偏心接合した平行弦トラス平板の力学性状に関する研究

A STUDY ON STRUCTURAL PROPERTIES OF DOUBLE-LAYER GRIDS WITH ECCENTRIC JOINTS

鈴木敏郎*, 小河利行**, 木村祥裕***, 今井一郎****
Toshiro SUZUKI, Toshiyuki OGAWA, Yoshihiro KIMURA
and Ichiro IMAI

The ultimate strength of double-layer grids is determined by the member buckling and yielding. After buckling, the grids lose most of their strength. In this paper, we investigate the structural properties of double-layer grids with eccentric joints to improve deformation capacity. These grids consist of units of truss connected together by eccentric joint members. The loading tests and numerical analysis are carried out to investigate the influence of the rigidity of eccentric joint members and the difference of the progressive collapse mechanisms. As the result, these grids show stable behavior compared with that of the conventional grids.

Keywords : *eccentric joint, unitization of truss, structural properties, double-layer grid, elasto-plastic analysis, loading test*
偏心接合, ユニット化, 力学特性, トラス平板, 弾塑性解析, 載荷実験

1. 序

屋根構造等の大空間構造に用いられる平行弦立体トラス平板（以下、トラス平板）では設計上、雪荷重や風荷重等の鉛直荷重が支配的となることから、通常強度設計による検討がなされる。トラス平板において部材が圧縮力を受け、いったん座屈すると、保持できなくなった軸力が隣接部材に再配分され、次々と座屈を引き起こし、トラス平板全体の耐力は低下する。トラス平板の強度性状、座屈後挙動を取り扱った研究は数多く見受けられ、その力学挙動は総括的に把握されている⁹⁾。

また、トラス平板は人工地盤のような長期に極めて大きな鉛直荷重を支持する構造物にも用いられる。屋根構造の場合とは異なり、地震を考慮して、鉛直荷重および水平荷重に対する検討が必要とされる^{9),10)}。トラス構造物においても一般の建築構造物と同様に保有耐力、塑性変形性能を考える必要がある。

著者らはトラス構造物の塑性変形性能に関して研究を行い、その中でトラス構造物がある程度の変形性能を確保するためには個材の細長比を小さくしなければならないという知見を得ている^{3),4)}。この場合、トラス構造物の崩壊形式は一部の圧縮弦材の座屈によるものであり、他の多くの部材は健全なままである。

トラス構造物の崩壊形式を変化させて、変形性能を確保する手法として、個材座屈を生じる可能性のある圧縮弦材に対して補強す

る²⁾、圧縮弦材の断面性能を大きくする⁸⁾といったものがある。また、圧縮弦材の座屈後、耐力低下を抑制する方法として、著者らはトラス梁の中立軸近傍に新たに中間材を配した梁を提案し、そのような梁の塑性変形性能について把握している¹³⁾。これらは比較的構成部材が少ない平面トラス梁等の場合には有効な方法であるが、トラス平板の場合には対象となる部材の配置や、トラスの構成そのものが複雑となってしまう。そこで著者らはトラス平板の構成をあまり変えることなく、靱性を改善するために圧縮弦材の節点で偏心接合したトラス平板を提示し、その力学挙動について検討している¹⁴⁾。トラス部材の節点で偏心接合した場合、軸力に加えて二次的な曲げモーメントが作用するために、圧縮弦材の座屈による急激な耐力低下を抑えることができる。

本研究で提案するトラス平板の特徴は、あらかじめユニットトラスを作成し、順次連結することで構築作業を簡略化している点である。ユニットトラス同士を接合材で連結することで、節点に集まる部材数を低減し、高い精度を維持できる。

このトラス平板は各接合材により偏心接合されていることから、圧縮弦材の座屈後の急激な耐力低下を緩和できる。偏心接合材の断面性能を適切に調節することでトラス構造物全体の変形能力は大幅に向上し、耐震性に優れたトラス平板となりうる。そこで円形中実棒によるトラス平板を対象として、偏心接合したトラス平板につい

注) 本論文の一部は参考文献11), 12)において発表している。

* 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)

**** 榊梓設計代表取締役専務

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.

