九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

鉄塔・電線連成系の実機振動試験データによる動的応答解析コードの精度検証

首藤, 康之
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門受託研究員

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/10.15017/26768

出版情報：都市・建築学研究. 22, pp.57-64, 2012-07-15. 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：

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第22号，2012年7月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.22, pp. 57～64, July. 2012

鉄塔・電線連成系の実機振動試験データによる動的応答解析コードの精度検証

Comparison Coupled Vibration Test of Transmission Tower and Numerical Results using Dynamic Analysis Program

首藤康之*，前田潤滋**
Yasuyuki SHUTO and Junji MAEDA

Generally, a transmission tower is designed statically based on Japanese civil standard: Design Standard on Structures for Transmission, JEC127-(1979). However a special tower, e.g. very high tower and a tower under gusty wind, is designed dynamically using dynamic response analysis. For suitable dynamic design, it is important that the analysis results and actual phenomena are consistent.

In this paper, we compared vibration test results of an actual transmission tower and these numerical results using dynamic analysis program. So, we confirmed that these results show same vibration characteristics. These results show availability of the dynamic analysis program for transmission tower design.

Keyword: *Transmission Tower, Vibration test, Vibration of coupling mode, Tension of transmission line, Nonlinear Analysis*
送電鉄塔，振動試験，連成振動，電線張力，非線形解析

1．序論

台風襲来頻度が高い九州地方の送電用鉄塔の設計にあたっては、台風時を想定した設計風速によって設計荷重が決定することが多い。このように台風を想定した設計を行うためには、送電用鉄塔の動的応答特性の把握、台風の風況特性の把握、さらには風の特性の中でも送電用鉄塔が多く建設される急峻な山岳地での局所的な風況把握などが必要である。これまで、様々な研究機関において、送電用鉄塔の合理的な設計に関する研究 [1)~4)]が盛んに行なわれており、鉄塔の動的風応答に関する課題の解明は進んできている。また、風況特性についても過去の風観測結果から一般地形における特性についての把握は進み、建築物荷重指針・同解説（2004）[5)]において一定の風荷重評価手法が示されている。

実際に建設される送電用鉄塔は、鉄塔毎に鉄塔高や結構、そして前後鉄塔までの距離である径間長が異なるとともに、地形条件に伴って送電線に作用する風況特性が大きく変化する。さらに、台風時の風況特性のうち超高圧送電線が多く建設される山岳地の風況については過去の実測 [6)]はあるものの、実測例が限られていることから未だ十分な解明がなされているとは言えず、現在示されている指針だけでは適切な風荷重評価は困難である。したがって、送電用鉄塔の設計基準 [7)8)]では、このような未確定要素は、所要安全率を定めることで対応している。この設計基準の想定範囲外となる塔高の高い鉄塔や架線条件が非常に厳しい鉄塔、そして地形条件の厳しい箇所については、設計者毎に一定の考え方に基づいた動的応答解析コードを用いて、想定した風荷重を入力条件とした解析を行い、その結果を用いて設計しているのが現状である。より適切な設計を行うためには、この構造解析コードによる解析結果と実際の設備に発生する荷重との整合性評価が重要となってくる。

本論では、有限要素法による非線形の汎用構造解析コード「ADINA」を用いた鉄塔・電線連成系の動的応答解析結果について、鉄塔実機を用いた強制加振試験結果との比較検証を実施し、解析コードの鉄塔設計への適用性評価を行ったので報告する。

2．実機を用いた鉄塔加振試験

2.1 試験鉄塔と送電線路の概要

図 1 に試験鉄塔およびその前後の鉄塔の概要図を示す。加振試験を実施した鉄塔 No.3 は 220kV 仕様の鉄塔で、鉄塔高は 64.5m である。以下、鉄塔 No.の小さい方

*　　都市・建築学部門　受託研究員
**　　都市・建築学部門

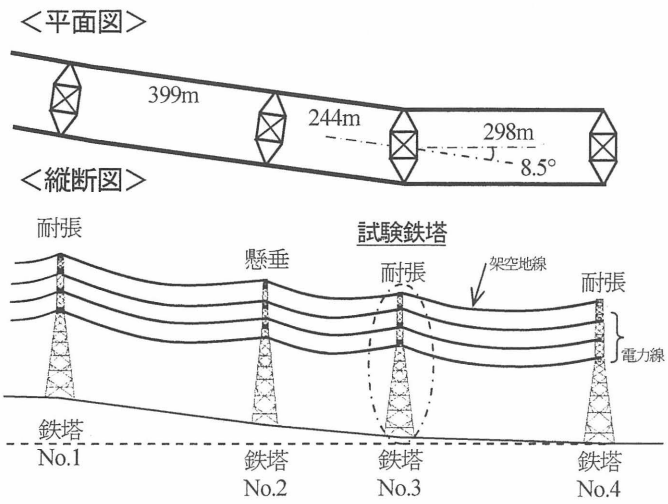


図1　試験鉄塔概要図

表1　架渉線緒元

項目	電力線	架空地線	
	1，2L	1L	2L
線種	NS-ACSR	NS-OPGW	NS-AC
断面積[mm²]	708.5	202.6	220.0
外径[mm]	34.2	18.9	21
単位質量[N/mm]	23.2	9.9	9.9
条数[条]	2	1	1
ヤング率[N/m²]	7.8×10^{10}	10.7×10^{10}	10.7×10^{10}
最大使用張力[N]	49,000	31,400	31,400

