

自己釣り合い型自由曲面トラス構造の研究

兼光 知巳 杉崎 健一 甲斐 芳郎 谷口 尚範 瀧 諭 立石 寧俊
(技術研究所) (技術研究所) (エンジニアリング事業本部) (設計本部) (技術研究所) (技術研究所)

Self-supported Truss Structure for Making Any Shape

by Tomomi Kanemitsu, Kenichi Sugizaki, Yoshiro Kai, Hisanori Taniguchi, Satoshi Taki and Yasutoshi Tateishi

Abstract

A self-supported truss structure for making any shape is proposed in this paper. The structure is composed of the same shaped truss units and makes any shaped roof and wall. Pre-stressing members makes a lighter structure with high stiffness than general truss structures. All of the members of the structure are stressed in the axial direction only. Each stress of the members is always in the tensile or compressible direction through any load. The one-way direction of the stress makes the connections simple. The self-supported structure by pre-stressing decreases stresses of structures supporting a roof. In this paper, the concept of the proposed structure is introduced. The structural characteristics are verified by experimental tests of pre-stressing and loading.

概 要

自己釣り合い型自由曲面トラス構造（張弦トラス構造）を提案した。本構造は、同一形状のユニットを組み合わせるのみで任意の曲面を形成し、屋根・壁を構成することができる。初期軸力を導入することによって高い剛性を確保できるため、従来のトラス構造に比べ軽量である。外力下において常に、軸力のみで抵抗し、各部材は引張あるいは圧縮のどちらか一方の軸力しか発生しないため、簡易な接合部である。また、自己釣り合い型構造であるため、下部構造の荷重負担を低減できる。本報告では、張弦トラス構造の概要を説明するとともに、初期軸力導入実験および載荷実験によって、その構造性能を検証する。

§ 1. はじめに

スパンの大きい屋根構造を構成する構造として、鉄骨トラス構造、鉄筋コンクリートシェル構造等の構造形式が考えられ、従来から多くの屋根構造に用いられている。一方、屋根は、大きな室内空間を構成するという機能とともに、意匠的に工夫できる部位でもあることから、複雑な曲面形状を有することが多い。複雑な曲面形状を鉄骨トラス構造で構成する場合、部材の長さ、接合部等の種類が多くなり、建築生産上、煩雑になり易い。また、スパンライズ比が小さいアーチ形状等、屋根形状によっては、屋根に作用する鉛直荷重による水平力を下部構造で負担する必要がある。鉄筋コンクリートシェル構造で構成する場合、型枠・配筋等が複雑になるとともに、重量が大きいため下部構造の負担が大きい。

筆者らは、スパンの大きい屋根に関する上記の課題を解決する観点から、次の特徴を有する自己釣り合い型自由曲面トラス構造（以下、「張弦トラス構造」という）を提案した。

- ① 同一形状のトラスユニットのみで構成する。
 - ② 軸力のみで抵抗する構造とし、いずれの荷重下においても、各部材の軸力方向（引張または圧縮）は一定とする。
 - ③ 初期軸力を導入することによって、高い剛性を有する自己釣り合い型構造とする。
- ①②によって、ほぼ同じ部材の長さおよび比較的簡易な接合部を用いて、図-1に示すような自由曲面を

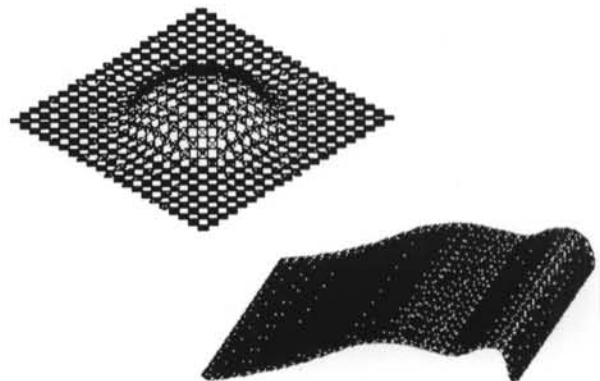


図-1 自由曲面の形成

形成することができる。屋根を下部へ延長することによって、屋根と連続した壁も構成することができる。②③によって、屋根構造の軽量化をはかることができるとともに、下部構造への屋根荷重による負担を低減できる。

