リングスチフナで補強される送電用鋼管トラス鉄塔節点の設計方法に関する研究

その3 実機条件における局部変形耐力

STUDY ON DESIGN METHOD FOR A JOINT OF RING-STIFFENER ON
THE TUBULAR STEEL TRUSSED TOWERS

Part 3 Local behavior of tubular steel on real condition

中 込 忠 男*1, 本郷 榮次郎*2, 深 沢 隆*3, 松尾 康博*4, 新 井 聡*4

Tadao NAKAGOMI, Eijiro HONGO, Takashi FUKASAWA,

Yasuhiro MATSUO and Satoru ARAI

FEM analysis are performed to investigate the local behaviors of tubular steel towers reinforced by ring-stiffeners under two different loading conditions. The effectiveness of these results are evaluated through empirical studies using real-scaled models together with the preceding results regarding the tubular steels stiffened by both of ring-stiffeners and gusset plates¹⁾²⁾. The derived conclusions are: (1) the effects of the axial forces on the yield strength of the stiffened steels are investigated. (2) the yield strength of a ring stiffener increases under loads in a single direction while it decreases when loads are in multiple directions. (3) the stress distribution in ring-stiffeners is able to be effectively evaluated by the proposed method.

Keywords: tubular steel trussed tower, ring-stiffener, local behavior, design method

鋼管トラス鉄塔, リングスチフナプレート, 局部変形耐力, 設計方法

1. はじめに

筆者らは、文献1)において、図1に示すような送電用鋼管トラス鉄塔のリングスチフナ補強される鋼管接合部を、図2(b)に示すような1枚のリングスチフナで補強される鋼管の単純モデル(以降、単一リングモデルと呼ぶ)として扱い、鋼管局部変形に影響する諸因子を変化させた耐力試験および試験結果との対比により有効性が検証されたFEM非線形解析を実施する方法で、単一リングスチフナに引張力Pが作用する場合の鋼管局部変形降伏耐力式の提案を行っている。また、文献2)において、図2(a)に示すようなリングスチフナとガセットプレートにより補強した鋼管(以降、一体型モデルと呼ぶ)の管壁に曲げモーメントM、水平力Pが作用する場合の引張力が生ずるリングスチフナが取り付け鋼管の局部変形耐力を、実験およびFEM非線形解析により、定量的に把握することにより、単一リングモデルとして取り扱うことの有効性を確認している。

上記報告では、図3(a),(b)に示すように鋼管材軸を対称軸とした片側、両側の2種類の載荷形態での水平力が作用する場合を対象としている。また、耐力評価はリングスチフナに引張力が作用する場合のみを対象としている。

しかしながら、送電用鉄塔においては、図4に模式的に示すよう

なりリングスチフナに多方向でかつ引張、圧縮の種別が異なる荷重が作用する。さらには、後述するように実機のディテールは、単一リングモデル、一体型モデルで簡便的に取り扱えない場合が多い。

以上より、本報では、送電用鋼管トラス鉄塔を対象に、①単一リングモデルに圧縮力が作用する場合の局部変形耐力を評価すること、②実機条件で想定される2方向からの荷重の組合せ条件の局部変形耐力への影響を定量的に把握すること、さらには③リングスチフナにより補強される実機ディテールを模擬した鋼管接合部を有する骨

図1 リングスチフナ 補強接合部 (a) 一体型モデル (b) 単一リングモデル
図2 接合部モデル

*1 信州大学工学部社会開発工学科 教授・工博

*2 東京電力(株) 博士(工学)

*3 (株)巴コーポレーション 工博

*4 (株)巴コーポレーション

Prof., Dept. of Civil Engineering and Architecture, Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr. Eng.
Tokyo Electric Power Company, Dr. Eng.
Tomoe Corporation, Dr. Eng.
Tomoe Corporation

組試験を行い、単一リングモデル、一体型モデルの検討結果を骨組へ適用した場合の有効性について検証を行うことを目的としている。

2. 単一リングモデルに圧縮水平力が作用した場合の局部変形耐力

2.1 検討方法

文献1)2)においては、図3(a),(b)に示すようなリングスチフナに引張水平力が作用する場合を対象に検討を行っており、図3(c),(d)に示すように圧縮水平力が作用する場合の局部変形耐力について言及していない。そこで、本章では、圧縮水平力が作用する場合の局部変形耐力を、載荷形態、材質、スチフナ寸法、鋼管の軸力比をパラメータとして、FEM解析により評価し、引張水平力が作用する場合と比較する方法で、その設計上の取り扱いについて検討を行う。

