

波型腹板桁の振動実験と3次元固有値解析

THREE DIMENSIONAL EIGENVALUE ANALYSIS AND VIBRATION TEST OF CORRUGATED WEB GIRDER

本田秀行* 秋葉 徹**

By Hideyuki HONDA and Toru AKIBA

Corrugated web girder is a girder developed to increase shearing strength of web, and is amenable more ordinary plate girder when large shearing force has acted. The studies on corrugated web girder have been undertaken, and important data have been reported. However, most of those studies have been done on static behavior, and there has been comparatively little attention given to dynamic behavior. In this study, to investigate fundamental dynamic characteristics and dynamic behavior of corrugated web girder, the vibration test of that girder was done. The plate girder with identical size was also done under same condition to that test. Furthermore, three dimensional eigenvalue and eigenvector of the corrugated web girder were analyzed under the three conditions changed restriction condition of structural elements.

1. まえがき

一般に、横倒れ変形が拘束されているプレートガーダーが曲げモーメントとせん断力を受けた場合、破壊は圧縮側フランジか、あるいは腹板に生じる。圧縮側フランジが曲げモーメントによって降伏点に達してもプレートガーダーとしての耐荷力の余力は相当に保持されているのが通常である。しかし、腹板が過大なせん断力を受けて降伏点に達した場合、曲げによる場合と異なり、それ以上の耐荷力は期待できない。特に、桁高に比べて腹板厚が薄ければ、腹板が降伏点に達する前に座屈変形を生じ、低い耐荷力しか期待できない。

プレートガーダーの設計では、腹板厚が薄ければ経済的な断面設計となる。しかし、前述のように、腹板厚が薄ければせん断力に対するガーダーの耐荷力は低下する。このことから、薄い腹板を材料の有するせん断応力の降伏点まで耐えられるように腹板のせん断強度を高めて座屈変形を防止するため、腹板を波型などの形状に加工した波型腹板桁 (Corrugated web girder) は横田 (当時の東京鉄骨橋梁 (株))¹⁾ によって古くから考案されている。

腹板の波型形状とせん断強度の関係が定量的に評価されれば、波型腹板桁は通常のプレートガーダーよりもせん断力に対する合理的な桁と考えられる。しかし、腹板の波型の加工技術、溶接作業、製作費などが制約となり、わが国では島田¹⁾ による波型腹板桁のせん断強度評価を目的とした実験的研究とクレーン用桁として一部使用されている以外、波型腹板桁を対象とした検討例は少ないようである。

* 工博 金沢工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒921 石川県石川郡野々市町扇ヶ丘7番1号)

** (株) 開発計算センター 第二事業部 (〒135 東京都江東区深川2丁目2番18号)

最近、加工技術の進歩などにより、前述のような制約の一部も解放されつつあることから、欧米の特にドイツでは波型腹板桁に対する研究^{2)～4)}が行われるようになってきた。しかし、従来の研究では、波型の形状によるせん断強度や座屈現象の静的挙動の解明が検討課題であり、波型腹板桁の動的特性の評価に関する検討例は未だないのが現状である。波型腹板桁がせん断強度などの増加に期待が持て得るならば、垂直補剛材の不必要、中間対傾構の間隔増大、腹板の面外低周波振動の拘束、あるいはニールセン型ローゼ桁橋で指摘^{5), 6)}されるような斜め吊材の配置効果によって主構のせん断剛性が高まることによる振動軽減や振動減衰性能の向上など、プレートガーダーではあまり期待ができなかった静的・動的の面からの事項にも期待され得るであろう。このことから、今後、構造物の主要部材として通常のプレートガーダーに換わり波型腹板桁が適材適所に使用され得ることも考えられる。そのような場合、波型腹板桁の静的挙動の解明に加えて、動的挙動の解明も重要になるものと思われる。

そこで、本研究では、波型腹板桁に対する適材適所の使用法の可能性を模索する目的から、まず波型腹板桁の基本的な動的特性を把握するための振動実験を実施した。また、同寸法のプレートガーダーに対しても同一な条件で振動実験を行い、両桁の動的特性の相違に検討を加えた。さらに、各要素の拘束条件を3種類変えた波型腹板桁の3次元固有値解析を一つのケーススタディとして行い、各拘束条件における振動モードと固有振動数を明らかにするとともに、それらに対する検討も行った。

2. 振動実験

(1) 実験法とデータ解析

腹板の波型形状は、図-1に示すように、各種考えられる。本研究では、文献2)～4)で主に用いられている形状として図中の台形波型を採用した。そして、桁長に対して腹板高が通常のプレートガーダーに比べて若干大きいのが、実験で用いた波型腹板桁の供試体桁の寸法と波型形状を図-2に示す。本研究では、図-2に示した波型腹板桁の供試体桁を2体と、また同寸法のプレートガーダー1体を製作して振動実験に用いた。

