1次元有限要素法による大規模立体骨組の複合非線形解析

COMBINED NON-LINEAR ANALYSES OF A LARGE SPACE FRAME USING ONE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD

堀 昭夫*, 笹川 明**
Akio HORI and Akira SASAGAWA

Materially and geometrically non-linear analysis of the tested models for a large space frame is presented based on one-dimensional finite element method. The analytical results have been confirmed to agree sufficiently with the experimental ones up to a large deformed state. Coupled chord bucklings and complicated collapsed states were simulated well. The analytical results of the partial models have shown that coupled buckling between several chords appears asymmetric because of the difference of axial forces allowed by adjacent members. Except for whole buckling-like phenomena, it is possible to analyze a large and complicated space frame with elasto-plastic coupled bucklings up to a large deformed state.

Keywords: combined non-linear analysis, space frame, large frame, elasto-plastic buckling, coupled buckling, fiber

複合非線形解析、立体骨組、大規模骨組、弾塑性座屈、連成座屈、線素

1. はじめに

剛接立体骨組に関する、材料非線形性および幾何学的非線形性の両方を考慮した複合非線形解析は、これまでにいくつかなされている。最近の解析では、水渡・多田による一般硬化塑性ヒンジモデルと増分摂動法を用いた2層立体トラス平板の解析¹⁾、加藤らによる部材の両端および中央での塑性化を考慮した剛接合単層ラチスドームの解析^{2) 3)}、都井・磯部による順応型Shifted Integration法を用いた大規模建物の解析⁴⁾等があげられる。また剛接骨組ではないが、システムトラス等を模擬した複合非線形解析では、加藤らの解析⁵⁾や鈴木・小河らの解析⁶⁾等があげられる。また修行らによる半剛接骨組の複合非線形解析⁷⁾も報告されている。さらに骨組解析法による部材の解析に、北田・上谷・大崎による柱部材の解析⁸⁾等がある。なおピン接合の2層立体トラスの解析は数が多く、例えばHillら⁹⁾、和田ら¹⁰⁾、多田ら¹¹⁾、石川ら¹²⁾の解析がある。

しかし筆者らの立体トラス模型実験^{13) 14)}で観察されたような、互いに剛接された部材が連成して弾塑性座屈する現象を模擬した立体解析はあまり見あたらない。このような座屈を含む骨組を、部材の両端および中央だけで塑性化を考慮して^{1) 2) 3) 5)}解析すると、骨組全体の变形が必ずしも正しく評価されない。

一方、複合非線形解析では、要素の負荷・除荷を適切に仮定しないと解が得られないという問題があり、上谷・中村・森迫・石田により整合剛性行列の形成法^{15) 16)}が発表されている。ただしこの方法を用いた立体骨組の複合非線形解析は今のところ発表されていない。上記の水渡・多田の解析¹⁾は、最終的には循環剛性選択過程¹⁵⁾

に陥って解析を終了している。立体骨組の複合非線形解析では、解析対象が複雑もしくは大規模になるほど、整合剛性を求める困難さが増えると推察される。また整合剛性を常に用いて解析すると、ある要素で必要となった小さな増分に骨組全体の増分が依存してしまい、大規模立体骨組を解析するには、現状の実用レベルの数値解析能力で整合剛性を厳密に守ることは困難と考えられる。この観点から、部材を材軸方向に6分割して各断面で線素の応力-歪関係を追跡する部材モデルを用いるとともに、部材内の解析で整合剛性がうまく見つからない場合には試行した中から適当な剛性を選択し、部材内では増分を小さくするが骨組全体では増分を大きく設定する、立体骨組の複合非線形解析法を提案した¹⁷⁾。ただし全体座屈的な現象は解析対象から除いた。本論では、この解析法を改良して、解析法の提案¹⁷⁾では行わなかった大規模立体骨組に対する複合非線形解析を行う。解析対象は大規模立体トラス模型実験^{13) 14)}とし、実験結果と解析結果の比較により大規模立体骨組に対する解析法の妥当性を検討する。また解析における剛接立体トラスの部材座屈挙動についても検討する。

2. 解析方法

解析方法は立体骨組の複合非線形解析法¹⁷⁾によった。ただし2.2で述べるように骨組全体の増分解析方法を若干変更した。解析方法の概略を以下に簡単に記す。なお解析法¹⁷⁾と同様に、大規模骨組への適用性を考えて骨組全体の増分を大きくした解析結果が直ちに正解である理論的な保証はない。しかし仮に釣合を満足する解が1

* ハザマ技術研究所 主任研究員・博士(工学)

** 信州大学工学部社会開発工学科 教授・工博

Chief Research Engineer, T.R.I., Hazama Corp., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr. Eng.