本報告では、張弦トラス構造のシステムの概要を説明するとともに、初期軸力の導入および荷重が作用した場合の耐力・変形状態に関して実験を行い、本構造の基本的な構造性能を検証する。

§ 2. 構造システムの概要

張弦トラス構造は、図-2に示すように、自由曲面梁構造および自己釣り合い型ユニット構造¹⁾の2つの構造システムの特徴を有する。2次元的には、図-2(a)に示す自由曲面梁構造の特徴を有し、曲げモーメントを負担する上下弦材とせん断力を負担するストラットで構成される。ストラットの長さや角度を変化させることによって任意の曲面を形成することができる。張弦トラス構造は、1本のストラットを、束材、グリッド材、斜材で構成する自己釣り合い型ユニット構造(図-2(b)、以下、ユニットという)に置換し、図-2(c)に示すように各ユニットを接合することによ

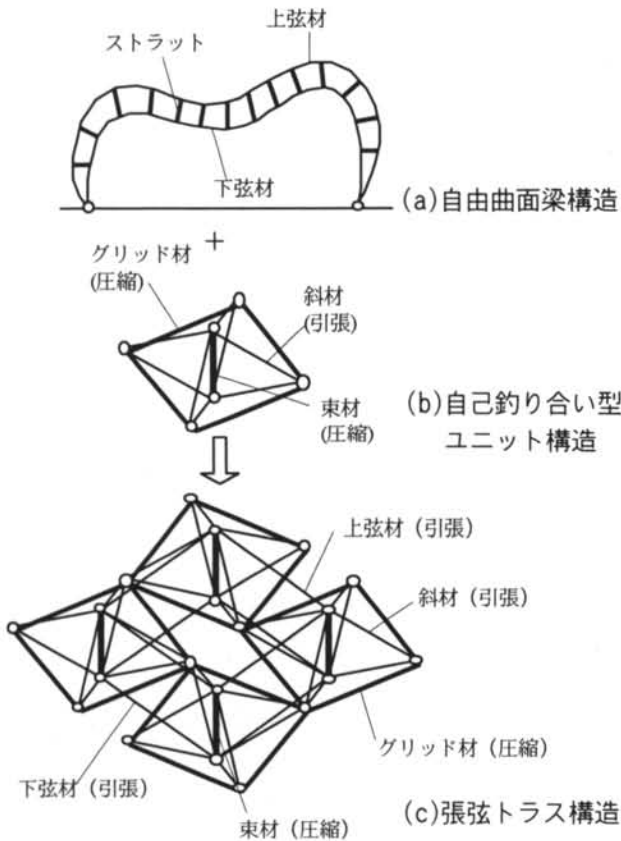


図-2 構造システムの概要

って、3次元的に自由曲面梁構造と同様な構造システムを構築した構造である。

張弦トラス構造を構成する部材は、あらゆる荷重に対して軸力のみが作用する。予め、初期軸力を導入することによって、上下弦材、斜材およびそれら端部の接合部は引張力のみを、束材、グリッド材およびそれら端部の接合部は圧縮力のみを負担し、応力の棲み分けができる。

図-3に示す張弦トラス構造で構成する単純支持の門型構造に自重+積載荷重または地震荷重が作用した場合について構造解析(線形)を行った。同図中に、解析で得られた部材軸力分布および変形を示す。同図より、本構造は、鉛直荷重および水平荷重に対して、上下弦材の軸力による曲げモーメントによって抵抗していることがわかる。また、屋根面内の剛性はグリッド材で確保し、面内せん断力を伝達できる。