Azusa sekkei Co., Ltd., Representative Managing Director

て単調載荷実験を行い、基本的な力学性状を明らかにする。そして数値解析により、このようなトラス平板と偏心のないトラス平板の崩壊機構を比較し、偏心接合の影響を把握する。

2. 偏心接合した平行弦トラス平板の力学特性

2.1 試験体

試験体は Fig. 1 に示すような偏心接合した平行弦トラス平板であり、Fig. 2 に示す単位ユニットトラスを9つ用いて構成されている。試験体はまず、単位ユニットトラスを作成し、それを偏心接合材で連結して組み上げている。試験体はプラット型の平面トラス梁で構成される直交交差型のトラス平板で水平方向の剛性が低いことから、Fig. 2 における点線で示す位置に水平補剛材を用いている。試験体は全部で2体で、偏心接合材の剛性をパラメータとしており、偏心接合材のせん断変形が先行するタイプと弦材の個材座屈が先行するタイプである。接合材の径は、それぞれ $\phi 13.8$ 、 $\phi 10.0$ である。

Table 1 に部材特性を示す。弦材、斜材および束材に $\phi 16$ 、水平補

剛材に $\phi 22$ の中実棒をそれぞれ用いている。ただし、ユニットトラス中央の束材は $\phi 22$ を用い、加力点につながる束材は加力治具となるように $\phi 30$ としている。トラス平板は $3,000\text{mm} \times 3,000\text{mm}$ で、高さは 360mm である。細長比 λ は節点間距離を座屈長さとした場合、弦材で 113.6 、斜材で 136.4 、水平補剛材で 144.9 である。Table 2 に鋼材の機械的性質を示す。試験体に使用した各部材の材質は SS400 で、偏心接合材のみ SCM440 である。引張試験は各径の中実棒について JIS 規格 2 号試験片を用いて行った。なお、降伏応力度の算定は 0.2% オフセット法によって行っている。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、支持部で外径 120mm 、加力部で 160mm 、ユニットトラスの中央は 100mm 、端部は 80mm である。Fig. 3 にユニット接合部の詳細を、Table 3 に偏心接合材の部材特性を示す。偏心量 (l') は 107.1mm であり、これは図中ユニット中央ボールから端部ボールまでの長さ ($L_f + l'$) の $1/7$

Fig. 1 Specimen and test set up

Table 1 List of members

Length of chord member	($\phi 16$)	$L_f(\text{cm})$	45.5
Length of level stiffness member	($\phi 22$)	$L_s(\text{cm})$	75.0
Length of web member	($\phi 16$)	$L_w(\text{cm})$	58.0
Moment of inertia	($\phi 16$)	$I(\text{cm}^4)$	0.32
Moment of inertia	($\phi 22$)	$I(\text{cm}^4)$	1.15
Slenderness ratio of chord member	λ_f		113.6
Slenderness ratio of level stiffness member	λ_s		136.4
Slenderness ratio of web member	λ_w		144.9

Fig. 2 Unit of truss

Table 2 Material properties

TEST-PIECE	E (t/cm^2)	Est (t/cm^2)	σ_y (t/cm^2)	σ_u (t/cm^2)	Y.R	Elong. (%)
SS400	2143	35.6	3.25	4.66	0.70	33.1
SCM440	2159	24.6	9.63	10.40	0.93	13.4

Fig. 3 Eccentric joint

Table 3 List of eccentric joint

TYPE	I (cm^4)	l_o (cm)	l' (cm)	$l'/(L_f+l')$ (cm)
E-13.8	0.180	15.15	10.71	1/7
E-10.0	0.049	15.15	10.71	1/7

Photo. 1 Specimen

に相当する。

Photo. 1 に試験体の作成過程を示す。試験体はまず単位ユニットトラスを組み立て、それを偏心接合材によって連結している。ここで上弦材の初期不整量は上弦材長さ454mmの1%程度、5mm以内に収まっており、施工精度の高いトラス構造になっている。

2.2 荷重装置及び実験方法

実験装置を Fig. 1 に示す。本実験では地震時の水平外乱を想定し、鉛直荷重と水平荷重を同時に受けるトラス平板の力学性状を検討する。そこで図中、上弦材の中央節点から $(X, Y, Z) = (7, -3, -7)$ となるように荷重方向を設定している。ただし、ジャッキ端部をピン支持しているため、加力点ボールの変位ベクトル方向は任意であり、荷重ベクトル方向は常に加力ボールとジャッキ支持端とを結ぶ線上にある。荷重は油圧式ジャッキにより集中荷重を加えており、荷重の検出には載荷節点とオイルジャッキの間にセットしたロードセルにより行っている。また、試験体外周支持端部の境界条件は鉛直変位を拘束し、うち3節点を一方向ローラー支持、その他の9節点を二方向ローラー支持としている。