表-1は、振動実験の内容とそのケース名を示している。供試体桁の面内と面外の基本的な動的特性を把握するため、両桁を鉛直と水平に設置し、ピアノ線切断（引張力が280kgfに達した時にピアノ線を切断）に

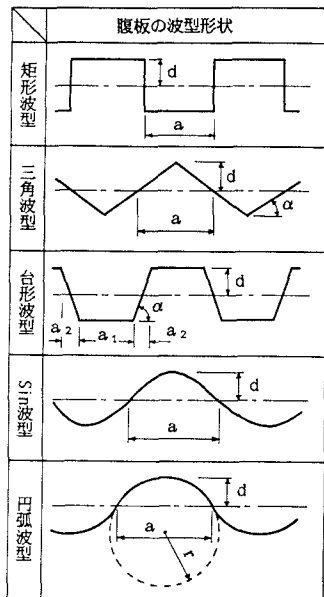


図-1 腹板の波型形状例

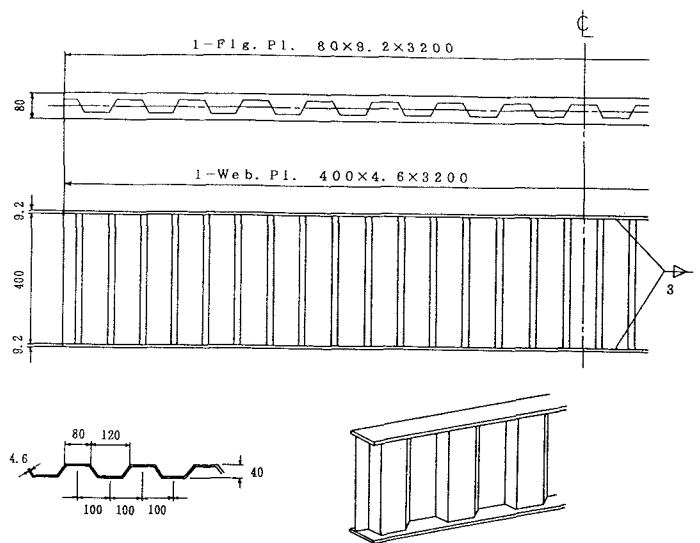


図-2 波型腹板桁の供試体桁 (SS41)

よる衝撃加振、あるいはハンマー加振によって実験を行った。実験ケースCGVKとPGVKは、ジャッキダウンによる引張力を100kgfから280kgfまで各種変えた場合である。なお、波型腹板桁とプレートガーダーに対して同一な実験条件で振動実験を行った。

図-3は、鉛直（面内）方向のCGV1とCGVKケースに対する実験装置を示している。供試体桁の支間長が3m、センサーは10Gの加速度計（東京測器研究所社製のAR-10C）を鉛直方向に5台、水平方向に1台設置した。油圧によるジャッキダウンによって引張されたピアノ線を瞬時に切断して衝撃力を桁に与えた。ジャッキダウンによる引張力と桁のたわみを測定するため、桁中央点にダイヤルゲージも設置している。写真-1は、鉛直方向に対する波型腹板桁の実験風景である。支点部での水平（面外）方向の変位を拘束するために拘束板が設置されている。

表-1 実験内容と実験ケース名

水平（面外）方向のCGHHとPGHHケースに対する実験装置を示したのが図-4である。鉛直方向に対する実験と同様、水平方向に単純支持として6台の10G加速度計を設置し、木製のハンマー加振によって桁に衝撃力を与えた。

測定データの処理として、応答加速度波形は動ひずみ計を介してテクニカルコンピュータ（TEAC社製のPS-9000-332MMA）でAD変換後、フロッピーディスクに収録した。そして、バンドパスフィルターやウインドー処理などの波形の編集後、FFT（高速フーリエ変換法）やMEM（最大エントロピー法）によるスペクトル解析を実施した。

一例として、桁中央点での応答加速度の生波形を示したのが図-5である。図中の(a)は波型腹板桁で、(b)はプレートガーダーの場合である。また、図中の(a)、(b)とも上段と中段は鉛直方向の応答例であり、下段は水平方向の応答例である。衝撃加振後の減衰自由振動波形での最大加速度は波型腹板桁の方がプレートガーダーより小さい特徴が見られる。また、両桁とも供試体桁としての剛性が高かったために応答波形は乱れているが、一般的な傾向として、波型腹板桁はプレートガーダーに比べて応答波形が若干滑らかになっている。特に、実験ケースCGHHとPGHHにその傾向が顕著となっているが、プレートガーダーに添設されている垂直補剛材の配置による影響と考えられる。

実験ケースCGVKとCGHHに対してFFTでスペクトル解析を行った一例を図-6に示す。約100Hzは波型腹板桁の鉛直（面内）曲げ1次を、約13.5Hzは

波型腹板桁	鉛直	ピアノ線切断	CGV1	プレートガーダー	鉛直	ピアノ線切断	PGV1
			CGVK				PGVK
		ハンマー加振	CGVH			ハンマー加振	PGVH
	水平	ハンマー加振	CGHH		水平	ハンマー加振	PGHH

