非対称鉛直力を受ける大スパン2層立体トラスの静的模型実験

合せ扇形平面でライズを有する大スパン立体トラスに関する研究 (その1)

STATIC TEST OF A MODEL OF A LONG-SPAN DOUBLE-LAYER
SPACE TRUSS UNDER UNSYMMETRICAL VERTICAL LOAD

Long-span space truss with a rise and a semicircle-connected plan (Prat 1)

堀 昭夫*, 島崎和司**, 和田 章***

Akio HORI, Kazushi SHIMAZAKI and Akira WADA

A 1/100 scale model of a double-layer space truss designed for a long-span retractable roof was loaded statically. Its rise-span ratio is about 0.20 and members were made of copper pipes.

Single chord tests showed that the elasto-plastic axial force could be obtained from experimental strains. Results of elasto-plastic buckling analyses were well-agreed with experimental ones.

At the overall-model test, coupled chord bucklings were observed and they caused a general instability. Buckling length of a chord in a rigid-jointed truss can be approximated as that of coupled buckling of two chords, when elasto-plastic chord bucklings precede to others.

Keywords : space truss, static test, double layer, rise, coupled buckling, buckling length

立体トラス, 静的実験, 2層, ライズ, 連成座屈, 座屈長さ

1. はじめに

開閉ドームに象徴されるような大スパン構造物の建設が近年増加しているが, スパンが100~200 m 程度になると複層立体トラスにライズを与える方法がよく採用される。

複層立体トラスの実験に関しては, これまでいくつかの研究が報告されている。例えば2層立体トラスでは, 部材に外径12 mmのアルミニウム管を用いたトラス平板に面外載荷した Schmidt らの研究¹⁾や, 部材に外径10 mm程度の鋼管を用いて面外載荷実験を行い解析と比較した Collins の研究²⁾等がある。これらはいずれもライズのない立体トラス平板に面外載荷したもので, 特に大スパンを想定したものではない。また送電鉄塔の実大実験を行って解析と比較した鈴木・佐藤らの最近の研究³⁾もあるが, 塔状鋼管トラスが主対象となっている。ライズを持つ複層立体トラスの実験はほとんど見あたらないのが現状である。

一方, 複層立体トラスの弾塑性挙動に関する最近の解析的研究としては, 2層立体トラス平板の基本ユニット

を1つの集合要素に置換し解析した鈴木・小河らの研究⁴⁾, 2層立体トラス平板の鉛直荷重による連鎖的崩壊を検討した Smith の研究⁵⁾, 個材の座屈と破断を考慮し2層立体トラス平板を解析した和田・久保田の研究⁶⁾, 立体トラス平板の荷重-変形性能の向上方法をまとめた Hanaor らの報告⁷⁾, 1方向大スパン2層円筒トラスの地震応答解析を行った和田・向の研究⁸⁾, 正方形網目と菱形網目からなる立体トラス平板の有効強度を調べた坂・日置らの研究⁹⁾等がある。また複層立体トラスではないが, 直交交差型トラス平板の上下動による応答を解析した加藤・石川らの研究¹⁰⁾, ラチスアーチの構面内弾性座屈に関する日置・村上らの研究¹¹⁾も発表されている。

しかしこれらの解析的研究においても, ライズを有する複層立体トラスを対象にしたものは文献⁸⁾がある程度にすぎない。なお大スパン開閉ドームの実施に関係した Allen らの報告^{12)~14)}もあるが, 屋根架構全体を対象とした実験は特に行われていない。

実際の大スパン複層立体トラスには様々な形状が存在するが, 構造的にはアーチまたはリングの組み合わせと

* ハザマ技術研究所 研究員・工修

** ハザマ技術研究所 主任研究員・工修

*** 東京工業大学工業材料研究所 教授・工博

Research Engineer, Technical Research Institute, Hazama Corp., M. Eng.

Technical Research Institute, Hazama Corp., M. Eng.

