Architectural Institute of Japan

【論　文】

日本建築学会構造系論文報告集 第448号・1993年6月
Journal of Struct. Constr. Engng, AIJ, No. 448, June., 1993

トラス構造の靱性性能改善に関する縮小模型実験

EXPERIMENTAL STUDY FOR THE SMALL SCALE TRUSS STRUCTURES WITH NON-BUCKLING MEMBERS

向　秀元*, 渡辺　厚**, 岩田　衛***, 和田　章****

Hidemoto MUKAI, Atsushi WATANABE, Mamoru IWATA and Akira WADA

In the seismic design of general buildings, plastic deformations in some parts of the structures are permitted to absorb the energy of large earthquakes. As there are many members with a slender ratio over 100 in the steel truss structures, the buckling of these members easily occurs. After the occurrence of buckling, the mechanical properties of the steel members would not be ductile. For this reason, it is quite difficult to perform the seismic design by permitting the plastic deformation of the steel truss structures.

In this paper, by using special pipes with another pipe inside for compressive members of truss structures, it is possible to protect buckling and enlarge the abilities for the resistance against loading forces and deformation capability.

Three experiments for about one twentieth scale model of the steel six grids planner truss structures, namely, (a) normal truss structure, (b)truss structure with the non-buckling member in the center of upper chords and (c) truss structure using the non-buckling members for all upper chords, were performed to investigate the mechanical properties of the structures. The loading was performed by rotating the warm-gear by using stepping motor through the round steel bar attached to the nodal point on the lower chord members. Five loading systems were controlled simultaneously by personal computer.

It was found out that the improvements for the force-deflection relationship were showed with protecting the buckling of the members. Numerical analysis for these specimens were also performed and the results could explain the mechanical behaviour of experiments.

Keywords : *truss structure, non-buckling member, resistance against loading force, deformation capability*

トラス構造，座屈拘束部材，耐荷能力，変形性能

1. 序　論

都市の中の高層ビルに付随したアトリウムや屋根付き野球場など，大空間構造の建設要求は高まってきている。大空間構造の構造形式には，鉄筋コンクリート構造のシェル構造，空気膜構造などがあるが，鉄骨のトラス構造による場合が最も多い。わが国のような地震国では，鉄骨のトラス構造の設計においても，一般の建物と同様に耐震安全性を確保することが重要である。

一般の建築構造物においては，大地震に対して構造物を弾性範囲に収めるのでなく，構造物の一部に塑性変形が生じることを許容し，そのことにより地震エネルギーを吸収する耐震設計法が用いられている。トラス構造の耐震設計においても同様に，構造物の塑性化を許容することが出来ればより合理的な耐震設計が可能となる。そのためには，大きな力や変形を受けた構造部材が靱性のある性質を持っていなければならない。実際にトラス構造に使われている部材の細長比は100以上のものもあり，圧縮力を受けた場合に生じる座屈後の力学的性質は靱性的であるとは言えず，トラス構造の耐震設計に構造物の塑性化を許容した設計法を用いることは難しい。

トラス構造の耐荷能力，変形性能の改善の方法としては，今までに，重要圧縮材を過大設計し指定した引張材を過小設計することによって引張降伏を先行させ耐荷能力・靱性を高める方法[1),2)]，斜材を取り外したり[3)]偏心のある斜材を用いる[4)]ことで弾性域での部材力を分散させ部材の利用性を高め耐荷能力を高める方法，部材にプレ

* 神奈川大学　助手・工博（当時東京工業大学大学院生）　Research Associate, Kanagawa University, Dr. Eng.
** 新日本製鐵株式会社　掛長・工修　Nippon Steel Corporation, M. Eng.
*** 新日本製鐵株式会社　室長・工博　Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.
**** 東京工業大学　教授・工博　Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

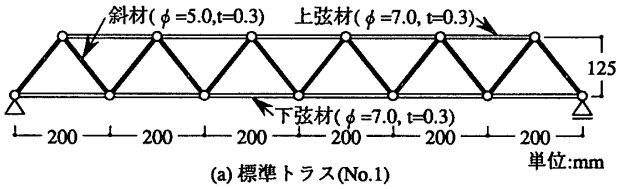
NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

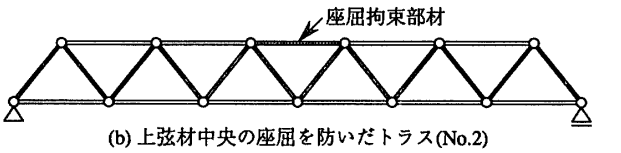
ストレスを導入することで耐荷能力を高める方法[5)~8)]，重要圧縮材に鋼管コンクリートを用いる方法[9),10)]，弦材の近傍に水平な中間部材を導入する方法[11)~13)]，力制限装置(Force-Limiting Device)により圧縮材に靱性を持たせる方法[14)~18)]が行われてきている。Hanaor ら[19)]は上記方法について詳細にレビューを行っており，力制限装置を用いる方法が最も有効であると指摘している。

本研究では，トラス構造の圧縮部材として中心に心棒となる鋼管(以降，心材と記す)を挿入し，心材の弾性座屈荷重を母材の降伏軸力より大きくし座屈を防止することによって圧縮部材の靱性を向上させ，トラス構造の耐荷能力の向上・変形性能の改善を計ることを考える。本方法では容易に圧縮部材に引張部材と同様の応力－歪関係が得られ，部材が持つ本来の力学的性状を十分に発揮させることが可能である。この考え方は，PC 版の中に平鋼のブレースを挿入したり，鋼材のブレースの周囲を鋼管コンクリートや鉄筋コンクリートでおおい座屈を防止したブレースの考え方と同じである。圧縮材の中心に心材を挿入する方法については，多田ら[20)~22)]，Sridhara[23)] も実験研究を行っている。

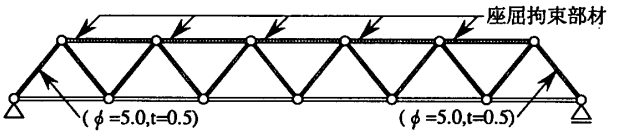
本論文では，圧縮力を受けても座屈しない部材を用いたトラス構造の縮小模型実験を行い，その力学的性質を調べる。その際，模型実験では縮尺が大きくなるほど耐力が小さくなり，より高精度な加力制御が要求されるため，本実験では，変位制御が容易で高精度であるステッピングモーターを用いた自動加力システムを構築する。また，数値解析により実験の現象を明らかにすることにより，本加力システムによる縮小模型実験の妥当性を示す。



(a) 標準トラス(No.1)



(b) 上弦材中央の座屈を防いだトラス(No.2)



(c) 上弦材全体の座屈を防いだトラス(No.3)

※No.2およびNo.3で注記のない部材はNo.1に記した部材と同寸法

図—1　試験体

表—1　ステンレス部材の断面性能および素材試験結果

素材試験体種類	記号	外径 (mm)	肉厚 (mm)	断面積 (mm²)	弾性剛性 (t/cm²)	0.2%耐力 (t/cm²)	引張強度 (t/cm²)
焼きなまし前	CW-1	7.0	0.3	6.5	2050	7.28	9.72
	CW-2	7.1	0.3	6.5	2088	7.28	9.71
	CW-3	7.1	0.3	6.5	2050	7.27	9.68
焼きなまし後	AN-1	7.0	0.3	6.5	2273	2.32	7.12
	AN-2	7.0	0.3	6.5	2381	2.40	7.16
	AN-3	7.0	0.3	6.5	2308	2.40	7.26

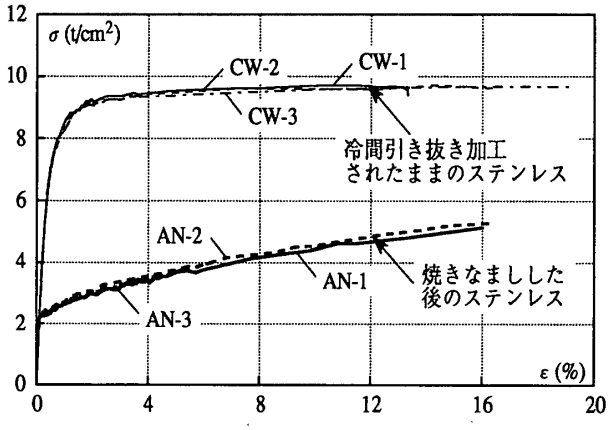
2. 実験方法

2.1　試験体

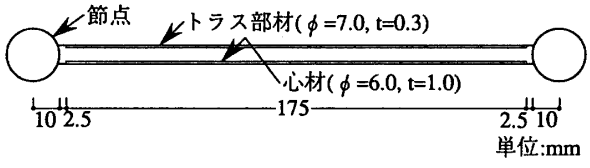
実験は，図－1 に示すように，通常のトラス(No.1)，上弦材中央の部材に心材を有する鋼管を用いたトラス(No.2)およびすべての上弦材に心材を有する鋼管を用いたトラス(No.3)の 3 種類について行った。各トラスの形状は同一であり，弦材節点間距離 20 cm，スパン 120 cm，高さ 12.5 cm の平面静定トラス構造である。