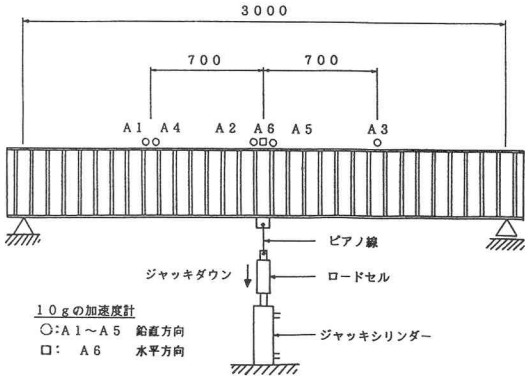


図-3 実験装置（CGV1とCGVKケース）

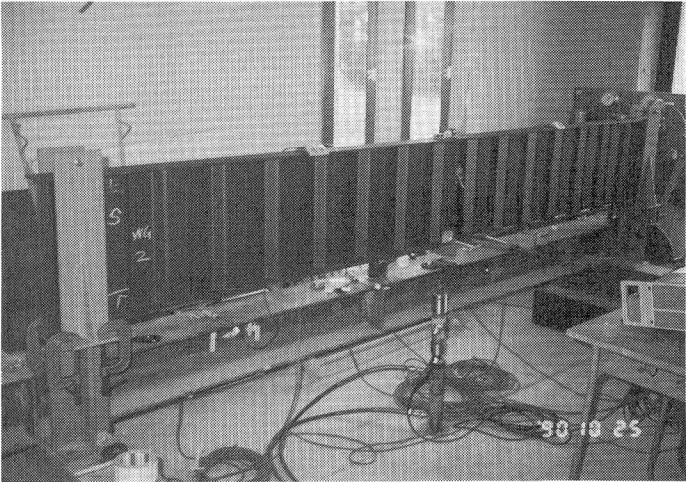


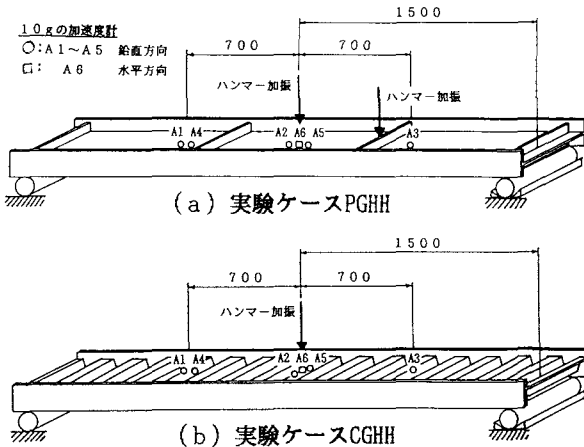
写真-1 波型腹板桁の実験風景

その水平（面外）曲げ1次振動数と思われる。

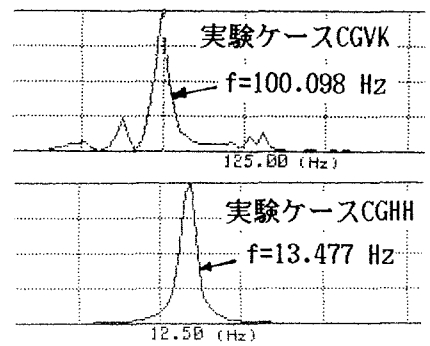
（２）動的特性

F F Tと一部MEMを用いたスペクトル解析の結果として、表－２に波型腹板桁を、表－３にプレートガーダーの場合を示す。両供試体桁の振動数が非常に大きい値となったことは、両桁とも支間長に対して桁高が高く桁全体の剛性が大きいためである。両桁を鉛直に設置したPGVとCGVケースを比較すると、各加振法によって値は変動しているが、一般的に振動数は波型腹板桁の方がプレートガーダーより若干小さい傾向を示している。これは、波型腹板桁に対する曲げ剛性は波型腹板のアコーディオン効果によって面内軸がプレートガーダーと比べて弱軸となることからことからプレートガーダーより面内曲げ剛性が小さくなる^{7)、8)} ことによるものと思われる。また、両桁を水平に設置したPGHとCGHケースの比較では、波型腹板桁の振動数がプレートガーダーに比べて顕著に小さい値を示している。これは、図－５に示した生波形例でも分かる通り、プレートガーダーの $\frac{1}{2}$ と $\frac{3}{2}$ 点に添設されている垂直補剛材の剛性による影響と思われる。

