

豊里大橋(斜張橋)のケーブル定着点の設計について

DESIGN OF CABLE ANCHOR PART OF TOYOSATO- ŌHASHI (CABLE-STAYED BRIDGE)

近藤和夫^{*1}・小松定夫^{*2}・小林紘士^{*3}・井上洋里^{*4}・松川昭夫^{*5}

By Kazuo Kondo, Sadao Komatsu, Genshi Kobayashi, Hirosato Inoue and Akio Matsukawa

1. まえがき

斜張橋の設計において、ケーブル定着部材に導入されたケーブル張力が、いかなる応力分布をして主桁断面へ伝達していくかを、定量的に把握することは、非常に重要な問題である。しかし、この応力解析を的確に行なうことは、定着構造が、やむをえず複雑な立体薄板構造となることから、各部材への力の伝達量を的確に求めることが困難となり、常に苦慮される問題でもあった。

既設の斜張橋におけるケーブル定着点の設計方法としては、応力分布形状にある仮定を設けて解析する方法、および、模型実験により充実する方法などがあげられる。前者の例は、1963年にドイツの Hamburg に架設された Norderelbe 橋の設計¹⁾にみられ、これは定着桁に接合している縦シャイベ内の応力解析にせん断流理論を、デッキ・ボトムプレート内の応力解析には、応力の伝達分布角度を仮定する手法がとられており、実験的な裏付けはないが、ケーブル定着点の設計に一つの考え方を提示したものといえる。後者の例は、1970年にドイツの Düsseldorf に架設された Knie 橋の設計²⁾にみられ、ケーブル定着桁内の主応力分布を模型実験によって確かめている。しかし、諸外国においても、この種の設計に関する研究報告は非常に少なく、上記の二橋を除けば、既設の斜張橋におけるケーブル定着点の設計が、いかに行なわれているかは明白でない。

豊里大橋のケーブル定着点の設計にあたっては、以下に述べる略算法に基づいて設計した断面を使用して、有

限要素法により詳細設計を行なった。なお、有限要素法の適用性については、別途、模型実験によって確認している。さらに、現場載荷実験を行ない、安全性を確かめた。

本論文は、上記の模型実験、定着構造の理論解析、および、現場載荷実験などについて、その内容を述べるものである。

2. 定着点の構造および断面決定

(1) 定着構造

導入されたケーブル張力を、的確に、かつ、速やかに、主桁断面に伝達させるため、図-1に示す構造とした。同図は上段ケーブルの定着構造をモデル化して示したもので、G₁ 定着桁はデッキプレートと縦シャイベに、G₂～G₅ 定着桁は縦シャイベに結合されている。

斜め方向に引き込まれたケーブルは、16本のストランドに分散され、上記の定着桁によって球面状に定着さ

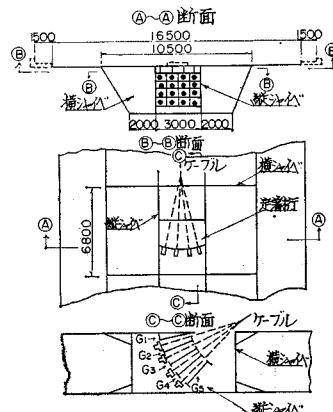


図-1 ケーブル定着構造

*1 正会員 大阪市土木局長

*2 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

*3 正会員 大阪大学助手 工学部土木工学科

*4 正会員 大阪市土木局橋梁課長

*5 正会員 大阪市土木局橋梁課主査

れている。G₁ 定着桁に導入されたストランド張力の水平分力の大半は、デッキプレートから、G₂～G₅ 定着桁に導入されたストランド張力の水平分力は、縦シャイベから、それぞれ、主桁に軸方向力として伝達され、最後には、均等化された垂直応力となる。一方、定着桁に導入されたストランド張力の鉛直分力は、縦シャイベとデッキ、および、ボトムプレートによって構成された箱桁により、縦シャイベの両端に設けられた横シャイベに伝えられ、主桁にせん断力、および、曲げモーメントとして伝達される。

(2) 断面算定の計算法

最大ケーブル張力は 2528 t (ストランド当たり 158 t) である。(1) で述べたように、G₁ 定着桁に導入されたストランド張力の水平分力は、デッキプレートから、鉛直分力は、縦シャイベから伝達されるものとする。G₂～G₅ 定着桁は、縦シャイベとの接合辺で単純支持されているものとし、縦シャイベ面内に生ずる定着桁の反力を、鉛直分力と水平分力に分けて考える。

鉛直分力が主桁に伝達されるまでの応力解析は、横シャイベに支持された縦シャイベを腹板とする箱桁、および、主桁腹板に支持された横シャイベを腹板とする I 型桁に、それぞれ、はり理論を適用した。

縦シャイベに伝達された水平分力については次のように考えた。

まず、縦シャイベからデッキおよびボトムプレートへ伝達されるせん断力は

「テコの法則」にしたがって、または、デッキとボトムプレートとの断面積 (腹板の影響を考慮して、図-2 のような断面積を採用する) 比にしたがって、分配されるものと仮定する。各部材の設計には、両者の大きい方の

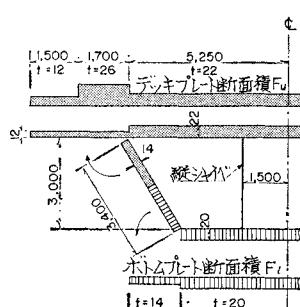


図-2 腹板のデッキ・ボトムプレートへの展開

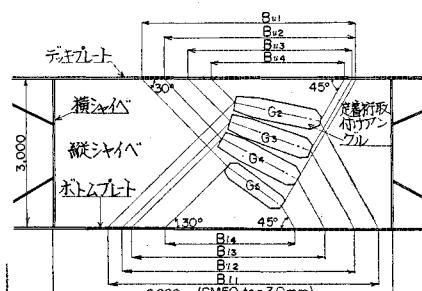


図-3 せん断応力の分布

分配値を採用した。縦シャイベ、デッキ、ボトムプレート内でのせん断応力は、図-3 に示すように、ケーブル張力の作用方向前面に対して 30 度、後面に対して 45 度に伝達分布するものと仮定した。図-3 より、デッキプレートと縦シャイベとの境界線上の各点に作用する縦シャイベのせん断応力、および、このせん断応力に対する有効幅 B は、それぞれ、式 (1), (2) となる。ただし、G₁ 定着桁からデッキプレートを介して、縦シャイベに伝達されるせん断応力は小さく、かつ、安全側にあるので無視している。

$$\tau = \sum_{i=1}^4 \frac{S_i}{B_{ui} \cdot t_s} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^4 S_i}{\tau_{max} \cdot t_s} \quad \dots \dots \dots (2)$$

S_i : デッキプレートに伝達されるせん断力

B_{ui} : せん断応力の分布幅

t_s : 縦シャイベの板厚

デッキプレートに生ずるせん断力は、縦シャイベ上縁で B の分幅をもって ΣS が分布するものと考え、そこから、デッキプレートの左右の断面積比にしたがって、橋軸直角方向に伝達分配するものと仮定する。G₁ 定着桁から、直接デッキプレートに入力される水平分力についても同様に考えた。ただし、G₁ 定着桁は 4箇所でデッキプレートに接合されているが、計算がいたずらに複雑となることをさけて、入力点を 2箇所にまとめて計算した。図-4 の断面 A でのせん断応力は式 (3) となる。

$$\begin{aligned} \tau_A = \Sigma S_i & \left\{ \frac{1}{F_u \cdot t_d} \left(\frac{F_{u1}}{B} + \frac{F_{u2}}{B_1} \right) \right\} \\ & + P \left\{ \frac{1}{F_u \cdot t_d} \left(\frac{F_{u3}}{B_3} + \frac{F_{u4}}{B_2} \right) \right\} \quad \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

