

ハイブリッド・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 Hybrid Parabola Truss Mechanism

吉澤孝和* 宮澤圭** 清水功雄*** 吉川薫****

By Norikazu YOSHIKAWA, Kei MIYAZAWA, Isao SHIMIZU and Kaoru YOSHIKAWA

Static characteristics and control effect of a hybrid parabola truss structure are examined by indoor model experiment. Upper nodal points of the trussed frame are arranged on a parabolic curve. A cable used for static control of the structure is installed through the upper chord members. When the cable is stressed, uplift force is generated at the nodal points by induced cable tension. By this uplift mechanism, nodal deflection and member force of the trussed frame can be controlled. The control mechanism of this structure has been found by basic numerical analysis. Under various loading conditions of the experiment, this paper clearly verifies the interaction between the cable and trussed frame.

Key Words: Truss, Cable, Hybrid, Experiment, Structural Control

1 ま え が き

トラス構造の持つ高い剛度と、ケーブル構造の持つ抗張力機能とを合理的に融合させたハイブリッド構造を思考して、筆者らはこれまでに、橋梁に対する静的応答制御をテーマとした各種のトラス方式を考案し、数値解析によってそれらの持つ構造的な特性を検討してきた。^{1) 2) 3) 4) 5)} 近年に至って、実橋への応用の可能性の高いひとつの構造形式に到達した。^{4) 5)} 現時点ではこの系を、仮の名称として「ハイブリッド・パラボラ・トラス」と呼んでいる。数値解析による検討では、この構造方式は吊橋とトラス橋の両者の特性を兼ね備えていることが分かった。今回、この特性を検証する目的で基礎的な室内実験を試みた。^{6) 7)} ここに報告するものは橋梁への応用を想定した実験結果と考察である。

2 構造方式に関する検討の経緯

ハイブリッド・パラボラ・トラス構造を考案するに至った経緯を、Fig.1 を用いて簡単に記述する。

- 1) ケーブルによる既存のトラス橋の補強： Fig.1(a)は、老朽化したトラス橋をケーブルによって補強する手法を検討した例である。橋脚上の鉛直材を補強して頂部から斜張橋タイプにケーブルを配置する。¹⁾
- 2) テンドンによるトラスの耐荷機能の向上： Fig.1(b)の左側の図は、鋼構造物に対するプレストレスの導入法の一般的な例である。^{8) 9)} ここで、右側の図のような形態にテンドンを配置した場合、漸増荷重の

* 工博 信州大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒380 長野市 若里 500)

** 工修 (株) 長野技研 設計部設計課 技師 (〒390-12 松本市 新村 2326)

*** (株) 宮地鐵工所 技術開発部技術開発課 課長 (〒103 中央区 日本橋 小伝馬町 15-18)

**** 工修 (株) 宮地鐵工所松本工場 製造部生産技術課 係長 (〒390-14 長野県 波田町 1909)

作用に対して、粘り強く抵抗できる機能がこの系に備わることを、数値解析によって解明した。²⁾

3) Vトラス構造の考案： Fig.1(c)に示す系を、上弦材全体の配置形状から見て、Vトラス（仮称）と呼ぶ。ケーブルをトラスの上弦材の断面内に配置すれば、風雨等からの保護と同時にケーブルのサグも消去でき、ケーブルの張力を有効に利用できる。上弦材の所定の節点と塔頂部との間に直線状に配置した個々のケーブルの張力を調整して、節点のたわみと部材力を調整できる。しかしこの構造の欠点は、スパンの中央部に対してケーブル張力による上向きの力が過剰に集中してしまうことであった。³⁾

4) バラボラトラス橋の考案： Fig.1(d)はVトラスの欠点を解決した機構である。上弦材の各節点をひとつの放物線上に配置し、上弦材の内部または上弦材と平行にケーブルを配置する。ケーブルの緊張力は上弦材の各節点にほぼ一様な上向きの力を発生させるため、静的応答制御を効果的に行なうことができる。^{4) 5)} この系は「吊橋の主ケーブルの位置に補剛トラスの上弦材を配置して中にケーブルを組み込んだ構造物」と見ることもできる。この構造方式の特長として次の2点があげられる。

- a) トラスの上弦材はケーブルを所定の形状に保つ。また風雨等の外的環境からもケーブルを保護できる。
- b) ケーブルの張力調整によって、トラスとケーブルの荷重分担率をかなり多様に設定することができる。

特に橋梁の場合、系の自重の大部分をケーブルに負担させ、活荷重はトラスと共に分担させるような設計の可能性を数値解析で確認してきた。⁶⁾ なお、Fig.1(d)とほぼ同一の外形をもつトラス橋は、かなり古くから架設されている。本方式が従来のタイプと相違する点は、上弦材の中にケーブルを装備しており、ケーブルの張力調整によって系の変形制御と部材力調整を行う機能を有していることである。

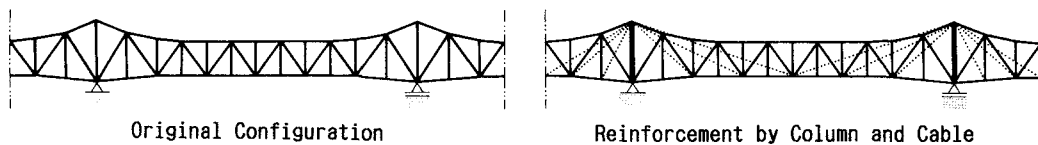
5) バラボラトラスの大径間屋根構造への応用： Fig.1(e)は豪雪荷重を受ける大径間の屋根構造への利用を考えたものである。ケーブル張力を調整して屋根上の積雪を除雪せずに支持するとともに、屋根のたわみを許容限度内に制御することができる。特にパネルごとに張力調整を行えば、漸増漸減を繰り返す非対称な積雪荷重に対しても制御が可能であることを数値解析によって確認している。¹²⁾

3 橋梁への応用に関する考察

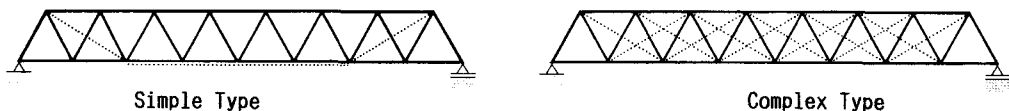
ハイブリット・パラボラ・トラス構造に関する検討は、現時点では上記の数値解析と後述の基礎的な実験を完了した段階である。さらに詳細に検討すべき多くの課題を抱えてはいるが、この方式を実橋に利用する場合を想定したとき、次の諸点についてメリットがあると考えられる。

