

衝撃荷重を受ける鋼 I 形ばりの局部振動に関する実験研究

EXPERIMENTAL STUDY ON LOCAL VIBRATION OF
I-SECTION STEEL BEAMS UNDER LATERAL IMPACT LOAD

岡村美好*、深沢泰晴**

Miyoshi OKAMURA and Yasuharu FUKASAWA

*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)

This paper presents experimental studies for initial process of local vibration due to a light lateral impact in I-section steel beams. The forces and acceleration responses of a certain cross section by impact excitations are measured. The predominant frequencies and the local vibration modes which were obtained by spectrum analysis of the experimental results are discussed.

In addition, the dynamic analysis is carried out by means of the finite strip method together with the modal analysis. As the results of the comparison of the analytical value with the experimental value, it is found that the initial time histories of acceleration responses obtained by the analysis are in good agreement with the experimental ones.

Key Words : thin-walled steel beam, local vibration, impact load, experimental study

1. はじめに

鋼鉄道橋に代表される鉄道鋼構造物においては、列車によって、構造物を構成する薄板要素に面外方向の曲げ振動が生じることが知られている。このような局部振動は、薄板要素接合部での疲労亀裂の促進や騒音放射の一要因になると考えられ、車両走行の高速化に伴って問題視されるようになってきている¹⁾。

薄板要素の局部振動については、断面変形を考慮した薄肉断面部材の動的問題として、中村²⁾や能町、角田、岸³⁾によって解析的に検討されている。中村は箱形断面ばりを対象として有限帯板法を用いた固有振動解析および地震応答解析を行い、中間ダイヤフラムの効果や動的挙動に対する断面変形の影響について検討している。また、能町らは、薄肉H形断面ばりについて動的二次元弾性論および動的平面曲げ理論に基づいた位相速度分散曲線および波動モードを求め、その特性を明らかにするとともに Bernoulli-Euler 梁理論や Timoshenko 梁理論による結果と比較している。

著者らも、これまでに薄肉 I 形断面ばりの波動伝播特性の解明⁴⁾や薄肉 I 形断面ばりの衝撃応答解析⁵⁾を行い、薄肉断面ばりの衝撃挙動における局部振動特性を明らかにしてきた。これらによれば、薄肉断面部材の局部振動は低周波振動ではほとんど生じないが、高周波振動になると薄肉断面を構成する薄板要素の連成振動が生じること、波長が短い場合には薄板要素の連成振動ではなく薄板要素単独の

面外曲げ振動が生じることなどが明らかになっている。しかしながら、これらの研究は解析的な検討に限られており、実験面からの検討や解析結果の妥当性についての検証はほとんど行われていない。

このようなことから、本研究は、鋼薄肉断面ばりの局部振動特性を実験的に把握するとともにこれまでに行われている解析結果の妥当性を検証することを目的として、弾性衝撃実験を行ったものである。両端単純支持鋼 I 形ばりを対象に、軽い衝撃力を作用させて各薄板要素の面外方向の加速度応答を測定し、各測定点における応答波形ならびに卓越周波数における振動モードについて検討することにより局部振動特性を明らかにした。続いて、有限帯板法にモード解析法を併用した解析手法により弾性衝撃応答解析を行い、実験結果との比較を行った。

2. 実験方法

2.1 供試体および測定方法

実験供試体および応答計測位置を図-1に示す。供試体は、一般構造用溶接軽量H形鋼 (JIS 3353 SWH400) を長さ2.10mに切断したものを用いた。両端から5cmの位置を支点断面として鉛直補剛材を設けて断面変形を拘束し、支持条件は両端単純支持 (部材軸方向については両端ローラー支持) とした。