を若番側、大きい方を老番側という。各鉄塔の 4 本の主脚およびそれぞれ 4 つの主構面を構成するトラス部材には中空鋼管が用いられており、その他の部材には山形鋼が用いられている。鉄塔 No.1、鉄塔 No.3 そして鉄塔 No.4 は送電線の支持方式が耐張型であり、鉄塔 No.2 は懸垂型である。試験鉄塔は前後の鉄塔 No.2 と鉄塔 No.4 を挟んで水平角度 8.5°で配置されている。各鉄塔間の距離（径間長）は若番側から 399m、244m、298m であり、図に示すように若干の地盤高低差を有している。本設備は、現在電力の供給に用いていない遊休資産（事業外設備）であるため、送電線終端部となる鉄塔 No.4 では架渉線が切断されており、鉄塔で架渉線を完全に引留めている状態である。

架渉線の緒元を表 1 に示す。ここで、図 3 に示すように、若番側から老番側に向かって右側を 1 号線（1L）、左側を 2 号線（2L）とする。架空地線は 2 相（1 条/相）、電力線は 6 相（2 条/相）である。架空地線は低風音型光ファイバ内蔵型アルミ覆鋼より線 200mm²（NS-OPGW200）と低風音型アルミ覆鋼より線 220mm²（NS-AC220）、電力線は低風音型鋼心アルミより線 610mm²（NS-ACSR610）を用いている。架渉線は、送電線の設計基準に基づき風速 40m/s の時に、架渉線の最小引張荷重に対する所要安全率を満たすように、さらに鉄塔の前後径間の張力がバランスするように架線している[7)9)]。

2.2 計測方法

試験鉄塔の写真を図 2 に、計測機器の配置を図 3 にそして試験に用いる計測機器及び計測内容を表 2 に示す。C1 上部に架台を用いて、自転車ペダル駆動方式を持つ反転同期型起振器である起振器「YUSURU」[10)]を設置し、この起振器により線路方向と線路直角方向（図 4 参照）の 2 方向に加振することで、塔頂変位及び張力変動を計測した。この

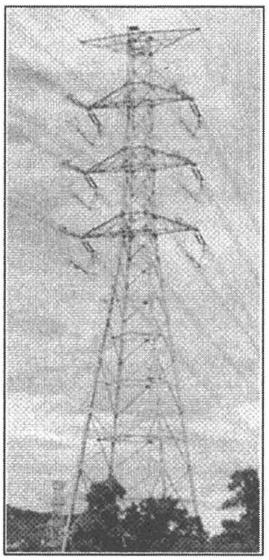


図2　試験鉄塔

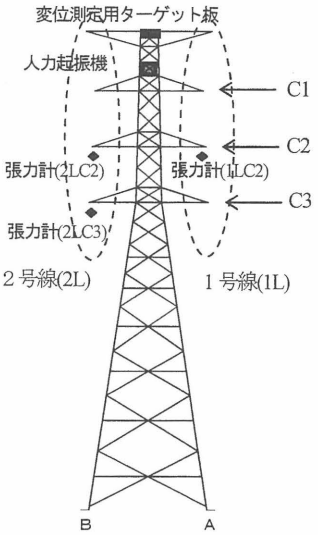


図3　計測機器の配置

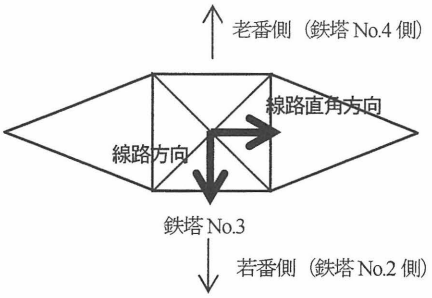


図4　加振方向

表2　計測機器一覧

計測項目	使用機器	数量	計測内容	備　考
張力	張力計	6台	電線の張力変動計測	電線 3 相に各 2 台設置
変位	変位計測システム	1組	鉄塔頂部の 2 方向変位の計測	塔頂部にﾀｰｹﾞｯﾄ板，地上に CCD ｶﾒﾗを設置
その他	記録装置	一式	計測データの記録	地上に設置
	起振機	一式	加振装置	C 1 上部に設置

「YUSURU」は設定した周波数及び加振振幅の調整が容易であり、加振力をある程度調整することが出来る。鉄塔の変位計測用として、塔頂部にターゲット板を設置し、地上部に設置したCCDカメラによりそのターゲット板の挙動を計測した。また、加振時の張力変動は、1号線中線（1LC2）、2号線の中線と下線（2LC2、2LC3）のそれぞれ若番側と老番側に張力計を設置し計測した。

地上からの計測開始の合図とともに YUSURU にて強制加振させ、目標の加振周波数に達するまで 1 分間程度加振し、加振力を一定に保った状態で2~5分間連続計測した後、加振を停止し約3分間自由振動計測を行った。

2.3 鉄塔加振による構造特性の把握

加振周波数は試験実施前に計測した台風時の観測データのうち、塔頂部の加速度波形をスペクトル解析することにより算出した鉄塔の卓越周波数より求めた。加振試験から得られた固有周波数と減衰定数を表 3 に示す。これらは、鉄塔の減衰振動状態の塔頂加速度波形を用いて算出しており、固有周波数は FFT 法によるフーリエスペクトル、減衰定数は RD 法により算出した。また加振試験時の風況は無風状態であった。

線路直角方向と線路方向の減衰定数にばらつきがみられるのは、試験鉄塔が耐張支持型鉄塔で水平角度が約 8.5°あることから、線路直角方向についても架渉線の影響を塔体が強く受けるためと考えられる。なお、塔頂変位や架渉線張力の試験結果については、時刻歴応答解析結果とあわせて第４章にて報告する。

表３　加振ケース及び試験結果一覧

加振方向	YUSURU		試験結果		塔体振動モード
	加振力	加振周波数	固有周波数	減衰定数	
	(N)	(Hz)	(Hz)	(%)	
線路直角方向	1855	1.3	1.3	0.9	1次モード
線路方向	1806	1.4	1.4	0.4	1次モード

