

鋼管で構成される塔状トラス構造物の 耐力及び変形性能について (曲げ降伏先行型架構の力学的挙動について)

金 冨 潔・甲津 功夫・吹田啓一郎
山田 直人・安田 俊一

IMPROVEMENT OF LOAD CARRYING CAPACITY AND DEFORMABILITY OF TRUSSED TOWER STRUCTURES

By Kiyoshi KANETA, Isao KOHZU, Keiichiro SUITA,
Naoto YAMADA, and Shunichi YASUDA

Synopsis

This paper refers to deformability of double-Warren truss tower structures composed of circular hollow sections, which are widely used in constructing steel tower structures. In current design practice, the structures are regarded as being collapsed as a whole, when buckling in a primary compressed member occurs, strength and deformability of the structures are not taken into account in the post buckling range. In order to improve the durability of the structure, it is desired to design so that buckling of the primary member does not lead to the collapse of the structure.

A method to improve deformability of the structure by adding bending resistant members is proposed. In order to make clear stability and deformability of the proposed structures in comparison with those of ordinary truss structures, an experimental investigation was carried out using subassemblages of truss structure.

1. 序

送電鉄塔・無線鉄塔・照明塔などの塔状鋼構造物に使用される構造形式として一般的なものの一つに鋼管で構成されるダブルワレン形式の塔状トラス構造がある。この構造は部材レベルでの偏心が少なく、また架構全体を軽量かつ剛性の高いものとするのが特徴である。風や地震などにより水平方向の荷重を受けたときの破壊は主柱材・斜材などの主要な圧縮部材の座屈によって起こり、その後の架構の変形性能はほとんど期待できないため、実際の設計では静的な荷重に置き換えた水平荷重に対する許容応力度設計が一般的である。

しかし、近年、塔状鋼構造物に要求される規模は大型化し、しかも市街地近郊に建設される場合も多くなる傾向にある。そのため、架構重量が大きくなり従来問題になることが少なかった地震荷重が大きくなるこ

と、また、仮に設計荷重を超える荷重が作用し架構が損傷を受けた場合に一部の損傷ですむのか、全体の倒壊につながるのかといった破壊後の挙動を考えた設計がなされていないなどの問題がある。

これまでに筆者らは鋼管を用いた塔状トラス構造の塔体部を取り出した試験体を作成し、溶接あるいはボルトによる部材接合方法の違い、主柱開角の有無、水平材の有無、水平力の載荷方向の違い、鉛直方向荷重の有無、などをパラメータとして静的載荷実験を行い、座屈発生時の部材の応力状態や座屈発生後の架構の変形性能などを調べてきた¹⁻³⁾。

その結果、座屈発生後の変形性能に着目した場合に特に問題となるのは水平力の作用する方向による差異である。水平力を構面平行方向に作用させた場合には主柱材の座屈によって最大耐力が決まり、その後、復元力が急激に低下するために座屈後の変形性能は全く期待できない場合が多い。一方、水平力を対角方向に作用させた場合には、圧縮側主柱材1本が座屈した後も残る3本の主柱材により架構の復元力が維持されるためある程度の変形性能が期待される。また、水平力と同時に主柱材降伏軸力の2～4割の大きさの鉛直力を作用させた場合には、鉛直力の大きさに応じて座屈後の復元力底下が早まり変形性能は劣る傾向にあった。

これらの実験結果から、一般的なトラス架構では、特に構面方向の水平力に対して、座屈発生後ただちに架構の崩壊に至る危険性が高いと考えられる。本研究では、この変形性能を改善するための試みとして、トラス架構に曲げ部材を付加した新形式の架構を提案した。これは付加した曲げ部材の降伏を圧縮部材の座屈に先行させることにより構面方向の架構の変形性能を高めることを意図したものである。本報ではこれまでの従来形式のトラス試験体と同寸法・同断面の試験体を製作し、水平力に相当する荷重を載荷した静的実験の結果について報告し、また、数値解析を行った結果と合わせて提案架構の変形性能について従来形式の実験結果と比較しながら考察を行った。

2. 実験概要

2.1 提案架構の特徴と試験体

従来形式のトラス架構試験体を Fig. 1 に示す。鋼管を用いた4本の主体材とダブルワレン形式の斜材からなり、塔高数十メートルの鉄塔を1/5程度に縮小したものから2パネル取り出したものを想定して作成した。以下、これを TYPE-A と称す。

