圧縮弦材を偏心接合した複層立体トラス構造の 力学特性に関する研究

A STUDY ON STRUCTURAL PROPERTIES OF DOUBLE LAYER SPACE TRUSS WITH ECCENTRIC JOINTS IN COMPRESSIVE CHORD MEMBERS

鈴木敏郎*, 小河利行**, 木村祥裕***, 石原 直****
Toshiro SUZUKI, Toshiyuki OGAWA, Yoshihiro KIMURA
and Tadashi ISHIHARA

The space truss is subject to failure by the member buckling of compressive chord members. After buckling, a member loses most of its strength, shedding force to neighbor members. This causes spreading member failures and a progressive collapse, which could take only seconds to develop. We propose a method to control collapse mechanism to improve the plastic deformation capacity of the space truss. The method is to use the compressive chord members with eccentric joints in space truss. We clarified the structural properties of this space truss by experiment and numerical analysis.

Keywords : *eccentric joint, structural properties, space truss beam, space truss grid, elasto-plastic analysis, loading test*

偏心接合, 力学特性, 立体トラス梁, 立体トラス平板, 弾塑性解析, 載荷実験

§1. 序

トラス構造物の耐力は、一部の圧縮弦材の個材座屈によって支配され、その後全体としてバランスを失い、低下する。耐力が保持できなくなるのは座屈が生じた一部の圧縮弦材のみであり、他の多くの部材は健全な状態のままである。

著者らはトラス構造物の座屈後挙動および塑性変形能力に関する研究を行ない、その中でトラス構造物がある程度の変形能力を確保するには個材の細長比をかなり小さくしなければならないという知見を得ている³⁾⁴⁾。しかし、個材の細長比を制限してトラス構造物の変形能力を確保した場合でも、崩壊形式は依然として一部の圧縮弦材の座屈によるもので、トラス全体としてバランスのとれた構成とは言いがたい。そこで著者らはトラス梁の塑性変形能力を向上させる目的でトラス梁の中立軸上に新たに中間材を配した梁を提案し、その力学挙動について検討している⁵⁾。このトラス構造では圧縮弦材の座屈後、弦材の耐力低下分をこの中間材が補い、トラス構造全体の耐力低下が抑えられ、靱性が改善される。しかし、平面トラス構造において優れた力学特性を示すこれらの方法も複層立体トラス構造では構成が複雑なものになってしまう。そこで複層立体トラス構造の構成をあまりかえることなく、靱性改善を図る簡便な方法として圧縮弦材の節点を偏心接合したトラスを提示する。複層立体トラス

ス平板の場合、偏心のないトラス構造では一つの圧縮弦材が座屈すると、その負担できなくなった力が隣接部材の座屈を引き起こし、トラス構造全体が不安定な挙動を示す。しかし、節点を偏心させたトラス構造では各部材に軸力に加えて曲げモーメントが作用するために、個材座屈による急激な応力の変動が緩和される。そのため、平板全体として安定した挙動を示すようになり、優れた力学特性を有するトラス構造と成り得る。

本研究では、圧縮弦材のトラス節点を意図的に偏心させることでトラス構造を構成する圧縮弦材の座屈後の急激な耐力低下を抑え、トラス構造物全体の靱性改善を試みたものである。トラス構造における節点の偏心により各部材に軸力以外に二次的な曲げモーメントが生じ、トラス構造の初期剛性、最大耐力は低下するものの、座屈後の急激な耐力低下は回避できる。さらに偏心のとり方、大きさ等の選択によってはこのようなトラス構造物の剛性、耐力をさほど低下させずに、靱性を改善することも可能である。そこで円形鋼管による四角錐立体トラス梁を対象として、圧縮弦材の接合部を偏心させた梁について単調載荷実験及び弾塑性大変形解析を行ない、基本的な力学性状を明らかにする。さらに数値解析によって対象を偏心接合立体トラス梁を連結した立体トラス平板にまで拡張し、トラス架構における偏心接合の影響を検討する。

注記) 本論文の一部は参考文献1)2)において発表した。

* 東京工業大学 名誉教授・工博

** 東京工業大学工学部建築学科 教授・工博

*** 東京工業大学工学部建築学科 助手・博士(工学)

**** 東京工業大学大学院生

Prof., Emeritus, Tokyo Institute of Technology; Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

