

# Ripple Web Girder による鋼板のせん断試験

## SHEARING STRENGTH OF STEEL PLATE GIRDERS WITH FOLDED WEB PLATE (RIPPLE WEB GIRDERS)

高 田 静 雄\*

By Shizuo Shimada

### 1. 緒 言

鋼の薄板を溶接で作ったプレート ガーダーが曲げとせん断を受けるとき、構造的な横倒れ変形が拘束されていれば、破壊は圧縮側のフランジか、または腹板に生ずる。プレート ガーダーの断面を経済的に設計するには、桁高が高く、腹板の板厚が薄い方がよいが、腹板が薄ければ特にせん断に対するガーダーの耐力が低下する。

一般的に、曲げによって圧縮側フランジが材料の降伏点に達したとしても、ガーダーはなお相当の耐力の余力を持つものであって、この状態が最大の耐力にはならない。一方、大きなせん断力を受ける場合には、腹板が材料のせん断応力の降伏点に達したときにガーダーの破壊が起こるが、この場合には曲げの場合とは異なり、それ以上の耐力の増進が期待できない。腹板の板厚が桁高に比して薄ければ、材料の降伏点に達する前に座屈変形が進行し、より低い耐力しか示し得ない。

せん断力の伝達に役立つプレート ガーダーの設計では、薄い腹板を材料の降伏点まで耐えられるよう、座屈変形を防止するように使うことが重要なヒントになる。ここで問題になることが2つある。1つは、材料のせん断応力の降伏点がいかにあるかということ。その2は、せん断座屈にはどんな実験式が妥当であるかということである。

鋼材の強さは引張試験で容易に実験できるが、純粋のせん断応力の状態で材料試験をすることは実験技術の上からも非常にむずかしく、それゆえに鋼板のせん断強度や、せん断剛性係数  $G$  の値にも多くの推定が入ることになる。せん断座屈の現象は柱の座屈よりもさらに条件が複雑になるので、理論的な検討はとも角、実験のデータは比較的少ない。

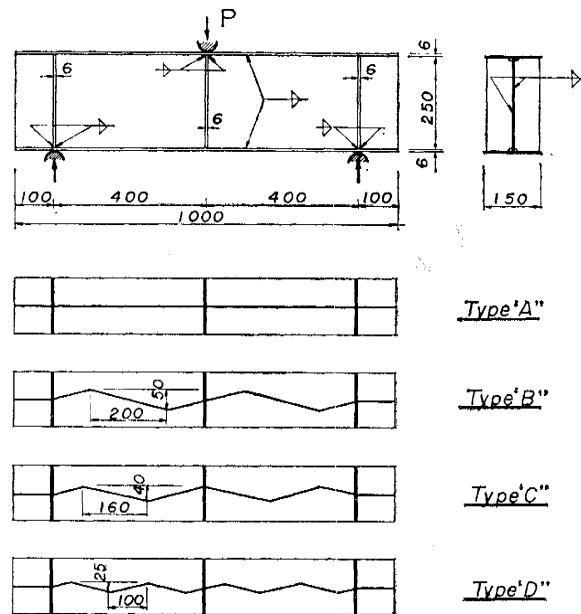
この報文で報告する波型腹板桁の実験は、目的が腹板のせん断強度を求めるために計画

したものである。ガーダーは桁高の高い支間の短いものを使い、フランジ断面積の大きい断面構成になっている。薄い腹板が材料のせん断強度まで局部座屈をしないように耐えられればせん断の試験になる理屈である。座屈防止という手段に腹板を屏風状に折曲げて、その効果を期待してみようと思いついたのである。

腹板を波型に変形させるというアイデアはすでに横田周平氏が発表しているが、実用断面としての開発には今後多くの実験データの積重ねが必要であろう。この報文では、差し当たりまとまった 20 本の試験桁の実験結果を報告したものである。なお、Ripple Web Girder という呼称は筆者が便宜的につけた名称である。

### 2. 試験桁の計画

鋼板のせん断強度を測定するには純粋なせん断応力の



Note: 1) Size in mm, 2) Every type has 5 sorts of plate thickness of Ripple web; 1.6, 2.0, 2.3, 3.2, and 4.5 mm.

Fig. 1 Specimens of Steel Girder with Folded Web Plate (Ripple Web Girder).

\* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科

場になるような載荷状態を特に考案しなければならない。閉じた長方形断面の桁をねじれば、比較的純粋のせん断応力の場ができる。しかし、ねじれ試験は特別な実験装置が必要であるし、また試験桁の単価が高い。そこ

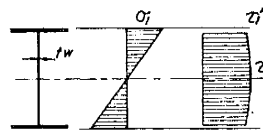
で普通の万能試験機で簡単にできる程度のせん断試験を、ガーダーの曲げ試験を応用して計画してみることにした。

試験桁の諸元は図一に示すような寸法であり、断面

Table 1 Cross Sectional Properties.