2.3 接合部曲げ試験

平行弦トラス平板の荷重実験に伴い、接合部の回転バネ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ている。ここではユニット材と偏心接合材の回転バネ剛性を比較するために $\phi 16$ の中実棒について行っており、鋼種は SS400, SCM440 である。Fig. 4 に荷重方法の概略を示す。試験体は偏心接合されているために各部材には軸力だけでなく、曲げとせん

Fig. 4 Loading system for bending tests

Table 4 Elastic rotational spring rigidity

	SS400	SCM440
$k\theta(\text{ton} \cdot \text{cm}/\text{rad})$	397.5	742.5

断力が同時に作用することになる。荷重形式は両端単純支持で中央集中荷重としている。実験結果から得られた接合部回転バネ剛性を Table 4 に示す。部材の鋼種の違いによって接合部の回転バネ剛性が変化しており、SS400 に比べて SCM440 の部材のバネ剛性は約 2 倍程度となっている。

2.4 偏心接合材の曲げ剛性の異なるトラス平板の力学性状

Fig. 5 に両試験体の加力点における荷重変形関係を示す。縦軸は荷重ベクトルの大きさを、横軸は載荷点での変位ベクトルの大きさを示している。また、Table 5 にそれに対応する諸データを示している。両試験体ともに接合部の偏心量は等しいが、偏心接合材の曲げ剛性は E-10.0 に比べて E-13.8 は約 4 倍であり、E-13.8 の初期剛性は E-10.0 の 1.5 倍、初期座屈耐力は 1.3 倍程度となっている。偏心接合材の曲げ剛性を適切に選択することで、初期剛性、座屈耐力を調節することができる。また、初期座屈耐力に対する最大耐力の上昇率は E-10.0 の方が高くなっている。偏心のないトラス平板では地震等の外力を受け、座屈を生じると軸力を保持できなくなった部材の応力が隣接部材に再配分され、次々と座屈を引き起こす。そのため、初期座屈によって最大耐力がほぼ決定され、急激に耐力劣化してしまう。しかし、本論文で提案している偏心接合したトラス平板は初期座屈後も耐力は上昇しており、E-10.0 で最大耐力は初期座屈耐力

Fig. 5 Load displacement curve

Fig. 6 Load axial strain curve

Table 5 Results of experiment

Specimen	Initial Stiffness (V/cm^2)	Initial Buckling Strength Pcr(ton)	Deformation at Pcr $\delta_{cr}(\text{cm})$	Maximum Strength Pmax(ton)	Pmax/Pcr	Deformation at Pmax $\delta_{max}(\text{cm})$	δ_{cr}/δ_{max}
E-13.8	6.41	14.77	2.30	15.79	1.07	3.77	1.63
E-10.0	4.05	11.10	2.94	14.29	1.28	5.88	2.00

Fig. 7 Distance of eccentric joints

Photo. 2 Deformation of eccentric joints

の1.3倍、E-13.8では1.1倍になっている。そして個材座屈を引き起こしながら、変形量を増大させ、最大耐力を迎えている。このとき両試験体の最大耐力は10%程度しか差がなく、偏心接合材の剛性が最大耐力に及ぼす影響は小さい。また、両試験体ともに最大耐力後の劣化は緩やかで、最大耐力の約80%である12.0t程度で停留しており、安定した力学挙動を示していることが分かる。

Fig. 6に試験体E-13.8における荷重と上弦材（図中a）の軸ひずみとの関係を示す。載荷当初、この部材は線形性を保ちながら、圧縮力を負担しているが、初期座屈が生じると応力状態が一変し、引張力を負担するようになる。その後、斜材の座屈が発生しているが、急激な耐力低下はない。座屈の発生に伴い、圧縮力、引張力を受け持ちながら応力状態がその都度変化しているのが分かる。

