

部材補強した送電鉄塔の強風下における振動特性と その補強効果

石野, 智慎
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻修士課程

石田, 伸幸
日本鉄塔工業株式会社

森本, 康幸
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

前田, 潤滋
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/20655>

出版情報：都市・建築学研究. 18, pp.27-32, 2010-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

バージョン：

権利関係：

部材補強した送電鉄塔の強風下における振動特性とその補強効果

Dynamic Properties of Transmission Tower with Reinforcing Member and its Wind Resistant Performance under Strong Winds

石野智慎*¹, 石田伸幸*², 森本康幸*³, 前田潤滋*³

Tomonori ISHINO, Nobuyuki ISHIDA, Yasuyuki MORIMOTO and Junji MAEDA

We investigated the dynamic properties of a transmission tower with reinforced arms by members installed to reduce axial force of horizontal tie members, and its wind resistant performance of the tower under strong winds was reported. The dynamic properties of the single tower were analyzed using the natural frequency and frequency response techniques, and the wind resistant performance of some tower-and-cable coupling models was investigated using the spectral response methods and step-by-step integral techniques. As a result, it was found that the reinforcing member can reduce the axial force of the horizontal tie member. Finally, we confirmed the reducing rate of the force is about 90% and 70% against mean wind loads and dynamic wind loads, respectively.

keywords : Reinforcement of Existing transmission tower,

Reinforcement of horizontal tie members inside arms, Wind-resistant performance of reinforced tower

既設送電鉄塔の補強, 腕金吊水平材の補強, 補強鉄塔の耐風性能

1 序

送電線を支持する鉄塔腕金部先端に作用する電線張力は腕金吊材やそれらを繋ぐ塔体内の腕金吊水平材に伝わる。強風下での状況によっては、電線風圧がこの腕金吊材に大きな応力を発生させ、腕金吊水平材を通して支柱材との接合部ガセットプレートへの負担が増大する。また隣接する鉄塔腕金部との高低差が大きい場合は発生荷重が増大し、台風通過時に設計荷重を上回る荷重が発生する可能性が考えられる。既設送電鉄塔の耐風補強には、補強方式の補強効果の検証は十分に行われている「支柱材補強」¹⁾や「金具締め方式による補強」²⁾などがあるが、これらは鉄塔支柱材を補強するものであり、腕金吊水平材に対するものではない。腕金吊水平材に対しては、静的荷重に対する効果が確認されている「腕金釣合方式」による補強³⁾が実施されているが、この補強方式による鉄塔の動特性への影響などは十分には検証されていない。

本論は、上記の腕金吊水平材の応力負担を低減するために開発した「腕金釣合方式補強」による鉄塔の動特性への影響と強風下におけるその補強効果を検証した。

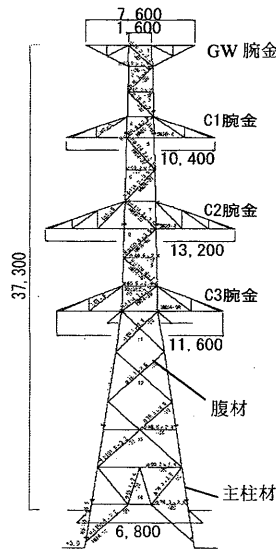


図1 補強対象鉄塔図

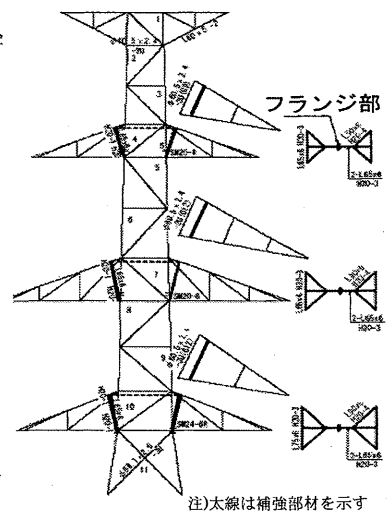


図3 鉄塔補強位置

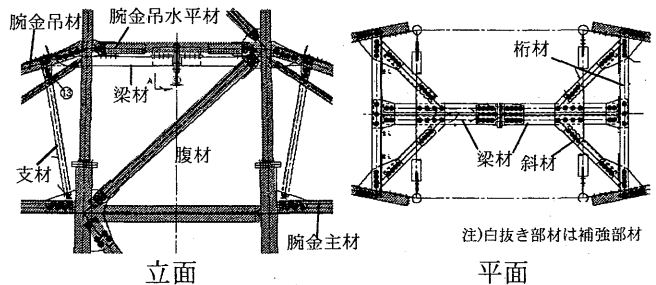


図2 補強部材詳細図

*1 都市共生デザイン専攻 修士課程

*2 日本鉄塔工業株式会社

*3 都市・建築学部門

2 対象鉄塔と補強方法

2.1 補強対象鉄塔

補強を実施した鉄塔を図1に示す。鉄塔は高さ37.3mの耐張型鉄塔で、C1、C2、C3腕金部の水平長がそれぞれ10.4、13.2、11.6mである。支柱材と斜材・腹材は中空鋼管、腕金部はアングル材である。腹材は最上部からC3腕金接合部まで斜材1本で、それ以降は斜材2本で構成されている。また腕金吊水平材はφ60.5×2.4の鋼管である。