§2. 圧縮弦材を偏心接合した立体トラス梁の力学性状

2.1 解析モデルおよび数値解析概要

圧縮弦材を偏心接合した複層立体トラス構造の力学性状を把握するために、Fig. 1 に示す4個の四角錐からなる立体トラス梁を対象として数値解析を行った。解析モデルは図に示す位置に集中荷重を受ける単純梁である。すべての節点を剛節とし、偏心のあるモデルでは上弦材と斜材との節点において鉛直方向に一定量の偏心をとることとする。ただし、梁せいは偏心の有無に関わらず一定である。偏心部は剛体として扱い、変形および塑性化を起こさないものとしている。上弦材と斜材は同一断面の部材とし、下弦材は2本の上弦材と対応させるため断面積が2倍の部材とした。

ここでは圧縮弦材を偏心接合した立体トラス構造の基本的な力学性状の把握を目的とするため、パラメータは偏心部の長さ e を弦材の長さ L で除した値 e/L および上弦材の細長比とする。荷重条件は Fig. 1 に示す鉛直荷重 $P1$ のみを受ける場合と、鉛直荷重と合わせて梁の材軸方向に $P1$ に対して $1/2$ の大きさの水平荷重 $P2$ を受ける場合の2種類とする。

解析法は幾何学的および材料非線形を考慮した有限要素法による弾塑性大変形解析⁶⁾である。応力-ひずみ関係は bi-linear 型とした。解析諸元を Table 1 に示す。

2.2 鉛直荷重を受ける立体トラス梁の偏心による力学性状の変化

Fig. 2 に上弦材の細長比 λ を80としたモデルが鉛直荷重 $P1$ のみを受ける場合の荷重変位関係を示す。図の縦軸は加力点における荷重であり、横軸は加力点での鉛直変位である。荷重 P は偏心のないモデルの線形弾性解析において、最大圧縮力を受ける弦材の軸力が降伏軸力に達するときの荷重 P_y で無次元化した。また変位 δ は P_y に対応する偏心のないモデルの弾性変位量 δ_y で無次元化した。図中の▼はそれぞれのモデルの最大耐力点を示している。

偏心のないモデルは $P/P_y = 0.9$ 程度で上弦材の個材座屈を生じ、その後急激な耐力劣化を起こしている。それに対して圧縮弦材を偏

心接合したモデルでは偏心量が増加するにしたがって初期剛性、最大耐力は低下するものの、最大耐力に至るまでの変位量は大きくなり、劣化勾配は緩やかになっていく。

Fig. 3 は上弦材の細長比 λ を60としたモデルが鉛直荷重 $P1$ のみを受ける場合の解析結果である。図の縦軸と横軸は Fig. 2 と同様に無次元化した。 $\lambda=80$ のときと同じく偏心のないモデルは上弦材が座屈するとともに急激な耐力劣化を示している。一方、偏心接合したモデルでは $\lambda=80$ のときと同様に偏心量が増加するにつれて初期剛性、最大耐力が低下していくが、最大耐力付近ではほぼ一定の荷重を保ったまま変形を伸ばし、非常に安定した挙動を示している。

$\lambda=80$ と $\lambda=60$ の結果を比較すると、偏心による初期剛性の低下は $\lambda=60$ の方が小さい。最大耐力時の変位量は弦材の細長比が異なる場合でも大きな差異は見られないが、偏心のないモデルと比較した場合の最大耐力比は $\lambda=60$ の方がかなり高くなっている。個材の細長比がある程度小さい場合には、圧縮弦材を偏心接合することで、

Fig. 2 Load-displacement curve ($\lambda=80$)

Fig. 3 Load-displacement curve ($\lambda=60$)

Fig. 4 Deformation ($\times 5$)

Fig. 1 Analytical model

Table 1 Mechanical properties and dimensions

Young's modulus	E (t/cm^2)	2,100
Modulus of strain hardening	E_t (t/cm^2)	21
Yield stress	σ_y (t/cm^2)	3.35
Member length	L (cm)	100
Depth of the beam	H (cm)	70.7

