

ハイブリッド・パラボラ・トラス構造の静的たわみ制御と破壊機構について

ON THE STATIC DEFLECTION CONTROL AND COLLAPSE MECHANISM OF HYBRID PARABOLA TRUSS SYSTEM

吉澤孝和* 山田貴男** 吉川薫*** 清水功雄****

Norikazu YOSHIKAWA, Takao YAMADA, Kaoru YOSHIKAWA and Isao SHIMIZU

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

** 信州大学大学院工学系研究科博士前期課程 (〒380 長野市若里500)

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

**** ㈱宮地鐵工所 技術開発部 次長 (〒103 東京都中央区小伝馬町15-18)

A new type structure called the hybrid parabola truss system is proposed. Purpose of this system is to control the deflection of large span roof subjected to heavy snow load. Nodal points of upper chord members are arranged on a parabolic curve. Cables are installed through the upper chords. When the cables are tensed, uplift forces are generated at the nodal points of upper chord. By this mechanism, nodal deflections and member forces of the truss can be controlled. Numerical analysis and indoor experiment are shown in this paper. First, static problems of the deflection control are discussed. Next, assuming a case that the control cable can not be actuated, collapse mechanism of the parabola-shaped-truss having no cable is discussed by consideration of material and geometrical nonlinear properties.

Key Words: hybrid parabola truss, deflection control, collapse mechanism

1 まえがき

ハイブリッド・パラボラ・トラスは、トラスの上弦材節点をひとつのパラボラ曲線上に配置し、上弦材の中に組み込んだケーブルを緊張して各節点に上向きの力を発生させ、系のたわみと部材力を調整することを目的とした構造である。筆者らはこれまでに、この機構を橋梁構造に応用することを想定して、水平な直線上に配置した下弦材の各節点に鉛直荷重を載荷する模型実験を行ってきた。実験では 1) トラスのたわみと部材力はケーブルの緊張力によって効果的に調整できること、2) 下弦材節点のたわみを 0 に近く調整した場合、節点荷重の大部分は鉛直材を経てケーブルに移行すること、3) 主構および床組等に相当する荷重をケーブルに負担させた状態で活荷重に相当する種々の荷重を下弦材節点上を移動させた場合、移動荷重は主としてトラスが負担し、ケーブル張力の変動はわずかであること、等の構造特性を知り得た。¹⁾

今回ここに報告するものは、上弦材節点載荷に対する系の制御機能と、強大な漸増荷重に対するトラス構造の崩壊機構に関する基礎的な検討の結果である。これらの検討は、ハイブリッド・パラボラ・トラス機構の利用法として、次のような場合を想定して行ったものである。

1) 大径間屋根トラスのたわみ制御

豪雪地帯においては、屋根上の積雪処理が重要な課題である。その対策として、a) 建物の耐雪化、b) 消融雪設備、c) 自然落雪、d) 雪おろし、等の手法がある。²⁾ 従来は、c) と d) の手法が主流であった。しかし、高所からの雪の落下による人身事故や物的な損壊のほか、地表に堆積した雪の運搬処理と貯雪場の確保に、巨額な費用の捻出を余儀なくされてきた。また、b) の手法では、融雪に要する熱源の供給にかなりの費用がかかることが難点である。

本文の内容は、a) の手法を比較的大径間の構造物に適用しようとするものである。冬期間に、雪の影響を受けない広大な空間を確保することは、豪雪地帯における都市の安全と諸機能を高め、市民生活を向上させる上で欠かせない課題である。すなわち、市民広場、運動競技場、マーケット、重要道路等をハイブリッド・パラボラ・トラス機構を用いて積雪から保護するという構想である。³⁾ 具体的には図 1 に示すようなパラボラ形状の屋根を諸施設の上に建設し、屋根上の積雪を地上に落下させずに支持し続ける。この方式を採用した場合、上記の c)、d) に見られるような問題は生じない。また、積極的に、屋根上の積雪を資源として活用することも考えられる。

豪雪荷重によって屋根のたわみが増大するにつれ、屋根を構成する構造材の変形も増し、終には継目の分離や屋根面の残留変形が生ずる。これによる漏水や屋根面の劣化を防ぐためには、雪荷重の増減に対して屋根のたわみを所定の制限値以内に抑えることが必要である。この場合、最大荷重に対するたわみを制限値以内に抑えるような方式を採用すると、積雪時以外は極めて無駄な設計となる。この観点から本文では、ハイブリッド・パラボラ・トラス機構を利用して、積雪荷重の状態に応じてトラスの節点たわみを制限値以内に保つようにケーブルの張力を調整する。これは一種のactive controlと言えるものであるが、対象とする外力は地震や風などの場合とは異なり、極めて緩慢に変動する雪荷重であるから、外力の検出に始まり制御力の調整に至るまで、静力学的な手法で十分対処することができる。⁴⁾

なお、このような機能を備えた構造物を実用化させるためには、本文に示すような力学的検討に加えて、積雪荷重または屋根たわみを検出して所定のケーブル張力を発生させる、計測制御システムの研究が必要である。これは今後の課題であるが、電気計測を利用した油圧サーボシステム等で対応できるものと考えられる。⁵⁾

よって当初はかなりの建設費を要したとしても、長年月の間には、上記の手法 b), c), d) よりも経済的なものとなるであろう。⁶⁾

2) トラス構造の破壊機構の検討

屋根トラスのたわみをケーブル張力で調整する場合、トラスの支点とケーブルのアンカーの強度は十分確保されなければならない。この条件は、以下の数値解析では常に成り立つものと仮定し、実験においても十分な剛度を有する支点構造を用いている。

この構造系について更に検討すべきことは、制御機構の故障などでケーブル張力の導入が不可能となった場合の構造特性である。すなわち制御不可能な状態の下で、長期間の豪雪が漸増荷重となってトラス構に作用した場合、この構造物の破壊機構を、解析および実験によって検討しておくことが必要である。

後述のように、本文に示すパラボラトラスは、鉛直荷重に対しては系の中の引張部材が主体となって抵抗する、いわゆる tension structure である。¹⁾ 圧縮部材の応力度は低く抑えられるため、局部座屈の危険は少ない。また、荷重の漸増と共に系の中に出現する各種の抵抗機構は、引張部材の組み合わせによって形成されていく。

この構造系の設計では、ケーブルの張力調整が完全に保障されるならば、自重と積雪荷重の大部分をケーブルに受け持たせ、トラスに関しては施工と維持管理に必要な最小断面を与えておくこともできる。しかし、ケーブルの故障でトラスに全荷重が作用してしまうような場合を想定すると、トラスのみの系が過大な荷重を受け大きく変形してしまうことがあっても、応力的には耐えられるようにトラス構造を設計しておけばよいと考える。

2 静的応答制御解析例

積雪荷重に対するハイブリッド・パラボラ・トラスの静的応答制御の可能性を、数値解析によって検討する。一般に積雪の形態は、積雪同士や他の物体との接触や滑動等の条件によってかなり複雑なものとなる。⁷⁾ 特に屋根上の積雪荷重は、屋根の形状やその向きなどによって日照や風向きが異なるために一層複雑なものとなり、耐雪型の屋根の設計では問題点のひとつとなっている。⁸⁾ しかし本研究では、積雪荷重は屋根上の各点に配置したセンサーを用いて検出できるものと考えている。検出されたひとつの雪荷重状態に対するトラスの静的応答制御の解析例を、以下の3種類の制御方式について図1に示す。図示のパラボラトラスは、左右両端部がそれぞれ上下の支点到剛結合され、支点是不動なものと考えて数値解析を行う。

制御方式1：全径間にわたり1本のケーブルを、上弦材の各節点の下側に接するように配置し、ケーブルの両端に緊張力Tを加えるものである。ケーブルは各上弦材の中で直線形状となるように支持され、各節点の位置で上向きに曲がる。これによりケーブルの張力は各節点にほぼ様な上向きの力の成分をつくりだす。

