

強風時における配電線の混触に関する検討

A STUDY OF DISTRIBUTION LINES' ENTANGLEMENT UNDER SEVERE WIND CONDITION

清水幹夫*, 岸野佑次**, 藤井啓一***, 佐藤順一****

Mikio SHIMIZU, Yuji KISHINO, Keiichi FUJII and Jyun-ichi SATO

* 工修 助電力中央研究所 構造部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

** 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

*** 工修 中国電力(株) 技術研究センター (〒739 広島県東広島市鏡山3丁目9番1号)

**** 工修 (株)アーク情報システム 解析第2部 (〒102 東京都千代田区五番町4-2)

A FEM code for calculating wind response of cables was developed in order to investigate the cause of the entanglement accidents between high voltage distribution lines and ground wires which took place in Chugoku Electric Power Company's supply area. This code can take geometrical nonlinearity of cables into account and its validity was shown by agreement between the calculated results and the observed data at the testing distribution line. Several wind response simulations were performed on distribution lines using the developed code, then the cause of the entanglement accident was investigated. And it was made clear that entanglement accidents would occur when the middle point of a high voltage distribution line makes out-of-plane circular movement with the radius of sag length and comes close to a ground wire.

Key Words: entanglement, distribution line, geometrical nonlinearity, FEM

1. まえがき

台風、季節風等の強風時に、配電系統において短時間事故停電が発生することがある。従来、こうした事故の発生箇所は、強風通過後の巡視によっては発見できない場合が多かった。しかし台風9313号通過後、中国電力(株)において、高圧線と架空地線とが接触する、混触事故が2件報告された。これらの事故はいずれも、台風通過後に高圧線と架空地線とが絡まった状態で発見されたものである。その後今日までに、台風及び季節風通過後の巡視の際、高圧線の被覆の損傷、あるいはアーク痕などから配電線の混触事故が十数件確認されている。

こうしたことから筆者らは、強風時の短時間事故停電の原因は高圧線と架空地線との混触事故と推測し、試験配電線を設け、その強風時挙動を観測するとともに、高圧線及び架空地線（以下、これらを架渉線と称する）の風応答解析コードの開発、及びこれを用いた混触事故の発生原因の検討を行うこととした。

本文では、幾何学的非線形性を考慮した、架渉線の3次元時刻歴風応答FEM解析コード「FU_SIN」の概要、そして上記試験配電線で得られた観測データを用いたコードの検証結果を示した。また、当コードを用いて平均風速、風の乱れの絶対強さ、そして吹き上げ角をパラメータとした数ケースのシミュレーションを実施することにより、混触の発生原因について考察した。

2. 解析コードの概要

2.1 開発方針

架渉線は可撓性に富み、その変形は強風時において非常に大きなものとなることが予想される。また、風が架渉線に及ぼす空気力は、風と架渉線との相互作用によって生ずるものであるため、解析の際の入力は風と架渉線との相対運動から時々刻々評価する必要があると考えられる。こうしたことから本検討では、架渉線を幾何学的非線形性を考慮したトラス要素で離散化し、準定常的に架渉線に作用する空気力を評価し得る、時間領域のFEM解析コードを開発することとした。表-1に当解析コードの特徴を示す。

筆者らは既に、送電線を対象として幾何学的非線形性を考慮したスリットジャンプのFEM解析を実施してい

表-1 解析コードの特徴

解 法	直接積分, Newmark-β法	
使用要素	線形トラス要素	
定式化	基本的未知量	変位法
	参照座標系	updated Lagrange系
大変形	要素の幾何学的非線形性を考慮	
増分解析法	Newton-Raphson法	
非定常空気力	準定常的に節点集中荷重に換算	
減 衰	Rayleigh減衰	

る¹⁾。ここにスリートジャンプとは、架渉線に堆積した着氷雪が落下することにより、架渉線が急激に跳ね上がる現象をいう。したがって本検討では、文献1で用いた解析コードに風荷重の入力機能を追加し、新たに「FU_SIN」としてコード化した。

2.2 要素マトリックスと運動方程式²⁾

表-1に示すとおり、本検討では幾何学的非線形問題を増分法で解析する。このとき、要素の平衡状態は増分形で次式のようにマトリックス表示できる。

$$([K_L]_e + [K_G]_e) \{\Delta u\}_e = \{\Delta F\}_e + \{\Delta T^v\}_e \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $[K_L]_e$ ：線形剛性マトリックス、 $[K_G]_e$ ：幾何学的剛性マトリックス、 $\{\Delta u\}_e$ ：節点変位増分ベクトル、 $\{\Delta F\}_e$ ：物体力増分ベクトル、そして $\{\Delta T^v\}_e$ ：表面力増分ベクトルであり、 $\Delta[*]$ は増分を、添字のeは要素毎に求められる量であることを示す。上式の物体力、表面力を慣性項、減衰項を用いて書き換えれば、要素の運動方程式が次のように得られる。

$$[M]_e \{\Delta \ddot{u}\}_e + [C]_e \{\Delta \dot{u}\}_e + [K]_e \{\Delta u\}_e = \{\Delta p\}_e \quad \cdots (2)$$

ここに、 $[M]_e$ ：要素質量マトリックス、 $[C]_e$ ：要素減衰マトリックス、 $[K]_e (= [K_L]_e + [K_G]_e)$ ：要素剛性マトリックス、そして、 $\{\Delta p\}_e$ ：節点力の増分ベクトルであり、 $[*]$ は時間微分を表す。

今、図-1に示すように節点i、jを有するトラス要素に対して局所座標系 $x_i (i=1,2,3)$ と節点変位を定義した場合、要素の節点変位増分ベクトルは次式のとおきベクトル表示できる。

$$\{\Delta u\}_e = \{\Delta u_1^i \quad \Delta u_2^i \quad \Delta u_3^i \quad \Delta u_1^j \quad \Delta u_2^j \quad \Delta u_3^j\}^T \quad \cdots (3)$$

