

# 山形鋼部材を用いたトラス構造物の耐荷力特性に関する研究

橋梁工学分野 畠中 彬

## Abstract

山形鋼は鋼構造物の2次部材に広く用いられており、送電鉄塔ではその構成部材として用いられる。2次部材では、ガセットプレートを介し他の部材に連結させる場合が多く、部材重心に作用力を作用させることができず偏心圧縮状態となる。しかし、一般的に山形鋼部材のモデル化は、剛性や断面積の等価な矩形断面で置き換えてモデル化しており偏心圧縮状態を考慮していないため、構造物の正確な耐荷力評価が困難であると考えられる。そこで、主部材および腹材の作用軸力の偏心に着目して解析モデルを作成し、トラス構造物の耐荷力特性について検討した。その結果、等辺山形鋼を用いたトラス構造物の耐荷力を求める場合、作用軸力の偏心が構造全体の耐荷力に与える影響は無視できないことがわかった。また、部材の重要度などを考慮した送電鉄塔の耐荷力特性について明らかにした。

## 1. 研究背景・目的

山形鋼は鋼構造物の2次部材に広く用いられており、送電鉄塔ではその構成部材として用いられる。2次部材では、ガセットプレートを介し他の部材に連結させる場合が多く、部材重心に作用力を作用させることができず偏心圧縮状態となる。しかし、一般的に山形鋼部材のモデル化は、剛性や断面積の等価な矩形断面で置き換えてモデル化しており偏心圧縮状態を考慮していないため、構造物の正確な耐荷力評価が困難であると考えられる。そこで、主部材および腹材の作用軸力の偏心に着目して解析モデルを作成し、トラス構造物の耐荷力特性について検討することを目的とする。

## 2. 等辺山形鋼の圧縮解析

等辺山形鋼部材のモデル化が部材の座屈耐力に及ぼす影響、作用軸力の偏心に着目して、弾塑性有限変位解析を行い、既往の研究<sup>1)2)</sup>と比較することにより検討する。

### 2.1 解析ケース

対象とするのはSS400の等辺山形鋼L-90×90×7mmの等辺山形鋼である。荷重パターンは、図-2.1に示すような6通りとした。Series1は重心軸圧縮、Series2は対称軸上に偏心し、加力点がフランジ刃先の方にある。Series3は同じく対象軸上であるが、偏心が刃先と反対側にある。Series4は非対称主軸上に偏心させたもの、Series5は両主軸に対して偏心させたものである。Series6は山形鋼の形状に沿った軸上に偏心させたものである。偏心量は対称軸上に最小断面二次半径 $r_{min}=17.7\text{mm}$ を、非対称軸上へは最大断面二次半径の半分 $r_{max}/2=17.4\text{mm}$ としている。解析ケースは細長比パラ

メータ $\bar{\lambda}$ が1.0付近、および、0.25付近の計12ケースである。図-2.1に荷重パターンを、表-2.1に全解析ケースを示す。

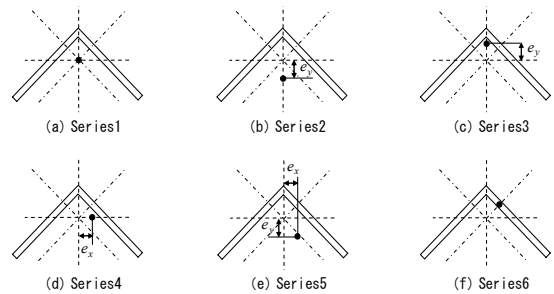


図-2.1 荷重パターン

表-2.1 解析ケース

Series	1		2		3		4		5		6	
材長 (mm)	345	1416	345	1770	345	1593	345	1416	345	1416	345	1416
細長比 $\lambda$	20	80	20	100	20	90	20	80	20	80	20	80
細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	0.29	0.97	0.25	1.25	0.25	1.14	0.25	1.00	0.25	1.00	0.29	0.97
重心からの偏心量 (mm)	0		17.7		17.7		17.4		248		21.6	
降伏応力 $\sigma_y$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	31		33		33		32		32		31	

## 2.2 解析モデル

### 2.2.1 板要素解析モデル

4節点板要素でモデル化している。荷重方法は図-2.2に示すように、部材端に剛体要素を取り付け、強制変位を与えている。両端ピン支持となるように境界条件を設定している。

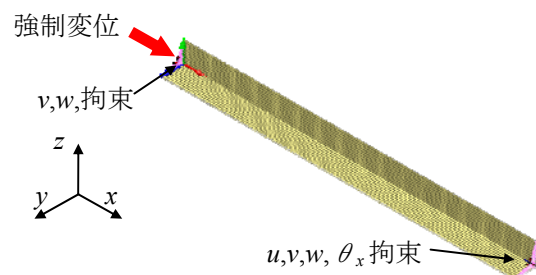


図-2.2 解析モデル

### 2.2.2 はり要素解析モデル

ファイバー要素の一種である箱型断面はり-柱要素<sup>3)</sup>で山形鋼断面を再現してモデル化している。荷重方法は板要素解析モデルと同様に、部材端に剛体要素を取り付け、強制変位を与えている。

