日本建築学会・情報システム技術委員会
第15回情報システム利用技術シンポジウム　1992

トラス模型実験における自動加力制御の一手法

○向　秀元[*1]、渡辺　厚[*2]、岩田　衛[*2]、市橋重勝[*1]、和田　章[*3]

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の方法が用いられている。トラス構造物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、大きな力を受けた構造部材が靭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靭性があるとは言えず、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。

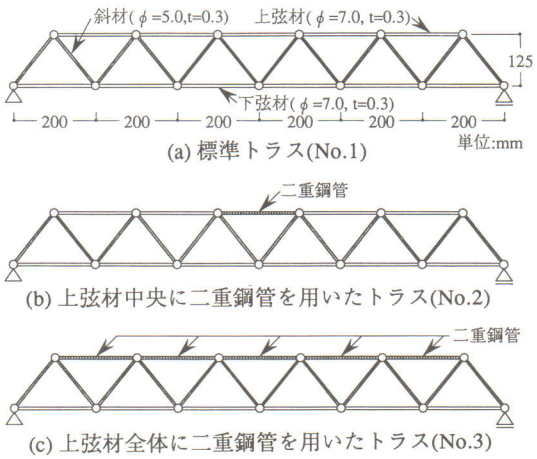
本研究では、トラス構造物の圧縮部材として中心に心棒となる鋼管(以降、心材と記す)を挿入し、心材の弾性座屈荷重を母材の降伏軸力より大きくし座屈を防止することによって圧縮部材の靭性を向上させ、トラス構造の耐荷能力の向上・変形性能の改善を計ることを考えている。この考え方は、PC版の中に平鋼のブレースを挿入したり、鋼材のブレースの周囲を鋼管コンクリートや鉄筋コンクリートでおおい座屈を防止したブレースの考え方と同じである。圧縮材の中心に心材を挿入する方法は多田等[1)-3)]も実験研究を行っている。

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、分布荷重として加力する場合、各加力点の荷重は極端に小さい。そのため、加力点の微小な荷重を同時に各々コントロールすることは難しく、従来、トーナメント方式により一点でターンバックルやおもり等によって加力されている。ここでは、各加力点毎の加力制御および任意の加力形式か可能な自動加力システムを構築する。

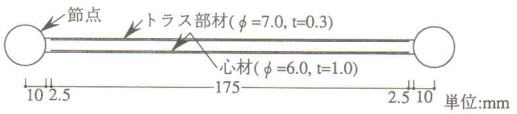
2．試験体および加力方法

2.1 試験体　試験体は、図―1に示すように、1グリッド20cm、スパン120cm、高さ12.5cmの平面静定トラス構造であり、通常のトラス(No.1)、上弦材中央の座屈を防いだトラス(No.2)および上弦材全体の座屈を防いだトラス(No.3)の計3体である。ただし、No.3の試験体については実験中のため、本論では、No.1、No.2の2体について記す。

トラス部材としては、弦材には直径7.0mm、肉厚0.3mm、斜材には直径5.0mm、肉厚0.3mmのステンレス鋼管を用い、節点とは銀ろう付けにより接合する[写真―1(b)]。試験体No.2、No.3に用いた座屈を拘束した部材を図―2に示す。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透き間を設け、また両端の節点とは接合しない。また、母材の降伏荷重(P_y=155.3kg)が心材のオイラーの座屈荷重($P_E=\pi^2EI/l^2$=247.6kg)より低くなるよう部材断面を選定し、その際、P_E/P_y=1.59の安全率を見込んでいる。なお、ステンレス部材は、冷間引き抜き加工されており、素材試験の結果[表―1、図―3]、0.2%耐力が通常の約3.1倍と高く銀ろう付け部分の



