

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

正会員 和田 章*
正会員 久保田 英之**

1. 序

一般的な鉄骨複層立体トラス構造の設計においては、設計荷重に対する弾性応力解析結果を用いた許容応力度設計が行われていると考える。この場合、部材断面の選択および接合部の設計における安全率の考え方は設計者の判断によって異なると思われるが、多くの場合、圧縮材では部材の全長を座屈長さとした許容応力度設計、引張材と接合部においても許容応力度設計が用いられ、接合部の強さを母材より強くする設計が行われていると考える。平板状の複層立体トラスについては全体的な不安定現象は問題とならないので、このように部材の設計が中心となるが、球形・円筒形のトラス構造では単層またはせいり小さな複層トラスが使われるため、全体座屈・部分座屈に関する安全確認が行われる。しかしながら、許容応力度設計によって作られた立体トラス構造全体の安全性または余裕度は設計時点において不明のままであり、単に立体トラス構造は不静定次数が高いから安全であるという定性的な考え方を定量的に把握するためにも、一般の骨組構造の耐震設計で行われているように、その終局時における壊れ方に注目した検討を行う必要があると考える。

大きな荷重を受けた立体トラスの終局的な強さ・挙動については、部材の破断あるいは接合部の破壊、全体・局部または部材の座屈に伴う不安定現象およびこれらすべての複合的現象が影響を持つ。これらについては2.で述べるように理論解析・数値解析・実験による研究が多く行われているが、実際の設計の過程において立体トラスの安全性を確認するための手段として実用的に用いられているとは言えない。また、近年立体トラス構造は壁状構造あるいは搭状構造など、鉛直面を構成する構造としても用いられるようになってきている。このような構造物を耐震設計するためには、ほかの骨組構造と同様に立体トラス構造の挙動を終局状態まで解析することが必要となる。

本研究では、立体トラスとしての安定問題および部材

の座屈・破断あるいは接合部の破壊が全体に及ぼす影響を調べるため、これらの複雑な現象を3.以下で述べるように単純化し、大荷重を受けるトラス構造全体の挙動を静的に追跡する方法を提案し、3つの例題を数値解析しその適用性を示す。解析手法は筆者ら¹⁾が発表した、材料非線形・幾何学的非線形を考慮した3次元トラス構造物の解析法を応用し、部材の軸力-軸伸縮関係に弾塑性座屈の影響を考慮できるように改良したものをを用いる。

3.で述べる単純化を行っているため、本研究で用いている手法の適用範囲は以下のようにになると考える。

(A) 解析対象は、各部材の両端部をピンとみなすことができると考えられるトラス構造物に限定する。各部材の両端部を剛に接合した単層トラス構造のように剛接合の効果が強影響を持つ構造物には適用できない。

(B) 3.2およびAppendix 1に述べる部材の軸力と軸伸縮との関係を表現する柴田²⁾が提案した関数の適用範囲の制限から、両端ピン接合として求めた使用部材の細長比は50から80程度のものに限定する。

2. 既往の研究および本研究の方法

2.1 既往の研究

トラス構造物の解析は古くから多くの研究者が行っているのでそのすべてを紹介することは不可能である。ここでは主に最近の研究から代表的なものを示す。

日置ら^{3)~5)}は、曲げを考慮した部材の座屈荷重から巨視的な有剛性あるいは有効強度を求めることを提案した。また、坂・日置ら^{6),7)}はねじ込み接合の立体トラス構造の実験および解析を通じ、接合部の大きさ・回転が耐力に及ぼす影響を検討した。

鈴木・小河^{8),9)}は、円筒トラスシェルの非線形挙動の解析を剛接あるいは剛接度をバネで評価したトラスモデルにより行った。また鈴木・小河ら^{10)~12)}は、四角錐集合要素を用いて個材座屈・塑性化を考慮した解析を行い、部材座屈後の荷重変形関係を表現できることを示した。

加藤ら¹³⁾は、軸方向および端部ねじ部に弾塑性を考慮したモデルにより、単層トラス球殻の弾塑性解析を行った。また加藤ら¹⁴⁾は、ピン接合単層トラスドームの座屈

* 東京工業大学 助教授・工博

** 東京工業大学 大学院生

(昭和63年3月10日原稿受理)

荷重に対する荷重や形状の初期不整が及ぼす影響について考察した。

半谷ら¹⁵⁾は、剛接合低ライズ球形スペースフレームを対象に、連続体置換法で評価した座屈荷重を、直接法で幾何学的非線形を考慮して求めたものと比較した。

山田ら¹⁶⁾は、剛接トラスからなる単層球殻の実験および解析を行い、全体座屈荷重を比較した。

Toaderら¹⁷⁾は、曲げを考慮した部材を用いて端部の回転拘束の影響を調べた。

Smith¹⁸⁾は座屈を考慮した部材を用いて二層のトラス構造物の解析を行い、部材座屈後のダクティルな性状が表せることを示した。

Rashedら¹⁹⁾は、曲げを考慮した部材で、耐力を軸力と曲げモーメントの関数とおくことにより複層トラスシェルの解析を行った。

Madiら²⁰⁾は、ピン接合トラス構造物に塑性化・座屈を考慮した部材を用い、2層平板トラスおよび鉄塔の部材座屈による崩壊解析を行った。

Collinsら²¹⁾は曲げを考慮した部材を用いて2層平板トラスの座屈解析を行い、部材端部の固定状態の違いによる性状の変化を検討し、模型実験と比較した。

McConnelら^{22), 23)}は3節点の梁要素を用い、低ライズのシェルの座屈性状について検討した。

なお、本論文で取り上げている、部材の破断によるトラス構造物の崩壊現象を扱った研究は見当たらなかった。

2.2 本研究の方法

(1) 本論文では、解析上の最小単位を1本1本のトラス部材とする。部材を独立に扱うことは、任意形状のトラス構造物に対して適用できる点、部材1本1本の挙動が把握でき、塑性化あるいは座屈などの非線形性状の導入が容易であるという点で、立体トラスの性質と連続体の性質のアナロジーを考慮して立体トラスを連続体に置換する手法に比べて優れていると考える。個々の部材を独立に扱う方法を用いることは未知数が増大するという問題点があるが、現在では計算機の性能向上により、この問題点は解消しつつあると考えられる。むしろ、単位部材が単純で数が多いということは、今後ますます一般的になるであろうスーパーコンピュータの利用には適していると考えられる。