### 2.3 解析結果

解析結果の一例を図-2.3に、図-2.4に解析結果のまとめを示す。図-2.3は縦軸に荷重荷重  $P$  を、横軸は、(a)では中央断面における両主軸方向への変位  $\delta$ 、(b)では供試体中央部の軸方向ひずみ(引張を正)、(c)は荷重変位を示している。

実験結果と解析結果とは良好な一致が見られる。また、偏心量よりも、曲げ剛性のほうが耐荷力に与える影響は大きい。最も荷重の低下率が大きいのは両主軸方向へ作用軸力の偏心を有する Series5 である。

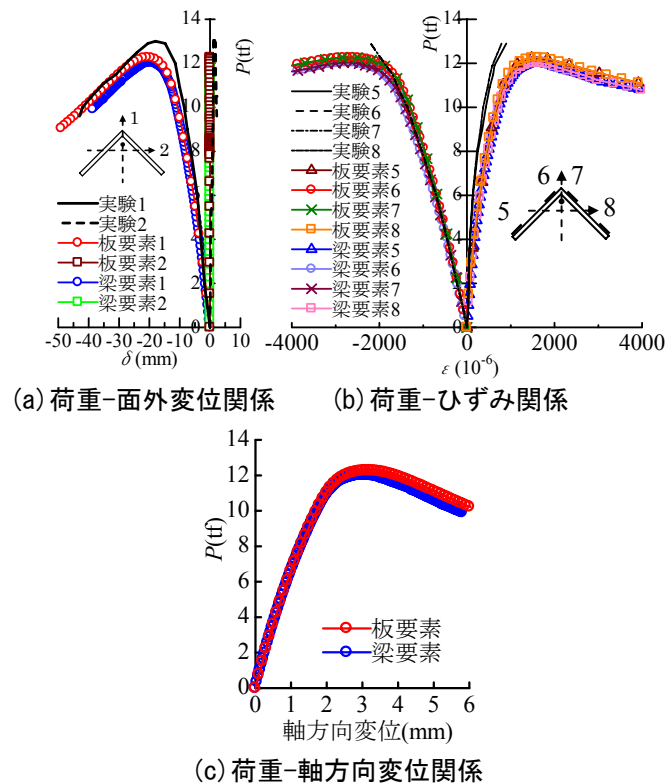


図-2.3 解析結果の一例 (Series3,  $\lambda=1.25$ )

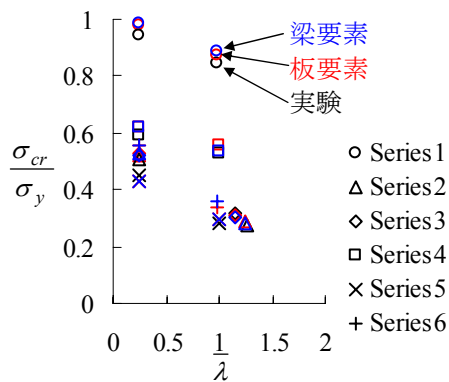


図-2.4 解析結果のまとめ

### 3. 簡易鋼トラス柱の模型実験・解析

等辺山形鋼部材を有するトラス構造物としての座屈、および、座屈後の挙動に着目して模型実験を行い、弾塑性有限変位解析での再現性について検討することを目的とした。

#### 3.1 実験供試体

実験供試体の全体図を図-3.1に示す。部材①、②は等辺山形鋼 L-50×50×4mm、部材③～⑤は等辺山形鋼 L-20×20×3mm であり材質は全て SS400 相当である。格点部はピン結合となるようにボルトで手締め程度とした。

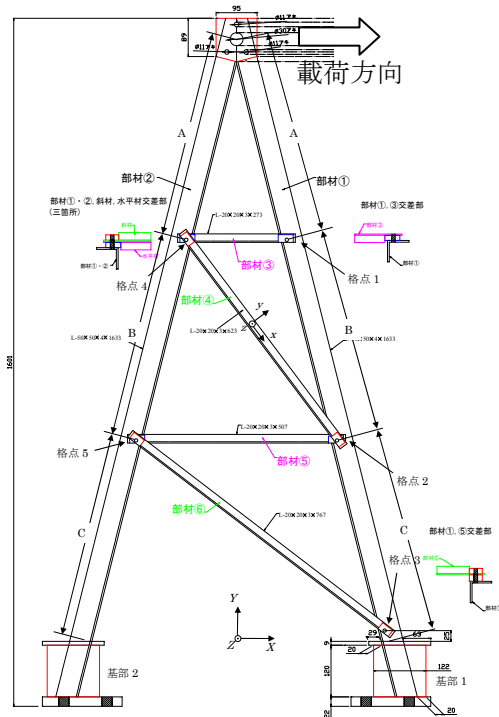


図-3.1 実験供試体

#### 3.2 測定項目

図-3.2 にひずみゲージの貼付位置を示す。部材①には合計 8 枚、部材④には 6 枚のひずみゲージを貼付している。その他は軸力算出用に 1 枚のひずみゲージを貼付している。図-3.3 に頂部変位計測位置を示す。巻込式変位計と接触式変位計によって計測した。