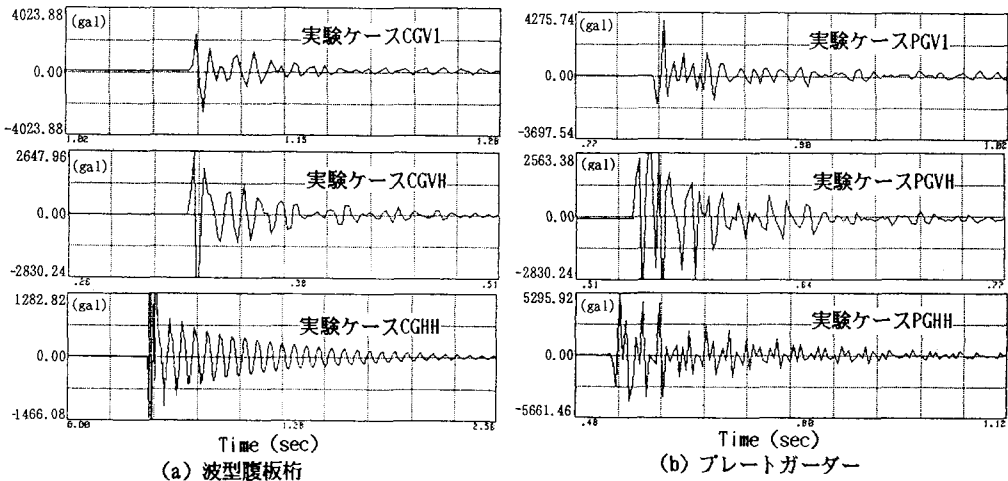
次いで、減衰定数を検討した結果を表－４に示す。表中でのパワースペクトルとは、F F TあるいはMEMでのスペクトル解析から卓越振動数に対して Half Power Methodで減衰定数を算出していることを示している。各実験ケース、あるいは算出方法によって減衰定数の値は変動しており、特に CGVケースのF F Tと



図－４ 実験装置（PGHHとCGHHケース）



図－６ F F Tによるスペクトル解析例



図－５ 中央点での加速度計A₂の応答波形例

生波形では約 2.3 倍の差異がある。これは、図-5 に一例として示した生波形が乱れていることにより正確な減衰定数の算出が困難であったためである。そこで、FFT と MEM での結果を比較した場合、一般的な傾向として、鉛直（面内）と水平（面外）とも波型腹板桁はプレートガーダーより減衰定数の値が大きく、減衰性能にやや優れていることが認められる。

3. 固有値解析

以上のような波型腹板桁の動的特性実験に対する一つのケーススタディとして、図-2 に示した諸元の波型腹板桁の 3 次元固有値解析を実施した。腹板の波型形状を忠実に解析するため、厚みを持つ 4 節点シェル要素としてモデル化した。そして、（株）開発計算センター所有の PATRAN のプリ/ポストプロセッサによって節点数が 1455 個、要素数が 1344 個の自動メッシュを作成した。要素分割の一部を図-7 に示す。固有値（固有振動数）と固有ベクトル（振動モード）の計算は、同社所有の解析プロシジャである ABAQUS を用いて行った。なお、質量マトリックスは分布質量系とし、固有値は Rayleigh-Ritz 法を基準とした繰返し法に基づくサブスペース法で計算した。

表-3 プレートガーダーの基本固有振動数

実験ケース	固有振動数 (Hz)			総平均 (Hz)
	F F T	M E M	平均	
PGV1-2	112.695	111.900	112.298	PGV 103.175
PGV1-3	112.499	—	112.499	
PGVK-1	104.004	—	104.004	
PGVK-2	103.906	—	103.906	
PGVK-3	103.125	—	103.125	
PGVK-4	103.125	—	103.125	
PGVK-5	102.246	100.500	101.373	
PGVH-1	97.850	96.900	97.375	
PGVH-4	95.800	—	95.800	
PGVH-10	98.240	—	98.240	
PGHH-1	86.165	80.786	83.476	PGH 84.398
PGHH-2	86.067	—	86.067	
PGHH-4	86.566	74.357	80.462	
PGHH-5	87.588	—	87.588	

表-4 減衰定数

実験ケース	バースベクトル		生 波 形	平 均
	F F T	M E M		
C G V	0.0198	0.0236	0.0458	0.0297
P G V	0.0181	0.0214	0.0194	0.0196
C G H	0.0153	0.0115	0.0175	0.0148
P G H	0.0047	0.0069	0.0186	0.0101

表-2 波型腹板桁の基本固有振動数

実験ケース	固有振動数 (Hz)			総平均 (Hz)
	F F T	M E M	平均	
CGV1-4	116.845	—	116.845	CGV 101.774
CGV1-5	117.041	116.360	116.701	
CGVK-1	100.586	—	100.586	
CGVK-2	100.098	—	100.098	
CGVK-3	98.926	—	98.926	
CGVK-4	98.731	—	98.731	
CGVK-5	97.754	97.600	97.677	
CGVH-1	95.557	—	95.557	
CGVH-3	95.947	94.260	95.104	
CGVH-4	97.510	—	97.510	
CGHH-1	13.438	—	13.438	CGH 13.401
CGHH-2	13.477	13.250	13.364	

