

集中荷重を受ける単純I桁(模型)の 変形と破壊現象について

○正員 室蘭工業大学 中村 作太郎

正員 同 番 匠 勲

正員 同 志 村 政 雄

1. 緒 言

支間一定 ($l = 80 \text{ cm}$) で高さの異なる4種類のI桁模型 (図-1, 表-1 参照) を単純に支持し, 上突縁の中央点に最大力量 150 t のアムスラー式圧縮試験機によって集中線荷重を載荷し, 降伏点に達するまでの荷重の増加にともなう断面応力度分布と, たわみの変化状態をストレインメーターとダイヤルゲージによって測定し, 理論計算値と比較吟味することにより, 支間と高さの比がどのように影響するかを明白ならしめた。またとくに, 破壊の現象を観測し, その変形状況を記録することにより, 集中荷重を受ける単純I桁の正しい理論を追究した。

更に, 理論値と実験値を正確に比較するためには, 模型材料の物理, 機械的性質を明白ならしめることが必要なの

で, 曲げ, 引張, 圧縮, それぞれの素材試験をも行ない, 降伏点応力度, 破壊応力度, 弾性係数などを決定した。

理論と実験の比較では, 腹鉄, 上突縁, 下突縁, それぞれの断面応力度 σ_x の分布, 荷重—たわみ曲線, 曲げ破壊荷重, 横振れ座屈荷重など, それぞれについて吟味検討した。

2. I桁模型の破壊実験とその応力解析

(1) 模型 製 作

図-1, 表-1 のとおり, 高さの異なる4種類のI桁模型 A, B, C, D を構造用平鋼 (SS-41) の電弧式連続隅肉溶接 (脚長 $6 \times 9 \text{ mm}$) により製作した。製作は素材試験用の Test piece (JIS 規格によるもの) と共に函館 Dock 室蘭製作所に依頼した。

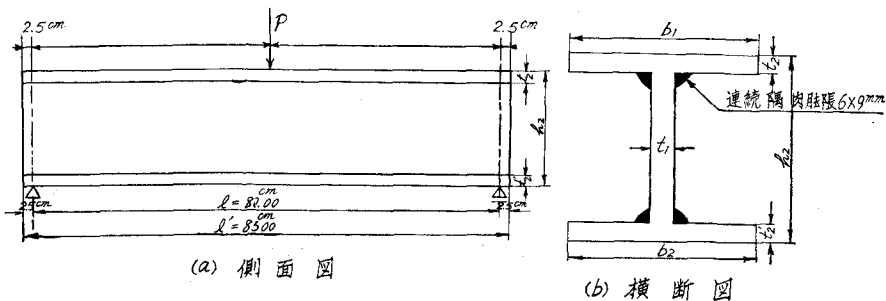


図-1

表-1 模型桁の諸数値

Beam	種				別				
	$b_1 (\text{cm})$	$b_2 (\text{cm})$	$t_1 (\text{cm})$	$t_2 (\text{cm})$	$h_1 (\text{cm})$	$h_2 (\text{cm})$	$A (\text{cm}^2)$	$I (\text{cm}^4)$	$W (\text{cm}^3)$
A	6.838	7.453	0.615	0.776	5.916	7.503	15.473	144.407	38.488
B	6.832	7.482	0.650	0.789	8.426	10.003	17.276	283.472	56.672
C	6.835	7.490	0.655	1.022	10.474	12.516	22.155	569.285	90.969
D	6.861	7.513	0.652	1.026	13.073	15.126	23.948	889.313	117.581

(2) 実験装置

アムスラー型圧縮試験機 (最大力量 150 t)
アムスラー型引張試験機 (最大力量 50 t)
インジケーター SM4J型 抵抗線歪測定器
ジャンクションボックス SJ4C
スイッチボックス SS24J
gage テスター GF5B
gage-type K-22-1, gage length 10.5 mm, gage-
factor 2.02, gage-resistance $120.1 \pm 3 \Omega$, gage-temp.
coef. $\times 10^{-6}$ strain/ $^{\circ}\text{C}$, gage-quantity 10
ダイヤルゲージ 精度 1/100 mm