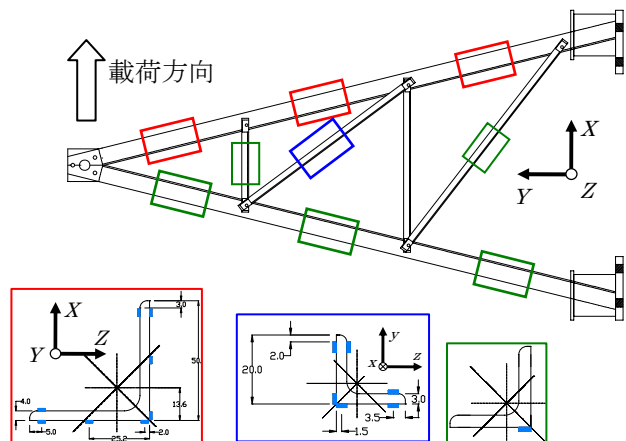
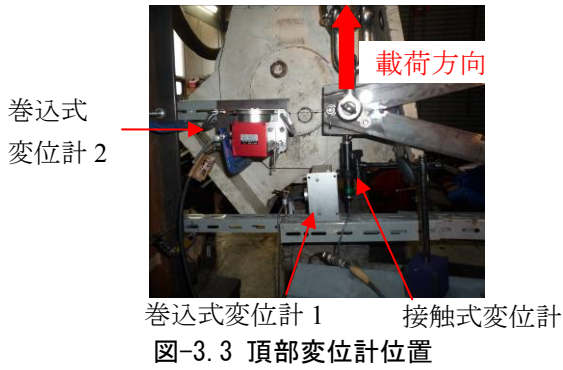


図-3.2 ひずみゲージ貼付位置



### 3.3 材料試験結果

実験供試体を製作した等辺山形鋼 L-50×50×4mm から 5 号試験片を, L-20×20×3mm から 13 号 B 試験片を 3 体ずつ製作し, 材料試験を行った. 表-3.1 に材料試験から得られた機械的性質を示す.

表-3.1 材料試験結果 (3 体の平均)

	ヤング率 $E$ ( $\text{N/mm}^2$ )	ポアソン比 $\mu$	降伏応力 $\sigma_y$ ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強さ $\sigma_u$ ( $\text{N/mm}^2$ )
L-50×50×4mm	207695	0.285	350.3	486.6
L-20×20×3mm	204688	0.288	333.6	456.8

### 3.4 実験結果

#### 3.4.1 荷重-頂部変位関係

図-3.4 に荷重荷重と頂部  $X$  軸方向の変位関係を示す. 図中の四角は実験終了時に計測した  $X$  軸方向の頂部変位量である. 図より荷重荷重 40kN あたりで急激に荷重が落ちていることがわかる. 図-3.5 に示すように基部 1, および, 部材①B 中央部で座屈が生じ, 大きく  $Z$  軸正方向に変形しているためである.

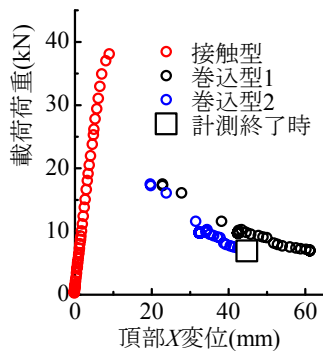
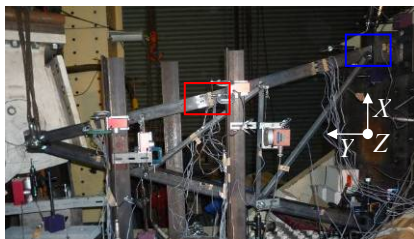
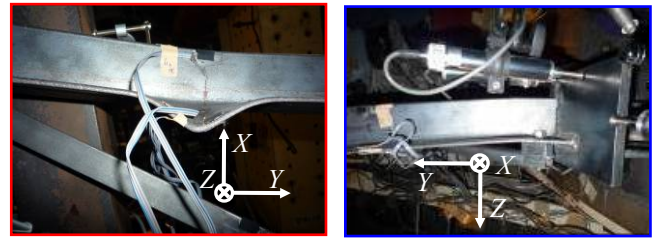


