

(138) 波形鋼板ウェブP C箱桁橋のねじり及びせん断剛性の評価に関する研究

ドーピー建設工業(株) 技術センター 正会員 ○上平 謙二  
 " 正会員 立神 久雄  
 金沢工業大学 土木工学科 本田 秀行  
 大阪市立大学 工学部 土木工学科 園田恵一郎

1. はじめに

ウェブに波形鋼板を用いたP C箱桁橋は、波形鋼板のアコーディオン効果により、上下コンクリート床版へのプレストレスの導入が効果的に行え、また、自重の軽減が図れるなど合理的な複合P C橋梁としての位置を確立しつつある。

本橋梁のオリジナルは欧州において生まれたものであるが、我が国においても注目され、既に2橋建設されており、その力学的特性についての種々な研究成果も発表されている。本橋梁の断面は上下のコンクリートフランジと波形鋼板ウェブから構成されているが、その曲げ特性については、上下のコンクリートフランジのみで抵抗する曲げ部材として、いわゆる平面保持の仮定に基づく通常のはり理論で十分に評価できるといわれている。一方、せん断及びねじり特性については、まだ曲げ特性ほど明らかになってはいない。

本研究では、せん断変形に敏感な影響を与えるウェブ鋼板の波形形状や箱桁の断面形状を変えたときのせん断及びねじり特性を調べ、得られた結果を設計のために利用し易い形にまとめている。

2. 解析モデル

2.1 解析対象構造

解析の対象とした構造は、図-1に示すようにせん断及びねじりが卓越する連続桁の中間支点近傍に着目し、一般的な中規模径間P C橋の外ケーブル構造におけるデビエータ間隔に相当する剛な隔壁間で囲まれた一部材を片持ち張出し構造としたものである。張出し長さは、波形鋼板の形状を考慮して15.68 mとした。また、箱桁断面形状は、既の実績をもつ橋梁より推定される適用範囲内での床版寸法ならびに波形鋼板寸法から設定し、図-2に示すように上床版幅を10 m、下床版幅を6 mとし、床版中心高さについては、波形鋼板のせん断やねじり変形の影響を考慮するため、2 m、4 m及び6 mと変化させた。また、部材厚は上床版を30 c m、下床版を25 c m、そして波形鋼板を10 m mとした。

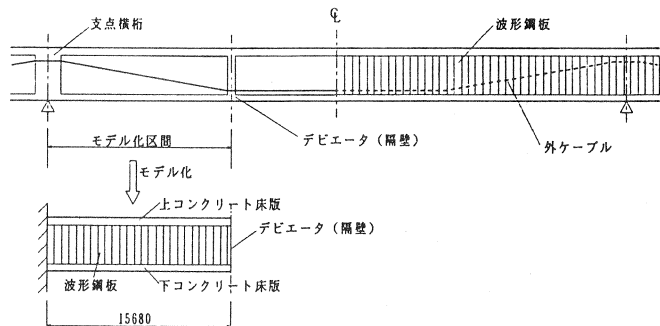


図-1 解析構造系のモデル化

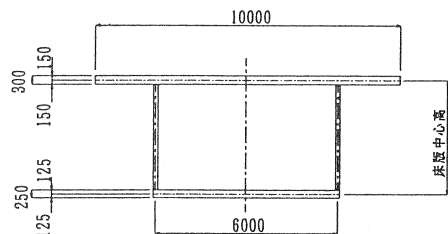


図-2 断面形状

2.2 解析モデル

解析モデルは図-3に示すように、上下のコンクリート床版及び波形鋼板をシェルモデルとした3次元有限要素解析モデルとした。すなわち、本モデルでは、上下コンクリート床版の厚みは要素の曲げ剛性と膜剛性によって考慮されており、波形鋼板についてはその形状及び応力の伝達機構を明確にするため、波形を忠実にモデル化し要素分割した。また、片持ち先端部には

外ケーブル偏向のためのデビエータを想定した剛性の高い隔壁を設けた。要素分割に際しては、事前解析を実施し本検討目的に準じた解析精度を得られる分割数とし、X方向には波形鋼板の波の形状に合わせ57分割、Y方向には10分割及びZ方向には6分割した。

波形鋼板の波の形状については、既往の実橋調査から波形鋼板の水平長と実長の比の関係を調べると、その比はほぼ0.90から95の間に入っている。従って、本解析では波形鋼板の波の形状を図-4に示すように、その最小値( $\gamma=0.892$ )と最大値( $\gamma=0.967$ )及び中間値( $\gamma=0.933$ )の3種類を考慮し解析に反映させた。解析に用いた解析モデルの各部材の材料の特性を表-1に示す。