(3) 実験方法

a. 実験準備

(i) 4個の模型とも、支点部、支間中央部、支点より
1/6 l, 1/3 lの個所に、腹板、上突縁、下突縁の分を合せ、
A, B模型で74枚ずつ、C模型で88枚、D模型で102枚
のゲージをはる。

(ii) ゲージにターミナルおよびリード線を接続する。
このリード線を24点スイッチボックス3個と6点スイッ
チボックスに接続し、ダミーゲージには実験を行なわない
模型のゲージを使用する。

(iii) ストレインメーター、スイッチボックスの初平衡
調整を行なう。

(iv) 全部の調整が終わったら測定準備完了である。

b. 測定要領と方法

(i) 集中線荷重は150 t アムスラー式圧縮試験機によ
って上突縁の支間中央点にかける。

(ii) 初荷重を500 kgとし、以下500 kg づつ荷重を順
次増して行き、500 kg ごとに測定値を記録する。すなわち、
部材応力および中央点のたわみをストレンメーターとダ
イアルゲージによって測り、荷重は破壊または座屈するま
で続け、部材応力ならびにたわみの変化状態を明らかなら
しめた。

(iii) ダイアルゲージは、下弦材中央点の底部にとりつ
け、弾性限度以上の荷重に対しても、できるだけ入念に測
定を試みた。また、破壊あるいは座屈を起こす極限状態付
近の現象を仔細に観察した。

(iv) 支点受台の沈下量を厳密に検査するため、両支点
部にもダイヤルゲージを取付けた。しかし、その影響は殆
んどなく省略出来るものなることを確認した。

(4) 理論計算

a. 曲げモーメントによる降伏点以内の断面縁維応
度 σ

$$\sigma = \frac{M}{I} y = \frac{M}{W} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、M: 曲げモーメント (kg-cm) (降伏点荷重以内)
W: 断面係数 (cm³)

表—2 Beam (A) の σ 値 (kg/cm²)

P(t)	$\sigma_{l/6}$	$\sigma_{l/3}$	$\sigma_{l/2}$
0.5	± 88.5	± 177.3	± 265.7
1.0	± 177.3	± 354.2	± 531.5
1.5	± 265.7	± 531.5	± 797.2
2.0	± 354.2	± 708.7	± 1,063.0
3.0	± 531.5	± 1,063.0	± 1,594.5
3.5	± 620.0	± 1,240.2	± 1,860.2
4.0	± 708.7	± 1,417.2	± 2,126.0
4.5	± 797.2	± 1,594.5	± 2,391.0
5.0	± 885.7	± 1,771.7	± 2,657.5
5.5	± 974.5	± 1,948.7	± 2,923.2
6.0	± 1,063.0	± 2,126.0	± 3,188.9

(注) (+)…引張応力度, (−)…圧縮応力度

表—3 Beam (B) の σ 値 (kg/cm²)

P(t)	$\sigma_{l/6}$	$\sigma_{l/3}$	$\sigma_{l/2}$
0.2	± 23.5	± 47.1	± 70.6
0.5	± 58.8	± 117.6	± 176.5
0.7	± 82.4	± 164.7	± 247.0
1.0	± 116.4	± 235.2	± 352.9
1.5	± 176.5	± 352.8	± 529.4
2.0	± 235.3	± 470.6	± 705.8
2.5	± 294.1	± 588.2	± 882.3
3.0	± 352.8	± 706.2	± 1,058.7
3.5	± 411.7	± 823.5	± 1,235.2
4.0	± 470.6	± 941.1	± 1,411.6
4.5	± 530.0	± 1,059.3	± 1,588.1
5.0	± 583.2	± 1,176.4	± 1,764.5
5.5	± 647.0	± 1,294.1	± 1,941.0
6.0	± 706.2	± 1,412.3	± 2,117.5
6.5	± 764.7	± 1,529.4	± 2,293.9
7.0	± 823.5	± 1,646.9	± 2,470.4
7.5	± 882.8	± 1,764.5	± 2,646.8
8.0	± 941.1	± 1,882.2	± 2,823.3

(注) (+)…引張応力度, (−)…圧縮応力度

表—4 Beam (C) の σ 値 (kg/cm²)

