

天草連絡道路のPC橋の柱頭部トラスの光弾性試験

栗 原 利 栄*
 国 広 哲 男**

1. ま え が き

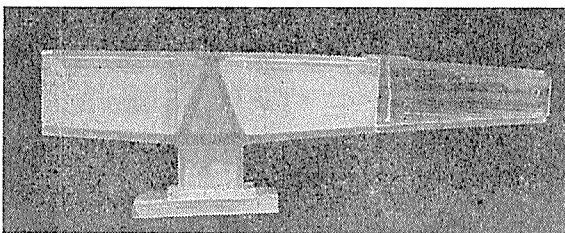
天草3号橋および4号橋では、箱型断面の桁と同じく箱型断面の橋脚の脚柱とは剛結されており、桁に生ずる大きな曲げモーメントは、剛結部を通じて脚柱に伝達される。この桁から脚柱への曲げモーメントの伝達が確実に容易に行なえるようにするため、剛結部すなわち柱頭部には箱桁断面内に斜め壁を配置してトラス状としている¹⁾。このようなトラス状の部材の応力を理論的に求めることはきわめて困難である。しかしながら、実際の設計においては、簡単な仮定をおいた実用的計算法によって、このトラス部材の応力を求めている。

曲げモーメントの伝達の際に、柱頭部にどのような応力が生じるかを明らかにし、トラス部材の実用的な設計法が妥当かどうかを検討するために、筆者らはすでにコンクリート製の模型について試験を実施した²⁾。しかしながらこの試験では、測定されたひずみの値が非常に小さく、これから柱頭部トラス部材の応力について明確な結論を導くことは困難であった。したがって、これらの点についてさらにくわしく検討するために、ここに述べる光弾性試験を実施した。

2. 模型および試験方法

模型は、4号橋の端橋脚 P₁ の柱頭部および中間橋脚 P₂ の柱頭部を対象にして写真-1, 2 に示すように2個製作した。

写真-1 端橋脚 P₁ の柱頭部の模型



* 日本道路公団天草架橋工事事務所長

** 建設省土木研究所橋梁研究室長

模型の断面寸法は図-1 に示すとおりで、これは実橋の1/100であり、部材と部材の剛結点においては、実橋に忠実にハンチを付した。

模型材料はエポキシ樹脂で、写真-3 に示すように、断面幅の中心線(図-1 に示す Y-Y 軸)に関して左右別々にけずり出した2つの模型片を後ではり合わすという方法で模型を製作した。

端橋脚柱頭部を対象とした模型については、中央径間側に相当する桁の先端にのみ荷重をかけた非対称荷重の

写真-2 中間橋脚 P₂ の柱頭部の模型

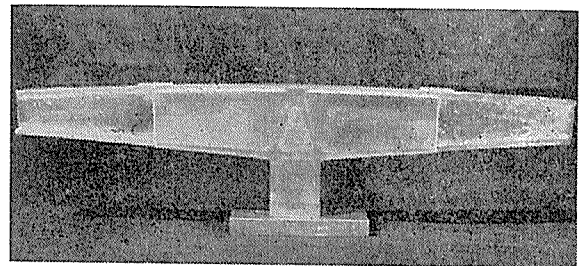
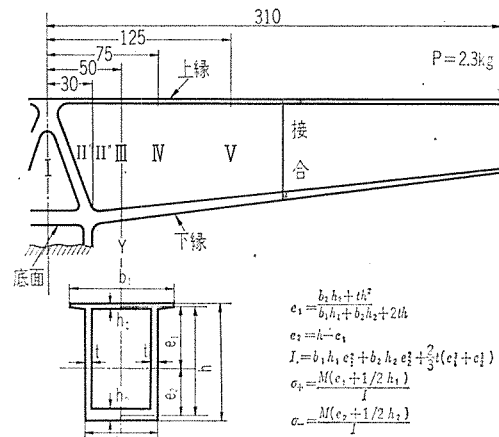