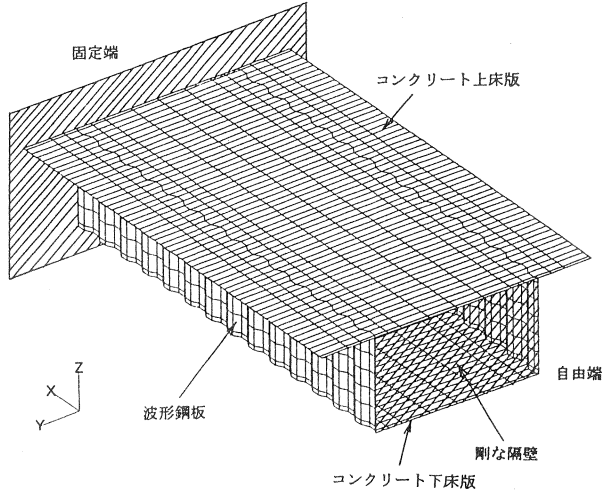


図-3 FEM解析モデルと要素分割

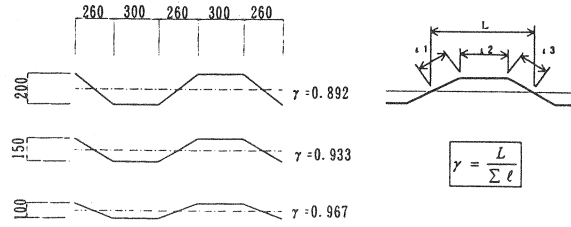


図-4 解析に用いた波形鋼板形状

### 3. 解析の種類

解析の種類と荷重強度との関係を表-2に示し、荷重の載荷方法を図-5に示す。

ねじり変形挙動については、波形鋼板の波の形状及び高さの変化によって、波形鋼板とコンクリート床版にどのようにねじりせん断力応力が伝達されるかを把握するため、波形鋼板の高さを変えた3ケースに対して波形鋼板の波の形状を変えた3ケースを考慮し、計9ケースの解析ケースを設けた。この場合のねじり載荷方法については、片持ち先端の剛な隔壁を回転させることによって与えた。このねじりモーメントの載荷強度については、道路橋示方書に示されているねじりせん断応力度の算定式に代入し、上下のコンクリート床版のせん断応力度が設計荷重作用時の許容応力度以下となるよう、5kgf/cm<sup>2</sup>程度に設定し決定したものである。

また、せん断変形挙動については、せん断力は波形鋼板に沿って伝達されるという挙動形態が明らかになっているため、波形鋼板の波の形状を一定にし、載荷荷重形態の相違によってどのようにせん断変形挙動が異なるかを把握することを目的として、6ケースの解析ケースを設けた。載荷荷重の種類としては集中荷重と等分布荷重とし、図-5に示すよ

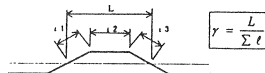
表-1 材料の特性

使用材料	ヤング係数 (tf/m <sup>2</sup> )	ポアソン比
コンクリート	3.10E+06	0.167
波形鋼板	2.10E+07	0.3

表-2 解析の種類

解析ケース	床版中心高	波形鋼板形状	荷重の種類	荷重強度
ねじり載荷	C-2-T-0.892	2.0 m	$\gamma = 0.892$	ねじりモーメント T = 300 tf·m
	C-2-T-0.933	"	$\gamma = 0.933$	"
	C-2-T-0.967	"	$\gamma = 0.967$	"
	C-4-T-0.892	4.0 m	$\gamma = 0.892$	" T = 600 tf·m
	C-4-T-0.933	"	$\gamma = 0.933$	"
	C-4-T-0.967	"	$\gamma = 0.967$	"
せん断載荷	C-6-T-0.892	6.0 m	$\gamma = 0.892$	" T = 900 tf·m
	C-6-T-0.933	"	$\gamma = 0.933$	"
	C-6-T-0.967	"	$\gamma = 0.967$	"
	C-2-P-0.933	2.0 m	$\gamma = 0.933$	先端集中荷重 P = 100 tf
	C-2-w-0.933	"	"	等分布荷重 ※ w = 3.333 tf/m
	C-4-P-0.933	4.0 m	"	先端集中荷重 P = 200 tf
せん断載荷	C-4-w-0.933	"	"	等分布荷重 ※ w = 6.667 tf/m
	C-6-P-0.933	6.0 m	"	先端集中荷重 P = 300 tf
C-6-w-0.933	"	"	等分布荷重 ※ w = 10.0 tf/m	