Prof., Research Laboratory of Engineering Materials, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

して考えられる場合がよくある。この場合の挙動は、各アーチまたはリングの3次元中での位置・方向が荷重分布に対してどうか、アーチ両端の並進変位の拘束はどうか、塑性化の発生箇所とアーチの位置関係はどうか、等により大きく異なる。さらに力学的に問題の起さない範囲で、経済性の向上を目的とした部材の省略がしばしば行われるため、実際の大スパン複層立体トラスの弾塑性挙動が複雑かつ多様であることは十分考えられる。

本論では大スパントラスの1例として、開閉ドーム試験設計¹⁵⁾部分屋根の2層立体トラスを対象に、その全型縮小モデルによる静的弾塑性実験を行い力学的挙動を調べる。同トラスは、平面が合せ扇形で、ライズスパン比が約0.20、複雑な架構形状を有し、開閉方式の関係で全体的なアーチが1方向だけとなっている。部材の省略があるため、脚部以外の並進自由度総数1890に対して、部材総数はそれを300上回る程度となっている。荷重は、厳しい荷重の1つである非対称鉛直力を用いた。

2. 試験体

2.1 試験体形状

試験体は、試験設計¹⁵⁾の部分屋根のうちスパンが220 mと最大のものを全型縮小したモデルで、縮尺を1/100とした。試験体の全体形状を図-1に示す。全体寸法は、スパン2200 mm・幅約850 mm・高さ約450 mm・デプス32.5 mmで、ライズスパン比が約0.20である。

図-1 試験体全体形状

試験体の架構形状を図-2に示す。架構は図-2(a)左側に示す、2本の下弦材と1本の上弦材を有する主トラスの集まり、および同右側に示す主トラス間をつなぐ材から構成される。主トラスは脚部では片側当たり9本あるが、上部では5本、頂部では3本に本数が減少している。試験体上弦面および下弦面の形状を同図(b)・(c)の左側に示す。上下弦面の形状はともに無理のない形となっている。ラチス材の配置を同図(d)の左側に示す。主トラス間をつなぐラチスは、基本的に1列おきの配置となっている。

2.2 試験体部材

試験体部材には既製銅管(りん脱酸銅, 質別H)を用いた。部材断面は、節点間距離に対する細長比と部材相互の断面積比が、試験設計とほぼ同じになるように選択した。ただし試験設計では計17種類あった断面を、最大 ϕ -5.0 $\times$ 0.5~最小 ϕ -2.0 $\times$ 0.25の計6種類にまとめた。なお既製断面の制約から管の径厚比は試験設計の1/2以下

図-2 試験体架構形状

となった。

使用断面の性能を表—1に示す。試験体各部材の断面を上弦材、下弦材、ラチス材ごとに図—2(b)~(d)の右側に示す。部材断面は頂部ほど大きい。

2.3 熱処理および素材の力学的特性

各部材には、詳細を後述する「ろう付け接合」時の機械的性質の変化抑制と残留応力の除去を目的として、焼鈍処理を施した。なお銅の熱処理は文献¹⁶⁾に詳しいが、本実験では酸化を防ぐため真空炉を使用し、400℃で2時間保持したあと除冷した。

焼鈍した銅管の素材試験結果を表—1の右側に示す。0.2% オフセット耐力が44~58 MPa、最大耐力が230 MPaとなっており、一般の鋼材と比べて降伏点および降伏比に相当する値が小さい。引張試験による応力-歪曲線の例を図—3に実線で示す。弾性限耐力は20 MPa程度であった。

2.4 試験体の製作

部材が集まる接合部は、接合部での大きな塑性化や破断を避けるため、一辺12 mmの銅立方体（以下サイコロと呼ぶ）で置換した。このため接合部は剛に近い。サイコロには各部材を取り付けるためのドリル穴を、数値制御機械加工により十分な精度で面と垂直に開けた。大部分の弦材は、端部をこのドリル穴に飲み込ませた状態で、サイコロと「ろう付け接合」した。サイコロの接合詳細を図—4(a)に示す。なおろう付けとは文献¹⁷⁾によれば、接合すべき母材を溶融することなく、継手間隙に母材よりも低融点の金属または合金を溶融・流入させて接合する方法で、接合の基本プロセスは、溶融ろうの母