(2) 本論文では軸力と軸変形との関係を部材ごとに独立に扱い、トラス全体の挙動をある程度簡単に解析することが目的であるため、部材両端はピン接合されていると考える。部材間が剛接合されていると考え、部材の座屈現象を周辺の部材の動きと同時に解析する方法の方が実際現象を表すためには厳密であるが、部材を3次元の梁としてモデル化する必要が生じる。この厳密な方法を適用するためには非常に多くの計算量が必要となる

が、筆者らはスーパーコンピュータの利用を前提としてこの方法による数値解析も試み、別の論文として発表済²⁹⁾である。

3. 解析法

3.1 概要¹⁾

部材剛性マトリックスは大変形の影響を考慮した理論による。1本の部材の増分形のつり合い方程式として軸力の影響を考慮した(1)式に示すものを用いる。部材長は常に部材両端節点の中心間距離で計り、部材軸力の計算に用いる部材の伸縮量は、両端の節点の最新の座標から求めた長さとの差によって計算する。

$$\begin{Bmatrix} f_{ix} \\ f_{iy} \\ f_{iz} \\ f_{jx} \\ f_{jy} \\ f_{jz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 & 0 & -K & 0 & 0 \\ 0 & N/L & 0 & 0 & -N/L & 0 \\ 0 & 0 & N/L & 0 & 0 & -N/L \\ -K & 0 & 0 & K & 0 & 0 \\ 0 & -N/L & 0 & 0 & N/L & 0 \\ 0 & 0 & -N/L & 0 & 0 & N/L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_{ix} \\ \Delta u_{iy} \\ \Delta u_{iz} \\ \Delta u_{jx} \\ \Delta u_{jy} \\ \Delta u_{jz} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} N \\ 0 \\ 0 \\ -N \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 i, j は節点番号、 x, y, z は局所座標であり、 x 軸は部材軸上にとり、 yz 座標は x 軸と直交する面上にとる。その他の記号の意味を以下に示す。

$\{f\}$: 外部節点力

$\{\Delta u\}$: 収束計算中の増分変位

K : 材料、断面形状、部材長を基に部材の伸縮の履歴から柴田²⁾の導いた関係式によって求められる瞬間剛性(3.2およびAppendix 1)

L : 直前の収束計算の結果から求められる最新の節点位置から求めた部材長

N : 直前の収束計算の結果から求められる最新の軸力(これまでの部材の伸縮の履歴から柴田²⁾の導いた関係式によって求められる)

求めた部材のつり合い方程式を組み立て、全体つり合い方程式として連立1次方程式が得られる。これを解くことによって増分変位が求められ、非線形解析を進めることができる。詳細は文献1)と同じでありここでは省略する。

3.2 座屈を考慮した部材特性

部材の軸力はその部材の軸方向ひずみおよび軸力の履歴から一意に定まるものとする。この関係を表す関数として柴田²⁾が提案した理論を用いる。座屈現象は圧縮変形に伴う軸力低下の形で表現する。

この関数は鉄骨構造の筋違の解析のために導かれたものではあるが、式展開が明快であり、座屈発生荷重ある

いは座屈後の挙動などが簡単に表せるためトラス構造の解析にも有効であると考えられる。外力の方向が複雑に変化する場合はもちろん、外力が1方向に単調に作用する場合であっても、部材が座屈あるいは塑性化した場合に、その周辺の部材のひずみの進行は必ずしも単調であるとは限らない。そのため、本論文では繰り返しの履歴が追跡できるモデルを用いる。

部材の座屈が進行している場合には、降伏域の進展に伴って軸方向外への変形増大が原因で軸力が低下する。これは見掛け上剛性が負となることを示している。ここで用いている柴田の関数でも、座屈進行時には負の剛性となる (Appendix 1 参照)。

座屈が進行している部材については、この負の剛性を用い、(1)式により要素剛性マトリックスを求める。このようにして求めた要素剛性マトリックスを組み立てててでき上がった全体剛性マトリックスは正值性が保証されない。本論文ではこのマトリックスを係数とする連立一次方程式の解法として軸選択を行うガウス消去法を用い、解を得ている。

3.3 部材破断の解析方法

本論文ではトラス部材の両端がピン接合されているとし、軸力と軸変形の関係だけでその力学的性質を考えている。そのため、部材破断および接合部破壊を区別せず、初期部材長に対するその時点の部材長の比として定義されるひずみが破断ひずみを超えたときに破断現象が発生するものとし、破断直後、瞬間的に負担軸力がゼロになると考える。

このようにモデル化した場合、図-1(A)のように微小なひずみの変化に対して大きな応力変動が生じる。このため、収束計算によってもつり合い状態が求まらないことが発生する。この解決法として、以下の手法¹⁾を採用する (図-1(B))。