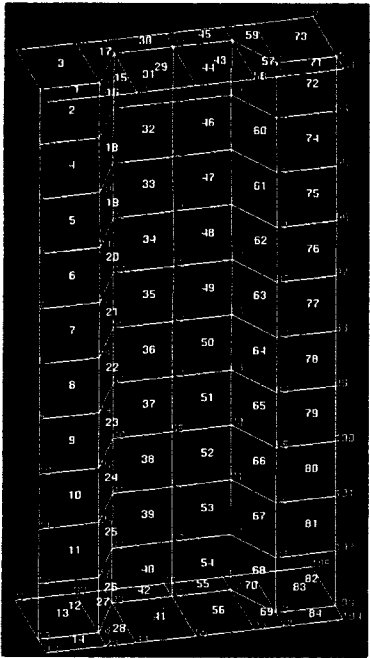


図-7 要素分割の一部

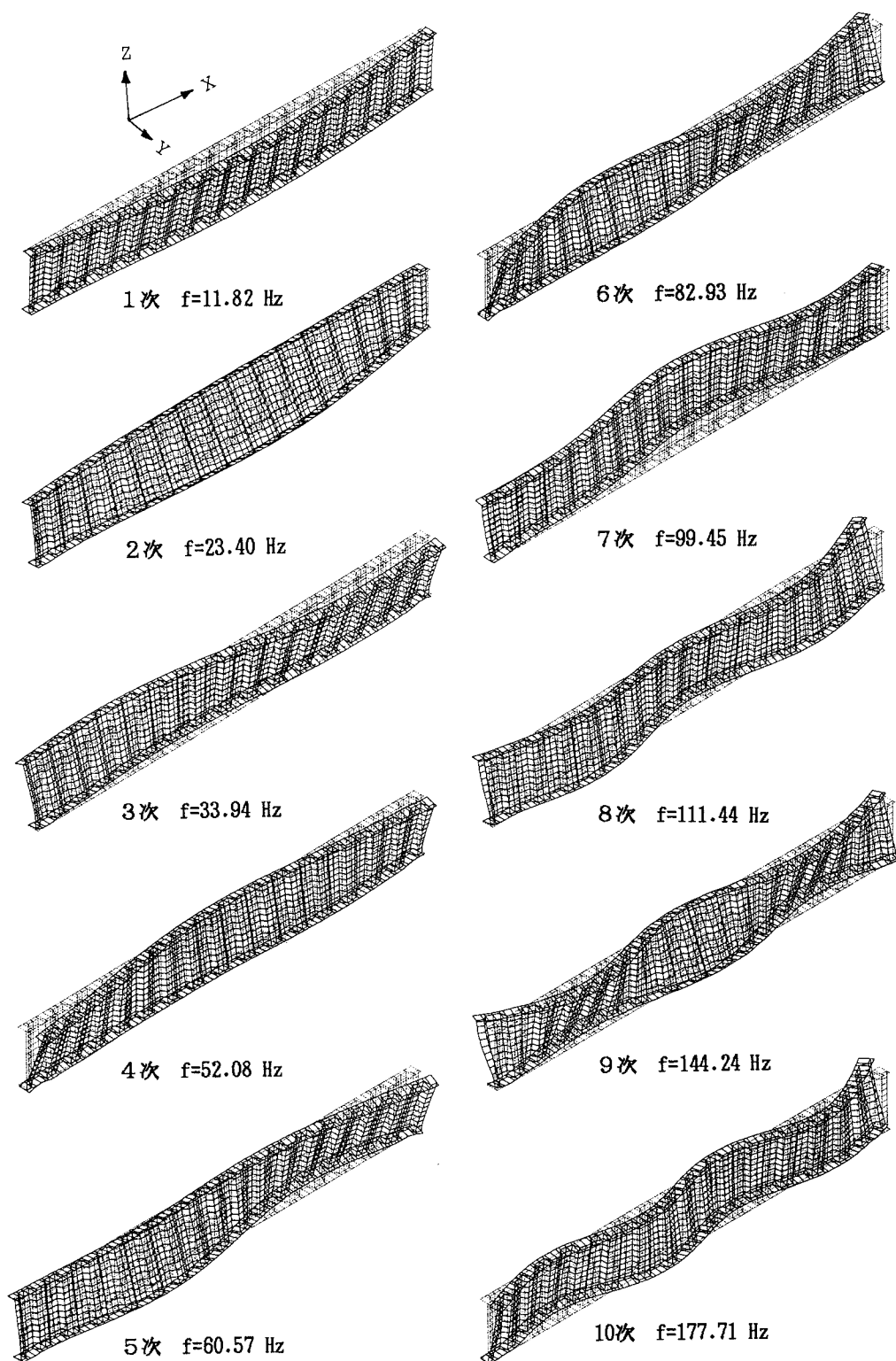


図-8 波型腹板桁の3次元固有値解析例 (CASE-1)