P(t)	$\sigma_{l/6}$	$\sigma_{l/3}$	$\sigma_{l/2}$
0.5	± 36.65	± 73.29	± 109.93
1.0	± 73.29	± 146.58	± 219.85
2.0	± 146.58	± 293.14	± 439.71
3.0	± 219.96	± 439.73	± 659.56
4.0	± 293.14	± 586.29	± 879.42
5.0	± 366.43	± 732.89	± 1,099.27
6.0	± 439.73	± 879.46	± 1,319.13
7.0	± 513.00	± 1,026.00	± 1,538.98
8.0	± 586.29	± 1,161.27	± 1,758.94

$P(t)$	$\sigma_{l/6}$	$\sigma_{l/3}$	$\sigma_{l/2}$
9.0	± 659.60	± 1,318.80	± 1,978.69
10.0	± 732.89	± 1,465.80	± 2,198.55
11.0	± 806.14	± 1,611.87	± 2,418.40
12.0	± 879.46	± 1,758.40	± 2,638.26
13.0	± 952.75	± 1,904.93	± 2,858.11
14.0	± 1,026.00	± 2,052.02	± 3,077.97

(注) (+)…引張応力度, (-)…圧縮応力度

b. セン断力の影響を加算せる理論たわみ¹⁾

せん断力の影響を加算せる理論たわみ δ の式を求めれば次の通りになる。

$$\delta = \delta_B + \delta_s = \frac{Pl^3}{48EI} + \frac{Pl}{4GA_w} = \frac{Pl^3}{48EI} \left(1 + \frac{30 \cdot I}{A_w \cdot l^2} \right) \dots\dots (2)$$

ここに、

- δ_B : 曲げモーメントのみによるたわみ (cm)
- δ_s : セン断力のみによるたわみ (cm)
- P : 支間中央点にかかる集中荷重 (kg)
- l : 支間 80 (cm)
- E : 弾性係数 2.1×10^6 (kg/cm²) (素材試験より)
- G : セン断弾性係数 $2/5 E$ (kg/cm²)
- I : 断面二次モーメント (cm⁴)
- A_w : 腹板の断面積 (cm²)

(2) 式を計算すれば、表-6 が得られる。

c. 曲げモーメントによる破壊荷重の理論値

(1) 式の M の代りに、 $\frac{1}{2} P_K \cdot l$ を用いれば、

$$P_K = \frac{W}{20} \sigma_K \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

- P_K : 理論破壊荷重 (kg)
- W : 断面係数 (cm³)
- σ_K : 材料の破壊引張応力度または破壊曲げ応力度 (kg/cm²)

素材試験の結果より得た σ_Y, σ_K の値を用いて計算する。

(表-7 参照)

表-5 Beam (D) の σ 値 (kg/cm²)

$P(t)$	$\sigma_{l/6}$	$\sigma_{l/3}$	$\sigma_{l/2}$
0.5	± 30.5	± 61.1	± 91.5
1.0	± 61.1	± 122.0	± 183.1
1.5	± 91.5	± 183.1	± 274.6
2.0	± 122.0	± 244.1	± 366.2
3.0	± 183.1	± 366.2	± 549.2
4.0	± 244.1	± 488.2	± 732.3
5.0	± 305.1	± 610.3	± 915.4
6.0	± 366.2	± 732.3	± 1,098.5
7.0	± 427.2	± 854.4	± 1,281.6
8.0	± 488.2	± 976.5	± 1,464.7
9.0	± 549.2	± 1,098.5	± 1,647.8
10.0	± 610.3	± 1,220.5	± 1,830.8
12.0	± 732.3	± 1,464.7	± 2,197.0
14.0	± 854.4	± 1,708.8	± 2,563.2
16.0	± 976.5	± 1,952.9	± 2,929.3
17.0	± 1,037.4	± 2,075.0	± 3,112.4