1) 中小橋梁としての有利性： スパン長が100mを超えるような小幅員の橋梁に対して、アーチあるいはトラス構造を採用する場合には、全体座屈に対する安全性の確保の必要から主構間隔を拡げるなど、設計上かなりの安全を見込まなければならない。^{13) 14)} また地形によっては架設に要する費用も増大する。吊橋あるいは斜張橋を採用する場合には、小幅員のために横剛性が低くさらに自重も小さい。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。このように小幅員で支間の長い橋梁を経済的に設計する有効な手だてがないのが現状である。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。また上下の構面でラテラルを組めるので横力に対する剛性も高くなるという有利性がある。¹⁵⁾

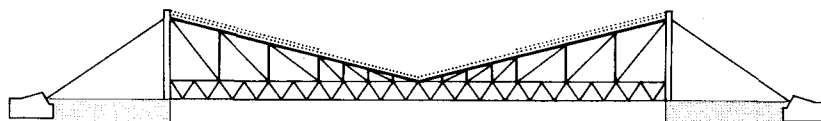
C1) ケーブル張力の与え方によってトラス構の所要鋼重量が変化する。数値解析による簡単な検討では、単径間パラボラトラス橋梁のタワーを含んだ鋼重量は、ワーレントラスおよびトラスドランガー橋に比べて、スパン長100m以下では若干多く、100m～125mでほぼ等しく、125m以上では最低となった。^{11) 19)} 幅員6m、スパン長150mの吊橋との比較では、両者のサグ比を等しくした場合、トラス構の重量は吊橋の補剛トラスの重量とほぼ等しく、集中荷重の移動に対する最大たわみとケーブル張力の変動幅はともに吊橋の1/2以下となった。^{19) 20)} 三径間パラボラトラス橋梁については図示のような自旋方式の検討を進めている。数値解析によって腹材の配置は図示の方式が合理的なこと、中央スパンのサグ比を1/15程度まで設定できることを知り得た段階である。^{5) 10) 19)} ケーブルとトラスの荷重分担率等に関する詳細な検討は今後の課題である。



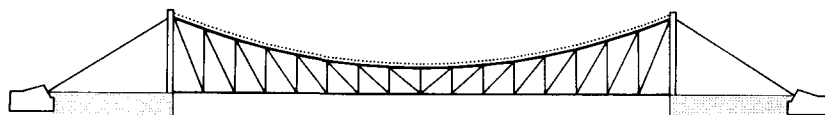
(a) Reinforcement of Old Bridge



(b) Stiffening of Warren Truss



(c) V-Truss System Applied to Single Span Bridge



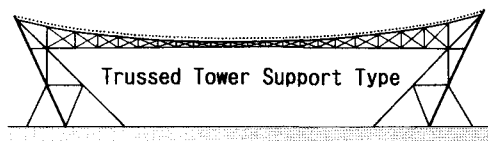
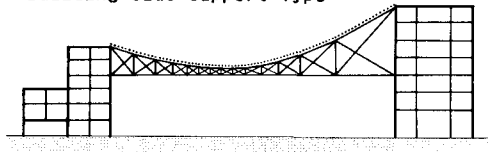
Single Span Type

Three Span Type



(d) Parabola Truss System Applied to Bridge Structures

Building Side Support Type



(e) Parabola Truss System Applied to Roof Structures under Heavy Snow Load

Fig.1 Various Types of Hybrid Truss System Equipped with Control Cable or Tendon
(Solid Line = Truss Member Dotted Line = Cable or Tendon)

2) 架設工法における有利性： 架設時に用いたケーブルを、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ことができる。トラス構はパネルごと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。¹⁶⁾ ケーブルのアンカーはコンクリートブロックあるいはアースアンカー等を用いるが、前出のトラスとの相互作用により、アンカーもコンパクトになるので無理なく配置できる。

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。

4) 構造応答制御機能： 上述のように、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。この機能は橋梁の場合には架設時および補修時における形状管理に利用できる。また、屋根上の豪雪荷重のように緩やかに変動する荷重に対しては屋根の変形を制御することにも利用できる。

4 実験装置と解析モデル

これまでの理論的な数値解析を通じて得られたパラボラトラス機構の力学特性は次のように要約される。

[特性A] ケーブル張力を調整して、種々の荷重条件に対する節点のたわみを効果的に制御できる。¹²⁾

[特性B] ケーブル張力の与え方により、作用荷重の分担率をケーブルとトラスの間で調整できる。^{10) 11)}

[特性C] すべての節点のたわみを0に近く制御したとき、吊橋に類似した機構が出現する。^{4) 5)}

これらの力学特性を検証する目的でモデル実験を行った。実験装置を Fig.2～Fig.6 に示す。このモデルはパラボラトラス機構に関する基礎的な実験を目的としたもので、実橋レベルとの相似性を考えたものではない。Fig.4, Fig.6 に示すような、剛度の高い鋼製のフレームにトラスの支点を設け、Fig.2 のような構造に組み立てる。トラス本体には制御装置、載荷装置、計測装置を取りつける。詳細を以下に述べる。

1) トラス構： 左右対称形状で、スパン長5000mm、中央高400mm、端部高800mmである。上弦材は節点[2], [8], [14]を通る放物線上に、下弦材は水平線上に配置する(Fig.2)。トラス部材はすべて同一断面のアルミ合金製溝型材(JIS 4100 6063-T5 20×20×2mm)である。Fig.3 に上部格点部[4] (および[12])の構造を示す。

厚さ9mmの2枚の鋼板を平行に置き、3本の組立ボルトと1本の節点ボルトで完全に結合する。格点部では前後に平行に置かれた鋼板にトラスの部材端を2本のボルトで固定する。これによって前後2面のトラス構面が形成される。