ここに、 $[*]^T$ はベクトルの転置を表す。このとき、要素質量マトリックスは、集中質量として次式で表される。

$$[M]_e = \frac{\rho A L_e}{2} \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ 0 & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (4)$$

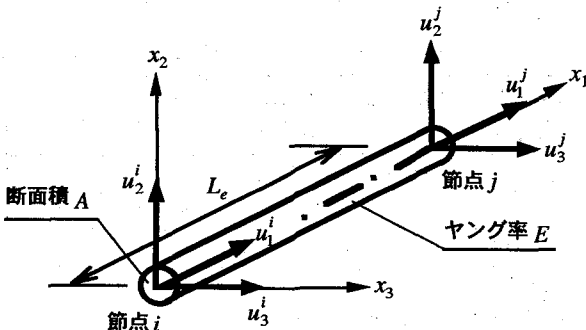


図-1 要素の局所座標系と節点変位の定義

ここに、 ρ ：密度、 A ：断面積、そして L_e ：要素長である。
また、線形剛性マトリックス及び幾何学的剛性マトリックスは、それぞれ次のように表される。

$$[K_L]_e = \frac{EA}{L_e} \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ 0 & 0 & & & & \\ & 0 & 0 & & & \\ -1 & 0 & 0 & 1 & & \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (5)$$

$$[K_G]_e = \frac{\sigma_e A}{L_e} \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ 0 & 1 & & & & \\ & 0 & 0 & 1 & & \\ -1 & 0 & 0 & 1 & & \\ & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \cdots (6)$$

ここに、 E ：ヤング率、 σ_e ：軸方向応力である。
式(2)を全体座標系に変換し、全要素に対して和をとることにより、全体座標系の運動方程式が次のように得られる。

$$[M] \{\Delta \ddot{u}\} + [C] \{\Delta \dot{u}\} + [K] \{\Delta u\} = \{\Delta p\} \quad \cdots \cdots (7)$$

ここに、 $[M]$ ：質量マトリックス、 $[C]$ ：減衰マトリックス、 $[K]$ ：剛性マトリックス、そして $\{\Delta u\}$ 、 $\{\Delta p\}$ ：それぞれ節点変位、外力の増分ベクトルである。

2.3 不平衡力の処理法^{1), 3)}

ある平衡状態を基に、1ステップの増分計算後の次の平衡状態を評価するとき、幾何学的剛性マトリックスは要素の応力変化により計算の前後で異なるものとなる。このため、図-2のように接線剛性を用いて増分計算を行った場合、得られる平衡状態は一般的に真の平衡状態とは異なり、不平衡力が存在することとなる。幾何学的非線形解析では、こうした不平衡力を合理的に評価し、平衡状態を決定する必要がある。本検討では、以下のように不平衡力を評価し、処理している。

今、1ステップの増分計算前後の平衡状態をそれぞれ c 、 $\bar{c}$ と表し、 $\bar{c}$ における系の反力ベクトルを $\{p_{int}\}^*$ 、外

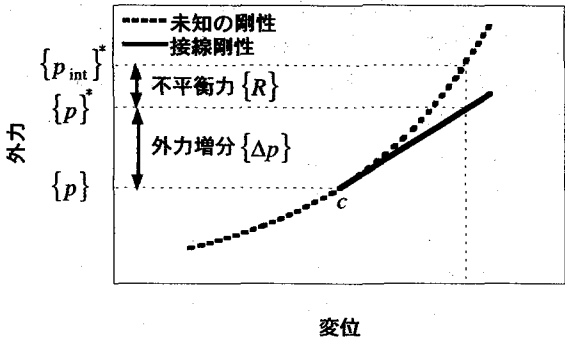


図-2 不平衡力の概念図

力ベクトルを $\{p\}^*$ とおくことにより, 不平衡力ベクトル $\{R\}$ を次式で表すことができる.

$$\{R\} = \{p_{\text{int}}\}^* - \{p\}^* \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに, 添字*は平衡状態 $\bar{c}$ における量であることを示す. 弾性ひずみエネルギー U_e を, 節点変位ベクトルの i 成分 u_i で微分することにより, 節点反力ベクトルの i 成分 $p_{\text{int } i}^s$ が得られる.

$$p_{\text{int } i}^s = \frac{\partial U_e}{\partial u_i} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$p_{\text{int } i}^s$ は, 弾性ひずみエネルギーより導かれることから, 復元力項の弾性成分のみに対応した反力ということができる. 平衡状態 c , $\bar{c}$ それぞれにおいて上式(9)を適用すれば, 節点反力ベクトル $\{p_{\text{int}}\}_c^s$, $\{p_{\text{int}}\}_{\bar{c}}^s$ が得られ, 次式により復元力項の弾性成分のみの不平衡力 $\{R^s\}_c$ を評価することができる.

$$\{R^s\}_c = \{p_{\text{int}}\}_c^s - \{p_{\text{int}}\}_{\bar{c}}^s - [K]_c \{\Delta u\}_c \quad \dots\dots\dots (10)$$

右辺第3項は復元力項の弾性成分であり, 式(1)の左辺に相当し, $c \sim \bar{c}$ 間に作用した外力増分のうち, 要素の弾性変形に対する直接的な寄与分ということができる. 式(10)は, 慣性項及び減衰項を含まないため, 静的・動的解析に無関係に用いられ, 要素レベルで不平衡力の評価を可能とすることから, 計算の合理化にも有効なものといえることができる.

本検討では, 全要素に対して式(10)を計算し系全体の不平衡力 $\{R^s\}$ を求め, Newton-Raphson法に基づき, 次式を用いて変位の補正量ベクトル $\{\Delta \hat{u}\}$ を求める. そして収束計算を行い, これを0に近づける処理をする.

$$\{\Delta \hat{u}\} = - \left[\frac{1}{\beta(\Delta t)^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} [C] + [K] \right]^{-1} \{R^s\} + \{Z\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに, Δt : 時間増分, $\{Z\}$: 慣性項及び減衰項による変位補正量, β 及び γ : いずれも Newmark の β 法のパラメータであり, 計算の際にはそれぞれに対し 1/4, 1/2 の値を用いた.