制御方式2：長さの異なる複数のケーブルを、支点部の緊張装置から上弦材節点の下側を通して延長し、所定の節点に結合するものである。制御条件に応じてケーブルごとに所定の張力を与えることができる。ある積雪荷重に対する制御に必要な各ケーブルの緊張力は、次の条件式と目的関数の下で、最適化理論を用いて決定する。⁹⁾

$$\text{条件式: } |\sum U_{ij} + \delta_i| \leq e \quad (1)$$

$$\text{目的関数: } \sum T_j \rightarrow \min. \quad (2)$$

ここに δ_i = 荷重によって生ずる上弦材節点 [i] のたわみ、 U_{ij} = ケーブル (j) の緊張力 T_j によって生ずる節点 [i] の鉛直上方への変位量、 e = 制限値である。

制御方式3：上弦材の各パネルごとに、個別に制御用のテンドンを組み込んだものである。与えられた積雪荷重に対して「トラスのみの系として計算した各パネルの上弦材の部材力に等しい張力を、当該パネルのテンドンに受け持たせる」という解析手順を反復することにより、系の節点たわみとトラスの部材力制御に必要な各パネルのテンドン張力を定めるものである。⁹⁾

図1の解析例に用いたトラスの外形は、20@5m=100mの径間長を有し、両端の上下支点間距離は14m、径間中央部のトラス高は2m、上弦材のサグは10m、下弦材のライズは2mである。トラス部材はすべて同一の断面形状とし、断面積は100cm²、断面二次モーメントは12100cm⁴、弾性係数は2.1X10⁶kgf/cm²、単位重量は7.85tf/m³である。ケーブルはすべての制御方式で同一のものをを用い、断面積、弾性係数、単位重量はそれぞれ、65cm²、2.0X10⁶kgf/cm²、7.83tf/m³である。屋根の骨組みを構成するトラス構は5m間隔に配置する。トラスとケーブルの自重のほか、屋根材は0.3tf/m²の自重を考慮した。雪荷重は0.3tf/m³として、各パネル上の積雪の深さを(a)図のように0, 1, 2, 3, 4, 5, 6mとした。

(b)図は制御方式1の概念図である。この方式による上記の積雪荷重に対する上弦材節点たわみの制御状況を(c)図に示す。実線は無制御(ケーブル張力0)の、点線はケーブルに446tfの緊張力を導入した場合のたわみである。パラボラトラスの構造的な原理から見て、この方式のような1本のケーブルのみによる制御は、一様分布またはそれに近い積雪荷重に対しては有効であるが、図に示したような不規則な荷重条件の下では、たわみ制御の不十分な部分も若干生じてくる。

(d)図は制御方式2の概念図である。この系は、左右の上部支点からそれぞれ4番目と7番目およびスパン中央の節点まで、合計6本の制御用のケーブルを延長して取りつけた系である。(a)図の積雪荷重に対するたわみ制御の結果を(e)図に点線で示す。制御の条件は、式(1)で $e=5\text{mm}$ とした。数値解析の結果、上弦材節点(屋根面)のたわみは $\pm 4\text{mm}$ 以下に制御された。この制御のために稼働されたケーブルは、(f)図の各パネル内のケーブル張力の合計の線グラフが示すように、スパン中央から左側の3本のケーブルのみで、右側の3本の張力は0である。

節点たわみ制御のみに注目した場合には、制御方式2は効果的である。しかしケーブルの緊張によってトラス部材に余分な負担をかけることになる。(f)、(g)図はそれぞれ上弦材、下弦材の軸力をパネルごとに棒グラフで示したものである。白棒はケーブル張力が0のときの、黒棒はケーブルに緊張を導入して、たわみ制御を行った後のトラスの軸力である。無制御の状態(Ⓙ、(j)、(k)図の白棒グラフのほうが見やすい)では、上弦材は左右の支点に近い部材ほど大きな引張力を発生し、スパンの中央部でわずかな圧縮力となる。下弦材はこれに対して正負が反転した様相を示すが、部材力の絶対値は上弦材の1/3程度である(Ⓙ両グラフの縦軸の目盛は異なっている)。

このような応力状態は、ケーブル張力の導入によって一変する。図示の制御例では、左側半径間のケーブルのみを緊張するために、緊張状態のケーブルを有する左側半径間の各パネルの上弦材の軸力は、無制御時の引張状態が逆転して制御後にはかなりの圧縮状態となる。そして右側半径間の各パネルの下弦材は圧縮状態から引張状態へと逆転する。このように、制御方式2はたわみ制御を主体としたものであるが、結果的にケーブルの緊張力はかなり高くなり、それがトラスの部材力を大きく変動させ、特に上弦材をかなり圧縮してしまうという好ましくない結果を生み出している。

(h)図は制御方式3の概念図である。制御前後のたわみ、上弦材軸力、下弦材軸力を(i)、(j)、(k)

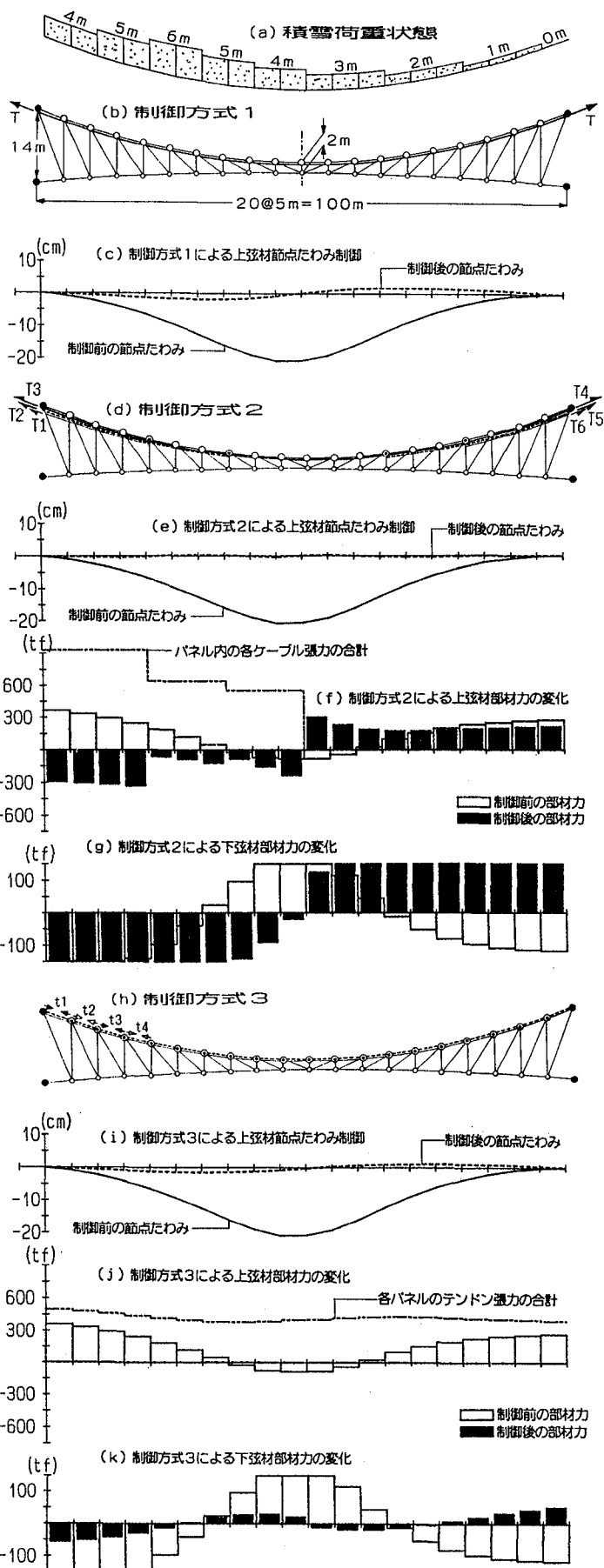


図1 数値解析による静的応答制御の検討(20パネル・100mパラボラトラス)