2.2 FEM解析概要

表1に解析対象一覧を示す。解析対象は、文献1)において試験および解析の対象とした鋼管 $\phi 190.7 \times 5.3$ 、鋼管径厚比 D/T (D : 鋼管径, T : 鋼管板厚) = 36, リングスチフナ寸法 $R \times t$ (R : 出幅, t : 板厚) は、 30×4.5 , 60×9.0 , 130×12.0 の3種類、載荷形態は、両側載荷および片側載荷の2種類、材質は $590, 400 \text{ N/mm}^2$ 鋼の2種類とし、鋼管の軸力比 N/N_y の影響を確認するために $N/N_y=0.8$ のケースも加えた計10ケースとする。

FEM解析は、汎用FEMプログラム「ADINA」³⁾を使用する。図5に解析モデルを示す。両側載荷のモデルは、リングスチフナ上下、載荷方向および載荷直角方向の対称性を考慮した1/8対称モデルとし、片側載荷のモデルは、リングスチフナ上下および載荷方向の対称性を考慮した1/4対称モデルとする。鋼管部モデル上端には、断面拘束のための剛体要素を配する。また、対象モデルは、鋼管、リングスチフナともに板厚が薄く、溶接部の剛性・耐力に及ぼす影響が無視できないことから、鋼管とリング部の隅肉溶接部を図中に示すように、三角形の余盛(脚長5mm)を有する完全溶け込み溶接部としてモデル化する。要素モデルは3次元固体要素とし、材料特性は $590, 400 \text{ N/mm}^2$ 鋼の規格降伏点を降伏点、二次剛性を $E/100$ としたバイリニア型の応力-ひずみ関係とする。なお、降伏判定は von Mises の降伏条件を適用する。また、幾何学的非線形構成式はトータルラグラジェを、反復計算はニュートン・ラフソン法を用いる。境界条件は、図中a,c点で示す鋼管上端中央節点をX,Y方向移動拘束、Z方向のみ移動自由の条件とする。なお、対称面は対称性を考慮し、対称面垂直方向を移動拘束とする境界条件に設定する。載荷は、水平力として載荷軸上のリングスチフナ外縁部から鋼管との接合部までの各節点に対して一様に荷重を与える方法を採用。

以上の解析条件は、解析結果を文献1)の引張水平力が作用した場合と比較を行うため、載荷方向を除いてすべて同条件である。

図6 荷重-変形量関係

図3 載荷方向

図4 荷重組合せ

表1 解析対象一覧および解析結果

名称	載荷形態	材質	鋼管 サイズ D×t (mm)	リングスチフナ サイズ R×t (R/t) (mm)	R/D	鋼管 軸力比 N/N _y	降伏耐力解析結果		
							圧縮 P _{yc}	引張 P _{yt}	P _{yc} /P _{yt}
R59-30-N0C(T)	両側載荷	STKT590 SH590P	$\phi 190.7$ $\times 5.3$	30×4.5 (6.67)	0.16	0.0	7.5	7.8	0.962
R59-30-N8C(T)				60×9.0 (6.67)	0.31	0.8	6.8	6.5	1.046
R59-60-N0C(T)				130×12.0 (10.83)	0.68	0.0	23.8	24.4	0.975
R59-130-N0C(T)				30×4.5 (6.67)	0.16	0.8	68.4	69.0	0.991
R59-130-N8C(T)				130×12.0 (10.83)	0.68	0.0	68.0	65.0	1.046
R40-30-N0C(T)				30×4.5 (6.67)	0.16	0.0	4.5	4.7	0.957
R40-130-N0C(T)	片側載荷	STKT590 SH590P	$\phi 190.7$ $\times 5.3$	130×12.0 (10.83)	0.68	0.0	38.3	38.6	0.992
K59-30-N0C(T)				30×4.5 (6.67)	0.16	0.0	11.6	12.1	0.959
K59-30-N8C(T)				30×4.5 (6.67)	0.16	0.8	10.0	9.7	1.031
K59-130-N0C(T)				130×12.0 (10.83)	0.68	0.0	78.0	79.7	0.979