Girder No.	t <sub>w</sub> (mm)	A <sub>w</sub> (cm <sup>2</sup> )	A (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	W (cm <sup>3</sup> )	Z (cm <sup>3</sup> )
A-1 ~ D-1	1.60	4.00	22.15	3184	243.0	257.4
A-2 ~ D-2	2.05	5.125	23.275	3242	247.4	264.4
A-3 ~ D-3	2.30	5.75	23.90	3275	249.9	268.3
A-4 ~ D-4	3.20	8.00	26.15	3393	258.9	282.4
A-5 ~ D-5	4.55	11.375	29.525	3568	272.3	303.5

$\sigma_1$ (kg/cm <sup>2</sup> /0.2 t-m)	$\tau_1$ (kg/cm <sup>2</sup> /t)	$\tau_1'$ (kg/cm <sup>2</sup> /t)
82.20	252.6	228.1
80.84	198.9	174.8
80.03	178.1	154.2
77.25	130.0	107.0
73.45	93.4	71.6

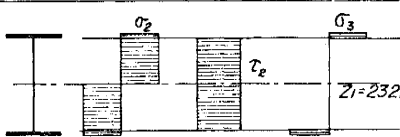


$$\sigma_1 = \frac{M}{I} y = \frac{M}{W}$$

$$\tau_1 = \frac{S}{I} q, \quad S = 1 \text{ t}$$

Case I Elastic Theory

$\sigma_2$ (kg/cm <sup>2</sup> /0.2 t-m)	$\tau_2$ (kg/cm <sup>2</sup> /t)
77.70	250.0
75.64	195.1
74.54	173.9
70.82	125.0
65.90	87.9



$$\sigma_2 = \frac{M}{Z}, \quad \sigma_3 = 86.06, \quad M = 0.2 \text{ t-m}$$

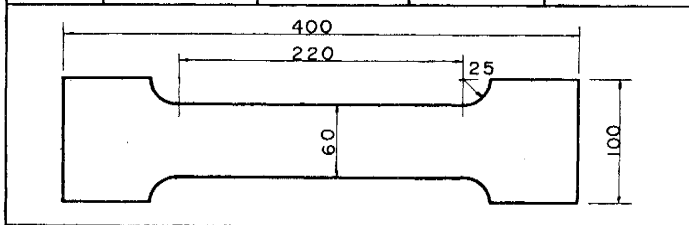
$$\tau_2 = \frac{S}{A_w}, \quad S = 1 \text{ t}$$

Case II Plastic Theory

Note: Flange plate 6.05 x 150 mm

Table 2 Strength of Steel Plates by Coupon Tests.

Thickness (mm)	$\sigma_y$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (kg/mm <sup>2</sup> )	elongation (%)	Material
1.60	20.0 ± 1.2	32.2 ± 1.5	19 ± 3	SPN-1
2.05	27.4 ± 0.6	37.3 ± 0.6	25 ± 1	SPN-1
2.30	26.2 ± 0.8	34.4 ± 0.6	25 ± 1	SPN-1
3.20	30.7 ± 0.6	46.6 ± 0.6	20 ± 1	SS41
4.55	31.3 ± 0.2	45.1 ± 1.0	22 ± 2	SS41
6.05	30.1 ± 0.6	42.6 ± 0.5	23 ± 2	SS41



性能は表一のように与えられる。この断面は、名古屋大学工学部土木教室の 100 t 万能試験機の載荷装置の寸法と能力とを考えてきめたものである。フランジ断面積と補剛材は腹板にくらべて大きく選び、桁高も支間にくらべて大きくして、腹板のせん断試験になるように考えた。

腹板の板厚はできるだけ薄いものを予定したが、桁の製作工場手持ちの材料から 1.6, 2.0, 2.3, 3.2 および 4.5 mm の 5 種類を使用した。これらの材料はそれぞれ強度が異なるし、応力とひずみの関係も少しずつ差がある。これらは表二および図二に模式的に示した応力・ひずみ曲線を参照されたい。特に注目すべき性質は板厚 3.2 mm の鋼板の応力・ひずみの関係であって、この材料は明確な降伏点を示さない。そのため、実験結果も、この材料のものが特別な性質を示している。

腹板を屏風状に曲げることの基準は別に根拠があったわけではない。腹板は真直ぐであるのが理想であるので、支間を 4 等分, 5 等分, 8 等分する波型とし、波高と波長は、1 波長対倍振幅を 8 対 1 にしてある。いろいろな波型を考えて見たが、屏風状に曲げるのは製作も楽であることと、折り曲げた一面がせん断力を受ける独立な長方形板になる利点もあった。腹板の波型の影響が、フランジの局部変形を引き起こすことのないように、フランジの板厚は 6 mm を使用し、幅も広い。この断面構成は成功であった。

なお、ガーダーにはすべてダイラー B のひずみ塗料を塗布した。この塗装によって直接応力の絶対値を計測しようというのではなく、ガーダーの破壊の進行を写真に撮影するとき、写りが映えるという効果を特に期待したものである。