図に示す。たわみ制御は方式2よりも劣るが、方式1よりも良好である。また上弦材軸力はこの制御によってほとんど0となる。下弦材軸力には制御による正負の逆転も見られるが、その絶対値はいずれも制御前よりもかなり小さい。また、(j)図には各パネルにおけるテンソンの緊張力を示した。各パネル間で大きな張力差は生じない。張力の平均値は方式1とほぼ等しい。

3 静的応答制御実験

この実験は文献1で報告したものと同一の装置を用いて行った。詳細は文献1に記述してあるので、ここではその概要を簡潔に述べる。実験モデルの主要な寸法と部材記号および節点記号を図2に示す。以下の記述はこれらの記号に従う。トラス部材はアルミ合金製の溝型材(JIS 4100 6063-T5 20X20X2mm)を用いた。部材端は2本のボルトで節点部に結合する。

図3は上部節点の構造である。厚さ9mmの鋼板を用いて、図示のように2面トラスを組み立てる。1本の制御用ケーブルを、上部のそれぞれの節点のケーブル受けローラの下側を通し、実験用フレーム(図4)の左右の上部支点に設けた緊張装置につないで、制御に必要な緊張力を導入する。すなわちこの実験モデルは前記の制御方式1に相当するものである。制御用のケーブルは、直径6mm、断面積0.22cm²、破断張力2tfのステンレス製ワイヤロープである。

実験結果の検討におけるトラスの数値解析では、節点部は剛体とみなし、トラスは剛節構造と考える。そしてトラス部材の長さは、理論上の節点間の長さから、ガセットプレートの鋼板上で部材が固定されている部分の長さを差し引いたものとする。

図4は、トラスの支点とケーブルの緊張装置を設置するフレームである。図示のような鋼材を用いた剛節構造とし、数値解析においてはフレームの変形を考慮する。しかしその量はトラスの節点たわみよりも2～3桁小さい値なので、無視できる。¹⁾

図5は実験状況の写真である。上弦材節点に対する荷重は、上部節点のケーブル受けローラにハンガーを取り付け、それをトラス構の下方まで懸垂して下端に荷重用の鋼板を吊し、各種の荷重条件を作り出した。計測に関しては、節点たわみはダイヤルゲージで、トラス部材のひずみはひずみゲージで、部材とフレームの温度は熱電対で検出した。実験は温度変化が±1℃の下で行った。

実験は種々の場合について行ったが、ここに示すものは屋根面に一様に積もった豪雪が、日照条件の差で不均等に融けていく場合を想定したものである。

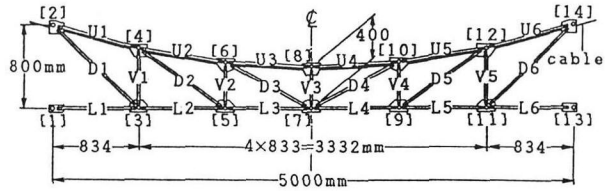


図2 実験用パラボラトラスの寸法と部材および節点記号

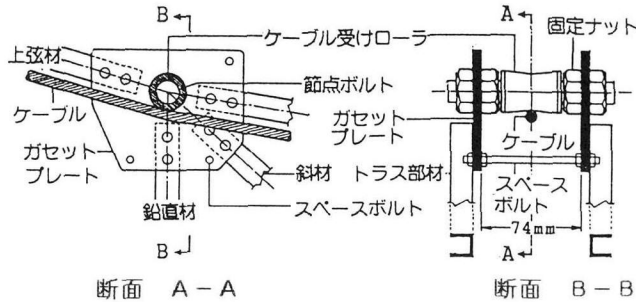


図3 上弦材節点部の構造と制御用ケーブルの関係

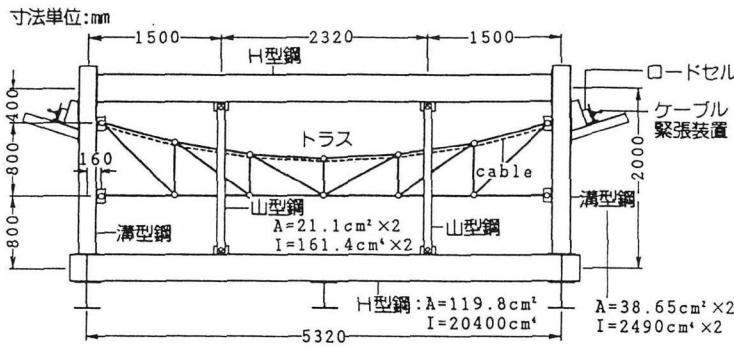


図4 実験用フレームの構造諸元とトラスの取り付け

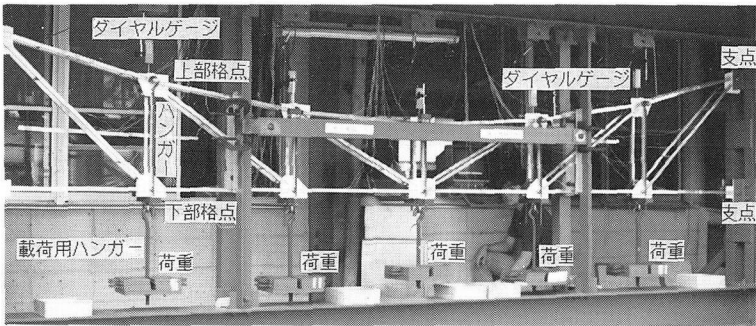


図5 静的応答制御実験状況 (荷重は重錘懸垂方式)

表1 上部節点に作用させた鉛直荷重

荷重状態	節点4	節点6	節点8	節点10	節点12
A点～B点	80kg	80kg	80kg	80kg	80kg
C点～D点	80kg	80kg	80kg	59kg	38kg
E点～F点	80kg	80kg	59kg	38kg	17kg
G点～H点	80kg	59kg	38kg	17kg	0kg
I・J・K点	59kg	38kg	17kg	0kg	0kg

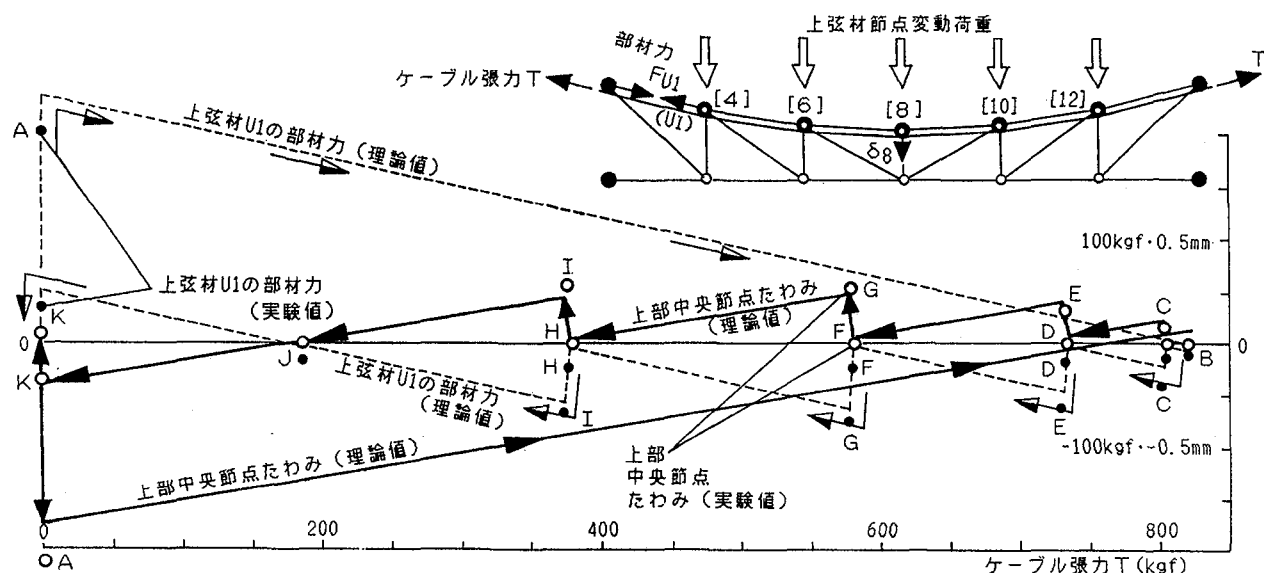


図6 上弦材節点における各種の荷重状態に対するケーブル張力調整によるたわみと部材力の制御(理論値・実験値)