つであるとすれば、解に振動・発散がなく不釣合力が小さければ、骨組全体の増分を大きくしても大きな問題はないと考える。

2. 1 部材モデル

部材は、両端の剛域を除いた部分を材軸方向に6つの要素（以下、小要素と呼ぶ）に分割してモデル化した。ただし各小要素の長さは部材内法の1/6とした。部材モデルの概要を図-1に示す。小要素内では断面力と柔性が要素軸に沿って直線分布するとした。このときせん断変形を無視すると、小要素の剛性が両端の断面柔性から容易に得られる。両端の断面柔性は、断面を線素に置換して求め、線素の応力-歪関係は模型実験¹³⁾で定めた拡張されたRamberg-Osgoodモデル(図-2)によった。断面の線素分割数は8とした。小要素のねじりは純ねじりとし、履歴モデルを線素の塑性化とは独立で線素の耐力曲線と相似な逆行型（除荷されても載荷曲線上に戻るモデル）に簡略化した。小要素の幾何剛性は、軸力、2方向の曲げモーメント、およびねじりモーメントからなる両端の断面力が保たれた状態での、剛体移動、両端間距離の増減、および両端それぞれの要素軸回りの回転、を考慮した。節点座標および要素座標系の更新は幾何剛性に対応するに行い、小要素両端での要素軸回り回転角の相違は、両端で断面の柔性・歪・応力を座標変換して考慮した。なお要素軸回りの回転で、小要素端の曲げ回転角の累積値を無視すると適合条件が満たされない。このため曲げ回転角の増分は、累積値と要素軸回りの回転角増分を考慮して求めた。

2. 2 骨組全体の増分解析

骨組全体の系（以下、全体系と呼ぶ）の増分解析は、解析法¹⁷⁾と同様に、全体系の増分をある程度大きく設定して、不釣合力の解消を次ステップ以降で行った。ただし本論では以下の変更を加えた。

全体系の解析で求めた変位増分により部材の除荷が新たに生じる場合に、部材の線素剛性を変更して全体系の変位増分を求め直す、その回数を1回¹⁷⁾ではなく5回以内に變更した。また上記の部材の除荷の判定は、簡単のため線素の歪増分によらずに、部材への外力仕事増分を部材体積および材料強度で除した値がある値以下で、接線剛性が低下した線素を有する場合に、部材の除荷が起きたと判定しているが、その値を文献¹⁷⁾の -10^{-6} から -10^{-8} 以下に変更した。以上の変更は、後述の「4. 直交方向試験の解析」に関する試計算に

おいて、解の振動・発散がより少なかったことを参考に行った。なお過去の解析結果¹⁷⁾や後述の「3. 非対称鉛直力試験の解析」で示す解析結果には、上記変更による差異は特になかった。また部材への外力仕事増分が正で線素の除荷が生じる現象は、部材の除荷では考慮せず、部材内の増分解析を通じて考慮される。

2. 3 線素の剛性選択

部材内の解析では、部材内の節点における力の釣合を満足するよう増分の大きさを調節して、全体系で計算された部材端変位に到達するまで増分解析を行った。線素の負荷・除荷の仮定には、循環剛性選択過程¹⁸⁾に陥った場合でも、多くない回数の試行の中から相対的に適切と思われる仮定を選択する試行的な剛性選択法¹⁷⁾を用いた。選択法の概略を簡単に記す。①歪増分の向きが仮定と整合しない線素があれば、その線素の仮定を変更して試行する。②循環剛性選択過程に陥った場合は、除荷発生を仮定すべき線素が1つであるとして多くない回数の試行を行う。③以上で整合剛性が得られない場合は、不整合指標と不釣合軸力指標の和が最も小さい剛性仮定を選択する。ここに不整合指標は、整合しない線素の歪増分の絶対値に弾性係数と線素断面積を掛けた合計値とし、不釣合軸力指標は、全体系の解析で仮定した部材剛性による軸力増分と、歪増分から求めた軸力増分の差の絶対値である。

