布の変化に

対する補剛材の影響について検討を行った。

図-8は、補剛材を有する構成板PL-15について、速度 280.5km/h の荷重が作用する時の荷重移動に伴うたわみ応答分布の変化を等高線図で表したものである。時間間隔は $\Delta t/t_0=0.1$ であり、等高線間隔は $1.0 \times$



(a) A 点



(b) B 点

図-9 たわみ応答に対する補剛材幅の影響 ($v_0=280.5\text{km/h}$)

10^{-7}m である。また、実線は正のたわみ、点線は負のたわみ、破線はたわみなしの等高線を表し、●印は荷重の位置を表している。

これまでの研究^{4),9)}からは、荷重速度が構成板の極小位相速度に一致する場合、荷重位置近傍に生じた振幅の大きな波の群は荷重が構成板を通過した後も構成板の端で反射して構成板内を逆方向に伝播すること等が明らかになっている。

図-8より、横補剛材を有する構成板においては、荷重位置近傍に生じた振幅の大きな波の群は荷重の進行に伴って振幅が増大し、荷重が補剛材位置を通過すると補剛材位置で反射して補剛材後方の板要素内をこれまでとは逆方向に伝播するのがわかる。また、荷重が補剛材位置を通過した後は、補剛材後方の板要素には構成板の幅とほぼ一致した波長の波が分布するようになり、時間の経過とともに定在波に移行していく様子が現れている。また、荷重が補剛材位置を通過した後の補剛材前方の板要素における応答波形は、荷重が構成板左端から補剛材位置に移動するまでの補剛材後方の板要素のものとほぼ同様の変化を示しているが、たわみ量が補剛材後方の板要素よりも大きいのは補剛材を通過してくる波の影響によるものと考えられる。

6. 横補剛材の幅の影響

横補剛材として垂直補剛材やダイヤフラムを想定すると、補剛材の幅は広い範囲で変化する。また、補剛材を有する鋼薄肉材構成板の局部振動問題に関する研究の多くは、補剛材による支持条件を固定あるいは単純支持として補剛材に挟まれた板要素のみを対象として解析を行っている。

そこで、補剛材幅の異なる構成板 PL-15 と PL-30、および補剛材は設置せずに設置位置の単純支持とした構成板 PL-S について時刻歴応答の比較を行った。

図-9に、荷重速度 280.5km/h の時の A、B 点におけるたわみの時刻歴応答の比較を示す。実線が PL-S、点線が PL-15、破線が PL-30 の応答を表す。

A 点の時刻歴応答では、荷重が構成板を通過後 ($t/t_0 > 1.0$) に 3 種類の構成板の違いが生じているが、それらの差はわずかなものとなっている。B 点においても、3 種類の構成板の応答はほぼ一致したものとなっている。他の荷重速度の場合についても同様の検討を行ったが、3 種類の構成板の時刻歴応答はほぼ一致したものが得られた。

これより、補剛材の幅を 15cm から 30cm に変えても横補剛材が構成板の局部振動挙動に与える影響はほとんど変化しないこと、また、それらの結果は補剛材設置位置を単純支持とした構成板の結果とほぼ

一致することが明らかになった。

7. まとめ

本研究では、高速列車走行によって実際の鋼鉄道橋に生じる局部振動の特性を把握するための基礎資料を得ることを目的として、部材軸方向中央断面に横補剛材を有する鋼薄肉材構成板を対象に、高速移動荷重によって生じる局部振動に対する横補剛材の影響について検討を行った。

得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 横補剛材を有する鋼薄肉材構成板の局部振動は、荷重速度が無補剛構成板の極小位相速度に近づくと顕著な増大を示す。
- (2) 荷重が構成板上を通過するときに生じる絶対最大たわみは、補剛材後方の板要素では補剛材の影響はほとんど生じないが、補剛材前方の板要素ではピーク時の絶対最大たわみが補剛材を設置することにより30%以上低下する。
- (3) 移動荷重によって構成板に生じた局部振動波が、横補剛材により反射して補剛材と支持端の間の板要素内で定在波に移行する過程を把握することができた。

- (4) 移動荷重が作用する構成板のたわみ応答は、横補剛材の幅が15, 30cmの場合、および横補剛材を設置せずに補剛材設置位置を単純支持とした場合ではほぼ一致する。

参考文献

- 1) 例えば、高橋昭一、志村勉、橘吉宏、小西哲司：PC床版2主桁橋「ホロナイ川橋」の設計および解析・試験研究、橋梁と基礎、Vol.30, No.2, pp.23-30, 1996.
- 2) 讃岐康博、梶川康男、川辺稔、村瀬輝巳江、浜博和：鋼少数主桁橋の裏面吸音板の設置方法に関する実験と考察、構造工学論文集、Vol.46A, pp.469-479, 2000.3.
- 3) 杉本一郎、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.
- 4) 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.
- 5) 岡村美好、深沢泰晴：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：応用力学論文集、Vol.3, pp.203-213, 2000.8.

(2001年4月20日受付)