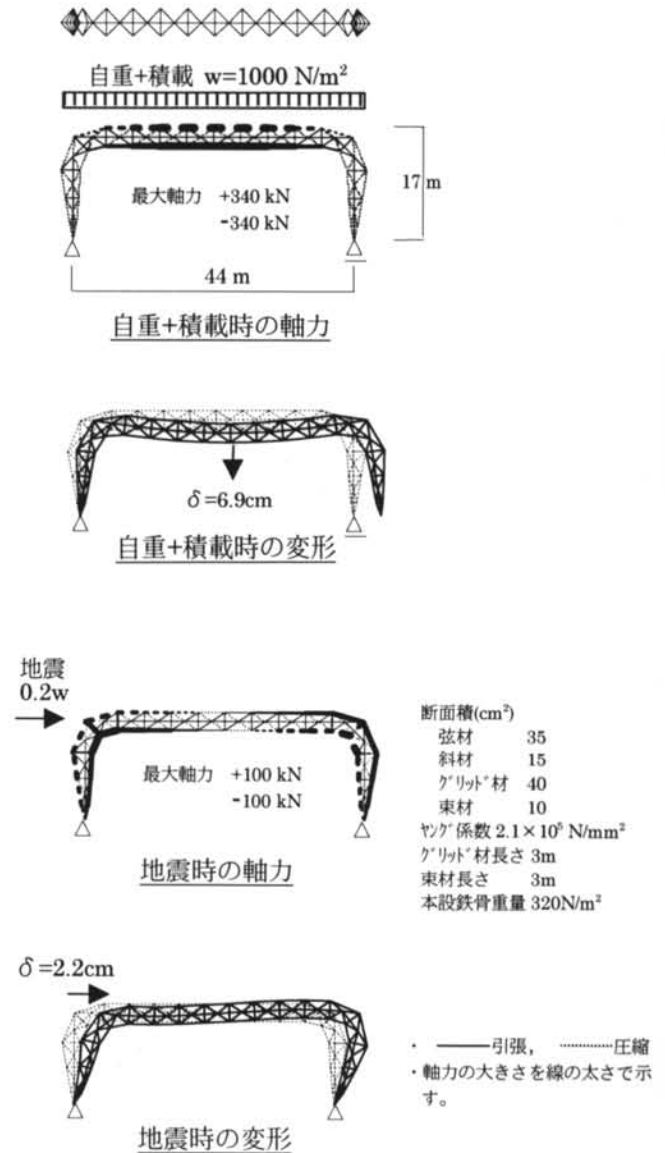


図-3 荷重が作用した場合の部材軸力と変形

§ 3. 初期軸力導入実験

3.1 実験の目的

張弦トラス構造は、初期軸力を導入することによって自己釣り合い型構造を形成し、耐力および剛性を保有することができる。本実験では、部材の長さを変化させることによって、解析によって設定した目標の初期軸力が導入できることを検討する²⁾。また、同一ユニットによって、形状の異なる構造物を形成できることを検討する。

3.2 実験方法

図-4に試験体および実験方法を示す。表-1、表-2に、試験体の断面リストおよび材料の諸元を示す。試験体は、ユニットを2×3のマトリクスに配置し、上下弦材で連結した構造とした。試験体のユニットは実大(スパン50m、グリッド長さ3m、束材長さ3m)の1/3縮小モデルとした。ただし、グリッド材端部の接合部は1/2縮小モデルとし、スパンは3ユニット分とした。試験体の形状は、隣接するユニット間の角度 θ_1 、 θ_2 を変化させた2種類とし、 $\theta_1=90^\circ$ 、 $\theta_2=0^\circ$ および $\theta_1=75^\circ$ 、 $\theta_2=10^\circ$ とした。2つの形状は、隣接するユニット間の角度のみを変化させ、ユニット自身は同一のユニットを使用した。

初期軸力の導入は、予め解析³⁾で求めた自己釣り合い軸力を目標(以下、目標軸力という)に、束材の伸長および上下弦材と押え材の縮長によった。束材の伸長は、2分割した部材間に取り付けた油圧ジャッキによる載荷によった。上下弦材と押え材の縮長は、2分