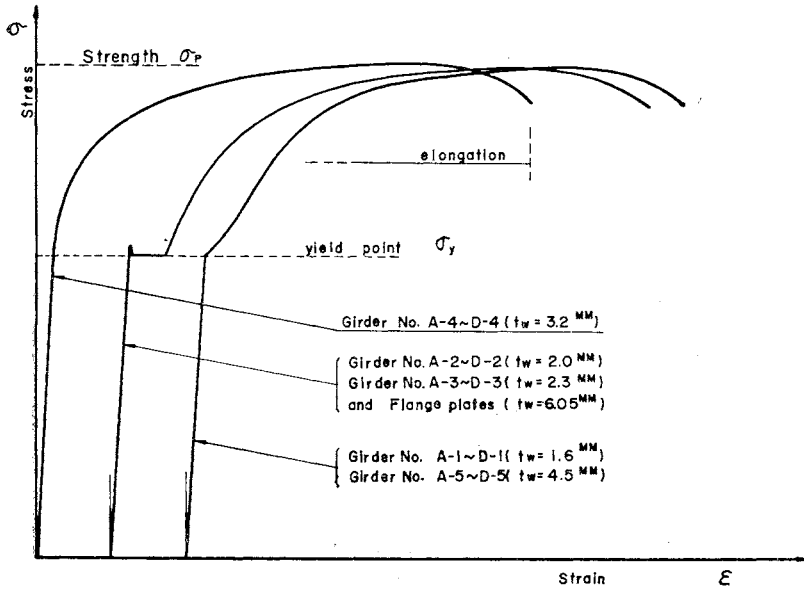


Fig. 2 Schematic Stress-Strain-Diagram of Steel Properties by the Tensile Tests.

### 3. ガーダーの破壊の進行

支間 80 cm のガーダーの支間中央に作用する荷重と、ガーダーのたわみとは試験機付属の自記録計に記録された。刻々の破壊の進行はきわめて興味のあるものであって、一例として試験桁 No. D-1 の破壊の進行を写真-1 および 図-3 に示してみた。

D-1 の試験桁は腹板の板厚 1.6 mm であり、また、波型の間隔の最もせまいものである。破壊は、腹板のせん断応力度がせん断の降伏点に達する頃に、折り曲げでできた単位の長方形板の個々が座屈するように生ずる。この座屈は、右か左か、どちらかの半分の支間に生ずる。この状態で、ガーダーは急速に耐荷力を失なうが、その途中で座屈変形が隣り合う二つの屏風面にまたがる

ように進行してゆく。

座屈による耐荷力の減少は非常に急激であるが、これは初期変形のある板の座屈が、一種の飛越し現象を示すためであると考えられる。最低の耐荷状態になったガーダーは再び耐荷力の回復を示すが、その途中で何回かの変形模様の変替があり、最後には、斜引張り状態に落着く。

荷重の回復は、最初の耐荷力の近くまでゆくが、この時、ガーダーの残り半支間の腹板が座屈を起こす。破壊の進行は最初と全く同じ過程を踏襲してゆく。

図-4 から 図-9 までは同じ腹板厚のガーダーの荷重たわみ曲線をまとめて示してある。腹板の板厚が 3.2 mm のものまでは腹板がせん断応力によって降伏し、座屈変形が進行することによってガーダーが破壊する。支間中央に対して左右の腹板が常に座屈するとは限らず、いずれかの半分が座屈し、耐荷力の回復が十分でなく、残り半分が健全のまま残ることもある。

腹板の板厚が 3.2 mm のものは、特に A, B, C, D の順に耐荷力が上昇している。この材料は明確な降伏点を示さない材質であるため、波型腹板の効果が、材料の塑性域のところで顕著な効果を示したものと考えられる。