3. 非対称鉛直力試験の解析

3. 1 実験概要

非対称鉛直力試験については文献¹³⁾に詳しいので、簡単に記す。試験体は、試設計¹⁸⁾の部分屋根である2層立体トラスを縮尺1/100に全型縮小した模型試験体である。試験体の全体形状を図-3に示す。ライズスパン比は約0.20、部材総数は約2200である。試験体架構は、2本の下弦材と1本の上弦材を有する主トラス、および主トラス間を相互につなぐ材から構成される。主トラスは脚部では片側あたり9本あるが、上部では5本、頂部では3本に本数が減少する。主トラス間をつなぐラチスは、基本的には1列おきに配されている（同図(b)参照）。試験体部材には、断面および素材試験結果を表-1に示す計6種の銅管を使用した。加力は、同図(b)の左半分の下

図-1 部材モデル

図-2 線素の応力-歪モデル

図-3 試験体の全体形状

弦材面の計28点に対して、試設計での重量分布や負担面積を参考に、トーナメント方式により下向鉛直力を単調载荷した。

3. 2 解析結果および実験との比較

非対称鉛直力試験に対する解析は、実験結果が平面図（図-3(b)）の上下方向にほぼ対称だったことから、1/2モデルを用いて解析した。境界条件は柱脚を固定し、1/2モデルにするための切断面で同面外への変形を拘束した。なお解析では、実験時のトーナメントを1つの要素に置換して、トーナメント元端の鉛直変位を制御した。初期不整は無視した。

図-4に実験および解析の荷重-変位曲線を実線および破線で示す。ただし荷重はトーナメント元端の荷重で、変位は試験体を1つ

表-1 試験体の部材断面と素材試験結果

公称断面	外径 (mm)	管厚 (mm)	弾性 係数 (MPa)	0.2% 耐力 (MPa)	最大 耐力 (MPa)	伸び (%)
$\phi-5.0 \times 0.5$	4.97	.484	125000	47.5	229	56
$\phi-4.0 \times 0.5$	3.97	.502	130000	49.3	231	53
$\phi-3.5 \times 0.5$	3.46	.473	127000	47.2	230	51
$\phi-3.5 \times 0.3$	3.48	.268	120000	58.4	232	—
$\phi-2.5 \times 0.25$	2.48	.221	112000	44.0	>217	—
$\phi-2.0 \times 0.25$	1.97	.238	117000	56.3	241	44

図-4 荷重-変位曲線の比較（非対称鉛直力試験）

(a) 全景

(b) 詳細

写真-1 実験の上弦材の座屈

の球殻として見たときの球中心方向への変位を示す。また図中①～⑥は、図中右下の平面図に示した位置での変位である。図を見ると解析結果(破線)は実験結果(実線)と非常に良く一致している。最大荷重も解析値849Nが実験値839Nとほとんど一致した。ただし解析は実験と比べて②の変位が若干小さく、③の変位が若干大きい傾向が見られる。

実験の最終時の上弦材の座屈状況を写真-1に示し、解析の最終時の変形を図-5に示す。解析の変形は、立面のみを示し、変形倍率を1.0とした。またA～Cの各詳細では便宜的に側面の主トラスを太線で示した。なおこれらの図は、実験の最終時よりも全体的変形が進んだ時の結果を示したが、実験の変形状態との定性的な比較には支障はない。図を見ると、左右対称だった骨組が大きく変形し、部材が著しくたわんだ様子がわかる。変形図A詳細の側面の主トラス(太線)は写真-1(b)と非常に良く似ており、解析でも実験と同様に、連続した上弦材が上下方向に連成座屈したことを示す。ただし実験では連成座屈が水平方向のものや上下逆方向のものも若干見られたが(写真-1(a))、解析のA詳細は全てほぼ同方向であった。なお実験で座屈方向がばらついた理由には、製作に伴う形状不整や部材接合時の残留応力なども考えられるが詳細は不明である。