初期剛性および最大耐力をさほど低下させることなくその力学挙動を改善できる。

Fig. 4に $\lambda=60$ の解析結果から、偏心のないモデルおよび弦材長に対する偏心部の長さの比 e/L が10%のモデルについて、偏心のあるモデルが最大荷重となる $\delta/\delta_y=2.4$ に達した時点での変形図を示す。図の変形倍率は5倍である。偏心のないモデルは加力点上部にある上弦材の座屈変形のみが突出しており、その他の部材には大きな変形は見られない。それに対して偏心接合したモデルでは、偏心部に生じる曲げ応力によって加力点上部の上弦材は荷重方向とは逆に上方へと変形しており、隣接する上弦材や斜材にも曲げ変形が生じている。トラス構造に偏心接合を導入した場合、特に最大荷重に達する前後の挙動において一部の個材の座屈が構造全体の力学挙動を支配することなく、多くの部材が偏心部で発生する曲げ応力によって変形していく。このような変形状態により、偏心接合したモデルでは通常のトラスに見られる個材座屈後の急激な耐力劣化を回避できると考えられる。

2.3 鉛直および水平荷重を受ける立体トラス梁の偏心による力学性状の変化

Fig. 5に上弦材の細長比 λ を60としたモデルが、Fig. 1に示す鉛直荷重 P_1 および水平荷重 P_2 を同時に受けた場合の解析結果を示す。縦軸は荷重ベクトルの大きさを、横軸は荷重点での変位ベクトルの大きさを示している。図の縦軸と横軸はFig. 2と同様に無次元化した。Table 2にFig. 2, 3, 5で用いた P_y の値をまとめて示す。 P_{1y} および P_{2y} はそれぞれ P_y の鉛直成分および水平成分である。

偏心のないモデルは初期剛性が高いものの、個材座屈により急激な耐力劣化を起こしている。偏心接合したモデルは鉛直荷重のみを受ける場合と同様に、偏心量の増加に伴って剛性および最大耐力が低下するが、最大耐力時の変位量が大きくなり、最大耐力後の劣化勾配も緩やかになっている。

鉛直荷重とともに水平荷重を受ける場合にも、個材座屈によってトラス梁全体の耐力が低下する場合には、偏心を導入することで急激な耐力劣化を緩和できる。

Fig. 5 Load-displacement curve ($\lambda=60$)

Table 2 Yield Load P_y

		$P_y(t)$	$P_{1y}(t)$	$P_{2y}(t)$
P1:P2=1:0	$\lambda=80$	6.15	6.15	—
	$\lambda=60$	10.93	10.93	—
P1:P2=1:0.5		10.70	9.57	4.79

§3 圧縮弦材を偏心接合した立体トラス梁の荷重実験

解析結果を検証するために、ボールジョイントのねじ込み接合で作製した立体トラス梁の荷重実験を行う。

3.1 試験体

試験体は4個の四角錐からなる立体トラス梁とし、一方向単調荷重を受ける単純支持の梁とする。先の解析結果を踏まえ、実験パラメータは上弦節点における偏心の有無および上弦材の細長比とする。

Fig. 6に基本となる試験体図を、Table 3に試験体リストを示す。試験体は全部で5体である。弦材および斜材の節点間距離を940mmとし、梁スパンを3760mmとしている。部材はすべて円形鋼管とし、 $\phi 34.0 \times 2.3$ および $\phi 48.6 \times 3.2$ を上弦材に用いている。節点間距離を座屈長さとした場合の細長比 λ はそれぞれ84および58である。斜材には上弦材と同じ断面を持つ部材を使用し、下弦材には断面積が上弦材に対して約2倍となるような部材を選定した。それぞれの細長比に対して偏心のない通常のモデルと、上弦材を偏心接合したモデルの2種類の試験体を設定している。

Fig. 7に偏心部の詳細図を示す。上弦材と斜材の接合部において、外径100mmのボール2つをねじ込み接合により連結することで偏心部を構成している。このときの偏心量 e は92mmとなり、弦材長さ

Fig. 6 Specimens

Table 3 List of specimens

	Top Chord & Diagonal member	Bottom Chord member	Stiffener	λ
Non-Eccentric	$\phi 34.0 \times 2.3$	$\phi 48.6 \times 3.2$	—	83.9
	$\phi 48.6 \times 3.2$	$\phi 89.1 \times 3.2$	—	58.4
Eccentric	$\phi 34.0 \times 2.3$	$\phi 48.6 \times 3.2$	—	83.9
	$\phi 48.6 \times 3.2$	$\phi 89.1 \times 3.2$	—	58.4
Eccentric (stiffened)	$\phi 34.0 \times 2.3$	$\phi 48.6 \times 3.2$	$\phi 16.0$	83.9