図-1 模型の断面諸値

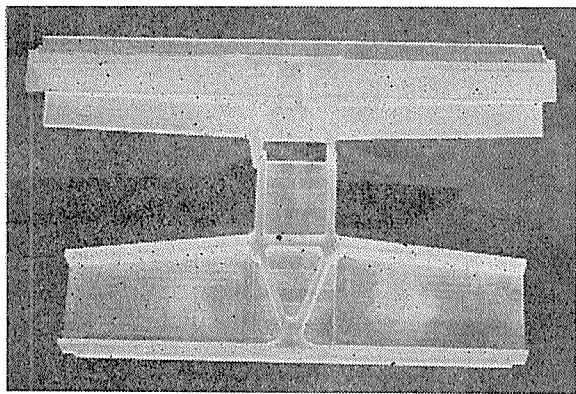


(単位: mm)

断面	h ₁	h ₂	t	e ₁	e ₂	I
I	3.5	10	10	41.6	37.2	2.00×10 ⁶
II'	"	"	"	"	"	2.00
II''	"	8	4	44.6	35.2	1.34
III	"	7.6	4	43.1	34.8	1.25
IV	"	7.1	3	40.9	33.6	1.03
V	"	6.2	3	36.3	32.1	0.81

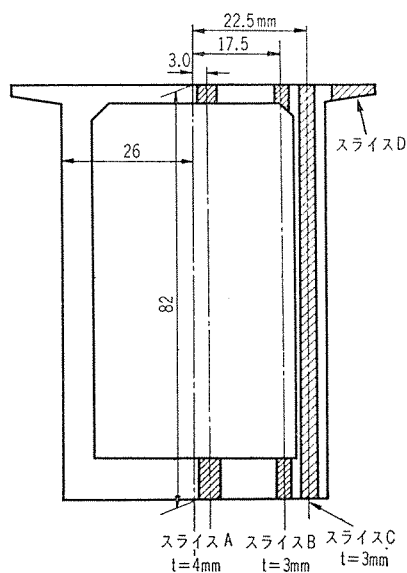
b₁ ≈ 50
 b₂ ≈ 50

写真-3 模型の製作



場合をとり扱い、中間橋脚柱頭部を対象とした模型については、両側の桁の先端に同じ大きさの荷重をかけた対称載荷の場合をとり扱った。荷重の大きさはいずれも2.3 kgである。

図-2 スライス位置



試験方法としては、応力凍結法を用いた。すなわち荷重をかけた模型を恒温槽に入れ、常温より徐々に温度をあげて模型に応力を凍結し、再び常温までもどした。このような模型より図-2に示すように4つのスライスを切り出し、2

3. 応力の計算値

模型の桁の上、下縁における応力の計算値は、表-1のとおりである。

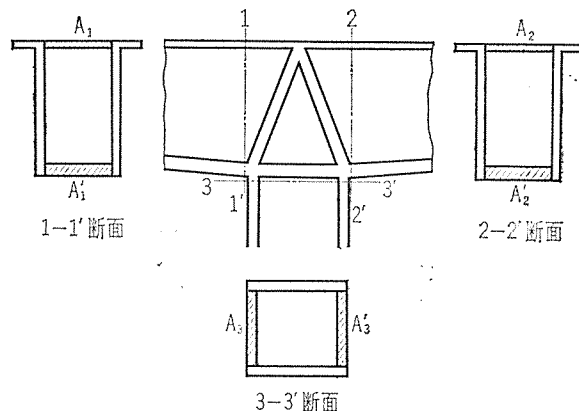
実橋の設計に用いている柱頭部トラス部材の応力の実用的計算法によると、模型の場合の応力はつぎのように

表-1 桁上、下縁に生ずる応力

断面	M (kg·cm)	上縁 σ (kg/cm ²)	下縁 σ (kg/cm ²)
I	71.3	-1.54	+1.49
II'	64.4	-1.39	+1.35
II''	64.4	-2.23	+1.94
III	59.8	-2.15	+1.85
IV	54.1	-2.24	+1.95
V	42.6	-2.01	+1.85

-は引張、+は圧縮をあらわす

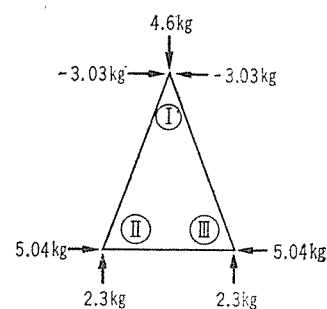
図-3 力が作用すると仮定する断面



計算される。図-3に示すように1-1', 2-2', 3-3'断面の斜線をほどこした部分に働く断面力が

図-4に示すように、三角部材の格点に働くものと仮定し、三角部材をトラス構造と考へて①, ②, ③の各格点について、鉛直および水平方向の力の均衡条件から各部材の応力を求めるのである。このようにして各部材の応力を求めると、同一部材において両端の応力に差が生ずるが、この差はせん断力となってウェブに伝えられると考へる。