図―1　試験体



図―2　二重鋼管部材

強度不足となってしまうため、1050℃で5分間加熱後自然空冷し焼きなましをして用いる[5)-7)]。

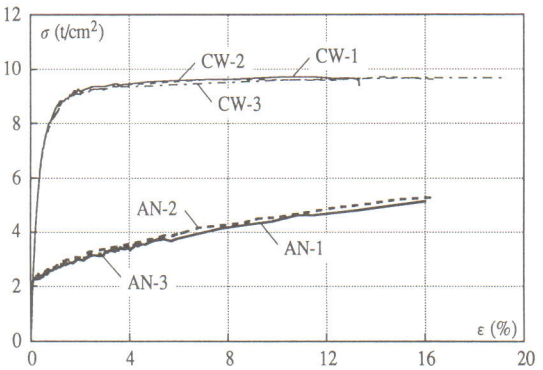
2.2 加力方法　図—4、写真—1に加力装置を示す。載荷は、ウォームフォイールの中心にめねじが切ってあり、パソコンでスッテピングモーターを制御しウォームギアを回転させることで、シャフトを締め付け軸棒に引張力を与えて行う。シャフトには溝を設け、上下で軸受けによりベアリングを溝にはめ込むことでウォームギアの回転による「とも回り」を防いでいる。また、軸棒の両端にリンクボールを取付け、中央に取付けたロードセルに曲げが働かないようにし、トラス節点の上下左右の変形に追従できるようにしている。加力は各軸棒のロードセルが等荷重となるように制御しながら、下弦材の節点の鉛直変位の最大が3.0cmになるまで行った。

トラス構造物の変形は下弦材の各節点に取付けた変位計、耐力は支点に取付けたロードセル、歪みは各部材中央に貼付した歪みゲージにより測定する。

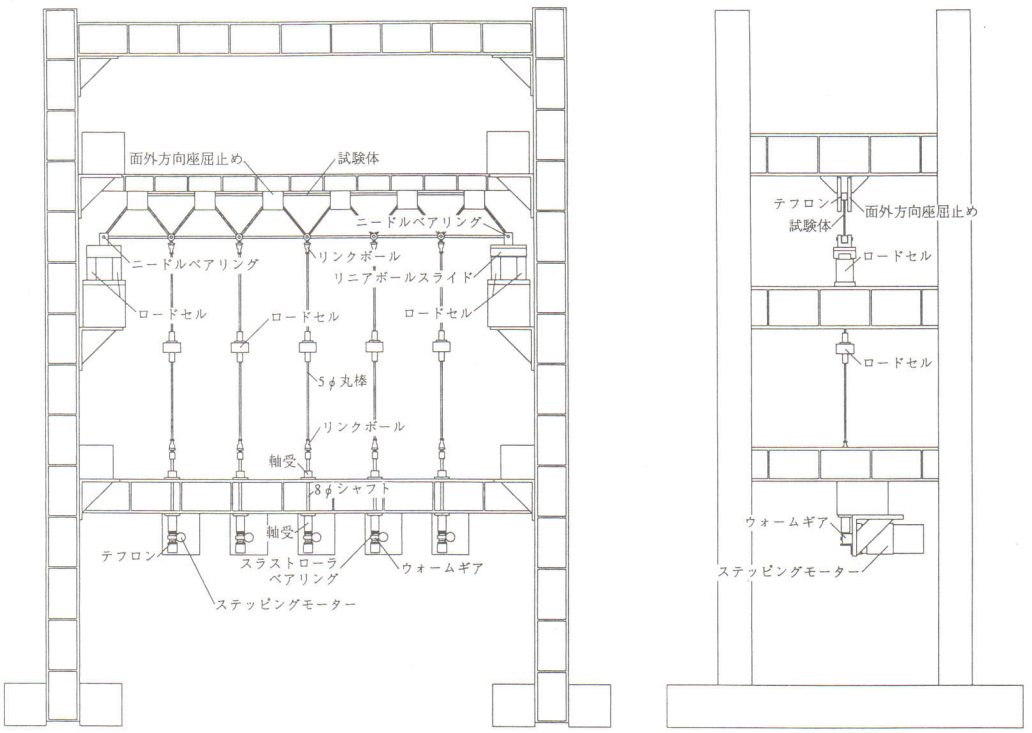
表—1　部材の断面性能および素材試験結果

素材試験体種類	記号	外形 (mm)	厚さ*1 (mm)	断面積 (mm^2)	弾性剛性 (t/cm^2)	0.2%耐力 (t/cm^2)	引張強度 (t/cm^2)
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