Fig. 7に荷重と加力点付近の偏心接合部における節点間距離との関係を示す。E-13.8では最終変形に至るまで偏心接合部では変形がほとんどなく、水平方向に節点のずれは生じていない。それに対してE-10.0では初期座屈後徐々に変形が増加し、最終的に偏心接合材で破断が生じている。しかし、破断による全体挙動への影響はほとんど見られず、緩やかに耐力が低下している。

Photo. 2に偏心部の変形状態を示す。E-13.8では偏心接合部が剛体回転し、これに連結している弦材で曲げ変形を生じている。E-10.0でも偏心接合部の剛体変形は見られたが、特に加力点付近の偏心接合部では写真のように節点が相対的に移動してひし形に変形している。これは偏心接合部で水平方向ならびに鉛直方向へのせん断変形が生じていることを示している。偏心接合材の剛性を変化させることで、トラス全体の崩壊形式は異なるが、弦材座屈が先行するE-13.8、偏心接合部のせん断変形が先行するE-10.0のどちらも安定した力学挙動を示している。

Fig. 8 Analysis models

Fig. 9 Stress strain models

3. 平行弦トラス平板の力学性状に対する偏心接合の効果

偏心接合した平行弦トラス平板の崩壊機構を把握するために数値解析を行う。特に偏心接合したトラス平板と偏心のないトラス平板の崩壊機構の違いを検証する。

3.1 数値解析概要

Fig. 8に解析モデルを示す。解析対象は図に示すように接合部に偏心のないトラス平板及び偏心接合したトラス平板である。支持条件及び荷重条件は実験と同じである。また、接合部の曲げ試験より得られた接合部の回転バネ剛性が剛接合に近いことから、数値解析では概略的に剛接合としている。解析法は幾何学的及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⁷⁾である。応力ひずみ関係はTable 2の引張試験結果を参考にしてbi-linear型にモデル化しており、トラス部材は実験と同様、円形断面の中実棒である。また、ここで数値解析を行うにあたって、文献6)を参考にして以下の仮定を行う。

- 1) 引張部材の応力ひずみ関係はbi-linear型とし、降伏後も一定の耐力を維持できる。
- 2) 圧縮部材が座屈耐力（許容耐力）を上回り、座屈したと判定された場合、部材の耐力は座屈耐力に応じて低減する。その際、座屈部材にFig. 9に点線で示す新たな応力ひずみ関係を与え、初期の形状から再度解析し直す。圧縮座屈した部材の耐力を材料的に取り扱うことで、部材の座屈後挙動を簡略的に評価している。前

Fig. 10 Load displacement curve

の計算で追跡した変形以降を順次包絡することで、架構の挙動を近似的に把握している。圧縮部材の座屈応力度 σ_{cr} は(1)式によるものとする。(1)式に示される λ_e は材料特性を考慮した各部材の有効細長比であり、ここでは各節点を剛接合としていることから座屈長さは節点間距離の0.5倍とする。また、圧縮部材の座屈後の耐力停留値は Paris の解¹⁾を用いて、 $e_0=5.0$ として座屈応力度 σ_{cr} に対する耐力停留値の比 n_m を(2)式のように定めている。

$$\sigma_{cr} = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda_e}{\Lambda} \right)^2 \right\} \sigma_y \quad (\lambda_e \leq \Lambda) \quad (1)$$

$$\sigma_{cr} = \left(\frac{\pi}{\lambda_e} \right)^2 \sigma_y \quad (\lambda_e \geq \Lambda)$$

$$\frac{1}{n_m^2} = \cos^2 \left(\frac{\pi n_m}{2} \right) \frac{e_0}{2} \lambda_e^2 \quad (2)$$

ここで、 $\lambda_e = \sqrt{\epsilon_y} \lambda$ 、 $\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2}{0.6}}$ である。

3) 偏心接合したトラス平板では荷重当初から軸力のみならず、曲げモーメントの影響も大きいことから、圧縮部材の許容耐力は前項で規定された座屈耐力もしくは部材が圧縮曲げにより降伏したときの耐力のいずれか小さいほうの値とする。

Fig. 9 中の表に弦材、斜材、水平補剛材の座屈耐力に対する耐力停留値の比 n_m を示している。 n_m は材料特性が同じ場合、部材の細長比のみに支配される。本論文で使用した部材の細長比では0.2~0.3程度となっている。