Fig. 7 Eccentric joint

に対する比 e/L は 9.8% である。部材は鋼管の端部にカプラーを溶接したものとし、 $\phi 24$ のねじを用いてボールジョイントと接合した。偏心部で発生する曲げ応力が上弦部材へと十分伝わるように、試験体軸方向の弦材はその端部をボールと密着させている。その他の接合部ではボールと部材端の間隔を 20mm 空けて接合している。

偏心接合したトラス梁では接合部の偏心量が大きくなるにつれて、偏心のないトラスに比べ初期剛性や最大耐力が少しずつ低下していくことが解析結果により明らかにされている。この傾向は部材細長比の大きなものほど顕著となる。そこで荷重実験においては構成部材の細長比が大きい $\lambda = 84$ のモデルに対して、最大圧縮力を受ける弦材の下に補剛材を設けた偏心モデルを用意し、偏心接合したトラス梁の初期剛性および最大耐力の改善を試みる。補剛材として使用した部材は $\phi 16$ の中実棒であり、細長比は 235、上弦材の断面積 A_u 、断面二次モーメント I_u に対する補剛材の断面積 A_s 、断面二次モーメント I_s の比はそれぞれ $A_s/A_u = 0.88$ 、 $I_s/I_u = 0.11$ となっている。部材特性を Table 4 にまとめて示す。

接合部は中空ボールジョイントを使用したねじ込み接合としている。ボールの大きさは上弦で外径 100mm、下弦で 140mm、加力点で 160mm である。

試験体に使用した円形鋼管の材質はすべて STK400 であり、部材とボールの接合に使用したネジは SCM440、補剛材は SS400 である。材料の機械的性質を Table 5 に示す。引張試験にあたり、鋼管は 12A および 12B 号試験片に、中実棒は 2 号試験片にそれぞれ仕上げたものを用いた。なお降伏応力度の算定は 0.2% オフセット法を行っている。

3.2 荷重装置および実験方法

Fig. 8 に荷重装置の概要を示す。反力梁から吊るされた 1 方向ローラーまたは 2 方向ローラーにより試験体の 4 隅の上弦ボールを単純支持している。

荷重はオイルジャッキにより行い、図に示すように試験体の下弦ボールに対して下方方向に集中荷重を与えている。荷重の検出には荷重節点とオイルジャッキの間にセットしたロードセルを使用した。測定はひずみゲージによるひずみ測定と、変位計による変形の測定を行っている。ひずみ測定は主として最大圧縮力を受ける弦材の曲げひずみの推移を計測する目的で行っている。変形の測定では主に Fig. 9 に示す加力点 ($\delta 0$) および四隅の支持点 ($\delta 1 \sim \delta 4$) の鉛直変位量を計測し、加力点における変形量 δ を算出している。

Table 4 Member properties

	Pipe ($\phi 34.0 \times 2.3$)	Pipe ($\phi 48.6 \times 3.2$)	Pipe ($\phi 89.1 \times 3.2$)	Stiffener ($\phi 16$)
Sectional area A (cm ²)	2.29	4.56	8.64	2.01
Moment of inertia I (cm ⁴)	2.89	11.8	79.8	0.32
Slenderless ratio λ	83.9	58.4	30.9	235

Table 5 Mechanical properties

Test Piece	σ_y (N/cm ²)	σ_u (N/cm ²)	YR (%)	E (N/cm ²)	Est (N/cm ²)	Elong. (%)
STK400 ($\phi 34.0 \times 2.3$)	4.32	4.78	90.5	1921	14.82	26.7
STK400 ($\phi 48.6 \times 3.2$)	3.94	4.42	89.0	2085	28.09	46.7
STK400 ($\phi 89.1 \times 3.2$)	4.31	4.99	86.4	1960	25.20	37.3
SCM440	7.94	9.54	83.2	2011	139.2	10.5
SS400	3.11	4.56	68.1	2099	34.70	33.1

3.3 接合部曲げ試験

立体トラス梁の実験に伴い、文献7)を参考に接合部の回転ばね剛性を調べる目的でボールジョイント接合部を中央に含む部材の繰返し曲げ実験を行った。Fig. 10 に荷重方法の概要を示す。接合部を含む中央領域には曲げモーメントのみが作用する方式をとっている。