提案架構の試験体を Fig. 2, 3 に示す。試験体寸法および使用鋼材は従来形式の試験体と等しく、1パネルの高さと主柱材材軸間距離はいずれも120 cm となっている。鋼材は JIS の STK 41 級鋼材で、部材断面は主体材が $\phi 60.5 \times 2.3$ 、斜材が $\phi 27.2 \times 2.3$ の鋼管を用いた。

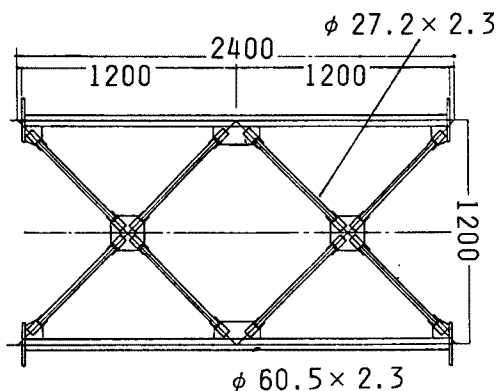


Fig. 1. TYPE-A specimen. (unit: mm)

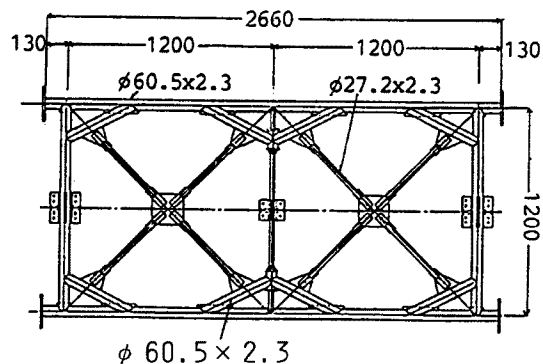


Fig. 2. TYPE-D1 specimen. (unit: mm)

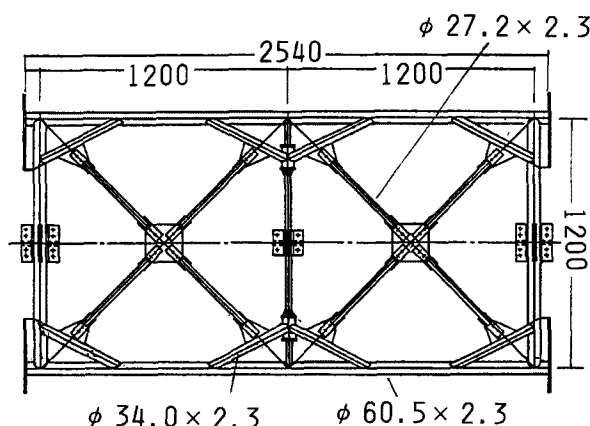


Fig. 3 TYPE-D2 specimen. (unit: mm)

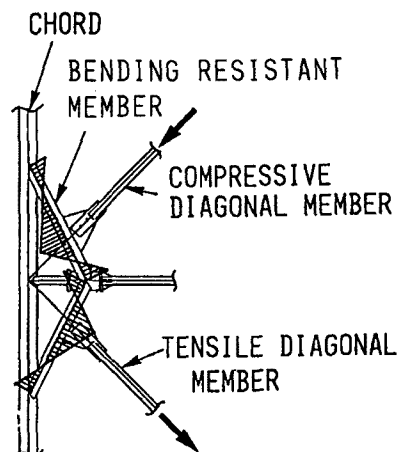


Fig. 4. Bending moment diagrams of bending resistant members.

Table 1. Mechanical properties of materials

Section	Elastic Modulus (ton/cm ²)	Compressive yield stress (ton/cm ²)	Tensile yield stress (ton/cm ²)	Ultimate strength (ton/cm ²)
$\phi 60.5 \times 2.3$	2085	4.292	4.299	4.81
$\phi 34.0 \times 2.3$	2032	3.948	3.867	4.53
$\phi 27.2 \times 2.3$	2064	4.152	4.116	4.78

J.D.Aristizabal-Ochoa⁴⁾ はブレース付鉄骨ラーメン構造に knee-brace と名付けた方杖状の部材を加えることによってラーメン構造のエネルギー消散能力とブレース付架構の高い剛性を兼ね備えた構造を形成できることを解析的に明らかにしている。本報で提案する新たな架構の特徴は、これと同様の部材をトラス架構に適用したもので、通常のダブルワレン形式の架構の1パネルにつき4本の新たな曲げ部材が斜材端部に加えられている。