(注) (+)…引張応力度, (-)…圧縮応力度

表-6 σ の計算値

Beam	計 算 値				
	δ_B (cm)	$30 I$ (cm ⁴)	$A_w l^2$ (cm ⁴)	δ_s (cm)	$\delta = \delta_B + \delta_s$ (cm)
A	0.035174P	4,332.219	23,283.2	0.006546P	0.041720P
B	0.017911P	8,504.160	35,052.8	0.004345P	0.022256P
C	0.008922P	17,078.547	43,904.0	0.003471P	0.012393P
D	0.005687P	26,679.399	54,553.6	0.002781P	0.008468P

(注) P : 支間中央点にかけた集中荷重

表-7 素材試験による σ_Y, σ_K の値

種 別	降伏点応力度 σ_Y (kg/cm ²)	破壊応力度 σ_K (kg/cm ²)
Tension test	2,874.7	4,261.3
Bending test	4,751.7	6,661.3

表-8 曲げ破壊荷重および曲げ降伏点荷重

Beam	W (cm ³)	Tension test の $\sigma_Y \sigma_K$ より		Bending test の $\sigma_Y \sigma_K$ より		実験による P_Y, P_K	
		P_Y (t)	P_K (t)	P_Y (t)	P_K (t)	P_Y (t)	P_K (t)
A	38.488	5.53	8.20	9.14	12.82	6.2	6.6
B	56.672	8.15	12.07	13.46	18.88	9.8	12.7
C	90.969	13.08	19.38	21.61	30.30	15.0	18.8
D	117.582	16.90	25.05	27.936	39.16	19.5	21.2

表-9 横振り座屈荷重の理論値 (P_{cr})

Beam	$B_1 \cdot C$	$\sqrt{B_1 \cdot C}$	$G(\text{kg/cm}^2)$	$G/l^2(\text{kg/cm}^4)$	m	$m\sqrt{B_1 \cdot C}(\text{t-cm}^2)$	$P_{cr}(\text{t})$
A	$259.5 G^2$	$16.109 G$	0.81×10^6	126.56	22.4	292,275.20	45.668
B	$412.8 G^2$	$20.317 G$	"	"	27.1	445,971.20	69.683
C	$796.3 G^2$	$28.219 G$	"	"	25.3	578,278.40	90.356
D	$871.7 G^2$	$29.525 G$	"	"	28.8	708,742.40	107.616

d. 横振れ座屈荷重の理論値

S. Timoshenko の理論式²⁾より, 中央に集中荷重を受ける単純桁(両端は振りに対してのみ抵抗振りモーメントを受ける)の場合を引用すると,

$$P_{cr} = \frac{m\sqrt{B_1 \cdot C}}{l^2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに,

l : 支間 80 (cm)

C : 振り剛さ

$$G\left(\frac{2}{3}b_2t_2^3 + \frac{1}{3}h_1t_1^3\right) (\text{kg} \cdot \text{cm}^2)$$

B_1 : y - y 軸に関する曲げ剛さ

$$= \left\{ 2 \frac{1}{12} t_2 b_2^3 + \frac{1}{12} (h_1 - 2t_2) t_1^3 \right\} E (\text{kg} \cdot \text{cm}^2)$$

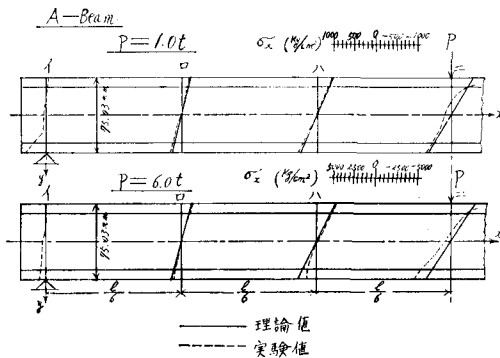


図-2 腹鉋の応力度 (1)

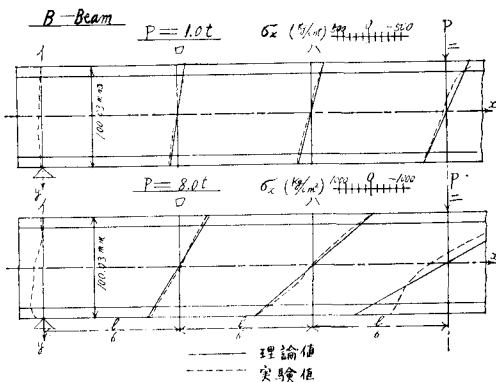


図-3 腹鉋の応力度 (2)

$$m: \left\{ l^2/a^2 = \frac{4C}{B_1} \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right\} \text{によって定まる係数}$$