P : G₁ 定着桁からの水平分力

F_u, F_{u1} : 図-4 参照

t_d : デッキプレートの板厚

一方、水平分力によって生ずる圧縮応力に関しては次のように考えた。

縦シャイベ内の圧縮応力は、デッキ、ボトムプレートの板厚の 24 倍を有効と仮定し、これを縦シャイベの断

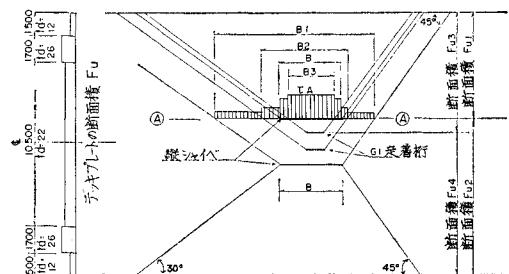


図-4 デッキプレートのせん断応力分布

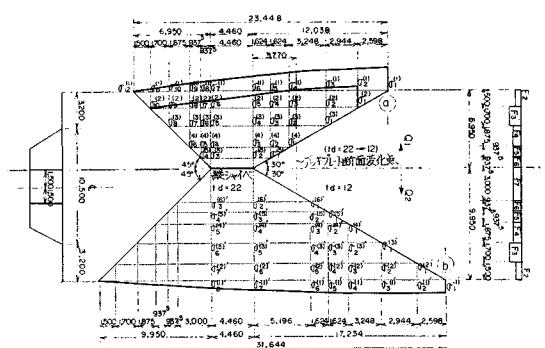


図-5 1 縦シャイペからのデッキプレートに生ずる圧縮応力分布

面積に加算した抵抗断面積を採用して計算した。この場合、 G_1 定着桁からの水平分力が縦シャイペ内の圧縮応力に与える影響は小さいので無視した。

デッキ・ボトムプレートに分配伝達されたせん断力による垂直応力の分布には、次のような仮定を設けた。

1) 圧縮応力の橋軸方向の分布形状は、図-5 中の太い実線で示すように、分布角度 30 度の線上で極大値、45 度の線上で零となるような放物線とする。

2) 抵抗断面はせん断応力の計算の場合と同様に、図-2 に示すようである。

1 枚の縦シャイペから伝達されたせん断力の影響について考える。図-5において、左右に伝達分配されたせん断力 Q_1, Q_2 が、それぞれ、分布角度 30 度の線上とデッキプレートの自由端との交点、④, ⑤ の断面上で、均等化された圧縮応力を分散されると仮定すると、これらの等分布圧縮応力 $\sigma_1^{(1)}, \sigma_1^{(1)'} = \sigma_1^{(i)}$ は式 (4) となる。また分布角度 30 度の線上での圧縮応力 $\sigma_1^{(i)}$ は、 F_i に作用する圧縮応力が、 $\sigma^{(i)}$ と $\sigma^{(i-1)}$ の平均値であると仮定して、橋軸に直角な断面上での橋軸方向の力のつりあいから、式 (5) で表わされる。 $\sigma_1^{(i)}$ についても同様な考え方である。

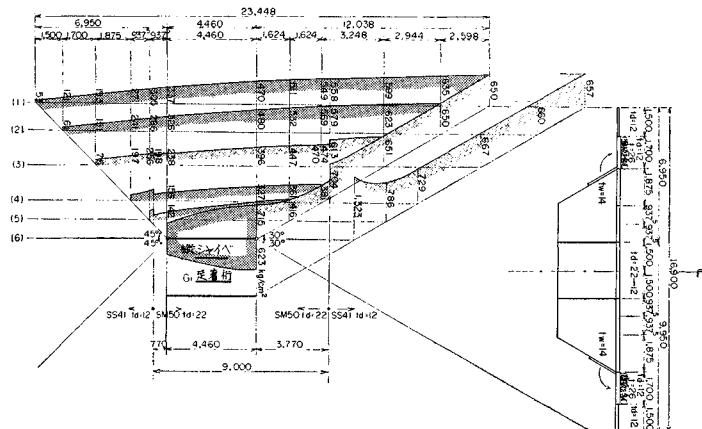


図-6 略算法によるデッキプレートの圧縮応力分布

$$\sigma_1^{(1)} = \frac{Q_1}{\sum_{i=2}^6 F_i}, \quad \sigma_1^{(1)'} = \frac{Q_2}{\sum_{i=2}^7 F_i} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\begin{aligned} \sigma_1^{(i)} &= \frac{1}{F_i + 2(F_{i+1} + F_{i+2} + \dots + F_n)} \\ &\cdot [2Q_1 - \{\sigma_1^{(1)} \cdot F_2 + \sigma_{i-1}^{(2)} \cdot (F_3 + F_4) + \dots \\ &+ \sigma_{i-2}^{(3)} \cdot (F_3 + F_4) + \dots \\ &+ \sigma_2^{(i-1)} \cdot (F_{i-1} + F_i)\}] \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ただし、

F_i : デッキプレートの分割断面積 (図-5 参照)

$$i \geq 2, \quad n = 6$$

以上の計算方法を適用して、縦シャイペおよび G_1 定着桁からの影響を重ね合わせることにより、デッキプレートの圧縮応力を計算した。この結果を図-6 に示す。なお、応力の算出にあたっては、安全側を考えて縦リブを無視した。ボトムプレートにおいても同様である。

以上の計算結果と主桁作用による影響を考慮して、上段ケーブル定着点の縦シャイペの板厚は 30 mm (SM 50 B), デッキおよびボトムプレートについては、主桁腹板間の板厚を、それぞれ、22 mm, 20 mm (SM 50 A) とした。なお、橋軸方向のデッキおよびボトムプレートの上記の板厚区間長は、それぞれ、9 m, 9.8 m である。

3. 模型実験

実橋のケーブル定着構造の複雑さ、および、模型桁と載荷装置の規模などから、一つの模型桁により、すべての状況を一度に把握することは非常に困難であり、適切な方法でない。このため、ケーブル張力がケーブル定着点から主桁全断面に伝達される過程を二段階に分けて、おののの目的に適した二種類の模型実験を行なった。すなわち、1) 縦シャイペとデッキ・ボトムプレートの

境界付近に生ずる変位とせん断力の分布状態を明確にすること、および、2) デッキ・ボトムプレートに伝達されたせん断応力の流れが垂直応力として全断面に均等分布するまでの応力伝達状況の把握とに分け、前者 1) を「細部模型実験」、後者 2) を「部分模型実験」と名付けた。

(1) 細部模型実験

上記の主旨から模型桁は、中央スパンの上段ケーブル定着部を含む主桁長 14 m、幅 10.5 m (鋼床板はね出し部を除く) を対象に、縮尺を 1/3 とした。図-7 に模型桁と応力の測定位置を示す。板厚は