トラス部材には，弦材に直径 7.0 mm，肉厚 0.3 mm，斜材に直径 5.0 mm，肉厚 0.3 mm のステンレス鋼管を用い，端部で直径 20.0 mm，長さ 16.0 mm のステンレスの円柱に銀ろう付けにより接合した。[写真—1(d)]。しかし，試験体 No.3 では，No.1，No.2 の実験より，座屈拘束部材が十分に働く以前に両端の斜材が座屈する可能性があることが分かったため，十分な強度を持たせるために直径 5.0 mm，肉厚 0.5 mm の鋼管を使用した。

表—1，図—2 に使用したステンレス部材の素材試験結果を示す。表中の肉厚は，外径および重量の測定値よりステンレスの密度を 8.03 g/cm³ [24)]として求めた値である。これらに示すように，ステンレス部材は冷間引き抜き加工されており，0.2 % 耐力が通常の約 3.1 倍と高く，銀ろう付け部分の強度不足により母材の降伏による構造物の弾塑性挙動を把握することができなくなってしまうため，1050°C で約 5 分間加熱後自然空冷し焼きなましをした[25)~27)]。



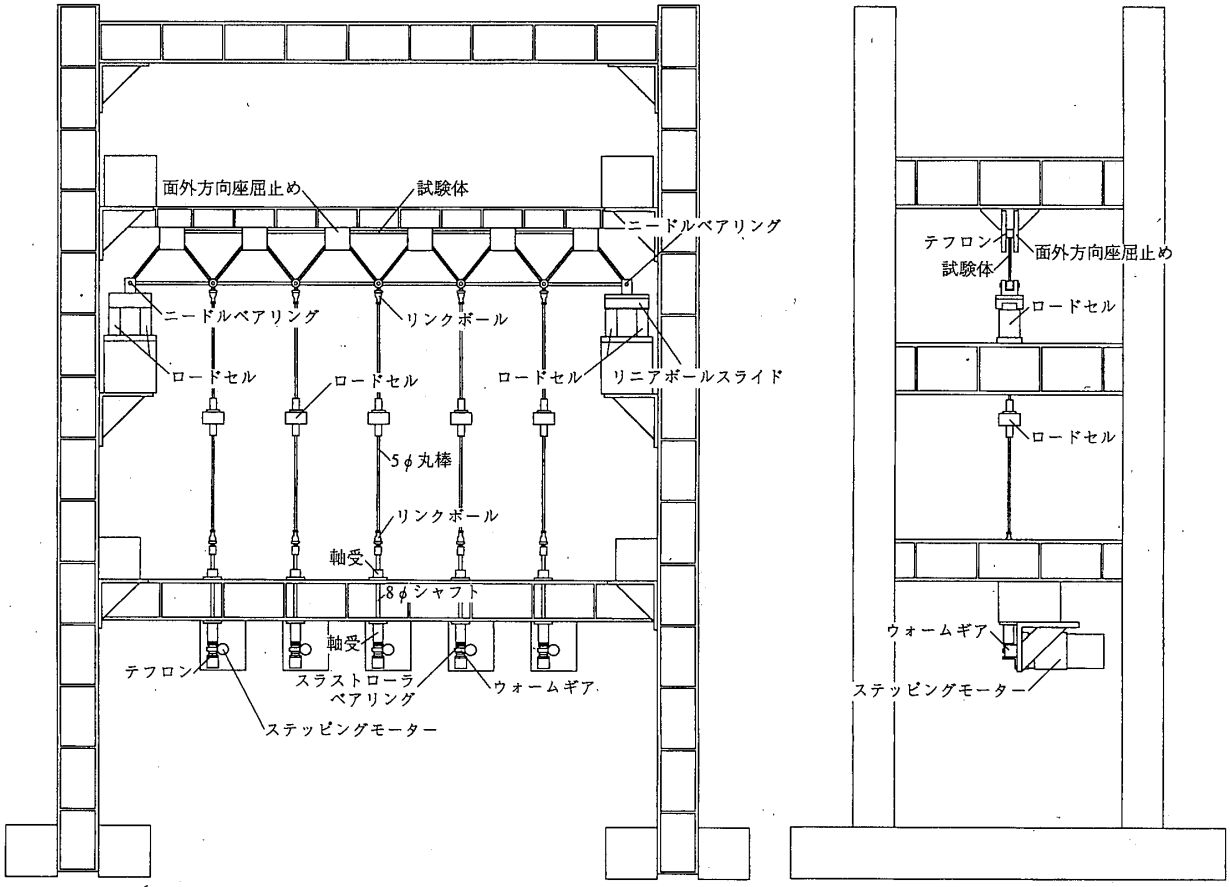
図—2　ステンレス部材の応力－歪関係



図—3　座屈拘束部材

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan



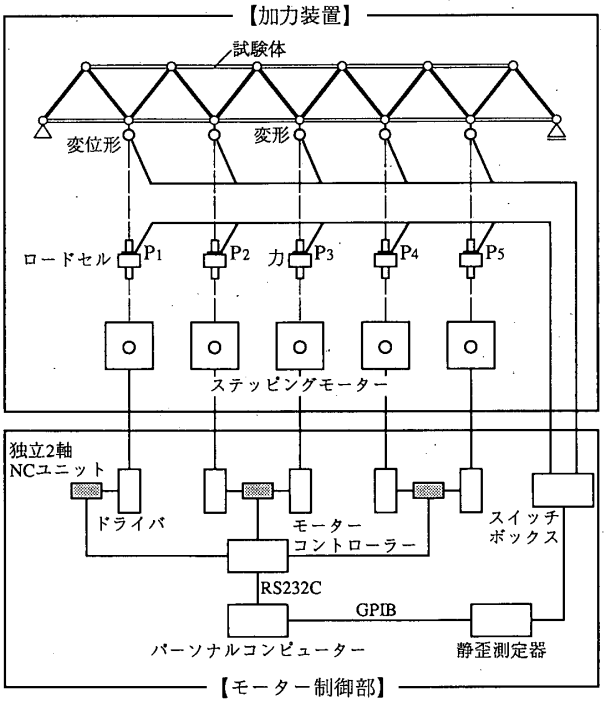
図—4　加力装置

試験体 No.2，No.3 に使用した心材を有し座屈を拘束した部材を図—3 に示す。トラス部材の座屈を防ぎ圧縮力にも安定した軸降伏性状を得るため，トラス部材の降伏荷重(P_y)と心材のオイラーの座屈荷重($P_{cr}=\pi^2EI/l^2$)とが，$P_{cr}>\nu P_y$(ν=1.5：安全率)となるよう心材を選定した。心材は，軸力が流れないようトラス部材との間にわずかに隙間を設け両端の節点とは接合していない。また，部材の圧縮変形に伴い心材が節点と接触しないよう，節点との間にも十分に隙間を設けている。本実験では，弾性係数が想定した値よりもやや高めであるため，$\nu\fallingdotseq 1.9$ となっている。

2.2　加力装置

図—4，写真—1 に加力装置を示す。試験体は，下弦材節点の両端の中心に通したピンをニードルベアリングを介して反力フレーム上に固定しており，一方の支点で反力フレームとの間にリニアボールスライド(ローラー)を取付けることで単純支持としている。また，上弦材各節点で面外方向のトラス構造の全体座屈を防いでいる。

載荷は，下弦材の各節点と加力フレームに取付けたステッピングモーターをウォームギア，シャフトを利用して丸棒(以下，軸棒と記す)でつなぎ，テテッピングモーターを稼動しウォームギアを回転させることにより，軸棒に引張力を与えて行う。シャフトにおねじ，ウォームフォイールの中心にめねじを切ることで，軸棒に引張力