(4)を用い計算すれば, 表-9 が得られる。

表-9 の P_{cr} は集中荷重が上突縁の支間中央に載った場合の値であり, 中心線上支間中央点に載荷せる場合には,

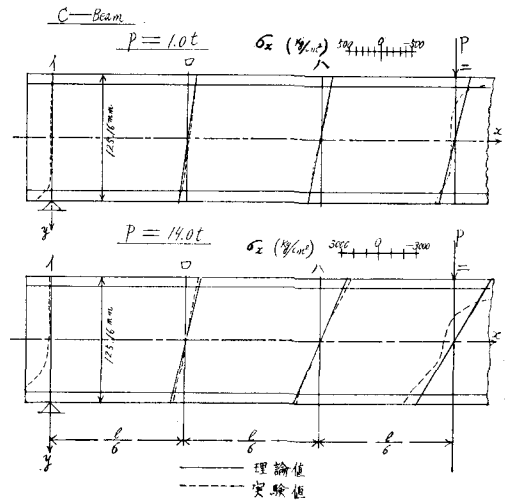


図-4 腹鉋の応力度 (3)

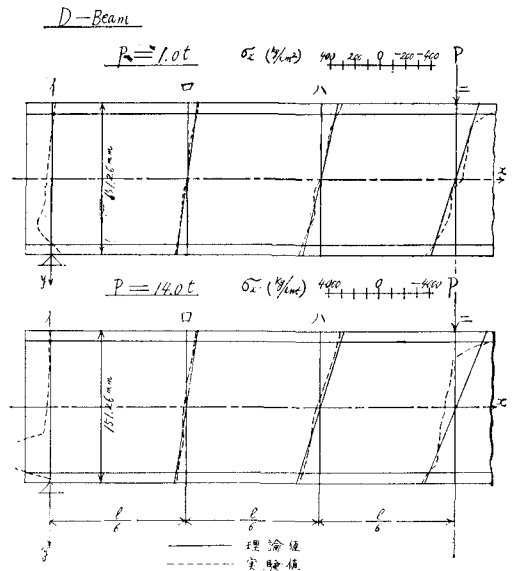


図-5 腹鉋の応力度 (4)

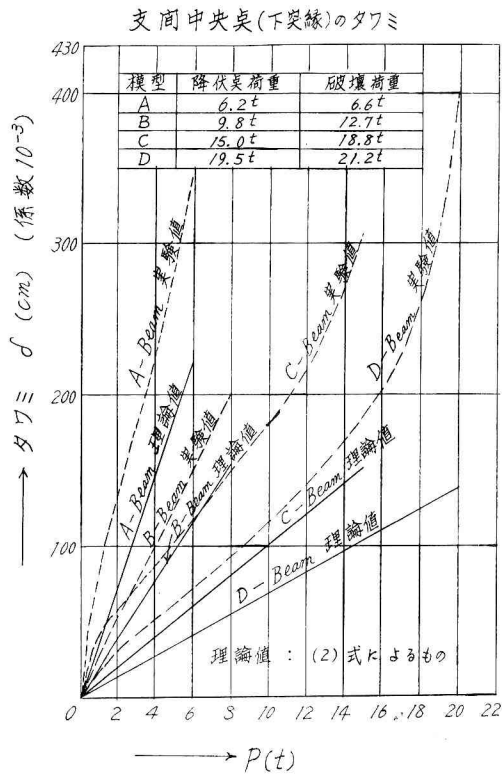


図-8 荷重-タワミ曲線

Beam (A) で $P_{cr} = 31.896$ t, Beam (B) で 46.500 t, Beam (C) で 59.542 t, Beam (D) で 70.380 t になった。

(5) 実験結果

実験結果を図示すれば、図-2～図-8 のとおりとなる。図-2～図-5 は Beam (A)～Beam (D) の腹板の断面応力度 σ_x の一部を理論値と比較して示したものであり、図-6 は上突縁の応力度 σ_x 、図-7 は下突縁の応力度 σ_x を図示したものである。

