

# パラボラ・トラス機構に関する基礎的実験と考察

## Basic Experiment and Considerations on Parabola-shaped Truss Mechanism

吉川 薫\* 清水 功雄\*\*  
 Kaoru YOSHIKAWA Isao SHIMIZU

### SUMMARY

Static characteristics and responses of Parabola-shaped truss structure are examined. Nodal points of upper chord are arranged on a parabolic curve. And the cable is installed through the upper chord members. When the cable is tensed, uplift forces are generated at the nodal points of upper chord.

By this mechanism (cable tension-uplift force), nodal deflections and member forces of the truss can be controlled. Under various loading and tensioning conditions of the experiment, interaction between the cable and the truss are verified.

### 1. まえがき

トラス構造の上弦材を放物線状に配置し、その上弦材の部材の中に tendon または ケーブル を組み込んだ構造物を、上弦材の配置形状よりパラボラ・トラスと呼んでいる。

この構造の基本構想は、信州大学工学部の吉澤助教授により発案・研究されていたものであり、数値計算により基本的な性状は把握されていた。

今回、基本的な静的応答を模型実験により実証することを目的として、信州大学との共同実験を行ったのでその報告を行う。

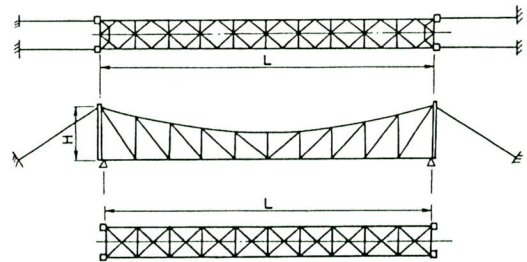
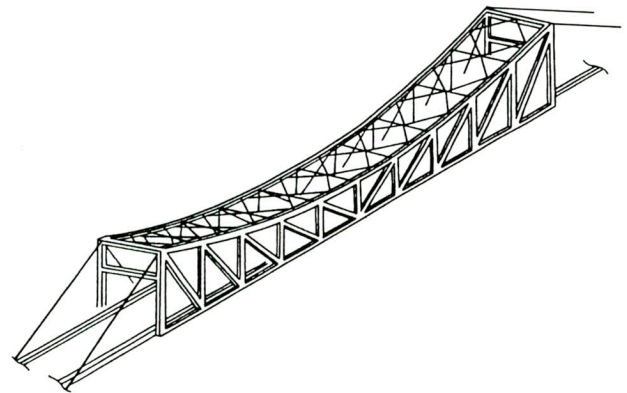


図-1 パラボラ・トラス構造 (単径間)

### 2. パラボラ・トラスについて

#### (1) 外観形状について

本構造を単径間の道路橋に適用した場合、図-1 に示すような外観形状になると思われ、外観的には普通の下路式トラスと変わらない。

また、3径間の橋梁に適用すれば図-2 のようなタイプが考えられる。この図の側面形状を見る限りにおいては、中間支点上で主構高さが大きくなる曲弦トラスに類似している。あるいは、上弦材と斜材を取り除き、鉛直材をハンガーに置き換えれば吊橋の形状にも似ている。外観上からは、本構造は曲弦トラスと吊橋を合成させた



図-2 パラボラ・トラス構造 (3径間)

\* 松本工場製造部生産技術課係長  
 \*\* 技術本部技術開発部次長

構造であるといえる。

## (2) 構造の特徴

本構造は、トラス橋の形状管理を部材の中に配置したテンドンの張力を調整することによって行うことを目的として考案された構造である。

具体的には、上弦材の箱形断面の中に、**図-3**に示すような複数のケーブルを通す。このケーブル(テンドン)は、荷重のほとんどを負担することも可能であるくらいの断面性能を有するものとする。ケーブルには荷重を支持するという主要な役割以外に、積極的に張力を加えて、構造全体の剛性を高めるという重要な役割を担わせる。

数値計算によれば、ケーブル張力を調整することにより、

- ① トラス部材の応力調整が可能になる。すなわち、部材の断面力の大きさを調節できる。
  - ② 系全体の変形の制御が行える。すなわち、トラス構造のたわみの大きさを調節できる。
- という2点が、大きな特徴であることがわかっている。