３．鉄塔-電線連成系モデルを用いた解析

3.1 解析モデル

有限要素法による非線形の汎用構造解析コード「ADINA」を用いて、図 5 のように第２章の加振試験を行った鉄塔と送電線をモデル化し、同条件にて時刻歴動的応答解析を行った。

モデルは鉄塔 No.1～鉄塔 No.4 までの 4 基 3 径間とした。試験鉄塔 No.3 に隣接している鉄塔 No.2 が懸垂支持型鉄塔であるため、若番側で耐張支持型である鉄塔 No.1 までをモデル化の範囲とした。鉄塔は実際の鉄塔構造と構成部材に合わせた立体ビーム要素とし、架渉線はリンク要素とした。また、実設備には架渉線と鉄塔との間に絶縁用のがいしを設置しているため、がいし要素も付加している。架渉線は径間毎に 30 分割、がいしは 4 分割とした。なお鉄塔 No.1 には、実際にはその若番側にも架渉線が接続されているため、鉄塔 No.1 の若番側には設計上の無風時水平張力を静的に常時載荷した。

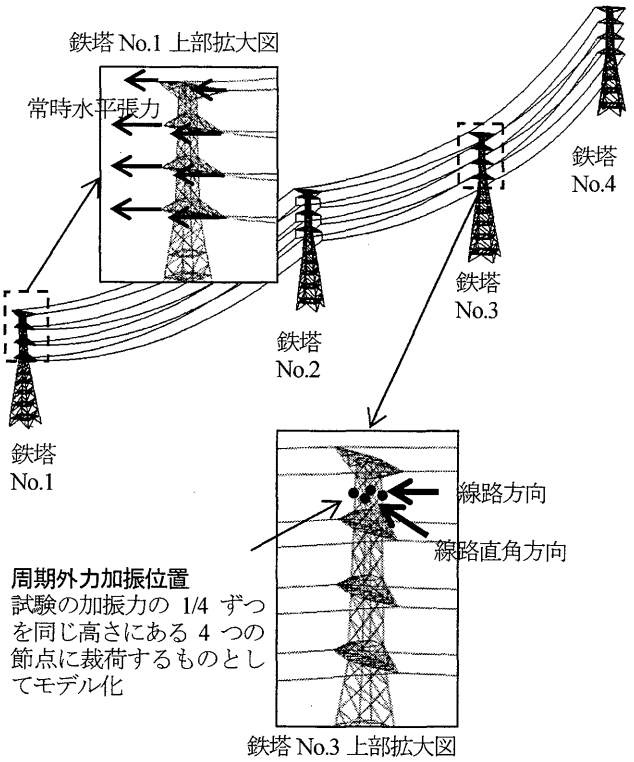


図５　解析モデル概要図

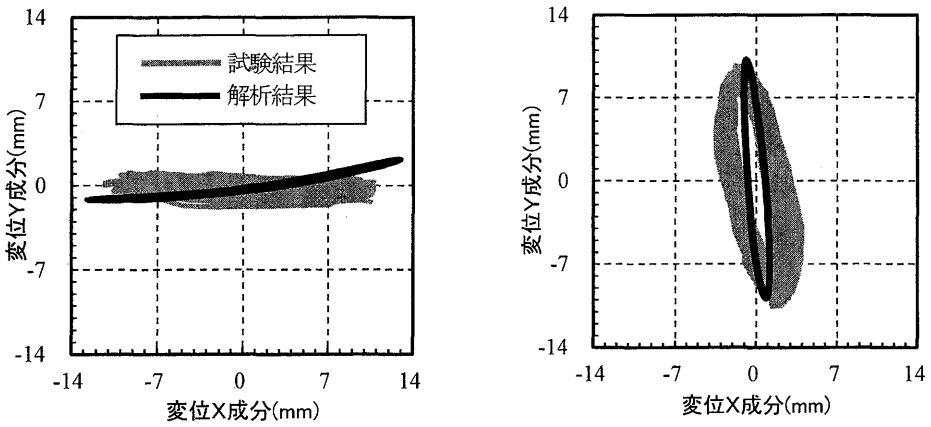
3.2 減衰の設定

減衰は剛性比例型として設定した。鉄塔の減衰定数は2.3節の加振試験によって得られた結果を用いて、線路直角方向では0.9%を、線路方向では0.4%を用い、同じく加振試験から得られた1次固有周波数に対して設定した。架渉線は、過去の試験結果 [11)12)]などから一般的によく用いられている0.4%を用い、同じく 1 次固有周波数に対して減衰定数を設定した。

風応答解析を行う際には、平均風速から定まる空力減衰力を設定する必要があるが、加振試験時にはほぼ無風状態であったため、今回の解析には空力減衰は設定していない。

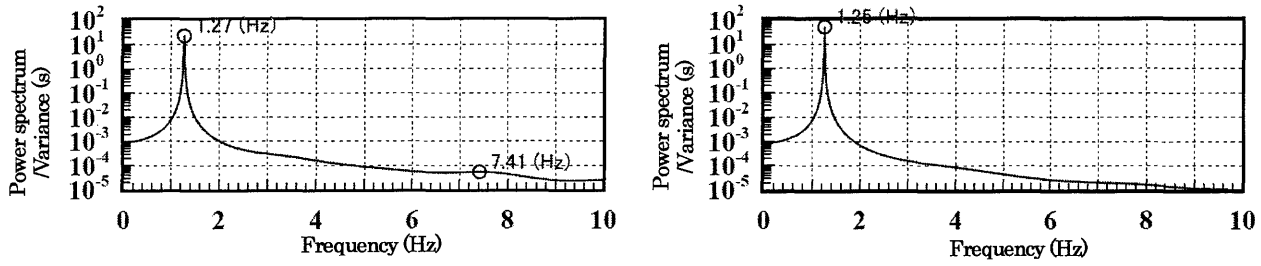
3.3 解析処理

加振試験時に人力起振器を設置したC1上部の4つの主脚の節点に周期外力を載荷した。加振力は 4 つの加振点にそれぞれ表 3 の加振力の 1/4 を与えた。加振周波数は、同じく表 3 の試験結果の固有周波数で設定した。また無風時を想定しているため風荷重は作用させていない。