腹板板厚 4.5 mm のものは、腹板のせん断応力が降伏する荷重とフランジの圧縮応力が降伏点に達するのと大体同じであり、破壊は全部圧縮側フランジの局所的な座

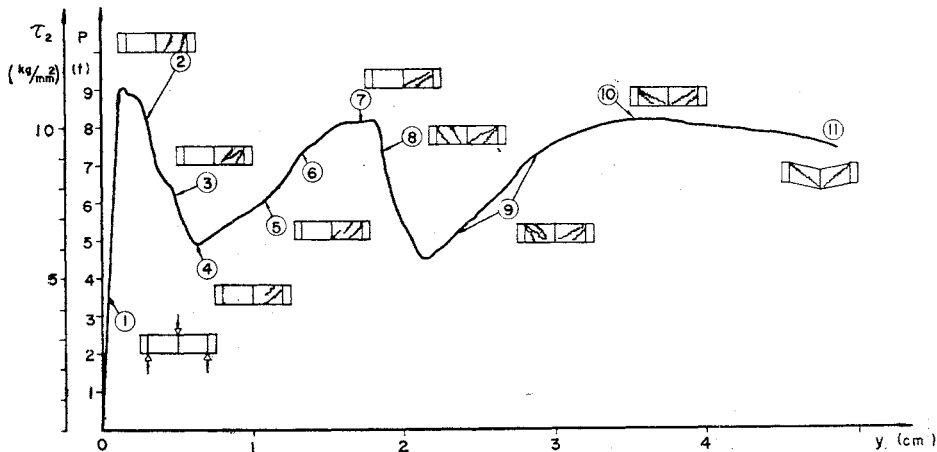
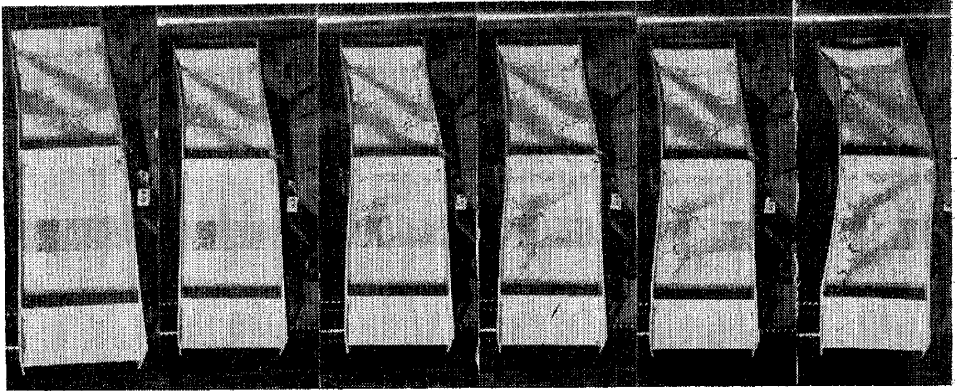


Fig. 3 Load Deflection Curve of Girder No. D-1, Refer Also Plate 1.

Plate 1 Testing History of Girder No. D-1.



1) Before test.

2) First web buckling occurs in each sub-panel of folded web plate at the right half span of girder.

3) Deformation of web plate grows over two sub-panels.

4) and exceeds beyond the edge of folded line.

5) Deflection of web plate progresses to the adjacent panels,

6) until it penetrates through the sub-panels between center and end stiffeners.

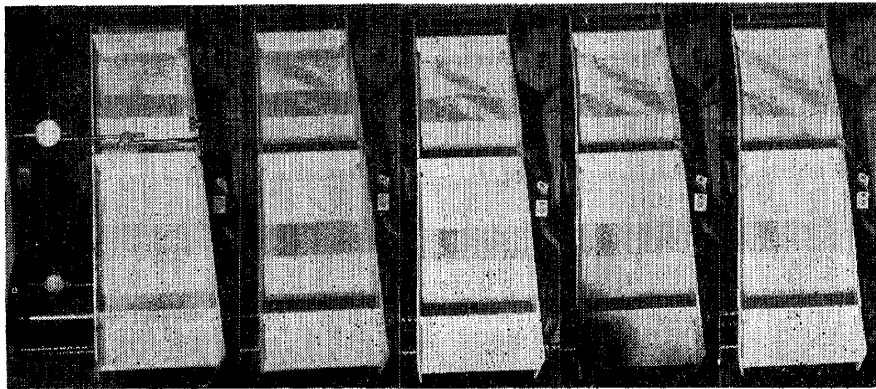
7) Finally, web plate of right half span is in the state of tension field diagonally.

8) Successively, web buckling occurs at the left half span of girder,

9) nearly the same process of buckling as is observed on the right half span.

10) Final deflection pattern is observed on the web plate.

11) Failure of girder.



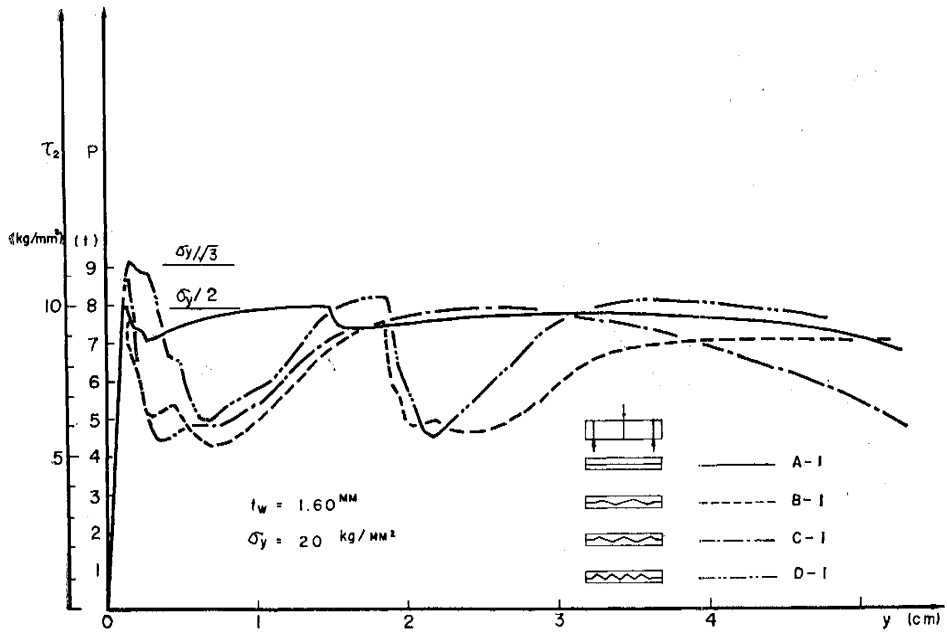


Fig. 4 Load-Deflection Curves of Girder Nos. A-1, B-1, C-1 and D-1.