材表面へのぬれと継手間隙への毛管流入であるとされている。一方、材軸がサイコロ面と大きく斜交する一部の弦材とすべてのラチス材は、1端を部材内に他端をドリル穴に挿入させた「く字形インサート」を介してろう付けした(同図参照)。銅管とサイコロ間のクリアランスは、ろう付け時の銅の熱伸長を吸収できるよう設定した。

試験体脚部の詳細を図—4(b)に示す。支持条件は固定とみてよい。

試験体仮組では、全体寸法精度を確保するために試験体形状に沿った鋼製仮組治具を用意し、ほとんどのサイコロをその所定位置にボルトで固定した(写真—1)。治具の所定位置の誤差は立体3方向ともに大略±1 mm以内、主トラスのデプス誤差が±0.5 mm以内であり、仮組誤差も同程度とみられる。仮組の終了後、銀ろう(BAg-1)を使った手作業による炎ろう付けを行った。ろう付け終了後に、アーチスラストを支持しながら試験体を注意深く治具から外したところ、試験体形状に特に変化はなかった。本実験での荷重分布がスパン方向に非対称であり、アーチ効果があまり期待できないことから、上述の製作誤差が実験結果に及ぼす影響は小さいと判断

(a) typical

(b) base

図—4 部材接合部の詳細

表—1 管材の断面性能と素材試験結果

nominal section	D (mm)	A (mm ²)	t (mm)	I (mm ⁴)	r (mm)	E (MPa)	$\sigma_{0.05}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)
$\phi-5.0 \times 0.5$	4.97	6.82	.484	17.4	1.60	125000	38.0	47.5	229	56
$\phi-4.0 \times 0.5$	3.97	5.47	.502	8.40	1.24	130000	38.5	49.3	231	53
$\phi-3.5 \times 0.5$	3.46	4.44	.473	5.07	1.07	127000	36.2	47.2	230	51
$\phi-3.5 \times 0.3$	3.48	2.70	.268	3.51	1.14	120000	45.0	58.4	232	—
$\phi-2.5 \times 0.25$	2.48	1.57	.221	1.01	0.802	112000	33.5	44.0	>217	—
$\phi-2.0 \times 0.25$	1.97	1.30	.238	0.495	0.617	117000	43.2	56.3	241	44

D: 外径(ほとんどの計測値が $D \pm 0.01$ mm以内) A: 断面積(長さ当り重量を密度 8.93 g/cm^3 で除した)
t: 管厚(DおよびAから求めた) I: 断面2次モーメント r: 断面2次半径 E: 弾性係数
 $\sigma_{0.05}$: 0.05%オフセット耐力 $\sigma_{0.2}$: 0.2%オフセット耐力 σ_{max} : 最大耐力 ϵ_{max} : 伸び

図—3 応力-ひずみ曲線 ($\phi-3.5 \times 0.5$)

写真—1 試験体仮組状況

される。

試験体重量は約 12 kg であった。

3. 予備試験と弦材耐力

トラス全体の試験に先だち、弦材耐力の把握を目的とした予備試験（弦材試験と呼ぶ）を行った。ここでは、使用鋼材の応力-ひずみ関係モデルの設定、弦材試験の結果、解析的な弦材耐力について述べる。なお、ろう付け接合部の引張耐力が部材耐力以上であることを別途確認した。

3.1 応力-ひずみ関係モデル

数値解析を行う場合や実験時のひずみから部材応力を求める場合には、応力-ひずみ関係のモデルが必要になる。降伏棚を持たない素材の 1 軸応力-ひずみ関係については文献^{18),19)}があるが、前者は硬化の大きい素材には不適合で、後者はステンレス鋼 (SUS 304) の実験式が多くそのまま適用できない。このため本論では、Ramberg-Osgood モデル²⁰⁾を拡張した応力-ひずみ関係モデルを新たに作成した。モデルの概要を図-5 に示し、履歴則を付録に述べる。同モデルによる単調引張下の応力-ひずみ曲線の例を図-3 に点線であわせて示す。