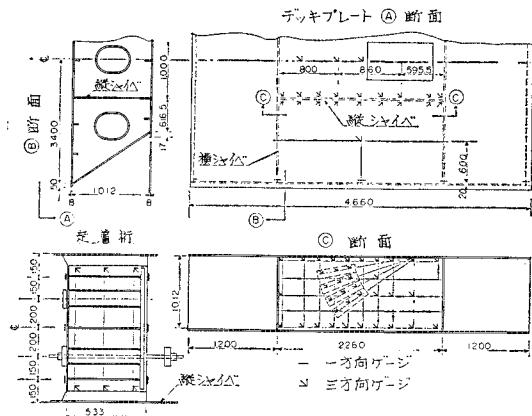


図-7 細部模型桁の応力測定箇所

デッキおよびボトムプレートが 8 mm、他の部材は、すべて 4.5 mm としたが、定着桁と縦シャイベの板厚は、縮尺 1/3 の寸法を満足していない。これは、実橋定着構造の設計完了時と、模型桁の製作時期とのずれによるものであるが、実験の目的が有限要素法による解析理論と境界条件の仮定の確認ということであるから、差しつかえないと考えられる。模型桁の使用材質はすべて SS 41 である。

図-8 に模型桁の据付け状態と載荷装置を示す。模型桁は、実験台上 30 cm の位置に浮かして据付け、その両端で、3 箇所（腹板および橋軸中心線上）の位置に、支持治具により固定されている。載荷装置は、模型桁と独立して設けられた載荷用フレームと PC 鋼棒とからなっている。この PC 鋼棒は、フレームの横ばりに 2 列、5 段に設けられた孔を通して定着桁に連結されている。容量 30 t のセンター ホール ジャッキにより、PC 鋼棒を引張って載荷した。5 枚の定着桁には別々に載荷し、最上段定着桁では 16 t、他の定着桁では 50 t までを 10 t きざみに行なった。

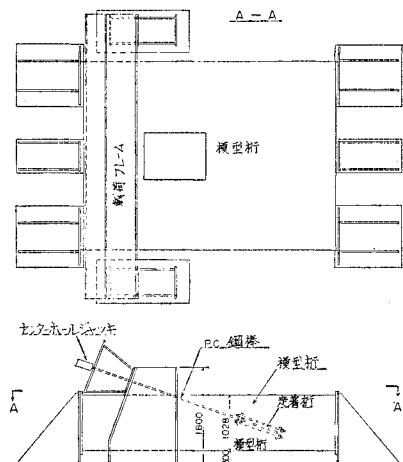


図-8 細部模型桁の据付けと載荷装置

(2) 部分模型実験

部分模型実験は、縦シャイベからデッキ・ボトムプレートに伝達されたせん断力が、両プレート面内で、いかなる形状で分布していくかを調べるのがおもな目的である。これには、細部模型実験から求められた、縦シャイベとデッキ・ボトムプレートとの境界線上のせん断力、または、変位を、部分模型桁に作用させて実験を行なえばよいが、上記のせん断力、または、変位の分布形状を、部分模型桁に再現することは困難である。したがって、縦シャイベ位置で、デッキ・ボトムプレートに点荷重を作用させることで置き換える、以後の挙動を忠実に追跡することにより、有限要素法による解析理論および境界条件についての仮定の妥当性を確認することにした。この考えに基づき、部分模型桁の構造は、定着桁、縦・横シャイベを取り除き、主桁断面のみで組み立てた。

ケーブル張力の水平分力に着目すれば、力の作用方向の側には圧縮応力が作用し、十分距離が離れた断面では応力は均等分布する。また、反対側では、若干の引張応力と圧縮応力が生じ、ある程度距離が離れると、水平分力による影響はなくなる。模型桁の長さを決定するためには、あらかじめ、これらの応力分布状態を知っておく必要がある。これについては、一端固定、他端自由の構造モデルについて、有限要素法による簡単な試算を行なった結果により、模型桁の寸法などを図-9 のように決定した。実橋との対照なども同図を参照されたい。模型桁は 1/7 の縮尺で、実橋の縦リブを均して換算している。溶接ひずみを極力小さくするため、断続すみ肉と Tig 溶接を併用して製作した。図-9 の A~B 区間は、本来、圧縮応力であるが、模型桁の薄板の局部座屈、および、初期たわみが実験精度に与える悪影響を考慮して引張実験とした。弾性範囲内の実験であるから、十分許しうるものである。載荷装置を含めたふかん図を図-10

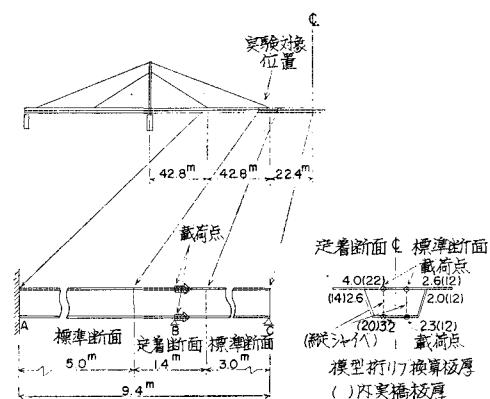


図-9 部分模型実験の対象位置

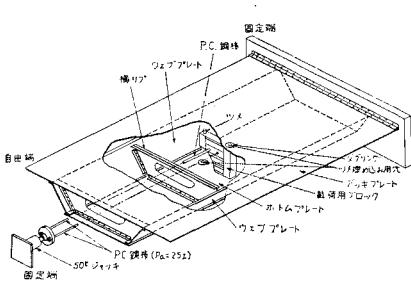


図-10 部分模型桁と載荷装置

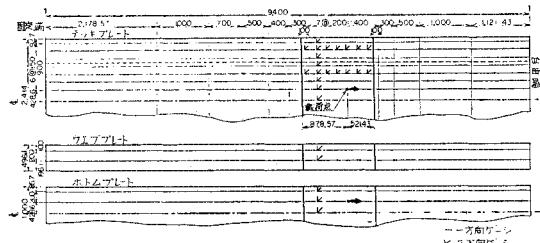


図-11 部分模型桁の応力測定箇所

に、応力測定位置を図-11に示す。荷重は中立軸線上に配置したPC鋼棒と、模型桁内に設けたH型ブロックにより、50tまでを10tきざみに与えた。

4. 理論解析

応力解析には、有限要素法を立体薄板構造物に適用した解析プログラムを使用した。しかし、平板の面外曲げ剛性は面内剛性に比較して非常に小さく、解析結果に与える影響は微小であると考え、これを無視した。

(1) 細部模型実験に関する理論解析

これに使用した解析プログラムは、川井、大坂、吉村、森田らによって開発されたもので（参考文献3）³⁾その特徴は次のようなものである。

- 1) 使用している要素は、三角形、長方形、および、線材要素であり、その位置は、X, Y, Z座標系において任意である。
- 2) 連立一次方程式の解法に、S.O.R. (Successive Over Relaxation) 法を用いている。

使用に際しては、節点数の関係から次の二段階に分けて行なった。

- 1) 定着桁から縦シャイベに作用するせん断力（反力）

定着桁は縦シャイベとの接合辺において固定されていると仮定する。そして図-12に示すように、定着桁に2点載荷した場合の縦シャイベ面内方向の反力分布を計算する。こ

の場合の節点数は97、要素数は156である。この計算の目的が、縦シャイベ面内方向の反力分布を求める事であるので、この限りにおいて、縦シャイベとの接合辺において固定とする仮定は、後述するように十分許容しうるものであつた。しかし、