2.2 腕金釣合方式補強の概要

挿入した補強部材を図2に白塗りで示す。補強箇所はC1、C2、C3腕金部である。補強部材は、塔体内の腕金吊水平材応力のいわばバイパスを目的とし、腕金吊材に桁材と斜材を接合し、それらに梁材を接合して左右の腕金吊材の間の応力を吊水平材と共に分担する構造としている。補強梁材はアングル材L65×6を2つT字型に重ね合わせたものである。また支材を腕金主材と支柱材の接合位置にあるガセットプレートに接合している。部材はすべてボルト接合である。補強部材の挿入位置を図3中の太線（水平材は破線）で示す。

3 単独鉄塔の振動特性

3.1 対象鉄塔と補強部材のモデル化

補強部材による送電鉄塔本体の振動特性への影響を明らかにするため、送電線部を取り付けていない単独鉄塔のモデルを使用する。補強前後の鉄塔部の解析モデルを図4に示す。塔体モデルを梁要素で組み立て、部材接合部に質量を集中させた。接合条件は図5に示すように、支柱材間の接合と、交差する腹材のうち部材の連続部分を剛接合とし、ボルト接合の位置をピン接合としている。

図6に補強部材モデルを示す。補強部材モデルでは、補強部材による部材振動モードへの影響を詳しく検証するため、要素分割数を増やした。また、2.1で述べたように補強部材は複数本のボルトで接合されているものの、その接合部剛性が不明であるため、補強後のモデルは補強部材のフレーム部をピン接合とした場合と剛接合とした場合の両方で検討を行う。剛接合では全要素を剛接合としてあり、ピン接合では構成材を梁要素で分割し、その端点をピン接合とした。また、これまでの実測結果⁴⁾を考慮して、減衰定数は塔体の全振動モードに一律1%を設定した。

3.2 固有値解析による検証

単独鉄塔モデルについて実施した固有値解析により得られた各モデルの固有周波数を表1に示す。表中「補強部材振動モード」は補強部材フレーム部の卓越振動モードに着目したものである。主要な固有モードを図7に示す。塔体全体の振動モード形状の場合、補強前、補強後ピン接合、補強後剛接合ともに固有周波数に大きな差は見られない。また、18Hz以上では腕金のみが振動するモ