3.2 弦材試験

長さが下弦材基準材長 86.5 mm で両端ピンとした弦材試験体（図-6(a)）を作成し、軸力-軸変位関係を調べた。加力は試験機により、計 4 種の弦材断面ごとに 3 本を単調圧縮、3 本を繰返し載荷とした。繰返し実験での等価軸応力（試験機荷重/弦材断面積）と等価軸ひずみ（軸変位/基準材長）の関係を同図 (b) に示す。引張側では、ひずみ硬化による耐力増加が著しい。最初の座屈における等価軸応力は、各断面とも 0.2 % 耐力を上回っている。

最も塑性化が集中する材中央の表面両側でのひずみ計測値をもとに、3.1 の応力-ひずみ関係と断面の平面保持・円形保持を仮定して、等価軸応力の逆算を行った。なお 1/2 断面を 12 の線素で置換した。最終サイクル直

(a) specimen

(b) cyclic test results

(c) analytical result (ϕ -4.0x0.5)

図-6 弦材試験結果

前までの結果を同図 (c) に破線で示すが、実線の実験結果とよく一致している。3.1 の応力-ひずみ関係を仮定すれば、塑性域でもひずみから軸力が求まると言える。

3.3 弦材試験の解析

基準材長の 1/1 000 程度の初期たわみを仮定して、線素の応力-ひずみ関係にもとづき、弦材試験体の半分を約 10 の線要素に置換して解析した。各要素は要素端に 12 の線素を有し、要素内の材軸方向には応力と変位の直線分布を仮定した。線素の応力-ひずみ関係は、前述のモデルのうち付録の④項で述べた断面積変化の補正、を無視して簡略化した。これは座屈ではヒンジ位置の曲げ耐力が問題となるため、この場合には断面積変化を無視した影響が軸力を問題とする場合に比べて小さいからである。解析結果を同図 (c) に点線で示すが、実線の実験結果と非常によく対応している。ただし解析では座屈荷重が実験に比べて低く、実験時の材端条件が必ずしもピンになっていなかった可能性が考えられる。

図-5 応力-ひずみ関係モデルの概要

図-7 弦材の座屈形式

表-2 弦材の座屈耐力解析値

nominal section	buckling strength (MPa)					
	① pin pin	② cou- pled	③ pin fix.	④ fix. fix.	⑤ lat. lat.	⑥ lat. fix.
$\phi-5.0 \times 0.5$	37.7	43.2	46.4	63.8	49.5	52.1
$\phi-4.0 \times 0.5$	34.7	40.1	42.4	54.3	45.3	47.7
$\phi-3.5 \times 0.5$	30.7	35.8	37.9	48.1	42.9	44.3
$\phi-3.5 \times 0.3$	39.0	45.5	48.1	60.6	56.2	57.4

3.4 弦材の座屈形式と圧縮耐力

最初に以下の3つを仮定して問題を簡略化する。

- ① 弦材端部の横方向変位がラチスにより拘束される。
- ② 弦材の座屈はラチスの座屈と連成しない。
- ③ 弦材の連成座屈は同一直線上にある同断面・同軸力・同材長の3つ以下の連続材の外端固定座屈で近似できる。

このときラチスによる回転拘束を仮に無視できれば、座屈荷重の小さい順に、それぞれ図-7中の①～④に対応する、以下の4つの座屈形式が考えられる。

- ① ピン-ピン座屈（両端ピンと仮定した場合）。
- ② 連成座屈（3連続弦材の外端を固定した連成座屈）。
- ③ ピン-固定座屈（2連続弦材の連成座屈は1端ピン・他端固定の場合と一致する）。
- ④ 固定-固定座屈（両端固定の座屈）。

材長 86.5 mm の各断面の弦材が単調圧縮時に上記①～④で座屈するときの最大耐力を 3.3 と同様の方法で求めた結果を表-2 に示す。座屈形式により耐力が異なるが、②と③の相違は他の場合と比べて小さい。また結果は省略したが軸力-軸変位曲線においても、②と③の相違は小さかった。

そこで弦材端部のラチスによる回転拘束を適当に仮定した解析を、①と③について行った。ラチス線索の応力-ひずみ関係にもとづき、弦材端の曲げばねに置換した。具体的には、各サイコロに様々な角度で取り付けく3～4本のラチスを弦材座屈面内の2本相当と仮定し、その断