(1°) 破断ひずみを超えた部材が存在する場合、それ

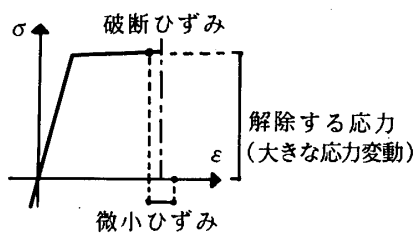


図-1(A) 部材の破断による大きな応力変動

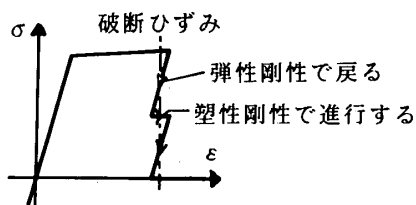


図-1(B) 階段状除荷

までと逆向きにわずかに全体荷重を除荷する。

(2°) しかる後に本来の加力方向に載荷する。この際、破断ひずみを経験した部材は除荷された状態の応力を保持するように塑性剛性を用いる。

最終的に破断したと判断された部材の軸力をゼロとするまで1°-2°の手順を繰り返す。

3.4 加力方法

幾何学的非線形の影響によって生じる不安定状態および外力低下の挙動は、新たなパラメーターを導入する半谷²⁴⁾、Riks²⁵⁾などの方法で解析により追従可能である。しかし、部材座屈や破断による急激な状態の変化への対応は困難である。このような場合には、一つの節点の変位量を制御することにより追跡することが通常行われる。しかし、この方法では各節点の荷重(反力)の分担が予想できない。

本論文では、節点間の外力分布を一定に保ったまま各節点の変位を制御する須藤²⁶⁾の方法 (Appendix 2)を用いる。

4. 解析例

4.1 大変形を起こす構造物

大変形領域での解析例として、図-2に示すスパン

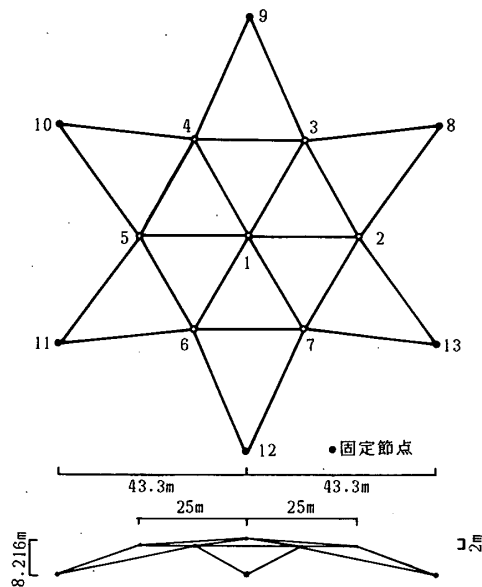


図-2 解析例1・単層立体トラス構造

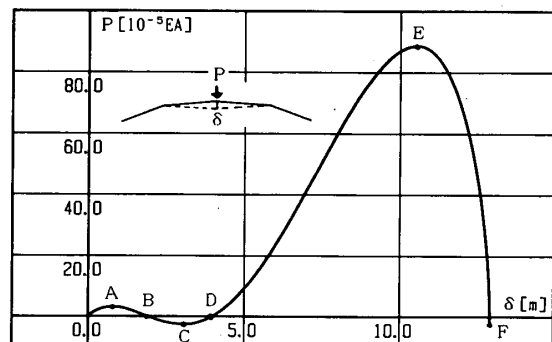


図-3 荷重-変位関係

100 m, ライズ 8.216 m のピン接合された単層立体トラス構造を扱う^{24), 27)}。部材はすべて同一の材料 (ヤング係数 E ・断面 (断面積 A) から成り, 常に弾性を保ち個材座屈は生じないものとする。

荷重は中央の点 1 だけの変位の制御することにより作用させ $\delta=13$ m までの解析を行った。図-3 に点 1 の変形 δ とこの点における鉛直荷重 P との関係を示す。

この図中の A~F 点における変形および軸力を図-4 に示す。この変形図は図-2 中の点 11-4-1-2-13 を結ぶ断面の変形および軸力を表したものであり, δ, P の単位は図 3 と同一である。

本解析結果は Tachibana²⁷⁾ らの行った解析結果とよく一致していることを確認してある。

4.2 平面トラス構造

この例は, 図-5 に示すスパン 14 m, せい 3 m, グリッド数 7 の単純支持された平面トラス構造物の, 下弦材の各点に等しい荷重が作用するように変位を制御することにより載荷した場合の挙動を解析したものである。表一

1 に使用した材料の性質を, 表-2 に断面の性能をそれぞれ示す。この例では上・下弦材, 斜材, つか材の各グループごとに同一のものを使用した。ここではそれぞれの細長比がほぼ一定になるように断面を定めた。

図-6 に全荷重 P と下弦ほぼ中央の点 (図-5 中に◎で示す) における加力方向変位との関係を示す。

この例では, 中央の上弦材①が最初に座屈し, ついでそれに隣接する上弦材②②'が座屈した。その後, 中央下弦材③が降伏したときに最大耐力となった。これ以降は緩やかに荷重が低下してゆく。変形が進むにつれ, 幾何剛性の影響でわずかに荷重が増加する。さらに変形を増加させると, 中央下弦材③のひずみとその破断ひずみとなり破断し, 荷重は急激に低下する。これ以降は座屈した部材の大変形後の残存耐力をほぼ一定としているため, 荷重は変化しなくなる。