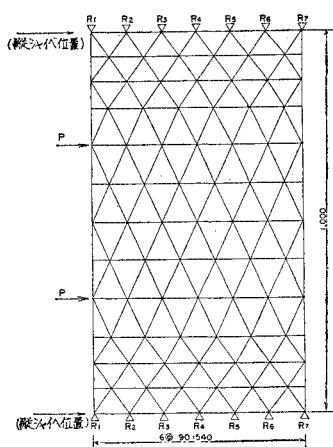


図-12 定着桁の要素分割

定着桁内の垂直応力の計算に対しては、この仮定は実際的でなく、この垂直応力は、単純ばかりとして、比較的明確に計算しうるものである。

2) 縦シャイベ内の応力

図-12に示すR₁～R₇までの反力を基本座標系においてX方向（水平分力）、Y方向（鉛直分力）に分け、図-13の節点209～252に、縦シャイベの面内荷重として作用させる。最上段の定着桁G₁は、デッキプレートに直接剛結されているため、これから入る張力は、デッキプレートに直接作用する軸方向力として、図-14の節点115および168に入力した。構造および荷重が対称であることから、解析は、構造全体を橋軸中心線上

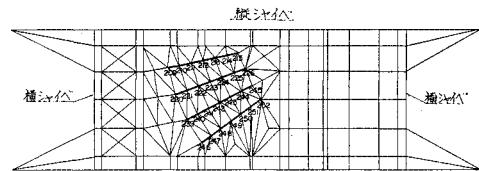


図-13 縦シャイベの要素分割および入力点

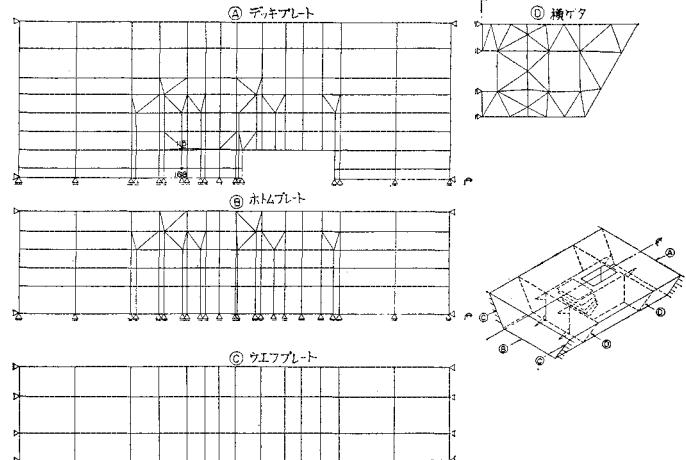


図-14 細部模型桁の要素分割

る。したがって、4.(1)で設定した仮定そのほかは、実用的に十分であるといえる。図-19, 20, 21に、縦シャイベ内の各種応力分布について、実験値と理論値を対比した一例を示す。両者の値が、いずれもよく一致していることから、有限要素法による面内応力問題として合理的に解析しうること、ならびに、境界条件の仮定も妥当であったことが確かめられた。

(2) 部分模型実験と考察

図-22, 23に、橋軸方向と横断面内の垂直応力の分布状態を、図-24に、橋軸方向と横断面内のせん断応力

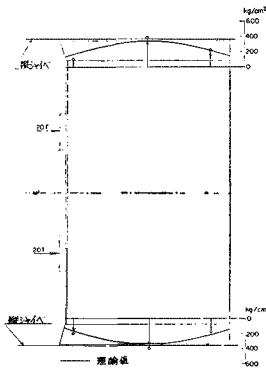


図-18 定着端部のせん断応力分布

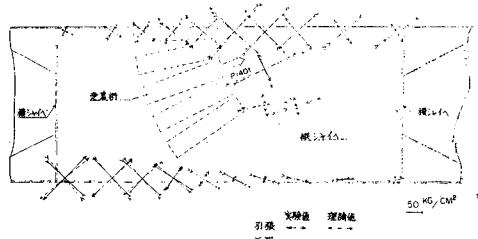


図-19 縦シャイベの主応力分布

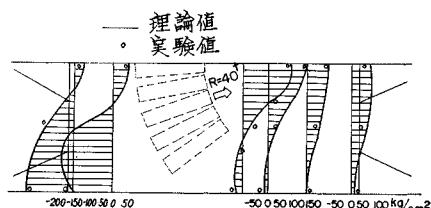


図-20 縦シャイベのせん断応力図

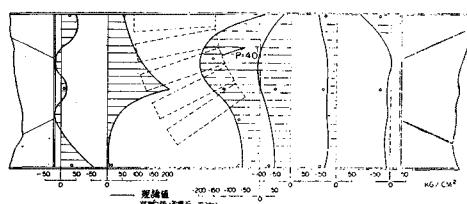


図-21 縦シャイベの垂直応力分布

分布状態を、それぞれ、実験値と理論値を対比して示した。垂直応力については、両者の値はよい一致を示しているにもかかわらず、せん断応力の両者の値には多少の差がみられるが、これは、三方向ひずみゲージから応力解析する場合に一般にいえることである。

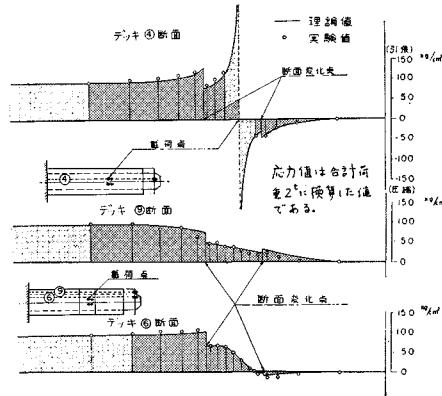


図-22 デッキプレート橋軸方向垂直応力分布

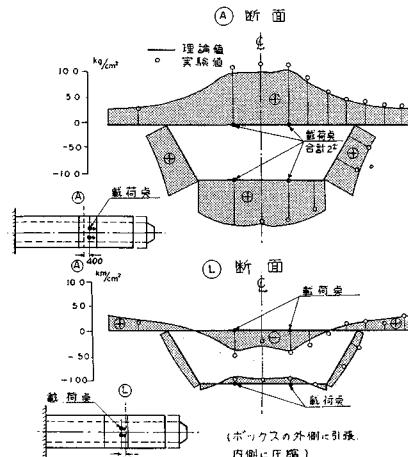


図-23 横断面内垂直応力分布

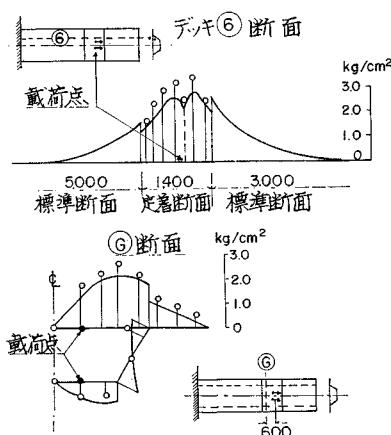


図-24 せん断応力分布

以上の結果から、部分模型実験においても、細部模型実験と同様、4.(2)で述べた有限要素法による解析理論、および、仮定した境界条件の妥当性を確かめた。

6. 実橋の理論解析

部分模型実験の結果から、縦シャイベの前方 36.05 m、後方 27.15 m、縦シャイベ長 6.8 m、合計 70 m を対象に実橋の応力解析を行なうこととした。

