

鋼波型腹板桁の静的挙動に関する基礎的研究

BENDING AND TORSIONAL BEHAVIOR OF BEAMS AND GIRDERS WITH CORRUGATED WEBS

西田 進*、前川 幸次**、水木 彰***

Susumu NISHIDA, Kouzi MAEGAWA and Akira MIZUKI

- * 工博 金沢工業大学教授 土木工学科 (〒921 野々市町扇が丘7番1号)
 ** 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920 小立野2丁目40番20号)
 *** 川田工業株式会社 富山工場 (〒939-15 富山県福野町苗島6410)

The use of corrugated webs is a possible way of achieving adequate out-of-plane stiffness without recourse to using stiffeners or thicker webs. Economical design of beams and girders normally requires thin webs. The conventional welding of stiffeners to allow the use of thin webs has too disadvantages. The first is a high fabrication cost, and the second is a reduced fatigue life. Owing to the advancement in welding technology, pre-manufactured beams with built-up sections are, however, gradually replacing beams made of rolled shapes. Two girders and three beams were tested to investigate the load-deflection relations and the buckling load behavior under two concentrated load at the $L/3$ points. And, stress distribution of the web for girders with or without corrugated webs are compared by experiment and numerical analysis by MARC.

Key Words: beam with corrugated web, bending, stress distribution, buckling

1. まえがき

鋼の薄板を溶接して製作するプレート・ガーダー（以下、板桁という）は一般に曲げに対して上下フランジが、せん断に対してウェブが抵抗するため、その断面設計において、桁高を高く、ウェブを薄くした方がより経済的となる。この前提条件として、板桁の横倒れ座屈とウェブのせん断座屈を拘束する必要がある。このため、一般に横倒れ座屈に対しては中間対傾構を、せん断座屈に対しては垂直補剛材を適切に配置するのが原則である。この原則に代るものとして、ウェブを波型に加工した波型腹板桁（以下、波桁という）が考案され、この波型ウェブを有するはりや桁は補剛材の溶接の必要が無いため製作や疲労寿命の面から有利である¹⁾。なお、鋼波型ウェブに関する研究は、文献1)に総括されているようにドイツ、フランス等でも行なわれ、モープレ高架橋（複合構造）として一部、実用化されている。

本研究では桁タイプの板桁および波桁各1体、およびはりタイプの板桁および2種類の波桁各1体を製作し、波桁の使用荷重状態での曲げ変形挙動、ねじり変形挙動を調査するとともに、横倒れ座屈実験も行なう。そして、波桁と通常の板桁との比較検討を行なって、波桁の特性を把握するものである。また、波桁ウェブはそのアコーディオン効果により曲げに対して抵抗しないといわれてい

る²⁾ため、ウェブに3方向ひずみゲージを張り付け、ウェブの曲げ応力およびせん断応力分布の検討も行なうものである。なお、波桁の横断面形状の非対称性より、その変形は3次元挙動をすると推測されるので、汎用解析コードMARCを用いた3次元弾性解析を行なってウェブの曲げ応力分布およびせん断応力分布の数値計算も行なうものである。

なお、ウェブの補剛材の必要性の有無によって、一般にはりと桁を区別しているが、ここでは波型ウェブの特性を考慮して、桁高/フランジ幅の大きいものを桁タイプ、小さいものをはりタイプとする。また、残留応力の影響については、今回、検討の対象外とする。

2. 鋼波型腹板桁の曲げ試験

2.1 供試体および実験方法

軟鋼（材質 SS400）の薄板を溶接して図-1に示す標準断面 I-172x80x3.2x6mm、長さ3.2mなるはりタイプの板桁1体、波桁2体を製作し、スパン長 $L=3$ mの単純ばりとして、曲げ試験を行なうものである。試験桁の断面寸法を測定した後、静的試験用骨組内にセットし、圧縮フランジ上に5tfジャッキを用いて2点集中荷重を作用させた。桁の変位およびヒズミは荷重約50kgf増分ごとに変位計、ダイヤルゲージおよびヒズミゲージを用