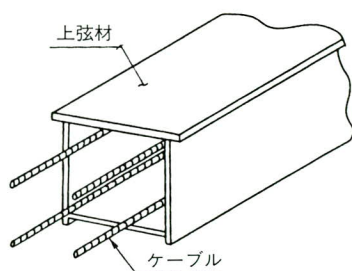


図-3 上弦材

## 3. 数値計算

### (1) 計算結果

数値計算に際しては、構造諸元、載荷方法、テンドン張力の大きさ等、様々なパラメーターを考慮したため、計算結果は膨大な量となった。個々の結果の報告は省略するが、下記の構造特性が明らかになった。

- ① テンドンの緊張によりトラス部材の部材力と構造全体の変形の調整が可能である。
- ② たわみをゼロに近い状態に調整すると、節点荷重の大部分がケーブルに移行し、ケーブルと鉛直材のみに部材力が生じるようになる。

- ③ 剛性が大きく、変形量が小さい。

## (2) 考察

本構造に対する検討は静的な挙動にとどまっているため、下記の考察は実用性という見地からは十分であるとはいえないが、パラボラ・トラスの基本的特性は把握できると思われる。

### ① 腹材の配置方法

腹材の配置方法として、プラットトラス型、ハウトラス型、ワーレントラス型が考えられる。スパン長150mのモデルに対する概略設計では各タイプ間に顕著な差はみられなかったが、ケーブル張力の点でプラット型がやや有利であった。

### ② 支点条件

下弦材支点がヒンジの場合とローラーの場合を比較した場合、ヒンジ支点のほうがたわみは小さくなる。ただし、ヒンジ支点ではスパン中央部付近の上弦材や、端部付近の下弦材に圧縮力が生じるのに対し、ローラー支点なら上弦材中央付近を除いてほぼ引張材として使用できるという長所がある。ローラー支点のモデルに対して系全体に一樣な温度変化があった場合、温度低下に対しては、たわみの減少、部材力の減少等有利であるが、温度上昇の場合はたわみが増大し、上下弦材とも圧縮力が大きくなる。

### ③ 他の構造形式との比較

トラスランガーやワーレントラスに比較して、鋼重の点ではパラボラ・トラスが有利であるが、たわみは大きくなる。吊橋と比較すれば、鋼重に有為な差異はみられないが、たわみとケーブル張力の変動幅が小さくなるため本構造が有利な点もある。

## 4. 模型実験

数値計算で得られた構造特性の確認を行うため、模型による載荷実験を行なった。

### (1) 実験装置

実験に用いたモデルを**図-4**、および**写真-1**に示す。支間は500cm、主構高さは端部で80cm、中央部で40cm、サグ比は1/12.5である。図中のU1、L1・・・等は部材マークを、[ ]内の数字は節点番号を示す。

近接した2面のトラス構面の中に、上弦材節点を介してケーブルを1本配置する。このケーブルを両方の上部支点で緊張することにより、すべての上弦材にプレストレスが導入できる構造になっている。なお、荷重は下弦材節点に載荷する。

トラス部材は全部材同一断面のアルミニウム製チャンネル(図-5)、ケーブルはステンレス製の片より索、ガセットプレートには鋼板を用いた。これらの部材の主要

諸元を表-1に示す。ケーブルの接触する上弦材節点には、ケーブル張力の摩擦損失を極力少なくするために黄銅製のローラーを設けた。模型全体は、剛性の高い鋼製(H型鋼)のフレームで取り囲み、支点やケーブルの反力を取ったり、測定機器の受台として使用した。