各パネル間に水平材を付け、斜材の圧縮及び引張軸力は支柱材と水平材の交点隅角部に設けた曲げ部材が曲げ変形することにより伝達される。このときの部材応力は Fig. 4 に示す曲げモーメント分布となることが期待され、曲げ部材の断面設計は、最大曲げモーメント発生位置での曲げ降伏が圧縮応力を負担する斜材の座屈よりも先行するように決定される。斜材の座屈発生を遅らせ、曲げ降伏先行型の架構とすることにより、曲げ部材の塑性変形によってエネルギー消散能力を得ることを目的としたものである。また、曲げ部材は支柱材に対して座屈補剛材としての効果をもたせ、支柱材の座屈による架構全体の崩壊を遅らせることが期待できる。

試験体に用いた断面は、曲げ部材は $\phi 60.5 \times 2.3$ (Fig. 2, TYPE-D1) と $\phi 34.0 \times 2.3$ (Fig. 3, TYPE-D2) の2種があり、水平材はいずれも $\phi 27.2 \times 2.3$ で共通である。試験体製作上の理由により水平材は中間部でボルト接合により継いでおり、斜材両端部はボルト接合、曲げ部材および支柱材と水平材の接合部は全て溶接接合とした。ボルト接合部は部材端部に板厚 3.2 mm のU字継手を設け、板厚 6 mm のガセットプレートに2本の垂鉛めっきされた M12 普通ボルトで接合されている。なお、全ての試験体に溶融亜鉛めっきを施した。

JISZ 2201 に基づく試験片により使用鋼材の材料試験を行い、その結果得た機械的性質を Table 1 に示す。

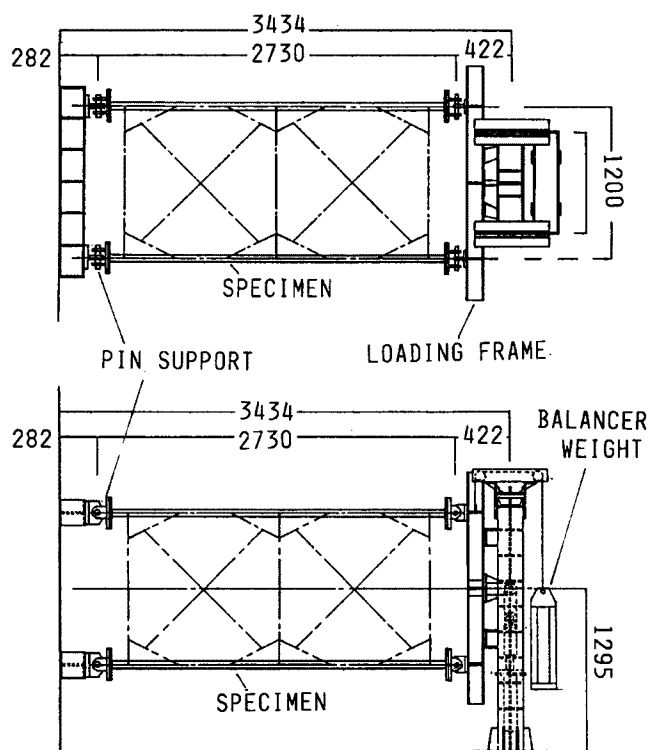


Fig. 5. Loading apparatus. (unit: mm)

2.2 載荷・計測方法

実験に用いた載荷装置と試験体の取り付け状況を Fig. 5 に示す。試験体は主柱材の柱脚側に取りつけたピン治具を介して反力壁に取り付けられ横向きのカンチレバー形式に支持されている。柱頭側にはピン治具を介して載荷用フレームが取り付けられ、油圧ジャッキによって載荷フレーム中央部のピン治具に載荷することにより試験体に水平力に相当する荷重を加えた。載荷フレームは周囲のガイドフレームによって載荷方向に直交する方向の変位を拘束されており、また、載荷フレームと同重量のおもりをワイヤーで載荷フレームに連結して両者をバランスさせることにより、載荷フレームの重量が試験体に作用するのを防いでいる。

各試験体について単調載荷、正負交番繰返し載荷をそれぞれ崩壊に至るまで行った。試験中は油圧ジャッキと載荷フレームの間に取り付けられた荷重計と載荷点変位を計測する変位計により載荷点の荷重—変形関係をモニターし、繰返し載荷では曲げ部材の降伏が予想される荷重の 1/3 程度の荷重を正負繰返して第 1 サイクルとし、第 2 サイクル以後は順次第 1 サイクルの整数倍の変位に達するまで載荷した。水平力の載荷方向は構面平行方向とし、TYPE-D 2 については対角方向に載荷した実験も行った。