解析は、細部模型実験、および、部分模型実験によって確かめられた解析理論と境界条件を採用して行ない、計算機の容量から、次の三段階に分ける必要があった。

1) 定着桁を介して縦シャイベ上に作用するケーブル張力の水平反力分布を計算する。この場合、各定着桁は近似的に長方形に置き換え、その両端は固定支持と考え

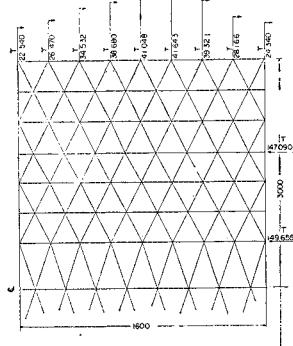


図-25 実橋定着桁の要素分割と反力分布
(G₁～G₄ 定着桁)

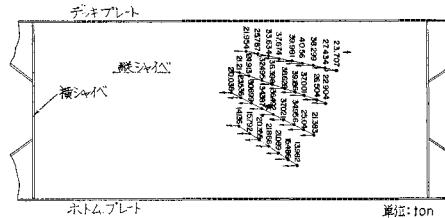


図-26 実橋縦シャイベに入力する荷重強度

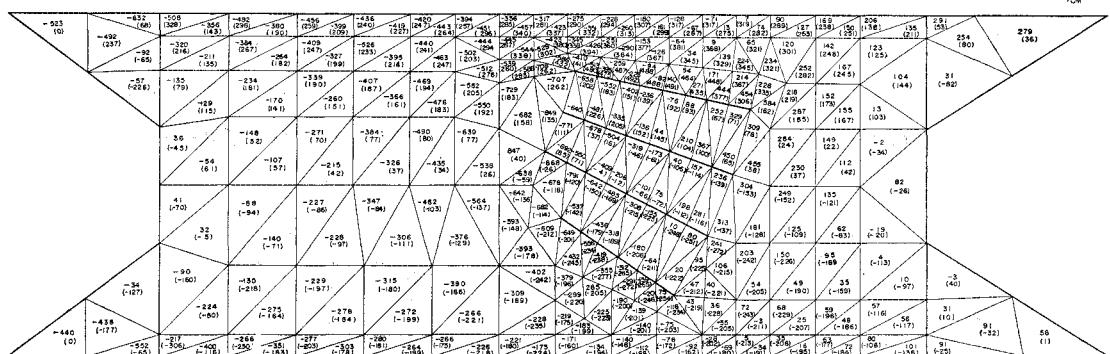


図-27 実橋縦シャイベ内の垂直応力値、() はせん断応力値

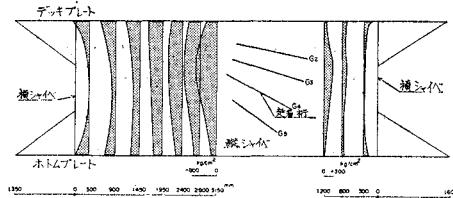


図-28 実橋縦シャイベ内の垂直応力分布

る。図-25 に要素分割（節点数 142、要素数 238）と反力分布についての代表的な計算結果を示す。

2) 縦シャイベ内の応力分布状態と、次の 3) の計算との関連において、縦シャイベとデッキ、および、ボトムプレートとの境界線上に生ずる変位分布を求める。主桁と縦シャイベからなる全長 70 m の部分を対象にして、縦シャイベに図-26 に示すような荷重を作用させ、G₁ 定着桁からの荷重を、デッキプレートに入力して解析する。縦シャイベとその付近のデッキ、および、ボトムプレートの有限要素はこまかく組立てている。図-27、28 に、縦シャイベ内の計算応力値、および、応力分布状態の一例を示す。

3) 2) の計算で得られた縦シャイベとデッキ、および、ボトムプレートとの境界線上に生ずる変位を強制変位として、また、G₁ 定着桁からの軸方向力を、図-29 に示すように、デッキプレートに入力して、デッキ、ボトム、および、ウェブの各プレートによって構成された全長 70 m の主桁断面を対象に応力計算を行なう。この計算は、主桁に伝達されたケーブル張力の水平分力が、主桁全断面に均等分布されるに至る過程を求めるものである。図-29、30、31 に、要素分割（節点数 809、要素数 1331）と計算応力値、および応力分布状態の一例を示す。

以上 3 段階の計算のうち、1), 2) は細部模型実験によって、3) は部分模型実験によって、その解法の妥当性が確かめられたものである。計算断面は安全側をとり、縦リブを無視して板のみを有効とした。