2.4 外力の定式化

たわみ, あるいは回転振動する物体に作用する非定常空気力には, 物体の振動変位, 速度, そして加速度に比例する成分が含まれることが知られている. 特に, フラッターに代表される曲げ, あるいはねじれの自励振動現象を厳密に評価する際には, 物体の振動と空気力との間に位相差, すなわち上記非定常空気力の変位依存成分, 及び速度依存成分等を考慮することが重要となる⁴⁾. 本検討の対象である配電線の混触事故については, 当初, ヒレ付の断面形状を有する難着雪電線に見られたことから, ヒレの翼としての効果がもたらす自励振動に起

因していると推測された. また, これまでに難着雪電線を対象として実施された風洞実験の結果^{5), 6), 7)}からも, 難着雪電線に自励振動が発生する可能性が認められる.

しかし, 実際の難着雪電線の架線状況は風洞内のそれと異なり, 架線時において電線がねじれた状態にある場合が多く, 径間全体にわたって自励振動の発生条件が同様に満足される場合は少ないと考えられる. また, ヒレのない丸断面の配電線の混触事故も報告されており, さらに, 試験配電線におけるこれまでの観測結果から, ヒレの有無による電線振動の有為な差はないことが確認されている.

こうしたことから本検討では, 配電線を難着雪, 丸断面で区別することなく扱い, 丸断面の高圧線, 及び架空地線を対象に風応答解析を行うこととした. そして空気抵抗係数は風の迎え角に依存しない一定値とし, 空気力は抗力のみが準定常的に作用するものと仮定した. このとき, 単位長さ当りの架渉線に作用する空気力ベクトル $\{p\}$ は次式で表すことができる.

$$\{p\} = \frac{1}{2} \rho_a d C_D [\{v\} - \{u\}]^2 \{i\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに, ρ_a : 空気密度($=0.13\text{kg/m}^3$), d : 架渉線の代表径, C_D : 空気抵抗係数, $\{v\}$: 風速ベクトル, $\{u\}$: 架渉線の速度ベクトル, そして $\{i\}$: 風向ベクトルである. $\{i\}$ は風の水平あるいは鉛直成分の主流方向に対し+1となる. 時々刻々変化する空気力は上式を用いて計算され, 解析の際は, これを節点力増分に換算した上で式(7)の右辺に代入する. なお, 空気抵抗係数 C_D は配電規定⁸⁾に基づき 1.0 と仮定した.

3. 試験配電線と観測項目

試験配電線 (以下, 試験線と称する) は, 強風時における配電線挙動の解明及び解析コードの検証用データの取得を目的として, 中国電力(株)倉吉営業所担当区域の, 鳥取県東伯郡赤碕町の荒神支線6-7右2号~右3号間に建設された⁹⁾. 試験線付近の地図を図-3に示す. 現場周辺の配電線路では, 台風9313号及び季節風通過時に高圧線と架空地線との混触が確認されており, 年間を通し