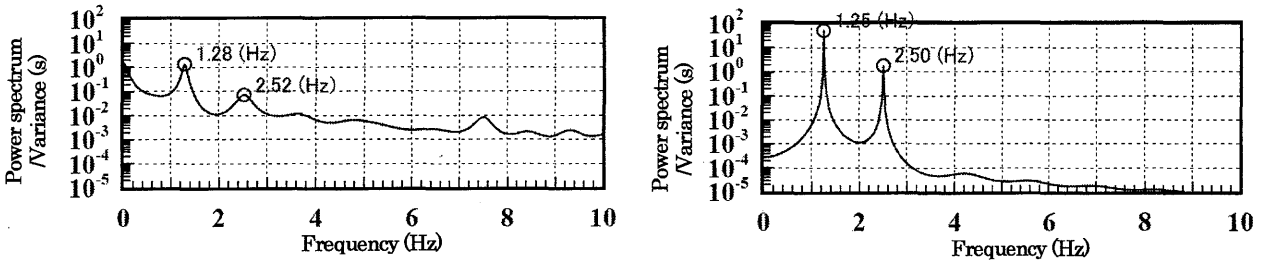


(a)　線路直角方向加振時　　(b)　線路方向加振時

図6　塔頂変位のリサージュ

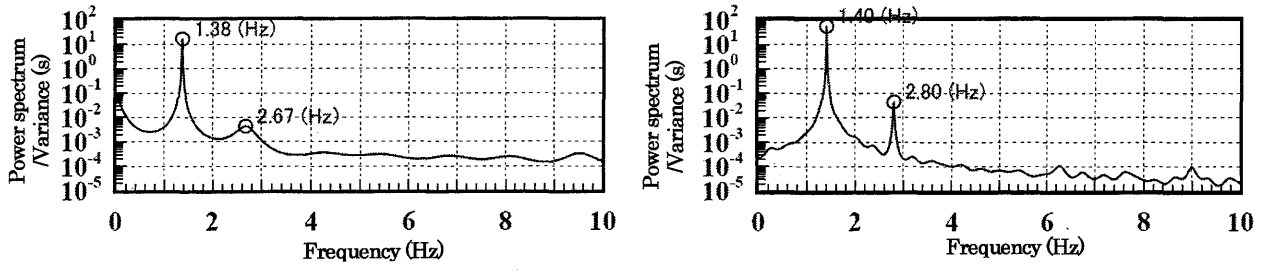


(a)　変位 X 成分（加振試験）　　(c)　変位 X 成分（解析）

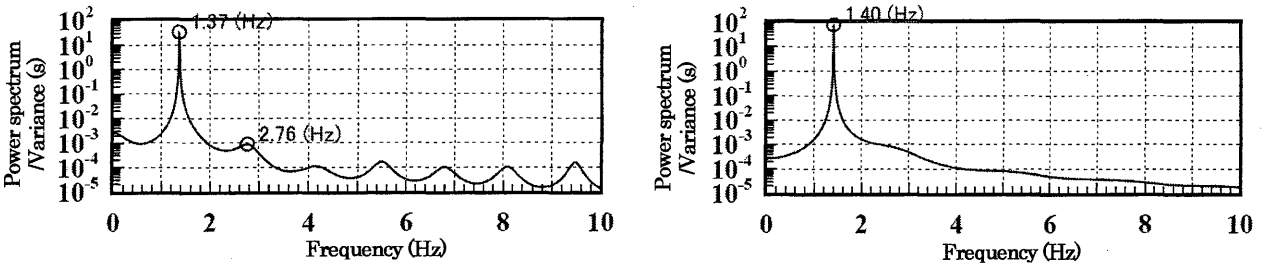


(b)　変位 Y 成分（加振試験）　　(d)　変位 Y 成分（解析）

図7　塔頂変位のパワースペクトル（線路直角方向加振時）



(a)　変位 X 成分（加振試験）　　(c)　変位 X 成分（解析）



(b)　変位 Y 成分（加振試験）　　(d)　変位 Y 成分（解析）

図8　塔頂変位のパワースペクトル（線路方向加振時）

最初に架渉線を含めたモデル全体の自重による静的釣合解析を実施した後、加振点に周期外力を載荷し、架渉線の幾何学的非線形を考慮した時刻歴応答解析を実施した。計算手法はNewmarkβ法（β=1/4）を用いた。計算ステップの時間刻みを0.01秒、計算時間は180秒とした。

4．検証結果

4.1 塔頂変位

(1) 変位量の評価

図6に塔頂変位のリサージュを示す。グラフ中心は加振前の塔頂中心点である。線路方向への変位を「変位Y成分」、線路直角方向の変位を「変位X成分」とする。

加振試験結果では、線路直角方向に加振した場合（図6(a)）は、X成分が±10mm程度、Y成分は±2mm程度であった。また、線路方向に加振した場合（図6(b)）は、変位X成分は±4mm程度、Y成分は±10mm程度であり、若干反時計回りに捻回する振動であった。これは、試験鉄塔に接続している架渉線が水平角度を有していることと、若番側と老番側で架渉線の張力が異なっていることが原因だと考えられる。