図-3.4 荷重荷重-頂部  $X$  変位関係



(a) 全体

図-3.5 終局状態



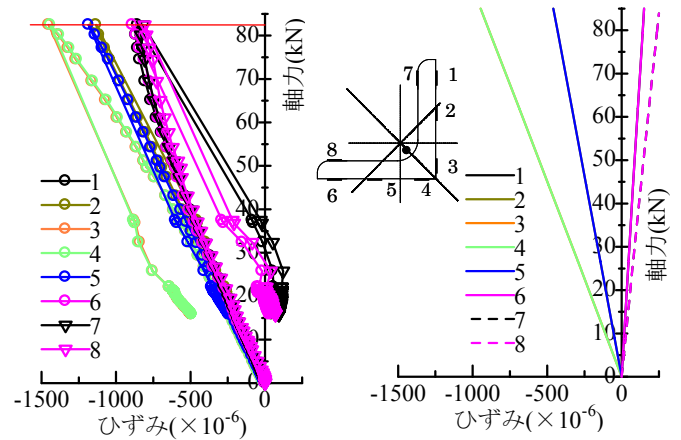
(b) 部材①B

(c) 基部 1

図-3.5 終局状態(続き)

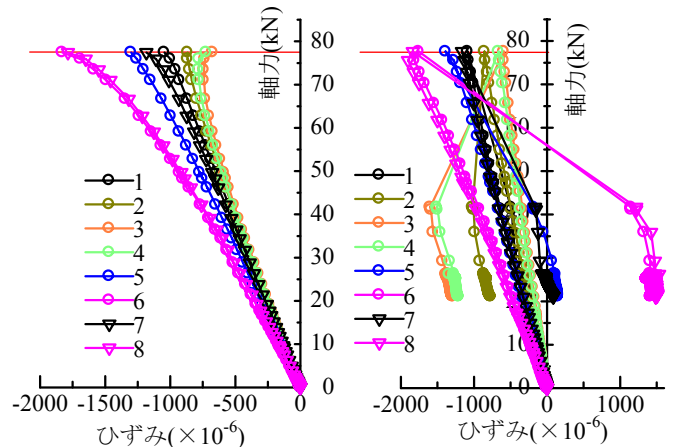
#### 3.4.2 圧縮軸力-軸方向ひずみ関係

図-3.6 に貼付したひずみゲージ結果から算出した部材の圧縮軸力-軸ひずみ関係, および, 第 2 章  $\bar{\lambda} = 0.25$  における板要素解析モデルの解析結果との比較を示す. 図中赤線は荷重荷重が最大となる地点である. 部材①A において, 軸力が 15kN 程度までは, ほぼ重心軸圧縮となっているが軸力が大きくなるにつれて力の作用軸がずれ対称軸方向に偏心を有する Series3 のひずみ分布に近づいていることが確認できる. 部材①B, C も同様に載軸力が 15kN 付近まで重心軸圧縮状態に近い. しかし, 軸力が大きくなるにつれて両主軸方向に偏心を有する Series5 の結果に近くなるということがわかる. 部材④は軸力の低い段階から Series5 の結果に近いが, 最大荷重以降, 部材①が負担していた圧縮力が配分されてその傾向が顕著になっている.



(a) 部材①A 実験結果

(b) 解析結果 (Series3)

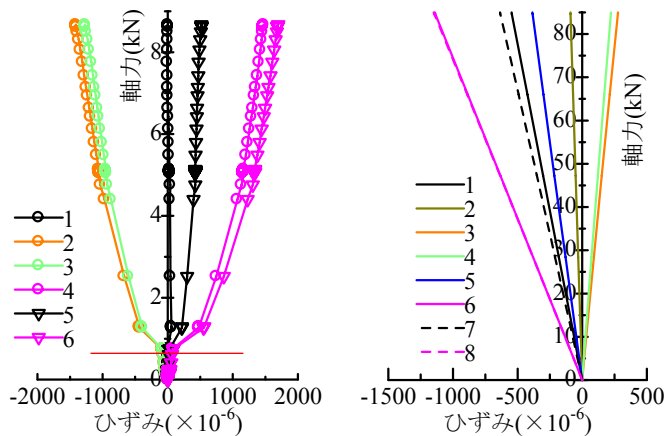
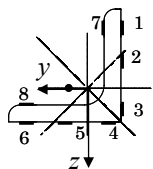
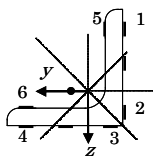


(c) 部材①B 実験結果

(d) 部材①C 実験結果

図-3.6 圧縮軸力-軸ひずみ関係





(e) 部材④実験結果

(f) 解析結果 (Series5)

図-3.6 圧縮軸力-軸ひずみ関係 (続き)