この実験では、ケーブル張力による節点たわみ制御の可能性を、つぎの手順によって検討した。

- ①まず、ケーブルは弛緩状態のまま、すべての上部節点に一樣な鉛直荷重を作用させ、上弦材節点のたわみとトラスの部材力を検出する。
- ②この荷重状態の下でケーブルに張力を導入して、上部中央節点[8]のたわみ δ_8 を0に制御する。このときのケーブル張力とトラスの部材力の関係を検討する。
- ③上部節点荷重を表1に示すように不規則に変化させて節点たわみ δ_8 を検出し、これが0になるようにケーブル張力を再調整する。

なお、この構造系(屋根トラス)に対するたわみ制御は、たわみ面積(上弦材の原形と、制御後の上弦材の全体形状との間にはさまれる面積)が最小となるようにケーブル張力を調整するのが理想的である。^{3) 6)}ただし、ここに示した実験では、制御の可能性を検証することを目的としているため、実験に用いた種々の荷重条件に対してほぼ最大のたわみを示す上部中央節点[8]のたわみ δ_8 を0とすることを制御の目安とした。

荷重は上部節点[4], [6], [8], [10], [12]に鉛直方向に作用させて表1のように変化させる。表中の荷重状態のA, B, ..., K点は、図6のグラフの各点に対応する。

実験結果と数値解析結果の比較を図6に示す。線グラフは数値解析によるもので、各荷重状態と、そこで生じたたわみの制御のために導入したケーブル張力とを用いて理論的に計算したものである。数値解析ではトラス部材の縦弾性係数を $6 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とした。¹⁾ 図6において、白丸は上部中央節点[8]のたわみ、黒丸は上弦材U1の部材力を実測してプロットしたものである。

図6の横軸はケーブルの張力を、縦軸は上部中央節点のたわみ(下方たわみを負)と第1パネル上弦材の部

材力(引張力を正)を示す。最初にケーブル張力が0の状態では、上部の全節点に80kgf(一樣豪雪荷重を想定)を載荷すると、上弦材U1の部材力および上部中央節点[8]のたわみ δ_8 はA点のように応答する。この状態からケーブルを緊張すると、たわみ δ_8 も、上弦材U1の部材力も、ともに線形的に減少してB点に至る。B点ではたわみは0に制御されるが、部材力にはわずかな圧縮が生じている。両者とも理論値との間に若干の差が見られる。

図において、CからKまでの線グラフとプロット点は、不均等な融雪によって、パラボラトラスに作用する積雪荷重が、各節点において表1のように変動した場合の制御の可能性を検討したものである。ケーブル張力で制御されていた節点たわみは、荷重の減少によって、D→E, F→G, H→Iのように上方へのたわみを生じ、過剰制御状態となる。よってケーブル張力を漸減させ、E→F, G→H, I→Jのように上部中央節点たわみ δ_8 を0に導く。なお、この図において、BとCの区間では、わずかな除荷を2段階で行ったため、図形が複雑になっている。K点はケーブル張力を0とした状態である。

実験値と理論値の間には若干の差が生じているけれども挙動特性は一致している。なお、ここに図示したものは1回のみの実験結果である。過去に文献1で示した実験例の場合には、実験値は解析結果と良く一致している。ただしそれは5回にわたって反復した同一実験の結果を平均したものであり、その中でも個々の実験結果についてみると、図6と同程度の差を示すものもある。¹⁾

この実験では、制御方式1の制御機能を検討した。表1のような各種の非対称荷重に対しては、上部中央節点のたわみが常に最大値を示す。この最大たわみを0に保つことを制御の目的として、ケーブル張力を調整したところ、このような制御は十分可能であることが実験的に証明された。

4 複合非線形解析と考察

豪雪荷重に対して屋根のたわみを所定の制限値以内に制御しているとき、何らかの原因でケーブルの緊張力が低下または消失した場合、パラボラトラスは外力にどのように抵抗できるかを、数値解析で検討する。

強大な外力の下では、材料特性が非線形の応力-ひずみ領域に入ったり、座屈を起こす部材が生じてくる。また、部材のひずみの増大により、構造物自体も大きく変形する。よって、材料非線形解析と大変形解析の両者を考慮した複合非線形解析が必要となる。

本節の解析では簡単のため、ケーブルは系から除去する。トラス部材はすべてピン結合とし、荷重は節点のみに漸増的に作用させる。部材の応力ひずみ関係は材料試験で得られたもの(図9のA曲線)を用いる。

なお、次節に示す実験の荷重条件の下では、載荷節点につながる鉛直部材(V3)を除いては、圧縮部材の応力度はかなり低い。よって実験では、(V3)に対しては座屈防止対策として、剛度の十分高い鋼材(断面積 3cm^2 , $E=2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$, 降伏点 $\geq 2300 \text{kgf/cm}^2$ を前後両面に配置)を用いた。したがって数値解析でも(V3)のみはこの数値を用いる。圧縮部材の座屈は考慮しない。

ここで、解析手順の概要を述べる。^{9) 10)} F を系全体の部材力、 S を全部材の剛度、 Δ を全部材の伸縮量、 M を部材の応力状態に対応した補正項とすると、部材力 F は次式で与えられる。

$$F = S \Delta + M \quad (3)$$

Δ は載荷前後のトラスの節点座標の関数である。 L を荷重項とすると、系の力の釣り合い条件は

$$L - P^T \cdot [S \Delta + M] = 0 \quad (4)$$

となる。 P は各部材の方向余弦である。この式において L 以外の各マトリクスの要素は、いずれもトラスの変形前後の節点座標および変形後における各部材の応力度の関数である。そのために通常、式(4)の右辺は0とはならず、不釣り合い力を生ずる。これを消去する手法として、各節点に微小な補正変位 d を生じさせ、各部材の軸力と方向余弦を補正する。補正変位 d は次式で求められる。

$$d = [P^T S P]^{-1} \cdot [L - P^T \cdot [S \Delta + M]] \quad (5)$$

d が十分な微小量となるまでこの計算を反復する。

数値解析は、次節の実験結果との対比を考えて、図2の実験モデルについて行った。実験設備の関係上、この実験では上部中央節点[8]にのみ、漸増鉛直荷重を作用させている。数値解析でも荷重条件はこれと同一とした。漸増荷重の各段階で、トラス部材の応力レベルに対応させて解析式の S と M の要素を補正すると共に、系の形状変化に関して P の要素を補正しながら、式(5)の反復計算を行う。トラス部材の材料特性は、部材からJIS規格の試験片を切り出して、引張試験を行った結果を平均したものを、図9のA曲線のように区分線

形化して解析に導入する。⁹⁾ 数値解析では引張部材は降伏点をこえても、そのひずみが20%に達するまで抵抗できるものと仮定した。

圧縮部材の応力は、この荷重条件の下では図7の解析結果に見るように、かなり低い。また、載荷節点につながる圧縮部材(V3)のみは前述のように鋼材を用いている。よってこの解析では部材の座屈は考慮しない。