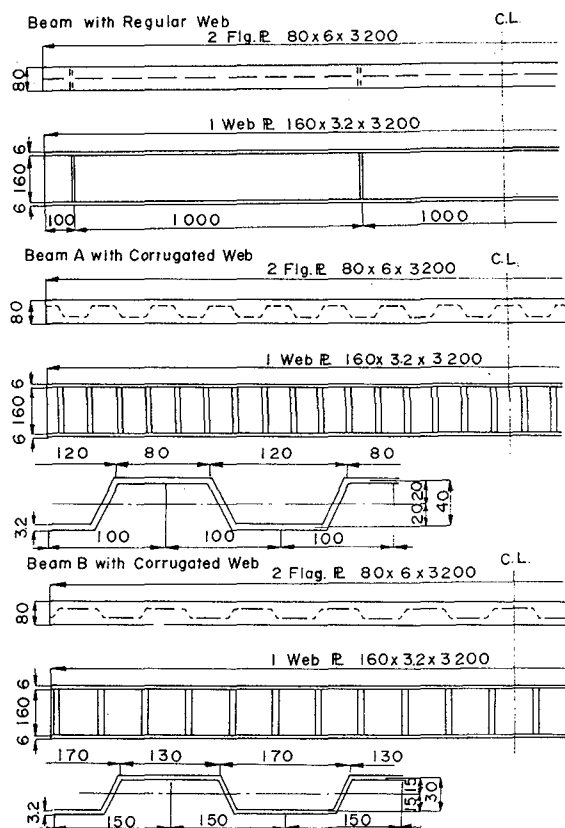


図-1 板桁および波桁の断面寸法（はりタイプ）

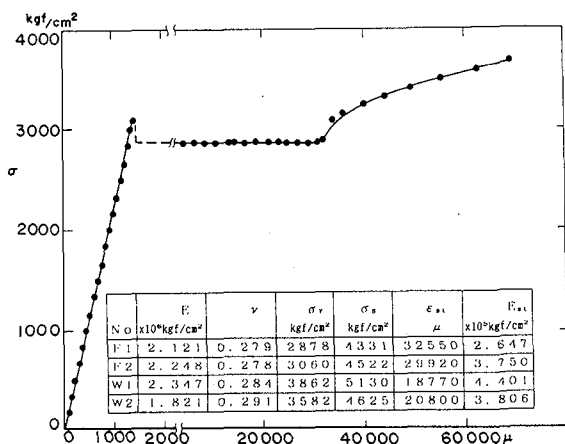


図-2 使用鋼材の引張試験結果（はりタイプ）

いて測定する。なお、試験桁の端部の支持方法は鉛直変位 v および水平変位 u に対して単純支持とし、端部でのねじり角 ϕ を拘束し、そりは自由とした。

図-2はフランジより切り出したF1試験片の応力とヒズミ（弾性ヒズミはヒズミゲージにより、塑性ヒズミは大きいダイアルゲージを用いて測定した）の関係を示し、図中にフランジおよびウェブに使用した鋼材から切り出したJIS2号試験片の引張試験結果を示してある。なお、数値計算にはフランジ部の値（F1およびF2）の平均値を用いるものとする。

図-3は標準断面 I-412x80x3.2x6mm、長さ6.2mなる桁タイプの供試体の断面寸法を、図-4はウェブより

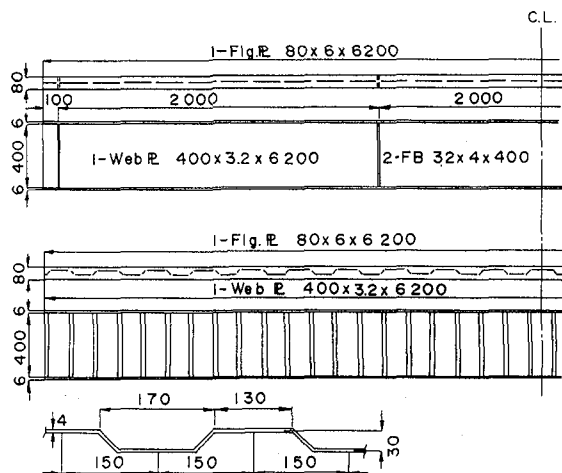


図-3 板桁および波桁の断面寸法（桁タイプ）

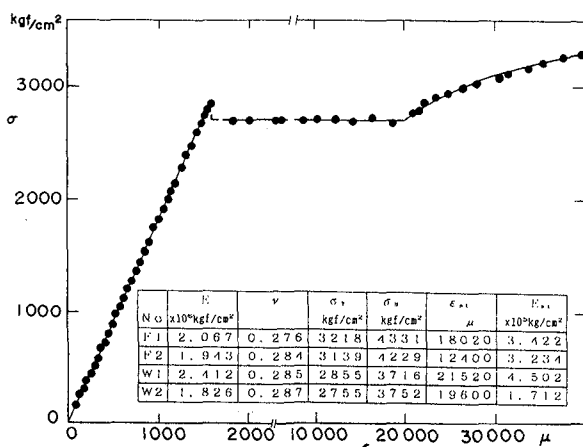


図-4 使用鋼材の引張試験結果（桁タイプ）

切り出したW2試験片の引張試験結果である。図-5は波桁ウェブのフランジ中心からのずれを αb とした場合の弱軸回りの断面2次モーメント I_y およびそり2次モーメント I_w を示してある。また、強軸回りの断面2次モーメント I_x は波桁ウェブのアコーディオン効果²⁾を考慮する場合は図中の I_x' を用いるものとする。