*1: 外形および重量を測定し、密度を8.03g/cm^3 [4)]として算出した。



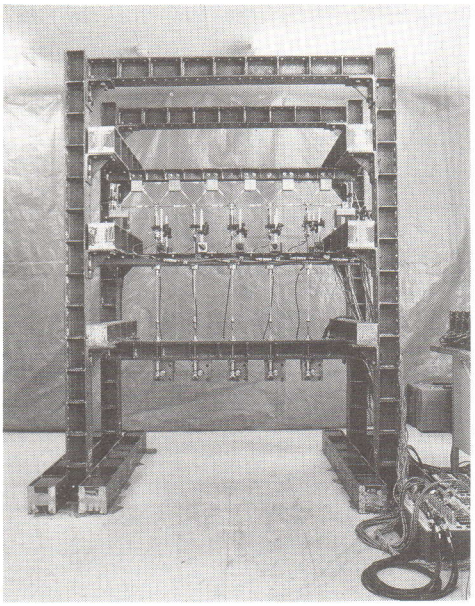
図—3　ステンレス部材の応力—歪み関係



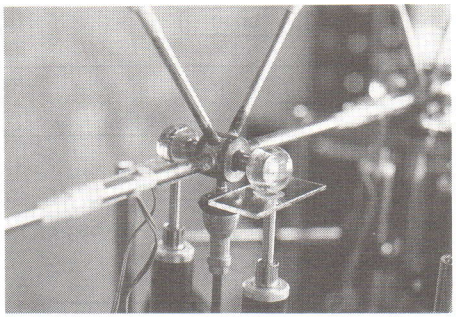
図—4　加力装置

3．加力制御システム

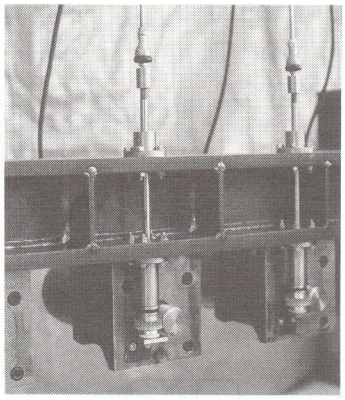
3.1 加力システム　本実験における加力システムを図—5に示す。パソコンにRS232Cを通して多軸コントローラー、GPIBを通して測定器を繋ぎ、荷重・変位等の測定とともに多数のステッピングモーターを同時に自動制御する。各ステッピングモーターに対し変位計およびロードセルを対応させることで、測定器を通してパソコンに取り入れられた荷重値または変位値と制御値を比較することでモーターの作動制御を行う。ステッピングモ