これらの仮定によって数値解析を行い、トラス平板の力学性状に偏心接合が及ぼす影響を検討する。

3.2 平行弦トラス平板の力学性状に対する偏心接合の効果

Fig. 10 に偏心のないトラス平板と偏心接合したトラス平板の加力点における荷重変形関係を示す。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。荷重 P は偏

Fig. 11 Collapse mechanism

心のないトラス平板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 で無次元化している。また、変位 δ は P_y に対応する偏心のないトラス平板の弾性変位量 δ_y で無次元化している。各線は数値解析結果を、○、●は実験結果を示している。偏心接合したトラス平板 E-13.8, E-10.0 の数値解析結果と実験結果を比較すると、初期剛性、最大耐力そして全体の荷重変形関係は良い対応を示しており、本解析手法によってトラス平板の力学性状を概ね捉えることができる。偏心のないトラス平板は、 $P/P_y=0.8$ で初期座屈が発生し、その後次々と生じる隣接部材の座屈によって耐力を急激に低下させている。耐力停留値は $P/P_y=0.4$ よりも低くなっており、最大耐力の50%程度である。しかし、偏心接合した E-13.8, E-10.0 は、偏心のないトラス平板に比べて初期剛性、最大耐力は多少低下するが、最大耐力以降の劣化勾配は緩やかであり、耐力停留値も $P/P_y=0.5$ で偏心のないトラス平板よりも高く最大耐力の70%となっている。偏心接合したトラス平板は偏心のないトラス平板に比べて初期剛性、最大耐力は多少低下するものの、最大耐力後の劣化勾配は緩やかになり、耐力停留値も高くなっている。偏心接合材の剛性を調節することで、初期剛性、最大耐力をコントロールすることが可能となり、有用性の高い架構形式となりうる。

Fig. 11 に各トラス平板の崩壊メカニズムを示している。偏心のないトラス平板は弦材で最初に座屈が生じると、座屈した部材で受け持てなくなった軸力が隣接部材に再配分され、それを引金として隣接部材の座屈が次々と誘発され、急激な耐力劣化を示す。一方、偏

Fig. 12 Effect of bending stiffness of eccentric member for initial stiffness of space truss

Fig. 13 Effect of bending stiffness of eccentric member for initial buckling and maximum strength of space truss

Fig. 14 Effect of bending stiffness of eccentric member for plastic deformation capacity of space truss

心接合したトラス平板では偏心接合部において接合材がせん断変形し、トラス平板全体の変形を増大させるとともに偏心接合部で発生する曲げ応力によって急激な応力変動を緩和しているものと思われる。そのため、平板全体の変形が進行しても座屈を経験する部材は少なく、安定した力学挙動を示している。偏心接合材の剛性が小さい E-10.0 は E-13.8 に比べて座屈を経験する部材がさらに減少している。

偏心のないトラス平板では弦材等の座屈、塑性化によって架構全体の変形が進行するが、本論文で提案している偏心接合したトラス平板ではこれらの変形に対して偏心接合部における接合材のせん断変形が平板全体の変形に占める割合が大きくなっている。

Fig. 12 にトラス平板の初期剛性と接合材曲げ剛性との関係を示す。縦軸はトラス平板の荷重変位関係より算定される剛性 $Kb(=(P/P_y)/(\delta/\delta_y))$ であり、横軸は偏心接合材の曲げ剛性 EI/l を弦材の曲げ剛性 EI_f/L_f で除した値である。

偏心接合によるトラス平板の剛性の低下は接合材の曲げ剛性が大きく影響しており、偏心接合材の曲げ剛性を確保することで平板全体の剛性は大幅に向上することが分かる。

Fig. 13 に偏心接合したトラス平板の耐力と接合曲げ剛性との関係を示す。縦軸は平板の初期座屈耐力 P_{cr} 、最大耐力 P_{max} を降伏荷重 P_y で除しており、横軸は Fig. 12 と同様の無次元化を行なっている。トラス平板の剛性と同様に接合材の曲げ剛性を大きくすることで、初期座屈耐力、最大耐力は大幅に向上する。弦材と同じ径($\phi 16$)を偏心接合材に用いた場合 $((EI/l)/(EI_f/L_f)=4.24)$ 、偏心のないトラス平板と同程度の耐力を確保することが可能となる。