豊里大橋(斜張橋)のケーブル定着点の設計について

さらに、実橋の応力照査においては、上記の応力に主桁作用の曲げによる影響を重ね合わせて検討することが必要であるが、縦シャイベが主桁作用にどの程度関与す

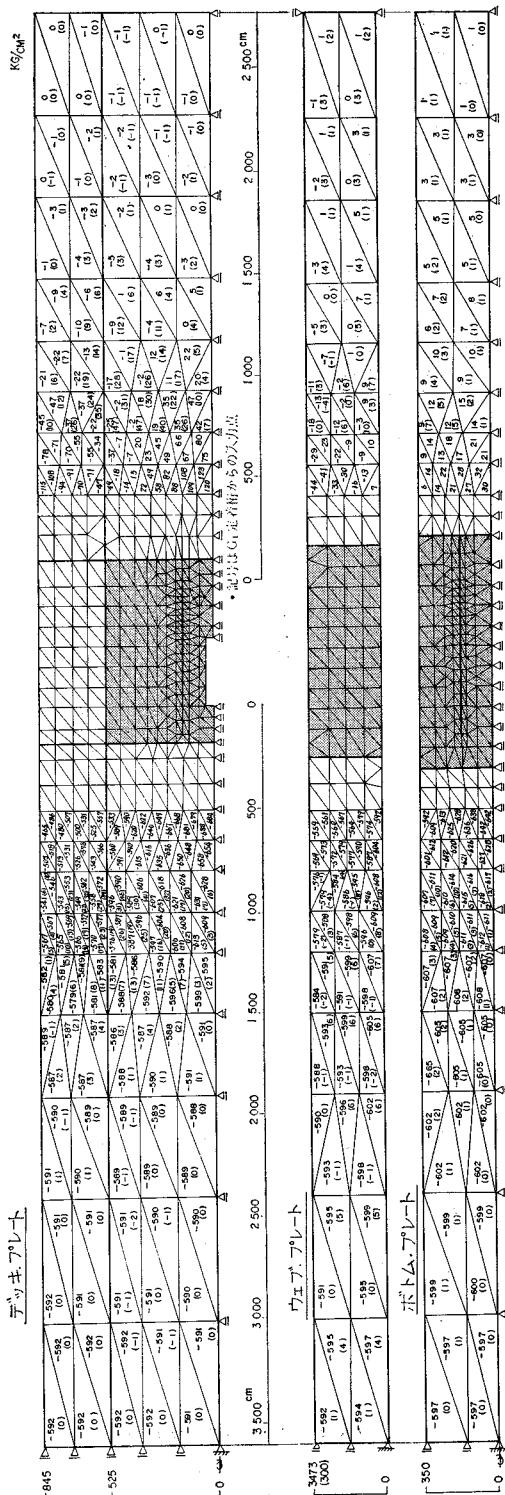


図-29 実橋の計算における要素分割と垂直応力()内はせん断応力直

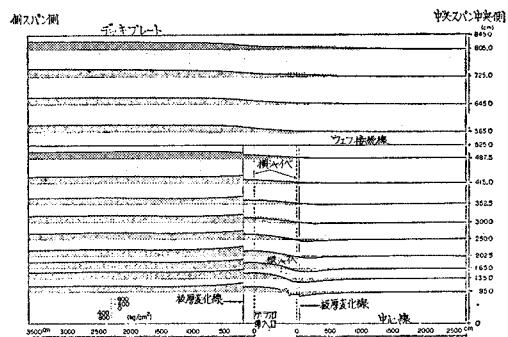


図-31 デッキプレート橋軸方向垂直応力分布

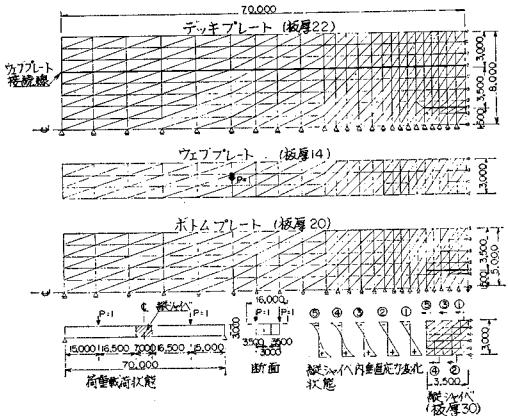


図-32 主桁作用による縦シャイベ内の垂直応力状態

るかは疑問である。このため、図-32に示す桁断面と荷重状態を想定して、有限要素法による解析を行なった。その結果、部分的に存在する本橋のように縦シャイベにおいても、主桁作用による曲げ応力を加味する必要のあることがわかった。このことは、7. の「現地載荷実験」においても確かめられた。

7. 現地載荷実験

実橋完成後、動的・静的載荷実験を実施した。本論文においては、ケーブル定着点付近に生ずる応力状態の調

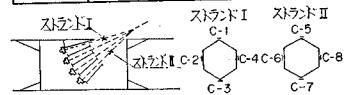
表-1 ストランド応力

A 前重 (理論値 809.8 kg/cm² 実験値平均 783.8 kg/cm²)

	C-1	C-2	C-3	C-4	平均
ストランド I	738.4	746.6	726.6	720	733.0
ストランド II	861.6	846.6	790.0	840.0	834.6

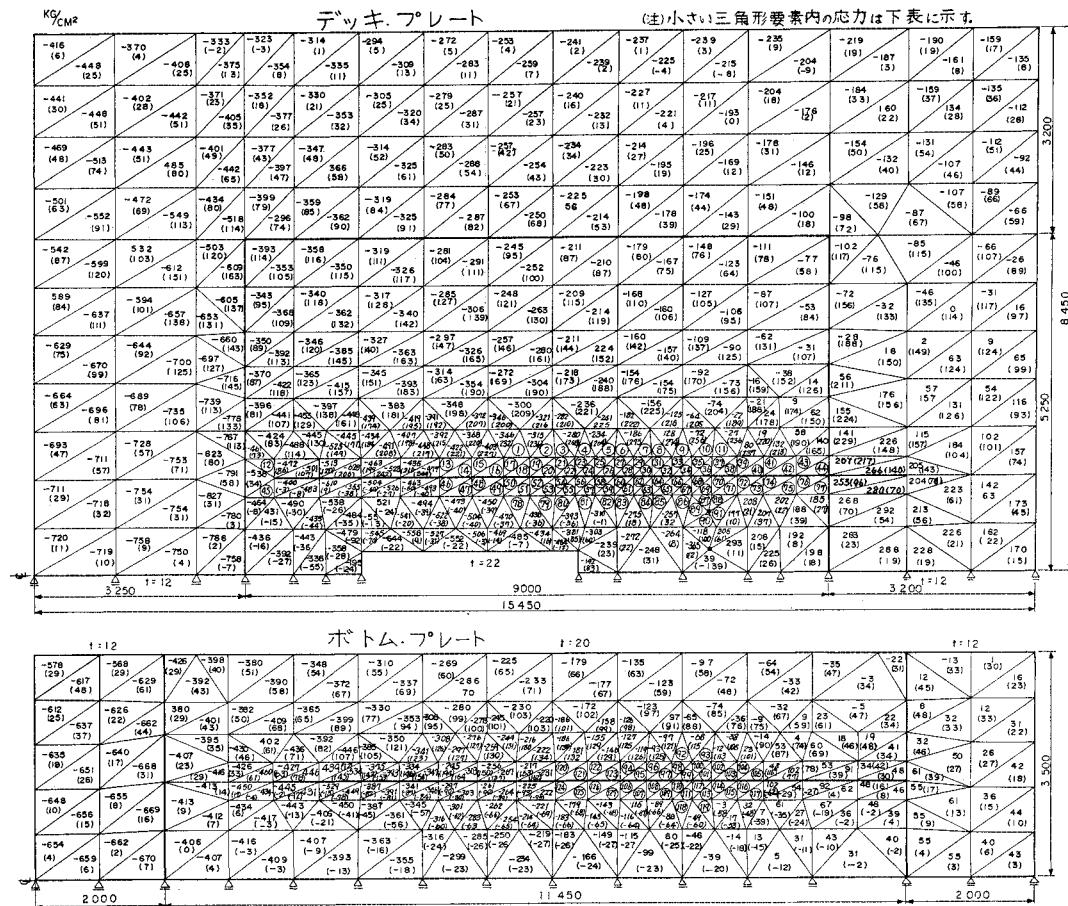
B 前重 (理論値 286.0 kg/cm² 実験値平均 304.0 kg/cm²)

	C-1	C-2	C-3	C-4	平均
ストランド I	313.4	303.4	315.0	308.4	310.0
ストランド II	301.6	298.4	291.6	300.0	298.0