(a) 全体

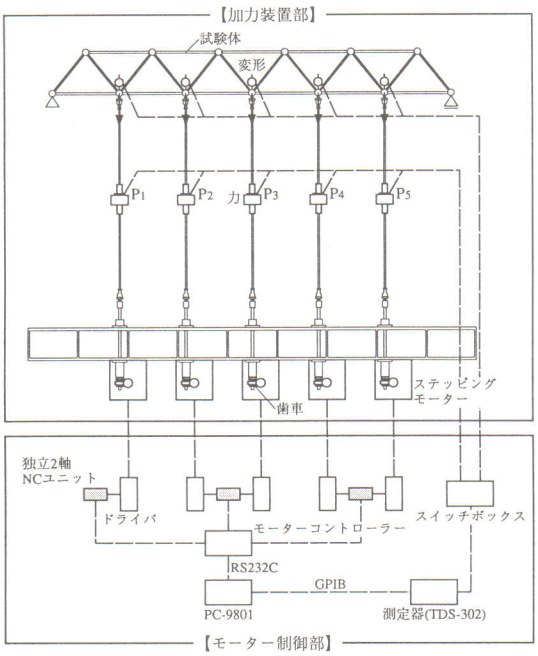


(b) 下弦材節点



(c) モーター加力部

写真—1　加力装置部分詳細



図—5　加力システム

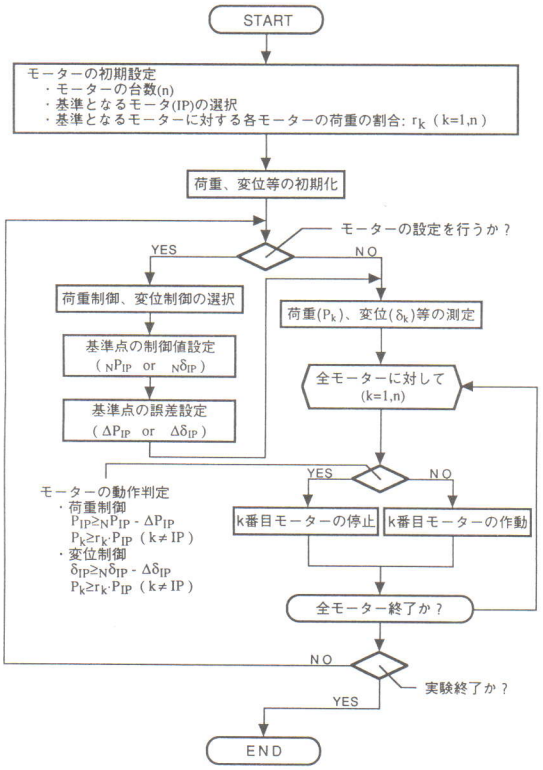
ーターでは油圧式ポンプとは違って変位制御が容易であり、加力装置としての剛性も高いため、部材の座屈後の負勾配領域まで簡単に測定が可能である。

3.2 モーターの制御方法　図—6にモーターの制御方法のフローチャートを示す。載荷は、基準となるモーターに対応するロードセルの荷重値を基にその他の荷重値を比例させる方法による。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加力する。

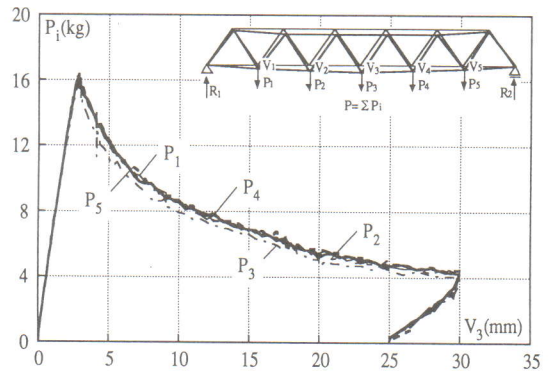
モーターの作動・停止は、基準点のモーターは対応する荷重または変位が[制御値-許容誤差]以上になると停止するようにし、その他のモーターは基準点のモーターに対応するロードセルの値以上になると停止し、その値より低くなると作動するようにする。ここでは、測定器にTDS-302を用いており測定に多少の時間がかかるため、測定時には毎回モーターは停止させている。測定器の性能が高速化すれば、より連続的なモーターの作動が可能である。

4．実験結果

4.1 モーター制御　図—7に標準トラスでの各軸棒の力—下弦材中央の鉛直変位の関係を示す。試験体左側の



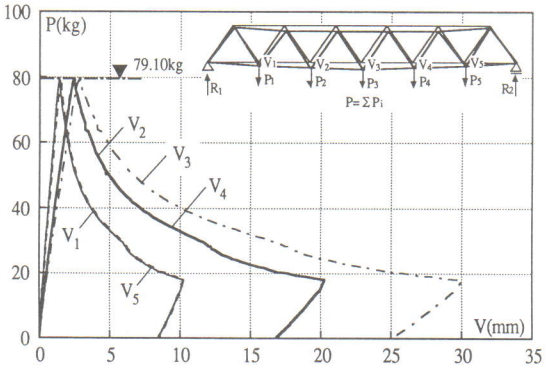
図—6　モーター制御フローチャート



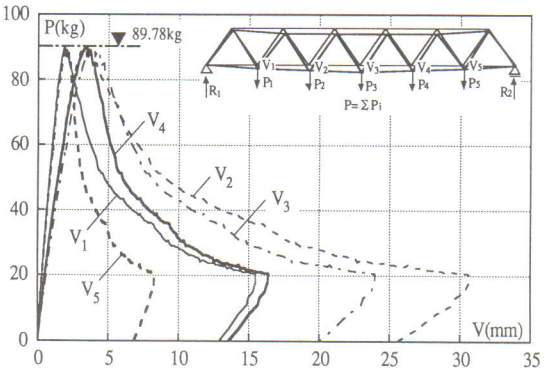
図—7　各節点力—下弦材中央節点の鉛直変位関係(No.1)