衝撃荷重は、インパルスハンマ (周波数範囲 2~10kHz、

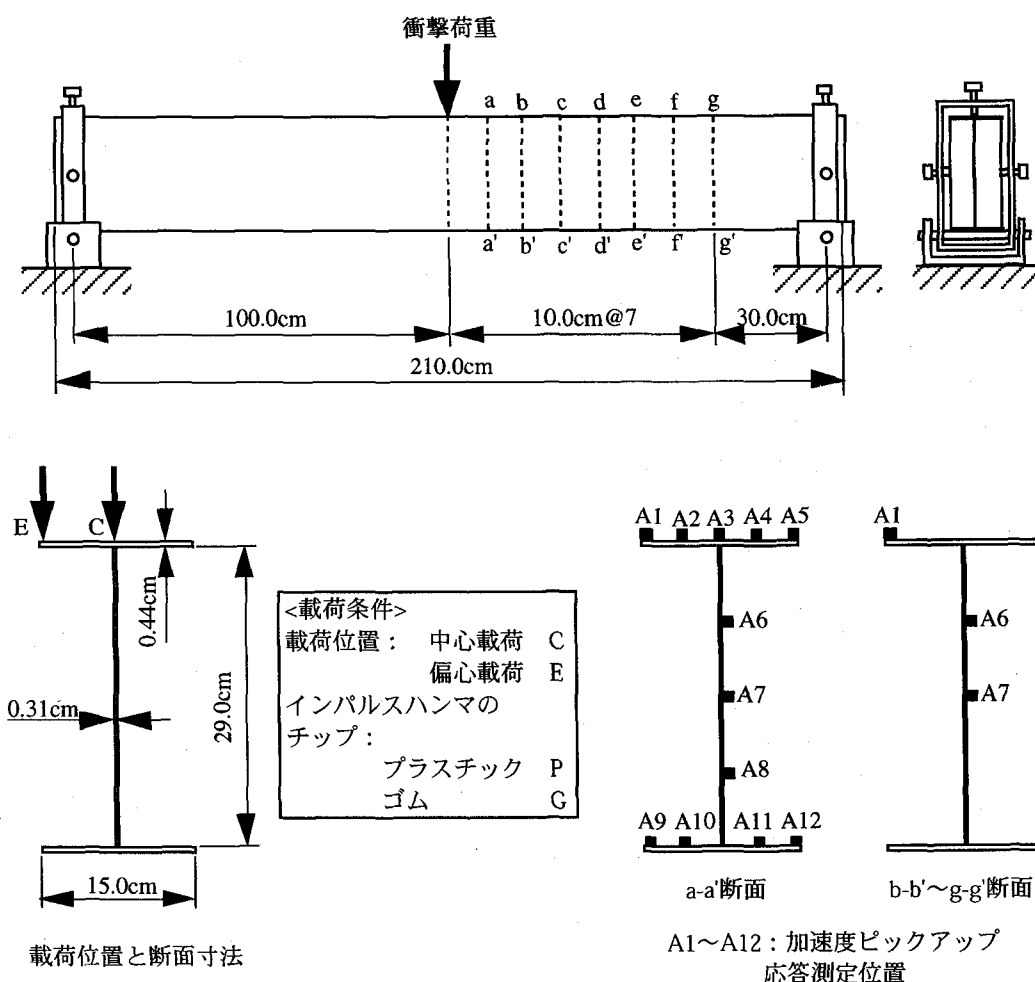


図-1 実験供試体および応答計測位置

測定レベル範囲0.01~5000N)を用いて、スパン中央断面に鉛直集中荷重として作用させた。載荷位置による局部振動の違いを考察するために、スパン中央断面内での載荷位置は中心載荷(C)と偏心載荷(E)とした。また、広い周波数範囲における応答を測定するために、インパルスハンマの先端に取り付けるチップを変えて衝撃荷重の継続時間を変化させた。低周波領域の応答を測定する際にはゴムチップ(G)、高周波領域の応答を測定する際にはプラスチックチップ(P)を使用した。これらの載荷位置とチップを組み合わせた4種類の荷重条件について測定を行った。

応答測定点は、載荷点付近でのウェブおよびフランジプレートの変形を把握するために、スパン中央断面より10cm離れたa-a'断面において図に示すようなA1~A12までの12点に加速度ピックアップ(振動数範囲1~25kHz)を配置した。さらに、部材軸方向の変化を把握するために、スパン中央断面より10cm間隔にとったb-b'からg-g'の6断面においてもA1, A6, A7の3点に加速度ピックアップを配置した。これらの加速度ピックアップにより、フランジ上では鉛直方向加速度応答を、ウェブ上では水平方向加速度応答を測定した。

測定は、それぞれの荷重条件について波形の再現性を確認しながら載荷荷重と加速度応答の測定を3回づつ行っ

た。

2.2 データ処理

測定データは、20kHzのアンチエイリアシングフィルタを設定して、サンプル周波数100kHz、データ数8000個で取り出した。各測点の加速度応答データは、それぞれの載荷荷重の最大値で除すことにより単位荷重当たりの応答に変換し、応答波形の再現性を確認した。同じ荷重条件で測定した3つの応答波形は、高周波成分の影響と見られる不一致が認められたため、3回分のデータについて同時刻の測定データの平均値を求め、これを応答データとした。なお、平均化処理を行ったデータについて、フィルター処理は行わなかった。

これらのデータについてスペクトル解析を行い、パワースペクトルおよびフーリエ位相スペクトルを求めて卓越周波数における局部振動モードの推定を行った⁹⁾。

3. 測定結果

3.1 衝撃荷重

それぞれの荷重条件において、インパルスハンマの力センサで得られた衝撃力-時間曲線の一例を図-2に示す。縦軸は衝撃力、横軸は経過時間であり、図中のCP、CG、

EP、EGは荷重条件を表している。これらの第1文字は載荷位置を表し、Cは中心載荷、Eは偏心載荷を意味する。また、第2文字はインパルスハンマのチップの種類を表し、Pはプラスチックチップ、Gはゴムチップを意味する。

荷重条件により最大衝撃力および荷重継続時間が異なり、荷重の継続時間がもっとも長いのはゴムチップを用いて偏心載荷（EG）した場合で約2.5msec、もっとも短いのはプラスチックチップを用いて中心載荷（CP）をした場合で約0.4msecである。荷重条件CP、CGおよびEGの場合に

