

PC 単弦アーチ橋の模型実験

—いちのみや自動車歩道橋（仮称）—

赤 名 弘 名**
山 本 武 司**

1. ま え が き

前号に掲載された「PC 単弦アーチ橋の設計——いちのみや自動車歩道橋——」報告に続き、今回は模型実験の結果について報告する。

PC 単弦アーチ橋に関しては、施工実績例がなく、また本橋の構造に近い模型実験の報告も皆無であるので、(株)アール・エス・ケー設計事務所でも実施したものである。

2. 実験の目的

実験の目的は、当社において実施した設計手法が妥当であるかを確認することが一番の目的である。

以下、実験を実施するに当たり、その確認すべき項目を述べる。

2.1 全体構造の把握

単弦アーチ構造は、補剛桁、アーチ材、吊り材で構成され、これらの部材の合成された構造系であるので、「平面骨組構造」として解析した設計手法の妥当性を検討するため、静載荷実験を行い部材各部のひずみを測定し、応力状態を照査する。

2.2 部材接合部の応力照査

補剛桁、アーチ材、吊り材の応力状態は、引張—曲げ圧縮材、引張材であり、相反する部材の接合箇所——部材格点——での応力状態が不明確であり、また応力集中も予測されるので、光弾性実験を行い格点部の応力状態を把握する。

2.3 補剛桁の3主桁の分配性

ホロー桁形式の補剛桁で、3主桁と横桁で構成される平面格子構造の横分配性を、静載荷実験、光弾性実験のひずみ分布調査により把握し、床版の有効幅や、主桁横桁の分配性に対する関与の大きさを照査する。

2.4 偏載荷（桁トルクモーメント）に対する安定

補剛桁に対して、偏載荷（桁直角方向にトルクモーメントを与える載荷状態）状態とし、桁の安定と、補剛桁

の荷重分配性を把握する。

3. 実験計画

模型は縮尺 1/30 アクリル樹脂模型を製作した。補剛桁は実橋どおりに、3主桁と吊り材取付け点に設置した横桁で構成される平面格子構造モデルとなるように製作し、吊り材の軸力により補剛桁上フランジ（床版）に、付加曲げモーメントの入らないように注意した。模型の形状寸法は図-1 に示す。

荷重は静載荷実験に対しては、1包 500 円（10 円玉 50 枚）の硬貨を使用し、また光弾性実験での集中荷重に対しては、天井を反力版として機械式ジャッキを用いて載荷した。

光弾性実験は、反射型光弾性装置を使用して測定したが、ここでは反射型光弾性装置の内容についての説明は省略する。

静載荷実験、光弾性実験の実験装置を 図-2、図-3 におのおの示す。

3.1 測定点

静載荷実験のひずみ測定点は、図-4 に示すように、アーチ材格点間に3か所ずつ 18 か所、吊り材には上・下端 2 か所で計 12 か所、補剛桁は 2 軸方向に測定するとして、15 ライン設置し、1 ライン 3 か所とし計 45 か所で 231 点のひずみ計を設置した（写真-1）。