解析結果では、線路直角方向に加振した場合（図6(a)）は、X成分は±13mm程度、Y成分が±2mm程度となった。加振試験結果と比較すると、X成分は解析結果は加振試験結果を若干超過し、Y成分はほぼ同様の変位量となった。線路方向に加振した場合（図6(b)）は、X成分は±2mm程度、Y成分は±10mm程度となった。この場合、解析結果と加振試験結果はほぼ同等の変位量となった。さらに、反時計回りに捻回する傾向も同様に現れていた。

(2) 変位パワースペクトルの評価

図7に線路直角方向に加振した際の塔頂変位のパワースペクトルを示す。図7(a)と図7(b)の加振試験結果では、加振方向の線路直角方向であるX成分で加振周波数1.27Hzに一つのピークが見られる。線路方向のY成分では同じ1.28Hzと約2倍の周波数2.5Hzにピークが見られた。これは、鉄塔に接続されている架渉線が弦振動として整数倍の倍長振動をするためだと考えられる。それに対して、図7(c)と図7(d)でも同様に、X成分に約1.25Hzピークが、Y成分に同じく1.25Hzとその倍数の2.5Hzにピークが見られ、加振試験結果と解析結果とでほぼ同様の周波数特性が得られた。

図8に線路方向に加振した際の塔頂変位のパワースペクトルを示す。この場合には線路直角方向のX成分に加振周波数1.4Hz付近とその倍数の2.8Hz付近にピークが、加振試験結果及び解析結果の両方に現れている。また、線路方向Y成分では加振周波数1.4Hz付近に大きなピークが見られ、加振試験時のみその倍数の2.8Hz付近に若干のピークが得られる。解析結果ではこの2倍の周波数のピークはほとんど見られなかった。

4.2 架渉線の変動張力

図9に線路直角方向加振時の架渉線の変動張力のパワースペクトルを示す。加振試験から得られたパワースペクトルでは、加振周波数1.3Hz付近とその倍数である2.6Hz付近に突出したピークが見られた。これらは塔頂変位と同様に架渉線の弦振動の影響が現れているものと考えられる。さらに高周波領域にもいくつかのピークが現れているが、これは架渉線の弦振動としての高次の周波数やがいし及びがいし金具などの影響が現れたものと思われる。一方解析結果では、加振周波数1.3Hz付近とその倍数の2.6Hz付近のピークのみが顕著に現れており、高周波領域のピークは発生していない。

図10に線路方向に加振した時の架渉線の変動張力のパワースペクトルを示す。このケースでも線路直角方向加振時と同様に、加振試験結果では加振周波数1.4Hz付近とその倍数の2.8Hz付近に大きなピークが見られ、それよりも高周波数領域にもいくつかのピークが見られるが、解析結果では1.4Hzと2.8Hzの二つの大きなピークは再現できているものの、高周波数域ではピークは現れなかった。

架渉線の張力については様々な個所で検討が出来るように、試験鉄塔に対して若番側、老番側そして1号線側、2号線側など異なった箇所の6箇所の計測を行ったが、これら全ての箇所で同様の傾向が見られた。

5．結果評価

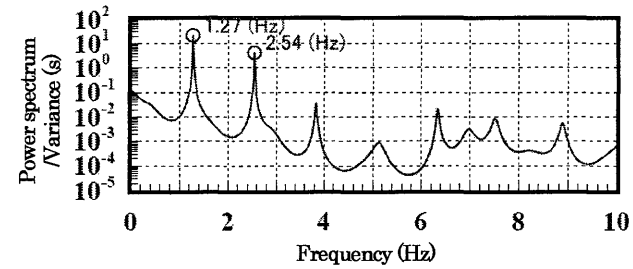
5.1 塔頂変位

塔頂変位量については、線路直角方向加振時の解析結果が加振試験結果を多少超過したものの、線路方向加振時も含めて概ね解析で再現できている。また、パワースペクトルについても同様の周波数でピークが見られていることから鉄塔の振動特性もほぼ正確に再現できている。

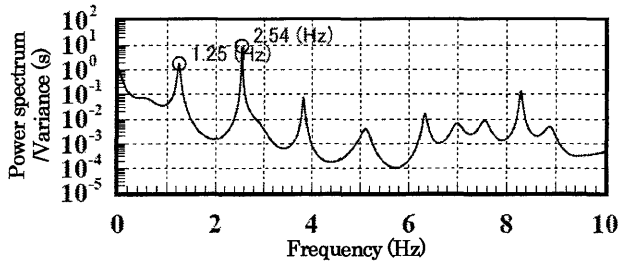
5.2 架渉線の変動張力

変動張力では、低周波数領域で同様の振動特性を得ることが出来たが、高周波数領域ではあまり再現性は得られなかった。解析上は鉄塔、架渉線そしてがいしのみをモデル化しているが、実際の送電線にはそれに付属しているがいし金具やその他付属品、さらには鉄塔のさまざまな付帯物が設置されており、それらの影響を正確にモデル化できていないためだと考えられる。

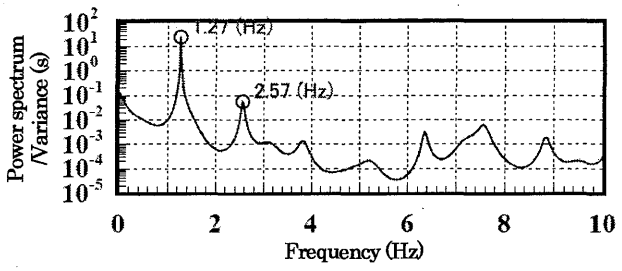
架渉線と鉄塔の連成系では鉄塔の特性、架渉線の特性そして様々な付帯物の特性などを含めて、広い範囲の周波数域に構造物としての振動特性が及ぶものの、その中でも低