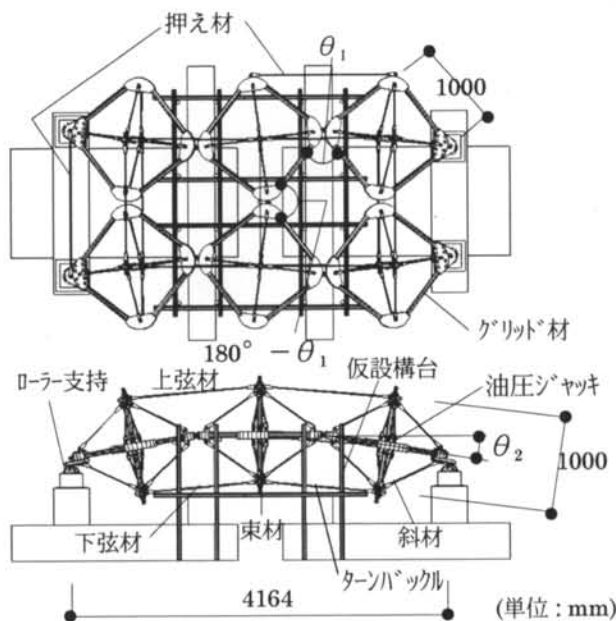


図-4 試験体および初期軸力導入実験方法

部 位	断面形状	材 質
上・下弦材	$\phi 12$	S45CN
斜 材	$\phi 12$	S45CN
束 材	$\phi 60 \times 5$	A6063TE-T6
グリッド材	$\phi 50 \times 5$	A6063TE-T6
押え材	$\phi 12$	S45CN

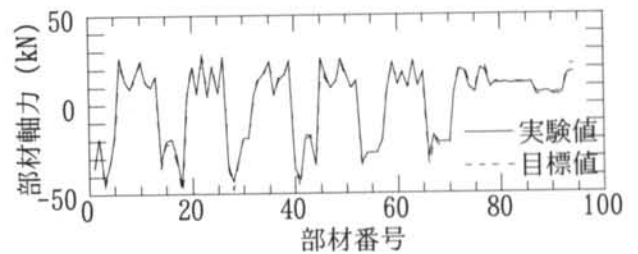
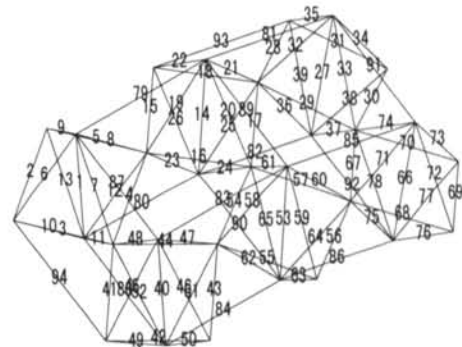
表-1 試験体の断面リスト

材 質	降伏点応力度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
S45CN	617	862
A6063TE-T6	186	222

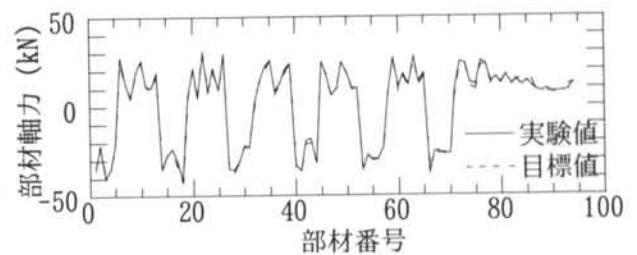
注)解析では、ヤング係数として、S45CNでは $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ を、A6063TE-T6では $7.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ を用いる。

表-2 材料の諸元

割した部材間に取り付けたターンバックルの回転によった。ここに、押え材は、初期軸力導入時においてグリッド材面内の形状を保持するために設置する。以下に具体的な手順を示す。



(a) $\theta_1=90^\circ$ 、 $\theta_2=0^\circ$



(b) $\theta_1=75^\circ$ 、 $\theta_2=10^\circ$

図-5 部材軸力の実験値と目標値との比較

- ① グリッド材と束材を目標形状の位置（仮設構台上）に取り付ける。上下弦材、斜材および押え材を目標形状から初期軸力導入による縮み量分を差し引いた長さで取り付ける。
- ② 束材に、目標軸力の約 20%の軸力を導入する。
- ③ 上下弦材と押え材に、目標軸力の約 20%の軸力を導入する。
- ④ 束材に、目標軸力を導入する。
- ⑤ 上下弦材と押え材に、目標軸力を導入する。
- ⑥ 仮設構台の反力を開放する。