※ 分布荷重強度は、1列の等分布荷重の強度である。



うに集中荷重は張出し先端の隔壁中心に荷重した。また、等分布荷重については、波形鋼板位置に隣接するコンクリート床版の要素線上に4ヶ所に分けて荷重した。荷重強度については、上下のコンクリート床版のみの曲げ剛性を用いて計算した固定端のコンクリート床版上縁応力度が、引張りで30kgf/cm<sup>2</sup>程度発生するように想定し決定したものである。

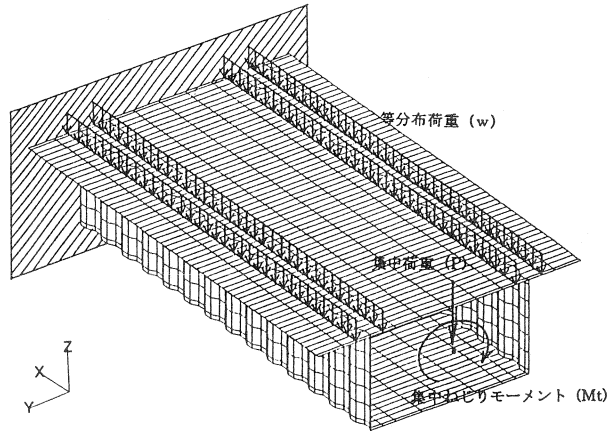
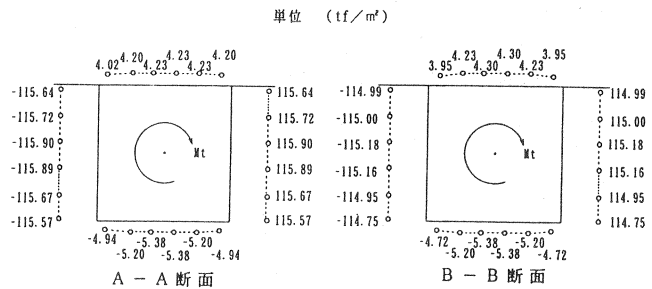
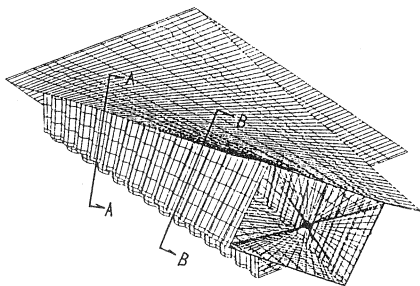


図-5 荷重の載荷方法

4. ねじり変形特性に関する評価

4.1 解析結果

ねじり変形とねじりせん断応力度分布の一例を図-6に示すが、ねじり角が線形関係に



ねじりせん断応力度分布図

図-6 ねじり変形図とねじりせん断応力度分布

あり、純ねじり理論が適用できることを確認している。

ねじり特性については、一般的にねじり剛性とねじりせん断応力度で評価できる。波形鋼板ウェブPC箱桁橋の場合、ねじり剛性に関連するねじり定数とねじりせん断応力度については、純ねじり下での閉断面薄肉理論に基づく道路橋示方書の式(1)式と筆者らの提案式(2)式に従って計算できる。

$$\tau = \frac{M_t}{2 \cdot A_m \cdot t} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\tau$  : ねじりせん断応力度、 $M_t$  : ねじりモーメント、 $A_m$  : ボックス断面積 (=  $b_1 \cdot h_1$ )  
 $b_1$  : ウェブ中心幅                       $h_1$  : 床版中心高

$$J_t = \frac{4A_m^2}{\left( \frac{h_1}{n_s \cdot t_1} + \frac{b_1}{t_2} + \frac{h_1}{n_s \cdot t_3} + \frac{b_1}{t_4} \right)} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $J_t$  : ねじり定数、 $A_m$  : ボックス断面積 (=  $b_1 \cdot h_1$ )、 $b_1$  : ウェブ中心幅  
 $h_1$  : 床版中心高、 $t$  : 各部材厚さ、 $n_s$  :  $G_s / G_c$   
 $G_s$  : 鋼のせん断弾性係数、 $G_c$  : コンクリートのせん断弾性係数