STKT590 : JIS G 3474 鉄塔用高強度鋼管
SH590P : JIS G 3129 鉄塔用高強度鋼材

図5 解析モデル

図7 R/D - Pyc/Pyt 関係

(a)R59-30-N0T

(b)R59-30-N0C

(c)R59-30-N8T

図9 塑性領域

(a)R59-30-N0

(b)R59-30-N8

図8 荷重-リングスチフナ円周方向ひずみ関係

2. 3 FEM解析結果

表1に解析結果を示す。なお、表1には引張と圧縮の差異を比較するため、引張水平力が作用した場合の解析結果を併記する。また、図6に荷重-変形量関係の代表例を、図7にリングスチフナ出幅と鋼管径比R/D-圧縮降伏耐力と引張降伏耐力比 P_{yc}/P_{yt} 関係を示す。図6での変形量は図3に示す変形量 δ である。なお、解析結果の降伏耐力 P_y は、文献1)と同様、荷重-変形量関係における0.5%オフセット法によるものである。

これより、鋼管軸力比 $N/N_y=0.0$ の場合、圧縮降伏耐力は引張降伏耐力に比べて低い値となっており、その耐力低下率は、リングスチフナ出幅が小さいほど大きい傾向を示している。ちなみに、両側載荷、片側載荷共にリングスチフナ出幅 $R=30\text{mm}$ の場合に低下率4%程度となる。なお、材質による影響は見られない。これに対して、 $N/N_y=0.8$ の場合は圧縮降伏耐力が引張降伏耐力を3~5%程度上回っており、 $N/N_y=0.0$ の場合とは逆の傾向となっている。

図8に荷重-載荷点近傍リングスチフナ円周方向ひずみを、図9に降伏耐力時の塑性領域を示す。これより、 $N/N_y=0.0, 0.8$ 共にリングスチフナ円周方向ひずみは、引張降伏耐力時、圧縮降伏耐力時ともに $10,000\mu$ 程度であり、両者に大きな差異は見られない。一方、リングスチフナの荷重直交方向位置での塑性領域の広がり、引張水平力が作用する場合のほうが圧縮水平力が作用する場合と比較して大きくなっている。このことから、 $N/N_y=0.0$ の場合、圧縮降伏耐力の引張降伏耐力に対する低下率が大きいのは、引張の場合は管壁の曲率と同方向の外側への変形モードとなるため、鋼管全周にほぼ一様円周方向力が作用し、たが効果により局部変形の進行が抑制されるためと考えられる。これに対し、圧縮の場合には、管壁の曲率と逆方向の内側への変形モードとなるため、鋼管全周に一様な円周方向力が作用せず、たが効果が期待できないことに起因していると考えられる。また、 $N/N_y=0.8$ の場合、圧縮降伏耐力が引張降伏

表2 解析対象一覧

鋼管サイズ (mm)	リング スチフナ サイズ	主荷重P	荷重比 m						
			1.0	0.5	0.0	-0.25	-0.5	-0.75	-1.0
$\phi 190.7 \times 5.3$	30×4.5	引張	○	○	○	○	○	○	○
		圧縮	○	○	○	○	○	○	○
	60×9.0	引張	○	○	○	○	○	○	○
		圧縮	○	○	○	○	○	○	○

○ : $N/N_y=0.0$, ◎ : $N/N_y=0.0, 0.8$

図10 解析モデル

耐力を上回るのは、鋼管軸力により鋼管が外側にはらむ変形状が、リングスチフナに作用する引張力に対しては重畳し、圧縮力に対しては逆に抵抗するためと考えられる。

以上の結果より、送電用鋼管トラス鉄塔のリングスチフナ補強される鋼管は、一般的に高軸力下で使用されることを条件に、その圧縮降伏耐力は、文献1)に示した引張降伏耐力に基づく降伏耐力式により安全側に評価できることが確認される。

3. 単一リングモデルに組合せ水平力が作用する場合の局部変形耐力

3. 1 検討方法

送電用鉄塔の柱材に取り付くリングスチフナに作用する水平力は、図4に示すように「引張・引張」、「引張・圧縮」、「圧縮・圧縮」の3タイプである。これまで文献1)2)および本報2章では、図3に示すような鋼管材軸を含む平面内に対して一軸方向荷重に対しての検討を行ってきた。ここでは、鋼管材軸を含む平面内に対して、直交する二軸方向荷重の組合せによる局部変形耐力についてFEM非線形解析を行い、設計上の取り扱いについて検討を加える。