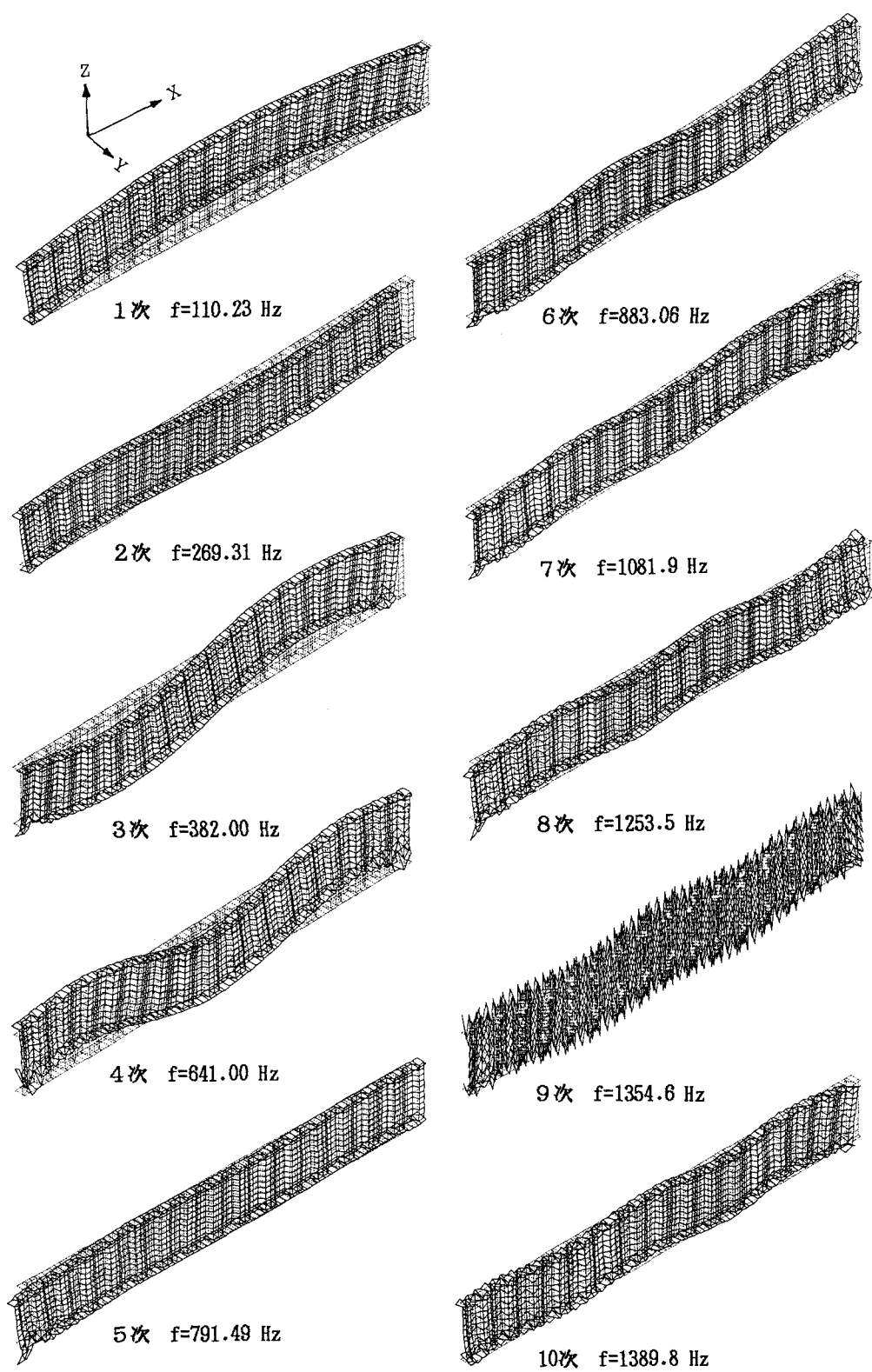


図-9 波型腹板桁の3次元固有値解析例 (CASE-2)