試験体全体の変形性状を把握するために試験体の主柱材と水平材の各交点における載荷方向の変位を変位計で計測した。また、主要な部材について抵抗線歪ゲージを貼付して部材の軸方向歪、曲げ歪を測定した。これらの計測量は載荷中に適当な間隔をおいて測定し、記録した。

3. 実験結果

以下に実験から得た各試験体の水平載荷荷重と載荷点の水平変位の関係を示し、実験で観察された曲げ部材の曲げ降伏、圧縮部材の座屈の発生から架構の崩壊に至るまでの状況を示す。

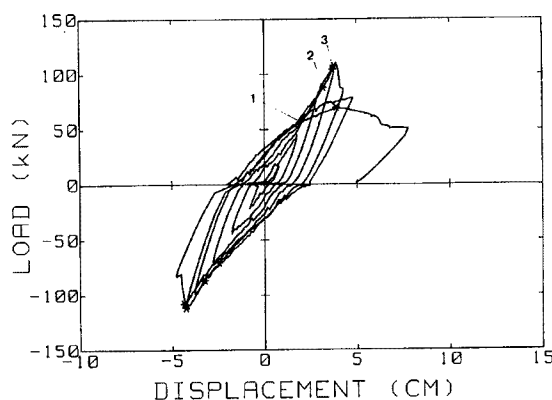


Fig. 6. Load-displacement diagrams. (TYPE-A)

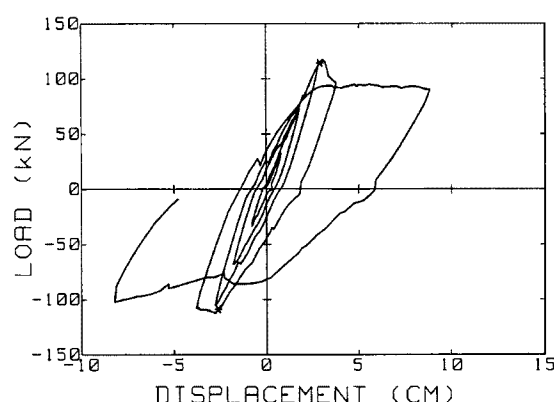


Fig. 7. Load-displacement diagrams. (TYPE-A, diagonal direction loading)

3.1 従来型架構実験 (TYPE-A)

従来形式の試験体による実験については種々の荷重条件下での結果が既に報告されているが¹⁾、本報で提案する架構との比較参照するため同じ荷重条件下での実験結果の概要を示す。

Fig. 6 に構面平行方向に水平力を繰返し載荷した実験による荷重—変形関係を示す。この試験体は両端ピン支持された中心圧縮柱の座屈耐力を部材許容応力度とする一般的なトラス架構の設計に従えば、斜材の座屈が先行する設計になっている。実験では図の①～③で順次斜材の座屈発生が歪記録から観察され、ほとんど全ての斜材に座屈が生じた段階で最大耐力に達するとともに直ちに架構全体の崩壊につながり復元力の急激な低下が見られ、架構としての変形性能は主要な部材の座屈後は全く期待できないことが分かる。支柱材と斜材の部材断面比を変えた別の試験体による実験では最初の座屈部材・最大耐力点での座屈部材が異なる場合があるが、最大耐力点以後の変形性能が得られない点では同様の結果となる。

Fig. 7 に水平力の作用方向を構面平方向から 45° 傾け対角方向に繰返し載荷して得た荷重—変形関係を示す。試験体は支柱材に約 $1/11$ の勾配を設けてあるが、勾配のないタイプと変形性能は大差ない。対角方向に水平力を受けた場合には、最初に圧縮側支柱材 1 本が座屈して最大耐力に達して若干の復元力の低下が見られるが、その後は残る 3 本の支柱材により一定の復元力が維持される。そのため先の構面方向に水平力を作作用させた場合と比較すれば良好な変形性能を持っていることが分かる。

従って、従来型架構では特に構面方向水平力に対する変形性能が低いことが明らかである。

3.2 曲げ降伏先行型架構実験 (TYPE-D 1)