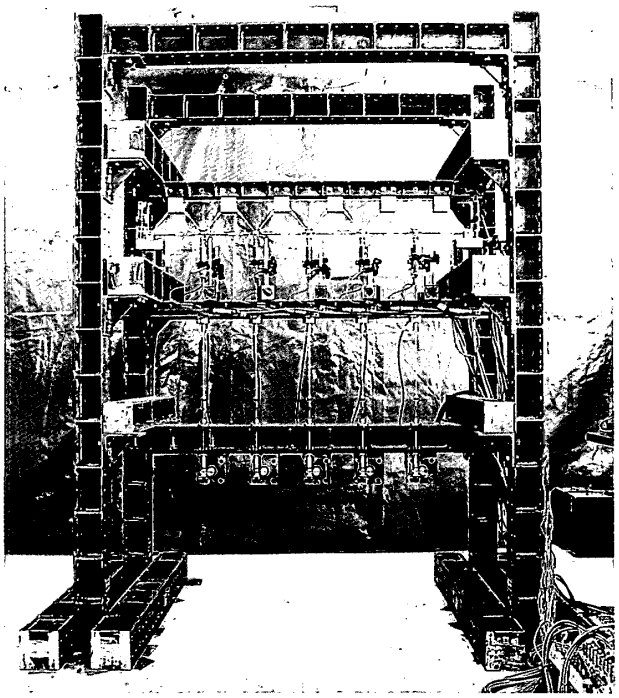


図—5　加力システム

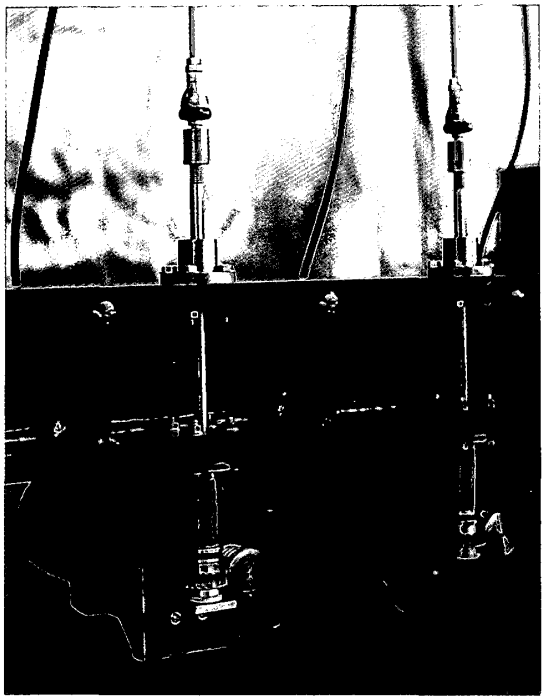
を与えることが可能である。また，シャフトには軸方向に溝を設け，上下に取付けた軸受けによりベアリングを溝にはめ込むことで，ウォームギアの回転による軸棒の「とも回り」を防いでいる。

NII-Electronic Library Service

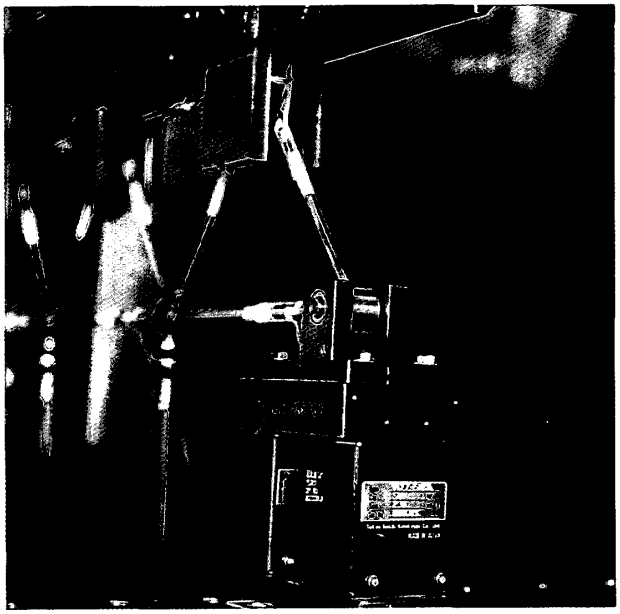
Architectural Institute of Japan



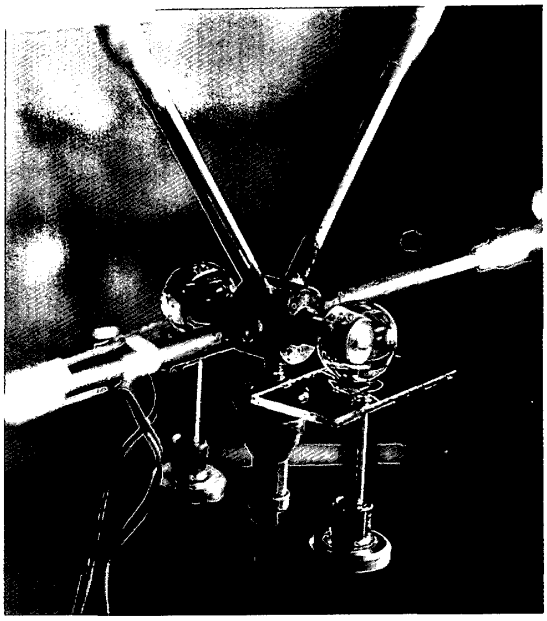
（a）全体



（c）モーター加力部



（b）ローラー部分



（d）下弦材節点

写真—1　加力装置全景および部分詳細

軸棒の両端にはリンクボールを取付けることでトラス節点の上下左右の変形に追従できるようにし，軸棒および中央に取付けたロードセルに偏心による曲げモーメントが働かないようにしている。

2.3　載荷履歴および測定方法

加力は，下方向の一方向載荷とし，各軸棒に取付けたロードセルが等荷重となるようにステッピングモーターを制御しながら，下弦材の節点の鉛直変位の最大が3.0 cmになるまで行った。

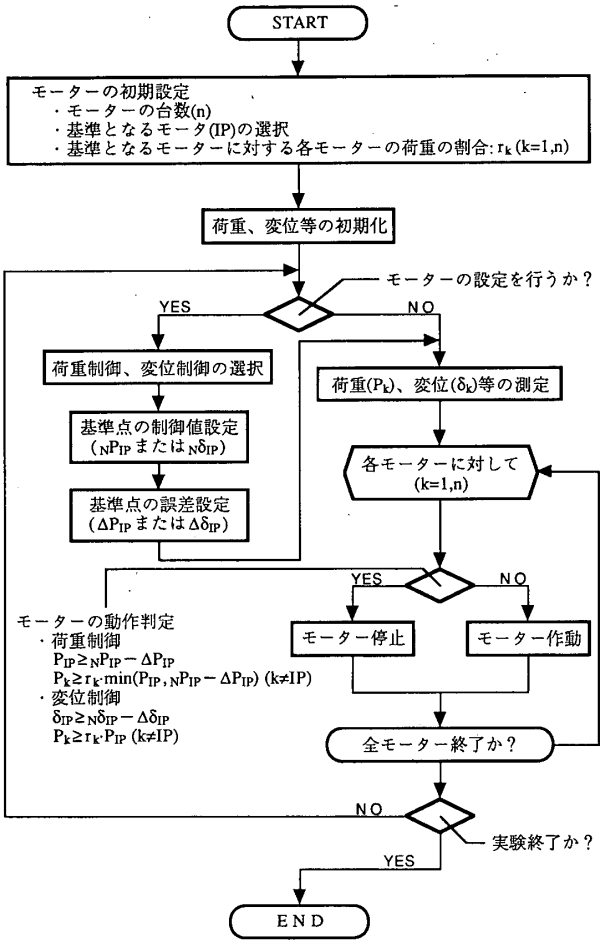
トラス構造の変形は下弦材の各節点に取付けた変位計により測定し，トラス部材の軸方向歪は各部材中央に貼付した歪ゲージにより測定した。また，構造物の耐力は左右両支点に取付けたロードセルの和により求めた。

2.4　モーターの制御方法

本実験の加力システムの概念図を図—5に示す。パーソナルコンピューターにRS 232 Cを通して多軸モーターコントローラー，GPIBを通して測定器をつなぎ，荷重・変位等の測定とともに多数のステッピングモー

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

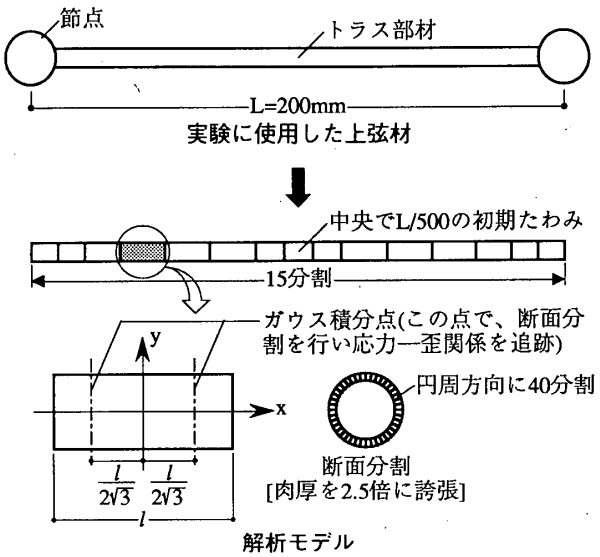


図—6　モーター制御フローチャート

ターを同時に自動制御するシステムである。各ステッピングモーターに対し変位計およびロードセルを対応させることで，測定器を通してパーソナルコンピューターに取り入れられた荷重値または変位値とパーソナルコンピューターより入力した制御値を比較することでモーターの作動制御を行う。