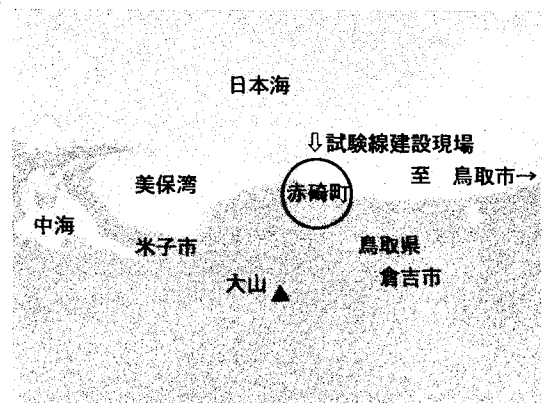


図-3 試験線建設現場

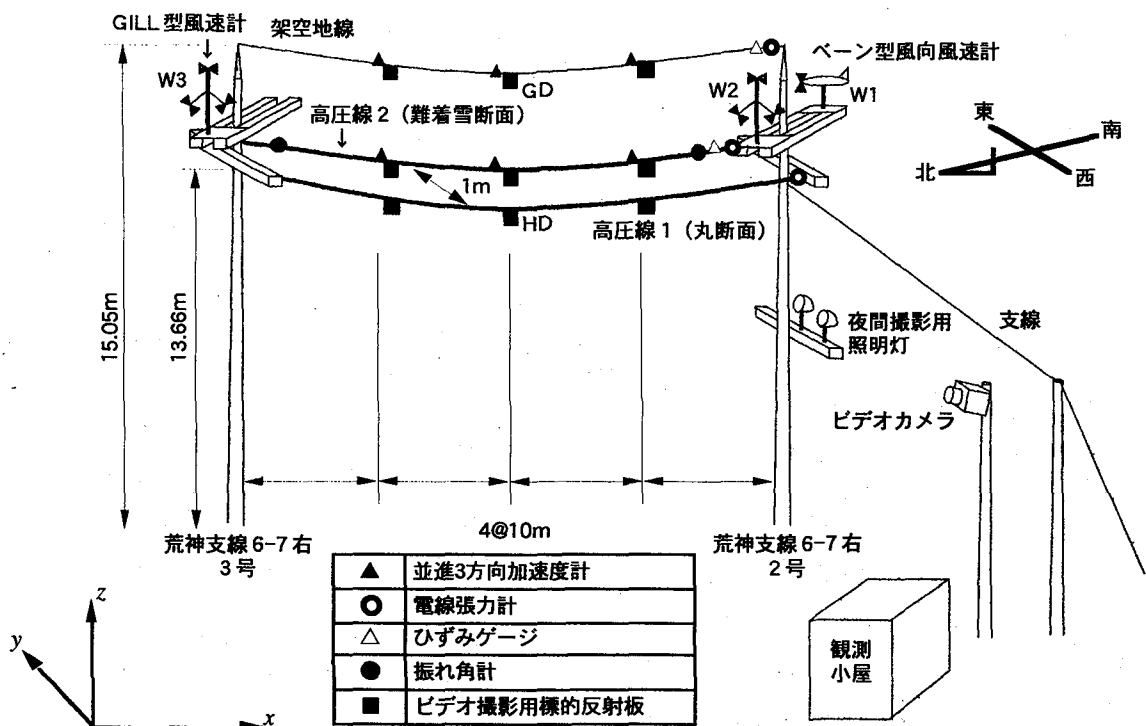


図-4 試験線概略図

で日本海からの強風が吹走するという、地域の住民からの報告も得られている。

試験線は、既設の配電線路の1径間に設けられたものであり、図-4に示すように、丸断面及び難着雪断面の2本の高圧線と1本の架空地線より構成される。以下、丸断面、難着雪断面の高圧線をそれぞれ高圧線1、高圧線2と称する。また、これらの架渉線及び径間両端の配電柱頂部には各種センサーが取り付けられており、合計32チャンネルの同時無人観測が可能となっている。

当試験線において混触は観測されていないが、事故事例では風上側の高圧線と架空地線とが接触する形態の混触が確認されている。試験線に対し、風は西から作用する場合が多いため、以下では架空地線及び高圧線1を検討の対象とし、それぞれの径間中央の軌跡の撮影記録及び電柱頂部の風速記録を用いて解析コードの検証を行うこととする。

なお、センサーの取り付け前後で高圧線の軌跡を比較したが、有為な差は現れなかったため、センサーが電線振動に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

4. 観測結果を用いた解析コードの検証

本章では、試験線における風観測結果に基づいて設定された解析条件の下で、同試験線の応答シミュレーションを実施し、この結果を変位観測結果と比較することにより、解析コードの検証を行った。

4.1 解析モデルとその固有振動特性

解析では、図-4に示した試験線の架空地線及び高圧

線1を、それぞれ別個にモデル化した。ここでは配電柱の変形は小さいものと仮定し、各架渉線両端の境界条件は固定の条件とした。

初期釣合状態における解析モデルを図-5-1及び図-5-2に示し、その諸元を表-2に示した。図では、線路方向、線路直交方向、そして鉛直方向をそれぞれx、y、そしてz方向とし、高圧線1の北側（3号電柱側）支持点

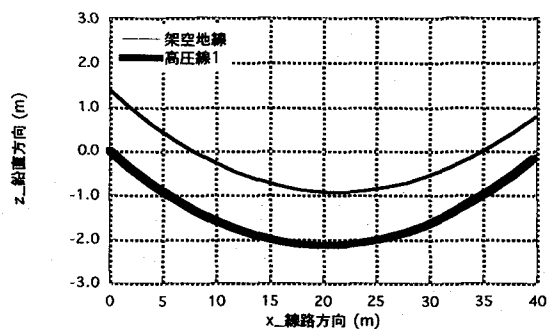


図-5-1 解析モデル (xz平面)

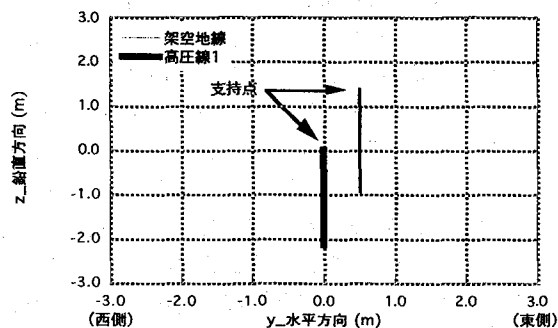


図-5-2 解析モデル (yz平面)

表-2 解析モデルの諸元

	架空地線	高圧線1
線種	硬銅線5mm	ACSR-OC25mm ²
断面積	19.64mm ²	83.32mm ²
密度	8.89t/m ³	1.86t/m ³
ヤング率	12000kgf/mm ²	8400kgf/mm ²
径間長	39.7m	
サグ*	2.00m(0.65m)	2.06m(0.73m)
支持点高低差	0.6m	0.18m
初期張力	17.65kgf	17.65kgf
要素分割数	20	

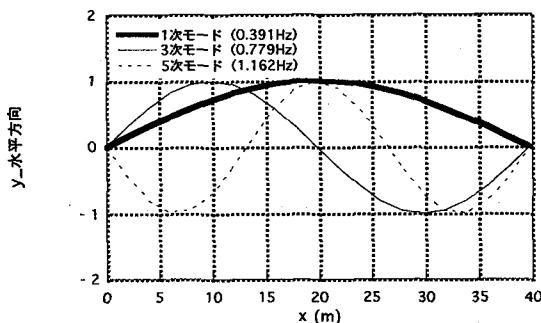
*) 混触の観測を目的とし、実際よりも大きな値とした。
() 内に標準値を示した。

表-3 固有振動数

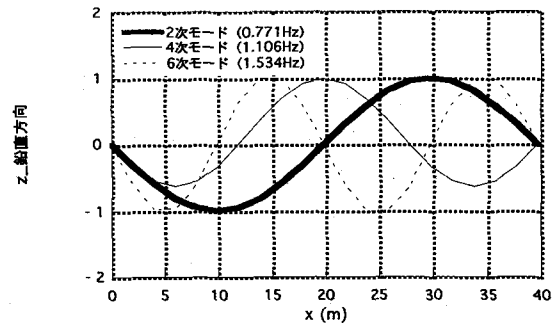
次数	架空地線		高圧線1	
	解析(Hz)	観測(Hz)	解析(Hz)	観測*1(Hz)
1	0.391	0.415	0.414	0.440
2	0.771	0.732	0.809	0.793
3	0.779	0.793	0.817	0.806
4	1.106	1.135	1.163	1.045
5	1.162	—*2	1.222	—
6	1.534	—	1.613	—