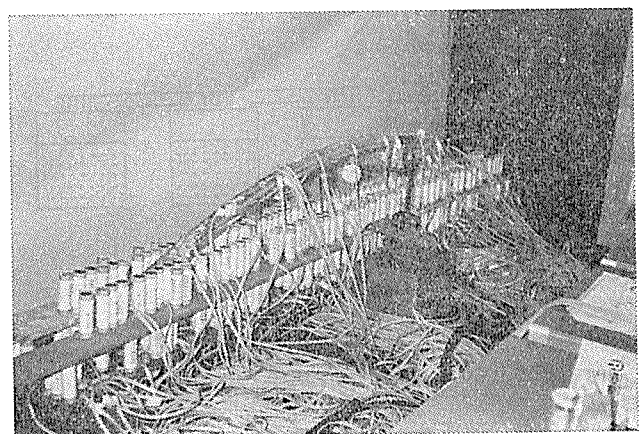


写真-1

** (株)アール・エス・ケー設計事務所

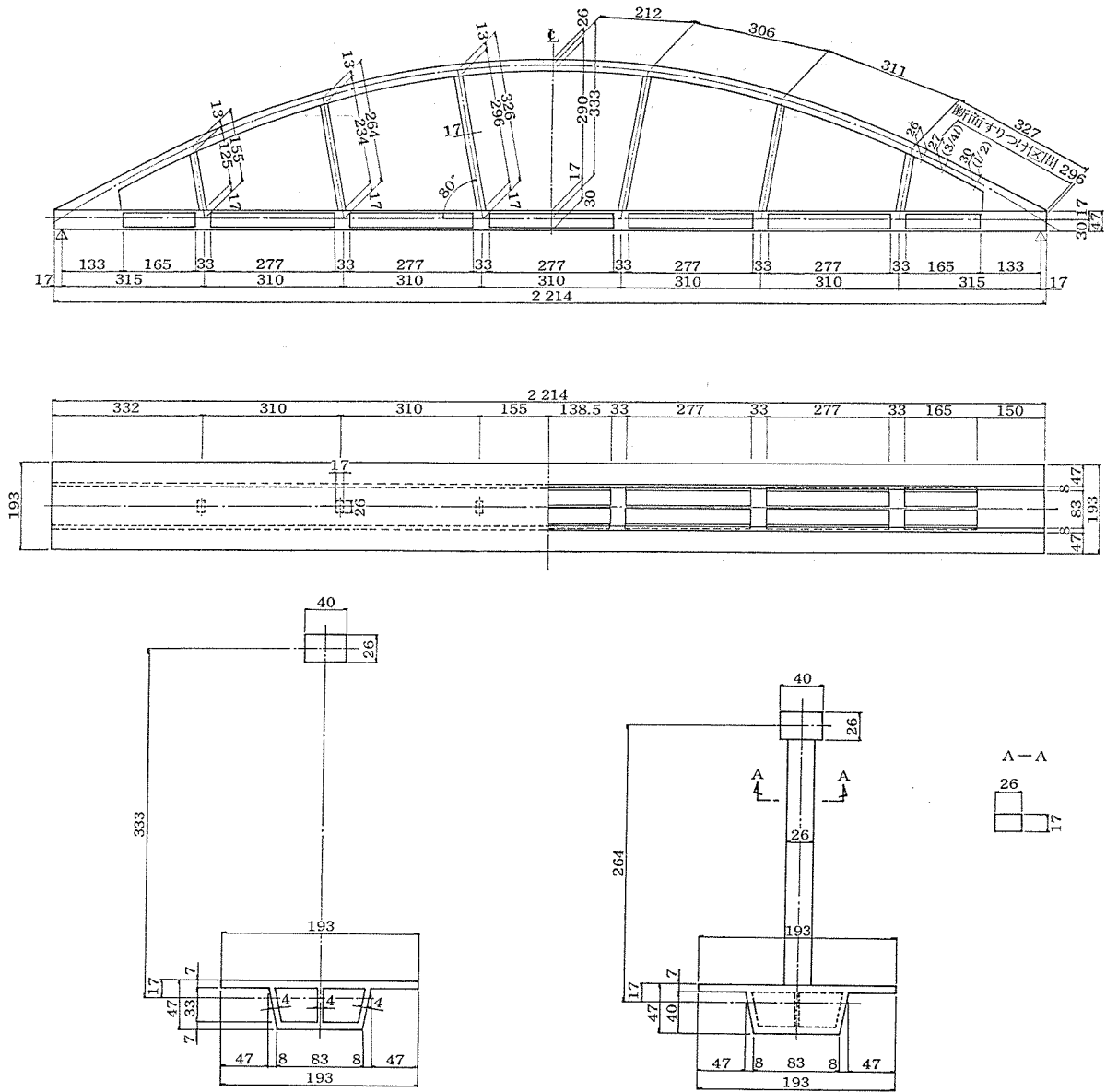


図-1 アクリル模型形状寸法図

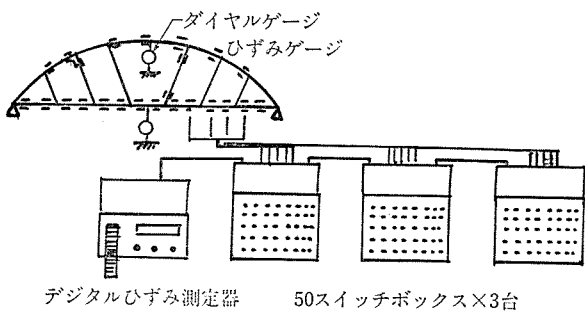


図-2 静載荷実験装置

補剛桁は、横断方向の3主桁の位置で、橋軸方向および橋軸直角方向の2軸にひずみを測定し主桁の横分配を検照する。

光弾性実験では、部材格点の隅角部の応力調査のため

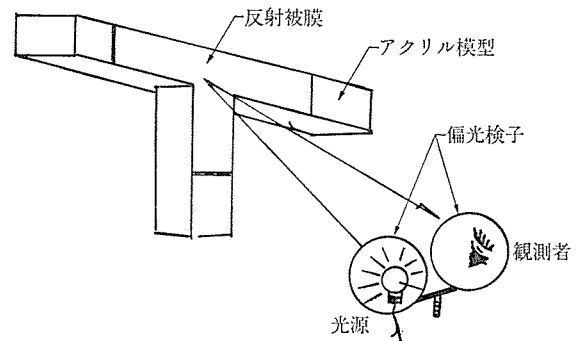


図-3 反射型光弾性実験装置

図-5 に示す吊り材とアーチ部の接合部、A部、B部および、アーチ起拱部C部に、補剛桁の横分配の調査のために、桁上フランジ部D部に反射被膜を接合し、ひずみ

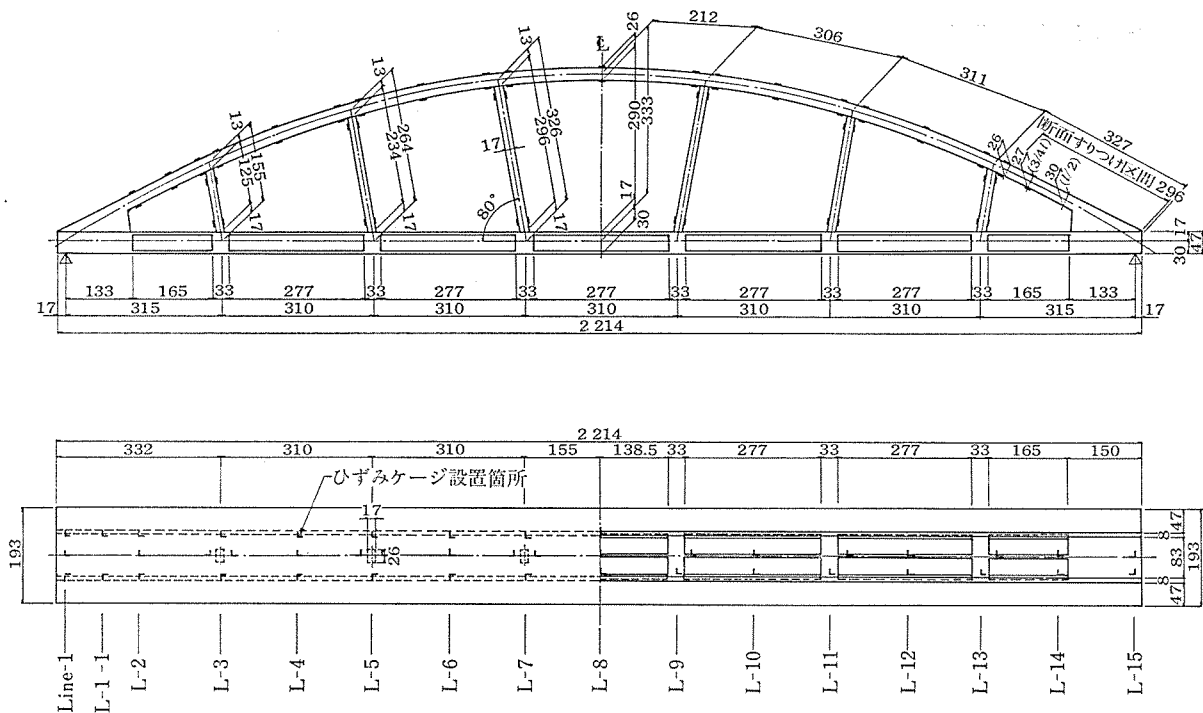


図-4 静 載 荷 実 験 ひ ず み 測 定 点

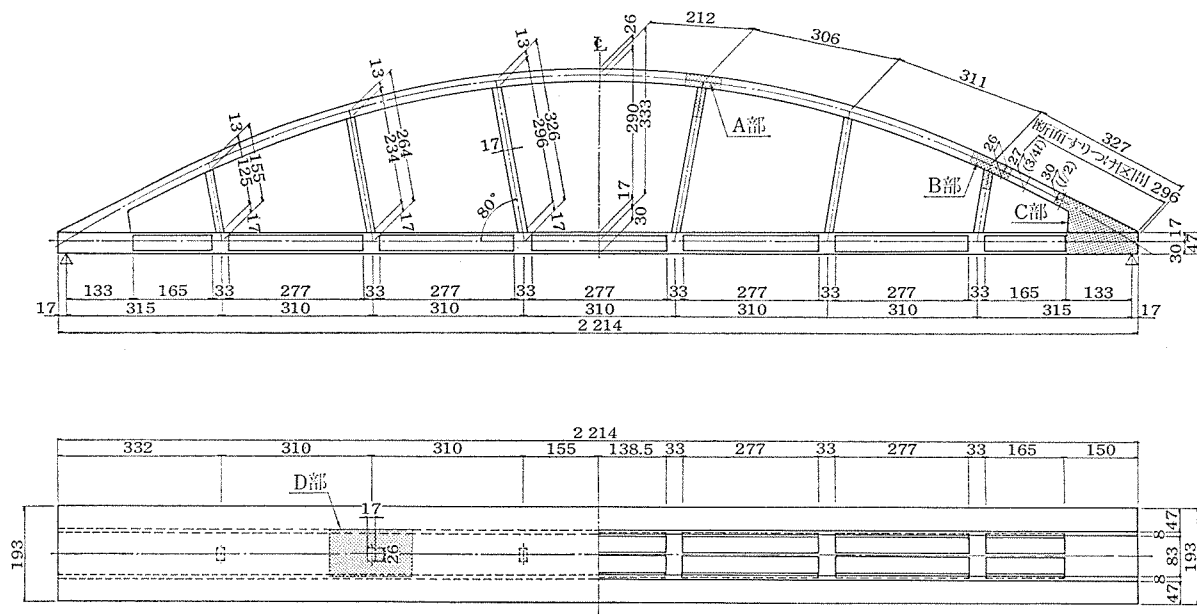


図-5 光 弾 性 実 験 測 定 箇 所

分布を調査する。

3.2 載 荷 方 法

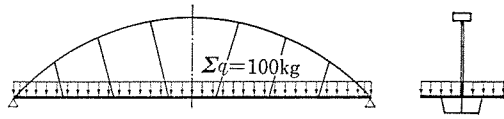
静載荷実験では、図-6 に示すように6ケースの載荷状態を実施した。

- ケース 1 全載荷状態 ($\Sigma q=100$ kg)
- ケース 2 橋軸方向 1/2 載荷状態 ($\Sigma q=50$ kg)
- ケース 3 橋軸直角方向 1/2 偏載荷状態 ($\Sigma q=50$ kg)

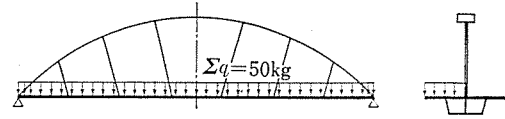
- ケース 4 橋軸直角方向 1/4 偏載荷状態 ($\Sigma q=50$ kg)