図-4 トラス部材の格点に作用する力



(1) 端橋脚柱頭部の場合 (非対称載荷の場合)

a) 断面諸数値

1-1' 断面 :

$$A_1 = 4.2 \times 0.35 = 1.47 \text{ cm}^2, I = 134 \text{ cm}^4$$

$$A_1' = 4.2 \times 0.8 = 3.36 \text{ cm}^2$$

2-2' 断面 :

$$A_2 = 4.2 \times 0.35 = 1.47 \text{ cm}^2, I = 134 \text{ cm}^4$$

$$A_2' = 4.2 \times 0.8 = 3.36 \text{ cm}^2$$

3-3' 断面 :

$$A_3 = 4.2 \times 0.6 = 2.52 \text{ cm}^2, I = 58.5 \text{ cm}^4$$

$$A_3' = 4.2 \times 0.6 = 2.52 \text{ cm}^2$$

トラス斜材断面積 : $A_4 = 4.2 \times 0.7 = 2.94 \text{ cm}^2$

トラス底材断面積 : $A_5 = 4.2 \times 1.0 = 4.2 \text{ cm}^2$

b) 各断面に作用する力

1-1' 断面 : $M_1 = 0, S_1 = 0$

2-2' 断面 : $M_2 = 64.4 \text{ kg·cm}, S_2 = 2.3 \text{ kg}$

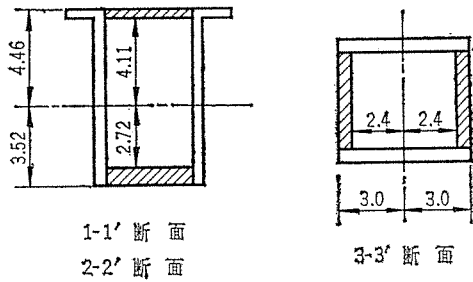
3-3' 断面 : $M_3 = 64.4 \text{ kg·cm}, N = 2.3 \text{ kg}$

c) 斜線をほどこした部分に作用する力 (図-5 参照)

1-1' 断面 : $P_1 = 0, P_1' = 0$

2-2' 断面 :

図-5 力が作用すると仮定する断面に関する諸値 (単位: cm)



$$P_2 = \frac{1.47 \cdot 64.4}{2 \cdot 134} (4.46 + 4.11) = -3.03 \text{ kg}$$

$$P_2' = -\frac{3.36 \cdot 64.4}{2 \cdot 134} (3.52 + 2.72) = +5.04 \text{ kg}$$

3-3'断面:

$$P_3 = \frac{2.3}{2} - \frac{2.25 \cdot 64.4}{2 \cdot 58.5} (3.0 + 2.4) = -6.33 \text{ kg}$$

$$P_3' = \frac{2.3}{2} + \frac{2.52 \cdot 64.4}{2 \cdot 58.5} (3.0 + 2.4) = +8.63 \text{ kg}$$

$$P_4 = 2.3 \text{ kg}$$

d) 柱頭部トラス部材の応力 (図-6 参照)

格点①の均衡より

$$\sigma_{I-II} \cdot \frac{2.7}{8.42} \cdot 2.94 - \sigma_{I-III} \cdot \frac{2.7}{8.42} \cdot 2.94 + 3.03 = 0$$

$$\sigma_{I-II} \cdot \frac{7.97}{8.42} \cdot 2.94 + \sigma_{I-III} \cdot \frac{7.97}{8.42} \cdot 2.94 - 2.3 = 0$$

$$\therefore \begin{cases} \sigma_{I-II} = \frac{2.3 \cdot \frac{2.7}{8.42} - 3.03 \cdot \frac{7.97}{8.42}}{2 \cdot \frac{2.7}{8.42} \cdot \frac{7.97}{8.42} \cdot 2.94} = -1.20 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{I-III} = \frac{2.3 \cdot \frac{2.7}{8.42} + 3.03 \cdot \frac{7.97}{8.42}}{2 \cdot \frac{2.7}{8.42} \cdot \frac{7.97}{8.42} \cdot 2.94} = 2.02 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