図-8 弦材の座屈解析結果

面を弦材が $\phi-5.0 \times 0.5$ なら $\phi-2.5 \times 0.25$ 、それ以外なら $\phi-2.0 \times 0.25$ と仮定した。さらに主トラスでの曲げ卓越を想定して、ラチス軸力の影響の無視と、他端での回転固定を仮定した。①および③に対し回転拘束を考慮した、⑤ばね-ばね座屈、⑥ばね-固定座屈、の等価軸応力-等価軸ひずみ曲線を図-8に、最大耐力を表-2の右側2列に示す。回転拘束により最大耐力が大きく上昇している。また回転拘束を考慮すると負勾配がより顕著になることがわかる。

4. 非対称鉛直力試験

水平地動を受けるアーチには、例えば頂部が右に移動するとき左半が伸長・沈下し、右半が逆に上昇するため、水平慣性力と同時に非対称な鉛直慣性力が生じる。試設計のスパン方向水平動に対する応答では、鉛直力の非対称成分が大きく、かつ厳しかった。そこで非対称鉛直力のうち最も単純でかつ加力が容易な、アーチ片側だけの下向鉛直力を用いて、全型縮小モデルに対し単調載荷した。

4.1 加力・計測方法

加力はトーナメント方式により、下弦材面の計28のサイコロに対し、試設計での重量分布・負担面積を参考に、図-9(a)に示す比率で多点比例載荷した。サイコロには数値制御機械により穴を開け、これに太さ1mmのワイヤーロープを通して、トーナメントと結んだ。トーナメントの概要を同図(b)に示す。トーナメントは角型アルミニウム管とねじ棒をピン接合したもので、質量が2.1kgと小さい。トーナメント最下部のねじ棒は、位置を固定したロードセルにつながっており、最下部で

図-9 非対称鉛直力試験の加力と計測

ねじを締めて加力した。

変位は、同図 (c) に●で示した上弦面の計 22 のサイコロの球中心方向変位と、その向きを↑で示した下弦面の計 14 のサイコロの水平変位を変位計により測定した。サイコロ側には外径約 5 mm の金属球を取り付け、変位計先端に接着されたガラスを当てた。このためサイコロの移動後も変位計測定力（スピンドルにより押される力）がサイコロ中心に作用するので、変位計によるサイコロへの付加曲げモーメント発生を回避できる。なお測定力は変位計ストロークと押し込み量によって異なるが 1~5 N/台程度であった。ひずみは、図中に太線で示す計 47 の部材の中央にそれぞれ、管周方向に 120° の間隔をあけて、

(a) overall

(b) portion

写真-2 実験状況

材軸方向に 3 枚のひずみゲージを貼付して計測した。ひずみゲージはグリッドの長さ・幅が 1×0.68 mm のものを使用した。実験状況を写真-2 に示す。

4.2 実験経過

軽度の損傷を除いた最終損傷状況を図-10(a)に示し、実験経過を以下に述べる。

- ① 最大荷重付近までは剛性が低下したものの、目視できる損傷はなかった。
- ② 耐力低下が始まると、加力側中段において 2 または 3 連続上弦材の連成座屈が目視された。
- ③ 変形が増大すると、上弦材座屈に付随したラチス曲げ変形が明瞭になった。また非加力側上段および中段で

図-10 非対称鉛直力試験の損傷状況

は、新たに下弦材の座屈が観察された。このうち中段での座屈は以後あまり進まなかった。さらに両脚部では、下弦材およびラチスに損傷が見られた。したがってこの時点で、スパン方向に4つの巨視的なヒンジが明瞭に形成されており、巨視的に不安定となったことがわかる。このときの耐力は最大耐力の90%程度であった。

④ 変形の増大に伴って上記各所で損傷が増加した。最大変位がスパンの5%を超えた時点で実験を終了したが、損傷が目視された部材数は全体の12%となった。最終時の耐力は最大耐力の50%強であった。最終時の上弦材座屈状況を写真-3に示す。上弦材連成座屈の方向は面外がやや多かったが(写真(b)), 面内も見られた(写真(c))。