ードが見られるが、このときの固有周波数は補強前後ともほぼ等しい。

補強部材が卓越するモードでは、ピン接合と剛接合で大きな差が見られ、剛接合に比べてピン接合の場合の固

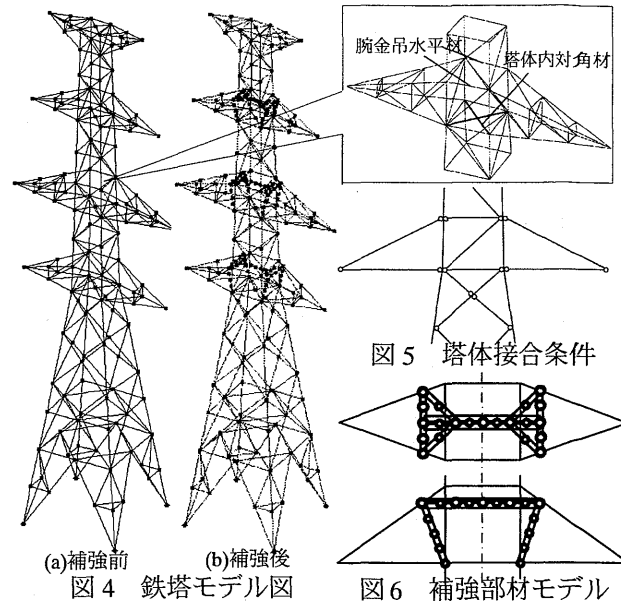


表1 固有値解析結果

固有モード	固有周波数(Hz)		
	補強前	補強後 (ピン)	補強後 (剛)
塔体曲げ 線路直角方向_1次 図7(a)	2.4	2.3	2.3
塔体曲げ 線路方向_1次 図7(d)	2.4	2.3	2.3
塔体捻り_1次 図7(f)	5.1	5.0	5.0
塔体曲げ 線路直角方向_2次 図7(b)	7.1	6.9	6.9
塔体曲げ 線路方向_2次 図7(e)	7.4	7.0	7.1
塔体捻り_2次	11.3	11.2	11.2
塔体曲げ 線路直角方向_3次 図7(c)	12.9	12.7	12.7
塔体曲げ 線路方向_3次	13.8	15.3	13.4
塔体捻り_3次	16.0	15.9	15.9
塔体曲げ 線路直角方向_4次	17.2	17.0	17.0
塔体曲げ 線路方向_4次	18.8	19.3	17.2
腕金振動			
GW腕金、C1腕金、線路方向振動 (逆位相)	18.7	18.6	18.7
C3腕金、線路方向振動 (左右非対称)	22.8	22.5	22.6
塔体内部材及び補強部材振動			
塔体内対角材上下振動 (C1のみ逆位相) 図7(g)	16.7	—	—
塔体内対角材上下振動 (同位相) 図7(h)	17.8	—	—
C1,C2,C3補強材及び塔体内対角材上下振動 (C1のみ逆位相) 図7(j)	—	—	16.1
C1,C2,C3補強材及び塔体内対角材振動 (C1塔体内対角材のみ逆位相) 図7(i)	—	16.8	—
C1,C2,C3補強材及び 塔体内対角材上下振動(同位相) 図7(k)	—	17.6	18.4
C3補強材_上下振動(左右対称)	—	5.9	11.6
C2補強材_上下振動(左右対称)	—	6.7	13.3
C1補強材_上下振動(左右対称)	—	8.7	17.1
C1、C2補強材_線路方向振動 (同位相)(左右対称) 図7(l)	—	16.2	—
C2,C3補強材_線路方向振動 (同位相) 図7(m)	—	—	19.9

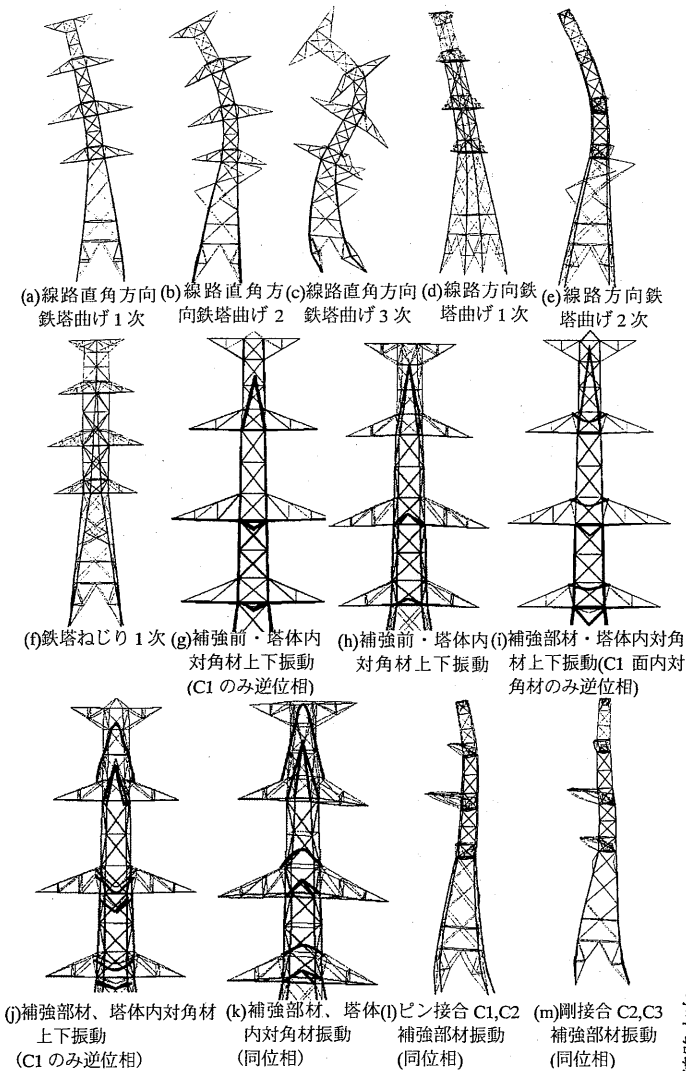


図7 固有モード図

有周波数がきわめて小さくなっている。

3.3 周波数応答特性の解析

周期外力を受ける鉄塔の周波数応答関数を算出し、C2腕金先端変位のゲインとC2腕金吊水平材の軸力ゲインを検討する。

3.3.1 設定外力

鉄塔の作用荷重は送電線部の風荷重が支配的であるので、外力を付加する位置を送電線支持部であるC1、C2、C3の各腕金の先端とし、種々向きを変えて1kNの周期外力を付加することにより周波数応答特性を調べた。ここでは図8に示す荷重条件で検討を行った。

3.3.2 腕金先端変位に関する周波数応答特性

周波数応答解析によって得られたC2腕金先端変位のゲインを図9に示す。C1～C3腕金吊水平材軸力の周波数応答ゲインはほぼ同様の傾向を示す。以下ではC2に関する結果を示す。変位は加振方向のものである。