Fig. 8 に TYPE-D 1 試験体に構面平行方向水平力を繰返し載荷して得た荷重—変形関係を示す。この試験体は曲げ部材に支柱材と同じ断面の部材を用いたもので、曲げ部材の両端支持部がピン接合されていると仮定すれば、曲げ部材が曲げ降伏する荷重は斜材の座屈荷重よりも低くなるように設計されている。

実験結果から、図の①で歪記録より曲げ部材の降伏が認められ、次に水平材の曲げ降伏が認められた。しかし、曲げ部材の最大曲げモーメントが全塑性モーメントに達する前に②で斜材の座屈が発生している。その後支柱材が座屈して最大耐力に達したが、最大耐力後も急激な復元力の低下は見られず変形性能は良好であることが分かる。従来型の試験体の実験結果と比較すれば架構の持つエネルギー消散能力が相当改善されていることは明らかであり、主要な部材の座屈後の変形性能が極めて高いことが分かる。ただし、曲げ部材の両端部は支柱材および水平材に溶接接合されているため両端ピン支持と仮定した設計応力よりも存在応力が小さくなり、また曲げ耐力が大きいために斜材の座屈が設計で意図したよりも早く発生している。その結果、変位 0 付近で剛性が低下するブレース付ラーメン架構に近い復元力特性を示している。

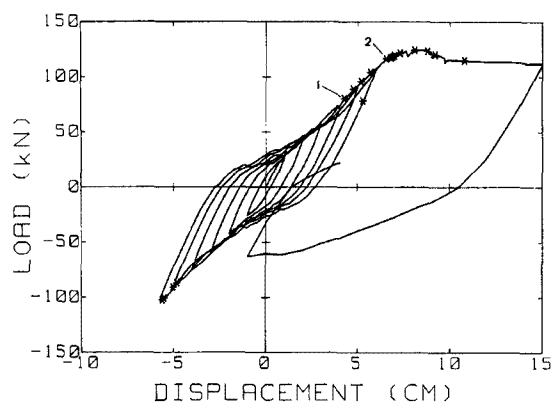


Fig. 8. Load-displacement diagrams. (TYPE-D1)

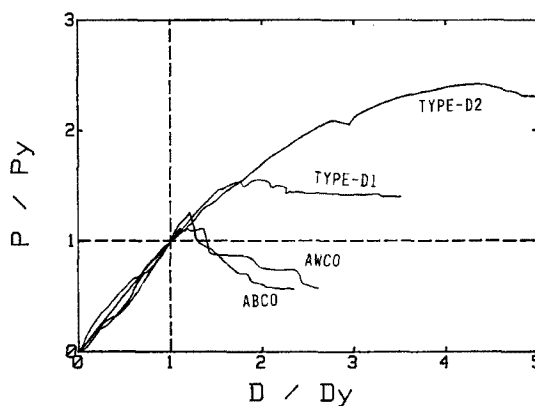


Fig. 11. Normalized P-D relations.

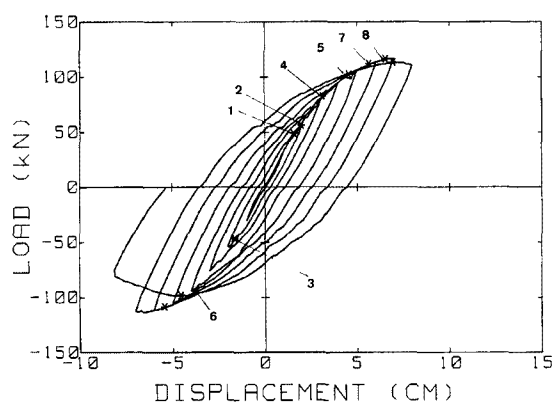


Fig. 9. Load-displacement diagrams. (TYPE-D2)

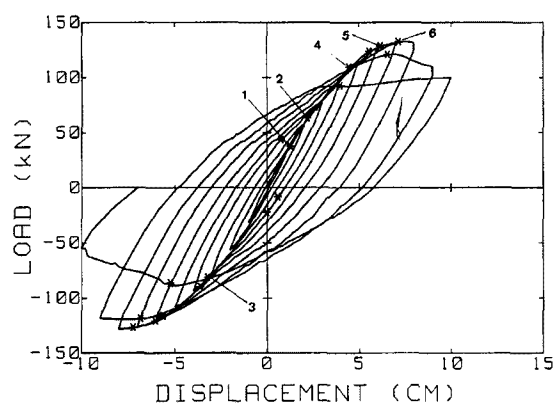


Fig. 10. Load-displacement diagrams. (TYPE-D2, diagonal direction loading)