4.3 実験結果

荷重と球中心方向変位の関係を図-11に示す。図中の数字1~6は図-9(c)の①~⑥の各変位を示す。なお荷重はロードセル測定値に対し、変位計測定力の非対称

(a) overall

(b) typical one

(c) fewer type

写真-3 上弦材の座屈状況

成分を考慮して補正したが、その絶対量は10 N以下と小さかった。最大耐力は839 Nであった。荷重変位曲線の全体形状は非常に滑らかで、耐力低下が緩慢であることがわかる。両側面の球中心方向変位もこれとほぼ同じであり、両側面の水平変位はほぼ同一であった。したがってスパン直交方向に非対称な全体変形は特になかったと言える。

中央主トラスの概略の変形を図-12に示す。各線は、最大荷重時・最大変位約30 mm時・最終時の変形をそれぞれ3倍したものを示す。ただしアーチに沿った方向の変位は特に測定しなかったため、最終時の中心方向とアーチ方向の変位の比率をそのまま他の場合にも適用した。図から加力側が下に凸で、非加力側は上に凸な、アーチに特徴的な非対称の変形となっていることがわかる。また全体変形の形状に極端な変化はなかったものの、最も損傷を受けた加力側中段の変位の割合が最終時にやや増加したことがわかる。

図-13に弦材のひずみから求めた部材軸力にもとづく、中央主トラスの曲げモーメントを示す。最も損傷を受けた加力側中段の主トラスの曲げ耐力が、最終時には大きく低下していることがわかる。一方、非加力側上段

図-11 非対称鉛直力試験の荷重-変位曲線

図-12 中央主トラスの概略変形図(3倍)

図-13 中央主トラスの曲げモーメント

での耐力低下は不明瞭である。

4.4 簡単な解析による最大耐力の検討

簡単な平面解析により最大耐力を検討した。まず片側当り 9 本ある主トラスの部材断面積を中央の主トラス位置に全て集約し、1 つの平面トラスに置換した。まず材端ピンで弾性解析し、2 連続した弦材の平均軸応力度が表-2 に示した 1 端固定・他端ラチス拘束の座屈耐力に達するときを調べた。最初の上弦材座屈は荷重 644 N の時で、図-10(b) に●で示す座屈位置は実験結果とよく一致している。次にその材の剛性を極端に低下させた弾性解析を行い、後続の部材座屈を調べた。結果は、図-10(b) に▲および▼で示した下弦材の座屈がそれぞれ 771 N, 777 N ではほぼ同荷重、かつ最大荷重実験値の約 92 % となって、実験経過および結果とよく対応した。したがって部材耐力を適切に評価することにより、簡便なモデルでも、崩壊パターンがあまり複雑でなく巨視的に模擬できるなら、複雑な形状の立体トラスの耐力および巨視的な損傷をよく把握できると言える。

5. 考 察

上記の実験結果および前述の解析結果を、弦材座屈長さとの関係から見ると以下のことが言える。

- ① アーチとしての曲げが卓越し、弦材座屈が先行した。
- ② 連続弦材に軸力勾配が存在し、弦材の連成座屈は 3 連続材以下であった。
- ③ 3 連続弦材と 2 連続弦材の座屈耐力の差は大きくない。
- ④ 弦材の両端固定座屈は見られなかった。
- ⑤ ラチスの回転拘束を考慮した 2 連続弦材の座屈耐力を用いて、最大荷重実験値を説明できた。

以上より、弦材弾塑性座屈が先行する剛接トラスにおいては、弦材座屈長さを 2 連続弦材の連成座屈時のそれで近似してよいと思われる。しかし 3.4 の座屈解析では、ラチスの回転拘束により最大圧縮耐力が上昇したが、負勾配がより顕著になった。そこでラチスの回転拘束を無視するのが便法と思われる。このとき 2 連続弦材が同断面・同材長であれば、連成座屈耐力が 1 端ピン・他端固定の単材と一致するので、座屈長さを単純に節点間距離の 0.7 倍と表現できる。