格点②の均衡より

$$\sigma_{II-I} \cdot \frac{2.7}{8.42} \cdot 2.94 + \sigma_{II-III} \cdot 4.2 = 0$$

図-6 トラス部材の格点に作用する力の大きさ (非対称載荷の場合)

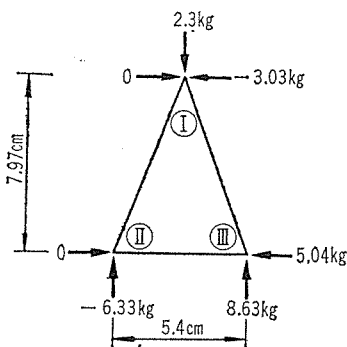


図-7 柱頭部トラス部材の応力 (非対称載荷の場合)

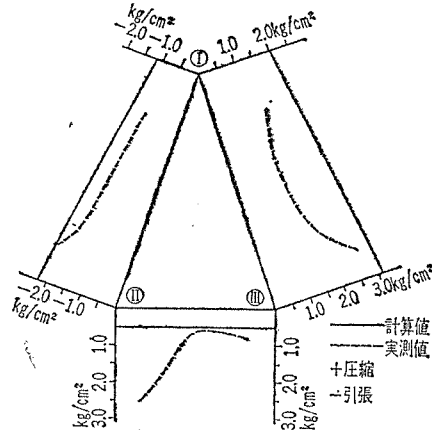
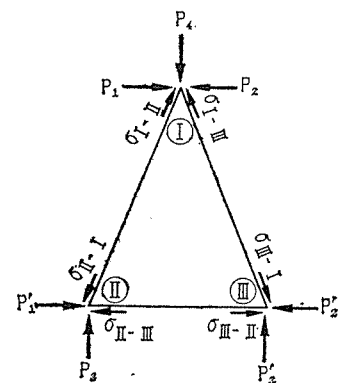


図-8 トラス部材の格点に作用する力の大きさ (対称載荷の場合)



$$\sigma_{II-I} \cdot \frac{7.97}{8.42} \cdot 2.94 = -6.33$$

$$\therefore \begin{cases} \sigma_{II-I} = \frac{-6.33}{\frac{7.97}{8.42} \cdot 2.94} = -2.28 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{II-III} = \frac{6.33 \cdot \frac{2.7}{8.42}}{\frac{7.97}{8.42} \cdot 4.2} = 0.51 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

格点③の均衡より

$$\sigma_{III-I} \cdot \frac{2.7}{8.42} \cdot 2.94 + \sigma_{III-II} \cdot 4.2 = 5.04$$

$$\sigma_{III-I} \cdot \frac{7.97}{8.42} \cdot 2.94 = 8.63$$

$$\therefore \begin{cases} \sigma_{III-I} = \frac{8.63}{\frac{7.97}{8.42} \cdot 2.94} = 3.10 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{III-II} = \frac{5.04 \cdot \frac{7.97}{8.42} - 8.63 \cdot \frac{2.7}{8.42}}{\frac{7.97}{8.42} \cdot 4.2} = 0.50 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

以上の計算結果より、柱頭部トラス部材の応力の計算値は 図-7 に示すとおりである。

(2) 中間橋脚柱頭部の場合 (対称載荷の場合)

断面諸数値は前と同様である。

a) 各断面に作用する力

1-1'断面: $M_1 = 64.4 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, $S = 2.3 \text{ kg}$

2-2'断面: $M_2 = 64.4 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, $S_2 = 2.3 \text{ kg}$

3-3'断面: $M_3 = 0$, $N = 4.6 \text{ kg}$

b) 斜線をほどこした部分に作用する力 (図-5 参照)

1-1'断面: $P_1 = -3.03 \text{ kg}$, $P_1' = 5.04 \text{ kg}$

2-2'断面: $P_2 = -3.03 \text{ kg}$, $P_2' = 5.04 \text{ kg}$

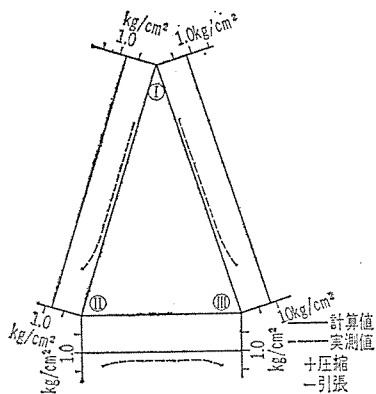
3-3'断面: $P_3 = 2.3 \text{ kg}$, $P_3' = 2.3 \text{ kg}$

c) 柱頭部トラス部材の応力 (図-8 参照)