この実験装置では、ケーブルの張力および節点荷重を前後2面のトラス構面に均等に作用させる。よって数値解析上は、2つのトラス構面を一体化した平面トラスとして解析する。系の節点座標の実測値を Table 1 に示す。格点部は剛体とみなしてトラスは剛節構造と考える。トラス部材の長さは、部材が結合する節点間の距離から、格点部の鋼板上で部材が固定されている長さを差し引いたものとする。計算に用いる部材長を Table 2 に示す。トラス構の4ヵ所の支点[1], [2], [13], [14]は Fig.4, Fig.6 に示すように、外枠のフレームの上に設置する。数値解析ではフレームの弾性変形を考慮する。

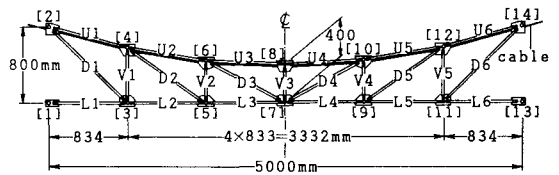


Fig.2 Configuration of Hybrid Parabola Truss System

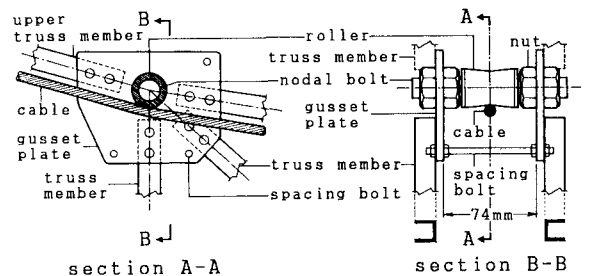


Fig.3 Details of Upper Panel Point [4], [12]

Table 1 Coordinates of Truss Nodal Points
([1]:origin, x:horizontal,z:vertical axes)

No.	x (mm)	z (mm)	No.	x (mm)	z (mm)
[1]	0.0	0.0	[2]	-2.0	798.3
[3]	834.5	-0.6	[4]	842.0	579.6
[5]	1663.9	-0.8	[6]	1672.4	447.0
[7]	2497.5	-1.6	[8]	2505.9	399.3
[9]	3331.0	0.2	[10]	3336.4	446.0
[11]	4162.9	2.7	[12]	4165.8	581.2
[13]	4997.4	5.2	[14]	4997.4	805.2

Table 2 Effective Length of Truss Members
for Numerical Analysis (mm)

upper	U1	U2	U3	U4	U5	U6
chord	700	710	700	700	710	700
diag-	D1	D2	D3	D4	D5	D6
onal	985	845	770	770	845	985
lower	L1	L2	L3	L4	L5	L6
chord	685	700	700	700	700	685
ver-	V1	V2	V3	V4	V5	
tical	440	310	270	310	400	

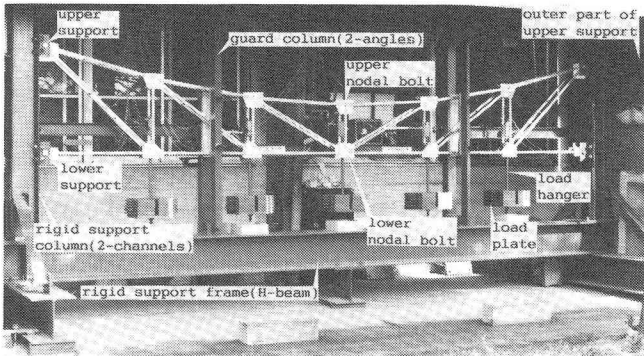


Fig.4 Entire Photograph of Parabola Truss Experiment

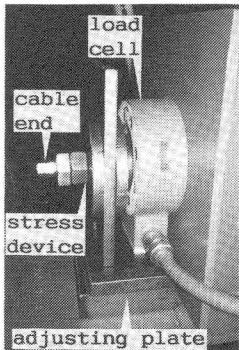


Fig.5 Load Cell and Cable End Device

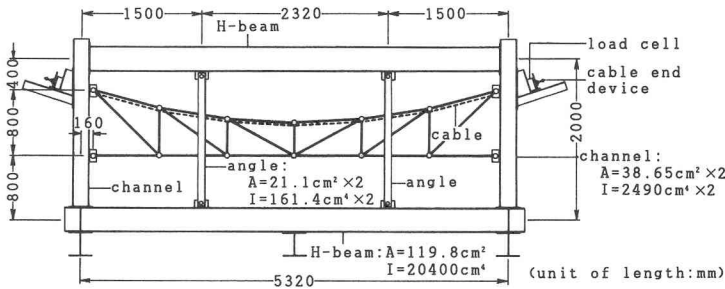


Fig.6 Dimensions of Outer Support Frame for Numerical Analysis

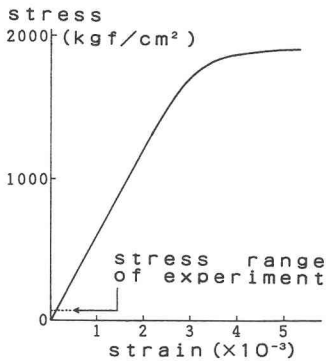


Fig.7 Stress-Strain Diagram of Truss Member (Made of Aluminum Alloy)

2) 制御機構： 1本のケーブル(ステンレス製ワイヤロープ: 直径 6mm, 断面積 0.22cm², 破断張力 2000kgf)を上弦材と平行に、Fig.3 に示すように取り付ける。節点には摩擦を減ずるためにローラを設け、ケーブルはローラの下側を通す。ケーブルの両端部は上部の支点に固定される。この支点部においてケーブル端のスクリューを回転するとケーブルの長さが調整され、所定の張力が発生する。Fig.5 は、ケーブル端部のスクリュー装置と張力検出用のロードセルを取り付けた上部支点の一部を示す。

実験モデルに対する理論計算において、ケーブルと節点ボルトの間の摩擦力を無視する場合は、ケーブルに発生する張力はすべてのパネルにわたって均等であると考えられる。摩擦抵抗などを考慮する場合は、各パネルの張力を節点摩擦による抵抗分だけ修正する。ケーブルの張力は節点に作用する集中荷重に変換する。

3) 載荷装置： この実験では、トラス構の下部節点に鉛直方向の荷重を作用させる。Fig.4 に様な載荷状態の写真を示す。載荷用ハンガーを下部節点のボルトに吊り下げ、所定の荷重条件に応じてこれに荷重板を載せる。数値解析における節点荷重は載荷用ハンガーと荷重板の重量の合計となる。