実験結果から得られた接合部回転ばね剛性を Table 6 に示す。弦材の接合部ではボールと部材を密着させているために回転剛性は高くなり、ボールと部材の間に 20mm の開きがある斜材の接合部に対して 2 倍程度の値となった。また部材細長比が小さくなると接合部の回転剛性は大きくなるが、部材の曲げ剛度による無次元化量 κ は小さくなる。これは $\lambda = 58$ の方が、接合部の剛接度が低いことを表している。

3.4 立体トラス梁の力学性状に対する偏心接合の効果

Fig. 11 に上弦材の細長比 λ を 84 とした試験体の加力点における荷重変位関係を示す。グラフの縦軸は、偏心のない試験体に対する線形弾性解析において、最大圧縮力を受ける弦材の軸力が降伏軸力に達するときの荷重 P_y で無次元化している。またグラフ横軸は P_y に対応する偏心のない試験体の弾性変位量 δ_y で無次元化を行った。

Fig. 8 Test setup

Fig. 9 Measured points

Fig. 10 Loading system for bending tests

Table 6 Elastic rotational spring rigidity

Specimen		KB (t · cm/rad)	$\kappa (=KB \cdot l / EI)$
$\lambda = 84$ ($\phi 34.0 \times 2.3$)	Chord member	214	3.62
	Diagonal member	135	2.29
$\lambda = 58$ ($\phi 48.6 \times 3.2$)	Chord member	356	1.36
	Diagonal member	1.82	0.695

(EI : flexural rigidity of tubular member, $l = 940\text{mm}$)

実験結果とあわせて部材端部の剛域と回転ばね剛性を考慮した数値解析結果も示している。数値解析の諸条件は、3.5節で述べることにする。

偏心のない試験体は剛性、最大耐力は高いものの、最大圧縮力を受ける上弦材の1本が座屈することで梁全体の耐力が決定され、その他の部材のほとんどは健全であるにも関わらず、梁としては急激な耐力劣化を示した。それに対し圧縮弦材を偏心接合した試験体は剛性、最大耐力が低下するが、最大荷重以降の劣化勾配は偏心のない試験体に比べて緩やかになっている。偏心のない試験体の耐力停留値まで荷重が低下する間に2倍以上の変形量に達している。

Fig. 12には最大圧縮力を受ける弦材の曲率と加力点での変位との関係を示している。縦軸はひずみゲージにより測定した最大圧縮力を受ける上弦材の曲率である。横軸はFig. 11と同様に無次元化した。偏心のない試験体の弦材は変位が $\delta/\delta_y = 1$ 程度で、座屈による急激な曲げ変形を起こしているが、偏心接合した試験体の弦材は初期から少しずつ曲げを受け、 $\delta/\delta_y = 1$ 以降も応力は緩やかに推移している。そのため個材座屈によるトラス梁全体の急激な耐力低下が抑えられ、変形が進んでも安定した挙動を示すと考えられる。

Fig. 13には上弦材の細長比が84の試験体をモデル化して行った数値解析の結果をもとに、偏心のない試験体と偏心接合した試験体の最大耐力直後の変形状態を示す。図の変形倍率は5倍である。載荷実験における変形状態もこの解析結果と同様であった。偏心のない試験体は1本の上弦材が座屈により大きく変形しており、その他の部材には大きな変形は見られず局所的な崩壊となっている。それに対して偏心のある試験体は、接合部に生ずる曲げ応力によって偏

心部が材軸方向に倒れ込み、最大圧縮力を受ける弦材が偏心のない試験体とは逆に上側へと変形している。隣接する弦材や斜材にまで曲げ変形が見られ、梁全体が変形している状況が分かる。

Fig. 14に上弦材の細長比 λ が58の試験体について、加力点における荷重変位関係を示す。図はFig. 11と同様に無次元化し、実験結果とあわせて部材端部の剛域と回転ばね剛性を考慮した数値解析結果も示している。上弦材の細長比 λ が84の場合と同じく、偏心のない試験体は最大荷重に達した後、最大圧縮力を受ける弦材の座屈により急激な耐力劣化を起こしている。一方、偏心のある試験体は初期剛性の低下が見られるものの、 $\lambda=84$ の試験体ほど大きく低下することはない。最大耐力も $\lambda=84$ に比べて高い値を示し、停留値をとりながら変形を進めており、非常に安定した挙動となっている。