図-7 に中央下弦材③, 中央上弦材①およびそれに隣接する上弦材②の軸力の変化を示す。縦軸にはそれぞれの軸力の降伏軸力に対する比をとり, 横軸は図-6 と同

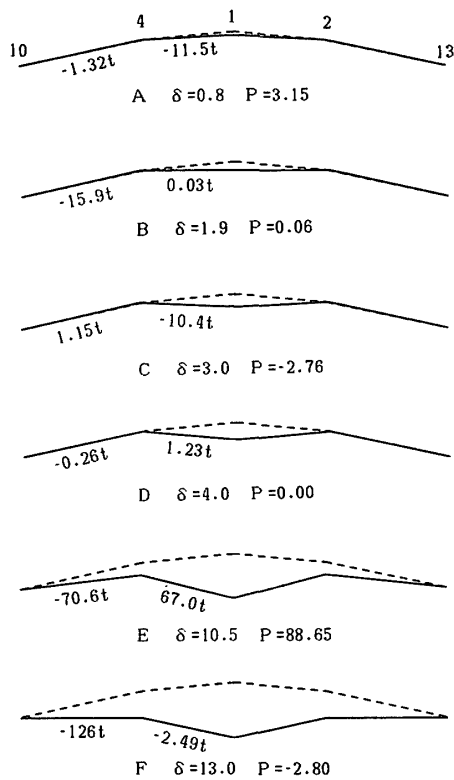


図-4 変形および軸力

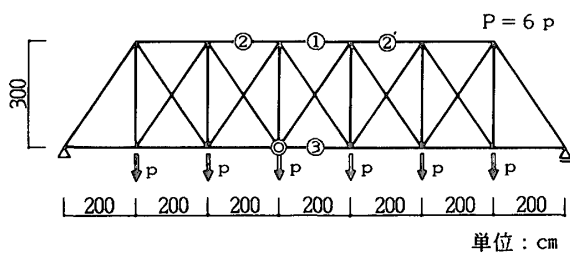


図-5 解析例 2・平面トラス

表-1 材料定数

弾性剛性	塑性剛性	降伏点	破断ひずみ 降伏ひずみ
2100 t/cm ²	21 t/cm ²	2.4 t/cm ²	100.0

表-2 断面性能 (平面トラス)

種別	材長 [cm]	断面積 [cm ²]	断面 2 次 モーメント [cm ⁴]	細長比	Euler 荷重 降伏軸力
上弦材	200.0	12.26	146.0	57.96	2.57
下弦材	200.0	12.26	146.0	57.96	2.57
斜材	360.6	30.13	952.0	64.14	2.10
つか材	300.0	19.13	438.0	62.70	2.20

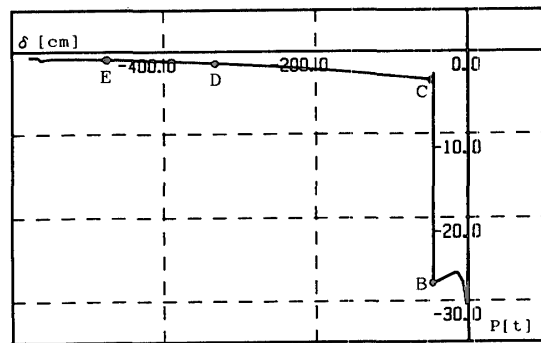


図-6(1) 荷重-変形関係

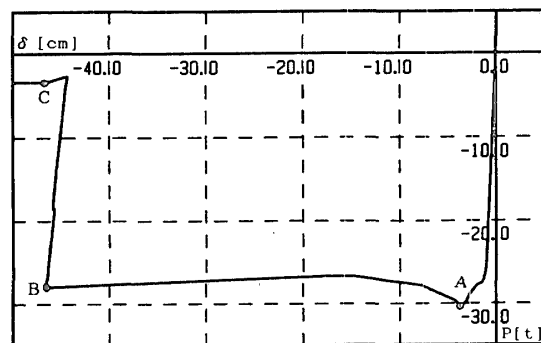


図-6(2) 荷重-変形関係 [拡大]

様の○の節点の鉛直変位を表している。

図-6中に示すA~Fの荷重ステップにおける変形状

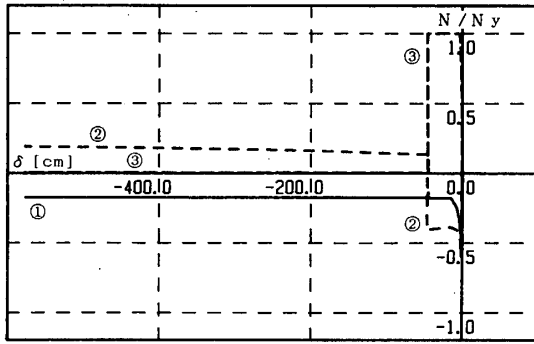


図-7(1) 軸力-変形関係

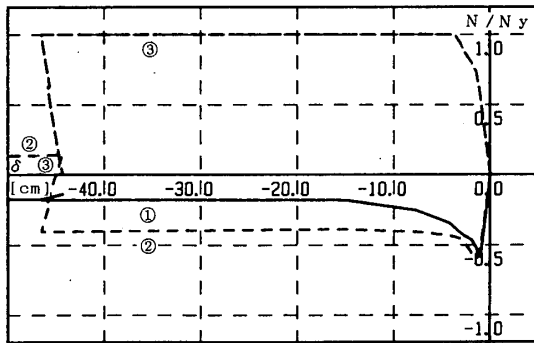
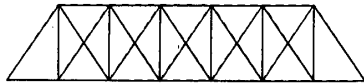
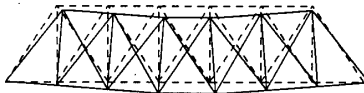


図-7(2) 軸力-変形関係 [拡大]



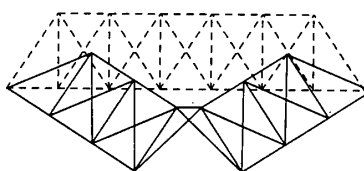
A $\delta = -3.7\text{cm}$ $P = -30.5\text{t}$



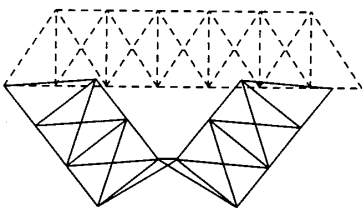
B $\delta = -46.5\text{cm}$ $P = -28.0\text{t}$