4) 外枠フレーム： トラスの支点とケーブルの緊張装置を設置するための外枠フレームは、水平の梁と鉛直の柱で構成する (Figs.4,6)。 $A=119.8\text{cm}^2, I=20400\text{cm}^4$ の H 型鋼を上下の梁とし、 $A=38.65\text{cm}^2, I=2490\text{cm}^4$ の溝型鋼を両側の柱に用いる。梁と柱はガセットプレートを通じて高張力ボルトで剛結する。さらに実験中の面外座屈に対する安全策として $A=21.1\text{cm}^2, I=161.4\text{cm}^4$ の山型鋼を設置する。数値解析においては外枠フレームの弾性変形を考える。計算に必要な断面数値を Fig.6 に示す。溝型鋼と山型鋼は上下の梁を裏表からはさむように配置されるので、これらの断面に関する数値はそれぞれ 2 倍する。

5) 計測機構： 下部節点のたわみの検出にはダイヤルゲージ (SDP-50C, 東京測機) を、トラス部材のひずみの検出にはひずみゲージ (KFG-5-120-C1-23L5M2R, 共和電業) を用いる。2 枚のひずみゲージを個々のトラス部材の腹部に対称的に貼り付ける。実験中の温度変化を監視するために、熱電対をトラス部材と外枠フレームに貼り付ける。ケーブルの両端部には張力検出用のロードセル (LUK-5TBS, 共和電業) をセットする。これらの計測要素で検出されるすべての信号はスイッチボックス (TDS-302, 東京測機) で記録され、コンピュータによって所定の数値に変換される。

6) 弾性常数： 外枠フレームはすべて構造用鋼材であるため、縦弾性係数は $2 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ とする。トラス部材はアルミ合金である。縦弾性常数を求めるためにトラス部材から切り出した 8 個のテストピースで引張試験を行なった。Fig.7 はこの試験で得られた応力ひずみ曲線である。試験データを最小二乗法で処理して、トラス部材の縦弾性係数を $6 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とした。

7) 温度変化の検討： トラス部材と外枠フレームの材質の差により、実験結果は温度変化に大きく影響を受けることが予備実験で判明した。温度変化の影響を避けるために、本実験は深夜に温度変化幅を 1°C 以内に制御した状態で行なった。よって数値解析においては温度変化に対する補正を省略できる。

5 実験結果および考察

バラボラトラスの理論解析で得られている主要な力学特性 A, B, C (前章) を検証するために、この実験はケーブル張力と節点荷重を種々の状態に組み合わせた各種の荷重条件 (Table 3: ①, ②, ③, ..., ⑮) の下で行なった。実験結果を Fig.8 に示す。この図は横軸にケーブル張力を、縦軸には下弦材中央節点 [7] のたわみ、上弦材 (U1)、下弦材 (L1)、斜材 (D1)、鉛直材 (V1) の部材力をとっている。それぞれの線グラフ上の各点は、同一の荷重条件に関する実験を、異なる日時に 5 回再現して計測した結果を平均してプロットしたものである。なお、Table 3 の各荷重条件を前章で述べた解析モデルに与えて計算した理論解析値は、Fig.11 に示す部分を除いてそのほとんどが Fig.8 (a), (b), (c) の各実験結果の線グラフ上に並ぶので省略した。

Fig.8 の一部について、実験で得られたデータの詳細を Fig.9 と Fig.10 に示す。図中の丸印は上記 5 回の実験における個々の計測値をプロットしたもの、線グラフはそれらの平均値を直線で結んだものである。

5.1 構造特性の実験的検討と考察

1) 初期条件 ([①] は、Fig.8 の各グラフ上の点①の位置に関する説明を意味する。以下同様) 実験モデルの自重のみの状態において、計測系の記録装置の全データを 0 にセットする (Fig.8 (a), (b), (c))。

2) プレストレス導入の検討 [①②③④]： 節点荷重は作用させずに、ケーブルの張力のみを 0kgf から 500kgf まで漸増させる。これはトラス構造物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。Fig.8 (a), (b), (c) の各グラフ上で、区間①→④にプロットした点は、ケーブルの張力を 100kgf ずつ増加させ

て収録した実験データを平均したものである。各グラフから、トラスの部材力および節点たわみはケーブル張力と線形的な関係にあることが分かる。ケーブル張力によって下弦材節点は上方へ引き上げられる。

Table 3 Procedure of Parabola Truss Experiment under Cable Stressing and Nodal Loading

No.	cable force (kgf)	nodal vertical load (kgf)					No.	cable force (kgf)	nodal vertical load (kgf)				
		[3]	[5]	[7]	[9]	[11]			[3]	[5]	[7]	[9]	[11]
①	(0)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	⑧	[980]	162.4	162.5	162.5	162.6	162.6
②	(100)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		[974]	141.1	141.2	141.2	141.3	141.3
③	(400)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		[968]	119.8	119.9	119.9	120.0	120.0
④	(500)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		[962]	98.5	98.6	98.6	98.7	98.7
	[525]	54.3	54.4	54.4	54.5	54.5	⑨	(800)	98.5	98.6	98.6	98.7	98.7
⑤	[540]	98.5	98.6	98.6	98.7	98.7	⑩	(500)	98.5	98.6	98.6	98.7	98.7
⑥	(700)	98.5	98.6	98.6	98.7	98.7	⑪	{533}	54.3	54.4	54.4	54.5	54.5
	(900)	98.5	98.6	98.6	98.7	98.7	⑫	(400)	54.3	54.4	54.4	54.5	54.5
⑦	{965}	98.5	98.6	98.6	98.7	98.7	⑬	(100)	54.3	54.4	54.4	54.5	54.5
	[971]	119.8	119.9	119.9	120.0	120.0	⑭	(0)	54.3	54.4	54.4	54.5	54.5
	[974]	141.1	141.2	141.2	141.3	141.3	⑮	(0)	37.9	38.0	38.0	38.1	38.1

Notes: In this table, several notes are given as follows:

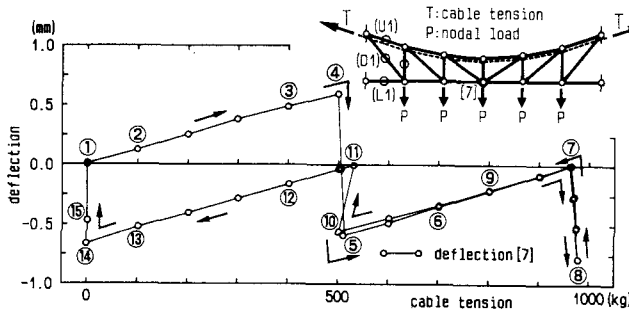
- 1) The symbols ①, ②, ③, ... correspond with those shown in Fig.8.
- 2) The cable force indicates averaged value of forces measured by load cells attached to both ends of the cable (see Fig.5).
- 3) The nodal vertical loads applied to lower panel points are not rigorously uniform.
- 4) There are three states of the cable force. They are classified by (), [], { } as follows:
 (700): Cable tension generated by operation of the cable end stressing device (see Fig.5).
 [525]: Under the latest cable stressing condition (in this case, ④:500kgf), nodal loads are applied. Consequently, the cable force rises. [525] is the cable force after the loading.
 {965}: Under the given nodal loading condition, the cable force is controlled until the deflection of the nodal point [7] vanishes. {965} is the cable force measured at that time.

3) プレストレス状態での載荷 [④⑤]: ケーブル張力の導入を500kgfで止め、すべての下弦材節点[3], [5], [7], [9], [11]に様に鉛直荷重を2段階(初回 54.4kgf, 次回 98.6kgf)で載荷する。この場合の系の挙動は区間④→⑤のグラフに見るように線形性を示す。段階的載荷によるケーブル張力の増分は(25kgf, 40kgf)である。これに対してトラス部材力の増分は大きく、例えば上弦材(U1)では(140kgf, 240kgf)である。

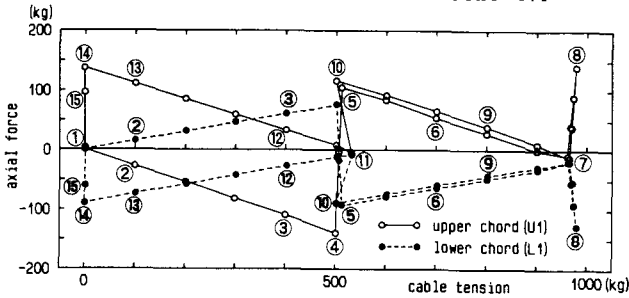
4) 制御機能の検証 [⑤⑥⑦]: ここでケーブル張力の調整によるトラスのたわみと部材力の調整の可能性を検証する。すべての下弦材節点に様な鉛直荷重(98.6kgf)を作用させた状態で、ケーブルの緊張力を徐々に増加させると、各図(a), (b), (c)に見るように、ケーブル張力の増加に伴って、節点たわみとトラスの各部材力は線形的に変化していく。すなわちここに前記の特性B「ケーブル張力の与え方により、作用荷重の分担率をケーブルとトラスの間で調整できること」が示されている。この場合、ケーブル張力の増加に伴って、上弦材、下弦材、斜材の部材力は線形的に減少するのに対して、鉛直材の部材力のみが線形的に増加していく点に注目すべきである。この現象は、ケーブル張力を変化させることによって、トラス構造物とケーブル構造物との中間的な構造系が出現していることを意味する。

5) 吊橋類似機構の検証 [⑦]: 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 Fig.8に示す⑦の各点である。これにより前記の特性A「ケーブル張力を調整して、種々の荷重条件に対する節点のたわみを効果的に制御できること」が実証された。注目すべき現象は、斜材(D1)、上弦材(U1)、下弦材(L1)の各部材力はほとんど0となるのに対して、鉛直材(V1)の軸力は節点荷重(98.6kgf)とほぼ等しい大きさを示していることである。これは下部節点荷重が鉛直材を通じてケーブルに直接伝達していること、すなわち前記の特性C「トラスとケーブルによって吊橋に類似した機構が得られること」を証明するものである。ただし、これまでに検討してきた数値解析においても、ケーブル張力の調整によってすべての節点のたわみを一様に0に制御することは無理であった。^{10) 11) 12)}

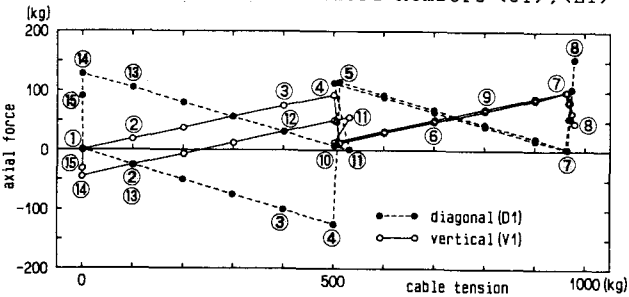
6) 活荷重載荷の検討 [⑦⑧⑦]: 上記 5) の特性を利用した吊橋類似機構をもつトラス構造物を想定して、自重をケーブルと鉛直材に負担させた場合、この構造系がその後に作用する活荷重等の外力に対してどのような挙動を示すかを検討する。実験では節点[7]のたわみが0に制御された状態から節点荷重を段階的に162.5kgfまで増加し、そこからまた出発時の状態まで段階的に減少させた。この反復載荷実験過程のグラフにおいても、ケーブル張力とトラスの状態ベクトルの間には線形性が見られる。



(a) Deflection of Nodal Point [7]



(b) Member Force of Chord Members (U1), (L1)



(c) Member Force of Web Members (D1), (V1)

Fig.8 Static Response between Cable Tension and State Vector of Trussed Frame (Experimental Result)

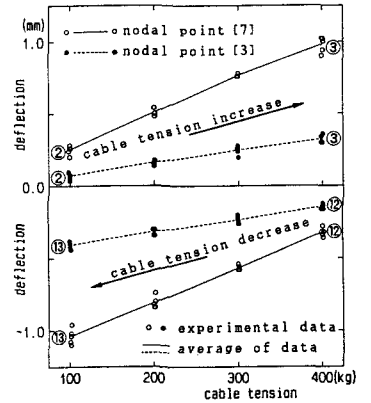


Fig.9 Data Scattering and Line Graph by Averaged Value (Deflection of Lower Nodes)