2.2 曲げ試験（図心載荷および偏心載荷）

使用荷重状態での変形挙動を調査するために、板桁では補剛位置（L/3点）に、波桁ではグリップ現象を避けるため波形ウェブがフランジ幅中心に位置するほぼ

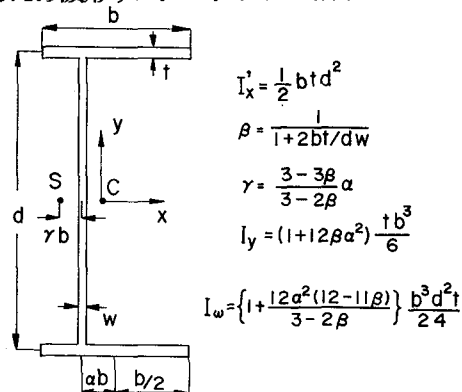


図-5 波桁の断面定数

L/3点に2点集中荷重Pを作用させて図心載荷の曲げ試験を、また載荷点に垂直補剛材を取り付けたあとe=2 cmの偏心荷重を与えた偏心載荷の曲げ試験を行なった。なお、荷重は最大ヒズミが約 500 μ程度となるまで 50kgfずつ作用させた。図-6は板桁の、図-7および図-8は波桁の作用荷重Pと載荷点の鉛直変位vおよびねじり角φの関係を示すものである。なお、図中のv_cは偏心載荷の場合である。また、ねじり角φを表わす図中のF(a)式は次式にて与えられる。

$$F(a) = \xi - \frac{\sinh \kappa \xi (\sinh \kappa \xi + \sinh \kappa (1 - \xi))}{\kappa \sinh \kappa} \quad (1)$$

$$\xi = \frac{a}{L}, \quad \kappa = \sqrt{\frac{GJ}{EI_{\omega}}} L \quad (2)$$

る。これは波型ウェブのアコーディオン効果によるものであり、ウェブの曲げ抵抗を無視した場合の理論線（破線）に対応している。また、波桁のねじり角φが理論値を若干下まわるのは溶接による残留変形の影響と思われる。

図-9は板桁の中心載荷の、図-10は偏心載荷の作用荷重Pとはり中央部のフランジ4隅のヒズミε₁~ε₄との関係を示すものである。なお、図中のε₀はまげヒズミを、ε_ωはそりヒズミを示し、波桁のそりヒズミはε_ω=−Eφ'' ωより求めるものとする。図より、中心

載荷の場合は理論値にほぼ一致し、偏心載荷の場合、曲げヒズミはほぼ理論値に一致するものの、そりヒズミは圧縮フランジ側は理論値よりやや大きめに、引張フラン

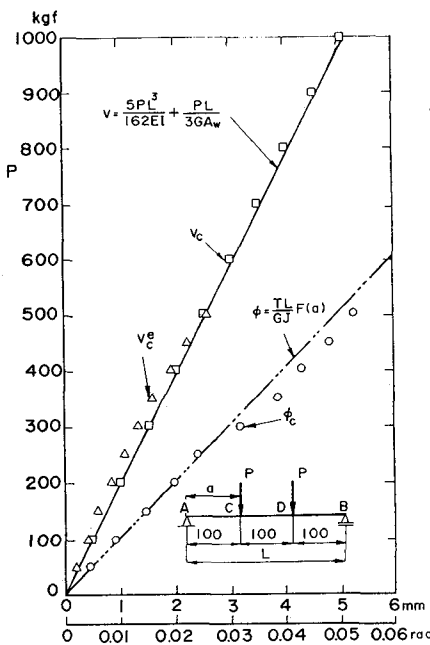


図-6 板桁の荷重・変形関係 (はりタイプ)