軸棒のロードセルより$P_1,P_2,\cdots,P_5$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。上弦材中央が座屈するため、最大耐力以降P_3が多少低くなるが、5本の軸棒ともほとんど等しい力が作用されていることがわかる。

4.2 荷重—変位関係　図—8に全荷重—下弦材各節点の鉛直変位の関係を示す。(a)が標準トラス(No.1)、(b)が上弦材中央に二重鋼管を用いたトラス(No.2)である。No.1では上弦材中央が座屈し急激に耐力が低下しているが、No.2では二重鋼管が座屈しないため耐力は標準

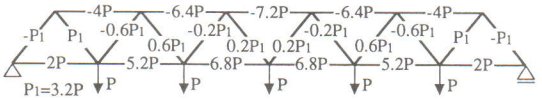


(a) 標準トラス(No.1)



(b) 上弦材中央に二重鋼管を用いたトラス(No.2)

図—8　全荷重—下弦材各節点の鉛直変位関係



図—9　弾性時の軸力分布

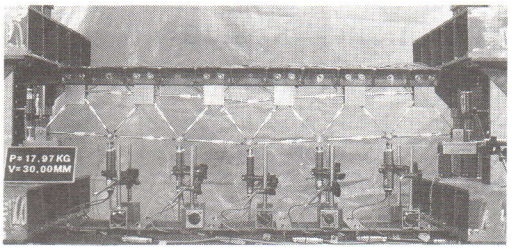
表—2　各試験体の最大耐力

試験体記号	No.1	No.2
最大耐力(kg)	79.10	89.78
最大耐力比	1.000	1.135

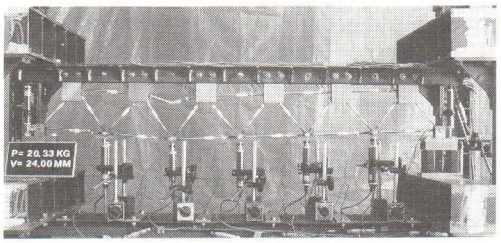
トラスよりも上昇し、その後、隣接した上弦材が座屈荷重に達し座屈するため耐力が低下している。

図—9に計算による弾性時の軸力分布、表—2に実験による最大耐力を示す。No.1では上弦材中央、No.2では上弦材中央に隣接した上弦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1.135は上弦材中央とそれに隣接した上弦材との軸力分布比7.2/6.4=1.125とほぼ等しい値となっている。

4.3 最終変位状態　写真—2に最終変位状態を示す。(a)が標準トラス(No.1)、(b)が上弦材中央に二重鋼管を用いたトラス(No.2)である。両者とも、上弦材が座屈した位置で3ヒンジが形成され崩壊過程をたどっている。従



(a) 標準トラス(No.1)



(b) 上弦材中央に二重鋼管を用いたトラス(No.2)

写真―2　最終変形状態

って、図―8において、下弦材の各節点の鉛直変位は、座屈前は変形モードが曲線を呈しているが、座屈後は座屈した上弦材の下の下弦材節点と支点を結んだくの字型の変形モードと移行している。

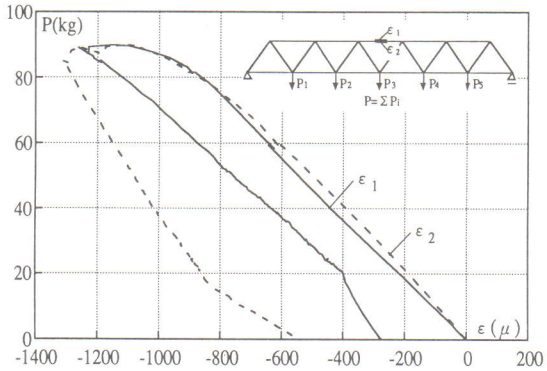
4.4 二重鋼管の荷重―軸歪み関係　図―10に上弦材中央に二重鋼管を用いたトラスの全荷重―上弦材中央部材の軸歪み関係を示す。二重鋼管の母材は最大耐力付近で座屈せずに圧縮力を受けて塑性化し始めており、二重鋼管が有効に働いているが、図―9に示したように上弦材中央と隣接上弦材の軸力が近接しているため、隣接した上弦材が座屈し構造物の耐力が低下している。従って、本試験体では耐荷能力は向上したが、変形性能の改善は果たせなかった。しかし、上弦材全体に二重鋼管を用いた試験体(No.3)では、変形性能の改善が期待できる。