C $\delta = -46.7\text{cm}$ $P = -3.5\text{t}$



D $\delta = -325.7\text{cm}$ $P = -1.5\text{t}$



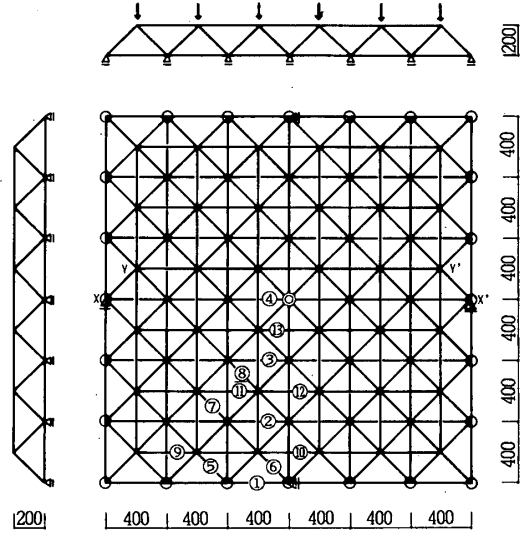
E $\delta = -470.7\text{cm}$ $P = -0.9\text{t}$

図-8 変形図

態を図-8に示す。破線が変形前、実線が変形後を表している。この図では変形量を誇張していない。また破断した部材は描いていない。

4.3 立体トラス構造

本例は、図-9に示すスパン 24 m×24 m、せい 2 m、グリッド数 6×6の正方形平面の立体トラス構造物の、上段部材の各節点に等しい荷重がかかるように、変位を



○：鉛直方向拘束 単位：cm

図-9 解析例3・立体トラス

表-3 断面性能 (立体トラス)

種別	材長[cm]	断面積[cm ²]	断面2次モーメント[cm ⁴]	細長比	Euler荷重降伏軸力
上弦材	400.0	22.72	734.0	70.37	3.32
下弦材	400.0	22.72	734.0	70.37	3.32
斜材	346.4	19.13	438.0	72.40	3.14

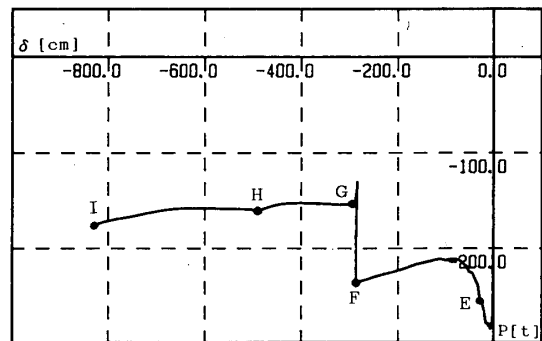


図-10(1) 荷重-変形関係

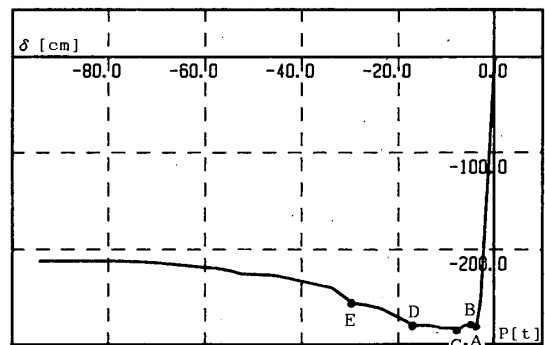


図-10(2) 荷重-変形関係 [拡大]

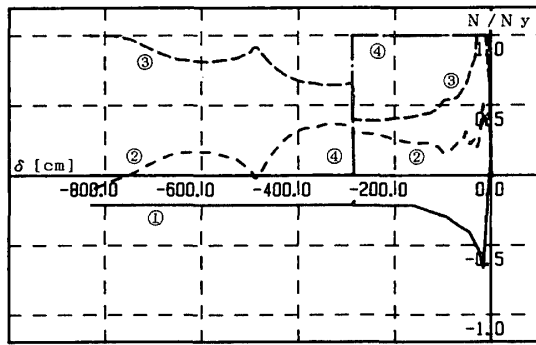


図-11(1-A) 軸力-変形関係 (下弦材)

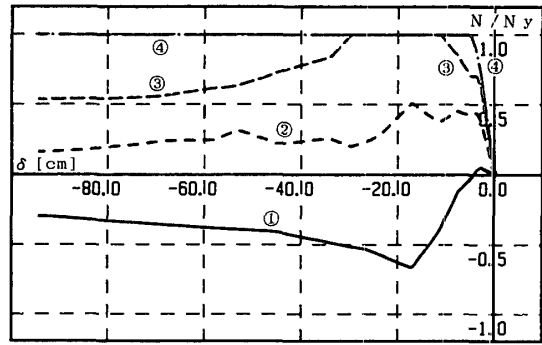


図-11(2-A) 軸力-変形関係 (下弦材) [拡大]

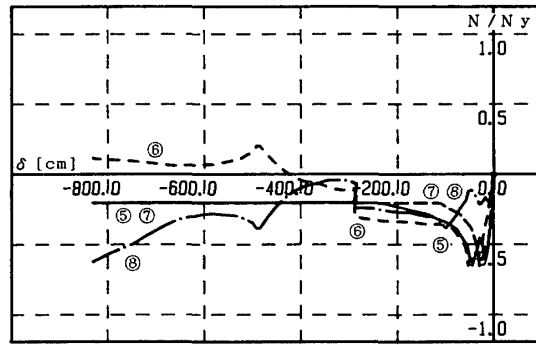


図-11(1-B) 軸力-変形関係 (斜材)

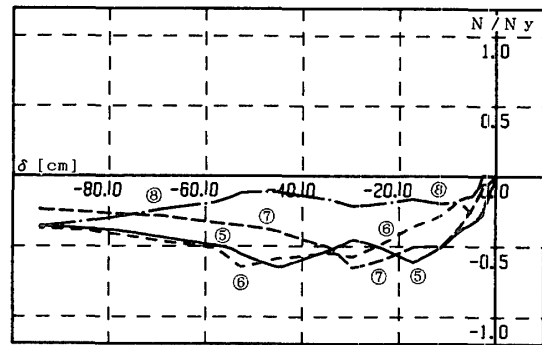


図-11(2-B) 軸力-変形関係 (斜材) [拡大]