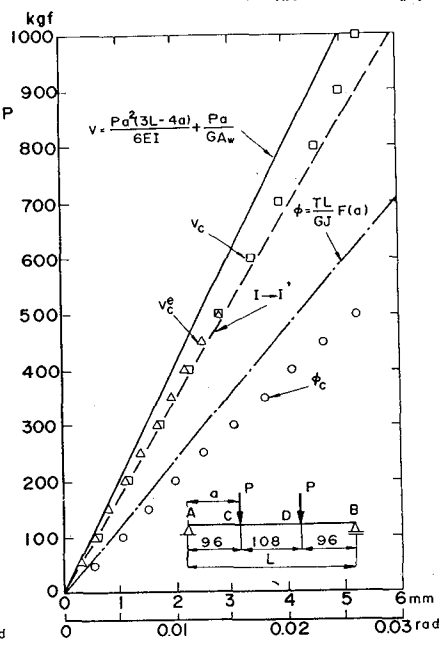


図-7 波桁Aの荷重・変形関係 (はりタイプ)

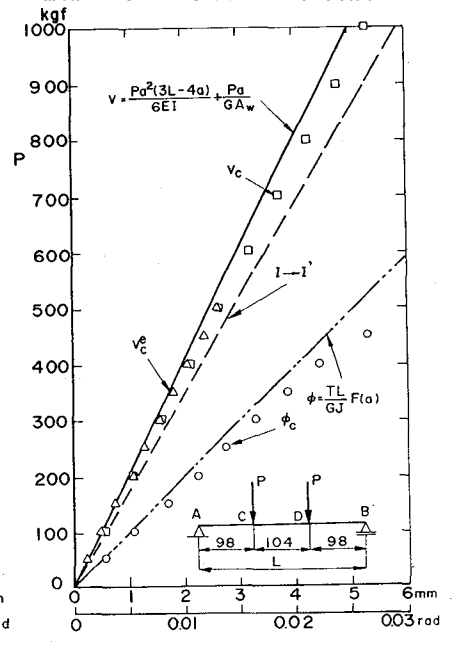


図-8 波桁Bの荷重・変形関係 (はりタイプ)

ここに、Jはサンブナンのねじり定数を、aは支点と載荷点間の距離である。

図より、板桁の鉛直変位vはほぼはり理論に一致し、波桁の鉛直変位は実験値の方がやや大きな値となってい

ジ側はやや小さめの値となっている。

図-11および12は波桁Bの中心載荷および偏心載荷の作用荷重Pとはり中央部のフランジ4隅のヒズミの関係を示すものである。この場合も、板桁とはほぼ同様の

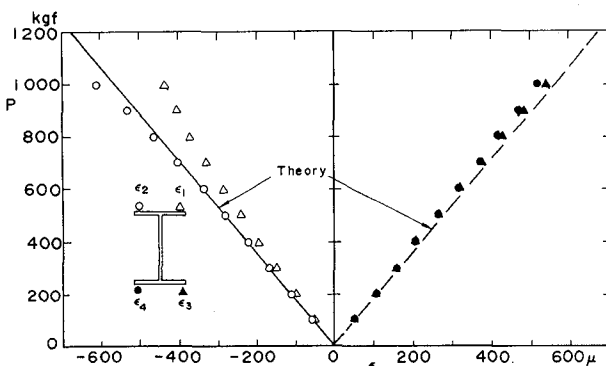


図-9 板桁の荷重・ヒズミ関係 (図心載荷)

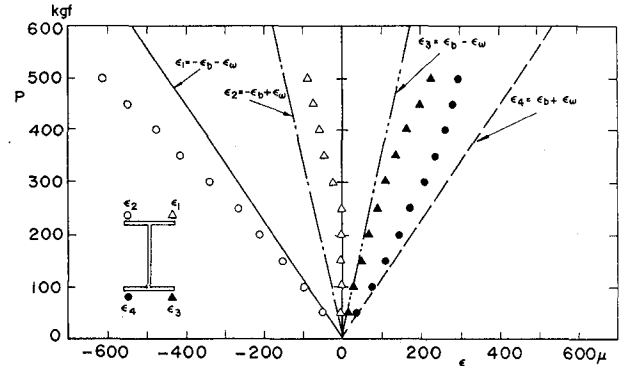


図-10 板桁の荷重・ヒズミ関係 (偏心載荷)

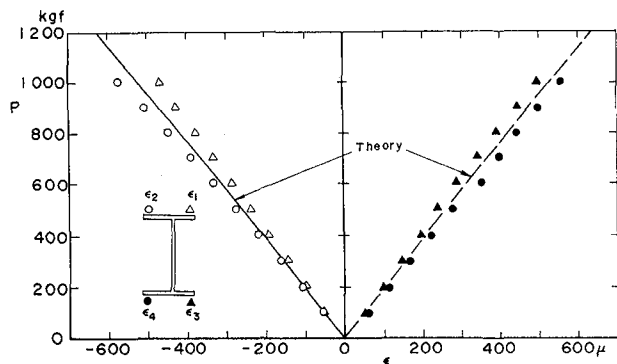


図-1-1 波桁Bの荷重・ヒズミ関係（中心載荷）

関係を示しているが、偏心載荷の場合の圧縮ヒズミはやや理論値と異なり、下フランジのそりヒズミはほぼ零となっている。これは、波桁を図-5に示す断面諸量を有する等断面桁としてねじり角 ϕ の式を求め、これと図-5の断面のそり関数 ω からそりヒズミ ε_s を計算したためである。実際は、波桁のウェブ中心が左右に移動するため複雑な応力分布となり、解析的には求められない。