査を主目的とした静的載荷実験について述べる。

実験の荷重位置とひずみ測定位置は図-33に示すようである。荷重 A は、上段ケーブル定着点付近、すな



デッキプレートの小三角形要素 (1) ~ (9) の応力

| 要素 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 | 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 | 240 | 241 | 242 | 243 | 244 | 245 | 246 | 247 | 248 | 249 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 | 255 | 256 | 257 | 258 | 259 | 260 | 261 | 262 | 263 | 264 | 265 | 266 | 267 | 268 | 269 | 270 | 271 | 272 | 273 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 | 280 | 281 | 282 | 283 | 284 | 285 | 286 | 287 | 288 | 289 | 290 | 291 | 292 | 293 | 294 | 295 | 296 | 297 | 298 | 299 | 300 | 301 | 302 | 303 | 304 | 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 311 | 312 | 313 | 314 | 315 | 316 | 317 | 318 | 319 | 320 | 321 | 322 | 323 | 324 | 325 | 326 | 327 | 328 | 329 | 330 | 331 | 332 | 333 | 334 | 335 | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 | 341 | 342 | 343 | 344 | 345 | 346 | 347 | 348 | 349 | 350 | 351 | 352 | 353 | 354 | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 | 360 | 361 | 362 | 363 | 364 | 365 | 366 | 367 | 368 | 369 | 370 | 371 | 372 | 373 | 374 | 375 | 376 | 377 | 378 | 379 | 380 | 381 | 382 | 383 | 384 | 385 | 386 | 387 | 388 | 389 | 390 | 391 | 392 | 393 | 394 | 395 | 396 | 397 | 398 | 399 | 400 | 401 | 402 | 403 | 404 | 405 | 406 | 407 | 408 | 409 | 410 | 411 | 412 | 413 | 414 | 415 | 416 | 417 | 418 | 419 | 420 | 421 | 422 | 423 | 424 | 425 | 426 | 427 | 428 | 429 | 430 | 431 | 432 | 433 | 434 | 435 | 436 | 437 | 438 | 439 | 440 | 441 | 442 | 443 | 444 | 445 | 446 | 447 | 448 | 449 | 450 | 451 | 452 | 453 | 454 | 455 | 456 | 457 | 458 | 459 | 460 | 461 | 462 | 463 | 464 | 465 | 466 | 467 | 468 | 469 | 470 | 471 | 472 | 473 | 474 | 475 | 476 | 477 | 478 | 479 | 480 | 481 | 482 | 483 | 484 | 485 | 486 | 487 | 488 | 489 | 490 | 491 | 492 | 493 | 494 | 495 | 496 | 497 | 498 | 499 | 500 | 501 | 502 | 503 | 504 | 505 | 506 | 507 | 508 | 509 | 510 | 511 | 512 | 513 | 514 | 515 | 516 | 517 | 518 | 519 | 520 | 521 | 522 | 523 | 524 | 525 | 526 | 527 | 528 | 529 | 530 | 531 | 532 | 533 | 534 | 535 | 536 | 537 | 538 | 539 | 540 | 541 | 542 | 543 | 544 | 545 | 546 | 547 | 548 | 549 | 550 | 551 | 552 | 553 | 554 | 555 | 556 | 557 | 558 | 559 | 560 | 561 | 562 | 563 | 564 | 565 | 566 | 567 | 568 | 569 | 570 | 571 | 572 | 573 | 574 | 575 | 576 | 577 | 578 | 579 | 580 | 581 | 582 | 583 | 584 | 585 | 586 | 587 | 588 | 589 | 590 | 591 | 592 | 593 | 594 | 595 | 596 | 597 | 598 | 599 | 600 | 601 | 602 | 603 | 604 | 605 | 606 | 607 | 608 | 609 | 610 | 611 | 612 | 613 | 614 | 615 | 616 | 617 | 618 | 619 | 620 | 621 | 622 | 623 | 624 | 625 | 626 | 627 | 628 | 629 | 630 | 631 | 632 | 633 | 634 | 635 | 636 | 637 | 638 | 639 | 640 | 641 | 642 | 643 | 644 | 645 | 646 | 647 | 648 | 649 | 650 | 651 | 652 | 653 | 654 | 655 | 656 | 657 | 658 | 659 | 660 | 661 | 662 | 663 | 664 | 665 | 666 | 667 | 668 | 669 | 670 | 671 | 672 | 673 | 674 | 675 | 676 | 677 | 678 | 679 | 680 | 681 | 682 | 683 | 684 | 685 | 686 | 687 | 688 | 689 | 690 | 691 | 692 | 693 | 694 | 695 | 696 | 697 | 698 | 699 | 700 | 701 | 702 | 703 | 704 | 705 | 706 | 707 | 708 | 709 | 710 | 711 | 712 | 713 | 714 | 715 | 716 | 717 | 718 | 719 | 720 | 721 | 722 | 723 | 724 | 725 | 726 | 727 | 728 | 729 | 730 | 731 | 732 | 733 | 734 | 735 | 736 | 737 | 738 | 739 | 740 | 741 | 742 | 743 | 744 | 745 | 746 | 747 | 748 | 749 | 750 | 751 | 752 | 753 | 754 | 755 | 756 | 757 | 758 | 759 | 760 | 761 | 762 | 763 | 764 | 765 | 766 | 767 | 768 | 769 | 770 | 771 | 772 | 773 | 774 | 775 | 776 | 777 | 778 | 779 | 780 | 781 | 782 | 783 | 784 | 785 | 786 | 787 | 788 | 789 | 790 | 791 | 792 | 793 | 794 | 795 | 796 | 797 | 798 | 799 | 800 | 801 | 802 | 803 | 804 | 805 | 806 | 807 | 808 | 809 | 8010 | 8011 | 8012 | 8013 | 8014 | 8015 | 8016 | 8017 | 8018 | 8019 | 8020 | 8021 | 8022 | 8023 | 8024 | 8025 | 8026 | 8027 | 8028 | 8029 | 8030 | 8031 | 8032 | 8033 | 8034 | 8035 | 8036 | 8037 | 8038 | 8039 | 8040 | 8041 | 8042 | 8043 | 8044 | 8045 | 8046 | 8047 | 8048 | 8049 | 8050 | 8051 | 8052 | 8053 | 8054 | 8055 | 8056 | 8057 | 8058 | 8059 | 8060 | 8061 | 8062 | 8063 | 8064 | 8065 | 8066 | 8067 | 8068 | 8069 | 8070 | 8071 | 8072 | 8073 | 8074 | 8075 | 8076 | 8077 | 8078 | 8079 | 8080 | 8081 | 8082 | 8083 | 8084 | 8085 | 8086 | 8087 | 8088 | 8089 | 8090 | 8091 | 8092 | 8093 | 8094 | 8095 | 8096 | 8097 | 8098 | 8099 | 80100 | 80101 | 80102 | 80103 | 80104 | 80105 | 80106 | 80107 | 80108 | 80109 | 80110 | 80111 | 80112 | 80113 | 80114 | 80115 | 80116 | 80117 | 80118 | 80119 | 80120 | 80121 | 80122 | 80123 | 80124 | 80125 | 80126 | 80127 | 80128 | 80129 | 80130 | 80131 | 80132 | 80133 | 80134 | 80135 | 80136 | 80137 | 80138 | 80139 | 80140 | 80141 | 80142 | 80143 | 80144 | 80145 | 80146 | 80147 | 80148 | 80149 | 80150 | 80151 | 80152 | 80153 | 80154 | 80155 | 80156 | 80157 | 80158 | 80159 | 80160 | 80161 | 80162 | 80163 | 80164 | 80165 | 80166 | 80167 | 80168 | 80169 | 80170 | 80171 | 80172 | 80173 | 80174 | 80175 | 80176 | 80177 | 80178 | 80179 | 80180 | 80181 | 80182 | 80183 | 80184 | 80185 | 80186 | 80187 | 80188 | 80189 | 80190 | 80191 | 80192 | 80193 | 80194 | 80195 | 80196 | 80197 | 80198 | 80199 | 80200 | 80201 | 80202 | 80203 | 80204 | 80205 | 80206 | 80207 | 80208 | 80209 | 80210 | 80211 | 80212 | 80213 | 80214 | 80215 | 80216 | 80217 | 80218 | 80219 | 80220 | 80221 | 80222 | 80223 | 80224 | 80225 | 80226 | 80227 | 80228 | 80229 | 80230 | 80231 | 80232 | 80233 | 80234 | 80235 | 80236 | 80237 | 80238 | 80239 | 80240 | 80241 | 80242 | 80243 | 80244 | 80245 | 80246 | 80247 | 80248 | 80249 | 80250 | 80251 | 80252 | 80253 | 80254 | 80255 | 80256 | 80257 | 80258 | 80259 | 80260 | 80261 | 80262 | 80263 | 80264 | 80265 | 80266 | 80267 | 80268 | 80269 | 80270 | 80271 | 80272 | 80273 | 80274 | 80275 | 80276 | 80277 | 80278 | 80279 | 80280 | 80281 | 80282 | 80283 | 80284 | 80285 | 80286 | 80287 | 80288 | 80289 | 80290 | 80291 | 80292 | 80293 | 80294 | 80295 | 80296 | 80297 | 80298 | 80299 | 80300 | 80301 | 80302 | 80303 | 80304 | 80305 | 80306 | 80307 | 80308 | 80309 | 80310 | 80311 | 80312 | 80313 | 80314 | 80315 | 80316 | 80317 | 80318 | 80319 | 80320 | 80321 | 80322 | 80323 | 80324 | 80325 | 80326 | 80327 | 80328 | 80329 | 80330 | 80331 | 80332 | 80333 | 80334 | 80335 | 80336 | 80337 | 80338 | 80339 | 80340 | 80341 | 80342 | 80343 | 80344 | 80345 | 80346 | 80347 | 80348 | 80349 | 80350 | 80351 | 80352 | 80353 | 80354 | 80355 | 80356 | 80357 | 80358 | 80359 | 80360 | 80361 | 80362 | 80363 | 80364 | 80365 | 80366 | 80367 | 80368 | 80369 | 80370 | 80371 | 80372 | 80373 | 80374 | 80375 | 80376 | 80377 | 80378 | 80379 | 80380 | 80381 | 80382 | 80383 | 80384 | 80385 | 80386 | 80387 | 80388 | 80389 | 80390 | 80391 | 80392 | 80393 | 80394 | 80395 | 80396 | 80397 | 80398 | 80399 | 803100 | 803101 | 803102 | 803103 | 803104 | 803105 | 803106 | 803107 | 803108 | 803109 | 803110 |<th
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