3. 2 FEM解析概要

表2に解析対象一覧を、図10に解析モデルを示す。2章と同様に、文献1)において試験体として用いた鋼管 $\phi 190.7 \times 5.3$ 、鋼管径厚比 D/T (D : 鋼管径, T : 鋼管板厚) = 36、リングスチフナ寸法 $R \times t$ (R : 出幅, t : 板厚) = $30 \times 4.5, 60 \times 9.0$ の2種類とする。材質は 590N/mm^2 鋼を対象とする。荷重組合せケースは、各方向の荷重

を主荷重 P と従荷重 P' の荷重比 $m=P'/P$ による影響を把握するため、主荷重 P について、リングスチフナに引張力が作用する場合と圧縮力が作用する場合のそれぞれについて $m=1.0 \sim -1.0$ までの13ケースとする。また、鋼管の軸力比 N/N_y の影響を確認するためのケースも加える。解析ケースは、以上の条件を適宜組合せた計23ケースとする。

FEM解析は、境界条件を除いて2章と同様とする。境界条件は、上面鋼管中央節点をX,Y方向移動拘束、Z方向のみ移動自由の条件とする。なお、対称面は対称性を考慮し、対称面垂直方向を移動拘束とする境界条件に設定する。

3. 3 解析結果

表3に解析結果を、図11に主荷重－主荷重方向変形量関係の代表例を、図12に主荷重－主荷重点近傍リングスチフナ円周方向ひずみの代表例を示す。解析結果の降伏耐力 P_y は、文献1)と同様、主荷重 P 側の荷重－変形量関係における0.5% オフセット法によるものである。降伏耐力時のリングスチフナ円周方向ひずみは、10,000 μ 程度であり、荷重組合せの場合においても一方向载荷と同様の値となっている。

図13に P_y/P_{y0} と荷重比 m の関係を示す。ここで、 P_y は主荷重側に着目した降伏耐力を、 P_{y0} は一方向片側引張荷重 ($m=0.0$) の場合の降伏耐力である。鋼管軸力比 $N/N_y=0.0$ の場合、それぞれの荷重の組合せにおける降伏耐力は、組合せが同方向 ($m>0$) の場合（「引張・引張」、「圧縮・圧縮」）は、主荷重方向の変形に従荷重が抑制するため、1方向荷重降伏耐力より5%程度高い値となるが、異方向 ($m<0$) の場合（「引張・圧縮」）は、主荷重方向の変形に従荷重が助長するため、1方向荷重降伏耐力より低くなり、 $m=-1.0$ の場合は、20%程度低い値となる。なお、鋼管軸力比 $N/N_y=0.8$ の場合は、2章と同様に $N/N_y=0.0$ の場合に比べて降伏耐力が高くなる傾向が見られる。

これより、異方向荷重の組合せ時を検討する場合 $m<0$ の領域においては、主荷重側の耐力評価では危険側評価を与えることから、従荷重側の影響を、図13右付図、および(1)式に示すように、各荷重 P, P' のベクトル和 $\bar{P}$ で取り扱う方法で考慮することとする。図13に修正耐力基準値 ($\bar{P} = P_{y0}$ 時の主荷重 P/P_{y0}) を破線で併記する。なお、ここでは荷重 P, P' の成す角を 90° とする。これより、ベクトル和による評価方法は、前述の主荷重による評価で降伏耐力が低下する $m<0$ の領域においても安全側評価を与えることが確認される。

$$\bar{P} = \sqrt{P^2 + P'^2} = P\sqrt{1+m^2} \quad (1)$$

柱材に取り付くリングスチフナに作用する荷重が、異方向の組合せとなるのは、図14に示すように塔体に対して斜め方向に荷重が加わる場合であるが、このとき○印で示す柱材の軸力は○印で示す柱材の軸力に比べて小さい。送電用鉄塔においては、一般的には4脚の柱材を同一設計することから、組合せ荷重による影響は考慮しなくてもよいと考えられる。