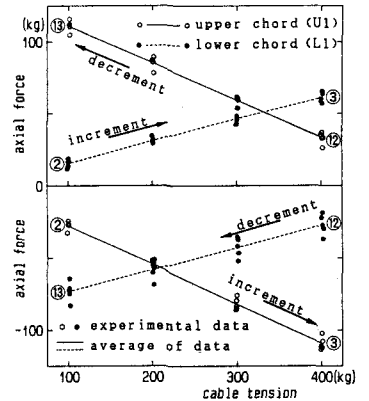


Fig.10 Data Scattering and Line Graph by Averaged Value (Axial Force of Chord Members)

ここで、上弦材と平行に配置した実験モデルのケーブルを緊張した場合、すべてのパネルで等しい張力を発生するものと仮定して、ケーブルに張力(T)を発生させたとき、張力が上弦材節点に及ぼす力をTable 1に示した実験モデルの形状から計算してみると、節点[4] (鉛直向上:0.0926T, 水平向右:0.0195T), 以下同様に[6] (0.1006T, 0.0109T), [8] (0.1132T, 0), [10] (0.1048T, -0.0114T), [12] (0.0992T, -0.0214T) となる。ケーブルの緊張力が系全体に与える鉛直上方向の力は: 0.5104T となる。これを用いて、Table 3 のグラフの⑤⑦⑧の荷重状態についてつぎの計算ができる。百分率は全荷重に対するケーブルとトラスの分担率である。

- ⑤の状態： 全節点荷重 493.1kgf, ケーブル負担荷重 275.6kgf (56%), トラスの負担荷重 217.5kgf (44%)
 ⑦の状態： 全節点荷重 493.1kgf, ケーブル負担荷重 492.5kgf (100%), トラスの負担荷重 0.6kgf (0%)
 ⑧の状態： 全節点荷重 812.6kgf, ケーブル負担荷重 500.2kgf (62%), トラスの負担荷重 312.4kgf (38%)

これより、ケーブル張力の導入後における外力の増分に対しては、張力が高いほどトラスの荷重分担率が軽減されることが分かる。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。³⁾ またFig. 8 の各グラフにおいて直線部⑦→⑧と直線部④→⑤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 (⑦⑧) のほうが若干緩い勾配を示すのは、以上のような理由による。

7) プレストレス低下の検討 [⑦⑨⑩]: 下弦材節点に一樣に荷重 (98.6kgf) を作用させた状態で、ケーブル張力を徐々に 500kgf まで下げる。どの図においても区間⑦⑨⑩のグラフは、区間⑤⑥⑦のグラフとほぼ一致する。このことは、プレストレスの低下に伴って節点たわみとトラスの部材力 (鉛直材以外の) が線形的に増加することを意味する。ただし上弦材の部材力に関しては区間⑦⑨⑩と区間⑤⑥⑦の差が大きい。これは主として、本実験装置の節点ローラーとケーブルの間の摩擦の影響によるものと考えられる。

8) 制御機能の再検証 [⑩⑪]: 一樣節点荷重 (54.4kgf) の下でケーブルを緊張して節点 [7] のたわみを 0 に調整した。上記 5) と同様な考察がこの段階に対してもなされる。

9) プレストレス低下の再検討 [⑪⑫⑬⑭]: ケーブル張力を徐々に 0 まで下げる。上記 7) と同様の考察ができる。区間⑪⑫⑬⑭のグラフは区間①②③④のグラフとほぼ平行である。

10) プレストレスのない系の検討 [⑭⑮⑯]: ケーブル張力が 0 の状態で節点荷重を Table 3 に示すように 0 kgf まで 3 段階で減少させると、各グラフともに縦軸に平行な直線を描く。

5・2 ケーブル張力の伝達に対する節点抵抗に関する近似的検討

前述のように、Fig. 8 の上弦材の部材力のグラフは同一の荷重条件に対して、ケーブル張力の漸増区間⑤⑥⑦と漸減区間⑦⑨⑩とが一致しない。この現象の要因のひとつとして節点抵抗が考えられる。すなわちFig. 3 のようにケーブルを節点ローラーの下を通過させているために、張力調整によって生ずるケーブルの伸縮が節点部の摩擦等による抵抗のために妨げられ、隣接パネルへ張力がスムーズに伝わらないことが考えられる。これを検討するためには各パネルごとにケーブルの張力を計測すればよい。しかし今回の実験装置では、トラスの上部支点の位置でケーブル端の張力を検出することができるのみである。よって近似的な検討手法ではあるが、次のような簡単な実験を試みた。トラスの節点荷重は98.6kgf (Table 3) とした。

- a) 左側の緊張装置のみを操作してケーブル端張力を100kgfずつ漸増したのち漸減して初期状態にもどす。
 b) 右側の緊張装置のみを操作してケーブル端張力を100kgfずつ漸増したのち漸減して初期状態にもどす。
 Table 4 にこの実験で得られたケーブルの左右両端の緊張力の計測値を示す。これより次の特性がわかる。

- 1) ケーブルの緊張段階においては、緊張操作を行なう側のケーブル端張力是他端の張力よりも高い。
- 2) ケーブルの弛緩段階においては、弛緩操作を行なう側のケーブル端張力是他端の張力よりも低い。
- 3) 緊張 (弛緩) の各段階において、操作側の張力に対して他端の張力は 4~9 % 低く (高く) なる。

Table 4 Left and Right End Force of Cable Stressed Unilaterally (unit of tension: kgf)

T_L = cable tension at the left end T_R = cable tension at the right end

Stressing at the Left End	T_L	101	200	300	401	501	601	501	402	302	201	101
	T_R	97	190	286	382	475	559	531	431	324	215	108
	T_R/T_L	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.93	1.06	1.07	1.07	1.07	1.08
Stressing at the Right End	T_L	93	185	278	376	459	564	530	425	320	214	106
	T_R	102	200	300	401	500	599	501	401	300	201	101
	T_L/T_R	0.91	0.93	0.93	0.94	0.92	0.94	1.06	1.06	1.07	1.06	1.05