図7は、漸増荷重を横軸に、トラスの部材応力と載荷点のたわみを縦軸にとって、系の応答をグラフ化したものである。図8は、荷重の増加にともなうトラス部材の応力状態の変化と全体形状の変化を示す。以下これらの図を用いて漸増荷重に対する系の応答を観察する。この解析では次のような部材の応力状態が生じてくる。

弾性領域引張：部材のひずみが図9のA曲線のE点以下にあって引張力を生じている場合。

弾性領域圧縮：上と同様のひずみ領域で圧縮力の場合。

降伏進行引張：部材のひずみが図9のA曲線上のE~Y区間にあって引張力を生じている場合。

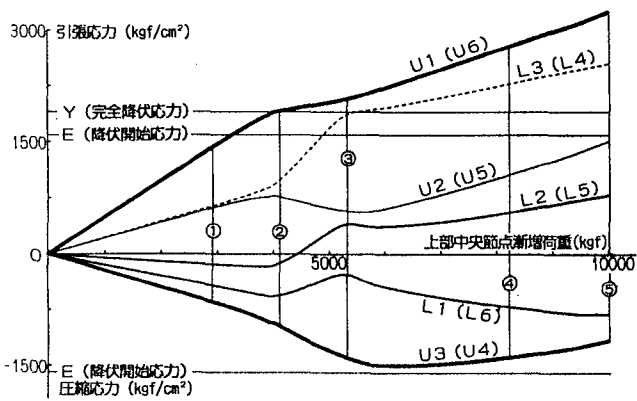
完全降伏引張：部材のひずみが図9のA曲線のY点以上でひずみ量0.2以下の領域で引張状態の場合。

図7におけるE線とY線は、図9のA曲線上のE点(応力ひずみ曲線上で降伏の開始する点)とY点(降伏時の曲線勾配の漸変領域が終り、その先の直線区間に入る点)の応力度を示す。図7(a), (b)の各部材の応力度のグラフでは、引張部材の応力度は、圧縮部材に比べて相対的に高く、E線とY線以上の領域に達する部材が多い。特にY線以上の完全降伏引張状態に入った部材の剛度は大きく低下するために、節点荷重の増分に対する荷重分担率が減ずるとともに、伸びの増分率は高くなる。このことが、図8に示すようなパラボラトラスの各種の抵抗機構を作り出し、節点たわみの増分に対しても大きく影響する。^{9) 10)} 以下、図7と図8に関して考察を述べる。

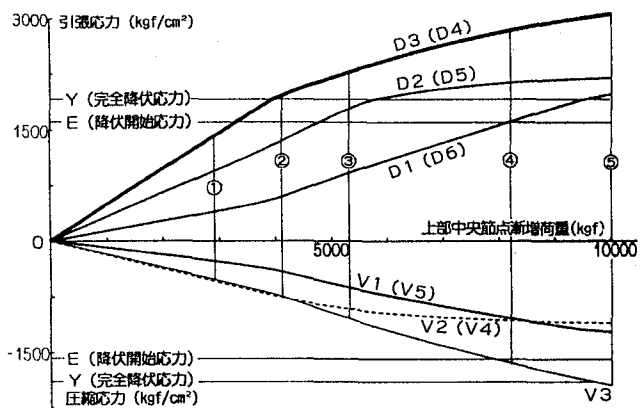
抵抗機構1 全部材の応力度が降伏開始点(E)以下の状態で、図7では①がこの領域におけるひとつの荷重値を示す。荷重増分に対する部材力の増分は、引張部材である斜材D3と上弦材U1が高い。系の中では(+U1+U2+D3+D4+U5+U6)という、引張部材を主体とした抵抗機構が形成されている。

抵抗機構2 図7の②では斜材D3と上弦材U1がともにY線をこえる。これによって節点たわみは急に増加する。図7の②から③に至る区間では、U1, U2, D3のグラフの勾配は低下する。特にU2が顕著である。これに対して、L1, L2, L3, D1, D2のグラフの勾配は引張側に増加し、U3, V1, V3の勾配は圧縮側に増加している。特にL2は、それまでの圧縮応力から引張応力状態へと変化している。系の中での抵抗機構として(D1+L2+L3+L4+L5+D6)が形成されている。

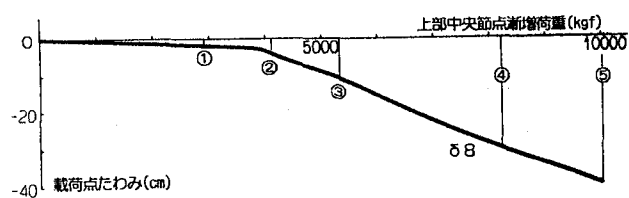
抵抗機構3・4・5 図7の③、④では、L3, D2がY線をこえる。この区間に見られる特徴はU1, U2, U3の勾配が引張側に漸増し、D1, L2, L3の勾配も同様の傾向を示すことである。ここでは、上弦材の組み合わせによるケーブル機構(U1+U2+U3+U4+U5+U6)、および上記の(D1+L2+L3+L4+L5+D6)による抵抗



(a) 漸増荷重に対する上弦材と下弦材部材応力の変化



(b) 漸増荷重に対する斜材と鉛直材部材応力の変化



(c) 漸増荷重に対する荷重作用点のたわみの変化

図7 上部中央節点荷重の漸増に対するトラスの応答

機構が見られる。特にU3は、圧縮応力増加の状態が、③を少し過ぎると圧縮応力の減少に転ずる。これは引張力の負担を意味する。

図7の各グラフが緩やかに屈曲している部分は、当該部材または同じ抵抗機構のグループの中の他の引張部材の降伏が、E～Y区間で進行中の状態にある場合である。

以上を要約すると、理想化された数値解析においては、上部中央節点に漸増鉛直荷重を受けるパラボラトラスは引張部材が主体となって外力を支持し、圧縮部材の応力度は概して低くなる。そして、ひとつの引張部材が降伏した場合には、他の引張部材のグループによって、外力の増分に対する抵抗機構が形成されていく。また大半の部材が降伏した状態の下では、上弦材の組み合わせによる一種のケーブルに類似した抵抗機構も形成されてくる。