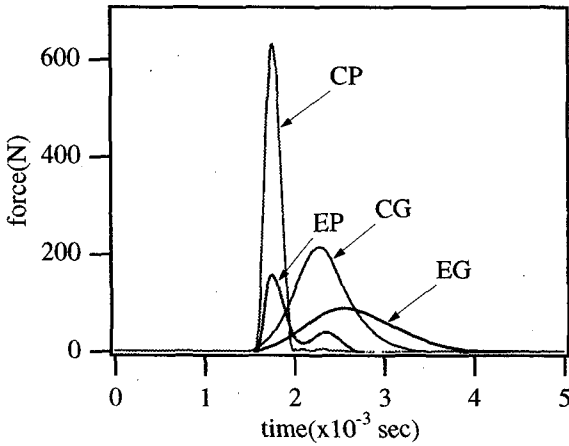


図-2 載荷荷重

は正弦波パルスに近い波形が得られているが、荷重条件EPの場合には2つのピークを持った波形となっている。

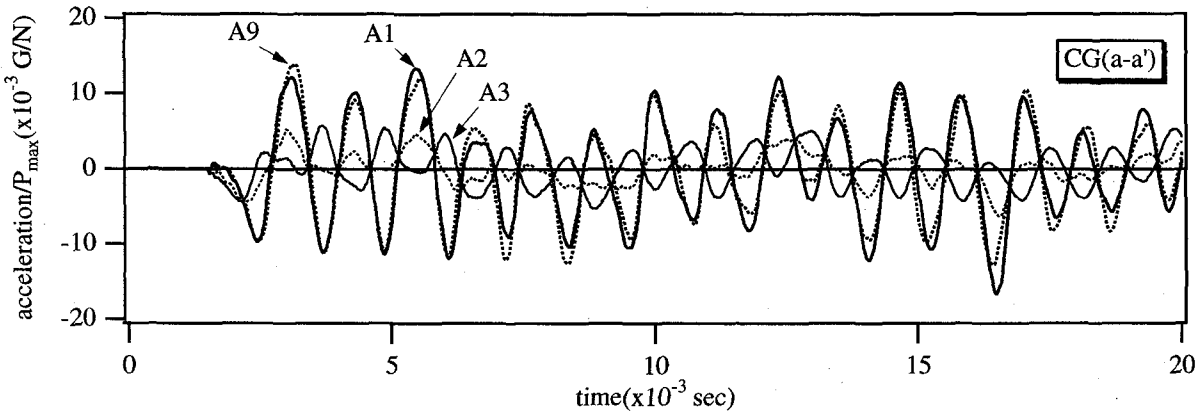
3.2 加速度応答波形

(1) 中心載荷

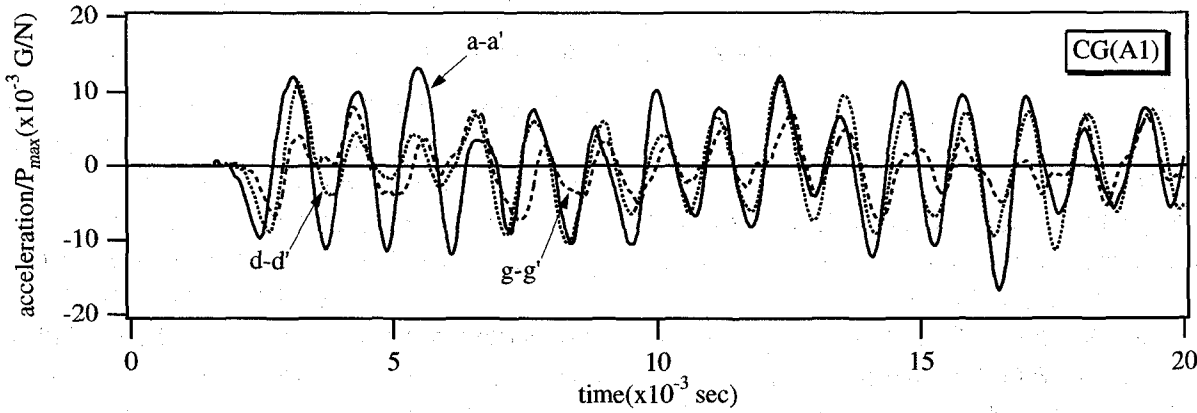
ゴムチップを用いて中心載荷（CG）した場合の各測定点における加速度応答波形を図-3に示す。図-3 (a) は、a-a'断面の上下フランジ自由縁A1、A9、上フランジ中央点A3、上フランジ中間点A2の応答であり、図-3 (b) は、上フランジ自由縁A1のa-a'、d-d'、g-g'断面における応答を表している。縦軸は加速度（重力加速度G：9.8m/sec²で表示）を載荷荷重の最大値で割った値であり、横軸は時間で20msecまでの応答を示している。

a-a'断面の各点では、載荷点からの距離に応じて波形の立ち上がりに差が生じている。A1、A9の応答波形はほぼ一致している。A3はA1、A9の1/3程度の振幅であり、初期を除いてフランジ自由縁と同周期、逆位相となっている。また、A2は周期が長く、他とは異なった応答となっている。

上フランジ自由縁A1のa-a'、d-d'、g-g'断面での応答は、載荷点からの距離に応じて波形の立ち上がりに差があるが、位相差はほとんど生じていない。したがって、載荷してまもなく部材全体に同様の断面変形が生じているものと

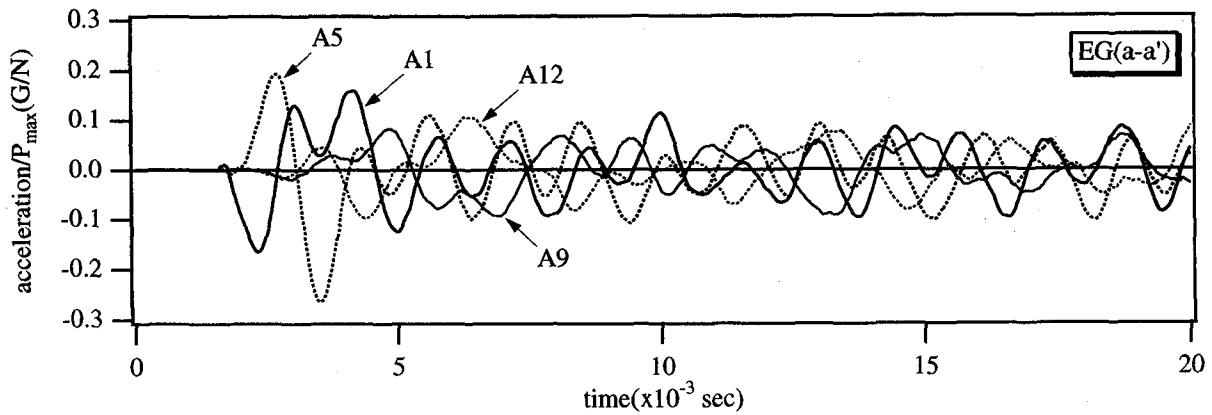


(a) a-a'断面

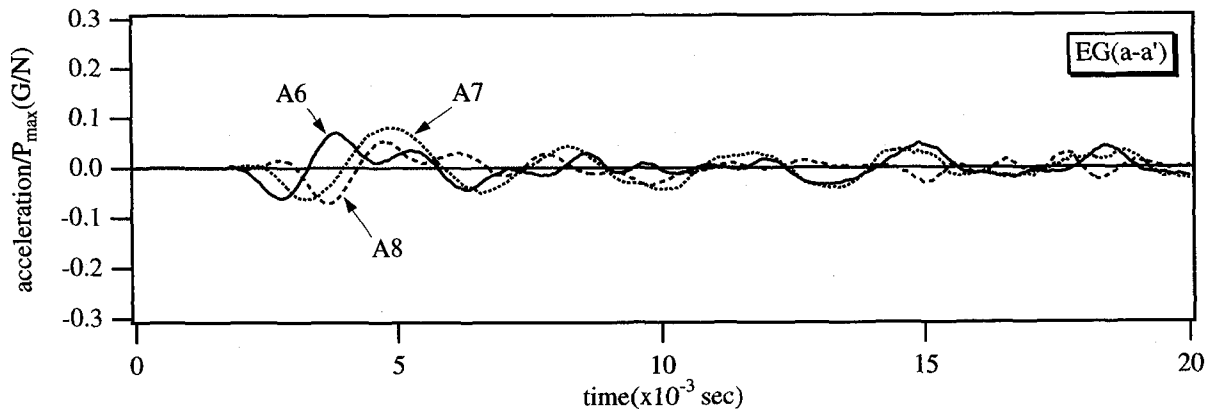


(b) 上フランジ自由縁A1 (a-a'～g-g'断面)