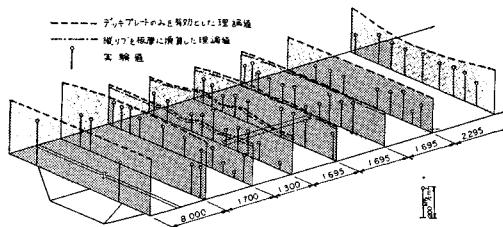


図-34 デッキプレートの垂直応力分布（A荷重）

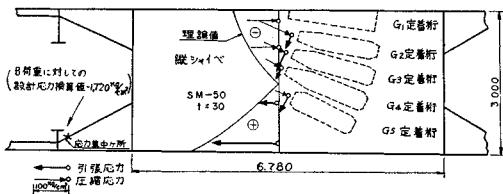


図-35 縦シャイベの垂直応力（A荷重）

力によって生ずる応力に、主桁作用による曲げモーメントの応力を重ね合わせたものである。

8. 現地載荷実験の考察

図-34, 35 からわかるように、デッキプレート、および、縦シャイベの応力実測値は、理論値を下まわり、大きな応力集中は生じていない。ケーブル張力の水平分力に対する応力解析に、有限要素法を適用して検討した設計断面は十分安全であった。なお、ボトムプレートにおいても同様な結果が得られた。しかし、図-35 に示すように、縦シャイベ先端の断面急変箇所には、かなりの偏心曲げモーメントによる応力と断面急変による応力集中が生じている。これは当初から予想されていたことであったが、設計にあたっては十分留意すべきことであろう。図-35 の縦シャイベ内の実験応力値が、ほぼ、三角形分布をしていることから、縦シャイベが主桁作用に十分関与していることが確認された。このことに関連して、分散配置した各ストランドも、主桁の曲げによる影響をうけている。表-1 の実測応力値からわかるように、荷重Aに対しては、上のストランド応力が下のストランド応力よりも小さく、荷重Bに対しては、これと逆の傾向を示している。A荷重の場合、最大張力と最小張力の差は、平均値の 18% くらいであった。

9. 結 論

以上、豊里大橋のケーブル定着点の設計にあたって実施した模型実験、有限要素法による理論解析、および、現地載荷実験について述べたが、これらの一連の検討結果からえられた結論を総括して述べると次のようなものである。

(1) 模型実験の結果と理論値がよい一致を示していることから、本橋のように比較的複雑な立体薄板構造のケーブル定着部の応力解析にも、有限要素法による解析理論が十分な精度をもって適用できることがわかった。斜張橋の定着部付近の立体構造の設計を行なうに際しては、各薄板の面内応力問題と考えて立体解析すればよい。

(2) ケーブルの水平分力に対して、2.(2)「断面算定」で示したように、略算法によって基本設計を行ない、その後、有限要素法によって正確な応力状態を求めた。この計算結果をもとに、定着部の詳細設計を実施したが、現地載荷実験の結果からも、十分安全であることが確かめられた。

(3) 有限要素法による解析、および、現地載荷実験から、本橋のような定着構造を採用した場合、縦シャイベにも、主桁作用による影響を加味しなければならない。また、ケーブルストランドも主桁の曲げ作用による影響をうけ、定着桁付近の上下のストランド間には、張力に差の生ずることがわかった。

以上、本橋のケーブル定着点の設計について述べたが、この種の問題に本文で取り扱った設計方法が有効であると思う。

なお、設計において、たえず熱心なるご指導を賜わった京都大学 小西一郎教授、また、模型実験においてご協力いただいた、三菱重工業（株）伊藤鉄一氏、市場悟氏、および、日立造船（株）中島康吉氏、牛尾正之氏に末筆ながら深謝する次第である。

参 考 文 献

- Aschenberg, H. und Freudenberg, G.: "Die Brücke über die Norderelbe im Zuge der Bundesautobahn Südliche Umgehung Hamburg. Teil III: Statische Berechnung des Brückenüberbaus", Der Stahlbau 32, 1963, H. 9, S. 281~287.
- Tamms, F. und Beyer, E.: "Kniebrücke Düsseldorf, Ein neuer Weg über den Rhein", S. 71~72, 133~138.
- 川井忠彦・吉村信敏・大坂憲司・森田寿郎: "有限要素法による立体薄板構造物の解析", 三菱重工技報 Vol. 6 (1969) No. 4.
- Wintergerst, L.: "Nordbrücke Düsseldorf, III. Teil: Statik und Konstruktion der Strombrücke", Der Stahlbau 27, 1958, H. 6.
- 小松定夫・松川昭夫・牛尾正之・市場悟: "淀川新橋（斜張橋）のケーブル定着点付近の応力伝達状況に関する模型実験について, (その1), (その2)", 第 24 回年次学術講演会講演集第 1 部
- 小松定夫・林紘士・松川昭夫: "豊里大橋の載荷試験について", 第 25 回年次学術講演会講演集第 1 部
- 市場悟・東口洋一: "斜張橋のケーブル定着部の応力解析", 三菱重工技報 Vol. 5 (1968) No. 5.
- 近藤和夫・井上洋里・佐伯章美・松川昭夫: "豊里大橋（斜張橋）の設計と架設", 橋梁と基礎 12, Vol. 4, No. 12, 1970.

(1970. 4. 30 受付)
(1971. 4. 17 受付)