格点①の均衡より

$$\sigma_{I-II} = \frac{4.6}{2 \cdot \frac{7.97}{8.42} \cdot 2.94} = 0.83 \text{ kg/cm}^2$$

図-9 柱頭部トラス部材の応力(対称載荷の場合)



$$\sigma_{I-III} = 0.83 \text{ kg/cm}^2$$

格点 ① の均衡より

$$\sigma_{II-I} \cdot \frac{2.7}{8.42} \cdot 2.94 + \sigma_{II-III} \cdot 4.2 = 5.04$$

$$\sigma_{II-I} \cdot \frac{7.97}{8.42} \cdot 2.94 = 2.3$$

$$\sigma_{II-I} = \frac{2.3}{\frac{7.97}{8.42} \cdot 2.94} = 0.83 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{II-III} = \frac{5.04 \cdot \frac{7.97}{8.42} - 2.3 \cdot \frac{2.7}{8.42}}{\frac{7.97}{8.42} \cdot 4.2} = 1.01 \text{ kg/cm}^2$$

格点 ③ の均衡より

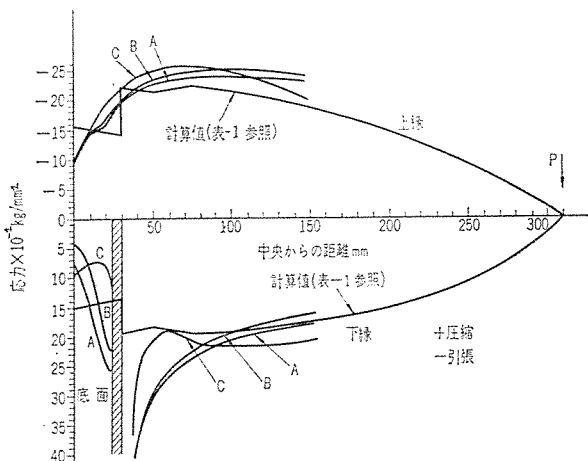
$$\begin{cases} \sigma_{III-II} = 0.83 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{III-II} = 1.01 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

以上の計算結果より、柱頭部トラス部材の応力の実用計算値は 図-9 に示すとおりとなる。

4. 試験結果およびその考察

実験によって得た等色線の縞写真を示せば 写真-4~11 に示すとおりである。写真-4~7 は、端橋脚柱頭部についての非対称載荷の場合、写真-8~11 は、中間橋脚柱頭部についての対称載荷の場合の等色線縞写真である。この等色線縞写真より模型の周辺応力分布を求める

図-10 周辺応力(非対称載荷)



と 図-10~14 となる。このような周辺応力の分布からつぎのようなことがいえる。

1) 桁上, 下縁の応力分布は、橋脚脚柱と桁との結合部付近をのぞいて表-1 に示す計算値とよく合っている (図-10, 13 参照)。

2) 脚柱中心線上の断面における桁上, 下縁の応力は

図-11 周辺応力(非対称載荷)