トラス部材のひずみはひずみゲージ、節点変位はダイヤルゲージ、ケーブル張力はロードセルによって測定した。

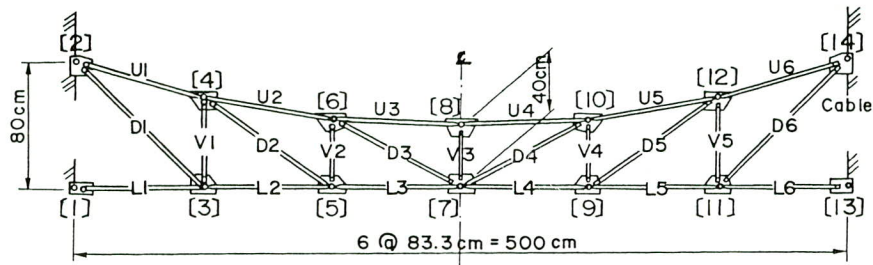


図-4 実験モデル

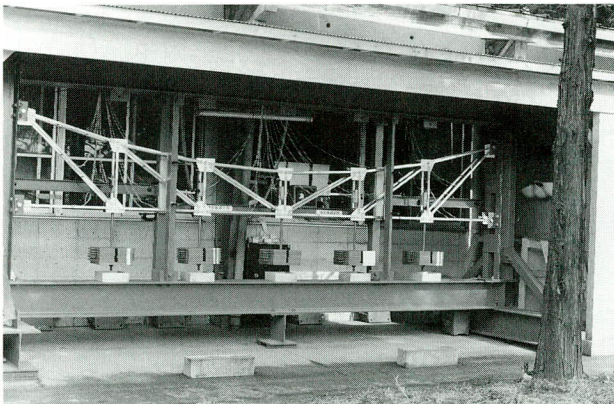
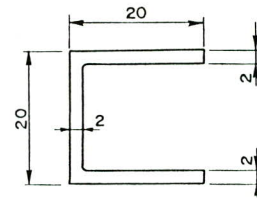


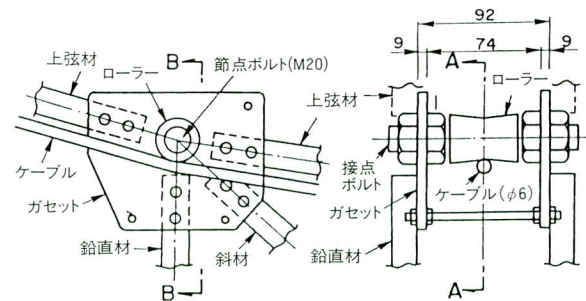
写真-1 実験状況



(a) トラス部材断面

表-1 構造諸元

トラス部材	アルミニウム製チャンネル	JIS H 4100 6063 T-5 20×20×2 E=2.0×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> A=1.12cm <sup>2</sup> σ <sub>y</sub> =15kgf/cm <sup>2</sup>
ケーブル	ステンレス製ストランド	φ6mm T <sub>a</sub> =2000kgf A=0.22cm <sup>2</sup>
ガセット	鋼製プレート	SS400 t=6mm



(b) 上弦材節点構造

図-5 トラス部材と上弦材節点構造

## (2) 実験方法

荷重の載荷方法とケーブルの緊張方法、およびその順序の組合せは種々考えられるが、ケーブルの緊張によってたわみや部材力を制御するという目的から表-2のような方法を採用した。すなわち、節点荷重の載荷・除荷

とケーブル張力の緊張・弛緩は、各々異なるステップとして行った。そして、ステップ番号③⑤⑦⑨においては、節点[7]のたわみを0にするような制御を行うべくケーブル張力を調整した。なお、節点荷重は5つの下弦材節点に同じ大きさの荷重Pを載荷した。したがって、節点荷重の総和は表中のPの大きさの5倍である。

## 5. 実験結果

節点荷重のステップ载荷（除荷）とケーブル緊張（弛緩）のプロセスを、同一の行程で5回行った。5回の実験結果を平均したもののうち、下弦材中央の節点[7]の変位、端部パネルの上弦材(U1)、下弦材(L1)、斜材(D1)、鉛直材(V1)の部材力と、ケーブル張力Tとの関係を図-6に示す。図中の変位は上方への変位を+、部材力は引張力を+として表現している。载荷段階のそれぞれの結果について順を追って説明する。

### (1) プレストレス導入（ステップ①～②）

節点荷重は作用させず、ケーブル張力のみを増加させる。これはトラス構造にケーブルを介してプレストレスを導入する場合に相当する。ケーブル張力は100kgずつ増加させている。各グラフの中間点はほぼ一直線上に並び、ケーブル張力とトラスの部材力、変位の間には線形関係が成り立つことがわかる。ケーブル張力の導入によって下弦材節点は上方へ引き上げられる。

### (2) プレストレス状態での载荷（②～③）

ケーブル張力（プレストレス）の導入を500kgで止め、下弦材節点に鉛直荷重を载荷する。この結果、ケーブル張力の増加は若干であるのに対し、トラスの部材力、変位は大きく変化する。すなわちプレストレス導入後に载荷した荷重の大部分はトラスが負担することがわかる。ただし、鉛直材の部材力のみが低下することがこの構造系の特徴である。

### (3) 制御機能の検証（③～④）

すべての下弦材節点に一樣な鉛直荷重を作用させた状態で、ケーブルの張力を900kgまで増加させると、図に見るようにケーブル張力の増加に伴って、節点変位と上弦材、下弦材、斜材の部材力は線形的に減少する。これに対して、鉛直材の部材力のみが線形的に増加していく。この現象は、この系ではケーブル張力を変化させることによって、トラス構造とケーブルによる吊り構造との中間的な構造系が出現することを意味する。