- ケース 5 中央集中荷重載荷状態 ($P=100, 150, 200, 250$ kg)
- ケース 6 1/3 l 点集中荷重載荷状態 ($P=250$ kg)

また、光弾性実験はケース 5, 6 について、測定箇所 のひずみ分布を測定した。

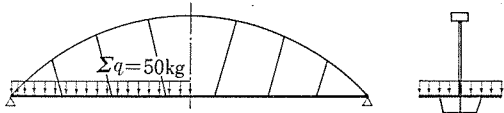
ケース 1 全載荷状態



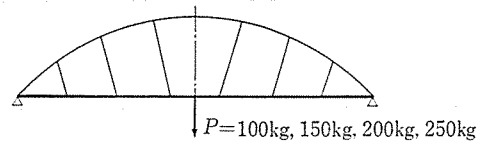
ケース 4 橋軸直角方向 1/2 偏載荷状態



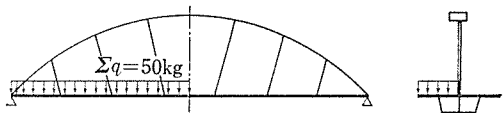
ケース 2 橋軸方向 1/2 載荷状態



ケース 5 中央集中荷重載荷状態



ケース 3 橋軸直角方向 1/4 偏載荷状態



ケース 6 1/3 l 点集中荷重載荷状態

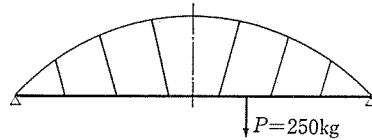


図-6 載荷状態図

4. 静載荷実験

4.1 部材力

実験結果と平面骨組構造による解析値を 図-7 に示す。

図-7 でわかるように、ケース 1~5 (図-7 (a)~(e)) は、実験値と解析値はよく相関している。曲げモーメントは、実験値は解析値に対して、数%減少しているのに対し、軸力は実験値が逆に数%増加している傾向がある。この原因は、支承条件が解析では、Fix (ピン支承), Mov (スライド支承) という条件に対して、実験においては、山形鋼の折曲げ部分を支承に利用したた

めに、両端ピン支承の状態に近くなったためと考えられる。また、模型の縮尺や載荷重が小さいために、水平変位量は、解析値では $\delta_x=0.18\text{ mm}$ と微小であり、支承の水平支持条件や変位などによる実験の精度に起因すると考えられる。しかし、構造モデルの相対的な部材力状態は、実験値と解析値は充分相関していると評価できる。