また、図-8 は荷重-タワミ曲線を描いたものであり、理論値の線と比較してみた。

写真-1 は、破壊荷重による模型桁の変形状況を示したものであり、桁高の高いもの程集中荷重の載荷点付近の上突縁に著しい変形を生ずることが明らかになった。

3. 考 察

(1) 応力度について

支点断面では単純静定桁の理論によれば σ_x 応力度は零になるべきであるが、支承の条件その他の原因(キップ現象など)により下突縁に近い腹板にかなり大きな引張応力度を示した。しかもこの引張応力度 σ_x は桁高が高くなるにつれて大きくなる傾向にあった。

中央載荷点の断面では応力度 σ_x の分布に集中荷重の局

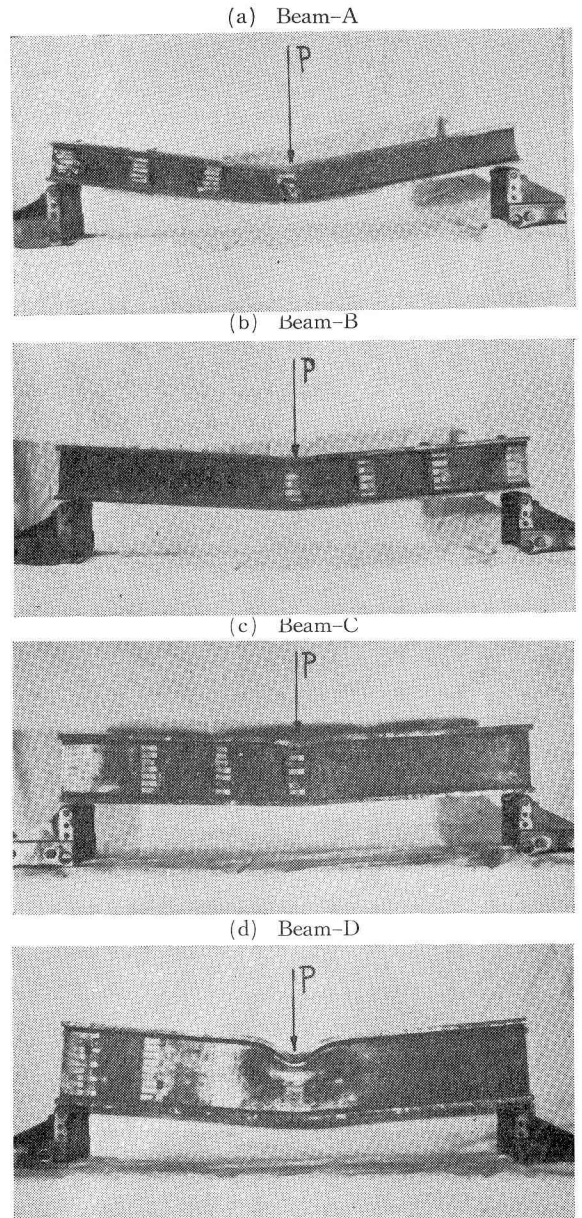


写真-1 破壊時の変形状況

部的影響が作用し、応力度零の点が桁中心線よりかなり上方にずれ、上突縁の圧縮応力度は急激に増大し、荷重を増加すれば座屈または破壊の起点となることが推察された。

また、中間断面における応力度 σ_x の分布はかなりよく理論的分布に近似しており、荷重点に近づくに従って理論の線から相離れて行くことがわかった。

(2) たわみについて

実験によるたわみは、単純桁の初等理論による計算値(曲げたわみとせん断たわみを加算せるもの)と著しく異な

り、その差異は約35~55%を示し、実験値の方が大きくなっている。しかもその差異は、桁高の高いものほど、また荷重の増大するほど著しくなる傾向にあり、実験曲線は荷重の増大につれて理論線より相離れて行くことが明白になった。