*1) 高圧線2に対する観測値を用いた。

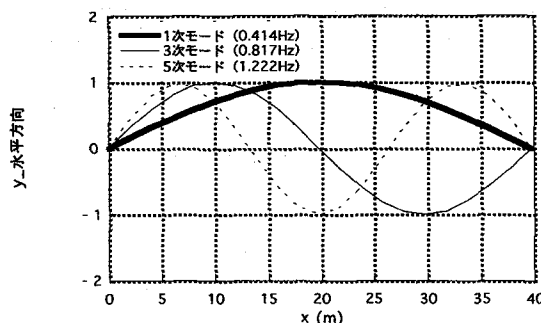
*2) 観測結果からのモードの特定は不可能であった。



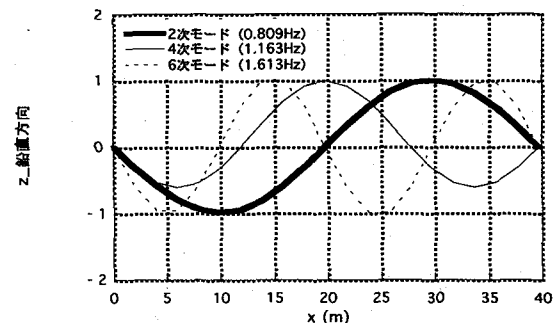
(a) 架空地線水平方向 (xy 面内) モード



(b) 架空地線鉛直方向 (xz 面内) モード



(c) 高圧線1 水平方向 (xy 面内) モード



(d) 高圧線1 鉛直方向 (xz 面内) モード

図-6 固有値解析結果 (図にはモード振幅のみを示した)

のz座標を0とした。

また、固有値解析で得られたモデルの固有振動モードを図-6に、固有振動数を試験線で観測された固有振動数と併せて表-3に示した。ここに固有振動数の観測値は、微動時における架空地線及び高圧線2の加速度観測記録のパワースペクトル及びココヒーレンスから推定した。なお、高圧線1, 2はセンサーの配置を除きサグ、張力、そして材料物性等の架線条件が互いに等しいため、両高圧線の固有振動数は等しいと仮定し、表-3には高圧線2に対する観測値を示した。

表-3より、架空地線及び高圧線の固有振動数は、解析と観測との間で良く一致しており、モデル化が妥当であると認識できる。

4.2 入力条件

架渉線の時刻歴風応答シミュレーションを行う際には、架渉線全体に分布して作用する変動風速の時刻歴データが必要となる。しかし、試験線ではこうした多次元の変動風速の時刻歴は観測されていないため、本検討では岩谷の方法¹⁰⁾を用いて人工的に変動風速を発生した。岩谷の方法では、自己回帰法を応用し、任意のパワースペクトル及び空間相関を有する多次元の変動風速を、過去のM個(Mは任意の数)の時点の風速の一次結合と、白色雑音の和として発生することが可能とされている。ここでは、変動風速のパワースペクトルは試験線における観測記録に基づいて定め、風の空間相関は既往の経験式¹¹⁾を基に仮定した。観測記録は、1995年11月の冬季

季節風時に、サンプリングタイム0.01秒で2分間、架渉線の応答と同時観測されたものである。

図-4中にW1, W2, そしてW3で示したベーン型風向風速計及びGILL型風速計により得られた変動風速記録から、水平かつ線路直交方向、すなわち西から東向きの風速に対してパワースペクトルを求めた結果を図-7に示す。図-7はW1～W3それぞれで得られたパワースペクトルをアンサンブル平均したものである。岩谷の方法を適用する際には、このパワースペクトルを数式で記述する必要があるが、ここでは次式を用いて近似した。

$$\frac{S(f)}{\sigma^2} = \frac{1}{0.14 \left\{ 1 + \left(\frac{f}{0.14} \right)^2 \right\}^{1.63}} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 $S(f)$ ：変動風速のパワースペクトル、 σ ：乱れの絶対強さ（標準偏差）、 f ：周波数である。上式は図-7中の実線で表される。

試験線における風の観測箇所は電柱頂部の2箇所であり、風の空間構造については信頼性の高いデータは得られていないため、風の空間相関、フェイズはそれぞれ次式で仮定した。

$$\sqrt{Coh(\eta, f)} = \exp(-8f\eta/v_0) \dots\dots\dots (14)$$

$$\Phi(\eta, f) = 0 \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 $Coh(\eta, f)$ ：風向に対し η m隔たった2点間のコヒーレンス、 $\Phi(\eta, f)$ ：同じくフェイズ、そして v_0 ：平均風速である。

なお σ 、 v_0 には、W1～W3それぞれで得られた観測値をさらにアンサンブル平均した次の値、

$$\sigma = 2.781 \text{ (m/s)}$$

$$v_0 = 10.09 \text{ (m/s)}$$

を用いた。変動風速は地上高15mにおいて、図-8に示すように水平かつ線路に直交する風速を、水平方向に5m間隔でch1～ch8までの8個（次元）発生させた。なおここでは、計算時間刻みを0.02秒、自己回帰式の項数を200、離散フーリエ逆変換の項数を500¹²⁾とし、合計7000ステップの計算を行った。そして初期の1000ステップのデータを捨て、後の6000ステップ（評価時間120秒）を入力として用いることとした。また、白色雑音は正規乱数を発生させて得た。

鉛直方向の風速は、W2のGILL型風速計による観測結果から水平方向風速と鉛直方向風速との比の時刻歴を求め、これを発生されたch1～ch8の変動風速それぞれに乗ずることによって定めた。水平、鉛直両方向風速の比の時刻歴を角度に換算し、吹き上げ角の時刻歴として図-9に、発生された変動風速を図-10に示した。