軸力管理は、全部材に貼付したひずみゲージを用いて測定した軸力によった。

3.3 実験結果および考察

図-5に、実験で導入した各部材の軸力（自重は除く）と目標軸力を示す。同図より、3.2節に示した軸力導入方法によって、目標軸力を導入できることがわかる。仮設構台の反力を開放し、単純支持状態で自立したことから、目標軸力を導入することによって自己釣り合い状態になったことがわかる。また、2種類の形状の試験体に初期軸力導入し、自立させることができたことから、同一ユニットによって、異なる形状の構造物を形成することができることがわかる。

§ 4. 载荷実験

4.1 実験の目的

本実験では、張弦トラス構造に鉛直荷重が作用した

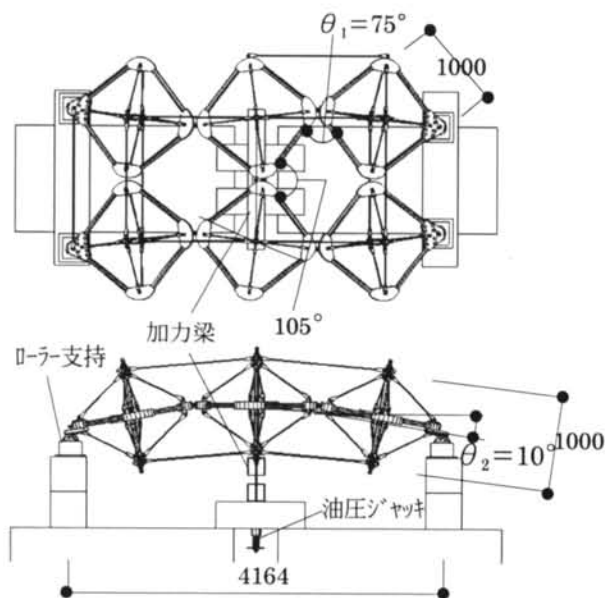


図-6 試験体および载荷実験方法

時の破壊モード、耐力および変形状を検討する。また、構造解析によって、耐力および変形状が追跡できることを検証する。

4.2 実験方法

図-6に試験体および実験方法を示す。試験体は3.2節と同じとし、形状は $\theta_1=75^\circ$ 、 $\theta_2=10^\circ$ とした。荷重は、スパン中央への鉛直下向き荷重とした。载荷は、スパン中央の2本の束材下端を剛な加力梁で接続し、加力梁の中央を油圧ジャッキによって鉛直下向きに加力することによって行った。支持条件は、周辺4点のグリッド材端部における単純支持とした。

3.2節に示した方法によって、予め目標の初期軸力を導入した。目標初期軸力は、3.2節で設定した初期軸力を $\alpha=1.0$ とした場合、同軸力を比例倍させた $\alpha=0.5$ 、 1.0 、 1.5 の3ケースとした。

4.3 実験結果および考察

4.3.1 破壊モード

写真-1に初期軸力 $\alpha=1.0$ の場合の最大荷重時における破壊状況を示す。部材の破壊順序は、 $\alpha=0.5\sim 1.5$ のいずれのケースも、概ね、次のようであった。ここに、部材の破壊とは、応力弛緩および引張降伏を

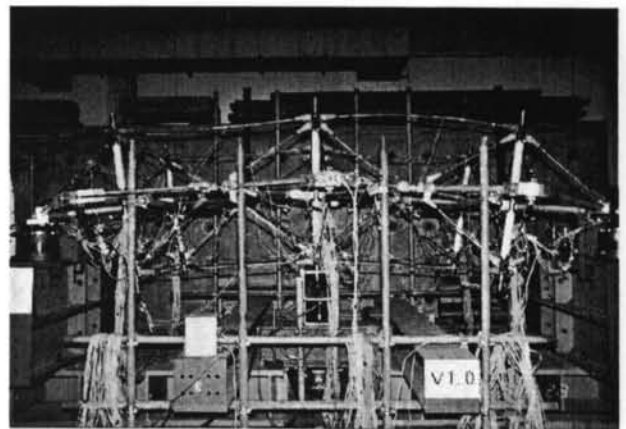


写真-1 破壊状況 ($\alpha=1.0$)