図9より、いずれの加振条件のときも、補強後の変位ゲインの大きさは補強前とほぼ同じか、もしくは小さい値を示していることがわかる。図9(d)の鉛直加振時では剛接合のみピークの位置にずれが生じている。このピー

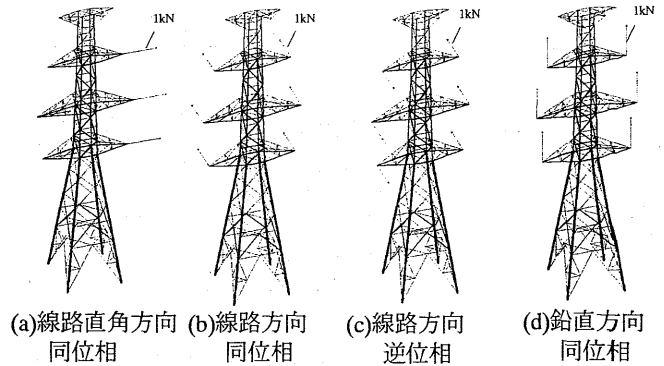


図8 荷重条件

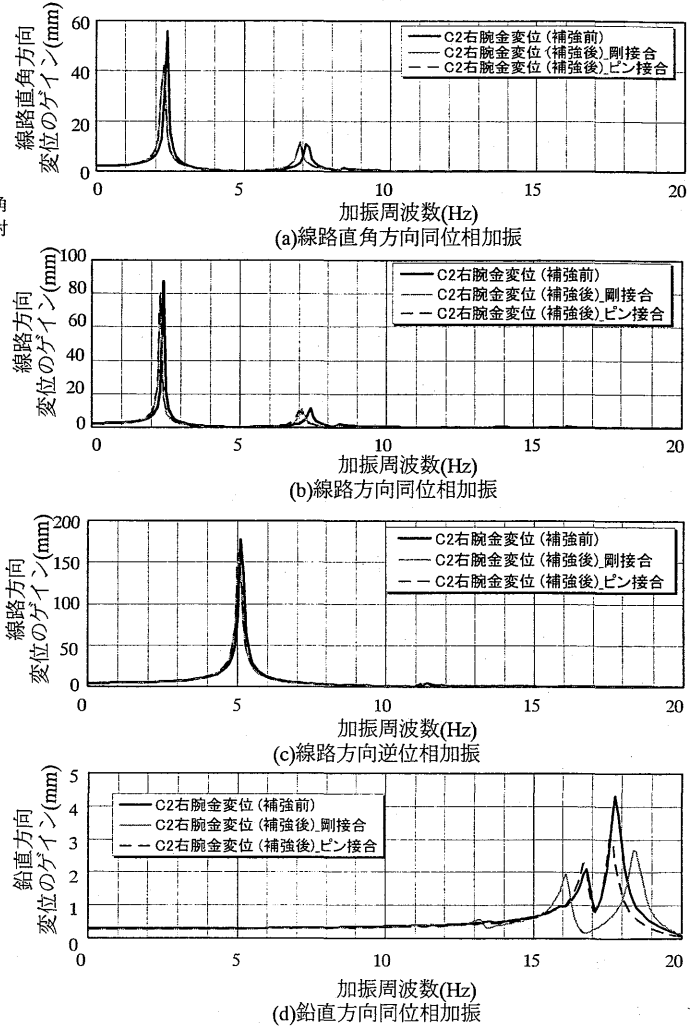


図9 腕金先端変位のゲイン (C2右腕金部)

クは、補強前では16.7Hzと17.8HzともにGW、C1、C2の塔体内対角材(図4)の上下振動モード(図7(g),(h))で、補強後のものは補強梁材および塔体内対角材の上下振動モードである(ピン接合: 図7(i),(k)、剛接合: 図7(j),(k))。前節に示すように補強部材の接合方法で異なるため、振動モードの固有周波数にこのようなピーク位置の差が生じると考えられる。