### 3.5 解析モデル

使用要素は箱型断面はり-柱要素である。基部の境界条件は実験結果より算出した並進ばね、および、回転ばねを用いてモデル化した。格点部は腹材が部材①、②に接続している箇所をピン結合としている。図-3.7 に解析モデルを示す。

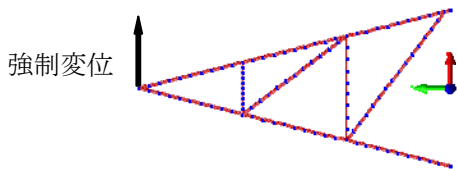


図-3.7 解析モデル

腹材の作用軸力の影響について検討するために、部材のオフセットを考慮した解析モデルと考慮しない解析モデルとの比較を行った。図-3.8 に概要図を示す。

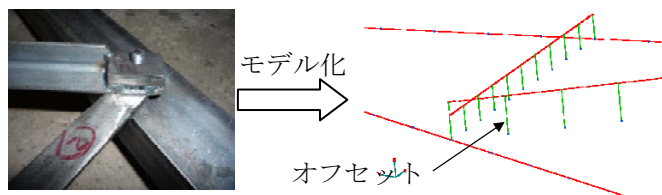


図-3.8 作用軸力の偏心を考慮したモデル化

### 3.6 解析結果

図-3.9 に頂部変位-載荷荷重関係の実験結果と解析結果の比較を示す。初期の勾配はどちらの解析モデルでも実験とよく一致する。しかし、最大荷重に関して部材の偏心を考慮するモデルと考慮しないモデルとを比較すると差があり、部材の偏心を考慮しないと耐荷力を7%程度高く評価している。図-3.10 に変形図を示す。変形図においても部材①B付近で大きく変形しており、実験結果の終局状態を再現できているといえる。

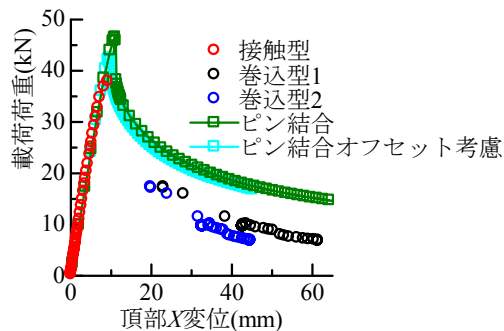


図-3.9 頂部X変位-載荷荷重関係

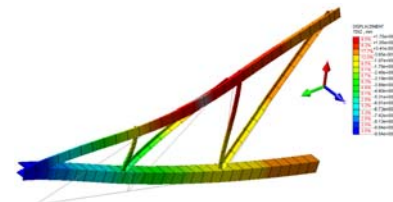


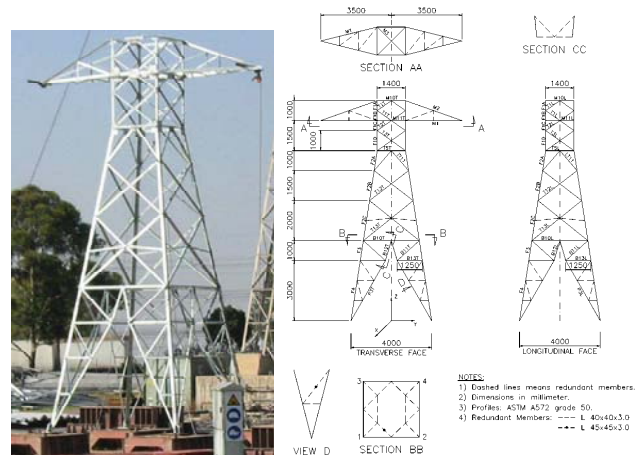
図-3.10 Z軸方向変位コンター図  
(最大荷重時、変形倍率10倍)

## 4. 送電鉄塔の耐荷力解析

等辺山形鋼を用いた送電鉄塔を対象とし、載荷試験結果<sup>4)</sup>と本解析結果とを比較して解析モデルの妥当性を検証し、送電鉄塔の崩壊挙動や耐荷力を検討する。

### 4.1 対象鉄塔

対象送電鉄塔はASCE 10/97 for Design/Calculationに基づいて設計されており、高さ11mで等辺山形鋼によって構成される小型の鉄塔である。図-4.1に対象鉄塔を示す。