次にアーチ起拱部のアーチ材、補剛桁の曲げモーメントの分布は、実験値と解析値は相反して、曲げモーメントの向きが逆になっていることがわかる。

これは、アーチ材を起拱部で、橋面の中央分離帯と桁端部の構造的なおさまりにより、アーチ材の A_3 から

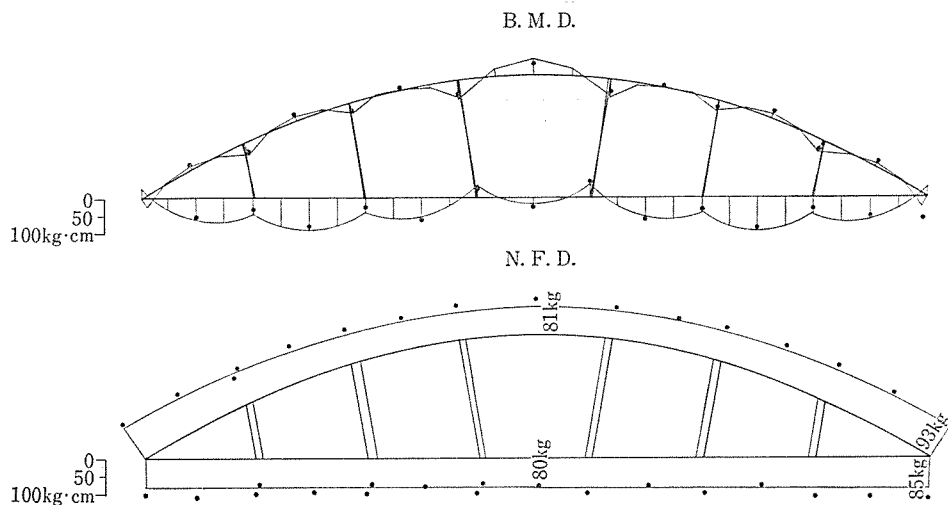


図-7 (a) ケース 1 満載状態

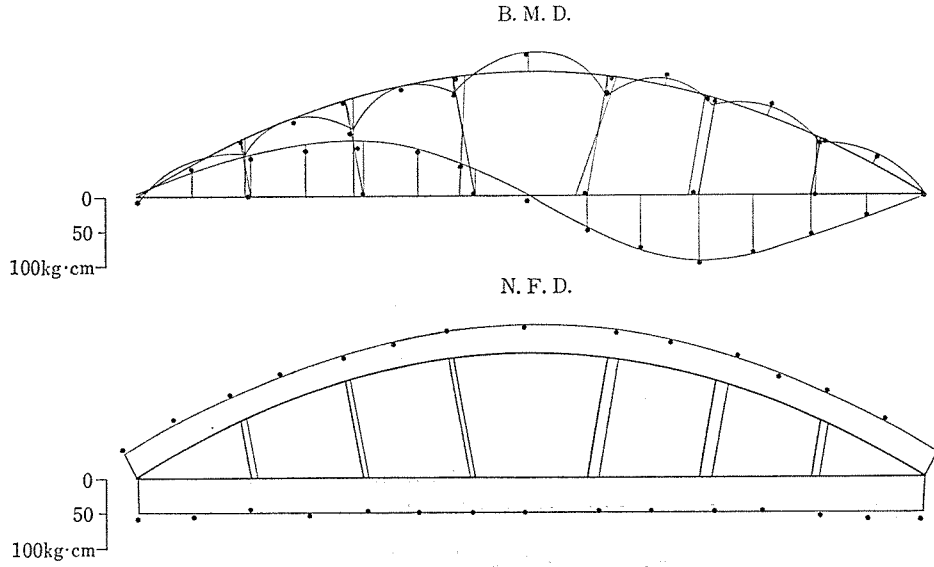


図-7 (b) ケース 2 $P=250$ kg 集中荷重

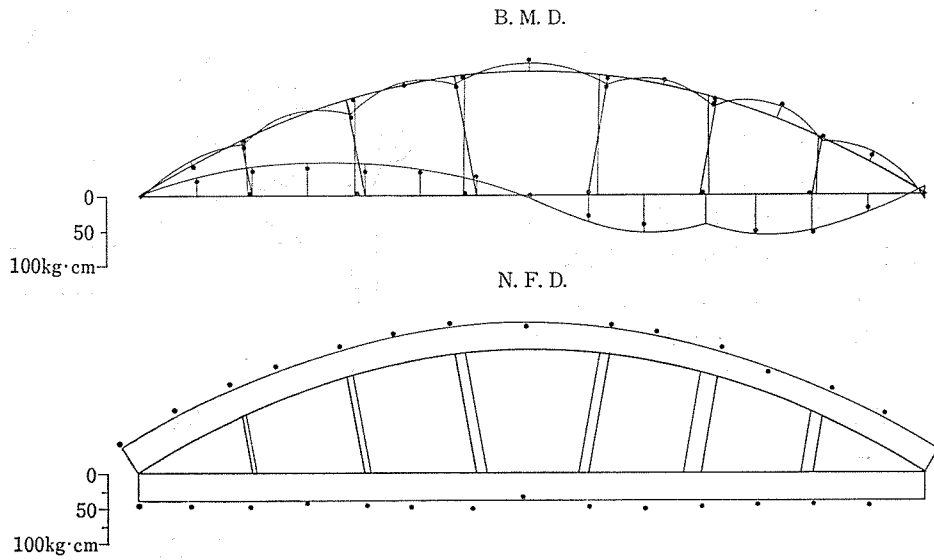


図-7 (c) ケース 3 橋軸直角方向 1/4 偏載荷重状態

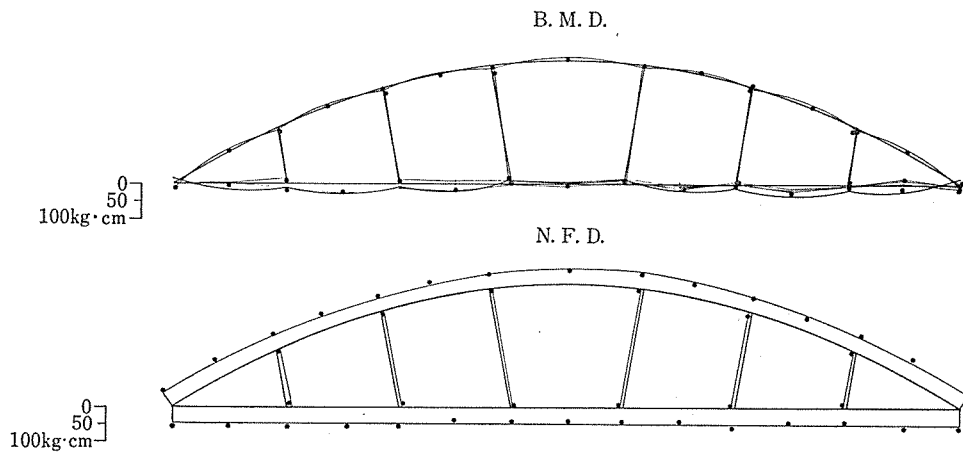


図-7 (d) ケース 4 橋軸直角方向 1/2 偏載荷重状態

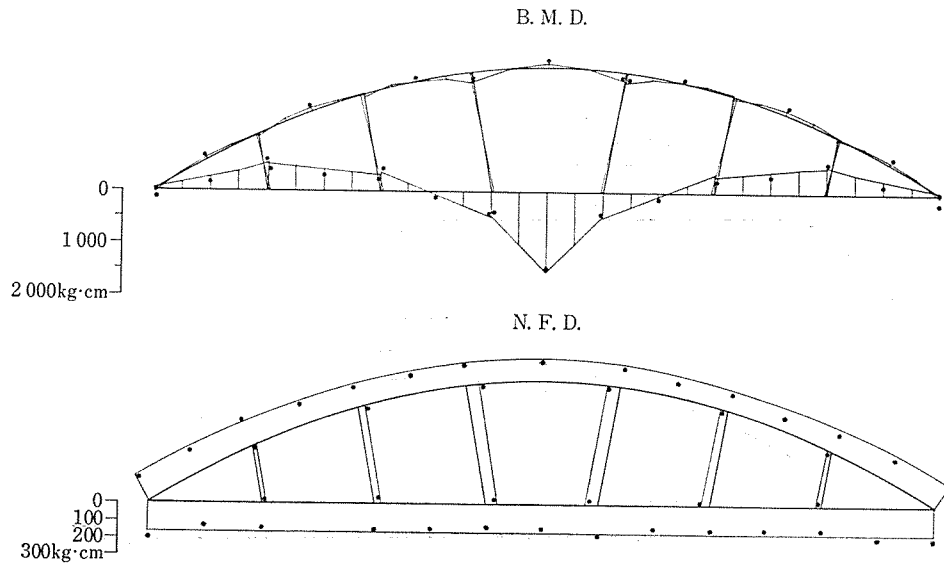


図-7 (e) ケース 5 中央集中荷重載荷状態

A_1 の区間で、断面変化部を設けていることに起因すると考えられる。すなわち、アーチ軸線が解析構造と模型構造でわずかに $e=0.75$ cm 偏心していることによるものである。

これは図-8 に示すような曲げモーメントの分布状態を考察することにより明確になる。

解析によるアーチ材の曲げモーメント $M_A=37$ kg·cm と桁の曲げモーメント $M_B=-44$ kg·cm に対して、アーチ軸力と桁軸力の軸線差 $e=1.6$ cm による付加曲げモーメント $4M_N=152$ kg·cm とアーチ軸線の偏心による ($e_A=0.75$ cm) 付加曲げモーメント $4M_{NA}=-76$ kg·cm を考慮すればよい。

これらを考慮したアーチ起拱部の曲げモーメントは、

$$\begin{aligned} \Sigma M &= M_A + M_B + 4M_N + 4M_{NA} \\ &= 37 - 44 + 152 - 76 = 69 \text{ kg}\cdot\text{cm} \\ &\approx \text{実験値 } 68 \text{ kg}\cdot\text{cm} \end{aligned}$$