3.3.3 腕金吊水平材軸力に関する周波数応答特性

周波数応答解析によって得られた各加振状態での腕金吊水平材(図3)軸力のゲインを図10に示す。腕金先端変

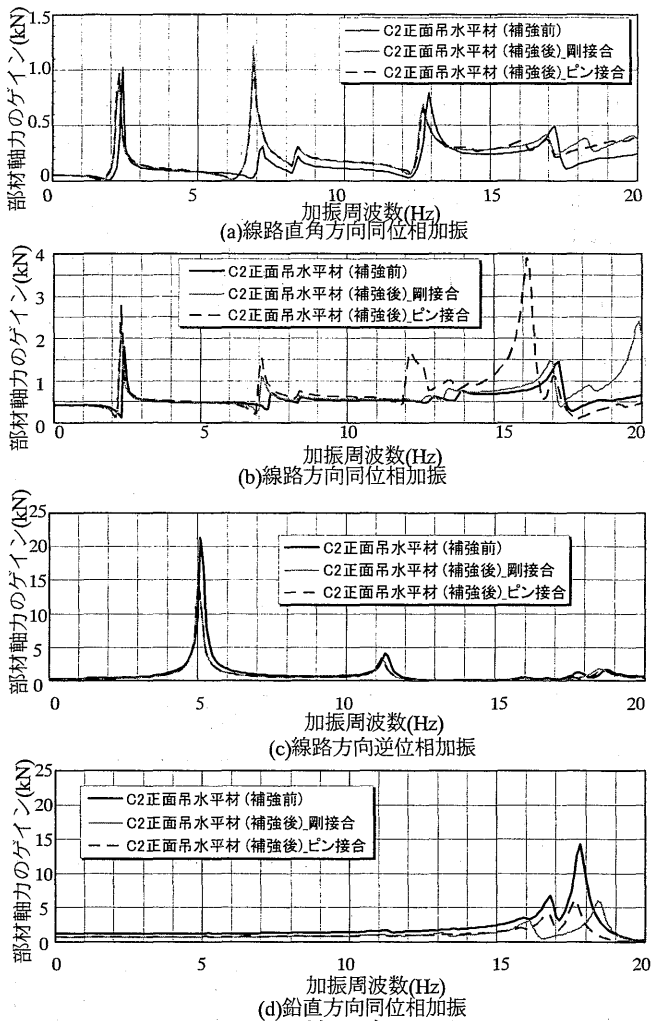


図 10 軸力ゲイン

位の周波数応答特性の場合と同様に、C1～C3 腕金吊水平材軸力の周波数応答特性はそれぞれ同じような傾向を示すため、ここでは C2 腕金に関するものを表示する。

線路直角方向同位相加振(図 10(a))の 2.3Hz 付近のピークは線路直角方向鉄塔曲げ 1 次モード(図 7(a))で、12.7Hz 付近は線路直角方向鉄塔曲げ 3 次モード(図 7(c))である。これらの場合は補強部材を付加したことにより軸力のゲインが多少低減されているが、その効果は小さいといえる。6.9Hz 付近での線路直角方向鉄塔曲げ 2 次モード(図 7(b))では補強部材を付加したことにより腕金吊水平材の軸力ゲインが増大している(図 10(a))。この荷重条件では補強部材の剛接合とピン接合での違いは見られない。

線路方向同位相加振(図 10(b))の場合の 2.3Hz に見られるピークは線路方向鉄塔曲げ 1 次モード(図 7(d))で、7.3Hz でのピークは線路方向鉄塔曲げ 2 次モード(図 7(e))である。このときの補強後の吊水平材軸力ゲインは補強前のものより大きい値を示す。5Hz 以内の低周波数域で、補強後の軸力ゲインが大きくなったのはこの加振条件の 2.3Hz に見られるピークだけである。また、この線路方向同位相加振では 16.2Hz でピン接合補強の場合のみに大きいピークがみられ、19.9Hz では剛接合補強の場合のみ

にピークが見られた。これらの振動モードは、16.2Hz のピークでは C1、C2 補強部材の線路方向振動(図 7(l))で、19.9Hz では C2、C3 補強部材の線路方向振動(図 7(m))である。

線路方向逆位相加振(図 10(c))での、5Hz 付近に見られるピークは全加振ケースでの軸力ゲインのうち最も大きな値を示している。このときの振動モードは鉄塔ねじり 1 次モード(図 7(f)) であるが、このピークでの軸力ゲインは、補強部材によって約 2/3 に低減されていることが確認できる。なお、このときの補強部材の接合方法での差は見られない。

鉛直方向加振時に見られるピーク(図 10(d))は同方向加振時における変位のゲインと同様のもので、補強後のピークは C1、C2、C3 補強部材と対角材の上下方向振動モードで、補強前は塔体内対角材の上下振動モードである。これらのピークでは補強部材による軸力の低減効果が確認できる。また 0Hz のとき、すなわち静的に荷重を付加した場合の軸力ゲインは、他の加振条件に比べて大きな値を示すが、このときの腕金吊水平材軸力は補強前に比べて補強後は約 2/3 に低減されていることが確認できる。

4 鉄塔—送電線連成系の風応答特性

鉄塔—送電線連成系のモデル化を行い、静的釣合解析とスペクトル応答解析、時刻歴応答解析を行い補強部材の強風下での補強効果を検証した。

4.1 連成系モデル概要

以下では図 11 に示すように、補強鉄塔を含む 4 基 3 径間を含めた鉄塔—送電線連成系モデルを使用して強風下での補強効果を検証する。

鉄塔には送電線 6 本と地線 2 本の計 8 本の架渉線が接続されている。今回用いた架渉線の諸元と配置を表 2 と図 12 に示す。補強鉄塔に隣接する老番側の鉄塔は懸垂型鉄塔であるが、耐張型鉄塔であるその他の鉄塔が電線支持に対して剛性が高いものと見なせることから、最外縁部の両鉄塔を剛体として解析した。補強鉄塔は耐張鉄塔であるので送電線を直接腕金先端で支持している。懸垂鉄塔では、懸垂がいしのモデル化を行いその下部に送電線を接続した。架渉線の諸元は表 2 と同じである。