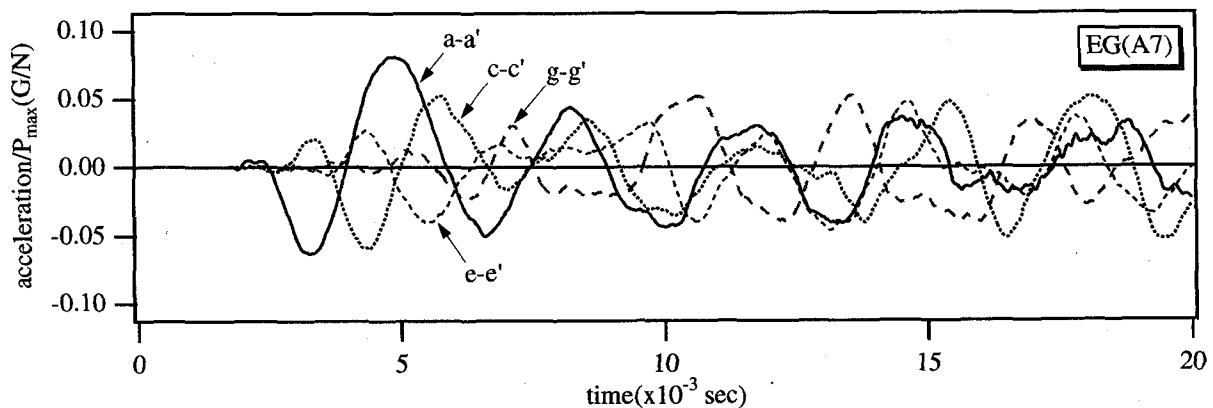
図-3 載荷条件CGによる加速度応答波形



(a) フランジ自由縁 (a-a' 断面)



(b) ウェブ (a-a' 断面)



(c) ウェブ中央点 A7 (a-a'~g-g' 断面)

図-4 载荷条件 EG による加速度応答波形

考えられる。

(2) 偏心载荷

ゴムチップを用いて偏心载荷 (EG) した場合の各測定点における加速度応答波形を図-4 に示す。図-4 (a), (b) は、a-a' 断面の上下フランジ自由縁 A1, A5, A9, A12 とウェブ A6, A7, A8 の応答であり、図-4 (c) はウェブ中央点 A7 の a-a', c-c', e-e', g-g' 断面での応答を表している。

a-a' 断面の A1, A5 の波形には、ねじり変形のような逆位相性は現れておらず、初期の応答に顕著な違いを示した後、時間の経過に伴って同位相の応答となっている。図に

示した範囲には現れていないが、さらに時間が経過すると A1, A5 は逆位相を示すようになる。A9, A12 では、上フランジよりも遅れて同時に波形が立ち上がり、一致した波形を示した後にはほぼ逆位相の応答となっている。

a-a' 断面のウェブ A6, A7, A8 においても面外振動が生じ、上フランジからの距離に応じた波形の立ち上がり時刻の差が明確に現れていて A6 から A8 への応答の伝播の様子がわかる。A6, A7 の応答波形は一部に一致する部分も見られるが、A8 は振幅・周期ともこれらとは異なっており、A6 と A7 の間にはフランジ自由縁と同様にねじり変形のような逆対称性は現れていない。また、フランジ自由縁に比

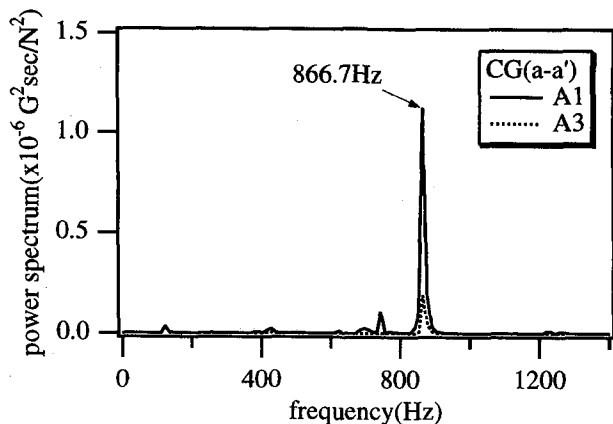


図-5 加速度応答のパワースペクトル
(载荷条件 CG、a-a' 断面)

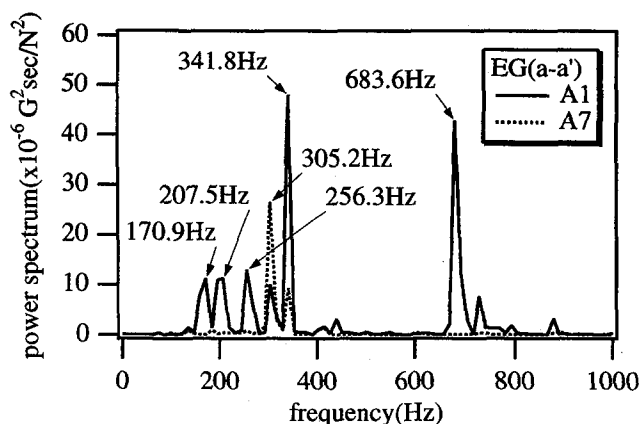


図-8 加速度応答のパワースペクトル
(载荷条件 EG、a-a' 断面)

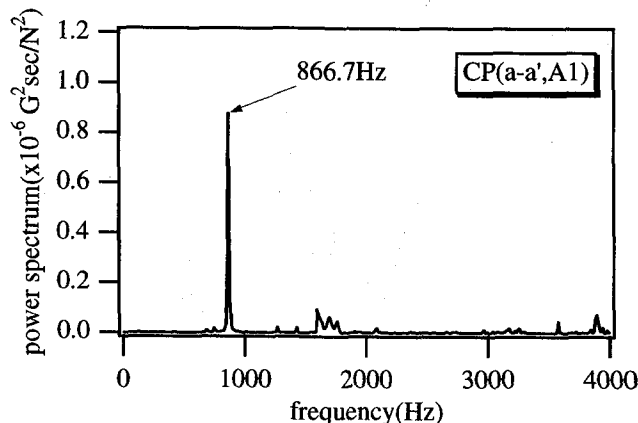


図-6 加速度応答のパワースペクトル
(载荷条件 CP、a-a' 断面)



図-7 断面変形図 (载荷条件 CG・CP、a-a' 断面)

べて、ウェブの方が周期の長い応答を示している。

測定点 A7 の a-a' から g-g' 断面での応答は、波形の立ち上がり時刻がほぼ等間隔でずれており、部材軸方向へのウェブの面外変形が伝播する様子が現れている。g-g' 断面では立ち上がりの波形の様子が他の断面と異なっている。また、図-4 (b)、(c) よりウェブの高さ方向と部材軸方向への波動伝播速度を求めたところ、いずれも約 200m/sec となった。