こうした風速発生計算の妥当性を確認するため、水平、鉛直各方向に対し、発生された8個の変動風速のパワースペクトルをアンサンブル平均し、それぞれ観測値

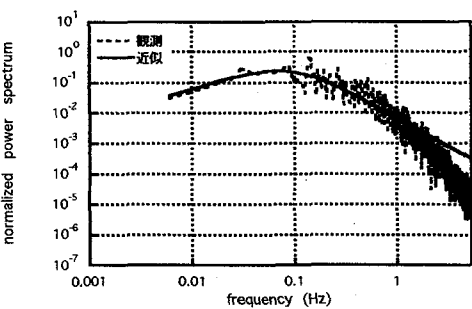


図-7 変動風速のパワースペクトル

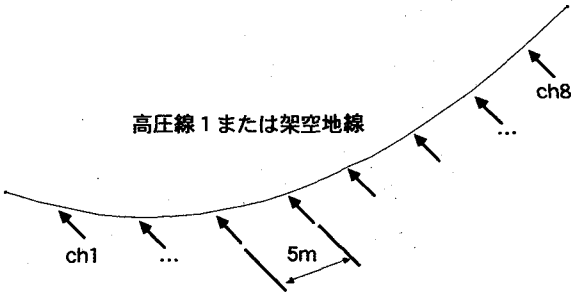


図-8 架空地線、高圧線1に作用する変動風速

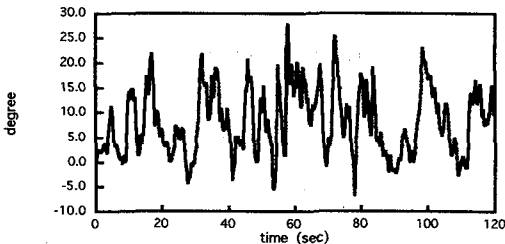


図-9 吹き上げ角時刻歴

と比較して図-11-1、図-11-2に示した。図より、パワースペクトルは発生、観測の間で概ね一致し、観測値を反映した風速が発生されたということが出来る。

図-10の変動風速は高圧線1、架空地線に対して共通に用いることとし、式(12)を用いて風圧荷重に変換し、節点集中荷重に換算した後、作用させた。

4.3 減衰定数

高圧線1、及び架空地線のモード減衰定数は、図-4中のGD、HDの位置で観測された線路直交方向の加速度応答記録に対し、RD法¹³⁾を適用して求めた。表-4に減衰定数を示す。解析では表-4の値に基づき、Rayleigh減衰を仮定して式(7)の減衰マトリックスを決定する。

表-4 減衰定数

架空地線		高圧線1	
振動数(Hz)	減衰定数	振動数(Hz)	減衰定数
0.391	0.0521	0.414	0.0208
0.771	0.0367	0.809	0.0332