となり、実験値 $M=68$ kg·cm の相反した曲げモーメントの発生状態と考察できる。

4.2 たわみ

載荷時のアーチ中央および桁中央のたわみ量は、ダイヤルゲージを用いて測定し、この結果を表-1 に示す。

たわみの測定は、模型の縮尺および載荷重が小さいために微少であり、またダイヤルゲージの支持状態の不備などにより充分な実験値を測定することができなかったが、アーチ材と補剛材のたわみの比は、ケース 1~4 の等分布載荷状態 ($\Sigma q=50\sim 100$ kg) では $\eta=\delta_B/\delta_A=1.0$ を示し、ケース 5, 6 など $P=250$ kg 集中載荷状態では $\eta=\delta_B/\delta_A=1.3$ で、解析値と比較的近似している性状を示している。

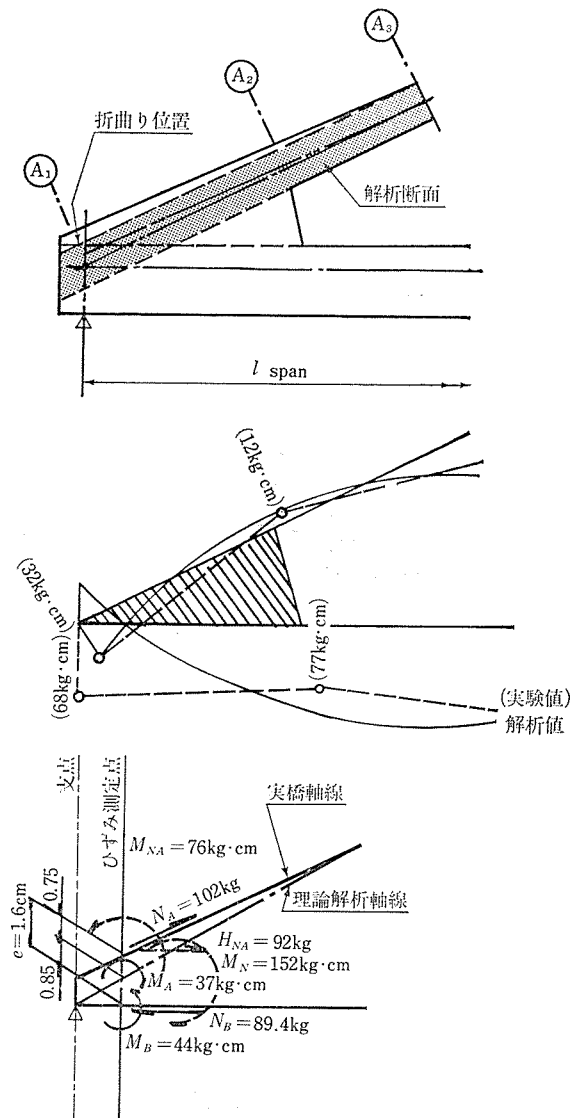


図-8 アーチ起拱部の偏心による軸力および曲げモーメント図

表-1 た わ み 一 覧 表

名 称	実験値たわみ量	実験値 δ_A/δ_B	理論値 δ_A/δ_B
Case 1	アーチ中央 $\delta_A=3.4\text{ mm}$	1.0	1.0
	桁 中 央 $\delta_B=3.4$		
Case 2	アーチ中央 $\delta_A=2.2$	1.2	1.0
	桁 中 央 $\delta_B=1.9$		
Case 3	アーチ中央 $\delta_A=0.6$	0.4	1.0
	桁 中 央 $\delta_B=1.6$		
Case 4	アーチ中央 $\delta_A=1.4$	0.7	1.0
	桁 中 央 $\delta_B=2.0$		
Case 5	アーチ中央 $\delta_A=6.2$	0.7	0.8
	桁 中 央 $\delta_B=9.6$		
Case 6	アーチ中央 $\delta_A=7.5$	0.7	0.9
	桁 中 央 $\delta_B=10.4$		