この(1)式を用いて計算したねじりせん断応力度に対し、解析値と比較した結果を表-3に示す。ここに示したねじりせん断応力度は、橋軸方向の各断面で波形鋼板及びコンクリート床版ともそれぞれほぼ一定

な応力度状態となること、また、特に波形鋼板については、ねじりせん断応力度を計算する際の箱桁断面積の幅を波形鋼板の波の中心位置とすることから、せん断応力度の抽出は斜め鋼板の応力度とし、それらの応力状態の中での各部材の最大応力度とした。

結果から解るように、波形鋼板の波の形状の影響よりも波形鋼板の高さの影響の方が支配的で、高さが高くなるにつれ計算値とFEM解析値との差が大きく、波形鋼板の高さが

高くなるにつれ波形鋼板については解析値のほうが小さく、一方、コンクリート床版については逆に解析値のほうが大きくなる傾向を示している。これは、波形鋼板のせん断変形能力が大きく、波形鋼板の高さが高くなればなるほど力が剛性の高いコンクリートの方に分担されるためであろうと推測できる。

4.2 ねじりに関する剛性評価式の提案

(1) ねじりせん断応力度の評価式

ねじりせん断応力度は、前述の(1)式で表現できるものとし、筆者らは式中の部材厚を換算する方法として(3)式のような新たな評価式を提案した。

$$\tau = \frac{M_t}{2 \cdot A_m \cdot t \cdot (1 + \alpha)} \quad (\text{波形鋼板}) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\tau = \frac{M_t}{2 \cdot A_m \cdot t \cdot (1 - \alpha)} \quad (\text{コンクリート床版})$$

- ここに、 $\tau$  : ねじりせん断応力度
- $M_t$  : ねじりモーメント
- $A_m$  : ボックス断面積 (=  $b_1 \cdot h_1$ )
- $b_1$  : ウェブ中心幅
- $h_1$  : 床版中心高
- $t$  : 各部材の厚さ
- $\alpha$  : 修正係数

ここで、FEM解析結果より、箱桁断面の高さと幅の比として表わされる  $h_1/b_1$  の変化によって、波形鋼板とコンクリート床版に生じるねじりせん断応力度の分担が変わることから、その分担率を考慮できる修正係数  $\alpha$  を導入し、波形鋼板については

( $1 + \alpha$ )、コンクリート床版については

( $1 - \alpha$ )としてそれぞれ分担させることとした。従って、(3)式の評価式においては、修正係数  $\alpha$  を決定すればよいことになる。このことを考慮して、箱桁断面の内側鋼板、斜め鋼板及び外側鋼板の各部材の最大応力度と実際に载荷したねじりモーメントから、(3)式を用いて修正係数  $\alpha$  を求めると図-6のような分布となる。この図から、箱桁断面の桁高 ( $h_1$ ) と幅 ( $b_1$ ) の比 ( $h_1/b_1$ ) に対する  $\alpha$  の値はほぼ線形と考えてよく、この  $\alpha$  は(4)式のように定義できる。

表-3 ねじりせん断応力度の比較

解析ケース	波形鋼板			コンクリート上床版			コンクリート下床版		
	FEM	計算	②	FEM	計算	②	FEM	計算	②
	①	②	①	①	②	①	①	②	①
C-2-T-0.892	1149	1250	1.088	45	42	0.933	54	50	0.926
C-2-T-0.933	1159	"	1.079	45	"	0.933	54	"	0.926
C-2-T-0.967	1166	"	1.072	45	"	0.933	54	"	0.926
C-4-T-0.892	1022	"	1.223	54	"	0.778	64	"	0.781
C-4-T-0.933	1031	"	1.212	54	"	0.778	63	"	0.794
C-4-T-0.967	1037	"	1.205	54	"	0.778	62	"	0.806
C-6-T-0.892	908	"	1.377	62	"	0.677	76	"	0.658
C-6-T-0.933	918	"	1.362	62	"	0.677	75	"	0.667
C-6-T-0.967	925	"	1.351	62	"	0.677	75	"	0.667