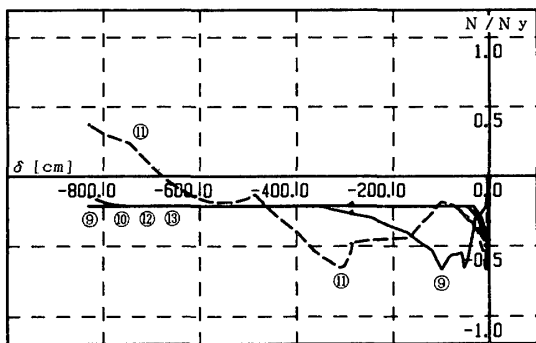


図-11(1-C) 軸力-変形関係 (上弦材)

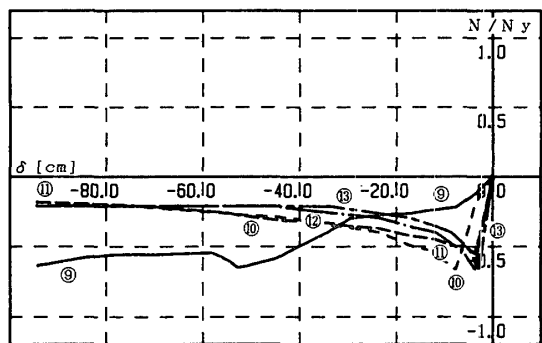


図-11(2-C) 軸力-変形関係 (上弦材) [拡大]

制御することにより荷重した場合の挙動を解析したものである。用いた材料の性質は4.2と同じである。表-3にこの構造物に用いた断面の性能を示す。上・下弦材、斜材の各グループごとに同一の部材を使用し、それぞれのグループについて、部材の細長比がほぼ一定になるように断面を定めた。

境界条件は、下段の節点のうち周辺に位置するものを鉛直支持し、水平方向へは下段の節点を図-9に示すように拘束した。

図-10に全荷重 P と下段中央の点 (図-9中に◎で示す) における加力方向変位との関係を示す。

図-11に主な部材の軸力の変化を、上弦材、下弦材、斜材に分けて示す。縦軸はそれぞれの部材の軸力の降伏軸力に対する比、横軸は図-10と同じである。

以下、対称性により同等の位置関係にある部材については1つの部材で代表させる。この例では中央の上弦材⑬が最初に座屈し、ついでその外側の上弦材⑫が座屈し

た。その後、中央下弦材④が降伏したときに最大耐力となった。これ以降は緩やかに荷重が低下してゆくが、変形が進むにつれ、幾何剛性の影響でわずかに荷重が増加する。さらに進むと、中央下弦材④がその破断ひずみとなったところで破断するため、荷重は急激に低下する。この瞬間、各部材の軸力状態は大きく変化するが耐力は残存しており、破断した下弦材④の両側の下弦材③の軸力が増加し始めていることが分かる。

図-12に図-10中に示すA~Iの各ステップにおける、部材の降伏・座屈・破断の様子を示す。

図-13に、F~Iステップにおける変形状態を示す。図が繁雑になるのを避けるため、斜材は省略してある。

5. 結論

本論文では、文献1)に示した解析法に部材の座屈を考慮できる方法を導入することにより、平面および立体トラス構造物の崩壊現象をトラスせいの数倍の変形まで解析することができることを示した。ここで示した第1