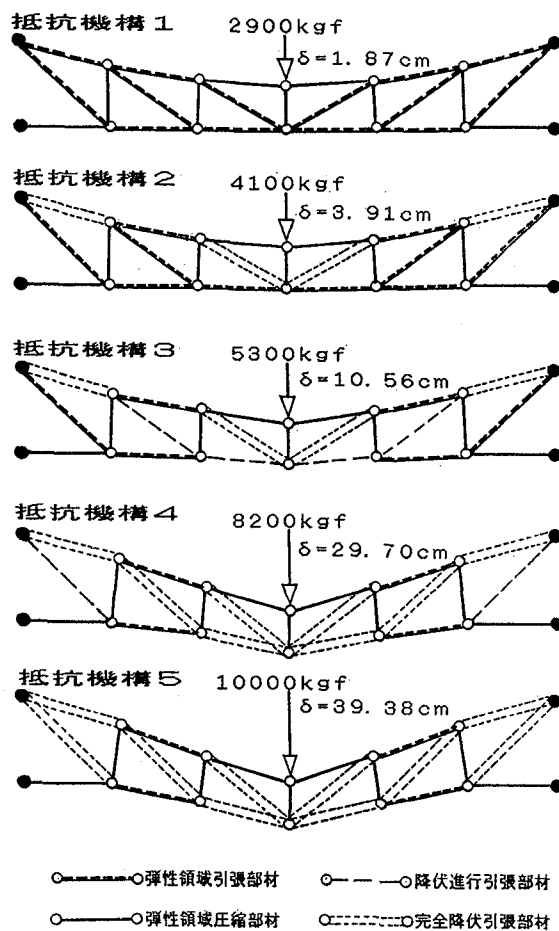


図8 漸増荷重に対するパラボラトラスの抵抗機構

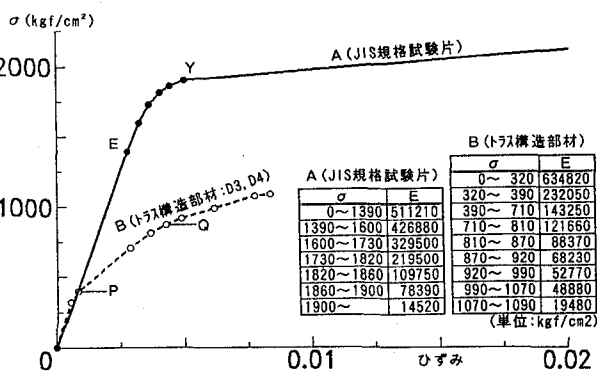


図9 数値解析用の応力ひずみ曲線と関連数値

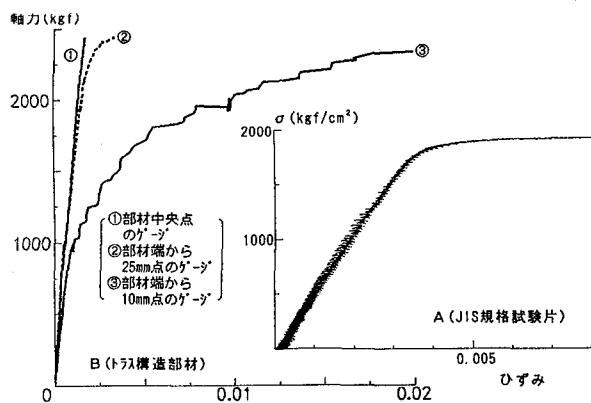


図10 トラス部材の引張試験結果

ここで数値解析に用いたトラス部材(アルミ合金)の応力ひずみ曲線を区分線形化したものを図9のA曲線に関連数値とともに示す。B曲線は、次節で述べる構造実験に用いたトラス部材の応力ひずみ特性である。

5 漸増载荷実験と系の破壊

ハイブリッドパラボラトラスの制御機構が作動せずに豪雪荷重が漸増していく場合を想定して、ケーブルを除去したトラスに対する漸増载荷実験を行った。装置は第3節で示したものをを用いたが、この実験で必要とされる漸増荷重は、第3節の重錘懸垂方式の20倍以上を要するので、図11に示すようなジャッキ方式を採用した。また、数か所の節点にジャッキを用いて鉛直方向に荷重を漸増していくことは、この装置では不可能なため、トラスの上部中央節点のみに、図11に示すような形で载荷した。

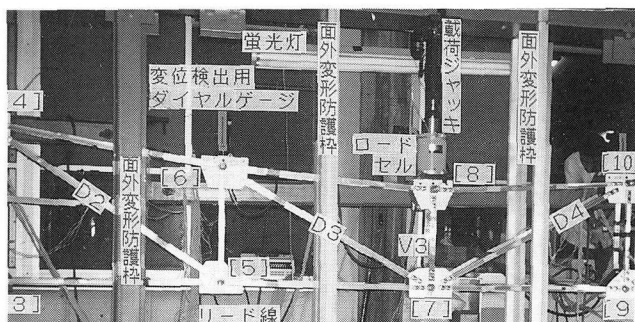


図11 漸増载荷実験(上部中央節点载荷)

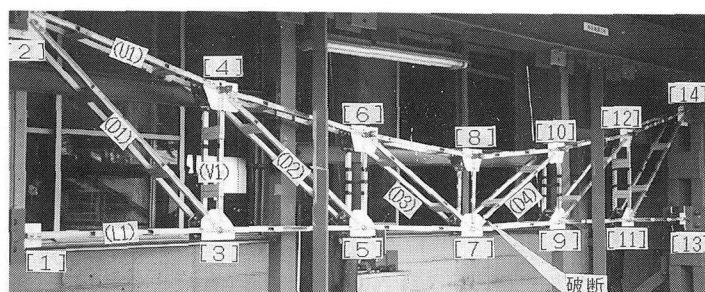


図12 抵抗機能消失後のパラボラトラスの形状(実験2)

この実験は、同一のモデルを2基製作して、それぞれ独立に行った。実験1では漸増荷重の増加速度を一定に保った。そのために、トラス部材が降伏を始めた後の節点のたわみ速度を急増させる結果となり、実験開始後80分で、前節で述べた抵抗機構1を形成する斜材D3が破断した。破断時の節点荷重は2333kgf、荷重作用点のたわみは4.343cmである。実験2では载荷点のたわみの速度を一定に保った。この場合は、トラス部材の降伏開始後における荷重の増加速度が非常に低くなり、最初の破断が部材D4に発生するまでに200分を要した。D4も抵抗機構1を構成し、数値解析上はD3と同一応力度を示す部材である。破断時の節点荷重は2233kgf、たわみは3.163cmと、実験1よりも若干低い結果が得られた。部材の破断とともに油圧式ジャッキの荷重が大きく低下したため、再び荷重を増加したところ、荷重628kgfで上弦材U1が破断した。たわみは4.143cmである。D4に引き続くU1の破断は、前節の数値解析でD3(=D4)とU1(=U6)が他の部材よりも高い応力度を示していたことから説明がつく。なお、これ以上の载荷は実験装置が危険なために中止した。両実験とも、気温変動は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下という条件の下で行った。

なお、前節で述べた抵抗機構2, 3, 4, 5は、全部のトラス部材が破断せずに荷重を分担し続ける、という条件の下でのみ出現し得る機構であるから、この実験でそれを作り出すことは不可能であった。また上記の実験2の結果を要約すれば、最初の部材D4の破断によって、パラボラトラスの外力に対する抵抗機能は消失することになる。

図12は、実験2を終了して各種の装置を除去し、トラスのみとした場合の写真である。当初は水平な直線上に並んでいた下弦材の配列が、実験後にかかなり変化した状況

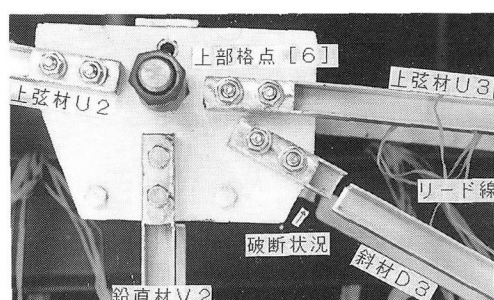


図13 斜材D3の破断状況(実験1)

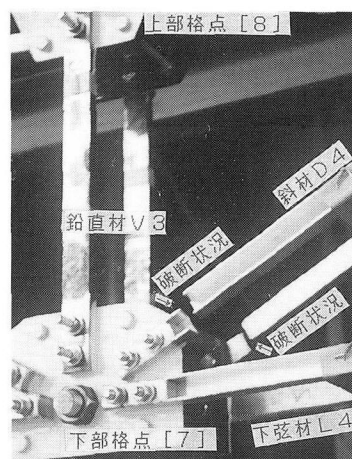


図14 斜材D4の破断状況(実験2)

を観察できる。図13は、実験1において斜材D3が上部節点[6]の近くで破断した状況を、図14は、実験2において斜材D4が下部節点[7]の近くで破断した状況を示す。いずれの実験でも、前後2面を構成するように配置した同一番号のトラス部材が2本とも同時に破断した。

この実験では、何本ものトラス部材が順次降伏するにつれて、系の中に各種の抵抗機構が出現することを期待していたが、最大の引張応力を示す部材の破断によってそれ以上の漸増荷重に対する系の抵抗機構は失われた。