3.3 卓越周波数と局部振動モード

(1) 中心载荷

ゴムチップを用いて中心载荷 (CG) した場合の a-a' 断面の上フランジ自由縁 A1 と上フランジ中央点 A3 の加速度応

答のパワースペクトルを図-5に示す。縦軸はパワースペクトル、横軸は周波数であり、実線が A1、点線が A3 を表している。A1、A3 ではスペクトル振幅には大きな差があるが、卓越周波数は一致しておりいずれも 866.7Hz である。

プラスチックチップを用いて中心载荷 (CP) した場合の a-a' 断面の上フランジ自由縁 A1 の加速度応答のパワースペクトルを図-6に示す。ゴムチップを用いた場合に比べて荷重の継続時間が短いので高周波領域にもピークが現れているが、それらのスペクトル振幅は小さく、866.7Hz でもっとも大きな振幅を示している。

866.7Hz での断面変形を図-7に示す。点線が元の断面を表している。断面変形は変形量の最大値を 1 として基準化し、各応答測定点での変形量を直線で結んで描いている。また、下フランジ中央点の応答は測定していないので、A10 と A11 の値を直線でつないで近似している。チップの種類に関係なく同様の断面変形が得られ、いずれも部材軸方向のモード次数は 1 であった。

解析より得られる I 形ばりの固有振動モードについては、文献 4.) 5) に詳しく述べられている。これらでは、断面変形の対称性により固有振動モードを強軸回りの曲げ振動、弱軸回りの曲げ振動、曲げねじり振動、縦振動の 4 つのパターンに分類している。具体的には、強軸回りの曲げ振動は左右対称、弱軸回りの曲げ振動は上下対称、曲げねじり振動は点対称、縦振動は上下・左右ともに対称となるモードである。この分類に従うと、図-7は左右対称であり、強軸回りの曲げ振動モードに対応する。図-3 (a) にも示したように上フランジの中央と自由縁は正負が反対方向に変形し、はりとしてのわたみはわずかでフランジの面外曲げ変形が大きなものとなっている。

(2) 偏心载荷

ゴムチップを用いて偏心载荷 (EG) した場合の a-a' 断面における载荷辺側の上フランジ自由縁 A1、ウェブ中央点 A7 の加速度応答に対するパワースペクトルを図-8に示す。実線が A1、点線が A7 を表している。A1 においては、いくつものピークが生じ、341.8Hz、683.6Hz で大きなスペクトル

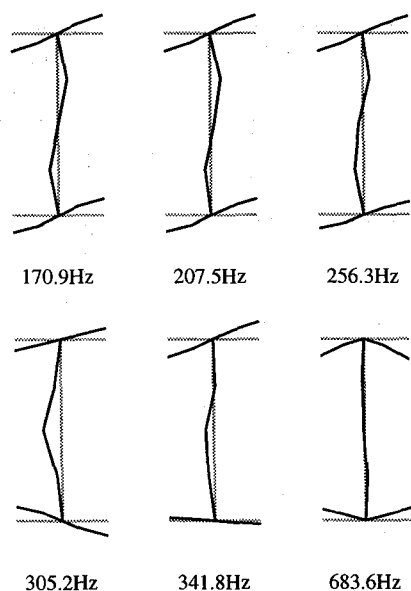


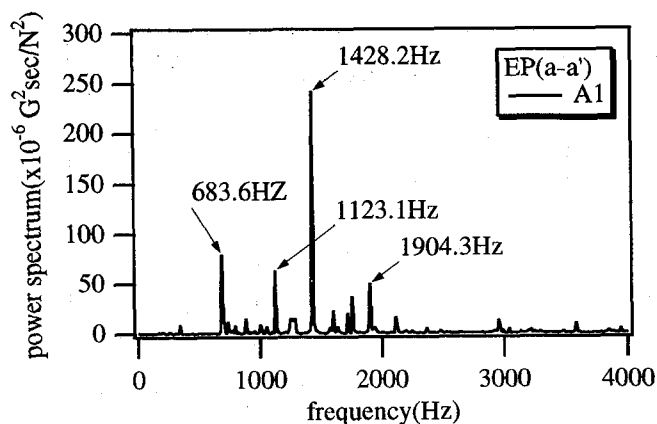
図-9 断面変形図（载荷条件EG、a-a'断面）

ル振幅を示している。A7では、305.2Hzと341.8Hzでピークが生じ、これらは上フランジ自由縁と一致した卓越周波数となっている。

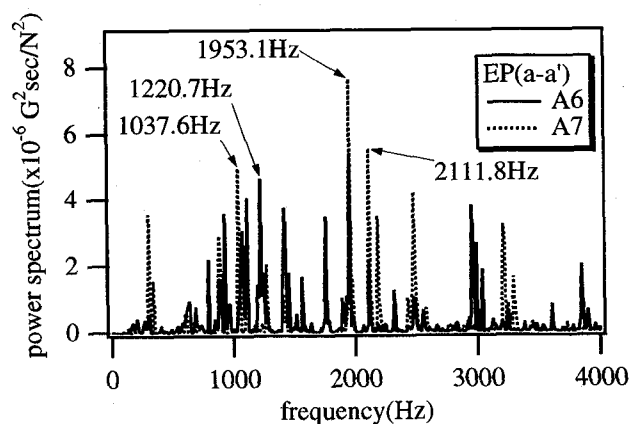
これらの卓越周波数における断面変形を図-9に示す。170.9、207.5、256.3Hzは点対称で曲げねじり振動モードに対応し、305.2、341.8Hzは上下対称の弱軸回りの曲げ振動、683.6Hzは上下左右対称の縦振動モードに対応している。偏心载荷した場合、強軸回りの曲げ振動と曲げねじり振動が生じると考えられるが、初期の衝撃応答においてはこれら以外の弱軸回りの曲げ振動モードや縦振動モードに対応する断面変形が生じ、それらのパワースペクトルが卓越することは興味深い結果といえる。なお、部材軸方向のモード次数は170.9、305.2Hzが1次、207.5Hzが3次、256.3、683.6Hzが5次、341.8Hzが7次となった。