これは、集中荷重の載荷点と支点部における著しい局部応力によるI桁特有の現象、いい換えるならば、横剛性に乏しい腹板の局所座屈および腹板全体としての横振り現象による影響および支点部における桁の非弾性沈下(圧密によるものを含む)の影響などが加算されて生ずるものと考えられる。非弾性沈下の影響は4~10%程度で、A桁において最大であった。この影響は荷重の小さい時大なるも、段々荷重の増大につれて小さくなって行く傾向のあることが認められた。

せん断力の影響は断面が大きいのでかなり大きく、16~%を示した。

横振りをともなう場合のたわみ現象は極めて複雑であり、その計算はやって見ないが、かなり大きくなるのではないかと推定される。本実験に用いたI桁は、フランジの断面が腹板に比べ大きいので、横振り剛性に富み、横振り座屈するほどではなかったが、腹板だけを切離して計算してみると、その時の座屈荷重の極めて小さかったことと、破壊後の変形状況などからみても当然、腹板の横振り現象(キップ現象)がたわみに影響しているものと推察される。これについては更に研究の余地があると思う。

(3) 座屈または破壊について

実験に用いたI桁模型は、フランジの振り剛性がかなり大なるため、横振り座屈に対する抗力が相当大であり、計算の結果から見れば、全体としての座屈荷重はかなり大きく、曲げ破壊荷重の約2.5~4.0倍を示している。しかし、たわみのところでも述べた通り、腹板だけ切離して計算してみると、予想もしないほど座屈荷重が小さくなるから、腹板の支間中央付近における部分的座屈は当然考えられるわけである。

要するに、破壊は主として曲げ応力度によって上突縁の載荷点付近に生じ、その進行状況は、載荷点直下の腹板、下突縁へと伝達して行くことが観察された。

すなわち、本実験に用いたI桁模型の腹板における破壊は、全体的な横振り座屈によるよりも荷重点付近の局部応力による上突縁の変形に始まり、次いで横剛性に乏しい腹板が中央付近で座屈したものと考えられる。この推定の正

しいことは理論計算と実験値との比較からみても判断される処である。

尚、全体としての横振り座屈現象を調べるための実験としては、もっと腹板の断面積に比べ、フランジの断面積の小さな、しかも背の高い模型I桁を採用すべきである。

4. 結 言

本実験では、たわみと破壊荷重の結果より集中荷重の局部的影響と支点部の局部応力の影響の大きいことおよびたわみ実験値が初等単純桁理論(曲げたわみとせん断たわみを加算したもの)によって求めた値よりかなり大きく、桁高の高いものほどその差が著しくなっていく傾向にあることなどを見出した。この結果は、矩形断面の桁(鋼鉄・エポキシ樹脂、木材など)のほかの実験結果³⁾とも概略的にみて一致する傾向を示した。すなわち、底面に支承を有する単純支持桁の上面に集中荷重を載荷する場合の曲げ応力現象(線形単純曲げの現象とは思われない)を解析する上においても一資料となるものと思う。しかしまた、I断面の桁は、詳細に論ずれば勿論、普通の矩形断面の桁とはその変形と破壊現象が異なり、荷重が大きくなればなるほど腹板全体としての横振り変形の現象が生じている筈であり、もう少しフランジの小さな大型の模型についてゲージの数を増やし、精密なる試験を行なってみたならば、更に興味ある結果が得られるのではないかと推定される。

尚、本実験においては、模型が小さいため集中荷重の載荷点と支点付近の応力測定に非常に困難を来とし、不鮮明な点のあったことを謝し更に今回の実験で不鮮明な点は今後別の模型実験によって追究する考えである。

最後に、本研究に御協力頂いた室蘭工業大学土木学科卒業生、勝俣征也、竹形晴彦の両君に深謝すると共に、この研究は、昭和37年度北海道科学研究費の補助金を受けたものなることを付記し、感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 増田淳, 他3名: 桁の理論とその応用 (1935) 増田橋梁研究所.
- 2) 久田俊彦, 他2訳: テイモシエンコ挫屈理論 (1958) コロナ社.
- 3) 中村作太郎, 番匠勲: 高さを考慮せる単純桁の光弾性模型実験による撓みと応力度分布に関する研究 土木学会第17回年次学術講演会概要集 I-78, (1962).