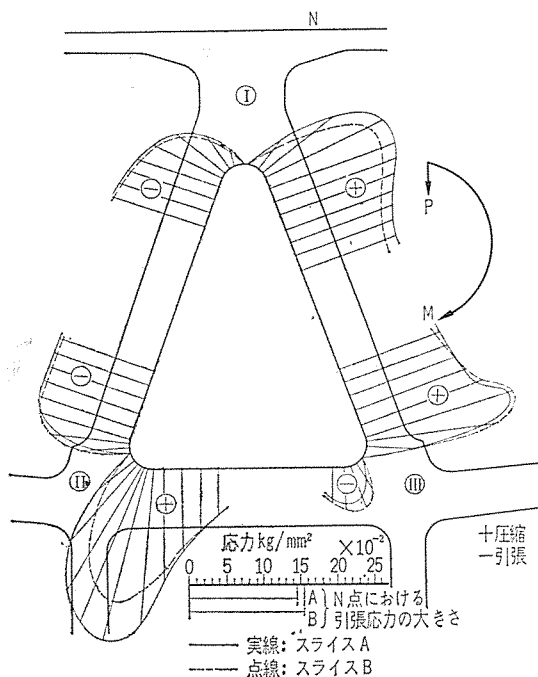
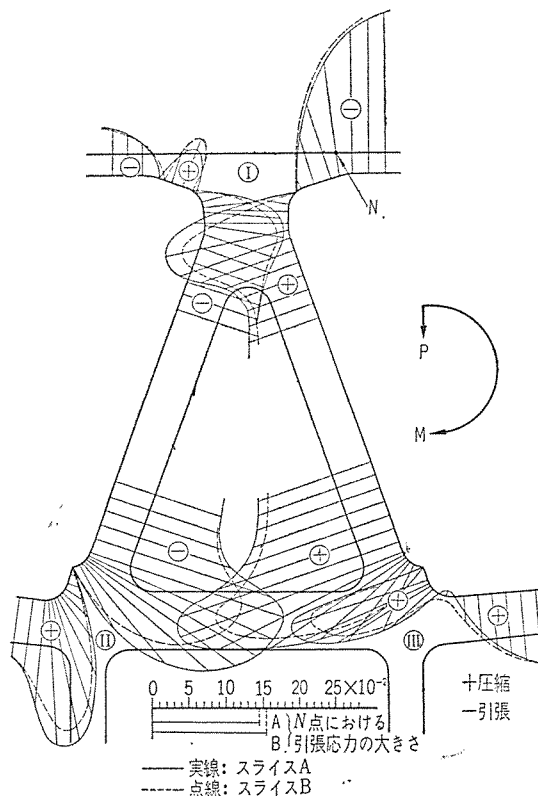


図-12 周辺応力(非対称載荷)



告

他の部分よりいくぶん小さくなる（図-10, 13 参照）。

3) 底スラブでは、脚柱壁との接合部ではとくに非対称載荷の場合には大きな応力集中が生じ、計算値の2倍以上の大きさの応力が生じる。この応力集中の影響範囲は、桁高の約 1/2, 底スラブ厚の約 5 倍程度である。対称載荷の場合には、底スラブの応力集中はそんなに大きくなく計算値の 40% 増し程度である。またその影響範

囲も前者より小さく桁高の約 1/5, 底スラブ厚の約 2 倍程度である（図-10, 13）。

4) 対称載荷の場合、柱頭部トラス部材に生じる応力には、応力集中が見られない、また斜材に生じる応力はきわめて小さい（図-14）。

写真-4 スライス A (非対称載荷)

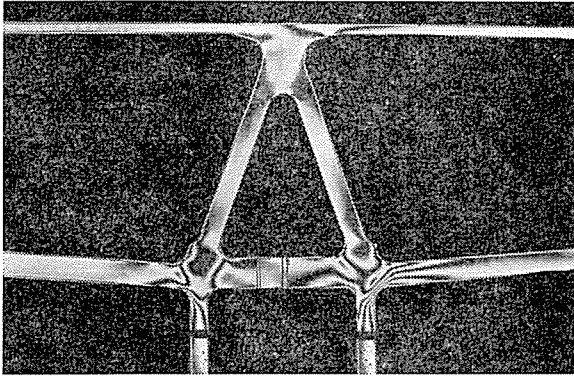


写真-5 スライス B (非対称載荷)

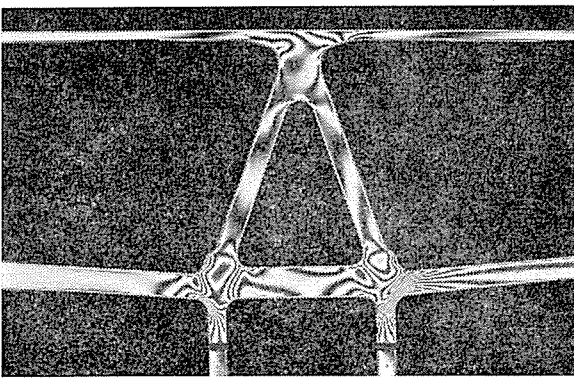


写真-6 スライス C (非対称載荷)