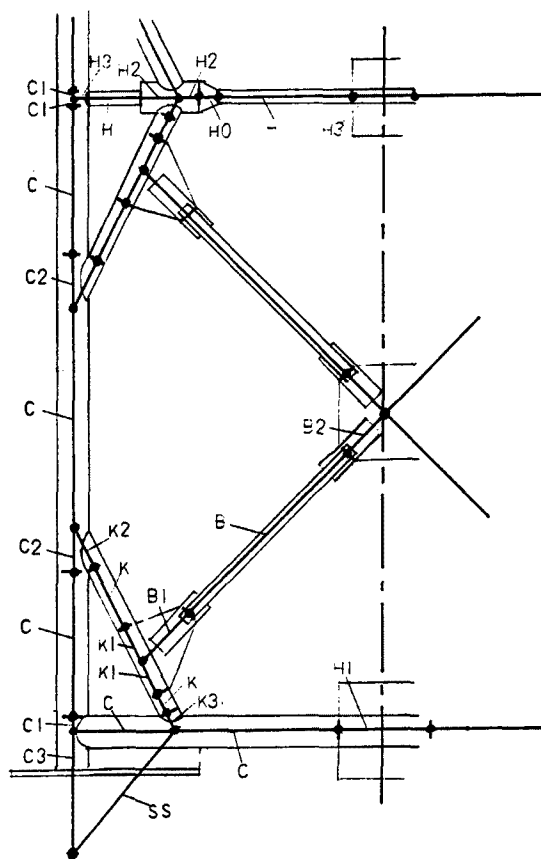


Fig. 12. Model of specimen for numerical analysis.

3.3 曲げ降伏先行型架構実験 (TYPE-D2)

TYPE-D1の実験結果を踏まえ、曲げ部材の断面を小さくして斜材座屈発生前に曲げ部材が十分な塑性変形を起こすようにした試験体である。Fig. 9 に構面平行方向、Fig. 10 に対角方向にそれぞれ水平力を繰返し載荷して得た荷重-変形関係を示す。

(1) 構面平行方向に水平力を受ける場合

構面平行方向载荷の場合、Fig. 9 の①で2カ所、②で1カ所、③で2カ所、④で1カ所それぞれ曲げ部材の歪が材料の降伏歪を超えているのが認められ、また④では同時に下パネルの斜材1本に座屈の発生が見られた。次サイクルの⑤、⑥でそれぞれ斜材に座屈が見られて剛性の低下が進み、⑦、⑧でそれぞれ柱脚側主柱材が座屈して最大耐力に達した。最終サイクルでは柱頭側主柱材の座屈と水平材の曲げによる破断によって復元力が低下しはじめ、ほぼ全ての斜材と主柱材が座屈して崩壊に至った。この実験で示される復元力特性は鋼構造ラーメン架構に匹敵するほど安定した紡錘形のループを描いており、従来型のトラス架構と比較して格段に優れた変形性能を示している。また、斜材の座屈発生前に曲げ材の塑性変形が進行するため TYPE-D1に見られたような変位0付近でのズレを含む履歴特性も見られない。

(2) 対角方向に水平力を受ける場合

Fig. 10 の①で2カ所、②で3カ所、③で3カ所の曲げ部材に降伏が見られ、④で圧縮側主柱材に座屈の兆候が歪記録から見られ、次サイクルで大きく進展した。⑤で斜材の座屈が発生しあわせて引張側主柱材の下部が引張降伏し、このため復元力の上昇が低下した。この主柱材は次サイクルの逆方向载荷時に座屈し、さらに次サイクルの⑥で反対側主柱材が座屈した直後に最大耐力に達して復元力は低下し始めた。次サイクルで逆方向载荷時にも主柱材が座屈して最し耐力に達し、その後斜材と主柱材の座屈が大きく進展して復元力は徐々に低下した。

従来型の試験体を対角方向に载荷した場合と比較すれば、主柱材の座屈によって最大耐力が決まり、その後、残る3本の主柱材によって復元力が維持される傾向は変わらない。しかし、最大耐力に至るまでの履歴曲線は構面方向载荷と同様に安定した紡錘形のループを描いており、従来型よりも高いエネルギー消散能力を持つ架構であると考えられる。