3.5 偏心に対する接合部曲げ剛性の影響

Fig. 11およびFig. 14には実験結果とあわせて、端部に剛域と弾性回転ばねを持った部材モデルによる数値解析結果を示している。実線 (Analysis 1) は接合部曲げ実験から得られた回転ばね剛性を用いて行った数値解析結果である。実験結果との対応も良好であり、偏心接合した立体トラス梁の力学挙動を十分にとらえることができる。

また、各図中に破線 (Analysis 2) で示している数値解析結果は、接合部の回転ばね剛性を本試験体の2倍としたものである。最大荷重を迎えた後の劣化勾配は緩やかになっており、さらに Analysis 1 に比べ、剛性および最大耐力が改善されている。特に上弦材の細長比が58の場合には初期剛性が大きく向上し、偏心のない試験体になり近づいている。

Fig. 11 Load-displacement curve ($\lambda=84$)

Fig. 12 Curvature-displacement relationship

Fig. 13 Deformation ($\times 5$)

Fig. 14 Load-displacement curve ($\lambda=58$)

Fig. 15 Effect of spring rigidity for initial stiffness of beams

Fig. 16 Load-displacement curve ($\lambda = 84$)

Fig. 15 に接合部の回転ばね剛性を実験値の 2 倍、4 倍、8 倍とした場合について、トラス梁の初期剛性の変化を数値解析より示す。横軸は接合部曲げ試験から得られた回転ばね剛性 KB (Exp.) に対する倍率であり、縦軸は Fig. 11 および Fig. 14 におけるトラス梁の剛性 $K[(P/P_y)/(\delta/\delta_y)]$ である。Table 6 に示されるようにパイプ部材の曲げ剛度に対する接合部の剛性比 α が小さい $\lambda = 58$ の試験体では、回転ばね剛性を大きくすることでトラス梁の初期剛性も大きく向上することが分かる。

このように偏心による立体トラス梁の剛性および最大耐力の低下は接合部曲げ剛性によるところが大きく、特に部材細長比の小さい場合にはある程度の接合部剛性を確保することで、梁全体の剛性および最大耐力を偏心のないトラスにまで向上させながら、安定した挙動が得られると考えられる。

3.6 圧縮弦材を偏心接合した立体トラス梁に対する補剛材の効果

Fig. 16 に、最大圧縮力を受ける上弦材の下に補剛材を設けた偏心モデルの実験結果を示す。図の縦軸と横軸は Fig. 11 と同様に無次元化した。

補剛材を導入した試験体は補剛材のないものに比べ初期剛性かなり向上しており、偏心のない試験体との差も小さくなっている。 $\delta/\delta_y = 1$ 付近で補剛材が座屈した後もさらに耐力を上昇させ、補剛材のない試験体を大きく上回る耐力が得られた。最大耐力後の劣化勾配も緩やかであり、変形が大きくなっても常に補剛材のない試験体より高い荷重を保っている。この結果から、梁全体に補剛材を導入することなく座屈する部材の近傍にのみ補剛材を施すだけで、偏心接合したトラス梁の剛性および最大耐力の改善が可能であるといえる。

§ 4. 圧縮弦材を偏心接合した複層立体トラス平板の力学性状

立体トラス梁を連結し、立体トラス平板へと拡張したモデルに対して数値解析を行い、圧縮弦材を偏心接合することによる複層立体トラス平板の力学性状の変化を調べる。

4.1 解析モデルおよび数値解析概要

解析対象は Fig. 17 に示す 6×6 個の四角錐からなる複層立体トラス平板である。下部周辺の節点を単純支持したモデルに対して、すべての上弦節点に等分布の鉛直荷重を作用させている。偏心のあるモデルでは上弦材と斜材の節点において鉛直方向に一定量の偏心をとることとし、偏心量 e は部材長 L に対して 10% とした。ただしトラス平板の深さは偏心の有無に関わらず一定である。偏心部は剛体として扱い、変形および塑性化を起こさないものとしている。偏心部で生じる曲げ応力が部材へ確実に伝わるように、すべての節点を剛節とした。

トラス平板を構成する部材には、載荷実験を行った試験体 ($\lambda = 84$) の上弦材と等しい部材を設定しており、この場合の細長比は節点間距離を座屈長さとして 89 となる。

構造、支持条件および荷重条件の対称性から、数値解析は全体の 1/4 について行った。

解析法は梁と同様に幾何学的および材料非線形を考慮した有限要素法による弾塑性大変形解析であり、応力-ひずみ関係は bi-linear 型とした。材料定数などの解析の諸元を Table 7 に示す。