4.3 横分配の性状

ケース 4 橋軸直角方向 1/4 偏載荷状態の桁の曲げモーメントの分布を図-9 に示す。これにより、各主桁の曲げモーメントの分布は均一化の傾向があることが判明し、補剛桁の 3 主桁の横分配性が極めて大きいことがわかる。

また、理論値に対して、よく近似する分布性状を示し、補剛桁全断面を有効断面と考えた設計時の桁の評価が妥当であることが確認できる。

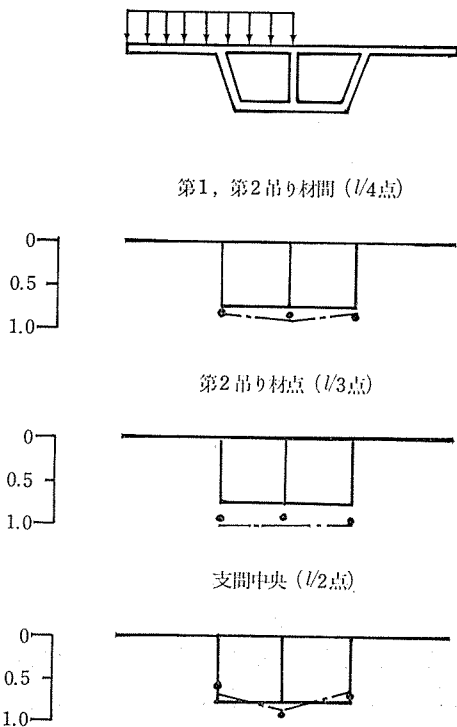


図-9 ケース 4 の各桁の曲げモーメントの分布

5. 光弾性実験

部材結合部の応力状態分布性状を把握するために、実施した反射型光弾性実験では、アクリル模型の弾性係数や、挙動が極めて小さく、被覆上でのひずみを識別しにくいので、設計荷重の約 3 倍の荷重を載荷し、隅角部の応力度、応力集中度を測定した。

5.1 吊り材、アーチ材の接合部

吊り材とアーチ材の接合部に当たる A 部、B 部は、2 部材の結合隅角部で、ケース 6、 $P=250\text{ kg}$ 載荷時のひずみ分布を図-10 (a), (b) に示す。

ここでは、応力図に示すような部材力の分布が想定され、これらの曲げモーメント、軸力の作用により、隅角部には応力集中が認められ、解析上の平均応力度 $\bar{\sigma}=20\text{ kg/cm}^2$ に対して、応力集中による最大応力度 $\sigma=54\text{ kg/cm}^2$ で、応力集中度は 2.7 倍となっている。

ただし、実橋隅角部には 150×150 のハンチを設けていること、および実験載荷荷重は設計荷重に対して 3 倍載荷していることなどを考慮すれば、応力集中による部材のひびわれに対しては安全であることが確認できた。

5.2 アーチ起拱部

アーチ起拱部の光弾性実験によるひずみ分布は図-10 (c) に示すように、 C_1 の位置で応力集中が生じ、その集中度は、 $\eta=\sigma/\bar{\sigma}=50\text{ (kg/cm}^2)/15\text{ (kg/cm}^2)=3.2$ 倍程度で極めて局部的に発生している。

また、応力の発生域より、アーチ軸力の主応力流域が明らかになり、起拱部の形状、アーチ材と補剛桁の取付け長さの妥当性が判明した。

これら以外には、静載荷実験のアーチ起拱部での断面変化に伴う付加曲げモーメントの影響が、 C_2 のラインで推察することができる。

これは 図-10 (c-1) に示すように、主応力域での軸力による応力状態に、上端 (C_{2-U}) では、圧縮応力が、下端 (C_{2-L}) では引張応力があることが判明した。

図-10 (c-1) の応力分布図は光弾性実験により、ひずみ分布図を基に作成した図であるが、負の曲げモーメントが生じていることが推定できる。これは、前にも述べたようにアーチ起拱部において、理論解析時の軸線に対して、実橋では補剛桁とアーチ取付け部は、断面変化のために (図-8) 軸線の形状が偏心したためと考えられ、先で考察した偏心曲げモーメント図と一致する。

5.3 主桁の横分配性

主桁の第 2 吊り材位置での、上フランジのひずみ分布を主桁へ集中載荷した場合 (ケース 6-1) と、等分布載荷した場合 (ケース 6-2) について、図-10 (d), (e) に示す。