実験および解析の損傷部位を図-6(a)および(b)に示す。実験の

図-5 解析の変形図（立面、1倍）

図-6 損傷部位の比較（非対称鉛直力試験）

損傷^{1,2)}は目視により、最終時の横たわみが著しい部材を太線で、やや大きな部材を太破線で示した。解析の損傷は等価軸歪（軸変位／初期材長）の大小から定め、等価軸歪が圧縮側に3%および1%以上の部材を図(b)の上図に太線および太破線で示し、等価軸歪が圧縮側および引張側に0.3%以上の部材を同図の下図に太線および太破線で示した。なお等価軸歪が引張側に1%以上の部材はなかった。また解析の損傷部位を等価軸歪ではなく横たわみで定めた場合は、等価軸歪が圧縮の損傷部位とほぼ一致した。図(a)、(b)の比較から、解析の損傷部位は実験と良く対応していると判断される。ただし解析で上弦材が座屈した付近（図中やや左側）の損傷部位は、場所にもよるが実験に比べて若干右寄りの傾向が見られる。これは図-4の荷重-変位曲線の②③において実験と解析が若干相違した事と関係がある。なお損傷部位付近では下弦材の本数が減っているが、上弦材の本数には変化がなく、実験と解析の損傷部位の若干の相違を簡単には説明できない。ただし解析において、下弦材の数が減じた主トラスの上弦材（図(b)の上図に2,4で示す材）が連成座屈になっていない現象は、下弦材の数が減じた位置でラチス材長が短く、ラチスによる拘束が大きいためと考えられる。

3. 3 弦材の連成座屈の検討

図-7に連成座屈した上弦材の軸応力度（軸力／断面積）と等価軸歪の関係を圧縮を正にして示す。図中の3本の実線が側から1,3,5番目の上弦材（位置を図-6(b)中に示す）を示し、破線が2番目の上弦材を示す。連成座屈の関係で、これらの上弦材（以下、当該材と記す）と連続する上弦材（以下、連続材と記す）の結果も併せて示した。なお側から4番目の結果は2番目と差がなかったので省略した。図から以下のことがわかる。i) 1,3,5番目（実線）では当該材が軸方向に大きく縮んだが、連続材もいくらか縮んでいる。ii) 当該材で図中の曲線が他と比べ下にある場合、連続材の曲線が他と比べ

図-7 上弦材の軸応力度と軸縮みの関係

図-8 軸応力度-軸縮み関係の検討

上になる補完的な傾向が見られる。iii) 1~5番目の当該材の座屈荷重にはほとんど差がなく、ある当該材の座屈が隣の主トラスの当該材の座屈荷重を低下させるような立体効果はなかったと推察される。iv) 2番目（破線）では、連続材がほとんど座屈せずに除荷されている。なお1~5番目の軸力を合計すると、当該材と連続材でほとんど差がなかった。また当該材の座屈順序は側から1→2→3→4→5番目の順であった。

上弦材の連成座屈を検討するため、図-8(a)に示す4つの場合、①：両端固定で座屈する場合、②：2連続した材が中間で回転を拘束されて、1端ピン他端固定と同じ座屈をする場合、③：2連続した弦材が中間で4本のラチスにより横たわみと回転を拘束されながら座屈する場合、④2連続した弦材と8本のラチスからなる部分モデルの弦材が座屈する場合、について軸応力度と等価軸歪の関係を調べた。ただし③④では、図中に破線で示した底面を剛とし、底面の変位は図中矢印方向の並進だけを許容した。また骨組解析の連成座屈が上下方向だったことから、弦材の水平方向の座屈を拘束した。初期不整は図中右側および左側の弦材に下および上向き $1/1000$ の初期たわみを仮定した。得られた軸応力度と等価軸歪の関係を図-8(b)に示す。上および下にある破線はそれぞれ①両端固定および②ピン固定の結果を示す。1点鎖線および実線は③ラチス固定および④部分モデルの結果を示す。ただし1点鎖線および実線は各2本あり、上にある線（図中R）が右側の、下にある線（図中L）が左側の弦材の結果を示す。なお①および②で部材をより細かく分割した平面解析結果を点線で示すが、軸縮み5%以下だと部材モデルの結果（破線）とほとんど変わらない。図から、③ラチス固定では左右の弦材（2本の1点鎖線）であまり差がないが、④部分モデルでは左右の弦材（2本の実線）の軸応力度-等価軸歪関係に大きな差が生じたことがわかる。この原因として、③のモデルは左右の弦材軸力がほぼ等しくなるのに対し、④のモデルでは追加したラチスにより弦材の軸力差が許容される事が考えられる。なお③と④で座屈荷重にはほとんど差がない。