図—6にモーターの制御方法のフローチャートを示す。加力は，基準となるモーターに対応するロードセルの荷重値に対しその他の加力点の荷重値を比で与えて行う。モーターの制御は，弾性範囲内では基準点の荷重制御，最大耐力付近ならびに塑性域では基準点の変位制御で行う。

モーターの作動・停止は，各軸棒の移動に伴いお互いのロードセルの荷重値に影響を及ぼし合うため次のように制御する。基準点のモーターに対しては，対応する荷重または変位が［制御値－許容誤差］以上になると停止するようにする。その他のモーターでは，対応する荷重が，荷重制御では基準点のモーターに対応するロードセルの値または荷重制御目標値に基準点のモーターに対する荷重割合を乗じた値以上になると停止させ，変位制御では基準点のモーターに対応するロードセルの値に基準点のモーターに対する荷重割合を乗じた値以上になると停止させ，その値より低くなると作動するようにする。ここでは，測定器による測定に多少の時間がかかり，モーターの回り過ぎを防ぐため，測定時には毎回モーターを停止させている。より高速度な測定器を利用すれば，連続的なモーターの作動が可能である。



図—7　座屈部材の解析モデル

3. 解析方法

材料非線形ならびに幾何学的非線形を考慮した分割要素法による任意形鉄骨平面骨組の弾塑性解析法[28]を用いる。本解析では，5つの加力点の荷重比を一定にして部材座屈に伴う構造物の耐力低下域まで解析を行うため，弧長増分法[29),30)]を導入する。

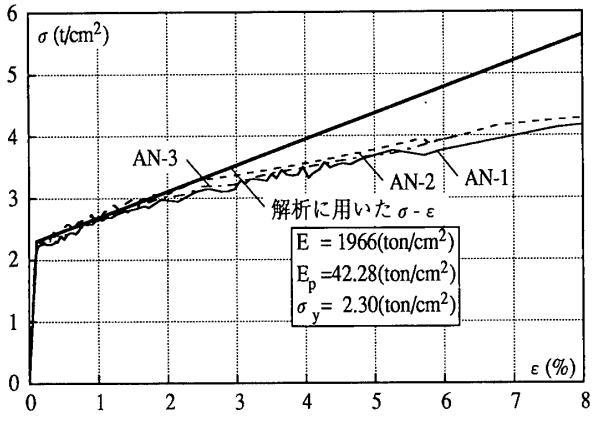
3.1　解析モデル

図—1の試験体に対して，節点の大きさを無視し節点中心間に部材を配し，材軸方向に5等分割し，各分割内の2点のガウス積分点で断面を円周方向へ40の小断面に分割しその点における応力－歪関係を追跡した。その他の基本的な解析理論は文献27)と同様である。なお，座屈部材(部材内の応力変化が激しい部材)は，図—7に示すように応力が集中する部分が細かくなるよう15分割した。15分割した部材は，標準トラス(No.1)で上弦材中央の部材，上弦材中央の座屈を防いだトラス(No.2)で上弦材中央部材の両隣りの部材(以下，上弦材中央隣接部材と記す)である。

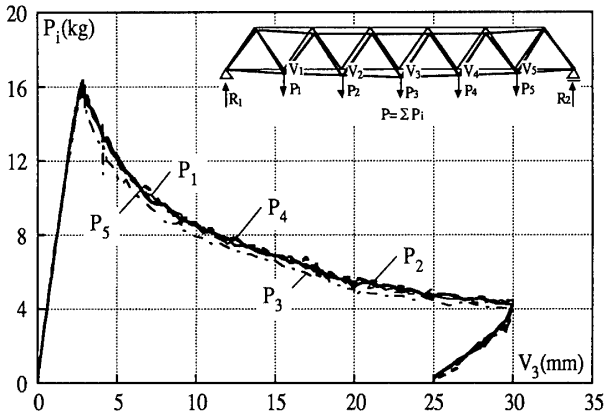
各部材には，部材中央で部材長の1/500となる初期たわみを与えた。ただし，No.2では，実験結果からもわかるように，試験体の制作誤差等により必ずしも対称形に上弦材中央隣接部材が同時に座屈するとは限らないため，右側の上弦材中央隣接部材の初期たわみは部材長の1/600とした。

座屈を拘束した部材は，心材の剛性を無視し軸力を負担している母材のみを扱い，各ステップ増分解析ごとに

NII-Electronic Library Service



図—8　解析に用いた部材の応力－歪関係



図—9　各軸棒軸力－下弦材中央節点の鉛直変位関係(No. 1)

生じた曲げ変形を常にゼロと置き，両端の節点を結ぶ直線上に材軸の分割点をのせるようにしながら解析を進めた。

実験では試験体をセットした時点でイニシャルを取っているため，あらかじめ試験体をセットした時点での初期重量を支点のロードセルで測定しておき，その重量を各節点に等分に振り分けて解析したうえで，加力点の荷重比が等しくなるよう一方向鉛直力を下方向に作用させた。

3.2　解析に用いた材料の力学的性質

解析に用いたトラス部材の応力－歪関係を部材の素材試験結果(図—2)に重ねて図—8に示す。各材料定数は，弾性係数(E)を1966 (ton/cm²)[25]，塑性剛性(E_p)を42.28(ton/cm²)，降伏応力度(σ_y)を2.30(ton/cm²)とした。E_p，σ_yは歪が0.2％～2.0％の間で素材試験結果の応力－歪関係に合うように決定した。

4. 実験結果

4.1　モーター制御

図—9に標準トラスについて各軸棒の軸力と下弦材中央の節点の鉛直変位の関係を示す。試験体左側の軸棒のロードセルよりP_1，P_2，…，P_5のように表す。P_3が制御の基準としたモーターに対する軸棒の力である。『2.4 モーターの制御方法』に記したようにP_3の制御に追従して他のモーターを制御しているため，上弦材中央の部材座屈後(構造物の最大耐力以降)はP_3が多少低くなるが，5本の軸棒ともほぼ等しい力が作用されていることがわかる。

ステッピングモーターでは油圧式ポンプとは違って変位制御が容易であり，加力装置としての剛性も試験体の約100倍と高く，また部材の座屈後の試験体の負勾配が弾性剛性と同程度なので，構造物が不安定になった後でも簡単に測定が可能である。

4.2　荷重－変位関係

図—10～図—12の各図(ａ)に実験による各トラス構造の全荷重と下弦材各節点の鉛直変位の関係を示す。鉛直変位は，試験体左側の下弦材節点よりV_1，V_2，…，V_5のように表す。表—2に各トラス構造の最大耐力値を示す。これらの図表には，『5. 解析結果』での実験結果との比較のため，解析結果を付随している。また，表—2のNo. 3の試験体については，実験値では実験終了時(V_3＝21.00 mm)，解析値では実験終了時との対応のためV_3＝20.82(mm)での値を示している。

図—10に示す標準トラス(No. 1)では上弦材中央部材が座屈し急激に耐力が低下している。

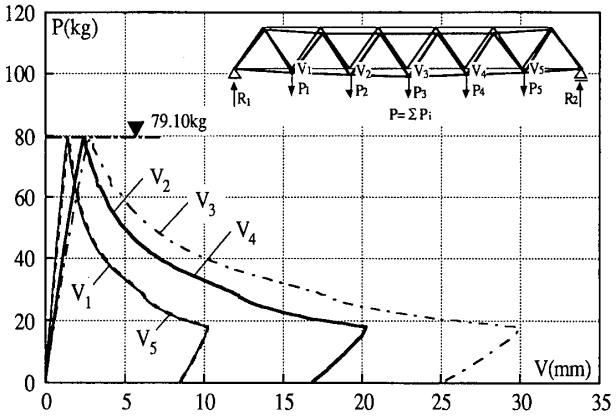
図—11に示す上弦材中央の座屈を防いだトラス(No. 2)では座屈拘束部材が座屈しないため耐力はNo. 1よりも上昇してはいるものの，その後隣接した上弦材が座屈荷重に達し座屈するため耐力が低下しており，トラス構造全体としての変形性能の改善は計れなかった。これは，図—13に軸力分布の計算値を示すように，上弦材中央部材と隣接部材の軸力比が7.2/6.4＝1.125とほとんど差がないため，上弦材中央部材が降伏する全荷重と隣接部材が座屈する全荷重が近接しており，座屈を拘束した部材が十分に安定した降伏現象を生じる以前に隣接部材が座屈したため，その変形性能向上の機能を果たせ得なかったためである。このように，No. 1では上弦材中央部材，No. 2では上弦材中央隣接部材の座屈により最大耐力が決まるため，No. 2のNo. 1に対する最大耐力比1.123は上弦材中央部材と上弦材中央隣接部材との軸力分布比1.125とほぼ等しい値となっている。