4. 考 察

4.1 変形性能

各架構形式の試験体の変形性能を比較するために、実験から得られた载荷点での荷重-変形関係をもとに、それぞれの試験体で最初に部材が降伏または座屈したときの荷重を P_y 、そのときの変位を D_y とし、荷重を P_y 、水平方向変位を D_y で除して無次元化した荷重-変形関係を Fig. 11 に示す。いずれも構面平行方向に繰返し载荷した実験から得た履歴ループの包絡線を示している。図中の AWC0、ABC0 は従来型試験体の結果で、両者は部材の接合方法が異なっており、AWC0 は溶接接合、ABC0 はボルト接合によるものである。無次元化の基準となる座屈発生の判定は部材の周囲に貼付した歪ゲージの歪計測値によるものであり、 P/P_y が1に達してから最大耐力までの間に若干の開きがある。いずれも従来型試験体は主要な部材の座屈が直ちに架構の崩壊に結びついて最大耐力に達し、その後は急激に復元力が低下するために座屈後の変形性能はほとんど期待できない。

一方、曲げ降伏先行型の架構では曲げ部材の降伏後も復元力は上昇し、主要な部材の座屈が遅くなるほど復元力特性は安定し変形性能が向上していることが分かる。曲げ部材の降伏後の耐力の上昇は、TYPE-D1 で約1.6倍、TYPE-D2 で約2.4倍に達している。また、最大耐力後の高い復元力を維持できる範囲は、TYPE-D1 で D_y の3.5倍、TYPE-D2 で D_y の5倍以上にわたっている。

従って本報で提案する架構形式によれば水平力の载荷方向にかかわらず高い変形性能を期待できると考えられる。

4.2 数値解析

(1) 解析方法

試験体の1構面を取り出した形の平面架構を対象に実験と同様の境界条件、荷重条件で直接剛性法による増分解析を行い、架構の崩壊機構が形成される過程を解析的に確認した。解析モデルは実験に用いた試験体の各部材を線材要素として取り扱ったものであるが、接合部詳細が部材応力の分配に大きな影響があるため、Fig. 12 に示すように要素分割したモデルとしている。各要素に付した符号はCが主柱材、Bが斜材、Hが水平材、Kが曲げ部材を示す。

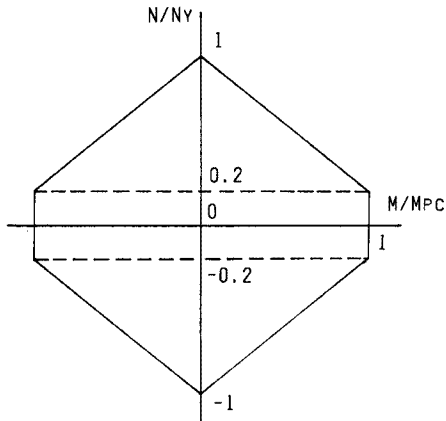


Fig. 13. Bending moment-Axial force interaction.

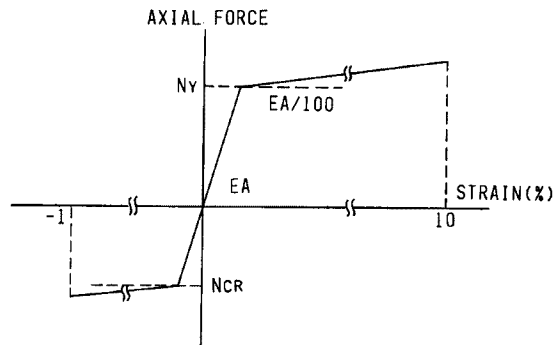


Fig. 14. Axial stress-strain relations.