(a) 全体写真

(b) 詳細および部材名称

図-4.1 対象鉄塔

### 4.2 載荷方法

載荷方法を図-4.2に示す。両腕金先端にx, y, z軸方向5000kgfを10, 25, 50, 75, 90, 100%の6段階で載荷している。

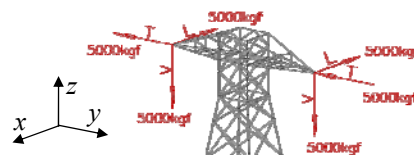


図-4.2 載荷方法

### 4.3 解析モデル

使用要素は箱型断面はり-柱要素である。格点部の結合条件を剛結合とし、第3章と同様に部材のオフセットを考慮しないモデルと考慮したモデルで解析を行った。

### 4.4 解析モデルの妥当性の検証

図-4.3 に実験結果と解析結果の比較を示す。横軸は設計荷重の荷重割合、縦軸は着目部材の軸力を記している。実験と解析で精度よく一致している。また、部材のオフセット考慮しないモデルと考慮したモデルとではほとんど差はないが僅かに部材のオフセットを考慮したほうが実験結果に近くなる。

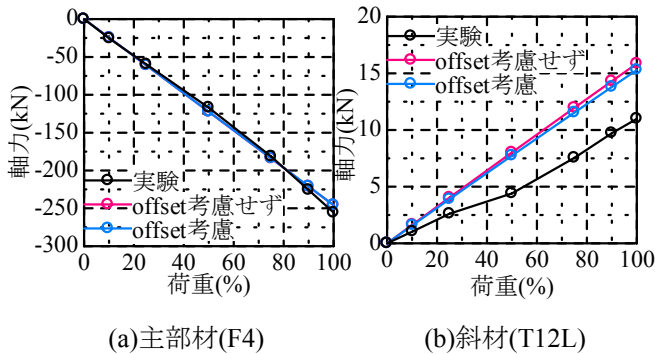


図-4.3 実験結果と解析結果の比較

### 4.5 部材感度を用いた送電鉄塔の耐荷力解析

設計や施工ミス、メンテナンスミス、腐食などによる不慮な部材の機能不全によって、構造物全体の耐荷力に与える影響を検討する。その手法として、送電鉄塔の構成要素が消失した場合に、耐荷力がどの程度低下するかを弾塑性有限変位解析により評価し、構成要素の消失前後における耐荷力の低下率を部材感度<sup>5)</sup>と定義し、送電鉄塔の耐荷力特性を評価する。

#### 4.5.1 解析方法

構造物の元の状態において非線形解析を行い、最大荷重を $\lambda_0$ とする。次に、ある一部材が最初から消失した状態で同様に弾塑性解析を行い、最大荷重を $\lambda_{damage}$ とし、その低下率を部材感度として次式で与える。

$$SensitivityIndex: S.I. = \frac{\lambda_0 - \lambda_{damage}}{\lambda_0} \quad (4.1)$$

ある部材を消失させても耐荷力がほとんど変化しない場合、その部材の部材感度  $S.I.$  は低くなる。逆に耐荷力が著しく低下する場合は部材感度  $S.I.$  が 1 に近くなる。つまり、部材感度  $S.I.$  が大きいほどその構造物における重要度の高い部材 (キーエレメント) となる。

#### 4.5.2 荷重ケース

図-4.4 に荷重ケースを示す。Case1 は 4.4 節と同様である。その他は架渉線から鉄塔に作用する荷重を想定として、片方の腕金みのみのケース (Case2)、両腕金とも同じ方向に荷重するケース (Case3)、および、両腕金で逆方向に荷重するケース (Case4) とした。

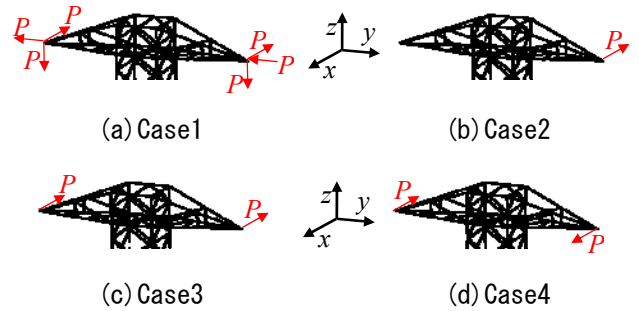


図-4.4 荷重ケース

#### 4.5.3 消失部材の選定

消失部材の選定方法を以下に示す。

- 1) 4.4 節で示した着目部材 (F2B, F4(1), TT11, LT11, T12T, T12L, T13L, B11T, B11L, P3L)
- 2) 部材を消失させる以前の解析モデルにおいて各荷重ケースで非線形解析を行い、最大荷重時における全要素の部材軸力を求める。その中で最も降伏軸力に近い圧縮、引張部材
- 3) 2) で抽出した部材が主部材の圧縮材である場合は腹材の作用軸力の偏心を考慮して、腹材における最も降伏軸力に近い圧縮部材
- 4) 同様、最大荷重時における全要素の二軸曲げモーメントを求め、その中で最も降伏曲げモーメントに近い部材