但し、表中のFEMはFEM解析値を示し、計算は(2)式を用いて計算した値である。

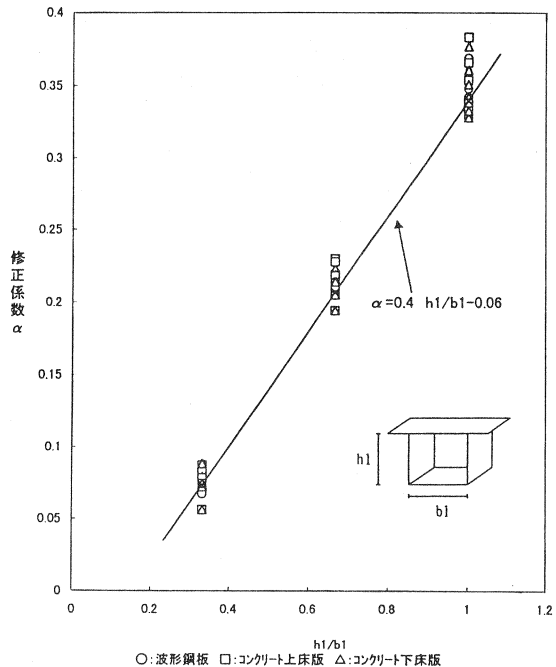


図-6 各部材の修正係数分布

$$\alpha = 0.4 \cdot \frac{h_1}{b_1} - 0.06 \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\alpha$  : 修正係数、  $b_1$  : 波形鋼板高、  $h_1$  : 床版中心高

この(4)式から計算される修正係数 $\alpha$ を用いて(3)式よりねじりせん断応力度を計算し、FEM解析値と比較すると箱桁断面の形状や波形鋼板の波の形状に関わらず両者はよく一致した。

(2) ねじり定数の評価式

ねじり定数の評価についても、ねじりせん断応力度と同様な方法で(2)式中の部材厚を換算する方法として、ねじり定数に対して(5)式のような新たな評価式を提案した。

$$J_t = \frac{4A_m^2}{\left(\frac{h_1}{n_s \cdot t_1(1+\alpha)} + \frac{b_1}{t_2(1-\alpha)} + \frac{h_1}{n_s \cdot t_3(1+\alpha)} + \frac{b_1}{t_4(1-\alpha)}\right)} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $J_t$  : ねじり定数、  $A_m$  : ボックス断面積 (=  $b_1 \cdot h_1$ )、  $b_1$  : 波形鋼板高  
 $h_1$  : 床版中心高、  $t$  : 各部材厚さ、  $n_s$  :  $G_s / G_c$   
 $G_s$  : 鋼のせん断弾性係数、  $G_c$  : コンクリートのせん断弾性係数  
 $\alpha$  : 修正係数

ここで用いた修正係数 $\alpha$ は(4)式より与えられるものである。勿論、この $\alpha$ についてはねじりせん断応力度の場合と同様、波形鋼板の場合は(1 +  $\alpha$ )を用い、コンクリート床版の場合は(1 -  $\alpha$ )を用いてそれぞれ分担させることとする。ここで提案した(5)式を用いてねじりモーメントを計算し、実際に载荷したねじりモーメントと比較すると表-4のようになる。この結果からも、計算値と良い一致を示していることが解る。

表-4 修正係数を用いたねじりモーメントの比較

解析ケース	ねじり率 (rad/m)	ねじりモーメント(tf·m)		①/②
		計算値①	載荷値②	
C-2-T-0.892	4.327×10 <sup>-5</sup>	304	300	1.01
C-2-T-0.933	4.216×10 <sup>-5</sup>	294	"	0.98
C-2-T-0.967	4.130×10 <sup>-5</sup>	291	"	0.97
C-4-T-0.892	3.290×10 <sup>-5</sup>	623	600	1.04
C-4-T-0.933	3.201×10 <sup>-5</sup>	613	"	1.02
C-4-T-0.967	3.131×10 <sup>-5</sup>	600	"	1.00
C-6-T-0.892	2.770×10 <sup>-5</sup>	892	900	0.99
C-6-T-0.933	2.696×10 <sup>-5</sup>	872	"	0.97
C-6-T-0.967	2.638×10 <sup>-5</sup>	863	"	0.96

このように、ねじり特性に関するねじり定数とねじりせん断応力度については、通常PC橋の設計の際に用いている道路橋示方書・コンクリート橋編の式に修正係数 $\alpha$ を導入することにより、簡単に精度良く評価できることが解った。