図—12に示す上弦材全体の座屈を防いだトラス(No. 3)では，P＝96(kg)付近で剛性が低下してはいるものの常に耐力が上昇しつつ十分に大きな変形能力を呈している。本試験体では，P＝118.09(kg)において試験体左側より2本目の下弦材と節点との接合部で銀ろう付けがはずれたため実験を終了した。

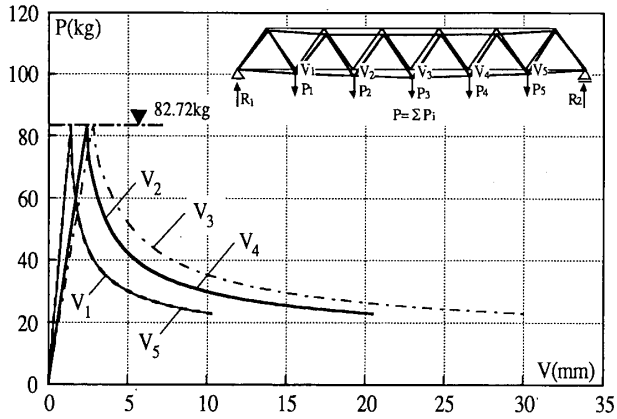
4.3　荷重－部材の軸歪関係

図—14～図—16に各トラス構造の中央より左側の部材に対して，全荷重と軸歪の関係を示す。各図中の記号□－△は，□が図に示す部材番号（左の記号はU：上弦材，D：斜材，L：下弦材を表し，右の数字は試験体

NII-Electronic Library Service

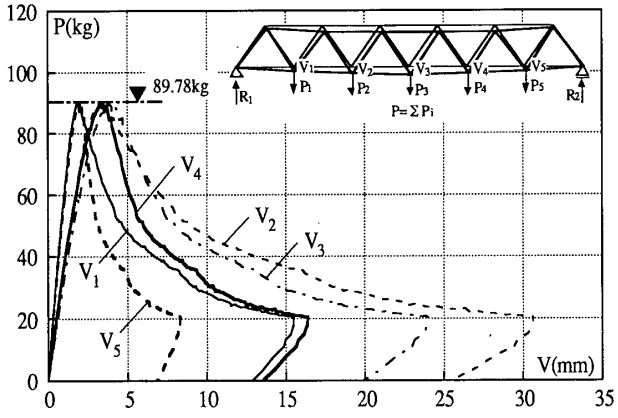


(a) 実験結果

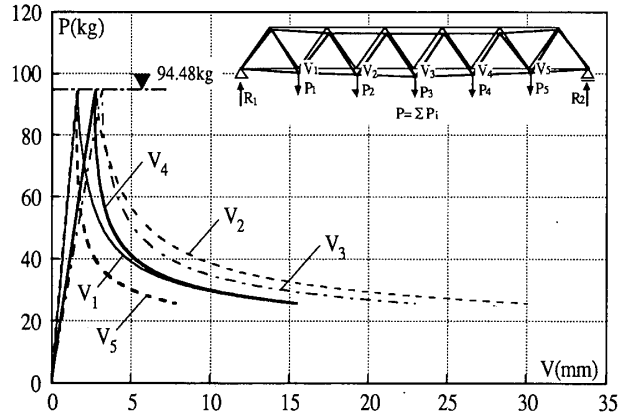


(b) 解析結果

図—10　全荷重－下弦材各節点の鉛直変位関係(No. 1)

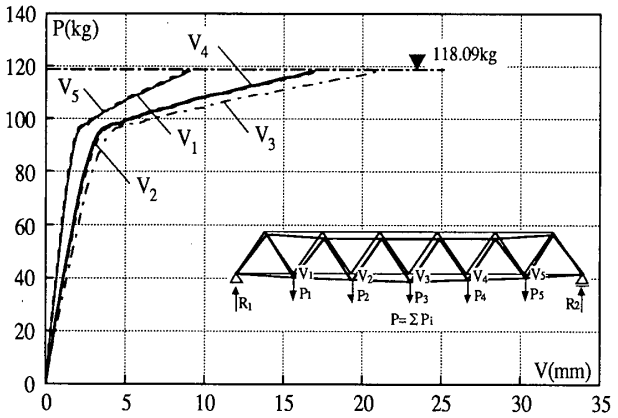


(a) 実験結果

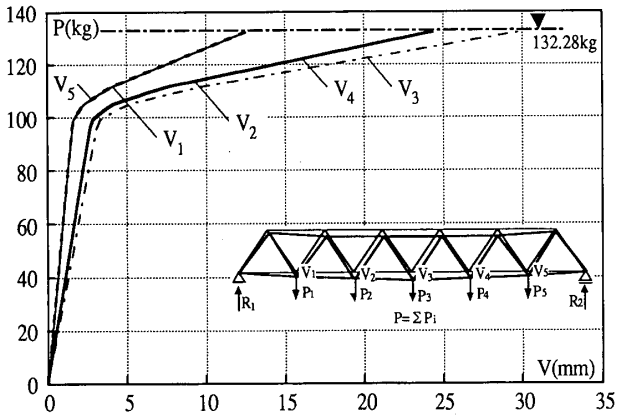


(b) 解析結果

図—11　全荷重－下弦材各節点の鉛直変位関係(No. 2)



(a) 実験結果

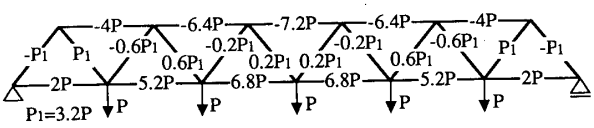


(b) 解析結果

図—12　全荷重－下弦材各節点の鉛直変位関係(No. 3)

表—2　各試験体の最大耐力

試験体記号		No.1	No.2	No.3
実験	最大耐力(kg)	82.88	93.04	120.75
	最大耐力比	1.000	1.123	1.457
解析	最大耐力(kg)	86.50	97.74	125.55
	最大耐力比	1.000	1.130	1.451