上記手法によって 19 の部材について検討することとした。図-4.5 に選定した部材を示す。

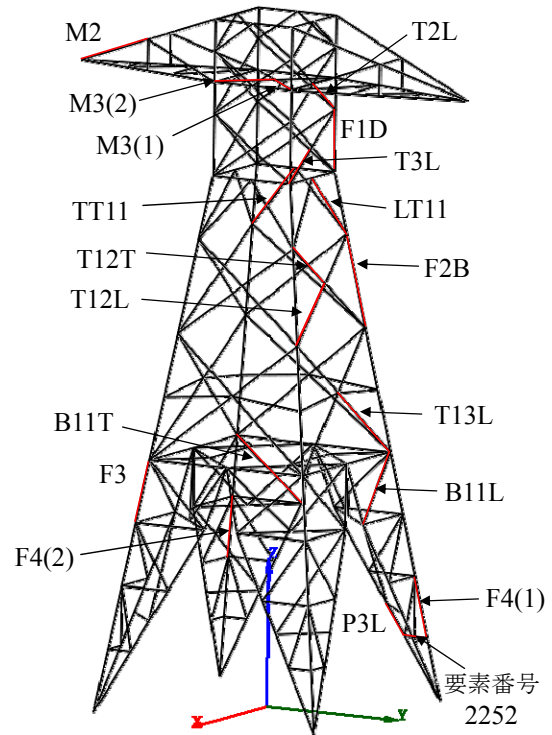


図-4.5 選定部材

#### 4.5.4 解析結果

図-4.6 に部材感度の一覧を示す。全体の部材感度の平均は 0.16 であり、ある 1 部材の消失による耐荷力の低下割合は大きくない。しかし、取り去る部材、荷重

ケースによって大きく異なることがわかる。部材感度が負の値となる場合もあるが、これは荷重の伝達経路が変化し、結果的に耐荷力は変わらない、あるいは上昇しているということである。本解析ケースでは斜材の部材感度が高い傾向にある。最も部材感度が大きいのは脚部主部材の P3L であり、部材感度は 0.42 である。

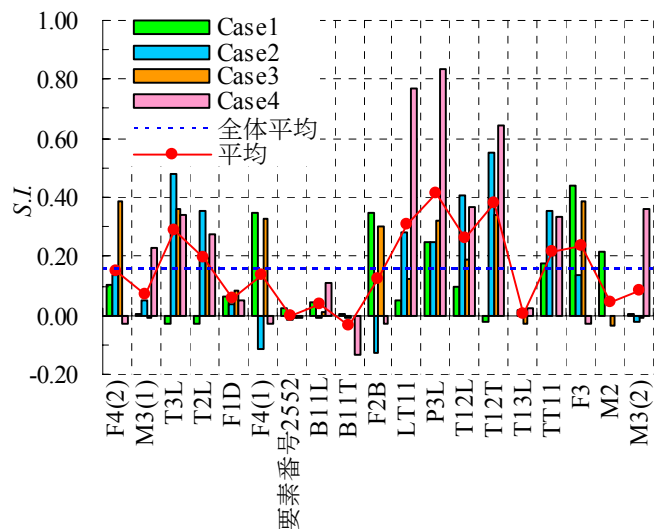


図-4.6 部材感度一覧

表-4.1 に消失部材の断面寸法と S.I.との関係を示す。消失させる部材断面の大きさと部材感度にはあまり関係はない。本解析では腕金から鉄塔に伝達する荷重を想定しているので、部材断面の大きい脚部主部材が消失し鉄塔全体が崩壊するモードより、鉄塔上部の斜材が消失し、鉄塔上部で崩壊するモードのほうが早期に起きやすく、耐荷力の低下を招くことがわかった。表-4.2 に載荷ケースごとの S.I.の最大値を示す。架渉線の引張力によって鉄塔に作用する荷重を想定した本解析では、Case4 が最も崩壊しやすいケースであるということがわかる。

表-4.1 消失させる部材の断面と S.I.との関係

消失部材(mm)	90×90×6.0	65×65×5.0	50×50×5.0	45×45×5.0	45×45×3.0
S.I.	0.16	0.15	0.18	0.24	0.05

表-4.2 載荷ケースと S.I.との関係

	Case1	Case2	Case3	Case4
S.I.(Max)	0.44	0.55	0.39	0.84

## 5. 結論および今後の課題

本研究では、圧縮軸力を受ける等辺山形鋼部材の挙動について作用軸力の偏心に着目して数値解析を行い、既往論文との比較による解析モデルの妥当性や耐荷力について検討した。また、部材における作用軸力の偏心がトラス構造物に与える影響について、簡易的なトラス柱を製作し、実験を行った。そこで得られた結果を元に送電鉄塔を対象にした解析モデルを作成し、部材の消失により、トラス構造物の耐荷力がどの程度低下するのかを検討した。以下に本研究で得られた主な結論、