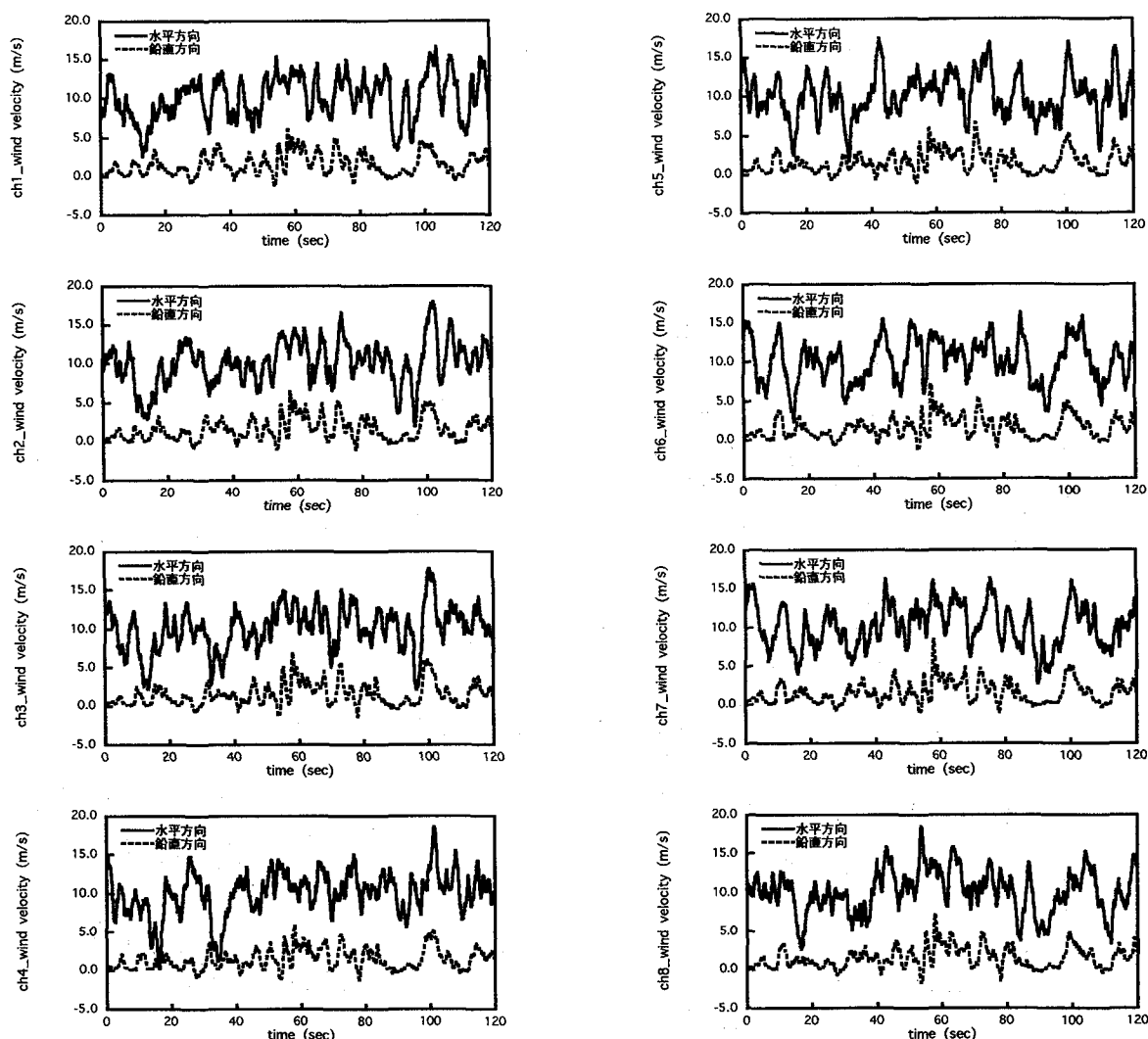


図-10 変動風速時刻歴（鉛直方向風速は上向きを正とした）

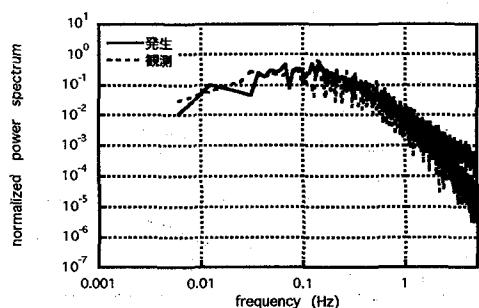


図-11-1 水平方向風速のパワースペクトル

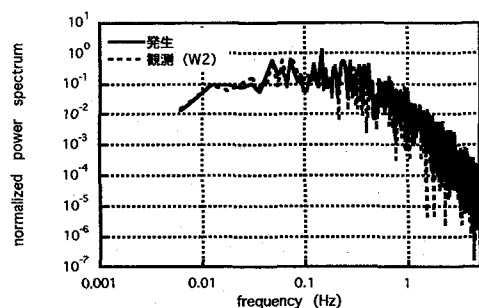


図-11-2 鉛直方向風速のパワースペクトル

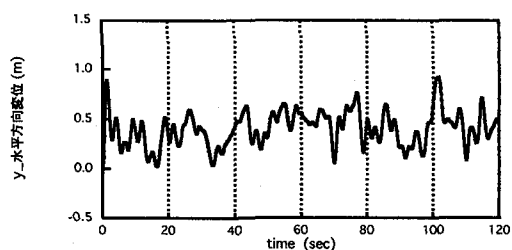
4.4 その他の条件

解析では高圧線1、架空地線を別個に扱うこととし、いずれについても自重のみを作用させる初期釣合解析、そして変動風を作用させる動的風応答解析の2段階の解析を実施した。動的風応答解析は0.02秒刻みで6000ステップの計算をした。

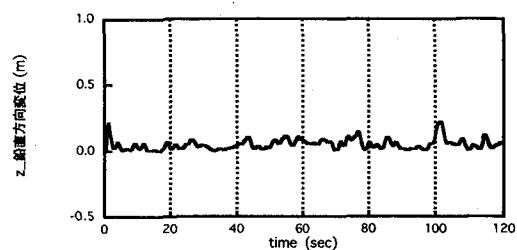
4.5 解析結果

解析結果として、架空地線、高圧線1それぞれに対し、

径間中央すなわち図-4中のGD、HDの位置における変位の時刻歴を図-12-1、図-12-2に示し、そのyz平面内のリサージュを図-13-1に示した。また、比較のため応答観測結果を図-13-2に示した。観測結果は、GD、HDの位置に取り付けられた反射板のyz平面内のリサージュをビデオ撮影することによって得られたものである。なお、図-12では原点を初期釣合状態における位置、すなわち動的風応答解析開始時の静止位置とした。また架空地線と高圧線1との位置関係を明確に示した