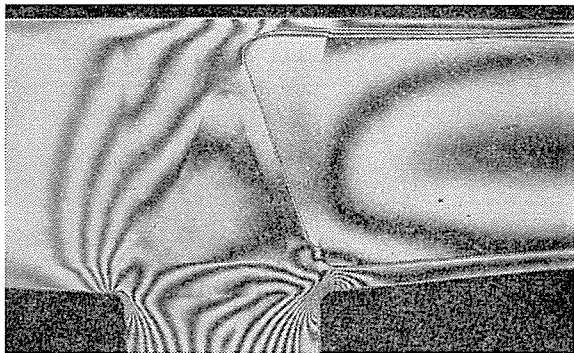


写真-7 スライス D (非対称載荷)

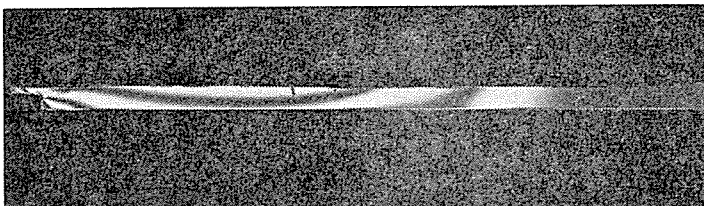


写真-8 スライス A (対称載荷)

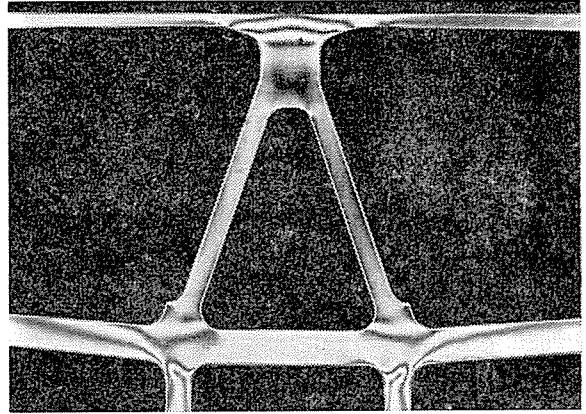


写真-9 スライス B (対称載荷)

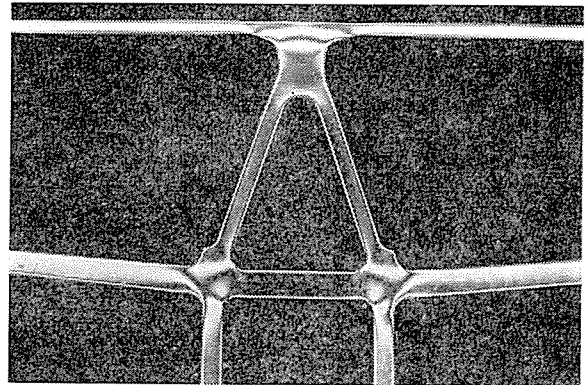


写真-10 スライス C (対称載荷)

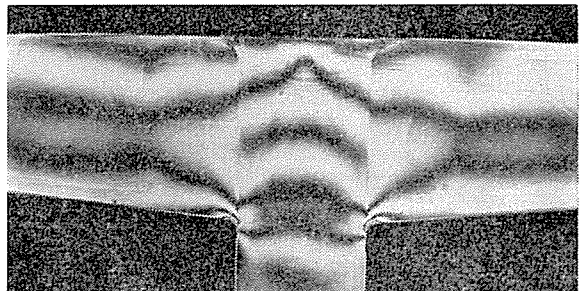


写真-11 スライス D (対称載荷)

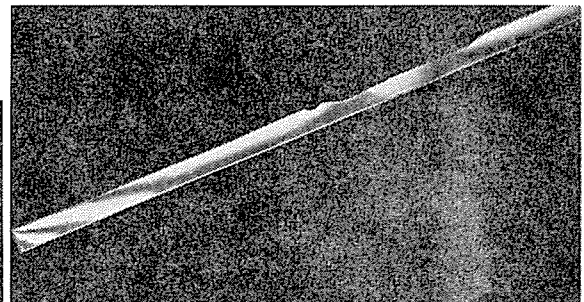


図-13 周辺応力 (対称載荷)