および、今後の課題を示す。

- i) 等辺山形鋼部材における作用軸力の偏心の耐荷力に与える影響は大きく、耐荷力は重心軸圧縮の時と比べて最大で 30%程度に低下する。
- ii) 偏心量よりも偏心を有する方向のほうが耐荷力に与える影響は大きい。荷重の低下率が最も大きいのは両主軸方向へ偏心を有する場合である。
- iii) 等辺山形鋼部材を用いた簡易的なトラス柱の実験において、主部材、腹材にかかわらず作用軸力の偏心有る。特にピン結合された腹材では、最も座屈荷重の低下率の大きい両主軸方向に偏心を有するピン支持された等辺山形鋼の圧縮挙動に近い。
- iv) 数値解析によって等辺山形鋼を用いたトラス構造物の耐荷力を求める場合、作用軸力の偏心がトラス構造物の耐荷力に与える影響は無視できないものであり、作用軸力の偏心を考慮しないと耐荷力を高めに評価する。
- v) 架渉線から送電鉄塔へ伝達される荷重を想定した荷重を載荷した場合、ある一部材が消失した時の耐荷力の低下度合いは取り去る部材、載荷ケースによって大きく異なる。
- vi) 本研究で対象とした送電鉄塔は、鉄塔高さが低いので、風荷重考慮せず架渉線からの張力のみについて耐荷力特性について検討した。しかし、送電鉄塔において支配的となる荷重は一般的に風荷重であるので、風向きなどを考慮した荷重で検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 横尾義貫, 若林実, 野中泰二郎: 単一山形鋼の座屈耐力に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 1964年7月
- 2) 若林実, 野中泰二郎: 山型鋼の座屈挙動に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, pp.327-335, 1966年3月
- 3) 大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻 橋梁工学分野 JIP テクノサイエンス株式会社 システム技術研究所: EPASS/USSP version2.0 ユーザーズ・マニュアル, 2008年2月
- 4) CIGRÉ SC B2 Working Group WG-08: INFLUENCE OF THE HYPERSTATIC MODELING ON BEHAVIOR OF TRANSMISSION LINE LATTICE STRUCTURES, 2008年12月
- 5) 伊藤拓海, 大井謙一, 李正林: 鉛直荷重を受ける骨組構造物の冗長性に関わる感度解析, 日本建築学会構造系論文集, 第593号, 145-151, 2005年7月

## 討 議 等

### ◆討議 [ 谷口 与史也教授 ]

鋼トラス柱の実験における部材の偏心圧縮状態は等辺山形鋼部材の圧縮解析において、どの偏心圧縮状態が一番近いのか。

◆回答：鋼トラス柱における主部材は、部材圧縮解析における対称軸方向、あるいは、両主軸方向に軸力が偏心する状態に近い。腹材は両主軸方向に軸力が偏心する状態に近い。

### ◆討議 [ 谷口 与史也教授 ]

鋼トラス柱の実験および解析の位置づけは何か。

◆回答：等辺山形鋼部材が複数組み合わせさせたトラス構造物において、等辺山形鋼部材の作用軸力と偏心の程度が鋼トラス柱の耐荷力に与える影響を明らかにするためである。

### ◆討議 [ 松村 政秀講師 ]

鋼トラス柱の実験において、部材の作用軸力の偏心に移り変わりは見られなかったのか。

◆回答：荷重の増加に伴って、主部材は重心軸圧縮に近い状態から偏心圧縮状態へと変化した。しかし、ある偏心圧縮状態から別の偏心圧縮状態に移る変化は確認できなかった。

### ◆討議 [ 角掛 久雄助教 ]

送電鉄塔への荷重のかけ方はどのような荷重を想定して載荷しているのか。

◆回答：送電鉄塔の解析では、実物大の載荷試験で採用されていた載荷方法を参考にして荷重を載荷している。そのため、実際の鉄塔に作用する荷重を想定したわけではない。

### ◆討議 [ 谷池 義人教授 ]

実物大の載荷試験での終局状態を解析で再現できたのか。

◆回答：実物大の載荷試験では、腕金付近における格点部の破壊によって終局状態となっている。解析ではこの格点部が破壊しないようにモデル化しているため、実験と解析とで終局状態は異なる。

### ◆討議 [ 山口 隆司教授 ]

部材消失の取り扱い方はどうしているのか。

◆回答：荷重を載荷しない初期の状態から、対象部材を取り除いた解析モデルを作成し、この解析モデルに荷重を載荷している。

### ◆討議 [ 大内 一教授 ]

部材の消失は何を目的としているのか。

◆回答：腐食・損傷などにより、構成部材の荷重分担が全く期待できない状態を想定し、部材の消失により、トラス構造物の耐荷力がどの程度低下するかを検討することにより、部材の重要度を評価することを目的としている。