プラスチックチップを用いて偏心载荷（EP）した場合のa-a'断面の载荷辺側の上フランジ自由縁A1、ウェブ上A6、A7の加速度応答のパワースペクトルを図-10に示す。ゴムチップに比べて荷重継続時間が短いことから1000～2000Hzにパワースペクトルのピークが生じ、A1においては1428.2Hzで最大のピークを示している。A6、A7では、A1より広い周波数範囲でいくつものピークが生じ、それらのスペクトル振幅の値はA1の1/10以下となっている。また、A6・A7とA1において共通した卓越周波数は現れていないことから、フランジとウェブはそれぞれ独立した応答を示していることがわかる。

これらの卓越周波数における断面変形を図-11に示す。上フランジ自由縁でピークを示す周波数（683.6、1123.1、1428.2、1904.3Hz）ではウェブはほとんど変形せずにフランジのみが変形している。683.6Hzは上下左右対称で縦振動モードに対応していると考えられるが、1123.1、1428.2、1904.3Hzでは上フランジのみが変形して左右対称となっており、偏心载荷の場合に予想されるような上フランジの非



(a) A1



(b) A6、A7

図-10 加速度応答のパワースペクトル（载荷条件EP、a-a'断面）

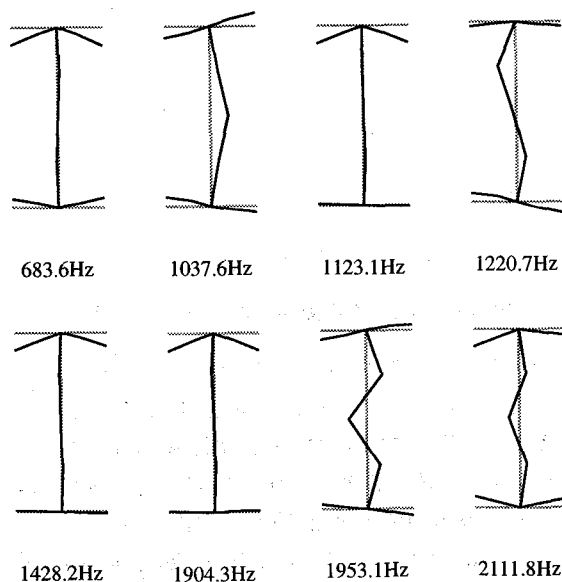


図-11 断面変形図（载荷条件EP、a-a'断面）

対称性は現れていない。

ウェブにおいてピークを示す周波数（1037.6、1220.7、1953.1、2111.8Hz）では1220.7Hzは点対称で曲げねじり振動モードに対応し、1037.6、1953.1、2111.8Hzは上下対称で弱軸回りの曲げ振動モードに対応しており、周波数が高

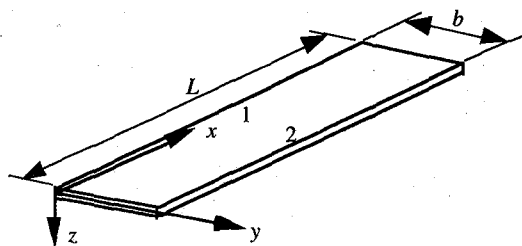


図-12 帯板要素

くなるとフランジ自由縁の変形量は小さく、ウェブの面外変形は次数の高いものとなっている。

また、これらの部材軸方向のモード次数は、683.6Hzで5次となることが推定できたが、その他のモードについては波長が短かったため今回の加速度ピックアップの配置では明確なモード次数の推定はできなかった。

4. 解析結果との比較

有限帯板法とモード解析法を併用した解析手法⁹⁾を用いて弾性衝撃応答解析を行い、実験結果との比較を行った。

4.1 解析モデル

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-12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、 $\{U_m\}$ 、 $\{V_m\}$ 、 $\{W_m\}$ 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であり、 r はFourier級数の採用項数である。また、 $\eta = y/b$ とすれば

$$\langle N_p \rangle = \begin{pmatrix} 1 - \eta & \eta \end{pmatrix} \quad (2a)$$

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

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で、構造全体に対する運動方程式を誘導した。

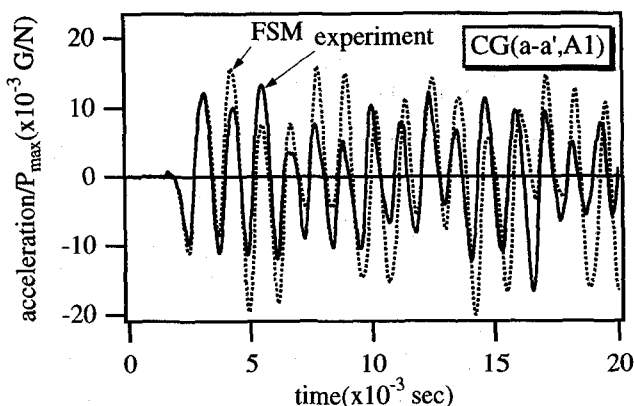


図-13 実験結果と解析結果の加速度波形の比較
(载荷条件CG、a-a'断面A1)

実験供試体をフランジ10要素、ウェブ20要素、合計40要素の帯板要素でモデル化し、以下の材料定数を使用した。

ヤング率 $E = 206 \text{ GPa}$

ポアソン比 $\nu = 0.3$

単位質量 $\rho = 0.785 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$

外力は図-2に示した衝撃力波形を集中荷重として作用させた。

モード解析法による応答計算は、ゴムチップを使用した場合については約2000Hz（採用項数30、モード次数200）までの固有振動モードを用い、プラスチックチップを使用した場合については約5000Hz（採用項数30、モード次数500）までの固有振動モードを用いて行った。なお、ここでのモード次数は、採用項数までの固有振動数を小さい順に並べたときの順番を表す。

減衰は質量比例型減衰を仮定し、最低次固有周期で減衰率 $h=0.01$ となるように減衰パラメーターを決めた。固有振動解析により得られた最低次固有周期は17.46msec（固有円振動数361.9rad/sec）で、減衰マトリクスを $[C]$ 、質量マトリクスを $[M]$ とすれば、以下のように表される。

$$[C] = 5.5 \times 10^{-5} [M]$$

4.2 比較検討

(1) 中心载荷

ゴムチップを用いて中心载荷（CG）した場合の比較を図-13～図-15に示す。

図-13は、a-a'断面の上フランジ自由縁A1での加速度応答波形の比較である。横軸は時間で、縦軸は加速度を载荷荷重の最大値で割った値であり、点線が解析結果、実線が実験結果を表す。なお、図中のFSMは有限帯板法を意味し、縦軸のGは重力加速度を表している。立ち上がりの波形は振幅・周期ともに一致しているが、その後は実験の方が周期はわずかに短く、振幅は小さなものとなっている。