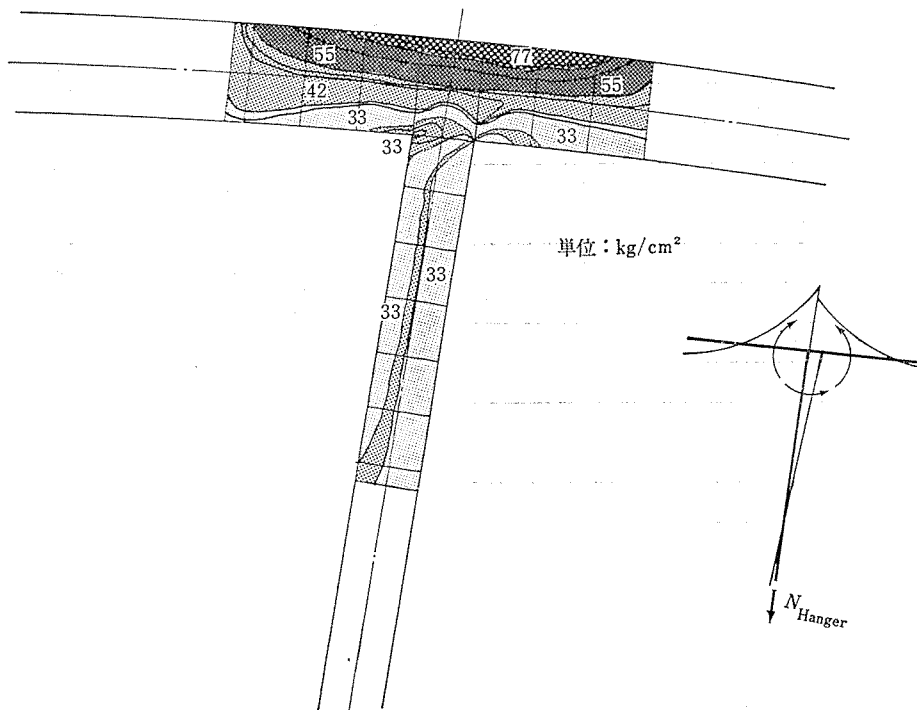


図-10 (a) A 部 応 力 分 布 図

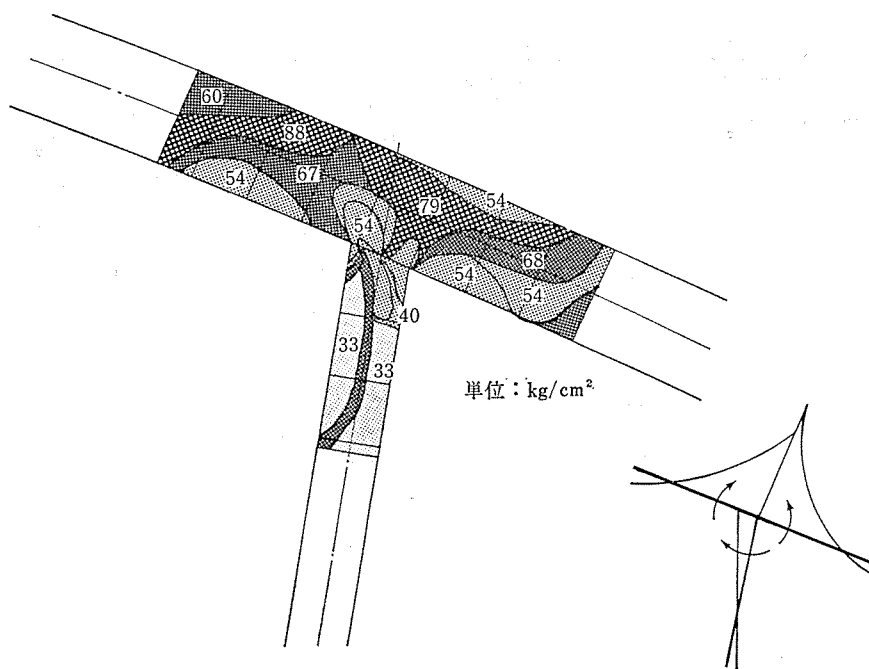


図-10 (b) B 部 応 力 分 布 図

ここで明らかなことは、ひずみの分布域より外桁、内桁の分配性が大きく、ほとんど同程度の荷重分担を行っていることがわかる。

図-10 (d) は、内桁に集中荷重を載荷したものであるが、桁間隔を a とすれば、載荷点より $2a$ の区間で応力は各主桁に均一化されていることが明らかであり、こ

れは FEM で解析した結果とよく一致する。

床版の応力状態は 図-10 (d)、10 (e) から明らかなように、主桁部分と同一な応力状態を示している。これは、主桁間の床版および張り出し部の床版も、有効に応力を負担していることを示し、桁全断面を有効として主桁を取り扱ってよいことが判明した。