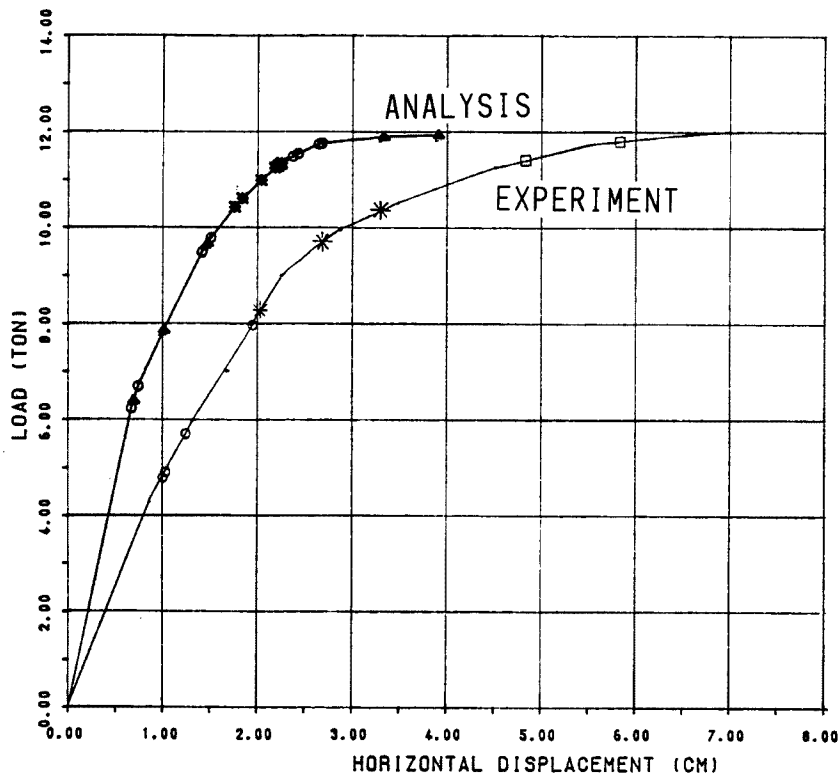


Fig. 15. Results of numerical analysis.

解析では、各部材の曲げモーメントと軸力の相関を考慮して全塑性状態に達した箇所では塑性ヒンジが形成されるものとし、その判定は鋼構造塑性設計指針に基づいて Fig. 13 に示す判定基準を用いた。また、各部材の軸力と軸方向歪の関係は、引張降伏または座屈により伸び剛性が 1/100 に低下するものと仮定して、Fig. 14 に示す応力-歪関係を用いた。

(2) 解析結果

TYPE-D 2 試験体を構面平行方向に単調載荷した場合について、Fig. 14 に実験および解析から得た荷重-変形関係を重ねて示す。解析結果は初期から剛性が実験結果よりも高くでているが、これは試験体に見られるボルト接合部のボルトの滑りが考慮されていないことや部材接合部は全て剛接合として接合部の剛性を評価に入っていないことが原因と考えられる。図中の、○は曲げ部材の降伏、*は斜材座屈、△は水平材曲げ降伏、□は主柱材座屈をそれぞれ示す。両者を比較すれば曲げ部材の降伏が先行し、続いて斜材の座屈が発生する過程が解析によりほぼ追跡されている。

5. 結 論

ダブルワレン形式の塔状トラス架構の水平力に対する変形性能を改善するために斜材端部に曲げ部材を付加した曲げ降伏先行型の架構形式を提案し、この架構形式による試験体を製作して静的載荷実験を行って従来型のトラス架構と比較を行った。その結果、曲げ部材の塑性変形を先行させ主柱材や斜材の座屈を遅らせることによって、提案架構は従来型で特に変形性能が低い構面方向に水平力を受ける場合でもラーメン架構に近いほどの良好な復元力特性と変形性能を持つことが示された。また、平面架構の解析によって部材の応力状況を求め、架構の崩壊に至る過程を追跡することが可能であり、これに基づいて断面設計を行うことができると思われる。

今後の課題として、部材接合部詳細を実架構に適用可能な形状にした場合の性能を確認すること、水平力と同時に鉛直荷重を受けた場合の変形性能を確認すること、立体モデルを用いて構面外方向の水平力を受けた場合の挙動を解析的に予測すること、などが必要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 金 冢 潔・甲津功夫・吹田啓一郎・平川恭章・稲岡真也：鋼管を用いた塔状立体トラス構造物の力学的挙動について、京都大学防災研究所年報，第30号 B-1，pp. 169-182，1987年。
- 2) 金 冢 潔・甲津功夫・吹田啓一郎・稲岡真也：対角方向水平力を受ける鋼管塔状立体トラス構造物の力学的挙動について、京都大学防災研究所年報，第31号 B-1，pp. 351-361，1988年。
- 3) 金 冢 潔・甲津功夫・吹田啓一郎・稲岡真也・山田直人：鉛直力と水平力を同時に受ける鋼管塔状立体トラス構造物の力学的挙動について、京都大学防災研究所年報，第32号 B-1，pp. 483-497，1989年。
- 4) J. Dario Aristizabal-Ochoa, "Disposable Knee Bracing: Improvement in Seismic Design of Steel Frames", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 112, No. 7, July, 1986, pp. 1544-1552.