表3 解析結果（降伏耐力）

鋼管サイズ (mm)	リング スチフナ サイズ	主荷重 P	P_{y0}	荷重比 m						
				1.0	0.5	0.0	-0.25	-0.5	-0.75	-1.0
$\phi 190.7 \times 5.3$	30×4.5	引張	12.1	12.5 (1.03)	12.2 (1.01)	12.1 (1.00)	11.8 (0.98)	11.5 (0.95)	10.5 (0.87)	9.3 (0.77)
		圧縮	9.6	9.6 (1.00)	12.0 (0.99)	11.6 (0.96)	11.3 (0.93)	10.9 (0.90)	10.3 (0.85)	7.6 (0.79)
	60×9.0	引張	30.6	31.4 (1.03)	—	30.6 (1.00)	—	—	—	24.5 (0.80)
		圧縮	—	30.4 (0.99)	—	29.3 (0.96)	—	—	—	—

太字: $N/N_y = 0.8$

図11 荷重－変形量関係
(30×4.5, $m=1.0$)

図12 荷重－リングスチフナひずみ関係
(30×4.5, $m=1.0$)

図13 P_y/P_{y0} －荷重比 m 関係

図14 45° 方向荷重時応力

4. 実機ディテールを模擬した鋼管接合部を含む骨組試験

4. 1 試験内容

文献1)2)において示したリングスチフナ補強された鋼管の降伏耐力式による評価の、実際の骨組に組込まれた接合部への適用の可否を検討するために、リングスチフナ補強された鋼管接合部を有する骨組試験を行う。骨組試験は、図15に示すような片側载荷形態である柱材曲げ点部（以降、曲げ点部と呼ぶ）を対象とした試験と、図16に示すような両側载荷形態である腕金吊材取付部（以降、吊材取付部と呼ぶ）を対象とした試験の2ケースとする。表4に骨組試験一覧を示す。なお、各試験対象箇所作用する応力の組合せは、曲げ点部については曲げモーメントと水平力片側载荷の組合せであり、吊材取付部については水平力両側载荷と曲げモーメントの組合せとなる。

曲げ点部対象試験は、実際の鉄塔を想定した応力状態となるように荷重を载荷することにより、接合部への入力荷重に対する各リングスチフナ負担応力を確認することを目的としており、载荷は降伏耐力以下で終了する。また、吊材取付部対象試験は、負担応力確認に加えて、リングスチフナ補強された鋼管の降伏耐力式に基づき設計した接合部の局所変形挙動を確認することも目的としており、载荷は最大耐力を確認するまでとする。

4. 2 リングスチフナ負担応力

各リングスチフナが負担する応力は、鋼管管壁に作用する力を曲

げモーメント M と水平力 T に分解し、さらに以下の要領 (図15, 図16 参照) で簡便に振り分ける方法で算定する。

曲げモーメント M に対しては、ガセットプレート両側リングスチフナ (吊材取付部腕金取付側のガセットプレートのよう) に内側のリングスチフナによりガセットプレートが分断されている場合はそのリングスチフナに逆対称の水平力 $P=M/H$ (H : 2枚のリングスチフナの間隔) として負担させる。一方は、水平力 T に対しては、リングスチフナが2枚の場合は当該リングスチフナ、3枚以上の場合はガセットプレート内側のリングスチフナで負担させる。

4. 3 試験体

試験体は、試験対象箇所とする塔体曲げ点部および腕金吊材取付部を含む骨組試験体とする。図17に曲げ点部を試験対象箇所とする試験体形状を、図18に吊材取付部を試験対象箇所とする試験体形状を示す。

試験対象箇所の鋼管は、図15に示すように $\phi 190.7 \times 5.3$ 、鋼管径厚比 D/T (D : 鋼管径, T : 鋼管板厚) $= 36$ とし、リングスチフナ寸法 $R \times t$ (R : 出幅, t : 板厚) は、曲げ点部については $20 \times 4.5, 25 \times 4.5$ の2種類、吊材取付部については図16に示すように $20 \times 4.5, 25 \times 4.5, 40 \times 6.0, 70 \times 9.0$ の4種類とし、鋼管は STKT590、プレートはすべて SH590P とする。試験対象接合部以外の各部材の材質は、柱材、腕金主材・吊材は STKT590、その他の部材は STK400、

図15 リングスチフナ負担応力図 (曲げ点部)

図16 リングスチフナ負担応力図 (吊材取付部)