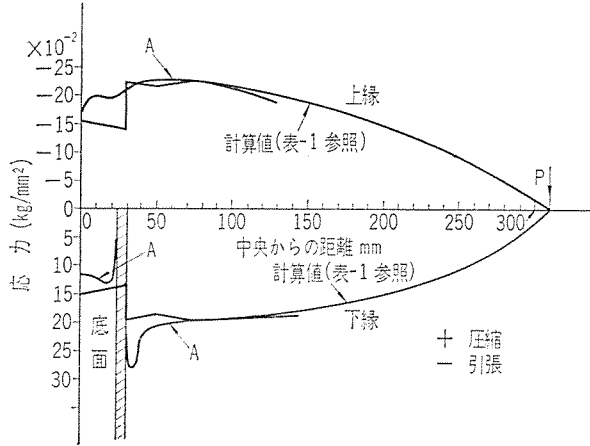
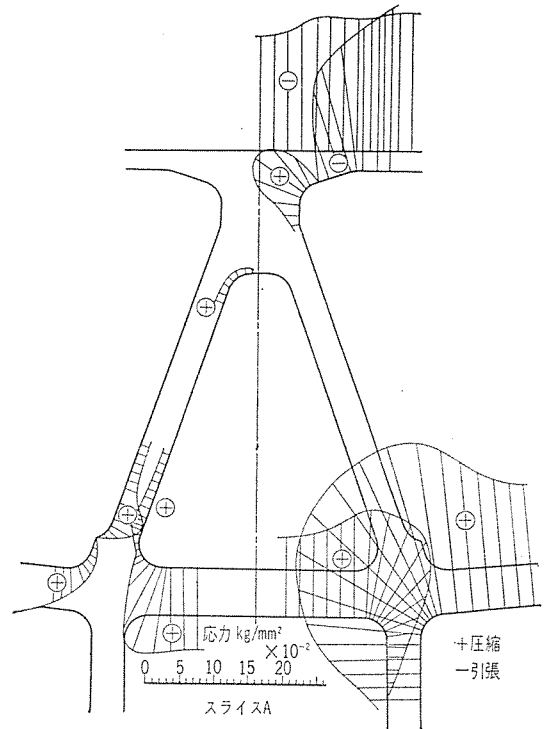


図-14 周辺応力 (対称載荷)



5) 非対称載荷の場合、柱頭部トラス部材に生じる応力には、格点付近において応力集中がみられる。またスライス A の方が、スライス B の方より応力がいくぶん大きくでるようである。トラス斜材における応力は、荷重の作用する側では圧縮、反対側では引張りが生じている。底材の応力は複雑な分布を示す。とくに、載荷側の格点 ⑩ の近くにおいては、底スラブの上面に引張応力が生じる (図-11, 12)。

6) 柱頭部トラス部材の内外周辺で応力の大きさがことなり、これらの部材には格点の剛結による影響で曲げ応力が生じているといえる (図-11, 12)。

7) 柱頭部トラス部材について、内外周辺応力の平均値をとることによって、曲げ応力を消去し、軸力による応力を求め、これと前述したような実用的計算法による計算応力とを比較してみると 図-7, 9 となる。

これらの図よりトラス斜材については、実用計算法は安全側の結果を与える。しかし底材については、いく分危険側の結果を与えるといえることができる。

5. あとがき

以上には、箱桁の柱頭部の応力状態についての光弾性による試験結果に関して述べてきたが、底スラブ (柱頭部トラスとしての底材をふくむ) で、脚柱壁との剛結部付近では、ハンチが付けてあるにもかかわらず、とくに非対称載荷の場合には非常に大きな圧縮応力が生じる。し

かしながら、

- ① この応力は局所的な範囲内に集中的に作用するものである
 - ② 以前に実施したコンクリートで造った模型による試験の結果によると、この応力集中が原因で桁が破壊したというような事実もない
 - ③ 実橋の場合、死荷重はすべて対称載荷で、大きな応力集中の原因となる非対称載荷は、活荷重によってのみ生ぜしめられるが、実橋は長大橋であるので活荷重の影響は死荷重の程度しかない
- というような諸点を考慮すると実橋の場合には、さして懸念するほどのことはないのではないかと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 本誌第 8 巻第 1 号 p. 16 「天草連絡道路第 3 号橋および第 4 号橋の設計・施工のあらまし」
- 2) 本誌第 8 巻第 2 号 p. 18 「天草連絡道路の P C 橋の模型試験」

1966.6.30・受付