この実験結果を詳細に調べた結果、次のような特徴のあることがわかった。

- ④ 部材の破断は、図13、14に見るように、部材端がガセットプレートに固定されている位置から1~2cmの位置(④図の写真のトラス部材の幅は2cm)に生じている。
- ⑤ 引張応力度の大きい部材の端部においてもほぼ同じ位置に、肉眼で識別できるネックが生じ始めている。
- ⑥ 部材が破断するほどの状態に至っても、各部材の長軸中央部に貼りつけたゲージは、降伏開始点(図9のE点)よりも低い値を示している。

なお、実験モデルを分解した後に、数本のトラス引張部材について、軸方向と直交する断面の幅を計測してみると、部材の端部のほうが他の部分よりも若干細くなっている傾向が認められた。

これらの現象から、実験に用いたトラス部材に関しては、部材から切り出したJIS規格の試験片について行った引張試験による応力-ひずみ特性のデータを、そのまま部材の軸力-伸び関係に適用して数値解析を行うことは不相当であると判断した。

そこで、部材端の固定条件を実験用トラスの場合と同一として、トラス部材の長軸方向のみに引張力を加えることのできる装置を、図15のように作って、部材の引張試験を行った。この試験では、ひずみゲージを部材の長軸上の中点のほか、部材端の固定部から10mm及び25mmの位置に貼りつけた。試験結果を図10のトラス部材の応力-ひずみ曲線に示す。なお、比較のためにJIS規格の試験片について得られた応力-ひずみ曲線(前節の解析で用いた図9のA曲線の基礎となるもの)も示してある。

図10において、トラス部材の応力-ひずみ曲線は、ゲージの位置によって著しく異なる。①は部材の中央のゲージによるもので、1本の直線である。②は部材端の固定部から25mmの位置のもので、かなり高い応力度まで直線性を示す。③は部材端固定部から10mmの位置のもので、JIS規格の試験片の場合(A曲線)に類似している。

これらの結果から、トラス部材の軸力-伸び関係に適用する区分線形化モデルを、図9のB曲線のように設定し直して、実験結果と対比する解析に用いることにした。B曲線は、図15のトラス部材の引張試験において、引張力の各段階で部材両端の固定点間の長さを計測して求めたものである。関連数値は図の中に併記した。

なお、この区分線形化モデル(B曲線)に関する数値は、部材の長さに応じて若干異なる。図示の数値は斜材D3、D4の数値である。B曲線の形状は巨視的には3種類の勾配を持った直線である。P点とQ点が勾配の顕著に変化する点である。部材の応力度がこれらの点をこえるたびに、部材の剛度が低下する。それによって漸増荷重に対する部材力や節点たわみの応答特性が変動する。

図16は、パラボラトラスの実験モデルに対する漸増荷重実験の結果と、これに対して図9のB曲線の区分線形化モデルを用いて行った複合非線形解析の結果を比較し

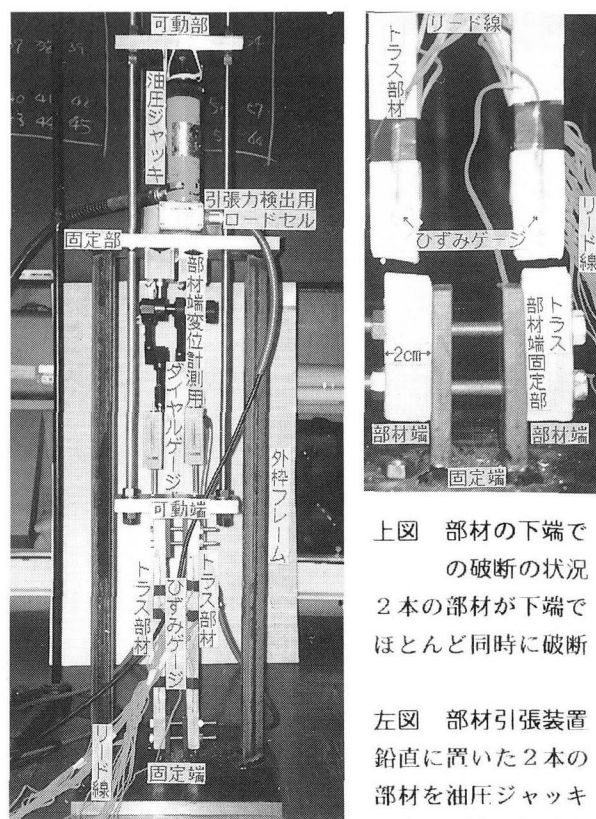


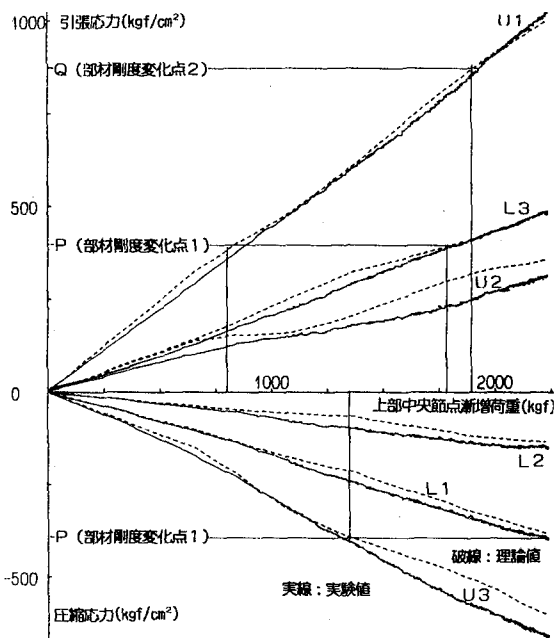
図15 トラス部材の引張試験装置と破断状況

たものである。解析においては、圧縮部材の応力-ひずみ関係は、引張部材と同一であると仮定した。実線のグラフは実験2で得られたもの、破線のグラフは漸増荷重の各段階に対して行った複合非線形解析の結果である。

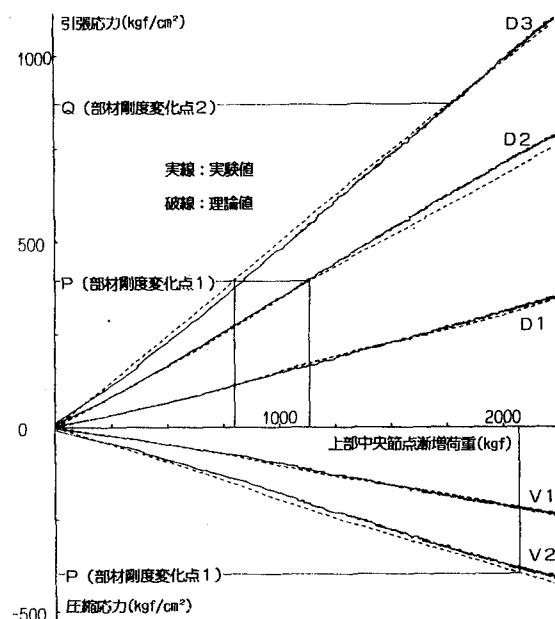
この実験では、理想化したモデルの数値解析による線グラフ(図7)に見られるような、高い荷重領域まで荷重を漸増させる以前に、部材の破断によって抵抗機能が消失している。しかし各グラフを詳細に観察すると、図7の場合と類似した系の応答特性の存在していることがわかる。たとえば、斜材D3と上弦材U1の応力度が、ほぼ同時にP点(部材剛度変化点1:図9B曲線P点に相当)をこえると、それ以上の漸増荷重に対しては、他の部材の応力度のグラフの勾配が複雑に変化ようになる。

実験値と解析値は、節点たわみと斜材および鉛直材に関しては、高い荷重値に至るまでかなり良く一致する。しかし上弦材と下弦材については、荷重値が高くなるにつれて顕著な違いを生ずる部材(U2、U3)も見られる。ただこれは、1回のみの実験結果であるので、この程度の差はやむを得ない。図16から明確に知り得ることは、各部材の応力度が順次、P点またはQ点をこえることにより、系全体の剛度が低下するため、節点たわみを示す曲線の勾配が徐々に増加していく、ということである。