### (4) 吊橋との類似機構の検証（④、⑧）

ケーブル張力を調整して節点[7]のたわみを0とした場合が図に示す④、⑧の各点である。この段階で注目すべき現象は、上弦材(U1)、下弦材(L1)、斜材(D1)の

表-2 節点载荷とケーブル緊張

ステップ	節点荷重 P kgf	ケーブル張力 T kgf	備考
①～②	0	0→500	荷重载荷
②～③	0→55	500	
③～④	99	500→965	
④～⑤	99→163	965	ケーブル緊張
⑤～⑥	163→99	965	荷重除荷
⑥～⑦	99	965→500	
⑦～⑧	99→54	500	
⑧～⑨	54	500→0	ケーブル弛緩
⑨～⑩	54→0	0	

注意 1) ステップの番号(①、②…)は図中の番号に対応する。  
2) 節点荷重の大きさPは1節点あたりを表す。  
3) ケーブルの緊張(弛緩)は節点荷重を固定した状態で行う。節点荷重の大きさを変えればケーブル張力も若干変化する。

各部材力はほとんど0となるのに対して、鉛直材(V1)の部材力は節点荷重とほぼ等しい荷重を示していることである。これは節点荷重が鉛直材を通じてケーブルに直接伝達されていること、すなわち鉛直材とケーブルによって吊橋に類似した機構が得られる事を示すものである。

### (5) 活荷重载荷の検討（④～⑥）

上記(4)の特性を利用した吊橋類似機構をもつトラス構造物を想定し、死荷重をケーブルと鉛直材に負担させた場合、この構造系がその後に作用する活荷重等の外力に対してどのような挙動を示すかを検討する。実験では節点変位が0に制御された状態から節点荷重を段階的に増加し、そこからまた段階的に減少させる。この反復载荷実験過程において、図上にプロットした点はほぼ一直線上に並ぶ。

また、各クラブにおいて、④と⑤を結ぶ直線と②と③を結ぶ直線の勾配を詳細に観察すると、いずれのグラフにおいてもケーブル張力の高い場合(④～⑤)のほうが若干緩い勾配を示す。すなわち、プレストレスの導入後における外力の増分に対しては、プレストレスが高いほどトラスの荷重分担率が軽減されることを意味する。このことは、ケーブルを含む構造物の解析においては、ケーブルの張力の大きいほど剛度マトリクスにおけるケーブル要素の剛度が大きな数値となることから理解できる。