6. まとめ

試設計された合せ扇形平面でライズを有する 2 層立体トラスの全型縮小モデルを作成し、弾塑性実験を行った。試験体部材には銅管を用いた。

最初に部材試験である弦材単材の座屈試験を行った。この結果から、弾塑性時の部材軸力を実験時のひずみから求めるための応力-ひずみ関係のモデルが設定できた。また同モデルを用いた単材の座屈解析結果が、実験結果

とよく一致した。さらにラチスによる回転拘束を考慮した時の、連続弦材の連成座屈耐力について検討した。

全型縮小モデルの試験では、アーチ片側だけに下向鉛直力を作用させたため、加力側では下に凸で非加力側では上に凸な、アーチに特徴的な非対称の変形が見られた。弦材の連成座屈が観察され、アーチ方向に巨視的に不安定となって荷重が低下した。最大荷重は、部材耐力を連成座屈耐力で与えた簡単な平面解析結果とほぼ一致した。

本実験からわかったことを以下にまとめて記す。

- ① 縮尺 1/100 の骨組実験が十分可能であり、複雑な全体架構の弾塑性実験ができる。
- ② 弾塑性実験の部材軸力を精度よく求めるための応力-ひずみ関係の仮定が可能である。
- ③ トラス架構中での部材の圧縮耐力評価では、連成座屈や他部材による拘束効果を考慮する必要がある。
- ④ 全型縮小モデルによる試験では、巨視的に不安定になって耐力が低下した。
- ⑤ 簡単な平面解析により求めた耐力および損傷位置が、同試験の経過および結果とよく一致した。
- ⑥ 弦材の弾塑性座屈が先行する剛接トラスにおいては、弦材座屈長さを 2 連続弦材のそれで近似してよいと思われる。このとき便法としてラチスによる回転拘束を無視すれば、同断面・同材長の 2 連続弦材の座屈長さを単純に節点間距離の 0.7 倍で表せる。

なお本実験のほかに、地震時を想定したスパン直交方向水平力を用いて、繰返し載荷実験を行った。この結果については改めて報告したい。また本論では詳細な解析を実施していないので、今後の課題である。また本実験では試験体部材に銅を使用したため、試設計結果との直接的比較が困難となった。この点は解析的に検討すべき問題と考える。

付 録

応力-ひずみ関係モデルの履歴則

- ① 骨格曲線 (図-5(a) 参照) : 骨格曲線は引張試験の応力-ひずみ曲線 (ただし応力を $(1+\text{ひずみ})$ 倍して断面積変化分を簡単に補正する) を、Ramberg-Osgood 曲線 (以下 R-O 曲線と記す) と、骨格曲線初期剛性 E_e の 1 % の勾配を持つ直線の和で置換する。ただし E_e は文献²¹⁾ の値 130 000 MPa を用いる。ひずみが 3 % を超える部分では、最大接線剛性が 1 700 MPa の別の R-O 曲線で置換する。
- ② 除荷曲線 (図-5(b)) : 除荷曲線は、最大接線剛性が E_e に等しい R-O 曲線とする。除荷曲線上から除荷された場合には過去の除荷点を指し、骨格曲線 (または後出の耐力曲線) 上から除荷された場合には除荷曲線の終点を指す。終点の応力は除荷点荷重と逆符号で与え、

除荷曲線全体の割線剛性 E_{un} を下式で与える。

$$E_{un} = k \cdot E_{sec} + (1 - k) \cdot E_e,$$

$$k = 0.85 \dots \dots \dots (付 1)$$

ここに E_{sec} は、除荷点と骨格曲線（または耐力曲線）の原点を結ぶ割線剛性とする。上式の $k = 0.85$ は弦材試験のひずみから求めた軸力が試験機荷重と整合するように定めた。