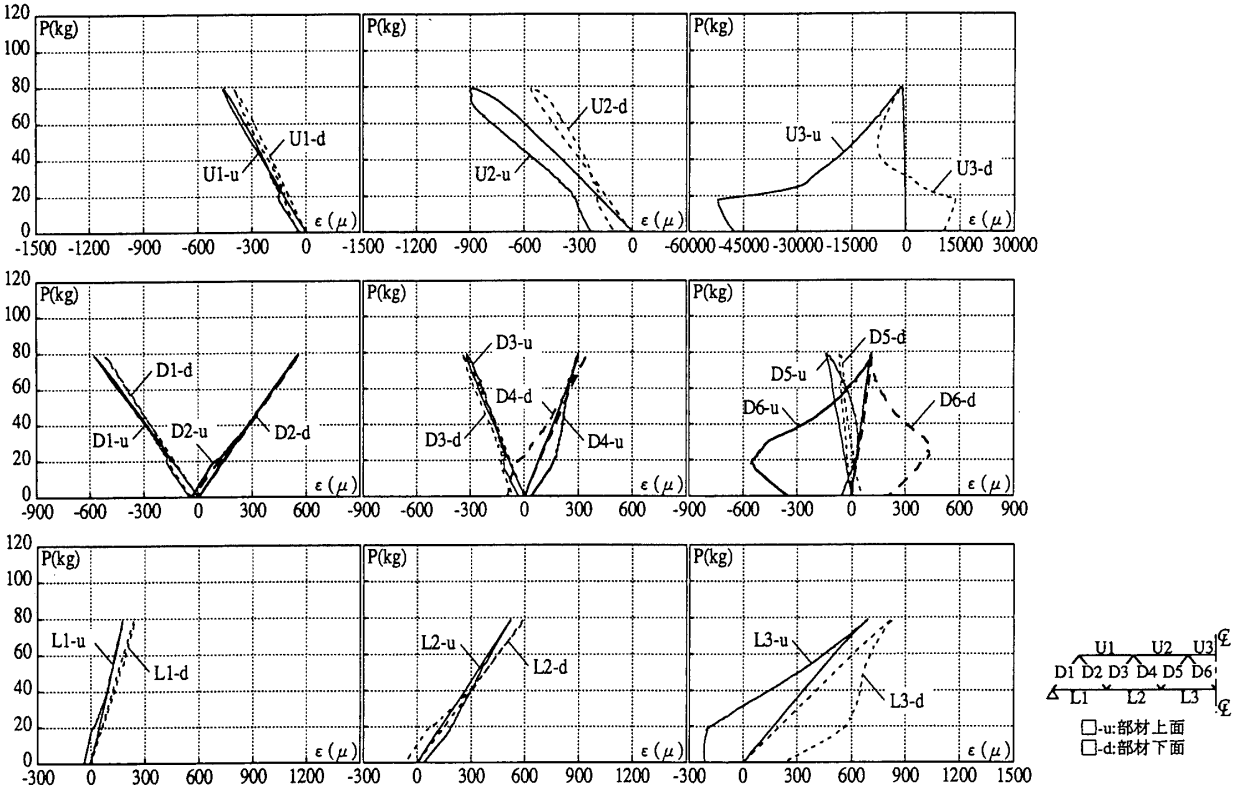
図—13　軸力分布図

NII-Electronic Library Service

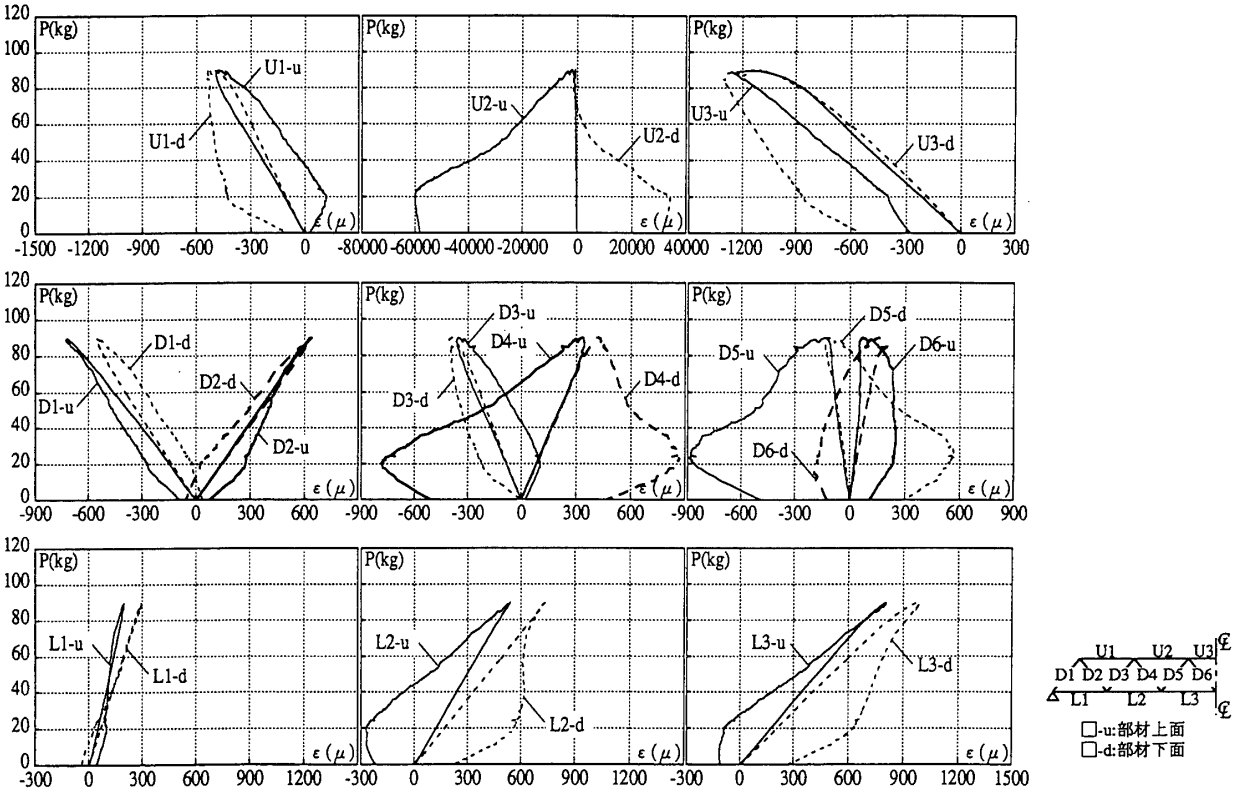
左側の部材より1，2，3，…としている）を示し，△がu：部材上面(実線)，d：部材下面(点線）の軸歪であることを示している。

図—14に示す標準トラス(No.1)では上弦材中央部材(U3)が座屈しており，座屈後はU3の軸変形の進行に伴いU3に近傍の部材が曲げを受けている。特に，U3と隣接した斜材(D6，D7)では曲げを激しく受け，他の部材の歪がU3の座屈後減少しているのに対して歪の増加が激しい。

図—15に示す上弦材中央の座屈を防いだトラス

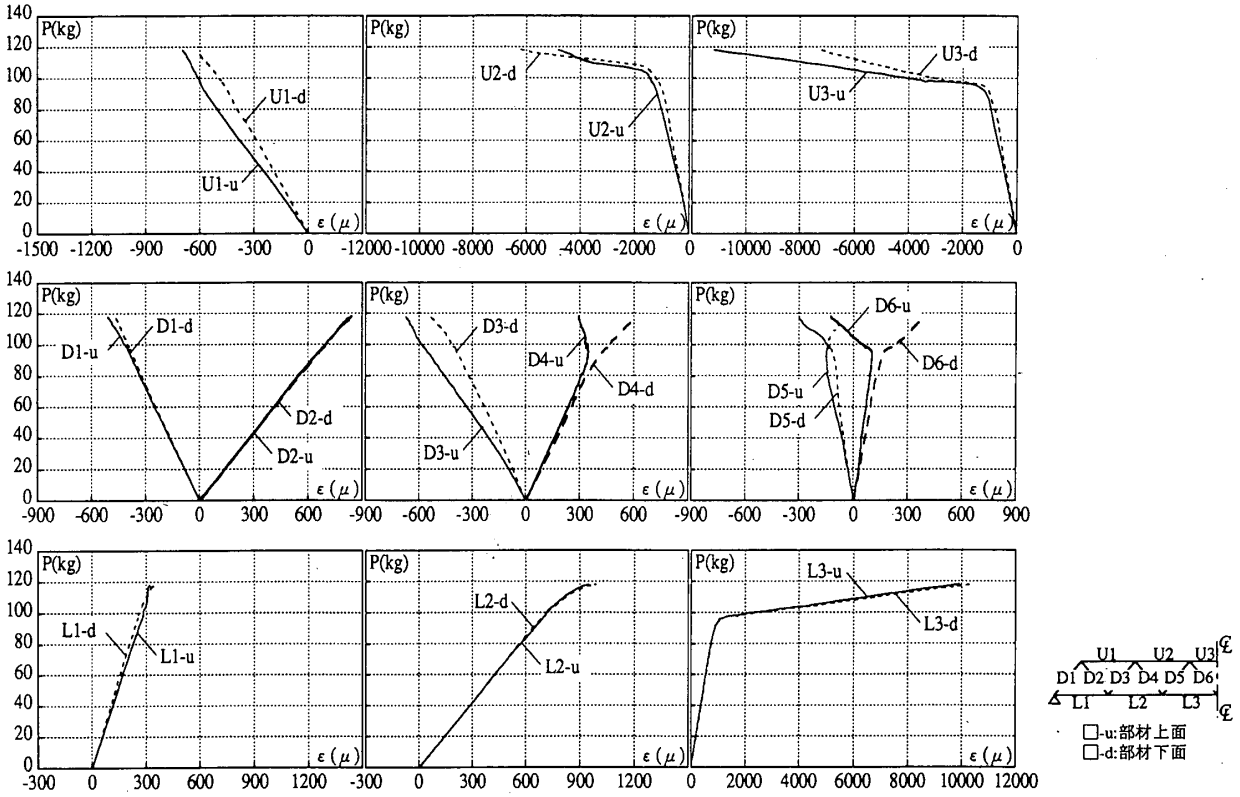


図—14　全荷重－部材の軸歪関係(No.1)



図—15　全荷重－部材の軸歪関係(No.2)

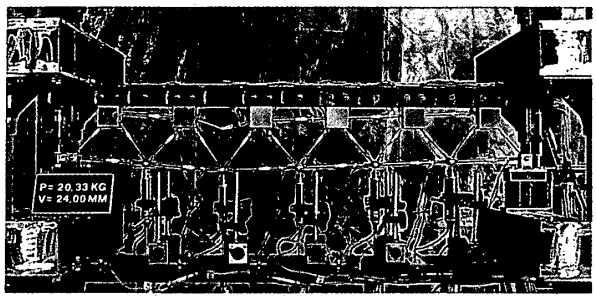
NII-Electronic Library Service

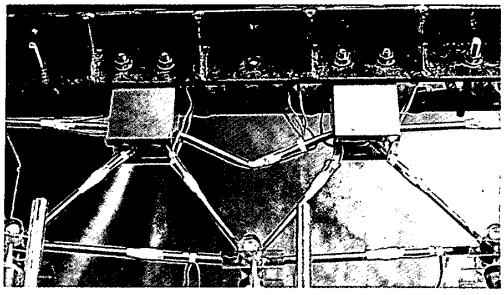


図—16　全荷重－部材の軸歪関係(No.3)

(No.2)では，座屈拘束部材が座屈せず構造物の最大耐力付近で塑性化し始めているが，それに隣接した上弦材(U2)が座屈し構造物の耐力が低下している。U2の座屈後はNo.1と同様の傾向を示している。