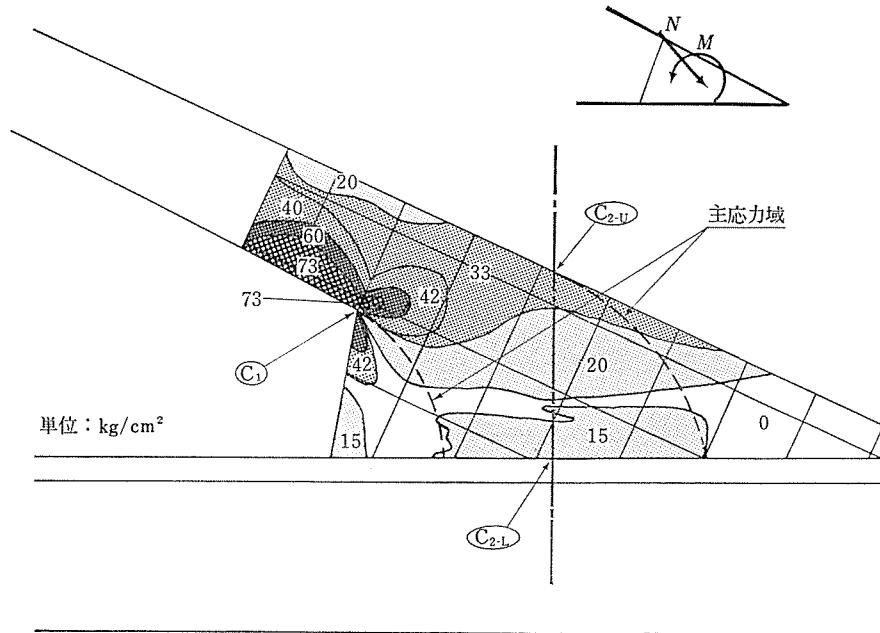


図-10 (c) C 部 応 力 分 布 図

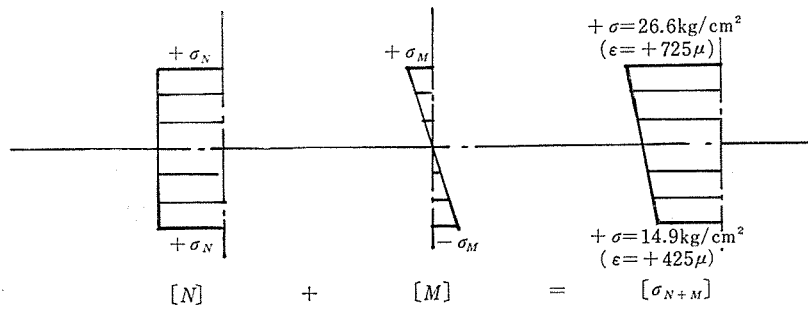


図-10 (c-1) 応 力 ス ト ー リ ー 図

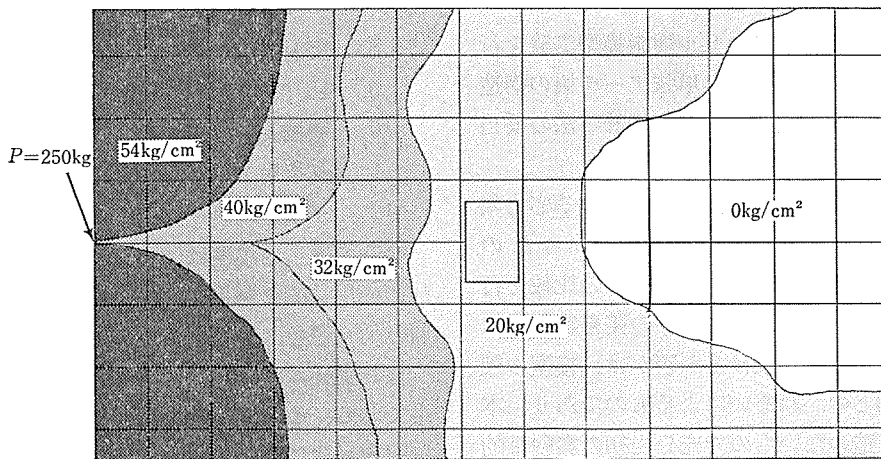


図-10 (d) D 部 応 力 図 (集 中)

6. 考 察

静載荷実験，反射型光弾性実験を実施した PC 単弦アーチ橋の模型実験で明らかになった事項は次のようである。

ある。

- 1) 全体構造形の力学特性は，設計解析の手法として用いた「平面骨組解析」と同一であり，設計手法の妥当性を得ることができた。

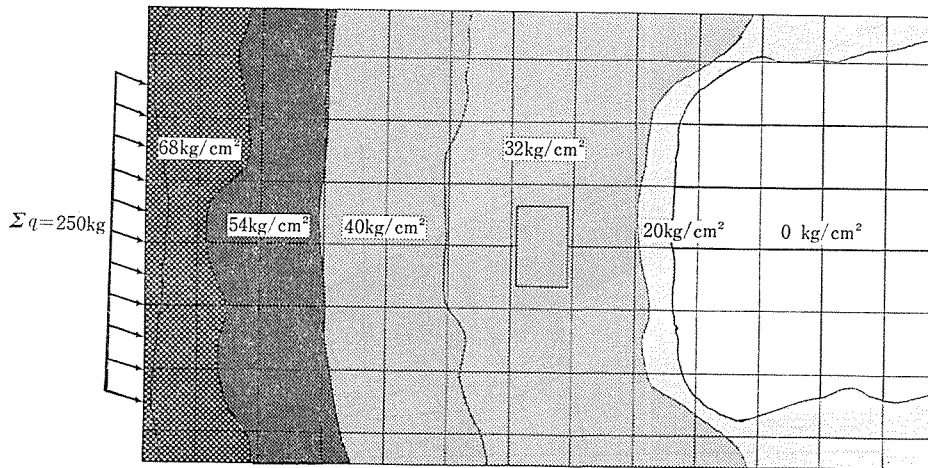


図-10 (e) D 部 応 力 図 (等分布)

- 2) 補剛桁の3主桁の荷重分配性は、まったく均一であり、格子桁の荷重分配性と同じであると考えてよく、分配性は高い。また桁の有効断面は全断面有効である。
- 3) 格点隅角部での応力集中度は、ハンチ構造のない模型実験では、 $\eta=2.7\sim 3.2$ 倍程の集中率を示すが、実橋での荷重、ハンチ構造を考えれば、集中率は緩和され、コンクリートのひびわれなどに対して安全であると考えられる。
- 4) アーチ起拱部の応力場が光弾性実験より明らかになり、アーチ材と桁との取付け形状の合利性が判明した。
- 5) 偏載荷状態に対する主桁の横分配性はよく、主桁全断面で安定した応力状態を示し、構造の安全性を確認できた。

以上のように、縮尺 1/30 アクリル樹脂模型実験を行い、明らかになった事項より、PC 単弦アーチ橋の構造の安全性、部材各部の応力状態の把握、設計手法の妥当性が確認できた。

ただし、格点隅角部の反射型光弾性装置による応力集中の測定実験では、ハンチ構造のない模型であったので、実橋と同一なハンチ構造を有するものとの比較を行えず、ハンチ構造の有無による応力集中の差を実証できなかったが、模型にハンチを設けるか否かは、模型の製作費と実験の主目的とのかねあいによるものであり、本実験では、ハンチ構造のないもので充分当初の実験目的を達することができた。

7. 結 び

ここに報告した、PC 単弦アーチ橋の構造模型実験は先に報告した「PC 単弦アーチ橋の設計——いちのみや自動車歩道橋——」の構造特性を明らかにするために実

施したものである。

この実験結果より、PC 単弦アーチ橋の構造的特性、各部材の荷重分担性は、設計時に決定した構造計画と変わりなく、構造の安全性や特性を明確にすることができた。

<実験使用機材一覧>

1. 縮尺 1/30 アクリル樹脂模型 (島津模型に外注)
2. ひずみゲージ KFP-5-C₁-65 (共和電業)
3. ゲージ端子 T-81
4. リード線 L-2
5. デジタル測定器 (プリンター付き) SD 520 A
6. スイッチボックス (50 点用 3 台) ASB 55 D
7. 反射型光弾性装置 031-A-115 V (フォトラステック社)
8. 反射被膜 PS-1 B ($t=2.0\text{ mm}$, $K=0.15$)
9. 10 円玉硬貨 500 円巻き 500 本 ($\Sigma q=100\text{ kg}$)
10. 機械式ジャッキ
11. 支承用アングル, その他鋼材
12. ダイアルゲージ

今回の構造用模型は、アクリル樹脂模型としたが、実験の使用目的を選択すれば、実験結果は従来ある実験材料と何ら遜色なく使用することができると考えられる。

なお実橋は、昭和 57 年 6 月末の完成を目指して施工中であり、その施工計画などについては、また次の機会に報告させていただきます。

参 考 文 献

- 1) 土木学会編：土木構造実験
- 2) 西田正孝：応力集中，森北出版，昭和 48 年 7 月
- 3) 佐藤信秋，西野忠，梶田順一：成田橋上部工の設計・施工と模型実験，橋梁と基礎，1980 年 12 月

【昭和 57 年 2 月 10 日受付】