これらの特性を総合的に考察して、節点抵抗に関する近似解析をつぎの仮定の下で検討してみる。

仮定1) ケーブルの両端の張力の差を、緊張（弛緩）操作側の張力の 5% と見積る。

仮定2) ケーブル張力の節点での損失は、個々の節点において等しい量だけ発生するものと仮定する。

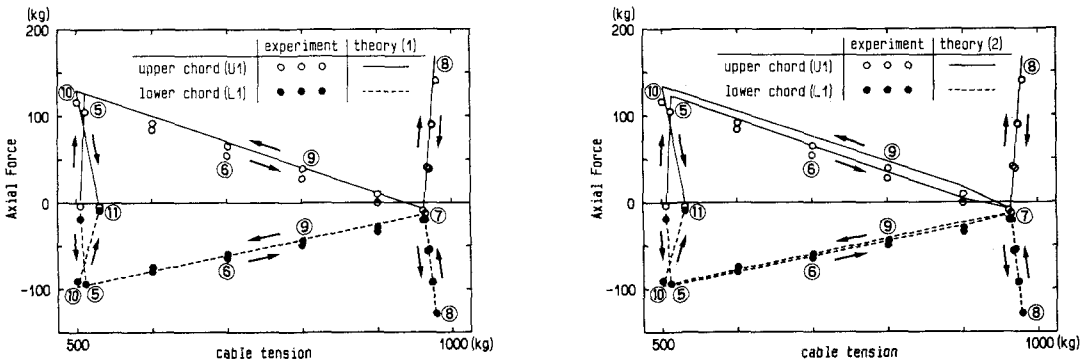
この実験に用いたトラス系では、ケーブルが通過する節点が5ヵ所ある。よってひとつの節点ををさむ両側のケーブル張力の比を； $(1 - 0.05)^{1/5} \approx 0.99$, or $(1 + 0.05)^{1/5} \approx 1.01$. と見積る。これより数値解析でケーブル張力の摩擦損失の影響を考慮する場合の基準をつぎのように設定する。

ケーブル緊張段階： $T_1 = T_6 = T$, $T_2 = T_5 = 0.99 \times T$, $T_3 = T_4 = 0.99^2 \times T$

ケーブル弛緩段階： $T_1 = T_6 = T$, $T_2 = T_5 = 1.01 \times T$, $T_3 = T_4 = 1.01^2 \times T$

ここに T_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) はパネル (i) のケーブル張力、 T はロードセルによって検出されたケーブル端の張力である。なおこの実験においては、左右両端のケーブル張力が同時に T となるように調整しながら計測を行なっている。

Fig.11 (a), (b) に Fig.8 (b) の一部を示す。実験結果は丸印のプロットで、数値解析結果は線グラフで示した。線グラフについては (a) 図は節点抵抗を無視した場合、(b) 図は節点抵抗を考慮した場合である。両図とも、⑦と⑧の間では節点载荷の際にケーブルは緊張もしくは弛緩されないために、実験結果と解析結果は明確に整合している。一方、⑦と⑩の間における実験結果は、ケーブルの緊張段階と弛緩段階の間でかなりのくい違いを示している。節点抵抗によるケーブル張力の損失を無視した (a) 図の解析ではこの現象を説明できない。これに対して節点においてケーブル張力が変動することを仮定した (b) 図の線グラフは、ケーブルの緊張段階と弛緩段階の間で生じた実験結果のくい違い現象と類似の傾向を示している。なおこれは上記の仮定に基づく近似的な数値解析であり、詳細な検討は今後の課題としたい。



(a) Analysis 1 (Resistance is not Considered) (b) Analysis 2 (Nodal Resistance is Considered)

Fig.11 Discrepancy of Truss Member Force between Incremental and Decremental Stages of Cable Stressing, and Comparison with Analytical Result

5.3 移動荷重に関する検討

構造物の自重を、ケーブルとトラスの鉛直材で形成される吊橋に類似した機構によって負担させた場合、この構造系が移動荷重に対してどのような応答を示すかを検討した。実験と解析はつぎの手順で行った。なお、この場合の数値解析では上記のケーブル張力の節点抵抗による損失は考慮していない。

1) 固定荷重（実際の構造物の自重に相当するもの）として、下弦材の各節点 [3], [5], [7], [9], [11] に一様に鉛直荷重 54.4kgf を載荷する。

2) この荷重条件の下でケーブル緊張装置を調整して、節点 [7] のたわみを 0 に調整する。この操作によってケーブルの張力は 532kgf に達した。ケーブル張力はこれ以後は調整しない。

3) 1 個の移動荷重 (44.2kgf) を交通荷重と仮定し、下弦材節点に順次 1 点ずつ載荷しながら計測を行う。

この実験は6回反復し、計測データの平均値を Fig.12 に丸印でプロットした。線グラフは数値解析によるものである。数値解析においては、上記 1) の固定荷重の下でのケーブルの初期張力を 532kgf、ケーブルの弾性係数は 1.5×10^6 kgf/cm² と仮定した。

Fig.12の横座標は、移動する集中荷重が作用する節点の位置を示す。移動荷重の作用位置に対応させて節点 [5] のたわみ、トラス部材 (U2) (D2) の軸力、およびケーブルの両端で計測したケーブル張力をプロットした。また線グラフは数値解析によるものである。

実験結果と数値解析結果は傾向的には良く一致している。ただし節点たわみについては両者の差が大きい。これはケーブルの弾性係数の与え方によるものである。今後の数値解析ではケーブルの弾性係数を実測して用いる必要がある。

Fig.12 から次の考察がなされる。

考察 1) 移動荷重によるケーブル張力の変動は、滑らかな連続性を示し、その変動量もわずかである (Fig.12 (c), (d))。

考察 2) トラス節点のたわみは、移動荷重がその節点に作用したとき最大値となる。荷重がその節点から遠ざかるにつれてかなり急速に減少する。Fig.12 (a) の線グラフには当該節点を除き若干連続性が見られる。

考察 3) トラスの部材力は、移動荷重がその部材に近づくにつれて急激な増加を示し、荷重が部材から遠い節点に移動すると非常に小さくなる。Fig.12 (b) の線グラフはかなり複雑な変動を示す。

この実験結果に見るように、構造物の自重の大部分をケーブルに負担させ、トラスの部材力が非常に小さくなるような構造物を期待しても、活荷重の作用する位置によってトラス部材にはかなりの応力が生ずる。これは設計にあたって十分注意すべき事項である。^{5) 11) 12)}

5.4 実験装置の外枠フレームの変形による支点変位について

実験に用いた外枠フレーム (Fig.6) の変形によって生ずる支点変位の影響を検討するため、この実験で起こり得る最大荷重条件、すなわち各下弦材節点に 200kgf の鉛直荷重を作用させ、ケーブルは 1000kgf の張力で緊張するという条件の下で数値計算を試みた。解析の結果を Table 5 に示す。上部支点 [2] と下部支点 [1] の鉛直変位 dZ は、トラス構の各節点のたわみに比べて 2～3 桁小さい。よって節点のたわみに関しては外枠フレームの変形の影響は無視できる。