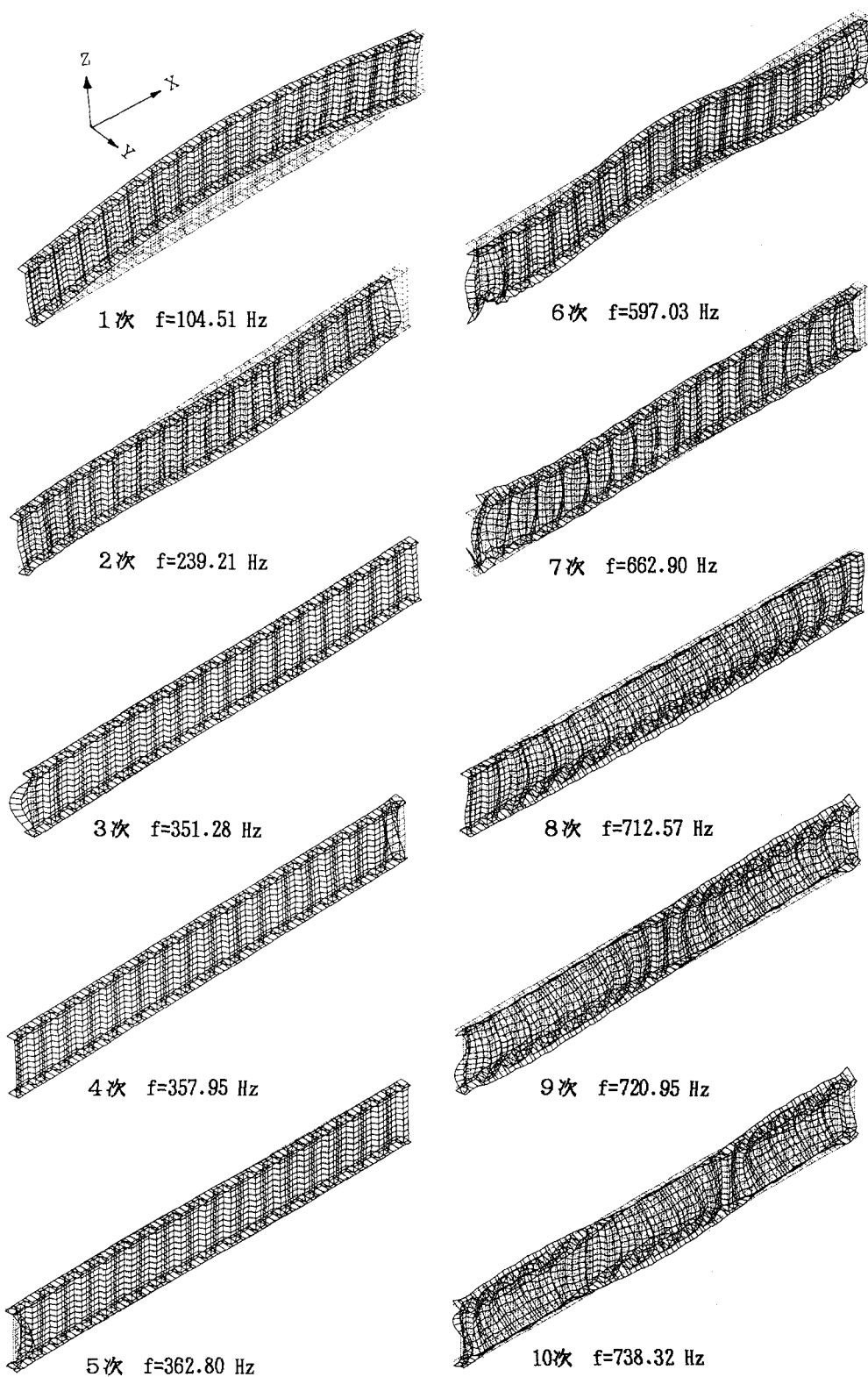


図-10 波型腹板桁の3次元固有値解析例 (CASE-3)

有ベクトルを求めた。

なお、X軸は橋軸方向、Y軸は橋軸直角方向、およびZ軸は鉛直方向である。また、本解析ではCASE-1からCASE-3の検討ケースを行っている。これは、波型腹板桁を主桁として実際に適用する場合、あるいは本振動実験の場合と多少異なる拘束条件と思われるが、波型腹板桁の動的特性に関する基礎的データがほとんどないことから、波型腹板やフランジの拘束などによって動的特性がどのように変化するかを基礎的に検討するための一つのケーススタディとして行ったものである。

図-8はCASE-1に対する計算結果を示している。CASE-1の拘束条件は単純支持部の節点を除く全節点の変位と回転を自由にした場合である。1次振動が水平（面外）曲げ1次の11.82 Hzで、実験ケースCGHHの約13Hzに対応する。なお、両者の値の差異は、実験と解析での拘束条件の相違に起因している。すなわち、実験では上下フランジが単純支持として支点部でのY方向の変位を拘束しているために解析値より若干大きな値となっている。7次振動は鉛直（面内）曲げ1次振動と思われ、99.45 Hzは実験ケースCGVの約100Hz前後の値に相当する。前述のように、両者の値の差異は拘束条件の違いによるものである。

図-9は、単純支持と全節点のY方向変位を拘束しその他を自由としたCASE-2に対する計算結果を示している。拘束条件がCASE-1に比べて強いことから、CASE-1で得た固有振動数は全体的に大きい値となり、また振動モードの性状もかなり異なっている。1次、2次、4次振動が鉛直（面内）曲げ1次、2次、3次振動モードを、3次振動が水平（面外）・ねじれの連成モードとなっている。なお、9次の振動モードが他の次数モードと比べて大きく異なっている。どのような振動モードの性状を示しているのか、あるいは解析上の問題か現在の所不明である。

図-10は、CASE-1とCASE-2の中間的な拘束条件として、単純支持と上下フランジのみY軸方向変位を拘束しその他は自由としたCASE-3に対する計算結果を示している。腹板の変位と回転を自由とした拘束条件であることから、CASE-2に比べて固有振動数は全体的にやや小さい傾向を示している。低次の振動モードはCASE-2とほぼ同様であり、1次、2次、6次振動が鉛直（面内）曲げ1次、2次、3次振動モードである。高次振動になるにつれて複雑な腹板の曲げ、ねじれ、およびそれらの連成した局部振動、および8次、9次、10次振動のように腹板の板としての振動モードなどが認められる。