図-8(c)に、骨組解析の側から3番目の結果（図-7中の3の実線）を実線で、④の結果を一点鎖線で比較して示す。また図中には①および②の結果を破線で併せて示した。図から以下のことがわかる。i) ④部分モデルの両弦材の結果（2本の一点鎖線）は骨組中の連成座屈の結果（2本の実線）とほとんど一致した。ii) 耐力低下域では当該材の結果（上の実線）が①両端固定の結果（上の破線）に近く、連続材の結果（下の実線）が②ピン固定の結果（下の破線）に近い。したがって本解析の連成座屈は、④部分モデルによりモデル化できるが、

座屈荷重は③ラチスー固定の場合とほぼ同じで、耐力低下後の軸力－軸変位関係は当該材が①両端固定に、連続材が②ピンー固定にそれぞれ近かったことがわかる。

4. 直交方向試験の解析

4. 1 実験概要

直交方向試験は、非対称鉛直力試験と同じ試験体を作成して、スパン直交方向に繰り返し水平力を作用させた試験である。詳細は文献¹⁴⁾に詳しい。荷重分布はスパン方向にほぼ一様で、試験体の加力方向手前の側面にある計16の載加点にトーナメント方式で加力した。ただし解析では、簡単のため加力方向に関係なく正負両側の全載加点(32点)に載加した。加力サイクルは試験体頂部のスパン直交方向変位がスパンの $\pm 1/1000$ 、 $\pm 1/500$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ に達した時点で各1回ずつ繰り返し、最後は正側に加力している。

4. 2 解析結果および実験との比較

実験結果がほぼ対称だったことから、解析は1/2モデルで行った。実験および解析の荷重と頂部水平変位の関係を図-9に示す。実線

図-9 荷重－変位曲線の比較（直交方向試験）

図-10 沈下量の比較

(a) 側面全景(変位100mm時)

(b) 脚部詳細(変位40mm時)

写真-2 実験の変形状況

(a) 45°斜視図

(b) 側面図

(c) 脚部斜視図

図-11 最終時の変形図（変位50mm時、1倍）

が実験結果を、点線が解析結果を示す。なお実験は変位100mmまで行ったが、解析は変位50mmを越えると荷重－変位関係にいくらか振動が見られたので変位50mmまでとした。図を見ると、変位の大きいサイクルでは解析結果が実験結果を若干上回るものの、解析は実験と良く一致している。最大荷重は実験値の正側1160N、負側1190Nに対し、正側が1250N、負側が1240Nと解析値の方が4～8%程度大きい。なお実験では、試験体の巨視的な崩壊形が、最初の主要な損傷であるラチスの座屈には関係せず、後で見られた柱脚直上部の主トラスの巨視的な曲げ降伏によると推察されている¹⁴⁾。したがって実験の荷重低下は前者の耐力低下と後者の耐力上昇を合わせた結果であり、実験と解析の耐力低下の有無を比較しても特別の意味はない。

図-10に実験および解析の沈下量を実験および破線で示す。ただし沈下量は、中央やや上部（図中●）における球中心方向への変位とし、横軸は頂部水平変位とした。解析でも実験と同様に、繰り返し載加によって沈下量が増大したことがわかる。解析を実験と比べると、+4サイクルで生じたずれを除くと、両者は非常に良く対応することがわかる。