図-14は、A1の加速度応答のパワースペクトルの比較である。解析結果では219.7Hzと854.5Hzの2つのピークが

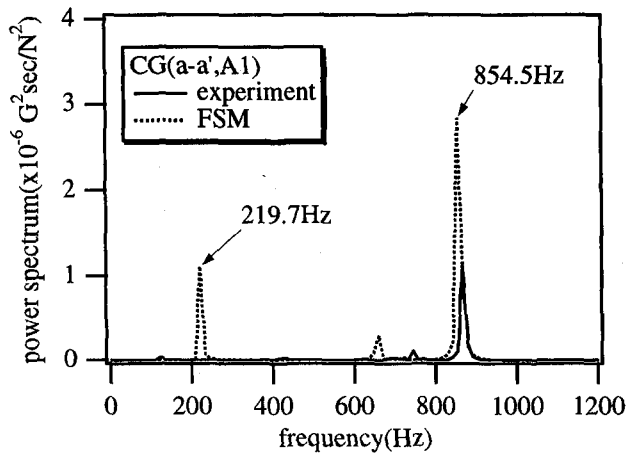


図-14 実験結果と解析結果のパワースペクトルの比較
(载荷条件 CG、a-a' 断面 A1)



図-15 解析による断面変形図
(载荷条件 CG、a-a' 断面)

現れている。854.5Hzについては、実験結果でもほぼ一致した周波数でピークを示し、スペクトル振幅は解析結果の50%程度である。これらの解析結果と実験結果の差は、解析で使用した減衰定数が実験結果を評価したものではないことから、減衰定数による影響があるものと考えられる。

卓越周波数854.5Hzにおける断面変形を図-15に示す。実験結果(図-7)と同様の断面変形となっている。また、部材軸方向のモード次数は1次となり、実験結果と一致した値となった。

(2) 偏心载荷

ゴムチップを用いて偏心载荷(EG)した場合の比較を図-16～図-18に示す。

図-16は、a-a'断面の载荷辺側上フランジ自由縁A1の加速度応答波形の比較である。解析結果と実験結果は、約10msecまではほぼ一致した波形を示し、その後時間の経過に伴って差が大きくなっている。なお、その他の応答測定点においても同様の結果が得られている。

図-17は、a-a'断面の载荷辺側上フランジ自由縁A1の加速度応答のパワースペクトルの比較を示したものである。解析結果と実験結果ではスペクトル振幅に差が生じ、ピークを示す周波数にいくらかずれがあるもののほぼ同様の傾向を示している。

これらの卓越周波数における断面変形を図-18に示す。

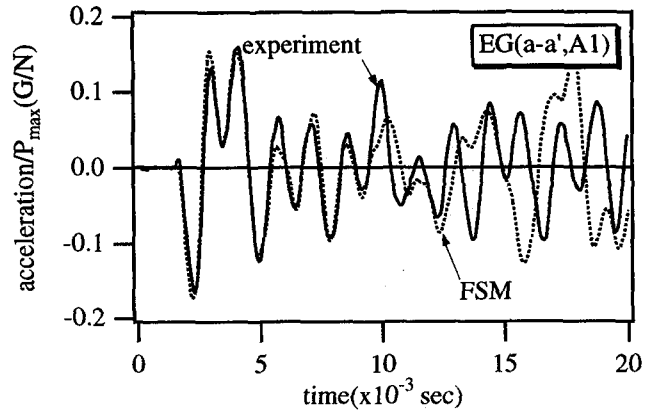


図-16 実験結果と解析結果の加速度波形の比較
(载荷条件 EG、a-a' 断面 A1)

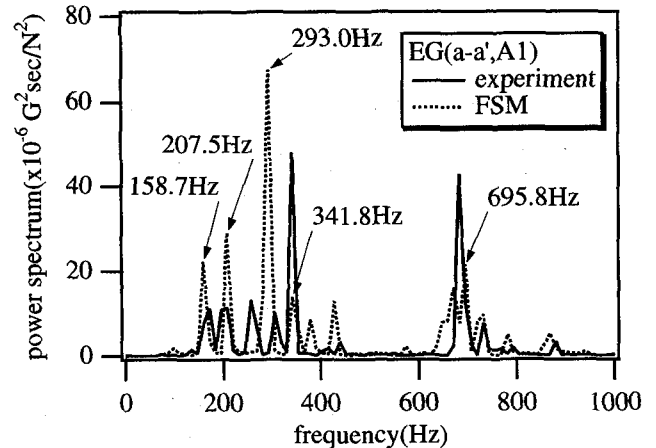


図-17 実験結果と解析結果のパワースペクトルの比較
(载荷条件 EG、a-a' 断面 A1)

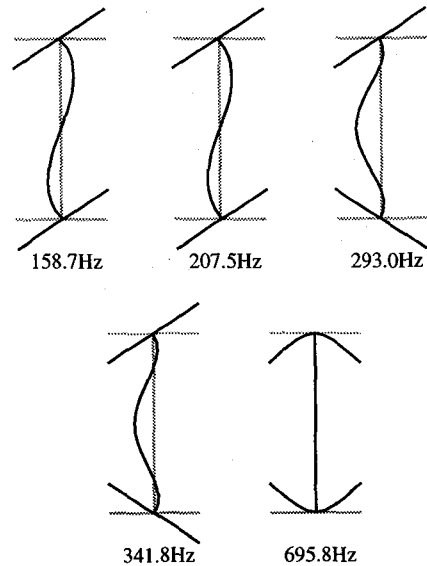


図-18 解析による断面変形図
(载荷条件 EG、a-a' 断面)

実験結果(図-9)と比較すると、卓越周波数が一致した場合には同様の断面変形が得られている。また、部材軸方向のモード次数は、158.7Hzが1次、207.5、293.0、695.8Hzが3次、341.8Hzが5次となり、低次モードでは実験結果と一