表4 骨組試験一覧

対象節点	鋼管サイズ $D \times T$ (材質)	リングスチフナ サイズ $R \times t$ (材質)	荷重方法	節点作用応力	リング スチフナ 位置	リングスチフナ			骨組降伏耐力	
						降伏耐力 P_y	負担応力 P	P/P_y	塔頂部 P_{hy}	腕金部 P_{vy}
柱材 曲げ点部	$\phi 190.7 \times 5.3$ (STKT590)	20×4.5 (A,D) 25×4.5 (B,C) (SH590P)	塔体: 水平力	曲げモーメント + 水平力 (片側)	両端部 (A,D) 中央部 (B,C)	7.02 9.53	3.76 9.53	0.54 1.00	100.6	—
腕金吊材 取付部		25×4.5 (A), 70×9.0 (B) 40×6.0 (C), 20×4.5 (D) (SH590P)	塔体: 水平力 腕金: 鉛直力	曲げモーメント + 水平力 (両側)	A B C D	5.66 35.11 13.07 3.84	2.92 35.11 11.80 1.55	0.52 1.00 0.90 0.40	84.7	39.9

図17 試験体形状, 荷重方法, 解析モデル (曲げ点部)

図18 試験体形状, 荷重方法, 解析モデル (吊材取付部)

表5 材料引張試験結果

鋼種	サイズ	降伏点 (tf/cm^2)	引張強さ (tf/cm^2)	降伏比	伸び (%)
STKT590	$\phi 190.7 \times 5.3$	6.36	6.62	0.96	26.7
SH590P	PL-4.5	5.6	6.1	0.92	26.3
	PL-6.0	6.16	6.67	0.92	19.3
	PL-9.0	6.15	6.72	0.92	19.7

STKT590 : JIS G 3474 鉄塔用高張力鋼管
SH590P : JIS G 3129 鉄塔用高張力鋼鋼材
引張試験 $\phi 190.7 \times 5.3$: JIS Z 2201 12C号試験片, PL-4.5 : 同5号試験片
PL-6.0, 9.0 : 同 1A号試験片

表6 短柱圧縮試験結果

鋼種	サイズ	降伏応力度 (tf/cm^2)	最大応力度 (tf/cm^2)
STKT590	$\phi 190.7 \times 5.3$	6.25	6.25

プレートはSS400とSH590Pを使い分けた。表5に供試材のJIS Z 2241による材料引張試験結果、表6に試験対象箇所鋼管の短柱圧縮試験結果を示す。

4. 4 試験方法

図17に曲げ点部対象試験の荷重方法を、図18に吊材取付部対象試験の荷重方法を示す。曲げ点部対象試験では、塔頂部に水平荷重を載荷する。吊材取付部対象試験では、塔頂部の水平荷重と腕金先端部の水平、鉛直荷重を組合せて載荷することとし、試験対象箇所への作用応力状態が実際の鉄塔と同様となるような荷重値とするため、対象接合部の柱材軸力が降伏軸力 N_y の80%に達するまでは塔頂部、腕金先端荷重を同時に載荷し、その後は、柱材軸力が $0.8N_y$ を保持するように、塔頂部荷重は漸減し、腕金先端荷重を増加させる方法で、接合部の降伏の確認および終局耐力の確認を行う。なお、各試験の基準となる試験降伏耐力 P_h 、 P_{vy} は、線形解析により、試験対象箇所のリングスチフナ部負担応力が4.2節の設定により降伏耐力 P_y に達する荷重とする。リングスチフナ材の材料引張試験、鋼管の短柱圧縮試験結果を用いた、リングスチフナ降伏耐力および4.2節に基づき算出したリングスチフナが降伏耐力に達する載荷点荷重を表4に併記する。

載荷方法は、塔頂部水平方向載荷については反力鉄塔の基礎部にウィンチを固定し、反力鉄塔を介してワイヤにより加力、腕金先端部の載荷については、水平荷重と鉛直荷重の合力を腕金下に設置した鉛直荷重載荷用基礎体にウィンチを固定し、ワイヤにより加力する方法を採る。

各計測については、荷重は載荷点に設置したロードセルにより、リングスチフナ作用力方向変形量は対象接合部のリングスチフナに設置した変位計により、各部ひずみはひずみゲージによりそれぞれ計測した。