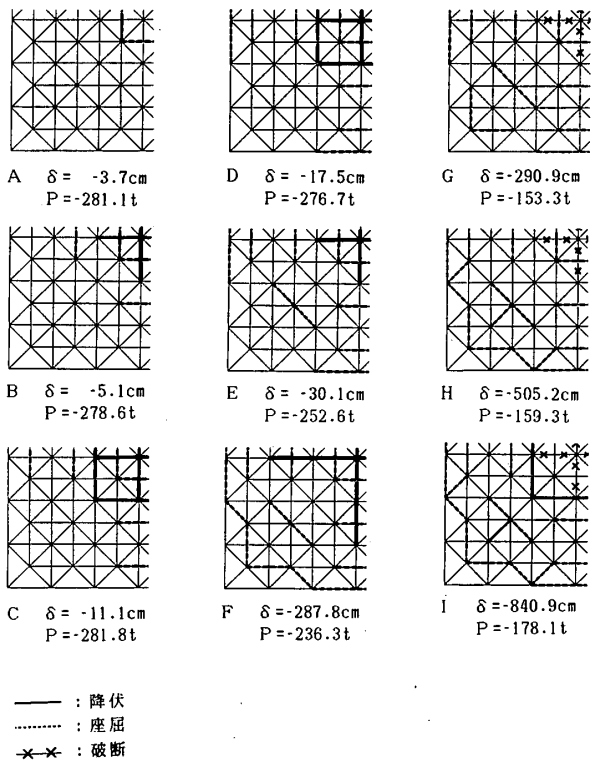


図-12 部材の座屈・降伏・破断状況

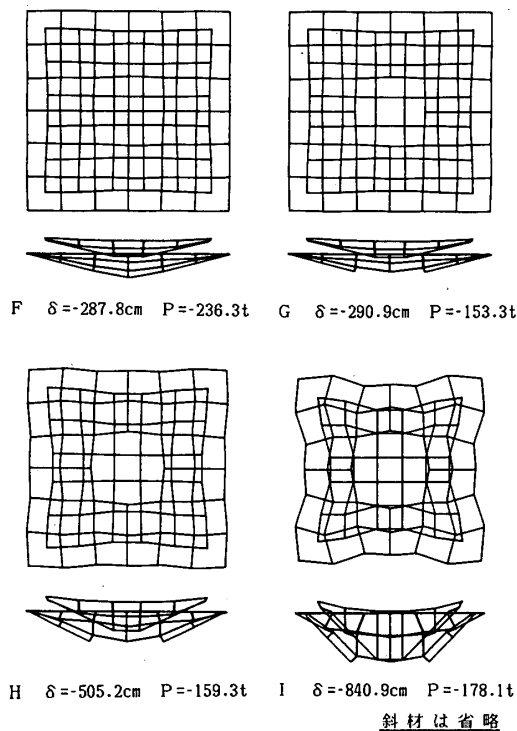


図-13 変形図

の例題で全体座屈が、第2・第3の例題ではいずれも部材座屈が先行したが、部材の製品不良または構造物の施工不良がある場合には部材破断が先行することがありうる。この場合であっても、本手法ではその崩壊までを追跡することが可能であり、事故時の安全性の検討等にも有効であると考えられる。

謝 辞

繰り返し軸力を受ける部材の軸変形-軸力関係を求めるプログラムをご提供くださった摂南大学教授柴田道生博士に深く御礼申し上げます。

Appendix 1 部材の復元力関数

読者の便を計るため、ここで用いた繰り返し軸力を受ける部材の復元力関数の要点を以下に示す。

(1) 部材の耐力曲線を次式で与える²⁸⁾。

$$\text{圧縮側} : n = 1 / (p_1 \delta + p_2)^{0.5} \dots\dots\dots (a-1)$$

$$\text{引張側} : n = 1 / (p_3 \delta + 1)^{1.5} \dots\dots\dots (a-2)$$

ここに、 n は無次元軸力 (= 軸力) / (降伏軸力)、 δ は無次元軸方向変位 (= 軸方向変位) / (降伏軸方向変位) であり、 p_1 、 p_2 、 p_3 は無次元 Euler 荷重 (= $(\pi^2 E) / (\lambda^2 \sigma_y)$)、 E : ヤング係数、 λ : 細長比、 σ_y : 降伏応力度) から定まる定数である。

(2) (1) で与えられた耐力曲線を区分線形化する²⁾。これにより n は (a-3) 式のような δ の関数で与えられる。

$$n = \begin{cases} 1 & (\delta \geq \delta^A, \delta' = 0) & \text{[降伏]} \\ c_k (\delta - \delta^A) + d_k & (\delta^A \leq \delta \leq \delta^P, \delta' > 0) & \text{[引張耐力]} \\ n^q + \frac{\delta - \delta^q}{\delta^P - \delta^q} (n^P - n^q) & (\delta^q < \delta < \delta^P, \delta' > 0) & \text{[弾性, 除荷]} \\ a_j (\delta - \delta^B) + b_j & (\delta \leq \delta^q, \delta' < 0) & \text{[座屈]} \end{cases} \dots\dots\dots (a-3)$$

ここで点 P 、 Q は弾性 [除荷] 域の引張側および圧縮側での限界点 (耐力曲線との交点) である。また a_j 、 b_j および c_k 、 d_k はそれぞれ (1) で与えた圧縮側および引張側の耐力線を区分線形化した時に生じる定数である。

Appendix 2 荷重分布状態を設定した変位制御法

ある物体内の点 i に作用する力およびその点の変位をそれぞれ p_i 、 δ_i で表すと、剛性マトリックスを K を用いて (a-5) 式なる関係がある。

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix} K \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \vdots \\ \delta_n \end{pmatrix} \dots\dots\dots (a-5)$$

今、この物体に働く荷重が $p_2 = \alpha_2 p_1$ 、 $p_3 = \alpha_3 p_1$ であることが分かっているとき、

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (a-6)$$

を用いることにより、(a-7)、(a-8) 式を導くことができる。

$$p' = [p_1 \ 0 \ 0 \ p_4 \ \dots \ p_n]^T = T^T [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ \dots \ p_n]^T \dots\dots\dots (a-7)$$

$$[\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3 \ \delta_4 \ \dots \ \delta_n]^T = T [\delta'_1 \ \delta'_2 \ \delta'_3 \ \delta'_4 \ \dots \ \delta'_n]^T = T \delta' \dots\dots\dots (a-8)$$

ここに、

$$\delta' = \delta'_1 + \alpha_2 \delta'_2 + \alpha_3 \delta'_3 \dots\dots\dots (a-9)$$

したがって、(a-5) 式から (a-10) 式のつり合い方程式を導くことができる。

$$p' = T^T K T \delta' = K' \delta' \dots\dots\dots (a-10)$$

この方程式を通常の変位制御の手法を用いて解くことにより、 δ' を求める。この δ' を用いて (a-7) 式から δ を求めれば、この δ は $p_2 = \alpha_2 p_1$ 、 $p_3 = \alpha_3 p_1$ を満たす解となる。