Fig. 17 Square on square double layer space truss with eccentric joints

Table 7 Mechanical properties and dimensions

Young's modulus	E (t/cm^2)	2,100
Modulus of strain hardening	E_t (t/cm^2)	21
Yield stress	σ_y (t/cm^2)	4.0
Member length	L (cm)	100.0
Sectional area	A (cm^2)	2.29
Moment of inertia	I (cm^4)	2.89
Slenderness ratio	λ	89.3
Depth of the Grid	H (cm)	70.7

Fig. 18 Load-displacement curve

4.2 複層立体トラス平板の力学性状に対する偏心接合の効果

Fig. 18 に複層立体トラス平板の荷重変位関係を示す。縦軸は 1 節点に作用する荷重であり、横軸はトラス平板の中央下部節点における鉛直方向変位量である。荷重 P は偏心のないモデルの線形弾性解析において、最大圧縮力を受ける弦材の軸力が降伏軸力に達するときの荷重 P_y で無次元化した。変位 δ は偏心のないモデルでの P_y に対応する弾性変位量 δ_y で無次元化した。図中の数字は部材の座屈および降伏の順序を表しており、Fig. 19 中の数字と対応している。

偏心のないモデルは初期剛性が高いものの、中央部の上弦材が座屈すると全体の剛性が低下し、その後やや荷重を増加させていくが、再び他の部材が座屈を起こすことで耐力を落としている。初期座屈

によって平板の耐力は決定されていないが、いったん部材が座屈するとそれを引き金として隣接部材の座屈が誘発され、急激な耐力劣化を示す。

一方、圧縮弦材を偏心接合したトラス平板では、梁の場合と同様に偏心のないモデルに対して初期剛性はやや低下する。しかし、細長比が 89 と比較的大きいにも関わらず、梁の場合に比べて偏心のないモデルとの初期剛性の差は小さい。荷重および支持条件の違いがあり、梁と平板を一概には比較できないが、トラス平板の場合には 1 節点に集まる部材数が多く、偏心部に対する拘束度が増すために、偏心を導入した場合にも平板全体としての剛性が大きく低下することはないと考えられる。偏心接合したモデルの最大耐力は梁の場合と異なり、偏心のないモデルを大きく上回っている。 $P/P_y = 1$ に達した後はほぼ最大耐力を保ったまま変形を進めていき、劣化勾配も極めて緩やかであり非常に安定した力学挙動を示している。

Fig. 19 に崩壊メカニズム、Fig. 20 に $\delta/\delta_y = 2.5$ の時点での変形図を示す。Fig. 19 中の数字は部材の座屈および降伏の順序を表している。偏心のないモデルでは平板の中央線上にある上弦材が中央部から支持部に向かって順に座屈することで耐力を落としている。このような十字形の崩壊モードは同様のモデルに対する実験結果⁹⁾にも現れている。崩壊するまでに座屈あるいは引張降伏を経験する部材はごく少数に限られており、残りの多くの部材は平板が崩壊した後も依然として健全なままである。それに対し偏心接合した平板では多くの部材が偏心部で生じる曲げ応力や引張応力などによって降伏し、崩壊メカニズムを形成している。本論で扱っている偏心の取り方では、偏心量が一定であるならば、偏心部で発生する曲げモーメントは斜材軸力の大きさに比例する。言い替えれば平板に対して大

Fig. 19 Collapse mechanism

Fig. 20 Deformation ($\times 5$)

きません断力が作用する領域において、偏心部に接続する部材に大きな曲げ応力が生じることになる。周辺単純支持で等分布荷重を受ける場合、せん断力の分布は中央部ほど小さく、周辺部で最大となる。したがって変形図にみられるように、圧縮弦材を偏心接合したトラス平板は、偏心のないモデルにおいて崩壊後も健全なままであった周辺部の多くの部材に曲げ変形を生じることになる。一方、通常のトラス平板の耐力を決定づける中央線上の圧縮弦材は、大変形域においても座屈せず健全なままであり、トラス平板の最大耐力上昇に寄与している。

§ 5. 結

本論文では、弦材の座屈により急激な耐力劣化を示す立体トラス構造に対して、大変形域における力学性状を改善する目的で圧縮側の接合部に意図的な偏心を設けたトラス構造を提案した。そして四角錐を単一ユニットとする立体トラス梁および複層立体トラス平板を対象に、圧縮弦材を偏心接合したトラス構造の力学性状を数値解析および実験を通して明らかにしてきた。以下に得られた結論を示す。