以上のCASE-1、CASE-2、CASE-3に対する計算結果をまとめたのが表-5である。

4. あとがき

本研究では、波型腹板桁の基本的な動的特性を把握するための振動実験と、拘束条件を3種類変えた3次元固有値解析を実施し、波型腹板桁の基本的な動的特性に対する検討を行った。

現時点で得られた振動実験の結果として、波型腹板桁はプレートガーダーと比べて、以下のような事項を指摘することができるものと思われる。

- ① 鉛直（面内）の減衰自由振動時の最大加速度が若干小さい傾向がある。
- ② プレートガーダーの垂直補剛材の剛性によっても異なるものと思われるが、本振動実験から、鉛直（面内）と水平（面外）曲げ振動数が若干小さい傾向がある。

表-5 波型腹板桁の固有値解析結果

振動 次数	固有振動数 (Hz)		
	CASE-1	CASE-2	CASE-3
1	11.82	110.23	104.51
2	23.40	269.31	239.21
3	33.94	382.00	351.28
4	52.08	641.00	357.95
5	60.57	791.49	362.80
6	82.93	883.06	597.03
7	99.45	1081.9	662.90
8	111.4	1253.5	712.57
9	144.2	1354.6	720.95
10	177.7	1389.8	738.32

CASE-1：全節点自由（X, Y, Z軸変位自由、回転自由）

CASE-2：全節点、Y軸変位固定。その他自由

CASE-3：上下フランジのみY軸変位固定。その他自由

- ③ F F TとMEMに基づくHalf-Power Methodで求めた減衰定数から評価して、鉛直（面内）よりも水平（面外）振動の減衰性能に優れている傾向がある。

一つのケーススタディとして拘束条件を変えて行った波型腹板桁の3次元固有値解析から、波型腹板桁に対して、以下のような事が指摘できるものと思われる。

- ① 波型腹板やフランジの拘束条件の違いによって固有振動数や振動モードの動的特性が大きく異なる。
② 高次振動の場合にはねじり、あるいは曲げとねじりが連成した腹板の局所的な振動も見いだされる。

今回の実験では、供試体桁の製作と波型形状に若干の改良点が残りと、腹板の水平振動や騒音測定などプレートガーダーとの相違についても検討する必要があると思われる。解析的にも3次元固有値解析に基づく波型腹板桁とプレートガーダーの動的特性の比較検討も必要である。また、本研究での検討は台形型の腹板に対するワンサンプルであり、各種の波型形状と動的特性の関係、あるいは移動荷重による動的応答特性など振動実験に加えて解析的にも動的挙動を把握していく必要がある。波型腹板桁に対して、構造物の主要部材としての適材適所の使用方法の可能性を模索するために、今後の検討課題としたい。

なお、波型腹板桁の静的挙動に対する検討も、当大学で実施されており、また桁長、桁高、板厚および波型の形状を変えた波型腹板桁に対する静的・動的挙動の検討も引き続き実施されていることを付記する。

最後に、供試体桁の製作に御協力を賜りました川田工業(株)富山本社の水木 章氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 島田静雄：Ripple web girderによる鋼板のせん断試験、土木学会論文集、No.124、pp.1～10、1965年12月。
- 2) Herzog, M : Leichtträger mit Faltensteg, Stahlbau, Nr.57, H.8, S.246～247, August, 1988.
- 3) Kähönen, A : Zur Einleitung von Einzellasten in I-Träger mit trapezförmig pfilierten Stegen, Stahlbau, Nr.57, H.8, S.250～252, August, 1988.
- 4) Lindner, J. unt Aschinger, R. : Grenzschrubtragfähigkeit von I-Trägern mit trapezförmig pfilierten Stegen, Stahlbau, Nr.57, H.12, S.377～380, Dezember, 1988.
- 5) 高木澄清・玉川 正・益田正雄・永井晋也・是松雅雄：安芸大橋（ニールセン型ローゼ桁橋）の実験報告、土木学会論文報告集、No.177、pp.1～8、1970年5月。
- 6) 本田秀行・小堀為雄：実験計画法によるローゼ桁橋の振動軽減評価、土木学会論文報告集、No.301、pp.37～46、1980年6月。
- 7) 猪股俊司：新しい分野でのPCの活用／プレストレスされた鋼・コンクリート組合せ橋梁－鋼・コンクリート合成構造の最近の話題－、プレストレストコンクリート技術協会、pp.1～21、1988年2月。
- 8) 服部政昭・大浦 隆：波型鋼板ウェブを用いたPC単純桁の一試設計、プレストレストコンクリート技術協会第2回シンポジウム論文集、pp.53～58、1991年11月。

(1991年9月30日受付)