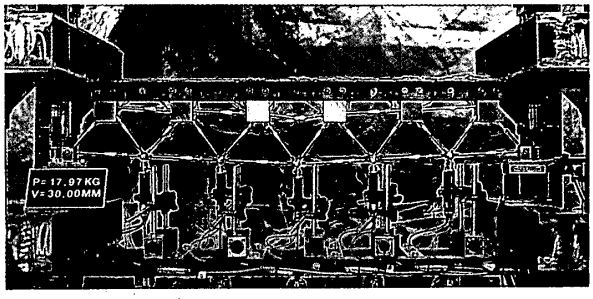
図—16に示す上弦材全体の座屈を防いだトラス(No.3)では，座屈拘束部材であるU2からU4が圧縮力を受けてU2で0.55％，U3で0.92％，U4で0.51％

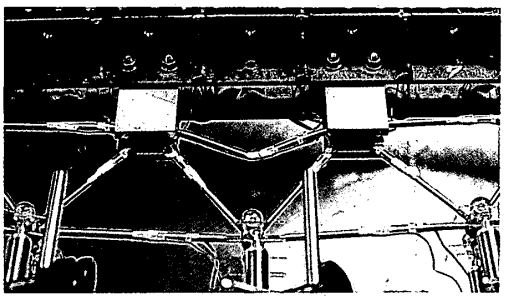




座屈部材

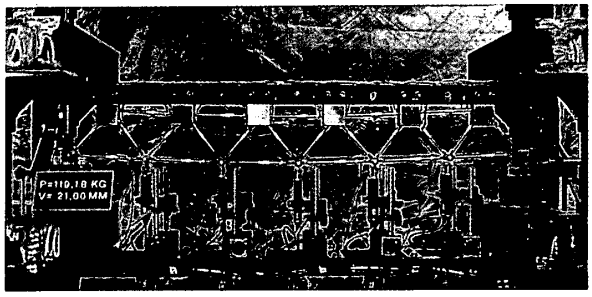
(b) 上弦材中央の座屈を防いだトラス(No.2)





座屈部材

(a) 標準トラス(No.1)



(c) 上弦材全体の座屈を防いだトラス(No.3)

写真—2　最終変形状態

NII-Electronic Library Service

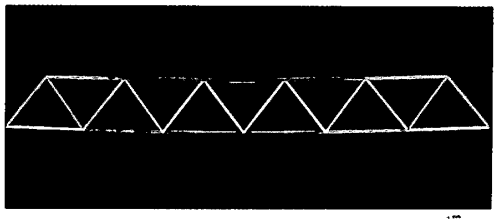
Architectural Institute of Japan

以上の圧縮歪を生じて塑性化しており，座屈拘束部材が有効に機能していることが分かる。その結果，構造物の耐力が上昇するため下弦材中央の2部材(L3，L4)が引張降伏している。また，塑性化した圧縮部材に隣接している斜材は，その圧縮部材の塑性化が進むにつれ曲げを受けている。

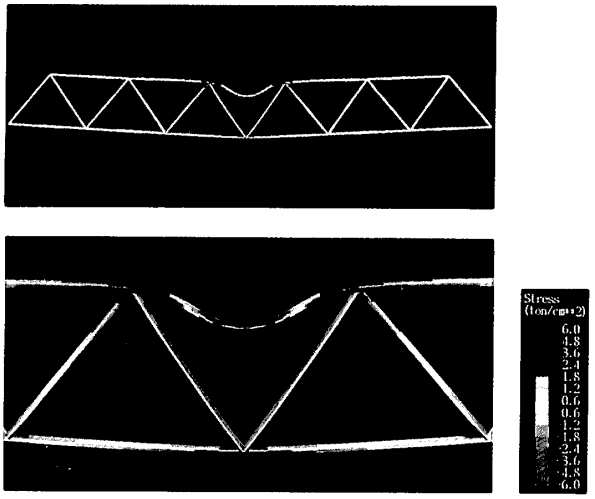
No.2とNo.3の実験結果により，トラス構造の変形性能を向上させるには，軸力が最大となる部材のみではなく，その部材の軸力に近接した軸力の圧縮部材にまで座屈拘束部材を用いる必要があることがわかる。

4.4　最終変形状態

写真—2に最終変形状態を示す。(a)が標準トラス(No.1)，(b)が上弦材中央の座屈を防いだトラス(No.2)，(c)が上弦材全体の座屈を防いだトラス(No.3)である。No.1，No.2では，上弦材が座屈した位置でトラス構造全体としてのヒンジが形成され，両支点を含め3つのヒンジができたため崩壊に至っている。そのため，図—10，図—11より下弦材の各節点の鉛直変位の比 $V_1 : V_2 : V_3 : V_4 : V_5$ を求めると，No.1では1.00：1.99：2.94：1.99：1.01，No.2では1.00：1.98：1.55：1.06：0.54となっており，座屈後は座屈した上弦材の下の下弦材節点と左右の両支点を結んだくの字型の変形モードに移行していることが分かる。特に，座屈後の耐力低下のために座屈しなかった部材の弾性変形が徐々に減少するため，この傾向は最終変形時に最も顕著である。



(a) 最大耐力時 [変形倍率：5倍]



座屈部材周辺の拡大

(b) 最終変形時

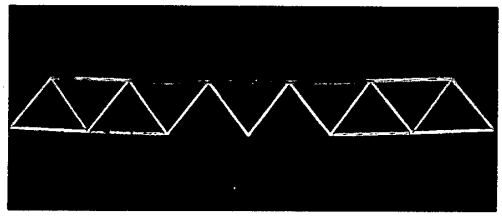
写真—3　解析による応力分布図(No.1)

5. 解析結果

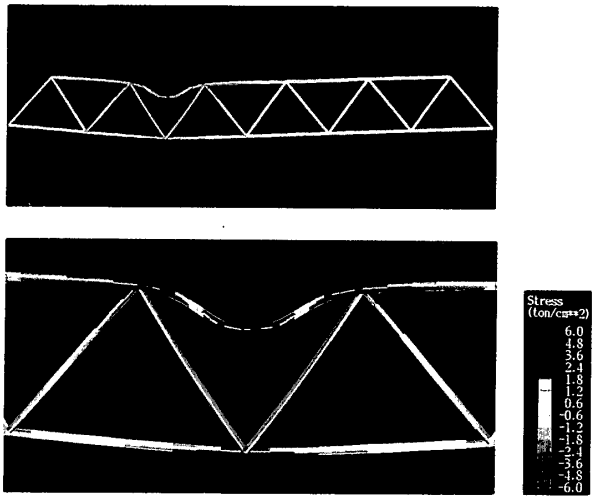
5.1　荷重－変位関係

図—10～図—12の各図(b)に解析による各トラス構造の全荷重と下弦材各節点の鉛直変位の関係を示す。鉛直変位は，試験体左側の下弦材節点より V_1，V_2，…，V_5 のように表している。

本解析では，ステレンス部材の応力－歪関係を図—8に示すbi-linear型に仮定しており，素材試験より降伏応力度の設定が多少大きく，また，塑性剛性が歪硬化が



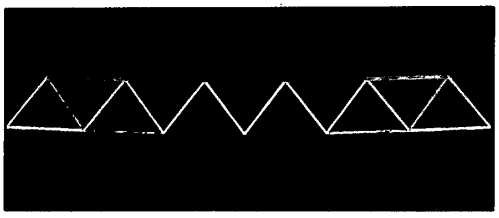
(a) 最大耐力時 [変形倍率：5倍]



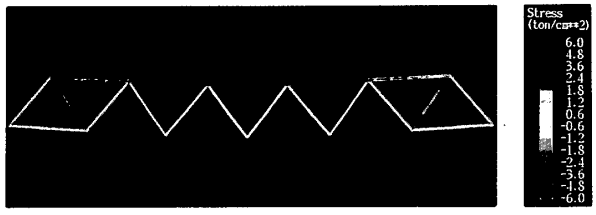
座屈部材周辺の拡大

(b) 最終変形時

写真—4　解析による応力分布図(No.2)



(a) P=99.12 kg [変形倍率：5倍]



(b) 最終変形時

写真—5　解析による応力分布図(No.3)

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

始まる点では小さく高歪域では大きくなっている。そのため，解析結果の方が実験結果より構造物の耐力を上回っており，上弦材が座屈し耐力の低下する試験体では座屈後の耐力低下が急であり，その後緩くなっているが，本実験結果のトラス構造の性状とよい対応を示してはいるものの解析結果が実験結果を上回るのは，この他に，実験では節点において多少面外方向の変形を許容しており完全に剛接合ではないこと，試験体制作上生じた部材の偏心等の影響が考えられる。