- (1) 立体トラスの圧縮弦材を偏心接合することにより、個材座屈による不安定な力学挙動は解消される。このとき偏心量が大きくなるにつれトラスの初期剛性および最大耐力は低下していくが、最大耐力以後の劣化勾配は緩やかなものとなっていく。
- (2) 個材の細長比がある程度小さい場合には、トラスの圧縮弦材を偏心接合することで、初期剛性および最大耐力をさほど低下させることなく、力学挙動を改善できる。
- (3) 偏心による立体トラスの力学特性は接合部曲げ剛性によるところが大きく、剛接合に近い接合方法を選択することで、トラスの弾性剛性、最大耐力を高く維持することができる。
- (4) 座屈する弦材の近傍にのみ補剛材を施すことで、偏心接合したトラス梁の初期剛性および最大耐力を向上させることができる。
- (5) 大変形域において、通常の偏心のないトラスでは最大圧縮力を受ける弦材の座屈変形のみが進行し、他の部材は健全なまま崩壊に至るが、偏心接合したトラスでは偏心部で生じる曲げにより変形は座屈する個材にとどまらず、トラス全体に及ぶ。
- (6) 偏心のないトラス平板では中央線上に collapse line が形成され、座屈あるいは引張降伏を経験するのはごく少数の部材のみであるが、偏心接合したトラス平板では周辺部の上弦材および斜材

が偏心部で生じる曲げモーメントにより降伏し、多くの部材によって崩壊メカニズムが形成されている。

- (7) 複層立体トラス平板においても、圧縮弦材を偏心接合することで安定した力学性状が得られる。またトラス梁に比べトラス平板は一節点に集まる部材数が多くなり、偏心部に対する拘束度が増すため、細長比が大きくとも初期剛性の低下はわずかであり、最大耐力は偏心のないトラスを上回る場合がある。

以上、圧縮弦材を偏心接合した立体トラス構造の基本的な力学性状を把握した。今後は、トラスの架構形式および偏心の設け方の違いがトラス構造物全体の挙動にどのような影響を及ぼすかを検討し、偏心接合の効果を定量的に把握していく。さらにこのようなトラス構造物が繰返し荷重を受ける場合の履歴挙動についても検討し、耐震性に優れたトラス構造物を提示していく予定である。

参考文献

- 1) 鈴木敏郎, 小河利行, 福岡庸一, 小久保隆博: 圧縮弦材を偏心接合した立体トラス構造の力学特性に関する研究(その1 数値解析による力学性状の把握), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.645-646, 1995.8
- 2) 鈴木敏郎, 小河利行, 福岡庸一, 小久保隆博, 石原 直: 圧縮弦材を偏心接合した立体トラス構造の力学特性に関する研究(その2 偏心接合した立体トラス梁の載荷実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.647-648, 1995.8
- 3) 鈴木敏郎, 久保寺勲, 小河利行: 鉄骨トラスばりの耐力と塑性変形性状に関する実験研究(トラス構造物の耐震性に関する研究(1)), 日本建築学会構造系論文報告集, 第360号, pp.75-83, 1986.2
- 4) 鈴木敏郎, 久保寺勲, 小河利行: 鉄骨トラス骨組の復元力特性と耐震性評価方法(トラス構造物の耐震性に関する研究(2)), 日本建築学会構造系論文報告集, 第365号, pp.28-38, 1986.7
- 5) 鈴木敏郎, 小河利行, 五十嵐規矩夫, 木村祥裕: 中間材を導入した鋼管トラス梁の力学性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第470号, pp.123-131, 1995.4
- 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, 第444号, pp.53-62, 1993.2
- 7) 谷口与史也, 坂 寿二: ねじ込み接合システムトラスの実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第468号, pp.91-99, 1995.2
- 8) Saka, T., and Taniguchi, Y.: Collapse Behavior of Double-Layer Space Truss Grids with Member Buckling, Spacial, Lattice, and Tension Structure (Proc. of the IASS-ASCE International Symposium 1994, Atlanta, Georgia, USA), Edited by J.F. Abel, J.W. Leonard, and C.U. Penalba, ASCE, New York, 1994, pp.529-538

(1996年10月10日原稿受理, 1997年3月7日採用決定)