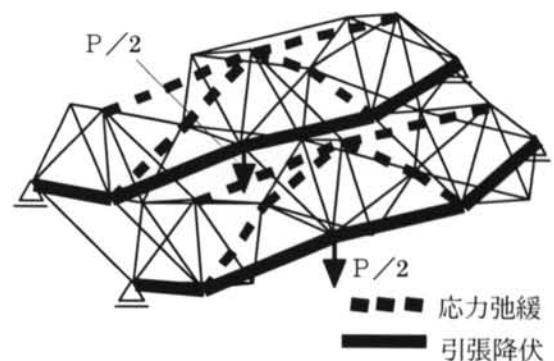
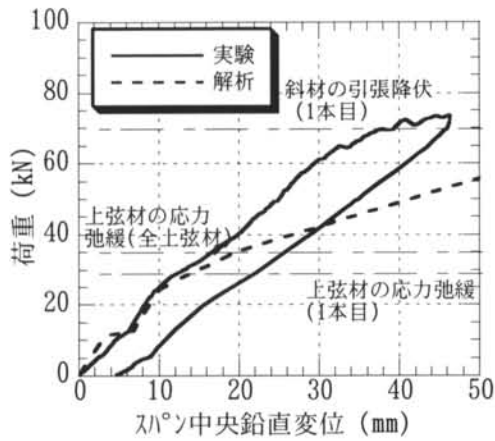


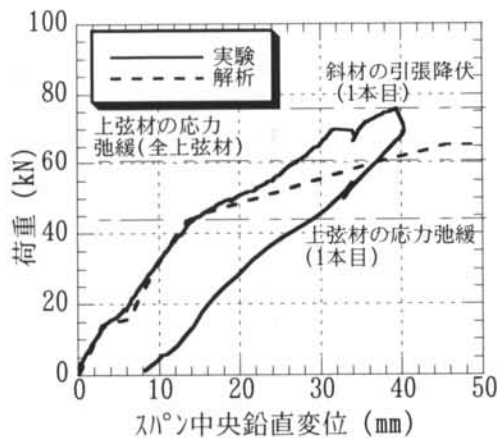
図-7 破壊モード

いう。

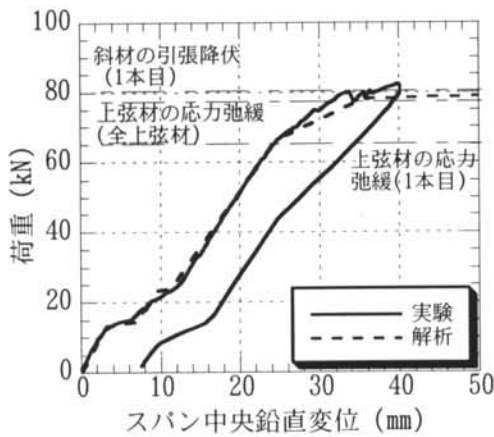
- ① 図-7の破線で示す斜材が順次、応力弛緩した。
- ② 図-7の破線で示す上弦材が順次、応力弛緩した。
- ③ 図-7の太実線で示す斜材と下弦材が順次、引張降伏した。