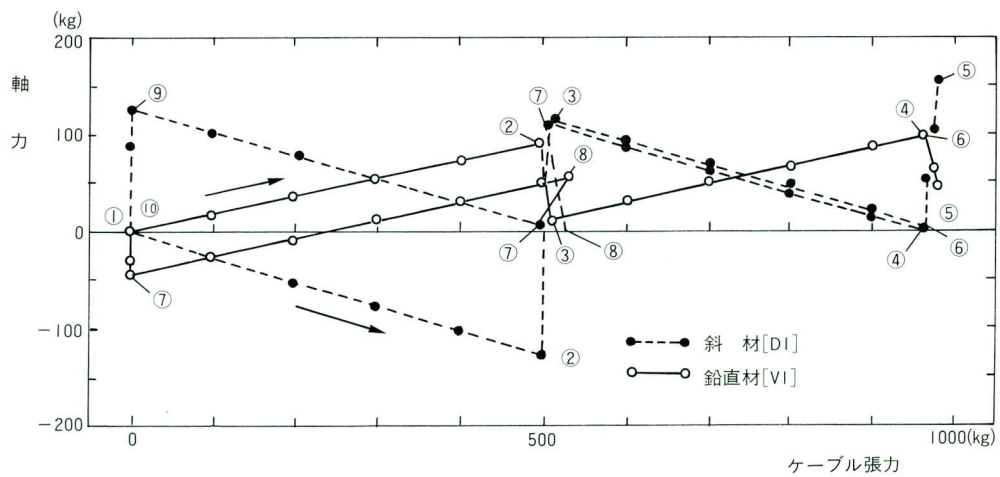
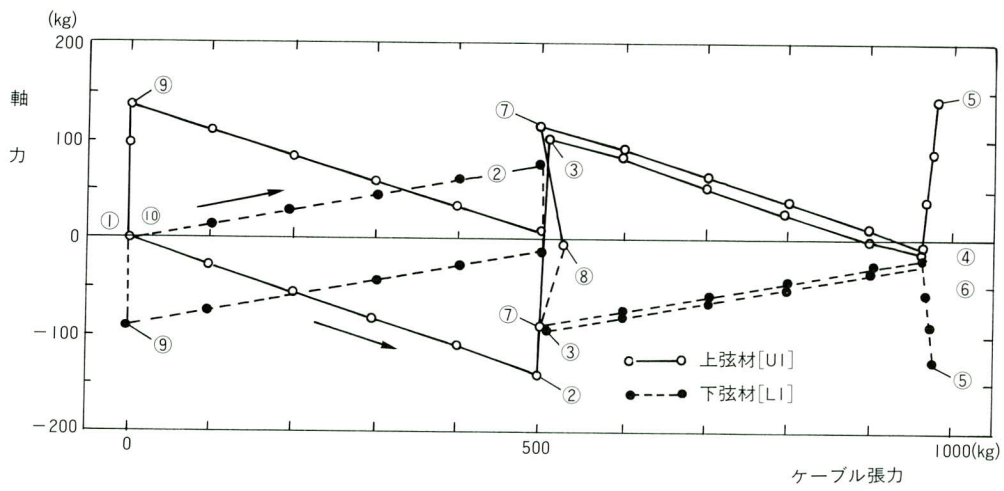
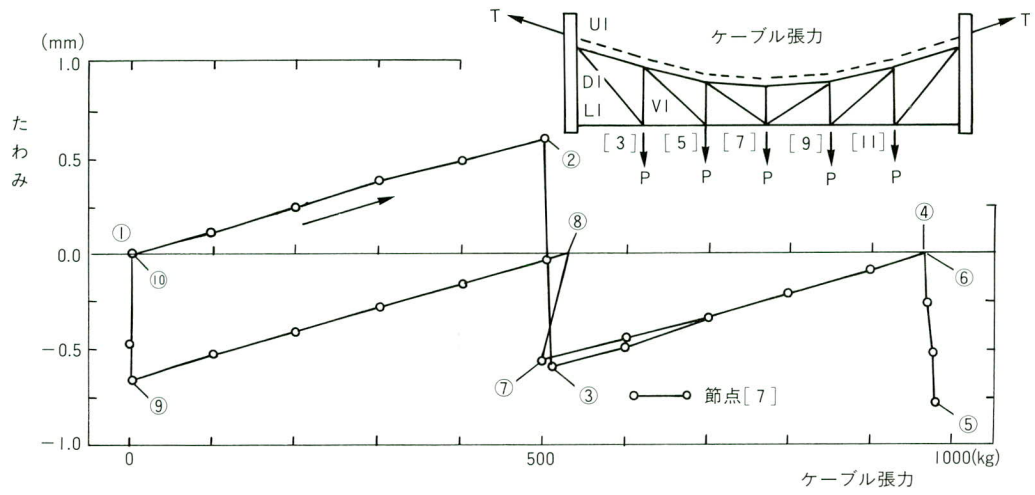


図-6 実験結果

## 6. 橋梁への応用に関する考察

パラボラ・トラス構造に関する検討は、現時点では数値解析と上記の基礎的な実験を完了した段階である。さらに詳細な多くの検討課題を抱えてはいるが、この方式を実橋に利用する場合を想定したとき、次の諸点についてメリットがあると考えられる。

### (1) 中小径間橋梁としての有利性

スパン長150m以下の小径間の橋梁に対して、アーチ構造を採用する場合には、全体座屈に対する条件が厳しいために、設計上かなりの安全を見込まなければならない。また、地形によっては架設に要する費用も増大する。吊橋を採用する場合には、小径間のために横方向の剛性が小さい。そのため架設時の安全性の確保や使用時の変形の大きさが問題となる。これに対して本構造方式は、ケーブルとトラスの相互作用によって系全体が引張構造物となるため、全体座屈は生じない。またプレストレスによる剛性が付加されるという有利性がある。

### (2) 架設工法における有利性

ケーブルエレクション方式のケーブルを、そのままトラスの上弦材の中に組み込んで主構造部材として利用する事が出来る。トラス構はパネル毎にブロック架設が可能である。これによって現場工事の安全性と省力化をはかることができる。

### (3) 主構造部材の交換の可能性

トラス構造とケーブル構造という二重構造であり、ケーブルの張力調整によって荷重の分担率を変更できるため、部材の補修や交換が可能である。ただし、上弦材の中には複数のケーブルを配置してあるものとする。