補強鉄塔と隣接する耐張型鉄塔とは 122.7m の高低差がある。連成系モデルでは、主として 1 次周波数に着目するものとして減衰を剛性比例型とし、減衰定数は実測結果を考慮して、鉄塔部には単独鉄塔の 1 次固有周波数で 1%⁴⁾、送電線部では送電線の 1 次固有周波数で 0.4%⁵⁾ とし、強風下で増大する送電線部の減衰特性を応答計算時に算入した。また C1～C3 腕金吊水平材には補強梁材中央部のボルト締め付けによりプレテンションが導入されており、それぞれ約 20kN の圧縮軸力を導入した。これは鉄塔—送電線連成系の自重釣合時に腕金吊水平材軸力が 0kN となるように設定するためである。

4.2 風速場の概要

平均風速、乱れの強さ、乱れのスケールの鉛直分布はベキ指数則を用い、地表面粗度区分Ⅱ⁶⁾として設定した。ただし基準風速はJEC(電気学会電気技術調査会標準規格)⁷⁾にもとづいて設定し、基準風速は基準高度 10m で 35.9m/s である。

強風応答解析にはスペクトル応答法を用い、風向 0° ~ 330° まで 30° 刻みの 12 方向に対して実施した。風向角は図 11 に示すとおりである。

4.3 平均風力に対する部材軸力の応答

平均風速による風力を静的に鉄塔—送電線連成系モデルに作用させた場合の腕金吊水平材軸力の値と補強部材による軸力低減率をそれぞれ図 13 と図 14 に示す。C1~C3 腕金吊水平材軸力はほぼ同様の傾向を示すため、ここでは C2 腕金に着目する。図 14 からわかるようにピン接合、剛接合いずれの場合でも補強部材を付加することにより、平均で約 90% 軸力を低減する効果が見られる。接合方法による腕金吊水平材軸力の低減効果の差異はほとんど見られない。また、図 13 より、低減された軸力は約 40kN であるため、軸力の低減はプレテンション導入による低減だけではなく、補強部材が軸力を負担したことによる効果も確認できる。

4.4 変動風力に対する部材軸力の動的応答

カルマン型のスペクトル特性をもつ変動風速に対する動的応答軸力の最大値をスペクトル応答法により算出した。評価時間 600 秒で、計算周波数範囲を 0~10Hz(0.001Hz 刻み)とし、風向は静的の場合と同様に風向を 12 方向に変化させ検討した。この場合の腕金吊水平材の最大軸力と補強部材による最大軸力の低減率をそれぞれ図 15 と図 16 に示す。静的状態の場合と同様 C2 腕金に着目する。図 16 より、ピン接合と剛接合のいずれの場合でも補強部材を付加することにより最大軸力を平均で約 70% 低減する効果がある。接合方法による腕金吊水平材軸力の低減効果の差異はほとんど見られない。図 13 と図 15 を比較すると、静的荷重作用時比べて動的荷重作用時には腕金吊り水平材の軸力の増大が顕著であるが、いずれの荷重作用時も補強前後での軸力低下の大きさはほとんど差が見られない。すなわち、本手法での補強部材は変動風荷重に対する補強効果は小さいと言える。

4.5 腕金吊水平材軸力のパワースペクトル

スペクトル応答法により得られた腕金吊水平材軸力のパワースペクトルを図 17 に示す。これより変動軸力の周波数成分は 2Hz 以下が支配的であることがわかる。3.2 節で得られた鉄塔振動モードの固有周波数は 2.3Hz 以上に現れることから、強風下において塔体の振動モードは腕金吊水平材軸力に大きく影響しないと言える。

同様に 3.2 節で得られた周波数応答特性ではピン接合と剛接合の違いにより腕金吊水平材軸力の差異がみられ

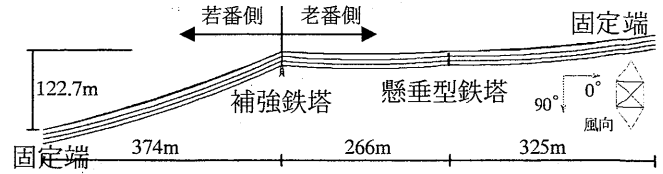


図 11 鉄塔—送電線連成系モデル立面図

表 2 架渉線の諸元

	地線1	地線2	送電線
ヤング係数[N/m ²]	1.16 × 10 ¹¹	1.29 × 10 ¹¹	8.20 × 10 ¹⁰
断面積[m ²]	1.53 × 10 ⁻⁴	1.57 × 10 ⁻⁴	9.62 × 10 ⁻⁴
単位長さ質量[kg/m]	0.71	0.94	3.35
風力抵抗係数	1.05	1.05	1.00
単位長さ受風面積[m ²]	0.02	0.02	0.06
弛度[m]	径間1	8.08	9.84
	径間2	3.65	4.65
	径間3	5.45	6.95