(a) $\alpha = 0.5$



(b) $\alpha = 1.0$



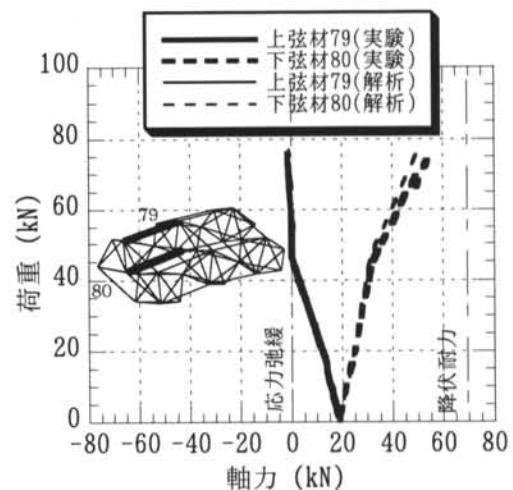
(c) $\alpha = 1.5$

図-8 荷重とスパン中央の鉛直変位の関係

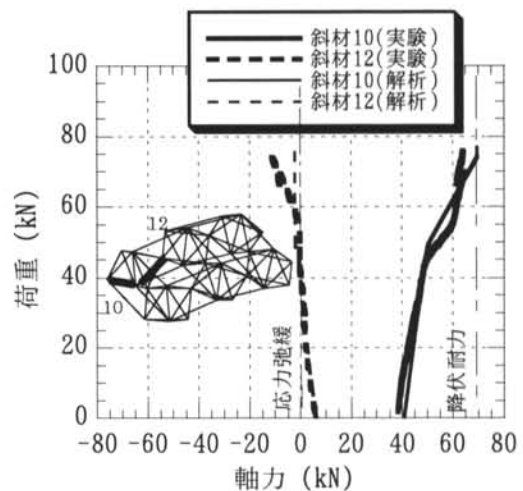
①~③における破壊部材とその順序は、初期軸力の大きさ α によって異なった。94部材という比較的部材数が少ない場合において、複数の部材が破壊しても、構造物全体の崩壊には至らなかったことから、本構造は複数の部材の破壊後も、全体崩壊に至るまでには比較的大きな余力を有することがわかる。なお、本実験では、太実線で示す下弦材あるいは斜材の1~2本が引張降伏した時点で実験を中止した。

4.3.2 荷重と変形の関係

図-8に、荷重 P と荷重点の鉛直変位 δ の関係を示す。図-9に、荷重 P と各部材の軸力 N の関係を示す。ここに、部材の軸力は、部材中央に貼付したひずみゲージの値から計算した値である。同図中には、実験結果とともに解析結果も示す。解析は、荷重を漸増させ、応力弛緩または引張降伏した部材を除去することによって行った。引張降伏した部材の軸力は、降伏後も引張降伏軸力を保持するものとした。各荷重ステップ間は線形解析とした。



(a) 弦材



(b) 斜材

図-9 荷重と部材軸力の関係

荷重とスパン中央の鉛直変位の関係はいずれのケースも、概ね2つの剛性を有しており、第2剛性は第1剛性の約1/2になっている。例えば、初期軸力 $\alpha=1.0$ の場合、図-9(a)より、荷重 $P=40$ kN 近傍でスパン方向の上弦材79が応力弛緩していることがわかる。他のスパン方向の上弦材も $P=60$ kN までには応力弛緩している。このことから、 $P=40$ kN 近傍における剛性の変化(第1剛性から第2剛性への移行点)はスパン方向の上弦材の応力弛緩によるものと考えられる。また、 $P=76$ kN において、スパン方向の端部下側の斜材10が引張降伏している。

第1剛性時において、いずれのケースも、変形が急激に増大し、ある程度変形すると剛性が復元する性状が見られた。例えば、 $\alpha=1.5$ において、荷重 $P=13\sim 14$ kN 近傍で、 $P=13$ kN 以前までの変形増分に比べ、大きく変形が進んだ。しかし、 $P=14$ kN を超えると、再び、 $P=13$ kN 以前とほぼ同等の剛性を有している。これは、 $P=13$ kN で斜材51が応力弛緩し変形が進んだが、 $P=14$ kN ですでに応力弛緩していた斜材47が引張状態に復元し、構造物全体の剛性が上昇したためと考えられる。このような応力配分による部材剛性の復元は、 $\alpha=0.5, 1.0$ のケースでも見られた。

第2剛性時においては、スパン方向の上弦材がすべて応力弛緩し、変形がある程度進行するが、再び、剛性が上昇している。これは、上弦材の応力弛緩後、すぐに、個材座屈し、構造物全体の変形が急激に進むが、その後、座屈した上弦材もある程度、圧縮力を保持し、剛性を有するため、構造物の変形もある程度保持されることによると考えられる。