3. 汎用解析コードMARCを用いた3次元弾性解析

波桁の曲げ試験を行なったところ、波桁ウェブは平面保持の仮定を満足しないことが推測された。このことを明確にするため P.V.Macalによって開発された汎用解析コードMARCを用いて3次元弾性解析を行うと思われる波桁の3次元弾性解析を行なうものである。

図-3に示す桁タイプの板桁および波桁を桁長3.2 mに切断し、スパン3 mの単純桁、桁中央部上フランジ図心に $P = 2 \text{ tf}$ 載荷した実験結果を解析対象とする。8節点厚肉曲面シェル要素を用い、対称性を利用して桁の右半分を図-13に示すように、板桁は上下フランジを各々60、ウェブを240分割し、波桁は上フランジを192、ウェブを160、下フランジを128、計48

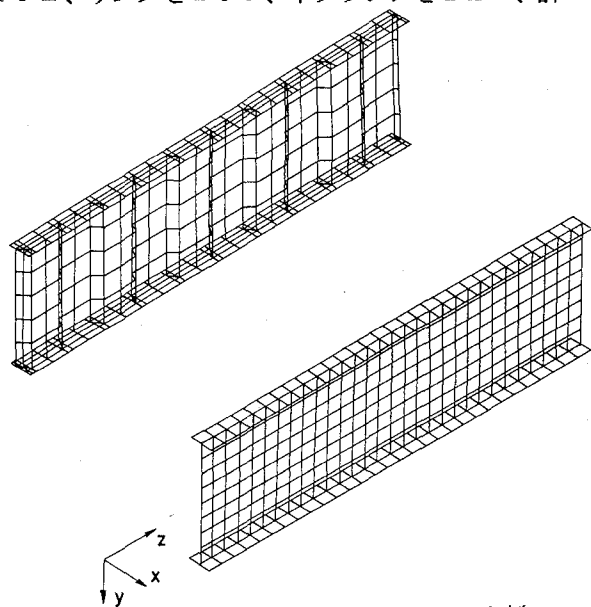


図-1-3 桁の8節点厚肉シェル要素分割

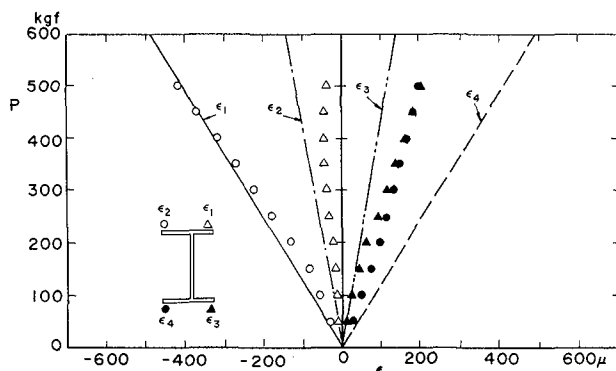


図-1-2 波桁Bの荷重・ヒズミ関係（偏心載荷）

0要素に分割する。なお、解析桁に対する解析値と実験値の比較は右支点より1 mのものである。

図-14から17にその解析結果を示す。図中、黒塗の各点は実験値を、白抜きの各点はMARCによる解析結果を、破線ははり理論による理論値を示す。図より、板桁ウェブの実験曲げ応力分布（黒丸）およびせん断応力分布（黒丸）ともほぼはり理論に一致している。また、MARCによる解析結果（白丸）とはり理論の差はほぼ無視できる程度である。一方、波桁ウェブの曲げ応力分布とせん断応力分布の実験値とMARCによる解析結果