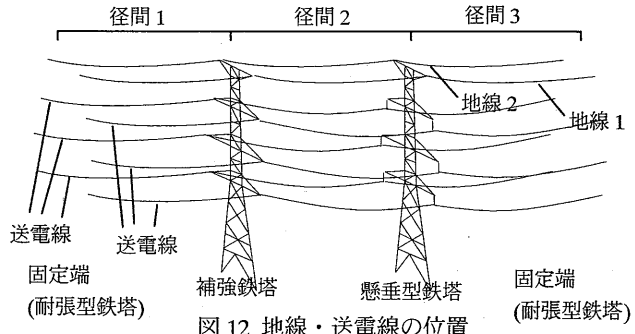


図 12 地線・送電線の位置

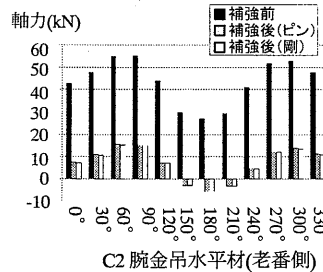


図 13 静的荷重重作用時の角度別腕金吊水平材軸力

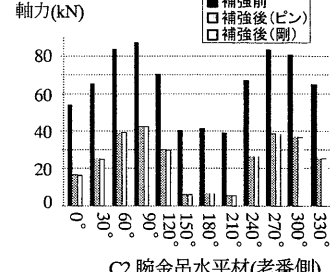
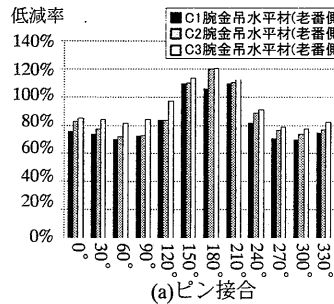
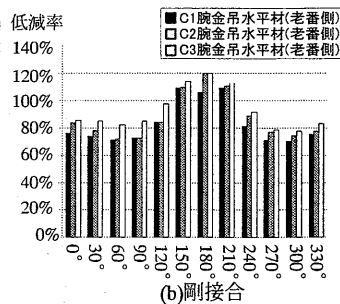


図 15 動的風応答における角度別腕金吊水平材の最大軸力

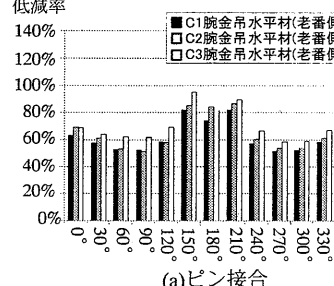


(a)ピン接合

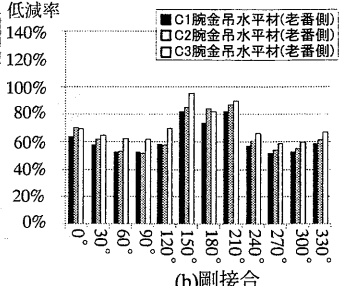


(b)剛接合

図 14 補強による腕金吊水平材軸力の低減率 (静的風荷重作用時)



(a)ピン接合



(b)剛接合

図 16 補強による腕金吊水平材最大軸力の低減率 (動的風荷重作用時)

たのは5Hz以上の周波数であることから、補強部材の接合条件がピン接合の場合と剛接合の場合で軸力低減効果には大きな差がないことが分かる。また、強風下における軸力のパワースペクトルが大きい2Hz以下の周波数域に着目して3.3節で得られた周波数応答特性をみると、鉛直方向荷重の場合は軸力のゲインが補強によって約2/3に低減されているが、線路直角方向および線路方向ではほとんど低減効果が見られない。4.4節で補強部材が軸力の変動成分には低減効果が小さいことを示したが、これは変動風荷重の方向がほぼ線路直角方向であるためと判断できる。

4.6 時刻歴応答解析

本節では、変動風速に対する時刻歴応答解析を行い、上述のスペクトル応答法による結果と比較する。解析はNewmark β 法 ($\beta=1/4$)を用い、時間刻み0.01秒、解析長さ600秒とし、変動風速をAR次数200のARモデルにより生成した。図18に風向90°におけるC2腕金吊水平材軸力のスペクトル応答解析結果と時刻歴応答解析結果を示す。C2腕金吊水平材若番側では平均値、最大変動、最大値のすべての値で、スペクトル応答解析値と時刻歴応答計算値できわめて近い値を示している。C2腕金吊水平材老番側では、スペクトル応答解析の結果が時刻歴