参考文献

- 1) 和田 章, 久保田英之: 不安定な構造物の構造解析法に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 387 号, pp. 35-44, 1988
- 2) 柴田道生, 荒木秀幸: 区分線形化された復元力関数を用いた筋違付架構の弾塑性解析 (その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 989-990, 1986
- 3) 日置興一郎: 個材の弾性座屈で定まる剛節ラチス構造の有効強度, 日本建築学会論文報告集, 第 325 号, pp. 1-7, 1983
- 4) 日置興一郎: 繰り返し形ラチス構造物の繰り返し形モードの弾性座屈解析, 日本建築学会論文報告集, 第 343 号, pp. 62-67, 1984
- 5) 日置興一郎, 阿部真也: 三方向二層立体弾性接合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, 第 349 号, pp. 34-42, 1985
- 6) 坂 壽二, 日置興一郎: ねじ込み接合で組み立てた立体トラスの座屈挙動, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 331 号, pp. 1-9, 1983
- 7) 坂 壽二, 那谷晴一郎: ねじ込み接合された直交二方向二層立体トラス平板の座屈後挙動について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 273-274, 1986
- 8) 鈴木敏郎, 小河利行: 屋根型円筒トラスシェルの座屈解析 剛接トラスシェルの非線形座屈挙動, 日本建築学会論文報告集, 第 288 号, pp. 29-37, 1980
- 9) 鈴木敏郎, 小河利行: 屋根型円筒トラスシェルの座屈解析 その 2-剛接度をバネ剛性で評価したトラスモデルによる非線形挙動の解析, 日本建築学会論文報告集, 第 295 号, pp. 45-50, 1980
- 10) 小河利行, 鈴木敏郎: 集合要素による複層屋根型円筒トラスシェルの座屈解析, 日本建築学会論文報告集, 第 323 号, pp. 50-58, 1983
- 11) 鈴木敏郎, 小河利行, 小崎 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, 第 359 号, pp. 26-34, 1986
- 12) T. Suzuki, T. Ogawa and H. Ozaki: Large Deformation Analysis of Square-on-square Double-layer Grids with Member Buckling and Yielding, Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Vol. 3, pp. 81-88, 1986
- 13) 高島英幸, 向山洋一, 加藤史郎: ポールジョイント接合された単層トラス球殻の弾塑性安定解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1285-1286, 1987
- 14) 石川浩一郎, 高島英幸, 加藤史郎: ピン接合三角形網目状単層トラスドームの座屈荷重についての考察 (その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1287-1288, 1987
- 15) 半谷裕彦, 原田和明: 単層スペースフレームの座屈荷重, 第 9 回構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, pp. 197-202, 1985
- 16) M. Yamada, K. Uchiyama, S. Yamada and T. Ishikawa: Theoretical and Experimental Study on the Buckling of Rigidly Jointed Single Layer Latticed Spherical Shells under External Pressure, Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Vol. 3, pp. 113-120, 1986
- 17) I. H. I. Toader and V. Gioncu: Influence of Elastically End-restrained Bars on the Behaviour of Curved Latticed Structures, Proc. of the Third Int. Conf. on Space Structures, pp. 539-544, 1984
- 18) E. A. Smith: Ductility in Double Layer Grid Space Trusses, Proc. of the Third Int. Conf. on Space Structures, pp. 510-515, 1984
- 19) S. M. H. Rashed, M. Katayama, H. Isha, I. Toda, K. Oda and T. Yoshiyaki: Analysis of Nonlinear and Collapse Behavior of TM Space Trusses, Proc. of the Third Int. Conf. on Space Structures, pp. 480-485, 1984
- 20) U. R. Madi: Idealising the Members Behaviour in the Analysis of Pin-jointed Spatial Structure, Proc. of the Third Int. Conf. on Space Structures, pp. 462-467, 1984
- 21) I. M. Collins: An Investigation into the Collapse Behaviour of Double-layer Grids, Proc. of the Third Int. Conf. on Space Structures, pp. 400-405, 1984
- 22) R. E. McConnel, F. A. Fathelbab and D. Hatzis: The Buckling Behaviour of Some Single Layer, Shallow Lattice Domes, Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Vol. 3, pp. 97-104, 1986
- 23) I. M. Kani and R. E. McConnel: Collapse and Post-collapse Analysis of Shallow Lattice Domes, Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Vol. 3, pp. 105-112, 1986
- 24) 半谷裕彦, 川股重也: 立体トラスの非線形解析, 日本鋼構造協会第 5 回大会研究集会マトリックス構造解析法研究発表論文集, pp. 237-244, 1971
- 25) E. Riks: Some Computational Aspects of the Stability Analysis of Nonlinear Structures, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 47, pp. 219-259, 1984
- 26) 須藤福三, 和田 章: 複数の荷重を受ける構造物の不安定領域を含んだ非線形解析法について, 日本鋼構造協会第 11 回大会研究集会マトリックス解析法研究発表論文集, pp. 217-222, 1977
- 27) E. Tachibana: On Application of the Quasi-Newton Method for Structural Analysis Including the Dynamic Snap-through Problem, Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Vol. 3, pp. 129-136, 1986
- 28) 柴田道生, 中村 武, 若林 實: 鉄骨筋違の履歴特性の定式化—その 1 定式化関数の誘導—, 日本建築学会論文報告集, 第 316 号, pp. 18-28, 1982
- 29) 和田 章, 久保田英之: 実規模鋼構造骨組の 3 次元非線形解析へのスーパーコンピュータの応用, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 394 号, pp. 94-104, 1988

SYNOPSIS

UDC : 624.074 : 624.042

COLLAPSE ANALYSIS OF TRUSS STRUCTURE WITH CONSIDERATION OF BUCKLING AND RUPTURE OF MEMBERS

by Dr. **AKIRA WADA**, Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, and **HIDEYUKI KUBOTA**, Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, Members of A.I.J.

A method and a numerical analysis to the large deformation collapse behavior of truss structures are presented in this paper, with consideration of yielding, buckling and the rupturing of members.

Truss members are idealized that the both ends of each member are connected to the related nodes by pin condition and only axial force acts to the each member.

Axial force and stiffness of each member are assumed to be expressed as a functions of axial force-deformation hysteresis and current axial deformation.

For the purpose of avoiding the difficulties of convergence due to the occurrence of large unbalanced force caused by the rupture of members, a method of repeating load-unload process is used to reduce axial force step-by-step, and to express the rupturing phenomena of members.

A shallow truss dome, a plane truss and a double-layer grid space truss are analyzed as examples. In the first example, the result of our analysis is in accord with the other numerical solution. The results of other examples show that gradual strength reduction due to the buckling or yielding of members and abrupt strength dropping due to the rupture of members can be expressed well by using the proposed method.