実験の変形状況を写真-2に示し、解析の最終時(変位50mm時)の変形を図-11に示す。なお写真は(a)が変位100mm時、(b)が変位40mm時のものである。図(a)は解析の変形をスパン方向45°上方から見たもの、図(b)は側面から見たものを示す。図(c)は脚部の斜視図であるが、手前の主トラスだけを太線で示した。解析の変形を写真と比較すると、制御変位の大きさが異なるものの比較ではあるが、図(b)は写真(a)と、図(c)の太線は写真(b)と極めて良く似ていることがわかる。

実験および解析の損傷部位を図-12(a)および(b)に示す。ただし実験の損傷は、+3、+4サイクルで横たわみが顕著となった部材を太線で示し、最後の正側加力で横たわみが顕著となった頂部付近の部材を太破線で示した。解析の損傷は、図(b)の右図が最終時に圧縮側または引張側で等価軸歪が0.3%以上の材を示し、左図が圧縮側で等価軸歪が1%・3%以上の材を示す。なお引張側で等価軸歪が1%以上

の材は図示しないが3つと少ない。解析の損傷を実験と比べると、実験最終時の変位が解析の2倍であることを考えれば、解析の損傷は実験と良く対応していると言える。

4. 3 解析での弦材の座屈

損傷が大きかった脚部付近の下弦材のうち、その位置を図-11(c)および図-12(b)中にa, bで示す連続した材（以下ではa材、b材と呼ぶ）の挙動を図-13に示す。なおa材の公称断面は $\phi-3.5 \times 0.5$ 、b材は $\phi-3.5 \times 0.3$ であり、a材の方が管厚が大きい。a材およびb材の軸応力度と等価軸歪の関係を図-13(a)に実線および2点鎖線で示す。また同図(b)および(c)に、a材およびb材の両端(剛域内端)の等価曲げ応力度(曲げモーメント/塑性断面係数)と等価軸歪の関係をそれぞれ示す。ただし図(b), (c)では実線がトラス全体をシェルとして見たときの面外方向への曲げ(下に凸な側を正)を示し、2点鎖線が面内方向への曲げ(平面図で見て上に凸な側を正)を示す。図-13から以下の事がわかる。i) 図(a)の座屈軸応力度は、a材が35MPaで1端ピン他端固定の解析値38MPa¹³⁾に近く、b材はサイクルにもよるが57~63MPaと両端固定の解析値61MPa¹³⁾に近い。ただしこれに断面積を乗じた座屈軸力は、a材とb材の差が1割以下と小さい。ii) +4サイクルでは主にb材が大きく座屈して軸応力度が低下した(図(a)の2点鎖線)。iii) この時のb材の面外の曲げ応力度は両端でほぼ等しく(図(c)第三象限の2実線)、両端固定に近い状態で連

成座屈したと考えられる。iv) -4サイクルではb材に大きな引張軸力が作用して(図(a)の2点鎖線)、座屈と逆方向に大きな曲げが生じた(図(c)第二象限の2実線)。v) この関係で、b材は最後の+5サイクルの座屈荷重が+4サイクルと比べて低下せず(図(a)の2点鎖線)、最後の+5サイクルでは逆にa材の座屈が大きく進んだ(図(a)の実線)と考えられる。なおa材では、引張軸力による曲げ戻しが顕著でなく(図(b)の2実線)、繰り返しによる座屈軸応力度の低下が認められる(図(a)の実線)。

5. 結論

過去に提案した立体骨組の複合非線形解析法に若干の変更を加えて、大規模立体トラス模型実験に対する複合非線形解析を行った。非対称鉛直力試験¹³⁾、直交方向試験¹⁴⁾のいずれの実験結果に対しても、解析結果は大変形領域まで非常に良く一致した。

非対称鉛直力試験に対する解析では、実験で見られたような連続した弦材の連成座屈を解析でき、座屈の変形状況も実験とほぼ一致した。連成座屈を検討するため、簡単な部分モデルについて解析したところ、両弦材の軸力差を許容するようなラチスの存在によって、連成座屈した両弦材で後座屈挙動に大きな差が生じて、実験および解析で見られた非対称な連成座屈になることがわかった。