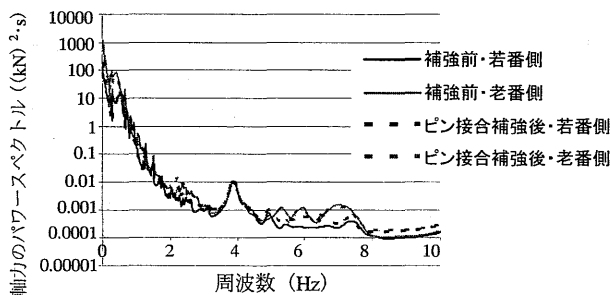
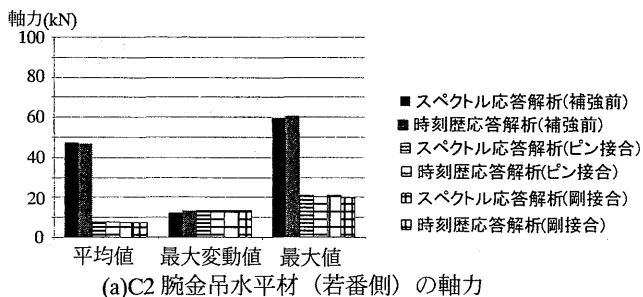
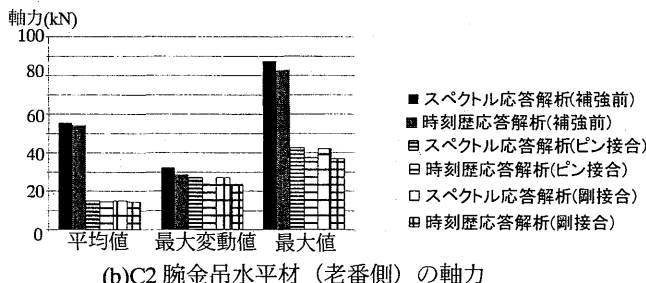


図17 腕金吊水平材軸力のパワースペクトル



(a)C2腕金吊水平材(若番側)の軸力



(b)C2腕金吊水平材(老番側)の軸力

図18 時刻歴応答解析結果とスペクトル応答解析結果の比較

応答解析の場合より多少大きな値となった。平均値、最大変動、最大値とすべての場合でその傾向が同じである。

5 結論

本論では「腕金釣合方式」による腕金部の補強による鉄塔全体と補強部周辺材への動的影響と、強風下における腕金吊水平材への軸力低減効果の検討を行った。得られた所見を以下に示す。

- (1)補強部材を付加することによる塔体本体の振動特性への影響はほとんど見られない。
- (2)補強部材を付加することにより、加振方向や加振周波数によっては腕金吊水平材軸力のゲインが増大する場合があるが、総体的には腕金吊水平材の応力負担軽減の目的を達成している。
- (3)10Hz以上の周波数域では補強部材のピン接合か剛接合かの接合形態で、周期外力に対する部材軸力低減効果に差が見られる場合が多く、線路方向同位相加振の場合にその影響が顕著である。
- (4)鉄塔—送電線連成系の動的強風応答では、補強部材は主に平均風力に対して腕金吊水平材軸力を低減する効果があるが、変動風荷重に対する低減効果は小さい。
- (5)「腕金釣合方式」補強部材による腕金吊水平材軸力の低減効果は、平均風速による静的風荷重の場合の軸力に対しては約90%、動的風荷重の場合の最大軸力に対しては約70%確認できた。

謝辞

本研究は、H21年度建築学会九州支部委託研究「送電鉄塔補強部材の強風応答特性に関する研究」の支援を得ました。

参考文献

- 1)松永稔他：送電用中空鋼管鉄塔支柱材の耐風補強工法，第16回風工学シンポジウム論文集，pp.477-482，2000年
- 2)中原佑他：金具締め方式による送電鉄塔腕金吊材取付部の支柱材補強方法に関する考察，日本建築学会研究報告九州支部第46号・1 構造系，pp.229-232，2007年
- 3) Y. Ajiro, J. Maeda et al : Some Effects of Non-balanced Tension of Conductors on the Wind Loads of a Strain-type Transmission Tower, Procs. of 17th Conf of the Electric Power Supply Industry, CD-RM, 2008
- 4) 漆原育男他：特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究，日本風工学会誌，pp.129-140，2000年
- 5)岩間貴行他：地震時における電線・がいし系の振動特性と鉄塔との連成系の振動特性に関する研究，鉄塔No.53，pp.39-61，1982年
- 6)日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2004年
- 7)電気規格調査会：電気学会電気規格調査会標準規格JEC127 送電用支持物設計標準，1979年

(受理：平成22年6月10日)