4. 5 骨組試験結果

図19,20に各ケースの荷重－載荷点変形量関係を示す。荷重－変形量関係において剛性が低下しているが、これは、腹材、水平材端部に取付くせん断ボルト接合部のすべりの影響である。曲げ点部対象試験は、リングスチフナ負担応力が弾性範囲変形と見なせる降伏耐力の約2/3となる塔頂部水平方向荷重 $68.8\text{tf}(0.68P_y)$ の段階で、載荷を終了した。吊材取付部対象試験は、塔頂部水平方向荷重 55.5tf 、腕金先端部水平、鉛直方向合力 $71.7\text{tf}(1.80P_y)$ の段階で、試験対象箇所において、最下リングスチフナ下の柱材が局部座屈を呈した。なお、試験対象節点における耐力については次章にて、FEM解析結果と対比する形で詳述する。

5. リングスチフナ補強部の負担応力検討および耐力検討

5. 1 FEM解析概要

リングスチフナ部の負担応力および降伏耐力を検討することを目的としてFEM解析を行う。解析は、骨組試験体を線材要素によりモデル化し、検討対象部を詳細モデルとした解析モデルを用い、2、3章と同様、汎用FEMプログラム「ADINA」³⁾を使用する。解析モデルを図17、18に示す。詳細モデルについては、2、3章と同様な方針でモデル化する。要素モデルは、骨組は梁要素、詳細部

図19 荷重－載荷点変形量関係（曲げ点部）

(a) 腕金先端部

(b) 塔頂部

図20 荷重－変形量関係（吊材取付部）

(a) 曲げ点部：試験設定荷重時

(b) 吊材取付部：降伏荷重 P_y 時

図21 接合部への入力荷重

は3次元固体要素とし、材料特性は各材料引張試験結果に基づき、ひずみが5%程度までの領域において合致するようなバイリニア型にモデル化した応力－ひずみ関係を用いる。境界条件は、柱部材最下点をX,Y,Z方向移動拘束条件とする。

5. 2 節点への入力荷重評価によるFEM解析モデルの妥当性検討

図21に曲げ点部、吊材取付部それぞれの節点への入力荷重を示す。図中の荷重は、曲げ点部対象モデルにおいては試験設定荷重時、吊材取付部対象モデルにおいては実験における降伏荷重 P_y 時のFEM解析による結果であり、()内の数値は試験結果である。なお、試験結果は、対象となる鋼管部材のひずみ計測値から鋼管の軸力を算定したものである。これより、曲げ点部対象モデル、吊材取付部対象モデル共に、試験結果とFEM解析結果は、概ね良い対応を示している。

5. 3 各リングスチフナ部の負担応力検討

接合部への入力荷重をリングスチフナ補強鋼管局部変形耐力基本形（両側載荷 [単一, 多枚数], 片側載荷, ガセットプレート一体系型）へ分解し、継手部リングスチフナ部材の負担荷重を検証する。

応力の負担は、ガセットプレート近傍のリングスチフナ円周方向ひずみの分布により推定する。曲げ点部においては、主構面、副構面について、吊材取付部においては、腕金吊材取付側について検討

を行う。なお、吊材取付部リングスチフナCについては、検討対象側のリングスチフナ形状が他部材との接合の取合い上から円弧形状ではないため、検討対象から除く。

図22に曲げ点部対象試験、図23に吊材取付部対象試験の荷重－リングスチフナ円周方向ひずみ関係を、図24に曲げ点部対象試験の線形領域 $P=30tf$ 時、図25に吊材取付部対象試験の線形領域 $P_y/2$ 時および非線形領域 P_y 時の各リングスチフナ円周方向ひずみを、FEM解析結果と併記する形で示す。なお、図24,25においては、4.2節の応力分担算定方法による各リングスチフナ負担応力と骨組に組み込まれた場合の負担応力を比較するために、4.2節の応力分担方法に基づく負担応力を荷重とした単一リングモデルFEM解析結果を白抜きプロット点で示す。これより、ガセットプレートが通しタイプの曲げ点部においては、実験結果とFEM解析結果は良い対応を示すが、応力分担算定結果に基づく値とは分担傾向は対応してい

るものの、それぞれの値については若干の乖離が見受けられる。しかしながら、実際の設計においては正副構面のベクトル和応力で用いることから、算定結果に基づく値は概ね安全側の評価を与える。また、上下ガセットプレートが分断されるタイプの吊材取付部においては、線形領域 $P_y/2$ 時、非線形領域 P_y 時共に実験結果、FEM解析結果、応力分担算定結果に基づく値とも良い対応を示す。