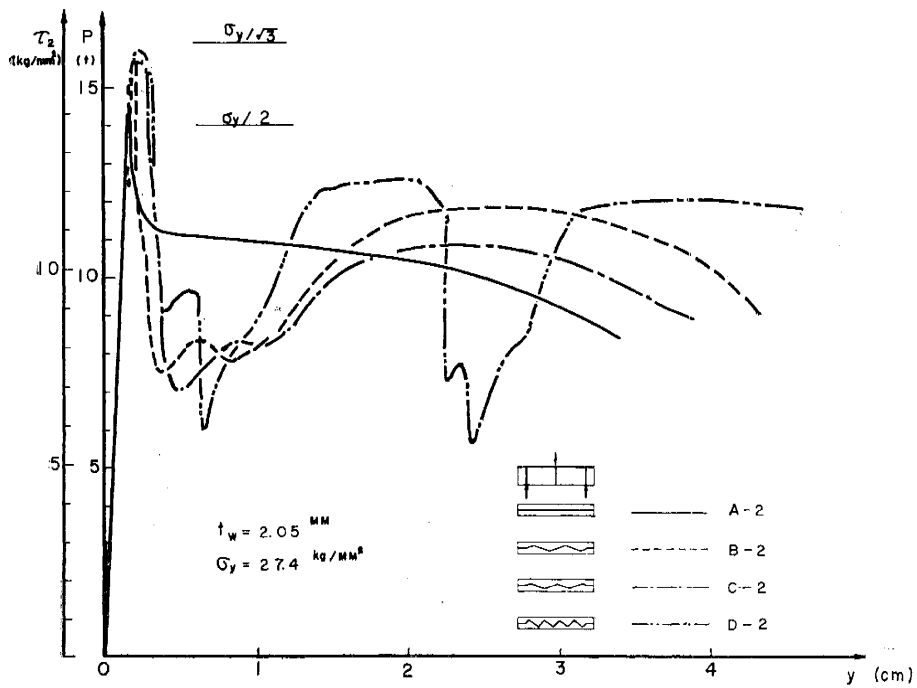


Fig. 5 Load-Deflection Curves of Girder Nos. A-2, B-2, C-2 and D-2.

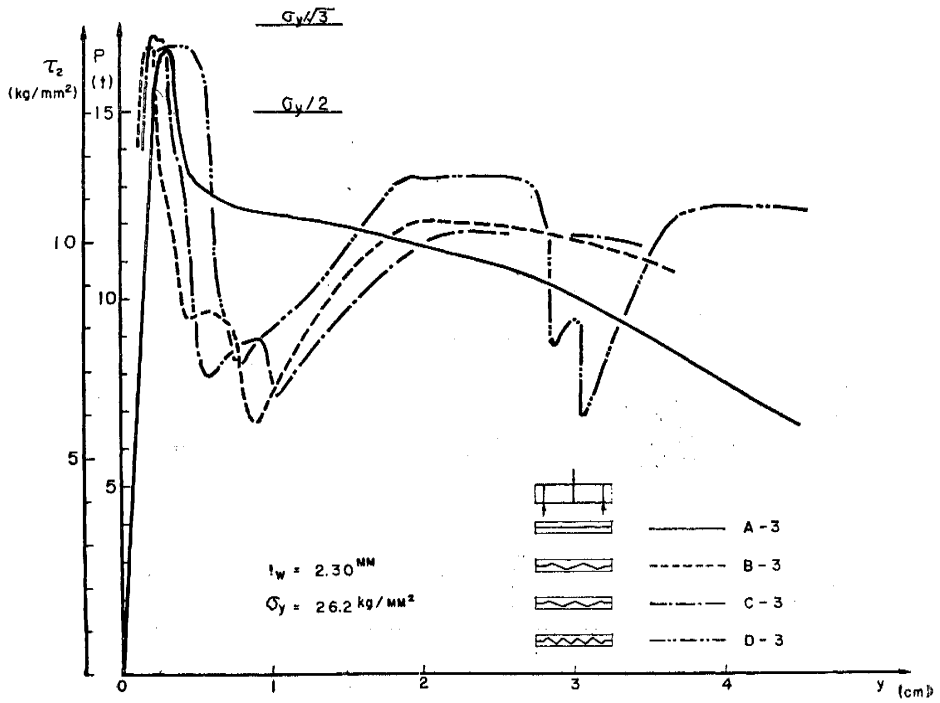


Fig. 6 Load-Deflection Curves of Girder Nos. A-3, B-3, C-3 and D-3.