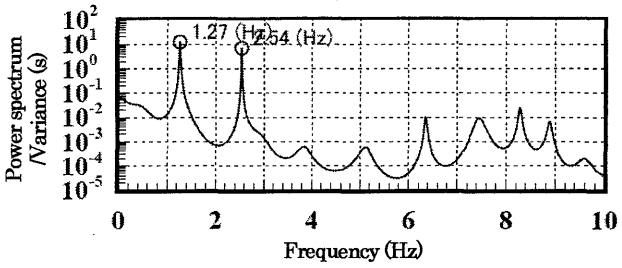
(a)　1LC2 若番側（加振試験）



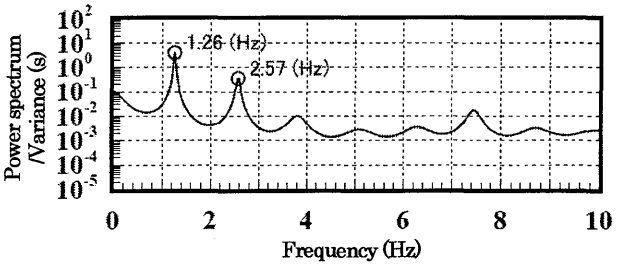
(b)　1LC2 老番側（加振試験）



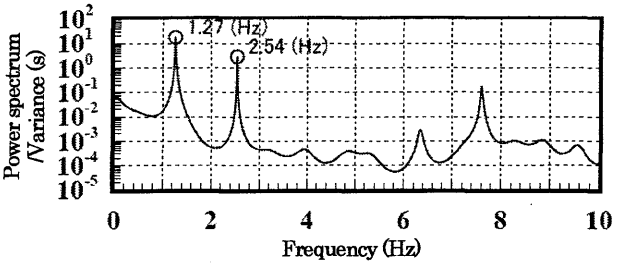
(c)　2LC2 若番側（加振試験）



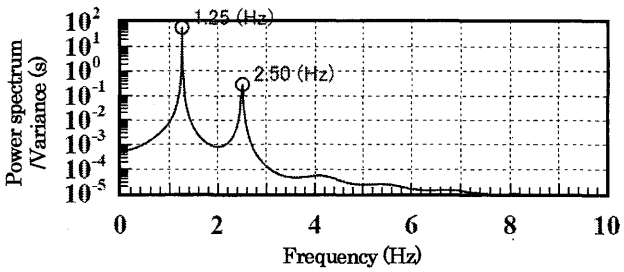
(d)　2LC2 老番側（加振試験）



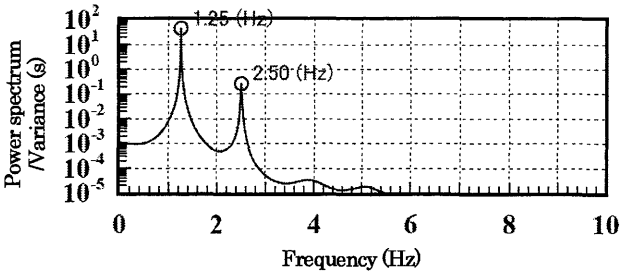
(e)　2LC3 若番側（加振試験）



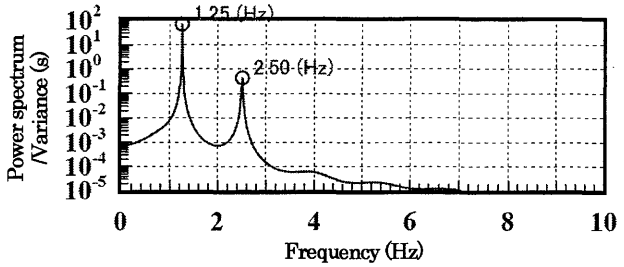
(f)　2LC3 老番側（加振試験）



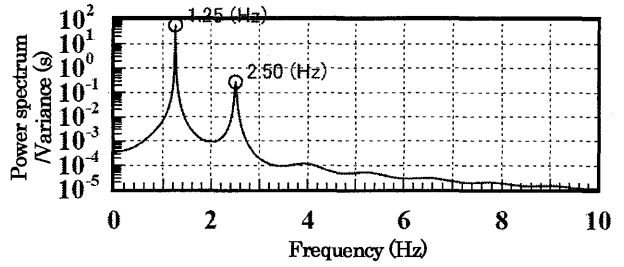
(g)　1LC2 若番側（解析）



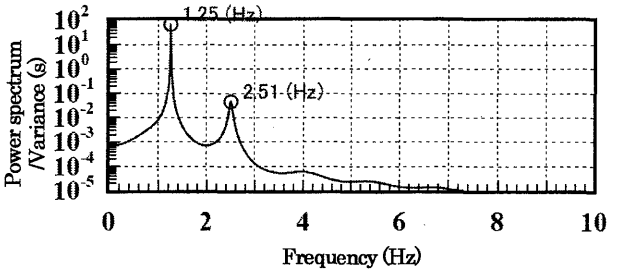
(h)　1LC2 老番側（解析）



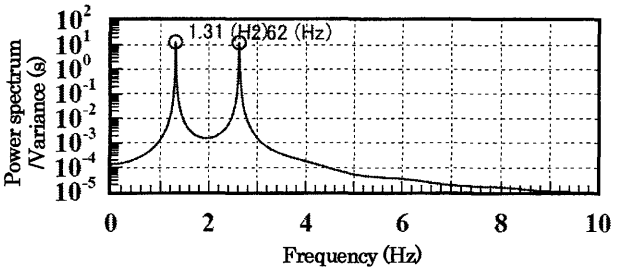
(i)　2LC2 若番側（解析）



(j)　2LC2 老番側（解析）

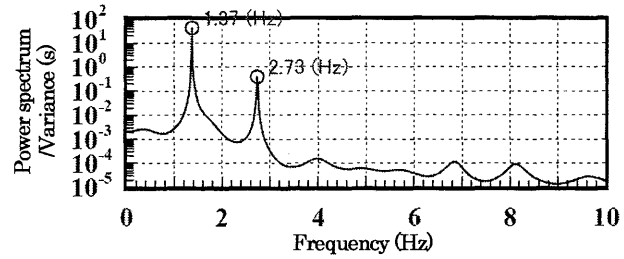


(k)　2LC3 若番側（解析）

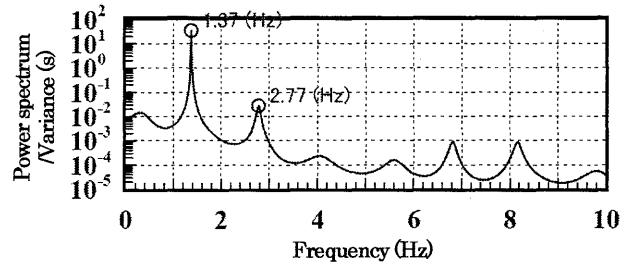


(l)　2LC3 老番側（解析）

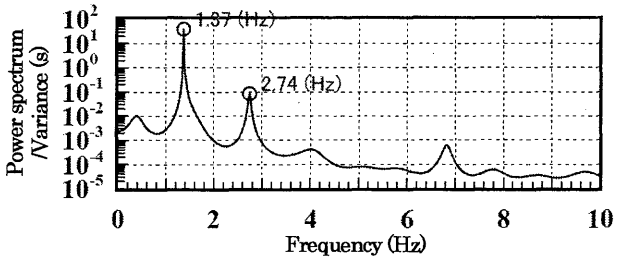
図９　変動張力のパワースペクトル（線路直角方向加振時）



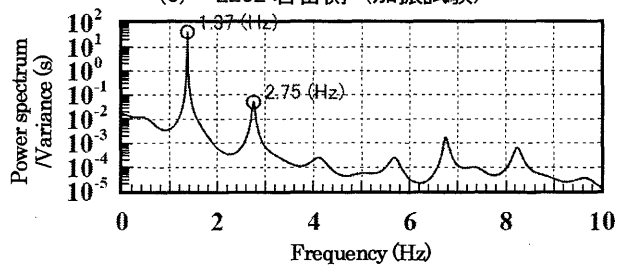
(a)　1LC2 若番側（加振試験）



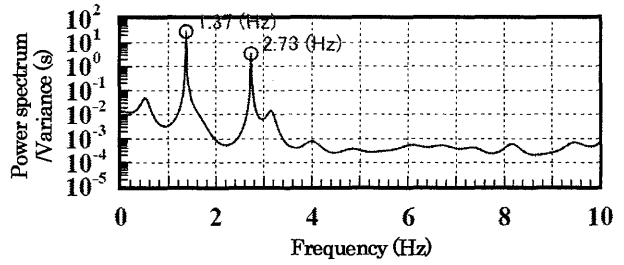
(b)　1LC2 老番側（加振試験）



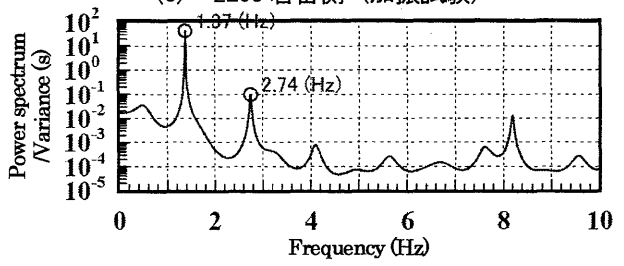
(c)　2LC2 若番側（加振試験）



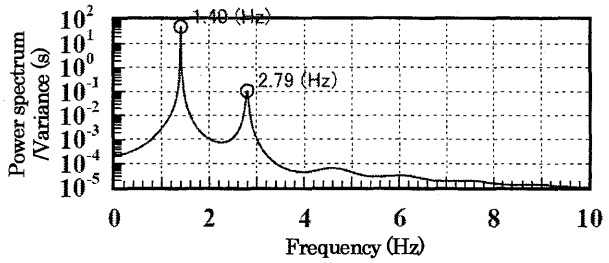
(d)　2LC2 老番側（加振試験）



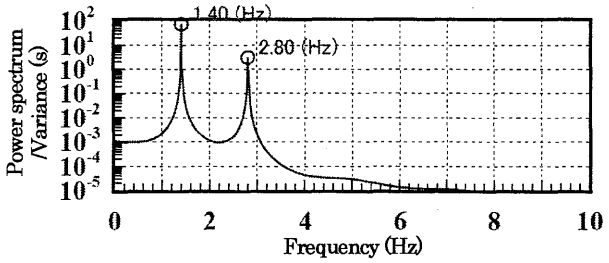