以上より、4.2節での提案のリングスチフナの簡便な応力分担算定方法は有効であると判断できる。

5. 4 リングスチフナ部の降伏耐力検討

図26に吊材取付部対象試験のリングスチフナの中で負担応力と降伏耐力の比 P/P_y が最初に1.0となるリングスチフナBの荷重－リングスチフナ円周方向ひずみ関係を、5.1節での解析結果、およびリングスチフナBと同サイズの単一リングモデル解析結果と併せて示す。なお、右縦軸に、リングスチフナ負担応力と同評価である単

(a) 主構面 (b) 副構面
図22 荷重－リングスチフナひずみ関係 (曲げ点部)

図23 荷重－リングスチフナひずみ関係 (吊材取付部、腕金取付部：線形部分)

図24 リングスチフナひずみ分布 (曲げ点部：線形領域 $P=30tf$ 時)

図25 リングスチフナひずみ分布 (吊材取付部：線形領域 $P_y/2$ 時、非線形領域 P_y 時)

ーリングモデル荷重 P を示す。図中には、骨組リングスチフナ部負担応力が4.2節の設定により降伏耐力 P_y に達する荷重 P_{vy} 点を▽で示す。また、図 20(a) に P_{vy} 点を▽で示す。

これより、試験結果の P_{vy} 時と単一リングモデル解析結果の P_y 時の円周方向ひずみは、同一の値であり、また、文献1)2)中で、リングスチフナ補強鋼管の局部変形降伏耐力時のリングスチフナ円周方向ひずみであるとされている $10,000\mu$ 程度と概ね一致するので、リングスチフナ B は、試験荷重が P_{vy} の時点でリングスチフナ部の降伏耐力 P_y に達していると判断できる。

6. 結論

送電用鉄塔のリングスチフナで補強される鋼管に関する本研究において得られた知見を以下に列挙する。

1. 単一リングモデルにおいて、鋼管軸力比 $N/N_y=0.0$ における引張降伏耐力と圧縮降伏耐力では、圧縮降伏耐力が低い値となる。これに対して、 $N/N_y=0.8$ の場合は圧縮降伏耐力が引張降伏耐力を上回る傾向を示す。これより、鋼管トラス鉄塔部材は高圧縮軸力下で用いられることから、引張降伏耐力は安全側評価を与える。
2. 2方向の荷重組合せによるリングスチフナ補強鋼管の局部変形耐力への影響は、同方向荷重の場合は降伏耐力が上昇するが、異方向荷重の場合は降伏耐力が低下する。ただし、四角鉄塔の柱材にリングスチフナが取付き、4脚とも同一設計とする場合、異方向となるのは軸力が比較的小さい部材であることから組合せ荷重による影響はほとんど考慮しなくてもよいものと考えられる。
3. 骨組試験および FEM 解析より、各リングスチフナが負担する応力が簡便な振り分け法により算定できることが確認された。
4. 実機条件におけるリングスチフナで補強される鋼管の局部変形耐

図 26 荷重ーリングスチフナひずみ関係
(吊材取付部:腕金取付面)

力は、接合されたリングスチフナ応力分担算定法に基づく単一リングモデル降伏耐力により評価できることが確認された。

謝辞

本研究を行うにあたり、神奈川大学藤本盛久理事長、日本大学秋山宏教授の御指導を戴きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中込忠男, 本郷榮次郎, 深沢 隆, 松尾康博, 新井 聡: リングスチフナで補強される送電用鋼管トラス鉄塔節点の設計方法に関する研究 その 1 リングスチフナで補強される鋼管の局部変形耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第 532 号, pp.169-175, 2000.6
- 2) 中込忠男, 本郷榮次郎, 深沢 隆, 松尾康博, 新井 聡: リングスチフナで補強される送電用鋼管トラス鉄塔節点の設計方法に関する研究 その 2 リングスチフナ・ガセットプレート一体型補強部を有する鋼管の局部変形耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第 538 号, pp.163-170, 2000.12
- 3) ADINA R&D, Inc. : Theory and Modeling Guide, 1999

(2000年10月10日原稿受理, 2001年5月11日採用決定)