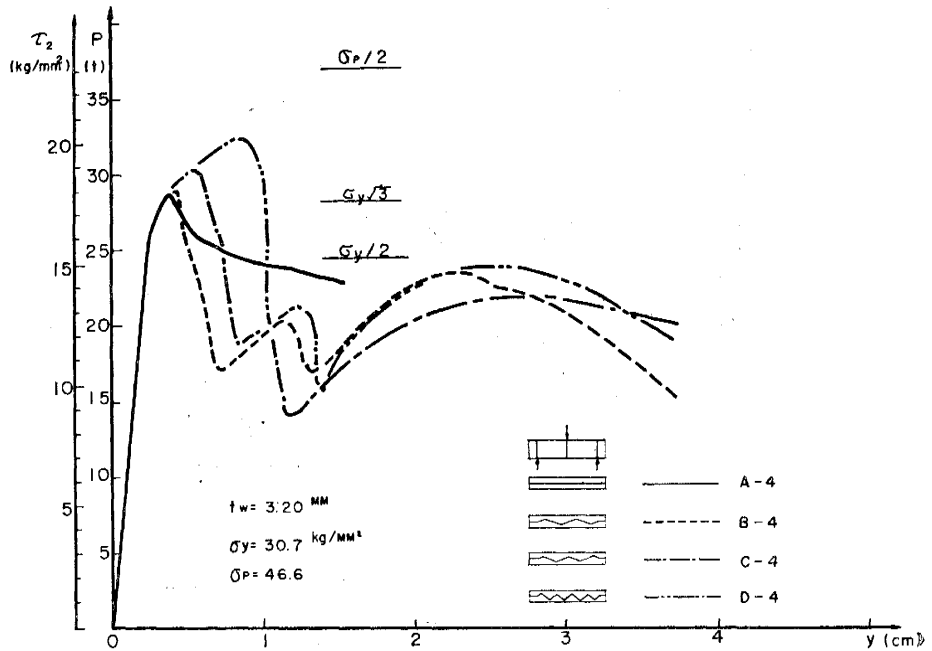


Fig. 7 Load-Deflection Curves of Girder Nos. A-4, B-4, C-4 and D-4.

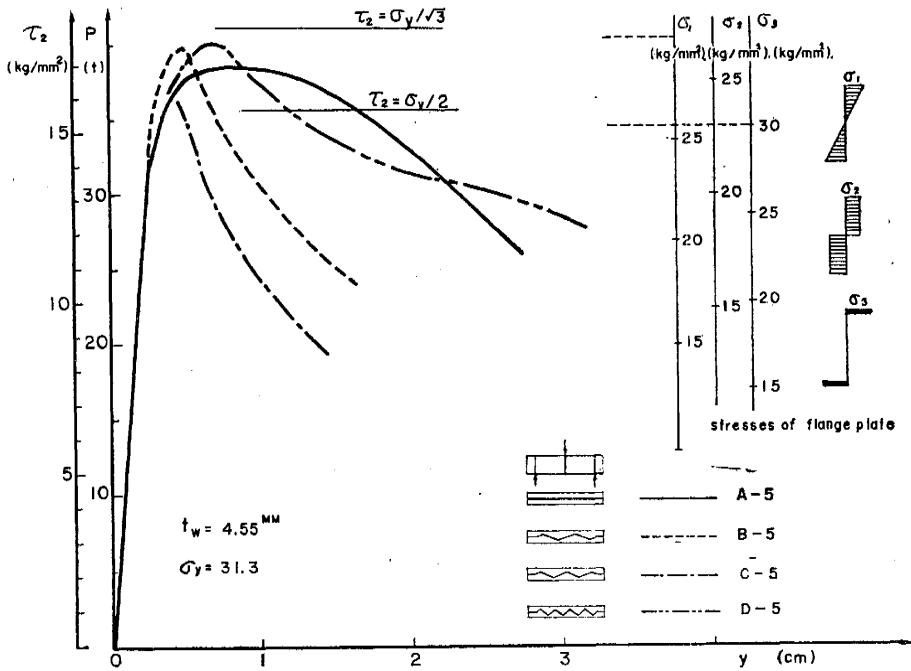


Fig. 8 Load-Deflection Curves of Girder Nos. A-5, B-5, C-5 and D-5.