5．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るトラス構造の縮小模型実験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ソコン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最初の圧縮部材を二重鋼管にするのみでも耐力が上昇した。従って、その部材と軸力が近傍の圧縮部材にまで二重鋼管にすることで、より耐荷能力が向上し、変形性能の改善も計れることが期待できる。



図―10　全荷重―上弦材中央部材の軸歪み関係(No.2)

【謝辞】

本実験を行うに際し、多くの方々の御指導、御協力を得ました。

東京工業大学助教授・林　静雄博士、同大学助手山田貴博博士には、終始、御指導・御助言を戴きました。同大学文部技官・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・御協力を戴きました。

新日本製鐵株式會社・鷲頭志郎氏、高周波熱錬株式会社・倉重正義氏、小峰善夫氏、高岡憲久氏にはステンレス部材の焼きなましに関し非常にお世話になりました。株式会社熊谷組・佐野秀男氏、株式会社間組技術研究所・堀　昭夫氏、島崎和司氏、紺野弘毅氏には、測定機器、素材試験等で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戴きました。

実験全般にわたり、日本工業大学・軍司雅弘氏、東京工業大学和田研究室の尾上清治氏、西尾博人氏に御協力を戴きました。また、実験中には、同研究室の黄　一華氏、伊藤嘉晃氏、吉田献一氏ならび同大学林研究室の香取慶一助手、東健二氏、岡西　努氏、藤川昌作氏に御協力を戴きました。

ここに記して、厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

1) 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，PP.1281～1286，1991年9月
2) 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，PP.1469～1472，1992年8月
3) 多田元英，桑原　進，米山隆也，今井克彦：二重鋼管の補剛性能，鉄骨構造部会資料，PP.1～9，1992年9月
4) 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
5) ASM：Source Book on Stainless Steels，pp.6～14,pp.162～163
6) 藤田輝夫：ステンレス綱の熱処理，日刊工業新聞社，pp.109～154，1970年10月
7) C.A.ゾッフィー，長谷川正義 監訳：ステンレス綱入門，特殊鋼倶楽部，pp.209～237，1965年7月

*1:東京工業大学大学院生、*2:新日本製鐵株式会社、*3:東京工業大学教授

An Automatic Control Experimental System for the Small Scale Truss Model Structures

Hidemoto Mukai*, Atsushi Watanabe**, Mamoru Iwata**,
Shigekatsu Ichihashi* and Akira Wada*

There is a great demand for the construction of large space structures such as the atriums attached to tall buildings and the large roofs of baseball stadiums. For the most case, steel trusses were used as the structural type. It is very important to ensure the same safety against earthquakes for these steel truss structures and for the general buildings, as Japan has the highest frequency of earthquakes in the world.

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.

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.

In this study, three experiments for the small scale model of the steel truss structures, with the non-buckling members for the compressive forces, were performed to investigate the mechanical properties of the structures. The size of the span for each planner statically determinate steel truss model for experiments was 120cm, and the height of the model was 12.5cm. Stainless steel pipes were used for the members. The sizes of chord members were 20cm in length, 7.0mm in diameter, and 0.3mm in thickness. The length of the diagonal members was 16cm, with a diameter of 5.0mm, and a thickness of 0.3mm. The sizes of the inside pipes to protect bucklings were 17.5cm in length, 6.0mm in diameter, and 1.0mm in thickness.

The loading was performed by rotating the warm-gear by using stepping motor through the round steel bar attached to the nodal point placed on the chord members. Five loading systems were used simultaneously for this experiment. The stepping motors were controlled automatically, taking data of loads, deformations, and so on at the same time.

With these experiments, the results were acquired as followings,

1. By controlling the stepping motors with the personal computer automatically, it is possible to perform the delicate controls for the loadings. The high stiff loading system that can catch negative slope data after the chord member was buckled could be produced.

2. The improvements for the force-deflection relationship were showed with protecting the buckling of the members.

---

* Tokyo Institute of Technology
** Nippon Steel Corporation