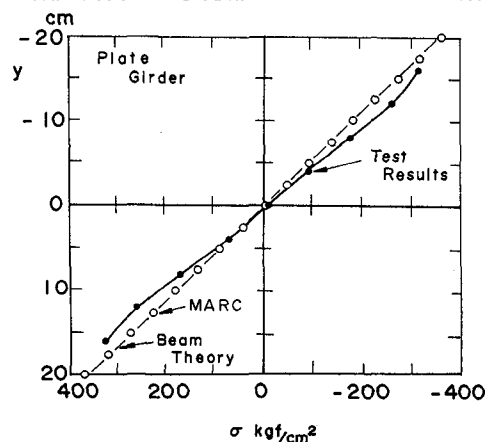


図-1-4 板桁ウェブの曲げ応力分布

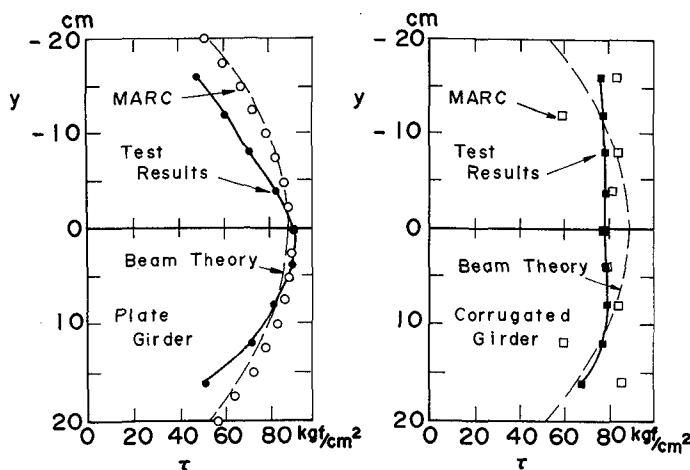


図-1-5 板桁ウェブのせん断応力分布

図-1-7 波桁ウェブのせん断応力分布

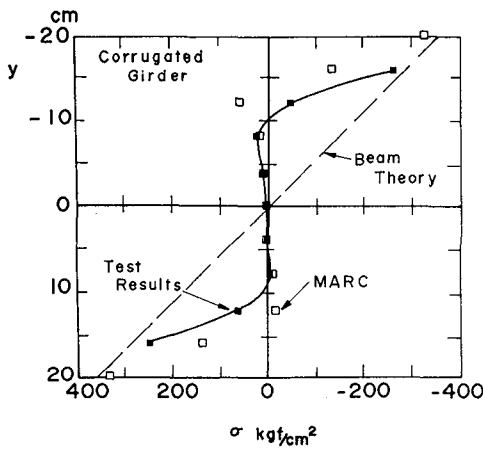


図-16 波桁ウェブの曲げ応力分布

はほぼ一致しているが、両者とは理論は大きく異なっている。これは波桁ウェブのアコデオン効果により、波桁ウェブは曲げには抵抗せず、せん断力にのみ抵抗するためである。なお、 $y = \pm 12 \text{ cm}$ 点の数値計算結果（図-17の口印）がやや特異なのは、この点近傍の曲げ応力の変化が大きい（図-16参照）ことによるものと思われる。

図-18はスパン長3mなる単純桁の中央部上フランジに作用する一点集中荷重をフランジ中心より2cm偏心させた場合の左支点から1m地点のウェブの面外変形（MARCによる解析結果）を示す。図より、垂直補剛材のない板桁の場合、ウェブの面外剛度が小さいため、桁が断面剛の仮定を満足しないことがわかる。一方、波型ウェブを用いた場合、その面外剛度が大きいため、断面剛の仮定を満足することがわかる。

4. 横倒れ座屈実験

スレンダーな桁タイプの板桁および波桁の横倒れ座屈実験を行なったが、面内と面外の断面2次モーメントの比 I_x/I_y が極端に大きいため、载荷の初期段階から緩やかな面外変形が発生し荷重・変形挙動上明確な座屈点を見出すことができなかった。このため、桁タイ