上弦材全体の座屈を防いだトラス(No. 3)では $V_3=30$ (cm)に達しても耐力の低下が見られなかった。

5.2. 部材の応力分布および変形状態

写真—3に標準トラス(No. 1)，写真—4に上弦材中央の座屈を防いだトラス(No. 2)，写真—5に上弦材全体の座屈を防いだトラス(No. 3)での部材の応力分布状態および変形状態を示す。(a)がNo. 1とNo. 2については構造物の最大耐力時，No. 3では $P=99.12$(kg)での部材の応力分布状態および変形状態であり，(b)が解析終了時での部材の応力分布状態および変形状態である。また，(a)では変形を5倍に誇張して示している。

最大耐力時では，部材の応力分布状態は，図—13の軸力分布状態のように，弦材では構造物の中心の部材ほど，斜材では端部の部材ほど応力が大きくなっている。

No. 1，No. 2のように部材が座屈すると座屈する部材周辺に応力が集中し，他の部材は応力が減少している。特に，座屈部材に隣接した斜材には応力が集中しており，曲げを受けていることがわかる。No. 3では，解析終了時には $P=99.12$(kg)時より更に応力が増加しており，上弦材中央およびそれに隣接した座屈拘束部材が有効に働いており，下弦材中央の2部材が引張降伏していることがわかる。また，No. 1，No. 2が座屈した上弦材の下の下弦材節点で折れ曲がったくの字型の変形モードであるのに対して，No. 3では弓なりの安定した変形モードを示していることがわかる。

6. 結　論

ステッピングモーターを用いた本加力システムにより，3種類のトラス構造に対して縮小模型実験を行い，更に同構造物について数値解析を行うことにより，以下の結論が得られた。

1) ステッピングモーター，ウォームギアを用いパーソナルコンピューターで自動制御することにより，微妙な荷重制御ができ，また，構造物の耐力低下時の負勾配域までゆっくりと測定可能な高い剛性の加力装置システムの構築ができた。

2) 本平面静定トラス構造では，耐力低下に起因する圧縮部材に心材を挿入し座屈を拘束することによって，耐荷能力の向上変形性能の改善が計れる。その際，圧縮軸力が最大となる部材のみならず，その軸力と近傍の圧縮部材まで座屈を拘束する必要がある。

3) 本解析結果は実験結果の性状と良い対応を示しており，本加力システムによる縮小模型実験の妥当性を示している。また，数値解析により，一層座屈拘束部材の有効性が明らかにされた。

4) 耐力低下に起因する圧縮部材に座屈拘束部材を用いることによって，大地震時にはトラス構造の塑性化を許容することができ，トラス部材に心材を挿入する本方法は耐震設計上有用であると考える。

謝　辞

東京工業大学助教授・林　静雄博士，東京工業大学助手山田貴博博士には，日頃有益な御指導・御助言を頂いています。愛知産業大学助教授・坂田弘安博士には，実験ならびに解析結果のコンピューターグラフィックに関し御助言を頂きました。東京工業大学文部技官・石井元氏，宗像光博氏には，試験体製作および実験にあたり，多くの御教示・御協力を頂きました。

新日本製鐵株式會社・鷲頭志郎氏，東京工業大学助教授・三島良直博士，高周波熱錬株式会社，株式会社熊谷組，株式会社間組技術研究所には，実験にあたり大変お世話になりました。実験における測定プログラムの作成に当り，日本工業大学専任講師・高橋雅充氏には有益な御助言を頂きました。

実験全般を通して，日本工業大学大学院生・軍司雅弘君，東京工業大学大学院生・尾上清治君，西尾博人君の多大な協力を得ました。また，実験中には東京工業大学助手・香取慶一助手，同大学大学院生・市橋重勝氏，黄一華氏，伊藤嘉晃君，吉田献一君，岡西　努君，藤川昌作君，同大学研究生・東　健二氏に御協力を頂きました。

ここに心より感謝の意を表します。

また，解析においては東京工業大学総合情報処理センター内のETA[10]を利用しました。関係者各位に御礼申し上げます。

参考文献

1) G A R Parke and H B Walker : A Limit State Design of Double-Layer Grids, 3rd International Conference on Space Structures, pp. 528～532, Sept. 1984
2) 鈴木弘之，那花弘行，前田恒一：鉄骨剛接トラスの荷重～変形性状（その3），日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 723～724，1985年10月
3) C. Marsh : Improving Space Truss Performance by Member Removal, Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, pp. 215～220, Sept. 1986
4) C. Marsh and M. F. Fard : Optimisation of Space Trusses Using Non-linear Behaviour of Eccentric Diagonals, 3rd International Conference on Space Structures,

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

pp. 669～671, Sept. 1984
5) A. Hanaor and R. Levy : Imposed Lack of Fit as a Means of Enhancing Space Truss Design, Space Structure, pp. 33～40, 1985
6) A. Hanaor, R. Levy and N. M. Rizzuto : Investigation of Prestressing in Double Layer Grids, Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, pp. 73～80, Sept. 1986
7) 鈴木敏郎，小河利行，木村　衛，金子洋文，石田大三，堀辺貴史：プレストレス鋼管トラス梁の力学性状に関する研究（その1，その2），日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 1217～1220，1991年9月
8) 木村　衛，鈴木敏郎，小河利行，金子洋文，太田秀彦，石田大三：外部釣合系プレストレス部材の圧縮挙動について，日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 1173～1174，1992年8月
9) 松井千秋，河野昭彦，大串勝利：弦材にコンクリートを充填した鋼管トラスの曲げねじれ座屈と変形性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 1293～1294，1987年10月
10) 松井千秋，河野昭彦：繰返し水平力を受けるコンリクート充填鋼管トラス柱の弾塑性挙動に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 1361～1362，1988年10月
11) 鈴木敏郎：鉄骨部材の性能を改善するための一つの試み，日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 1143～1144，1992年8月
12) 鈴木敏郎，小河利行，伊藤武司，堀辺貴史，澤田　毅：中間材を導入した複層立体トラス構造の力学特性に関する研究（その1，その2），日本建築学会大会学術講演梗概集B，pp. 1609～1612，1992年8月
13) 本間通康，鈴木敏郎，小河利行，五十嵐規矩夫：中間材を導入した鋼管トラス梁の塑性変形能力に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 1149～1150，1992年8月
14) Lewis C. Schmidt and Ariel Hanaor : Force Limiting Devices in Space Trusses, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST5, pp. 939～951, May 1979
15) Ariel Hanaor and Lewis C. Schmidt : Space Truss Studies with Force Limiting Devices, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. ST11, pp. 2313～2329, Nov. 1980
16) 脇山広三，今井克彦，多田元英，近藤史朗：トラス材の応力制限機構に関する研究（その1，その2），日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 1287～1290，1990年10月
17) 多田元英：応力制限機構を挿入した2層立体トラスの載荷能力に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第433号，pp. 103～112，1992年3月
18) 米山隆也，多田元英：摩擦型応力制限機構(FLD)に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 1237～1238，1992年8月
19) Ariel Hanaor, Cedric Marsh and Gerard A. R. Parke : Modification of Behavior of Double-Layer Grids : Overview, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 1021～1037, May 1989
20) 脇山広三，多田元英，桑原　進，米山隆也，今井克彦：二重鋼管の補剛効果に関する研究（その1～その3），日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 1281～1286，1991年9月
21) 脇山広三，多田元英，桑原　進，米山隆也，今井克彦：二重鋼管の補剛効果に関する研究（その4，その5），日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 1469～1472，1992年8月
22) 桑原　進，多田元英，米山隆也，今井克彦：二重鋼管の補剛性能，日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会資料，pp. 1～9，1992年9月
23) B. N. Sridhara : Sleeved Structural System
24) 長谷川正義監修：ステンレス鋼便覧，日刊工業新聞社，p. 104，1976年11月
25) ASM : Source Book on Stainless Steels, pp. 6～14, pp. 162～163
26) 藤田輝夫：ステンレス鋼の熱処理，日刊工業新聞社，pp. 109～154，1970年10月
27) C. A. ゾッフィー，長谷川正義監訳：ステンレス鋼入門，特殊鋼倶楽部，pp. 209～237，1965年7月
28) 藤本盛久，和田　章，白方和彦，小杉　立：筋違付鉄骨ラーメンの弾塑性解析に関する研究，日本建築学会論文報告集，第209号，pp. 41～51，1973年7月
29) 吉田　裕：有限要素法による幾何学的非線形構造解析法の現状と課題，土木学会論文集，第374号，I－6，pp. 25～37，1986年10月
30) Bruce W. R. Forde and Siegfried F. Stiemer : Improved Arc Length Orthogonality Methods for Nonlinear Finite Element Analysis, Computers & Structures, Vol. 27, No. 5, pp. 625～630, 1987

（1992年12月10日原稿受理，1993年2月26日採用決定）

NII-Electronic Library Service