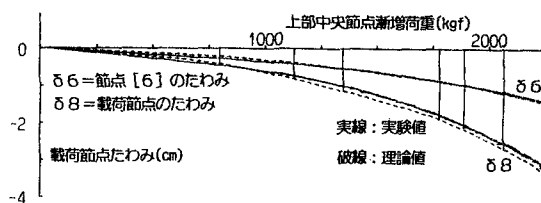
図17は、実験2における部材D4の破断直後のトラス変形図である。これは、5カ所の上部節点で検出した節点たわみを用いて作図したものである。



(a) 漸増荷重に対する上弦材と下弦材の部材応力の変化



(b) 漸増荷重に対する斜材と鉛直材の部材応力の変化



(c) 節点[8] (荷点) と節点[6] のたわみ

図16 漸増荷重実験におけるパラボラトラスの応答

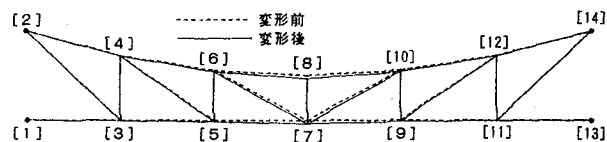


図17 トラスの原形と抵抗機能消失時の形状

6 まとめ

これまでに筆者らは、ハイブリッド・パラボラ・トラスの機構を橋梁に利用することを想定した、基礎的実験と考察を報告してきた。¹⁾ 今回ここに報告したものは、この機構を豪雪地帯における長大径間の屋根のたわみ制御に利用することを想定した基礎的な研究の結果である。本研究を通じて得られた主要な事項を以下に要約する。

1) 第2節では不均等な分布荷重に対してトラスの節点たわみを制限値以内に制御する問題を、3種類の制御方式について、数値解析で検討した。制御方式1は、全パネルにわたる1本のケーブルを、制御方式2は、数パネルにわたる種々の長さのケーブルを利用するものである。これらの方式は高いケーブル張力を要し、それがトラス部材の圧縮力を増加させてしまうことのほか、節点部での摩擦により、ケーブル張力が変動することに問題がある。これに対して制御方式3は、上弦材の個々のパネル内に独立したテンドンを配置するもので、制御に必要とされるテンドン張力も低くおさえられる。よって今後、テンドン張力を発生させる計測制御機構の問題^{4) 5)}を解決できれば、実用化しやすい方式と考える。

2) 第3節では、ケーブルの張力調整によるトラスの節点たわみ制御の可能性を検討するための実験を、制御方式1の構造モデルに対して行った。この方式は制御用ケーブルが1本のため、一様分布荷重に対する制御に有利な方式であるが、実験では、非対称荷重の複雑な変動に対しても、制御の対象とする節点のたわみを0に保つことは可能であった。数値解析結果とは良い対応が見られた。

3) 第4節では、ケーブルの制御機構が作動しない場合を想定して、豪雪荷重の増加に対するトラスの抵抗機能を、複合非線形解析によって検討した。その結果、パラボラトラスは、鉛直荷重のもとでは引張部材を主体とした抵抗機構を形成し、理想化された数値解析モデルに関しては、引張部材の降伏によって、系の中に種々の抵抗機構が出現することが分かった。

4) 第5節では、ケーブルを除去したトラスのみの実験モデルに対して、上部中央節点に鉛直荷重を漸増させた場合の系の応答を調べた。実験の結果は数値解析で予想していたものとはかなり異なるものであった。すなわち最大応力を示していた引張部材の降伏後は、その部材の剛度が大きく低下しながらも粘り強く抵抗する、というようなことはなく、早期に破断してしまった。最初の部材の破断によって外力に対する系の抵抗機能は消失した。

5) 部材の破断の発生箇所は、どの実験においても、部材がガセットプレートに固定されている位置から、部材の断面寸法と同じ程度の距離を隔てた場所であった。トラス部材と同一の固定条件のもとで引張試験を行ったところ、JIS規格の材料試験片で得られた応力-ひずみ曲線に近い形状がこの破断部分に現れた。しかし部材の他の部分では、同じ軸荷重値に対しても大きな伸びは生ぜずに直線性を示していた。このことより、複合非線形解析においては、JIS規格の材料試験片で得られた応力-ひずみ関係を用いて構造物の解析を行っても、実際の実験による構造物の応答を把握できないこと、そしてその原因は応力集中が部材端に生ずることにあると判断した。¹¹⁾

6) 構造実験用のトラス部材の引張試験によって得られた、個々の部材の軸力-伸び関係を用いて、複合非線形解析を行ったところ、実験結果とかなり良く対応することが分かった。ただし系の中での降伏部材の数が増してくるにつれ、実験値と理論値との差が大きくなる部材もあった。節点たわみについては高い荷重値に至るまで良好な一致が見られた。

7) 構造実験におけるトラス部材の端部は2本のボルトでガセットプレートに結合しているため、実際は剛節構造である。したがって部材端の曲げの問題¹²⁾も考慮すべきであるが、今回の複合非線形解析では節点部はピン結合と仮定している。曲げの影響に関する検討は今後の課題としたい。

8) 本稿で提案した構造系に関しては、今後、計測制御システムの検討が必要である。^{4) 5)} 積雪荷重または屋根たわみの検出は電氣的に、ケーブル張力の調整は油圧的に行うことになるだろう。これらは今後実験的に検討を進めていくことが必要である。

またこの系については、制御機構が作動しなくなった場合の構造物の安全性が問題となる。このような場合に対する設計方針としては、制御機構を除去したトラスのみの系に対して、予想される過大荷重を作用させ、結果的には系の変形が極めて大きくなったとしても、応力的には耐え得るような構造とすればよいと考える。^{9) 10)}

参 考 文 献

- 1) 吉澤孝和・宮澤圭・清水功雄・吉川薫：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，構造工学論文集，Vol. 40A，1994，pp. 39-50.
- 2) 山田孝一郎：56豪雪による北陸地方の建物及び人の被害と建物の耐雪化について，雪工学研究会報，No. 1，1985，pp. 16-23.
- 3) 吉澤孝和・山田貴男：豪雪を対象とした長大屋根構造物の静的応答制御について，自然災害科学中部地区シンポジウム講演要旨集，1993，pp. 26-27.
- 4) H. H. E. Leipholz and M. Abdel-Rohman: Control of Structures, Martinus Nijhoff Publishers, 1986, pp. 227-255.
- 5) 時田保夫・森村正直・他：防振制御ハンドブック，フジテクノシステム，1992，pp. 274-337.
- 6) 山田貴男・吉澤孝和：制御用テンドン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，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第1部，1993，pp. 1084-1085
- 7) 阿部和久・青木究：積雪の比較的大きい変形を対象とした個別要素解析法，構造工学論文集，Vol. 40 A，1994，pp. 385-394.
- 8) Michael O'Rourke, Wayne Tobiasson and Evelyn Wood Proposed Code Provisions for Drifted Snow Loads, Journal of Structural Engineering, V. 112, No. 9, 1986, pp. 2080-2092.
- 9) Norikazu Yoshizawa: Numerical Analysis of Non-linear Problems of Pin-Jointed Trusses, Transaction of JSCE, Vol. 2, Part 2, 1970, pp. 215-221.
- 10) 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，土木学会論文報告集，第227号，1974，pp. 1-10.
- 11) Shigeru Kuranishi and Kimio Kimura: Ultimate Strength of Truss Girder due to Failure of Chord Member, Proc. of JSCE, No. 344/I-1, 1984, pp. 113-119.
- 12) 西村宣男・小松定夫・西出俊亮：トラス圧縮材の構面内極限強度特性，土木学会論文集，第386号/I-8，1987，pp. 221-226.

(1994年9月14日受付)