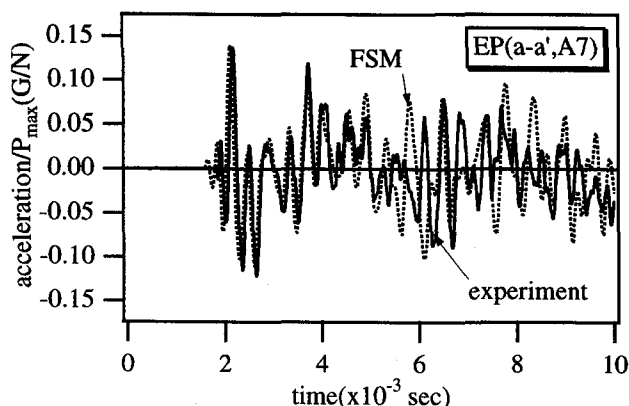


図-19 実験結果と解析結果の加速度波形の比較
(载荷条件 EP、a-a' 断面 A7)

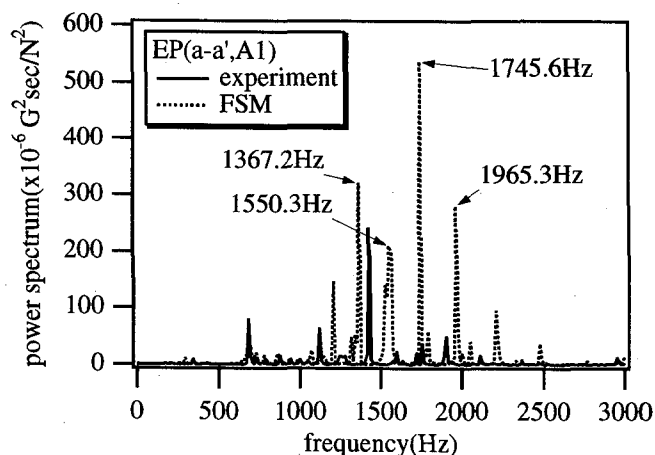


図-20 実験結果と解析結果のパワースペクトルの比較
(载荷条件 EP、a-a' 断面 A1)

致した値となっている。293.0、341.8Hzは弱軸回りの曲げ振動モード、695.8Hzは縦振動モードに対応しており、解析においても曲げねじり振動以外のモードが現れている。

プラスチックチップを用いて偏心载荷 (EP) した場合の比較を図-19～図-21に示す。

図-19は、a-a'断面のウェブ中央点A7での加速度応答波形の比較である。解析結果の方が実験結果よりも波形の立ち上がり早く、わずかに位相差が生じている。しかしながら、約5msecまではほぼ一致した波形を示し、その後時間の経過に伴って周期、振幅ともに差が生じている。

载荷辺側の上フランジ自由縁A1の加速度応答のパワースペクトルの比較を図-20に示す。解析結果では1000～2500Hzの高周波領域にパワースペクトルのピークが生じ、それらの周波数は実験とは異なったものとなっている。

これらの卓越周波数における断面変形を図-21に示す。いずれも上フランジのみが左右対称に変形しており、実験結果(図-11)と同様である。固有振動解析結果によると高周波領域において図-22に示すような縦振動モードと強軸回りの曲げ振動モードがほぼ一致した固有振動数で生じることから、これらのモードが合成されて図-21のような断

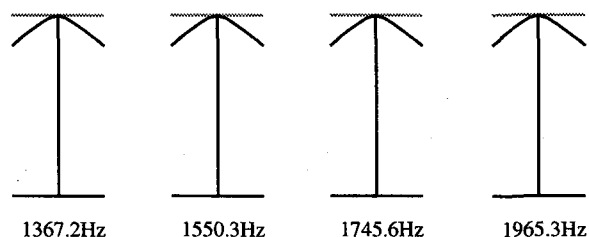


図-21 解析による断面変形図
(载荷条件 EP、a-a' 断面)

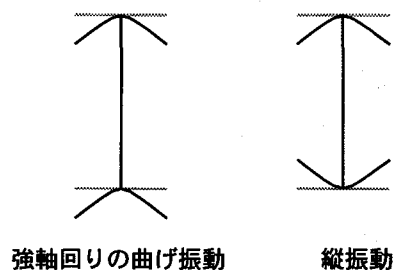


図-22 固有振動モード

面変形が生じたものと考えられる。また、これらの部材軸方向のモード次数は1367.2Hzが17次、1550.3Hzが19次、1745.6Hzが21次、1965.3Hzが23次となった。これらの実験結果との違いは、減衰定数の影響だけでなく、材端における支持条件の影響が高周波領域において大きく現れたものと考えられる。

5. あとがき

衝撃による鋼薄肉断面ばりの局部振動特性を実験的に把握するとともにこれまでにに行われている解析結果の妥当性を検証することを目的として、フランジ幅15cm、桁高30cm、スパン200cmの両端単純支持鋼I形ばりについて約3000Hz以下の応答を対象とした弾性衝撃実験を行った。さらに、有限帯板法による弾性衝撃応答解析結果との比較を行った。

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 中心载荷をした場合、荷重の継続時間が変化しても卓越周波数はほぼ一致し、局部変形に大きな違いは生じない。このときの断面変形は左右対称で上下フランジに顕著な曲げ変形を生じるものであり、部材軸方向のモード次数は1となる。
- (2) 偏心载荷をした場合の局部振動は、曲げねじり振動モードだけでなく、上下対称の弱軸回りの曲げ振動モードや上下左右対称の縦振動モードが生じる。また、高周波領域では、上フランジの曲げ変形が卓越し、強軸回りの曲げ振動モードと縦振動モードが合成された左右対称の断面変形を示す。
- (3) 有限帯板法による衝撃応答解析結果は、初期の加速度応答波形については実験結果とほぼ一致する。また、低周波領域では実験結果とほぼ一致した卓越周波数および局部振動モードを与え、高周波領域では断面変形は実験結果と

同様になるが部材軸方向のモード次数が異なり卓越周波数は一致しない。

なお、このような実験結果と解析結果の違いについては、実験供試体の減衰定数を明らかにするとともに、任意の境界条件を設定できる有限帯板法等を適用することにより減少できるものと考えられる。

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) 中村秀治：断面変形を考慮した薄肉振動はりの振動解析、土木学会論文報告集、第223号、pp.11-22、1974.
- 3) 能町純雄、角田与史雄、岸徳光：薄肉H形断面は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.
- 4) 岡村美好、深澤泰晴：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.
- 5) 岡村美好、深澤泰晴：鋼I形断面は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.
- 6) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析、技報堂、1993.
(1997年9月26日 受付)