### (4) 構造応答制御機能

所定の節点に結合した複数のケーブルの緊張力を調整することによって、系の変形を制御することができる。この機能は、架設時および補修時における形状管理に利用できる。

## 7. まとめ

トラスの上弦材の節点をパラボラ曲線上に配置し、上

弦材の中またはこれに平行して制御用のケーブルを組み込み、ケーブルの緊張力が調整できるような構造系を考案した。その静的な力学特性を検証することを目的として、基礎的な模型実験を試みた。実験結果は数値解析による理論値と十分な精度で一致し、トラス構造とケーブルの相互作用の機構を明確に証明する事ができた。実験で証明されたパラボラ・トラスの主要な構造特性を以下に要約する。

- ① 節点に作用する鉛直荷重によって生ずるトラスの節点たわみと部材力は、ケーブルの緊張力によって調整することができる。
- ② 節点たわみがほとんど0に調整されたとき、下弦材節点荷重の大部分はケーブルに移行する。この場合鉛直材のみが吊橋のハンガーのように働き、他のトラス部材の軸力は無視できるほどに小さくなる。

張力調整は上弦材間で行うのが実用的であり、ケーブルの定着方法を含めて上弦材の節点構造には多くの問題が残されている。さらに、実際の橋梁への応用のためにも動的応答特性や立体構造としての挙動を把握しなければならないであろう。

本報告を執筆するに当たり、実験の実行や数値計算結果・実験結果の資料提供等で多大な御協力を頂いた、信州大学工学部社会開発工学科の吉澤孝和助教授、(株)長野技研の宮澤 圭氏、吉澤研究室の学生諸氏に、紙上を借りて感謝の意を表します。

## <参考文献>

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧、丸善、1980
- 2) 土木学会：座屈設計ガイドライン、技報堂、1987
- 3) N.J.Gimsing、西川和廣 訳：ケーブル支持橋梁の最近の発展および将来への展望、橋梁と基礎、1987.5
- 4) N.J.Gimsing、大塚久哲 訳：超長大支間の斜張橋、橋梁と基礎、1989.6
- 5) 大森邦雄：鋼アーチ橋の設計上の留意点、アーチ橋特集号、橋梁と基礎、1991.8
- 6) 酒井勝昭：鋼アーチ橋の架設、アーチ橋特集号、橋梁と基礎、1991.8
- 7) 石橋和美：鋼トラス橋の設計上の留意点、トラス橋特集号、橋梁と基礎、1993.8
- 8) 酒井勝昭：鋼トラス橋の架設、トラス橋特集号、橋梁と基礎、1993.8

- 9) 長井正嗣、藤野陽三：1000mを超える自碇式斜張橋の構造形態に関する主に静的挙動からの一考察、土木学会構造工学論文集、Vol.38 A、1992
- (10) 吉澤孝和、宮澤圭：パラボラトラス構造を応用した新形式の長大橋梁について、JSCE中部支部研究発表会

- 講演概要集、I-40、1991.3
- (11) 吉川薫、清水功雄、吉澤孝和、宮澤圭：パラボラ形トラスとケーブルを組み合わせた構造の静的載荷実験、JSCE47回年次学術講演会講演概要集、I-425、1992.9

1994.6.25受付

#### グラビア写真説明

##### 北浦大橋

茨城県には、琵琶湖につぐ日本第二の霞ヶ浦があり風光明媚な観光地として有名であります。

しかし対岸との物的、文化的な交流がさまたげられており、そこで北浦を横断し鹿島郡と行方郡を結ぶ北浦大橋が計画され、全長1,298.8mの県内最大の橋梁として昭和63年に着工され平成6年度には全面開通となります。

その効果は茨城県だけでなく、他県との一層の物的、文化的交流をうながし又その雄大な景観は、観光地としても一層の効果を生むと思われます。(伊木)

##### 白山橋

南アルプスの麓に位置する高遠町は、歴史と桜の町であり高遠城址公園の“高遠コヒガン桜”や江島、生島で有名な江島の囲み家数は観光名所となっております。

高遠町は、急勾配な地形が多く道路が狭く、又町が三峰川で分断され地域生活、観光道路として不便をきたしております。

白山橋もそれらを解消するために架橋され、周囲の景観と調和したデザインとなっており、特に高欄は高遠城の欄干をイメージし格子は連干窓を表現されています。

又最終塗装も満開のコヒガン桜とマッチする様検討され、決定されました。

毎年4月中旬の“桜祭り”の期間中には沢山の観光客が白山橋を利用するものと思われます。(永田)