(e)　2LC3 若番側（加振試験）



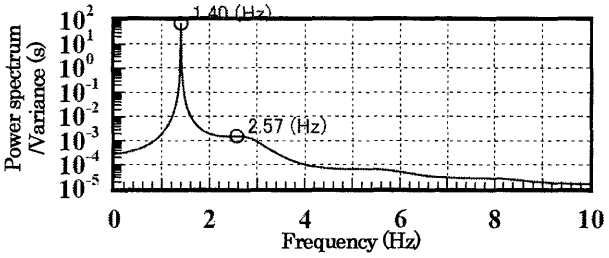
(f)　2LC3 老番側（加振試験）



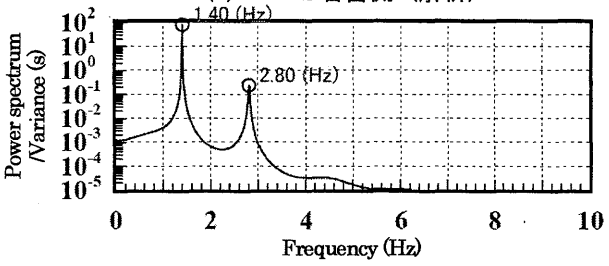
(g)　1LC2 若番側（解析）



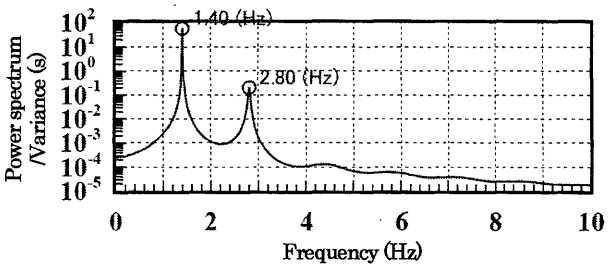
(h)　1LC2 老番側（解析）



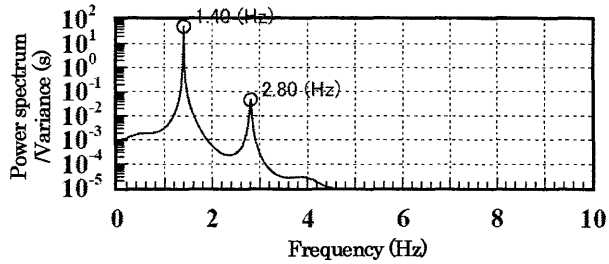
(i)　2LC2 若番側（解析）



(j)　2LC2 老番側（解析）



(k)　2LC3 若番側（解析）



(l)　2LC3 老番側（解析）

図 10　変動張力のパワースペクトル（線路方向加振時）

周波数領域のピークが卓越する。風のパワースペクトルは一般的に低周波数領域になるほど卓越していることから、鉄塔の応答については、低周波数領域の影響が最も強く現れることになる。したがって、今回の解析結果が加振試験結果の低周波数領域をよく再現できていることから、送電鉄塔の耐風設計に用いるツールとして有効であると評価できる。

6．まとめ

有限要素法による非線形の汎用構造解析コードである「ADINA」を用いた鉄塔・電線連成系の動的応答解析結果について、過去に実施した送電用鉄塔実機を用いた加振試験結果との比較を行うことで、解析コードの送電用鉄塔の耐風設計への有用性を評価した。その結果、以下のとおり本コードの送電用鉄塔の耐風設計への有用性が確認できた。

1) 解析で得られた鉄塔の塔頂変位量及びそのパワースペクトルは現地試験結果をよく再現できる。
2) 電線の変動張力のパワースペクトルは鉄塔の風応答特性に大きな影響を持つ低周波数領域にて、解析結果と現地試験結果とがよく一致した。

今回の解析は送電用鉄塔の固有周波数や構造減衰を鉄塔実機の実測結果に基づき設定している。鉄塔を実際に設計する際には、事前の実測検討を行えないため、これら構造特性は過去の経験則などから示されている一般的な値を用いている。また、強風応答解析時に外力として用いる風荷重は、建築物荷重指針・同解説（2004）に基づき設定されることが多い。しかし、これら構造特性や風荷重の設定によって、解析結果が大きく変わってくることが考えられる。