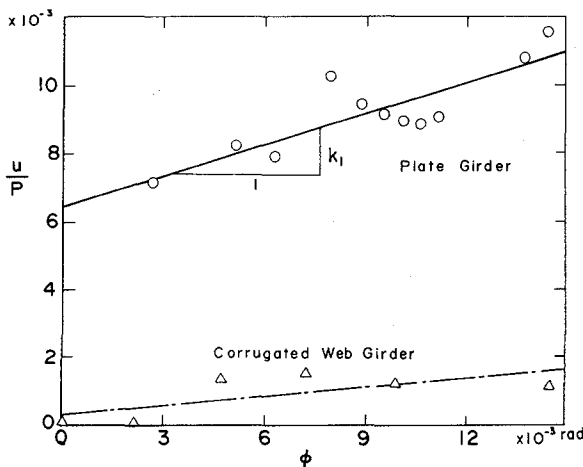


図-19 ϕ と u/P の関係（桁タイプ）

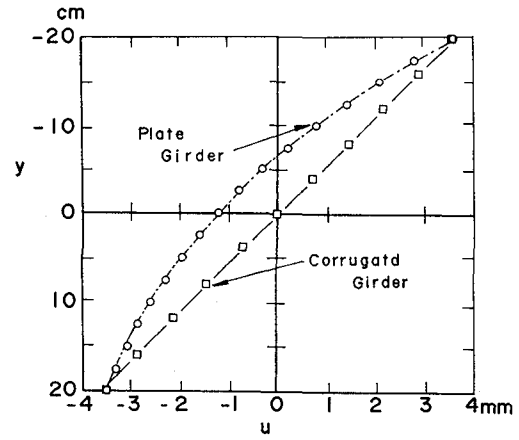


図-18 桁ウェブの面外変位 ($P = 1 \text{ t f}$)

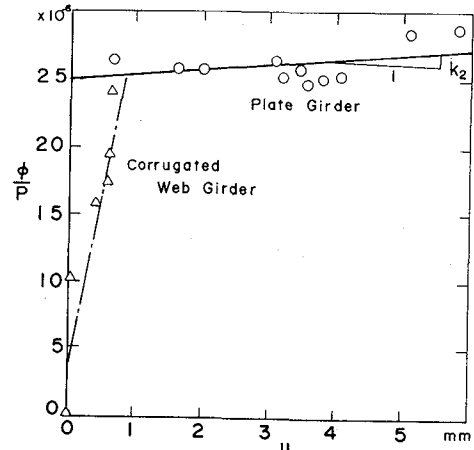


図-20 u と ϕ/P の関係（桁タイプ）

プの板桁および波桁の横倒れ座屈荷重はMeckの方法³⁾を用いた次式により求める。

$$P_{cr} = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}} \quad (3)$$

ここに k_1 および k_2 はそれぞれ図-19および図-20に示す直線の勾配であり、各図は作用荷重と水平変位およびねじり角の関係をMeckの方法によりプロットしたものである。各図の実験値を直線近似し、それぞれの直線の勾配の逆数の積のルートとして座屈荷重が求まる。板

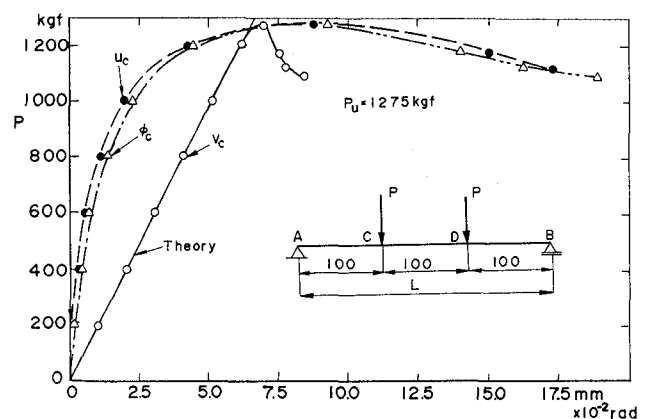


図-21 横倒座屈実験結果（板桁、はりタイプ）

桁の理論座屈荷重325kgf ($\sigma_{cr}/\sigma_y=0.074$ というスレンダーな桁に対応する) に対して板桁の実験座屈荷重は290kgf、波桁の実験座屈荷重は688kgfとなり、波桁の P_{cr} は板桁の P_{cr} の約2.4倍という結果をえた。

はりタイプの板桁および波桁の横倒れ座屈実験結果を図-21から図-23に示し、図中の面外変位 u の急激な増加が横倒れ座屈挙動を表わすが、本研究では最大荷重 P_u を実験座屈荷重と定義する。板桁の理論座屈荷重 $P_{cr}=1173\text{kgf}$ ($\sigma_{cr}/\sigma_y=0.441$ というややスレンダーなはりに対応する) に対して実験座屈荷重は $P_u=1275\text{kgf}$ 、波桁Aの理論座屈荷重 $P_{cr}=1849\text{kgf}$ に対して実験座屈荷重は波桁Aで $P_u=1565\text{kgf}$ 、波桁Bで $P_u=1186\text{kgf}$ となった。なお、理論座屈荷重は次式より求めた。

$$M_{cr} = P_{cr} a = C \frac{\pi^2 E I_y}{L^2} \left\{ 0.5g + \sqrt{(0.5g)^2 + \frac{I_w}{I_y} \left(1 + \frac{G J L^2}{E I_w \pi^2} \right)} \right\} \quad (4)$$