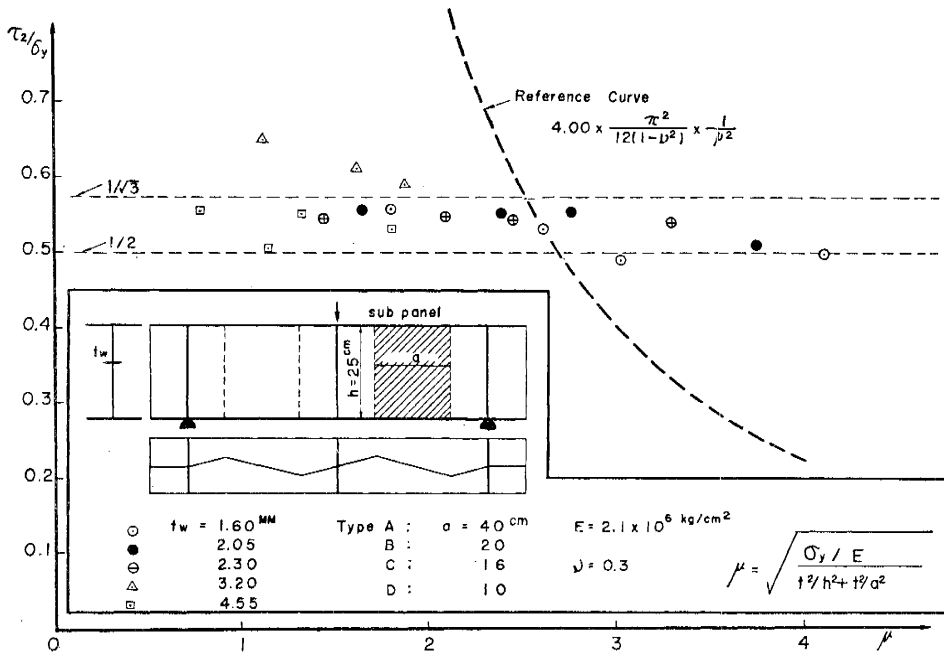


Fig. 9 Shearing Strength of Web Plates Against Sub-Panel Dimensions.

Table 4 Summary of Experimental Stress.

Girder No.	Max. Shearing stresses, $T_x(\text{kg}/\text{mm}^2)$	Max. Bending stresses, $\sigma_1(\text{kg}/\text{mm}^2)$	Max. Bending stresses, $\sigma_2(\text{kg}/\text{mm}^2)$	Max. Bending stresses, $\sigma_3(\text{kg}/\text{mm}^2)$	$\sigma_2/\sigma_1$	Failure by
A-1	9.95	0.498	6.54			Shear.
B-1	9.79	0.490	6.44			"
C-1	10.63	0.532	6.99			"
D-1	11.15	0.558	7.33			"
A-2	13.97	0.510	11.58			"
B-2	15.15	0.553	12.55			"
C-2	15.15	0.553	12.55			"
D-2	15.28	0.558	12.66			"
A-3	14.11	0.539	12.99			"
B-3	14.23	0.543	13.10			"
C-3	14.37	0.548	13.23			"
D-3	14.26	0.544	13.12			"
A-4	17.59	0.573	21.75	24.23	0.805	"
B-4	18.06	0.588	22.33	24.87	0.826	"
C-4	18.75	0.611	23.18	25.82	0.858	"
D-4	19.91	0.649	24.60	27.41	0.911	Shear and bending.
A-5	16.59	0.530	27.73	32.49	1.079	bending.
B-5	17.21	0.550	28.76	33.69	1.119	"
C-5	15.85	0.506	26.48	31.02	1.031	"
D-5	17.35	0.554	29.00	33.98	1.129	"



Table 3 Summary of Experimental Loads.

Girder No.	Max. Bearing Loads, $P_{\text{max}}(t)$	Critical Loads-I, $P_{\text{cr-I}}(t)$	Critical Loads-II, $P_{\text{cr-II}}(t)$	Critical Loads-III, $P_{\text{cr-III}}(t)$	Post Buckling Loads, $P_u(t)$	Failure Patterns.
A-1	7.96	7.95			7.58	
B-1	7.83	5.33	7.41	4.91	7.04	
C-1	8.50	4.95			7.70	
D-1	8.92	6.55	8.04	6.05	8.04	
A-2	14.32					
B-2	15.53	8.31			11.67	
C-2	15.53	8.23			10.62	
D-2	15.66	9.47	12.31	7.55	11.80	
A-3	16.23					
B-3	16.37	9.53			11.72	
C-3	16.53	8.64			11.16	
D-3	16.40	9.75	12.91	9.21	12.18	
A-4	28.15					
B-4	28.90	20.30			23.25	
C-4	33.00	19.30			20.90	
D-4	31.85	21.05			23.70	
A-5	37.75					
B-5	39.15					
C-5	36.05					
D-5	39.48					

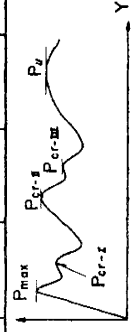




Table 6 Fiber Stresses of Flange Plate at Center of Span.

Girder No	Measured, $E \epsilon$ (kg/cm <sup>2</sup> /l)		Theoretical, $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> /l)	$\sigma/\bar{\sigma}$
	max	mean		
A-1	153	105	47	
B-1	191	120	0	82.2
C-1	113	59	11	86.1
D-1	158	114	90	
A-2	85	64	46	
B-2	121	98	60	80.8
C-2	106	91	74	86.1
D-2	126	103	90	
A-3	127	91	67	
B-3	98	88	79	80.0
C-3	131	96	65	86.1
D-3	103	92	71	
A-4	122	89	72	
B-4	99	90	83	77.3
C-4	69	64	57	86.1
D-4	86	80	71	
A-5	63	59	56	
B-5	82	76	68	73.5
C-5	89	79	63	86.1
D-5	81	72	66	