Table 5 Nodal Displacement (mm) of Experimental Frame Under the Heaviest Loading Condition
Left-Half Part of Apparatus ([1] = lower support, [2] = upper support of the truss frame)
(dX = horizontal displacement [(+): rightward], dZ = vertical displacement [(+): upward])

	No.	dX	dZ	No.	dX	dZ	No.	dX	dZ	No.	dX	dZ
upper node	[2]	0.031	-0.005	[4]	-0.077	-0.385	[6]	-0.030	-0.861	[8]	0.000	-1.010
lower node	[1]	0.016	-0.005	[3]	-0.084	-0.392	[5]	-0.091	-0.877	[7]	0.000	-1.032

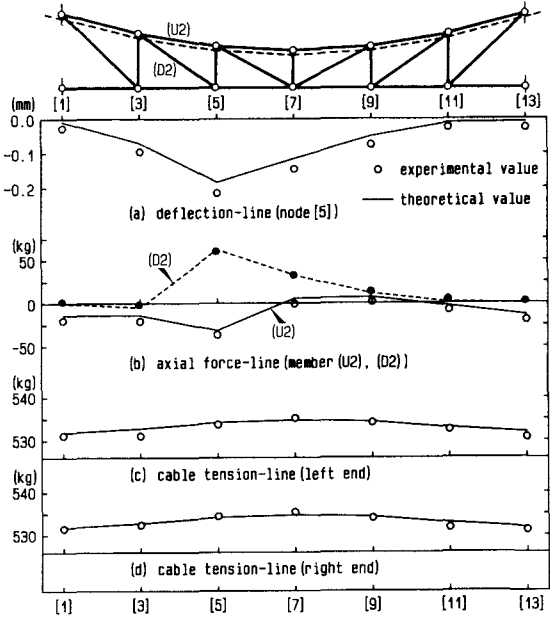


Fig.12 Static Behavior of Pre-Stressed Hybrid Parabola Truss Subjected to Moving Load

6 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と平行して制御用のケーブルを組み込み、ケーブルの緊張力を調整することによってトラスの部材力や節点変位を調整することができる。

これまでに行なってきたトラス構造物の数値解析^{1) 2) 3) 4)}によって見いだされたこのような力学特性を実験によって検証することを目的として、基礎的な室内模型実験を試みた。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、トラス構とケーブルの相互作用の機構を明確に証明することができた。

実験で証明されたハイブリッド・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り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く。そして他のトラス部材の軸力は無視できるほどに小さくなる。ただしこれは、鉛直荷重が各節点にはば一様に作用する場合について言えることである。
- 3) 各節点にはば一様に作用する鉛直荷重は、そのほとんどをケーブルに負担させることができる。ただしこれに移動荷重のような非対称荷重が追加的に作用すると、節点たわみにも、トラス部材力にも変動が生ずる。この場合の部材力の変動は、ケーブル張力の緩慢な変動に比べて増減が顕著である。

今回の実験装置では、上弦材の節点の下を通過するケーブルが節点部から受ける抵抗力を検出する手段がなかったために、その影響の検討は近似的な推測にとどまった。この問題を解決するための構造方式と実験装置については現在検討中である。

参考文献

- 1) 吉澤孝和：ピアノ線によるトラス構造物の補強について，第20回橋梁構造工学研究発表会講演集，1973，pp. 177-184.
- 2) 吉澤孝和：高張力鋼線によるトラス構造物の静的応答の制御に関する基礎的研究，土論集，227号，1974，pp. 1-10.
- 3) 吉澤・渡辺：長大橋梁としてのVトラス橋及び斜張橋の静的応答調整の比較，JSCE中部講概集，1988，pp. 64-65
- 4) 吉澤・宮澤：パラトラス構造を応用した新形式の長大橋梁について，JSCE中部支部講概集，1991，pp. 100-101.
- 5) 吉澤・宮澤・土井：三径間パラ型トラス橋の形状選定に関する力学的考察，JSCE中部講概集，1992，pp. 28-29
- 6) 吉澤・宮澤・清水・吉川：トラスとケーブルを組み合わせた構造的効果に関する基礎実験と考察，同上，1992，pp. 6-7
- 7) 吉川・清水・吉澤・宮澤：ハイブリッド・パラボラ・トラス機構に関する実験と考察，JSCE中部講概集，1993，pp. 81-82
- 8) Belenja E. I.: Vorgespannte Metallkonstruktionen, VEB Verlag für Bauwesen, 1966, pp. 211-247.
- 9) Ferjencik P.: Czechoslovak Contribution in the Field of Prestressed Steel Structures, I. C. E., Vol. 2, No. 11, 1972, pp. 481-491.
- 10) 宮澤・吉澤：調整用 tendon を有する三径間連続トラス橋の静力学的性質，JSCE47回年講集，1992，pp. 1024-25
- 11) 宮澤・吉澤：上弦材にケーブルを組み込んだ単径間トラス橋の力学的特性，JSCE48回年講集，1993，1052-53.
- 12) 山田・吉澤：制御用 tendon を有する大径間屋根構造の豪雪荷重に対する静力学特性，同上，1993，pp. 1084-1085
- 13) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，丸善，1980.
- 14) 土木学会：座屈設計ガイドライン，技報堂，1987.
- 15) 石橋和美：鋼トラス橋の設計上の留意点，橋梁と基礎，93-8，1993，pp. 102-107.
- 16) 酒井勝昭：鋼トラス橋の架設，橋梁と基礎，93-8，1993，pp. 112-120.
- 17) 大塚久哲：超長大支間の斜張橋，橋梁と基礎，89-6，1989，pp. 34-40.
- 18) N. J. Gimsing; 西川和広訳：ケーブル支持橋梁の最近の発展および将来への展望，同上，87-5，1987，pp. 11-34.
- 19) 宮澤圭：トラスとケーブルを用いた複合構造の橋梁への応用，信州大学大学院工学研究科修士論文，1993，pp. 1-135.
- 20) 川田忠樹：吊橋の設計と施工，理工図書，1965.

(1993年9月17日受付)