荷重とスパン中央の鉛直変位の関係において、実験結果と解析結果は良い一致を示した。このことから、同解析方法によって、荷重と鉛直変位の関係を追跡できることがわかる。なお、第2剛性時において、解析による剛性が実験結果よりも小さいのは、解析が破壊した部材の剛性を0としているのに対し、実験では、図-9で見られるように、破壊した部材もある程度剛性を有するという差異のためである。第2剛性時には、本境界条件下で最も剛性寄与率の高いスパン方向の上弦材の応力弛緩後の剛性の影響が大きいと考えられる。

4.3.3 耐力および剛性

本境界条件の下では、スパン方向の上弦材の1本が応力弛緩すると、剛性が比較的大きく変化する。また、スパン方向の上弦材がすべて応力弛緩すると、スパン方向の下弦材および斜材(図-7の太線部材)が主に引張抵抗し、これらの引張抵抗部材の1本が破断すると構造物全体の崩壊にいたる。このことから、

ここでは、スパン方向の上弦材の1本が応力弛緩した時点を構造物の許容耐力、スパン方向の下弦材あるいは斜材の1本が引張降伏した時点を構造物の終局耐力と定義する。初期軸力 $\alpha=0.5, 1.0, 1.5$ において各々、許容耐力は35、61、78 kN、終局耐力は70、76、80 kNであった。同結果より、図-7の太実線で示す下弦材あるいは斜材が引張降伏しない限りにおいて、上弦材の初期軸力が大きいほど構造物全体の許容耐力も増大することがわかる。終局耐力が初期軸力によらずほぼ同じ値になっているのは、終局耐力時に引張降伏した部材の初期軸力が、引張降伏軸力に対して、 $\alpha=0.5, 1.0, 1.5$ 各々、0.07、0.14、0.21と比較的小さい値でほぼ同程度であるためと考えられる。

第1剛性および第2剛性は、いずれの初期軸力のケースの値ともほぼ同じであった。よって、初期軸力モードが同じで部材の破壊モードが同じであれば、初期軸力の大きさは剛性に影響を与えないといえる。ただし、剛性の変化点は初期軸力の大きさの影響を受ける。

荷重とスパン中央の鉛直変位の関係において、実験結果と解析結果がほぼ一致していることから、本解析によって、本構造の耐力および剛性を評価できると考えられる。

§ 5. まとめ

同一形状のトラスユニットを組み合わせ、各ユニットを弦材で連結する自己釣り合い型構造「張弦トラス構造」を提案した。同構造に関して、初期軸力導入実験および載荷実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 同一ユニットトラスを組み合わせることによって、構造的に安定した形状の異なる構造物を形成できる。
- (2) 束材および弦材の長さ調整によって、初期軸力を導入することができる。
- (3) 複数の部材が破壊しても、即、構造物全体の崩壊には至らず、複数の部材の破壊後も耐力を保持できる。
- (4) 耐力は、初期軸力のモードが同じ場合、初期軸力の大きさの影響を受ける。
- (5) 耐力を決定する部材が破壊するまでの剛性は、初期軸力のモードが同じ場合、初期軸力の大きさに影響を受けない。
- (6) 部材の応力弛緩および引張降伏を考慮した荷重増分解析によって、荷重と変形の関係、耐力および剛性を評価できる。

<参考文献>

- 1)宮里直也, 斎藤公男, 岡田章:“Tensegrity Unit の構造物への応用に関する基礎的研究(その1) 1Unit の基本性状および完成時の応力について”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造I, 2000年9月, pp.1029~1030
- 2)兼光知巳, 杉崎健一, 甲斐芳郎, 谷口尚範, 瀧諭, 立石寧俊:“自己釣り合い型自由曲面トラス構造に関する研究 —構造システムと施工実験—”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造I, 2000年9月, pp.1039~1040
- 3)川口健一, ハッ繁公一, 真柄栄毅, 田中太, 河野義裕, 兼光知巳:“応力変位指定トラス構造線形逆問題解法の応用例”, 計算工学講演会論文集, Vol.2, 1997年5月, pp.51~54