③ 耐力曲線：耐力曲線は骨格曲線をひずみ軸方向に平行移動して与える。移動量は、耐力曲線が除荷曲線の終点を通ることから定める。

④ 断面積変化による補正：①～③の曲線に対し、体積一定による断面積変化分を補正する。つまり①～③による応力を $1/(1 + \text{ひずみ})$ 倍する。

参考文献

- 1) Schmidt, L. C., Morgan, P. R., et al. : Space Trusses with Brittle-Type Strut Buckling, Jour. of the Struc. Div., ASCE Vol. 102, No. ST7, pp. 1479~1492, 1976. 7
- 2) Collins, I. M. : An Investigation into the Collapse Behavior of Double-Layer Grids, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Space Structures' pp. 400~405, 1984
- 3) 鈴木敏郎, 佐藤亘宏, 深沢 隆 : 塔状鋼管トラス骨組の座屈耐力に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, pp. 69~81, 1991. 7
- 4) 鈴木敏郎, 小河利行, 山崎 均 : 個材の座屈, 塑性化で耐力の定まる複層立体トラス平板の大変形解析, 日本建築学会構造系論文報告集, pp. 26~34, 1986. 1
- 5) Smith, E. M. : Alternate Path Analysis of Space Trusses for Progressive Collapse, Jour. of Struc. Eng., ASCE Vol. 114, No. 9, pp. 1978~1999, 1988. 9
- 6) 和田 章, 久保田英之 : 部材の座屈および破断を考慮したトラス構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文報告集, pp. 109~116, 1989. 2
- 7) Hanaor, A, et al. : Modification of Behavior of Double-Layer Grids : Overview, Jour. of Struc. Eng., ASCE Vol. 115, No. 5, pp. 1021~1037, 1989. 5
- 8) 和田 章, 向 秀元 : 一方向大スパン複層円筒トラス構造物の地震応答解析, 日本建築学会構造系論文報告集, pp. 87~96, 1990. 7
- 9) 坂 壽二, 日置興一郎, 谷口与史也 : 正方形網目と菱形網目から成るねじ込み接合二層立体トラス平板の弾性座屈で定まる曲げ有効強度, 日本建築学会構造系論文報告集, pp. 81~88, 1990. 8
- 10) 加藤史郎, 石川浩一郎, 横尾義貴 : 上下地震動を受けるトラス平板の耐震性について, 直交交差型トラス平板についての検討, 日本建築学会構造系論文報告集, pp. 60~68, 1986. 12
- 11) 日置興一郎, 村上益美, 山根一三 : ラチスアーチの幾何学的非線形性を考慮した構面内弾性座屈について, 日本建築学会構造系論文報告集, pp. 91~103, 1989. 3
- 12) Allen, C. M., et al. : Toronto Skydome Retractable Roof Stadium -The Roof Concept and Design-, ASCE 7th Struc. and Pacific Rim Eng. Cong., pp. 155~164, 1989. 5
- 13) Allen, C. M., et al. : Application of Computer Aided Design in the Ontario Domed Stadium Project, Canadian J. of Civil Eng., Vol. 15, pp. 14~23, 1988
- 14) Allen, C. M., Packer, J. A., : Structural Testing of RHS Joints and Members for the Toronto Skydome Roof, Proc. of 3rd Int. Symp. on Tubular Struc., pp. 418~425, 1989. 9
- 15) 堀 昭夫, 宇野哲生ほか : リボン形平面の屋根を有する開閉ドームの試設計 (その1~その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp. 1337~1342, 1990. 10
- 16) 亀井 清 : 非鉄金属材料学 (第1章)・朝倉金属工学シリーズ, 朝倉書店, 1978
- 17) 例えば, 最新接合技術総覧編集委員会編 : 最新接合技術総覧 (第2編4章), 産業技術サービスセンター, 1984
- 18) 田中良仁, 水野英二, ほか2名 : 降伏棚を有する鋼材の繰返し弾塑性モデル, 構造工学論文集 Vol. 37A, 土木学会, pp. 1~14, 1991. 3
- 19) 今仲伸郎, 福田俊文, 山内泰之 : ステンレス鋼 SUS 304 の繰返し圧縮・引張応力-ひずみ関係, 構造工学論文集, Vol. 37 B, 日本建築学会, pp. 203~212, 1991. 3
- 20) Jennings, P. C., : Periodic Response of a General Yielding Structure, Jour. of Eng. Mech., ASCE, Vol. 90, No. 2, pp. 131~166, 1963
- 21) 国立天文台編 : 理科年表, 丸善

(1991年12月10日原稿受理, 1992年4月1日採用決定)