直交方向試験に対する解析では、複雑な実験に伴う測定点数の不足から、各部材が座屈したのか曲げられたのか実験ではわからなかった脚部の複雑な崩壊状況が解析できた。脚部の弦材の挙動を調べたところ、素材特性に大きく依存すると思われるが、繰り返し載加により、連成座屈で変形が大きい側の部材が入れ替わる現象が見られた。

本解析結果から、全体座屈的な現象を除外すれば、複雑かつ大規模な立体骨組に対しても、部材の弾塑性座屈の連成を含めて大変形領域まで解析できることがわかった。

参考文献

- 1) 水渡明、多田元英：一般硬化塑性ヒンジモデルと増分摂動法による立体剛接骨組の複合非線形解析、構造工学論文集 Vol. 41B, pp. 231~238、1995. 3
- 2) 柴田良一、加藤史郎、植木隆司：きわめて扁平な剛接合単層ラチスドームの弾塑性座屈荷重、日本建築学会構造系論文報告集, pp. 143~153、1993. 7
- 3) 加藤史郎、庄村昌明、向山洋一：水平と鉛直地震動を受ける大スパン単層ラチスドームの応答性状と崩壊加速度に関する研究、日本建築学会構造系論文集, pp. 87~96、1995. 11

図-12 損傷部位の比較(直交方向試験)

図-13 脚部付近の弦材の挙動

- 4) 都井裕、磯部大吾郎：順応型Shifted Integration法による大規模骨組構造の耐震強度解析、生産研究46巻、pp. 505～508、1994. 10
- 5) 例えば、植木隆司、加藤史郎、向山洋一、松榮泰男：両端に回転ばねのある部材で構成される単層ラチスドームの弾塑性座屈荷重、日本建築学会構造系論文報告集、pp. 47～58、1993. 6
- 6) 鈴木敏郎、小河利行、久保寺勲、五十嵐規矩夫：ボール接合単層ラチスドームの座屈実験及び弾塑性座屈解析、日本建築学会構造系論文報告集、pp. 53～62、1993. 2
- 7) 修行稔、岡延夫、李剣平：半剛接合部を有する鋼立体骨組の弾塑性非線形解析、日本建築学会構造系論文集、pp. 89～94、1996. 2
- 8) 北田透、上谷宏二、大崎純：増分摂動法を用いた立体骨組の弾塑性大たわみ解析法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1285～1286、1994. 9
- 9) Hill, C.D., Blandford, G.E., and Wang, S.T. : Post-Buckling Analysis of Steel Space Trusses, Jour. of Struc. Eng., ASCE Vol.115, pp.900-919, 1989.4
- 10) 和田章、向秀元：一方向大スパン復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
- 11) 多田元英、米山達也：建築物の屋上に設置された2層立体トラスの鉛直地震応答性状、日本建築学会構造系論文報告集、pp. 77～86、1993. 10
- 12) 石川浩一郎、加藤史郎：二層立体ラチスドームの上下地震時耐震性能の及ぼすドーム付加荷重の影響、日本建築学会構造系論文集、pp. 119～127、1995. 9
- 13) 堀昭夫、島崎和司、和田章：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、日本建築学会構造系論文報告集、pp. 105～113、1992. 6
- 14) 堀昭夫、島崎和司、和田章：スパン直交方向水平力を受ける大スパン2層立体トラスの静的模型実験、日本建築学会構造系論文報告集、pp. 73～82、1993. 2
- 15) 上谷宏二、中村恒善、森迫清貴、石田修三：弾塑性構造物の臨界挙動解析のための整合剛性行列形成法、日本建築学会構造系論文報告集、pp. 67～78、1993. 3
- 16) 森迫清貴、石田修三、上谷宏二：弾塑性骨組の臨界挙動解析における整合剛性行列、第43回応用力学連合講演会、pp. 111～114、1994. 1
- 17) 堀昭夫、笹川明：試行的な剛性選択法を用いた1次元有限要素法による立体骨組の複合非線形解析法、日本建築学会構造系論文集、1996. 12(掲載予定)
- 18) 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1～3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1337～1342、1990. 10

(1996年7月9日原稿受理、1996年11月27日採用決定)