Fig. 14 に偏心接合したトラス平板の最大耐力時の変形量と接合材曲げ剛性との関係を示す。縦軸はトラス平板の最大耐力 P_{max} の変形量 δ_{max} を降伏荷重 P_y 時の変形量 δ_y で、横軸は Fig. 12 と同様の無次元化を行っている。接合材の曲げ剛性を大きくすることで、トラス平板全体に対する偏心部でのせん断変形の寄与する割合は低下し、最大耐力時の変形量は小さくなっていく。接合材の剛性を適切に選択することで、トラス平板の初期剛性、最大耐力を確保しつつ、変形性能を向上させることができる。

4. 結論

本研究では圧縮弦材の個材座屈により急激に耐力を低下させるトラス平板に対して、靱性を改善する目的で偏心接合したトラス平板

を提案した。そして載荷実験及び数値解析によりこのようなトラス平板の力学性状を明らかにし、偏心接合の影響を検討した。以下に得られた結論を示す。

- 1) トラス平板の各部材を偏心接合することで、圧縮弦材の個材座屈による急激な耐力低下は抑制される。このような平板の最大耐力は初期座屈で決まらず、座屈後も耐力を上昇しつつ、変形を伸ばしている。
- 2) 偏心のないトラス平板では一部の圧縮弦材が座屈し、それを引き金として隣接部材の座屈が誘発され、急激に耐力を低下させる。しかし、偏心接合したトラス平板では、偏心部でせん断変形することで平板全体の変形が増大するため、大変形域においても座屈を経験する部材は少なく、安定した力学挙動を示す。
- 3) 偏心接合材の断面性能を適切に選択することで、初期剛性をコントロールすることができる。最大耐力、最大耐力後の劣化勾配は断面性能によらず、ほぼ等しくなっている。
- 4) 本研究で提案したトラス平板は、単位ユニットトラスを偏心接合することによって構成されるため、トラス構造物の構築作業は簡略化され、精度の高いトラス構造が期待できる。

以上、偏心接合したトラス平板の基本的な力学性状を把握した。今後、このような偏心接合したトラス平板について架構形式及び部材形状等をパラメータとして、トラス平板の力学挙動にどのような影響を与えるかを検討し、偏心接合の効果を定量的に把握していくとともに、より適切な接合部形式を検討することで実用化を図っていく予定である。

参考文献

- 1) Paris. P.C : Limit Design of Column Journal of Aeronautical Science, 1954.1
- 2) GAR Parke and HB Walker : A Limit State Design of Double-Layer Grids, 3rd International Conference on Space Structures,

pp.582~532, 1984.9

- 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.75~82, 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) 二層立体ラチス構造の解析・設計・施工—その現状と問題点—, 日本建築学会空間骨組小委員会二層立体ラチス構造研究班, 1992.11
- 6) T.SUZUKI, T.OGAWA, Y.TSUSHIMA, M.KIMURA and H.KANEKO : Stability of a space truss composed of square pyramid units. Space structures 4, pp.78~88.1993
- 7) 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集, 第444号, pp.53~62, 1993.7
- 8) 向 秀元, 渡辺 厚, 岩田 衛, 和田 章 : トラス構造の靱性性能改善に関する縮小模型実験, 日本建築学会構造系論文集, 第448号, pp.141~152, 1993.6
- 9) 小野徹郎, 対馬義幸, 岩田 衛 : 水平荷重を受ける剛接合立体トラスの耐力・変形状について, 日本建築学会構造系論文集, 第449号, pp.175~183, 1993.7
- 10) 小野徹郎, 対馬義幸, 岩田 衛 : 人工地盤を想定した剛接合立体トラスの実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第457号, pp.37~46, 1994.3
- 11) 山中 徹, 鈴木敏郎, 小河利行, 福岡庸一, 小久保隆博 : 偏心接合を有する平行弦トラス平板の座屈性状に関する研究 (その1) 実験概要, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1893~1894, 1994.9
- 12) 小久保隆博, 鈴木敏郎, 小河利行, 福岡庸一, 山中 徹 : 偏心接合を有する平行弦トラス平板の座屈性状に関する研究 (その2) 偏心接合部と崩壊形式, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1895~1896, 1994.9
- 13) 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
- 14) 鈴木敏郎, 小河利行, 木村祥裕, 石原 直 : 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, 日本建築学会構造系論文集, 第497号, 1997.7

(1997年6月10日原稿受理, 1997年11月5日採用決定)