したがって、送電用鉄塔の耐風設計にこのような構造解析コードを用いる際には、当該鉄塔の形状や建設地点の地形の状況などを把握した上で、上記のような一般的な考え方に基づく設定でよいのかどうか十分検討する必要がある。

謝辞

本研究は，九州電力株式会社との共同研究である「鉄塔耐風性能に及ぼす部材振動の影響とその長期的影響評価に関する研究」において行われたものである。関係各位に謝意を表します。

参考文献

1) 大熊武司，中村秀治，石川智巳，本郷榮次郎，渡辺敏緒，篠田明秀，北嶋知樹：風向別風速を用いた送電鉄塔の耐風設計法に関する研究－「送電用鉄塔の風荷重指針（案）」の骨子－，日本風工学論文集，第98号，pp.137-150，2004年1月
2) 中村秀治，石川智巳：架空送電線の対風設計（その２．送電用鉄塔の耐風設計），日本風工学会誌，第98号，pp13-20，2004年1月
3) 川島裕治，松永稔，他：送電用山形鋼鉄塔の強風時応答特性（その１）小型起振器による振動特性試験，日本風工学会誌，79号，pp.115-116，1999年4月
4) 前田潤滋，山崎智之，友清衣利子，石田伸幸，奥田慎也：風観測および送電鉄塔の風応答観測の現状，日本風工学会誌，第98号，pp21-28，2004年1月
5) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説（2004），社団法人日本建築学会，2004年9月
6) 大熊武司，丸川比佐夫，百村幸男，本郷栄次郎，伊澤健：山岳地における送電鉄塔の風応答-山岳地の風の性状-，風工学シンポジウム論文集，Vol.12，pp.7-12，1992年12月
7) 経済産業省原子力安全・保安院：解説電気設備の技術基準，第15版，2011年3月
8) 電気学会：電気規格調査会標準規格「送電用支持物設計標準(JEC-127-1979)」，1979年11月
9) 竹下英世：架空送電線の弛度，電力社，1965年8月
10) 本村禎浩，前田潤滋，石田伸幸，森智治，海老原修二，森本康幸：人力起振機による送電線・鉄塔連成系の振動試験，都市・建築学研究「九州大学院人間環境学研究院紀要第8号」，pp69-78，2005年7月
11) 岩間貴行，広木光雄，他：地震時における電線・がいし系の振動特性と鉄塔連成系の振動特性に関する研究，鉄塔No.53，p277，1982年2月
12) 社団法人日本鋼構造協会：構造物の耐風工学，東京電機大学出版局，1997年11月

（受理：平成24年6月7日）