5. せん断変形特性に関する評価

5.1 解析結果

FEM解析結果とはり理論による解析結果から得られた変形量の比較を図-7に示す。破線のFEM解析結果から得られた変形量については、ウェブ位置での上床版と下床版の平均値として抽出したものである。また、実線は、はり理論による計算から得られた変形曲線である。この場合の剛性評価として、曲げに対して

$$GA = G \cdot h \cdot t \cdot \gamma \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $h$  : 波形鋼板の高さ、  $t$  : 波形鋼板の板厚、  
 $\gamma$  : 形状係数 (=  $L / \Sigma t$ )、  $L$  : 波形鋼板の水平長さ  
 $\Sigma t$  : 波形鋼板の実長

はコンクリート床版のみを考慮した剛性評価を行い、せん断に対しては、(6)式に示すように波形鋼板のみを考慮してせん断剛性を板厚換算して計算している。結果から、FEM解析値とはり理論による計算値は荷重の種類に関係なく非常に良く一致しており、せん断変形に対しては、ここで提案した換算板厚によるせん断剛性を用いれば良いことが解る。

### 6. まとめ

本解析結果から、波形鋼板の高さや波の形状の変化に対する箱桁断面のねじり挙動及び波形鋼板の高さや荷重の種類に対するせん断挙動に対し、以下に示す結果を得た。

1) 波形鋼板をウェブに用いたPC箱桁橋のねじり特性に対し、箱桁の断面形状を考慮できる修正係数 $\alpha$ を導入した(3)式及び(5)式を用いることにより、箱桁断面形状や波形

鋼板の波の形状を考慮したねじり定数やねじりせん断応力度を精度よく算できることが解った。

2) せん断変形は、(6)式に示すように、波形鋼板の形状に関する係数( $\gamma$ )を導入したせん断剛性を用いることにより、波形鋼板の高さや載荷荷重の種類に関係なくせん断変形量を精度良く計算できることが解った。

### 謝 辞

本FEM解析を実施するにあたり、金沢工業大学大学院生の新谷英司君の多大なるご協力を戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 依田照彦、大浦 隆：波形鋼板ウェブを用いた合成PC箱桁のねじり特性について、構造工学論文集、Vol.39A、pp.1251~1258、1993
- 2) 立神久雄、上平謙二：ウェブに波形鋼板を用いたボックス桁の力学的特性、第3回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp. 187~192、平成4年
- 3) 谷口 望、中島 陽、依田照彦：波形鋼板ウェブを持つ合成桁の簡易曲げ解析法に関する研究、第51回土木学会年次学術講演概要集、pp.884~885、1996年
- 4) 上平謙二、立神久雄、本田秀行、園田恵一郎：波形鋼板ウェブPC箱桁のねじり剛性の評価方法に関する研究、第51回土木学会年次学術講演概要集、pp.178~179、1996年9月
- 5) 泉 満明：ねじりを受けるコンクリート部材の設計法、技報堂、pp.25~74、昭和50年8月

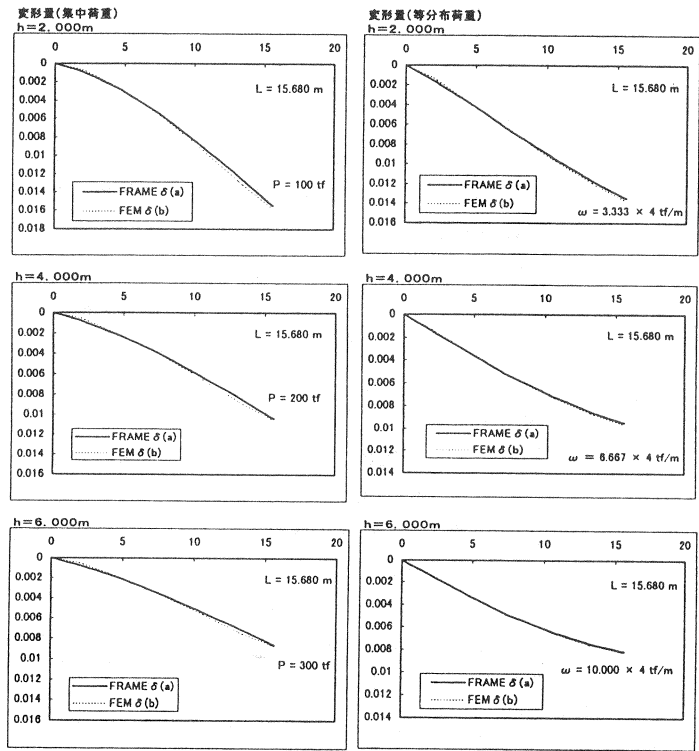


図-7 各荷重による変形図