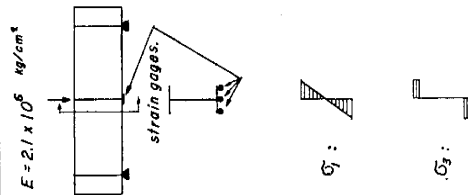
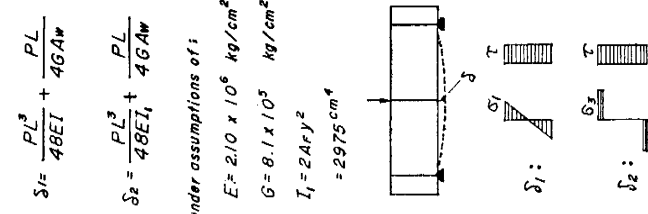


Table 5 Deflections at Center of Span.

Girder No	Measured	Theoretical	
	$\times 10^{-2}$ mm/l	$\delta_1 (10^{-2}$ mm/l)	$\delta_2 (10^{-2}$ mm/l)
A-1	11.7		
B-1	14.7	7.77	7.88
C-1	12.1		
D-1	12.5		
A-2	9.5		
B-2	9.7	6.38	6.53
C-2	10.0		
D-2	9.5		
A-3	9.4		
B-3	10.0	5.85	6.00
C-3	10.9		
D-3	9.8		
A-4	7.1		
B-4	8.4	4.58	4.79
C-4	8.0		
D-4	7.5		
A-5	5.4		
B-5	6.3	3.59	3.88
C-5	6.0		
D-5	5.7		



屈で生じている。

耐荷力の一覧は表—3 にまとめて示した。

#### 4. 応 力

腹板のせん断応力の理論値は表—1 にまとめて示したが、弾性理論、塑性理論のいずれの場合でも大きな差はない。それで、腹板全体が一様なせん断応力分布になるという仮定のもとにガーダーの最大耐荷力時のせん断応力を求めたのが表—4 の  $\tau_2$  である。この実験値を腹板材料の引張試験で求めた降伏点  $\sigma_y$  で除した無次元の数値はほとんど 0.50~0.58 の間に入っている。

フランジの軸応力度の最大値は支間中央であるが、最大耐荷力を示した時の軸応力度を弾性理論で推定した値と、塑性理論で推定した値とを、それぞれ  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  で示してある。フランジ材料の降伏点  $\sigma_y$  との比を同時に示してあるが、 $\sigma_3/\sigma_y$  の比が1以上になる A-5~D-5 ガーダーが、曲げによる破壊を示している。

腹板のせん断応力の無次元量  $\tau_2/\sigma_y$  を図にプロットしたのが図—9 である。横軸には無次元のパラメータ  $\mu$  を導入して整理してある。 $\mu$  は折り曲げた腹板1パネルの寸法が座屈荷重に影響するであろうと推定して導入した数値である。図中の点線のオイラー座屈に相似な曲線は、別に理論的な根拠はないが、比較のために加えた。四辺単純支持の長方形板の座屈荷重の経験式は種々あるが、いずれの場合も今回の実験結果を説明できないので、図を見やすくする意味で座屈係数  $k=4$  とおいてグラフを書き加えた。

#### 5. たわみとひずみ

ガーダーの支間中央では2個のダイヤルゲージを使ってたわみを測定した。単位荷重に換算したたわみの実

測値を理論値と比較したものを表—5 に示す。理論計算値の根拠には二通りの応力分布を想定してみた。

表—5 からわかるとおり、測定値は理論値より相当に大きい。もっとも、この実測値は、荷重を何回か増減させないで、0 から順次増加させながら読取った値であるので、初期の残留ひずみの影響が相当に大きいことも考えられる。

支間中央の引張フランジには計3つのストレインゲージを接着してフランジの軸方向のひずみを計測した。ストレインゲージのひずみは相当のバラツキがあるので、有為なデータを期待できないが、参考のために単位荷重に換算したひずみ量に  $E=2.1 \times 10^6$  を乗じたものを表—6 に示した。理論値には2つの根拠、弾性理論と塑性理論とを示してある。

#### 6. 後 記

本研究は昭和39年度文部省科学研究費の交付を得て行なった実験研究である。ガーダーの製作は、薄板の溶接に信頼のおける日本車輛製造KKの車輛部に依頼した。今回は経費の面で見送ったが、同所ではアルミ合金の溶接も可能であるので、試験ガーダーの規格を同じにしたものを試してみたいと思っている。

東京鉄骨橋梁KKの横田周平氏は腹板を波型に変形させる桁についての特許を保持されているが、今回のRipple Web Girderの実験には経費の一部の援助を始めとして、多分の好意を寄せて頂いた。

実験の実際には、昭和39年度の卒業実験として、水野一男、山本邦夫の両君が参加した。図および表のトレースは小川庄一郎君の手をわずらはした。なお、英文の添削は土木教室の福本助教授に智恵を借りた。これらすべてに感謝したい。

(1965. 5. 17・受付)