ここに、 c は荷重条件によって定まる補正係数($c=1.0$ 96)、 g は載荷点位置($g=d/2$)である。

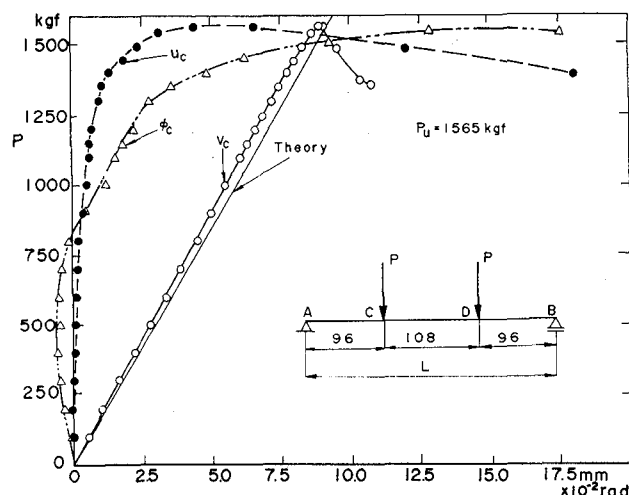


図-22 横倒れ座屈実験結果(波桁A、はりタイプ)

5. まとめ

本研究では、桁タイプの板桁および波桁各1体、およびはりタイプの板桁および2種類の波桁計3体製作し、波桁の使用荷重状態を想定した範囲での曲げおよびねじり試験を行なうとともに、横倒れ座屈実験も行なった。また、桁タイプの波桁および板桁のウェブに3方向ひずみゲージを張り付け、ウェブの曲げ応力およびせん断応力分布の測定も行なった。そして、測定応力分布は汎用解析コードMARCを用いた3次元弾性解析結果と比較検討し、次の結論を得た。

1) 板桁ウェブの曲げおよびせん断応力分布は図-14および15より、ほぼはり理論に一致するが、波桁ウェブの曲げ応力は図-16より零に、またせん断応力

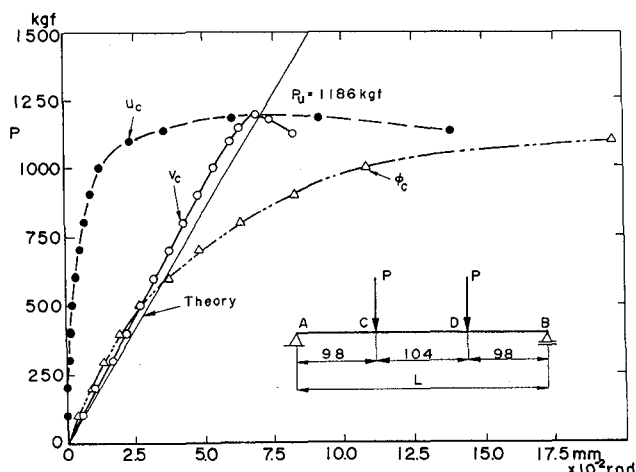


図-23 横倒れ座屈実験結果(波桁B、はりタイプ)

分布は図-17より一様分布にほぼ近似できるものと思われる。

- 2) 波桁の鉛直変位はウェブの曲げ抵抗を無視した場合の理論値にほぼ一致する。
 - 3) スレンダーな桁タイプの波桁の弾性横倒れ座屈強度は板桁のそれの約2.4倍となり、波桁が横倒れ座屈に強いことが再確認された。ややスレンダーなはりタイプの波桁Aの座屈荷重は同波桁Bのそれの約1.3倍となり、波桁が密なほど大きい横倒れ座屈荷重となった。波桁の横倒れ座屈強度の定性的な傾向はつかめたが、しかし、定量的な結論を得るには至らなかった。
- 波桁の波型ウェブとフランジの溶接によって、フランジに残留変形がわずかに残り、フランジの平面性がややくずれた。このため、曲げに比して初期不整の影響を受けやすい横倒れ座屈強度値にかなりの変動が生じた。今後、波型ウェブの構造特性を活かしたPC合成構造へと本研究をを発展させてゆきたい。

参考文献

- 1) Elgaaly, M. and Dagher, H.: Beams and Girders with Corrugated Webs, Stab. Bridge, pp.37~53, 1990.
- 2) 依田照彦、大浦 隆: 波型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.
- 3) Meck, H.R.: Experimental Evaluation of Lateral Buckling Loads, Jour. Eng. Mech. Div., Proc. ASCE, Vol.103, No.EM2, pp.331~337, 1977.
- 4) 西田 進: 波型はりの静的挙動に関する実験的研究、土木学会 第48回年次学術講演会概要集I、pp.256~257, 1993.

(1994年9月14日受付)