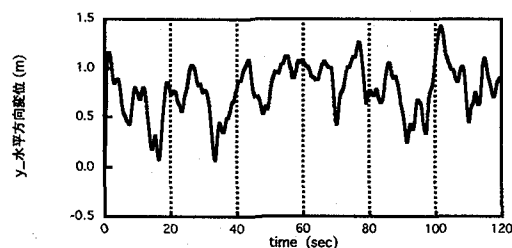


(a) 水平方向変位時刻歴

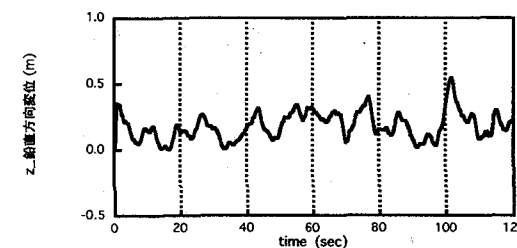


(b) 鉛直方向変位時刻歴

図-12-1 解析結果：架空地線変位時刻歴



(a) 水平方向変位時刻歴



(b) 鉛直方向変位時刻歴

図-12-2 解析結果：高圧線1変位時刻歴

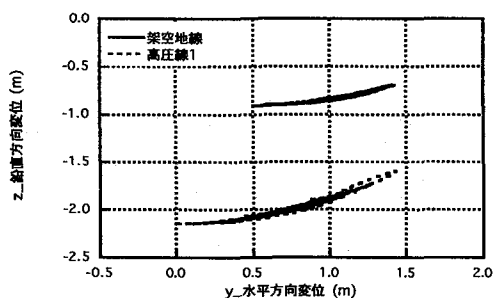


図-13-1 径間中央のyz面内リサージュ：解析結果

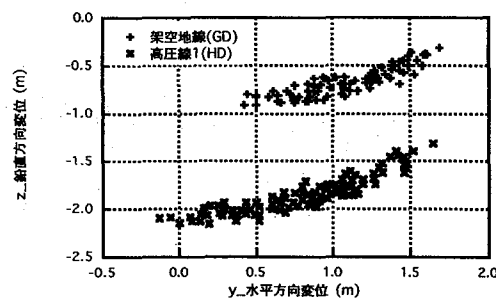


図-13-2 径間中央のyz面内リサージュ：観測結果

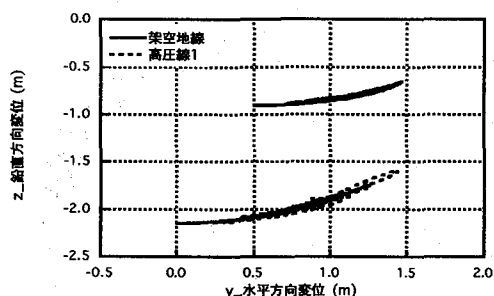


図-14-1 空力減衰を無視した解析結果

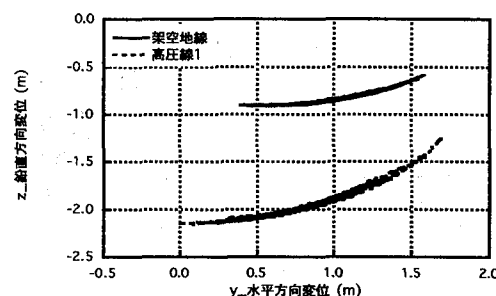


図-14-2 構造減衰を無視した解析結果

め、図-13の座標系は、図-5-2のそれと共通のものとした。

4.6 考察

図-12-1(a)と図-12-1(b)、そして図-12-2(a)と図-12-2(b)とをそれぞれ比較することにより、架空地線、高圧線1のいずれもが水平方向の振動、すなわち横振れ主体の応答をしていることがわかる。このことは図-

13-1からも認められる。図-12-1(a)、及び図-12-2(a)の波形は、図-10の入力に用いた変動風速波形に類似しており、架渉線の振動は風による強制振動、すなわちパフェッティングであると考えられる。また、図-13-1及び図-13-2より、解析結果は観測結果に比して小さな値となっているが、両者は概ね一致しているといえる。

解析結果が観測結果を下回った原因として、解析時に

減衰定数が過大評価されたことが考えられる。また、解析で用いた減衰定数は、加速度応答観測記録にRD法を適用して仮定したものであり、入力風荷重は式(12)で計算している。したがって、RD法の適用時と荷重換算時において、空力減衰が重複して考慮されたといえることができる。

これに関してさらに考察するため、減衰のみを変更し、改めて解析を行った。すなわち、式(12)の右辺に含まれる架渉線速度を常に0として空力減衰を無視した解析、及び式(7)の減衰項を無視した解析を行った。各架渉線径間中央のyz平面内変位リサージュを図-14-1及び図-14-2に示す。図-13-1と図-14-1との比較から、空力減衰を無視することにより、架空地線の最大振幅は増加するが、高圧線1の変位に有意な差はないことがわかる。図-14-2より、構造減衰を無視した場合、架空地線、高圧線1の最大振幅はいずれも増加し、それぞれ図-13-2に示した観測結果に近い値となることがわかる。

したがって、構造減衰の過大評価が、図-13-1の解析結果が観測結果を下回る原因といえることができる。また、解析では電柱の応答を無視し、架空地線及び高圧線1の両端を固定の条件としているが、厳密には電柱は振動するため、支持点の運動により実際の架渉線変位は解析値を上回ると考えられる。

以上により、本検討では鉄塔の応答を無視し、以下の4つの条件、すなわち、

- 1) 減衰定数、
- 2) 変動風速の空間分布、
- 3) 線路方向に分布する吹き上げ角、
- 4) 空気抵抗係数。

を仮定して解析を行ったが、変位の解析結果と観測結果は定性的に一致し、「FU_SIN」により架渉線の一応の風応答解析が可能となったことが示された。したがって次章では、当コードを用いたシミュレーションにより、混触事故の発生原因に関する考察を行うこととする。

5. シミュレーション解析による混触原因に関する検討

5.1 解析ケース

本章では、

- 1) 平均風速、
- 2) 風の乱れの絶対強さ、
- 3) 吹き上げ角

をパラメータとし、架空地線と高圧線との混触のシミュレートを試みた結果を示す。平均風速は、前章で示した観測値 $v_0 = 10.09 \text{ m/s}$ と、この約2倍の 20 m/s を、乱れの絶対強さは、前章で示した $\sigma = 2.781 \text{ m/s}$ と、 4 m/s を考慮する。また、鉛直方向の風速成分が増加した場合を考慮するため、図-9の吹き上げ角を基準値とし、これを2倍とした条件を設けた。なお、混触事故現場の風上には民家の屋根が存在する場合が多く、これにより鉛直上向き風速が増加され、図-9の2倍程度の吹き上げ角

表-5 解析ケース一覧

ケース No.	平均風速 (m/s)	乱れの絶対強さ(m/s)	吹き上げ角	混触の有無
1	10.09	2.781	図-9の2倍	無
2		4.0	図-9の2倍	無
3	20	2.781	図-9	無
4			図-9の2倍	有
5		4.0	図-9	無
6			図-9の2倍	有

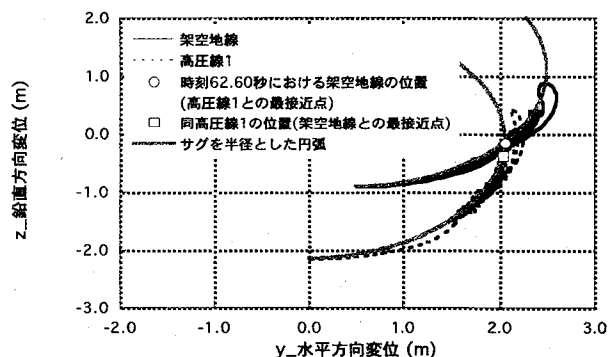


図-15-1 混触シミュレーション結果：ケース No.4

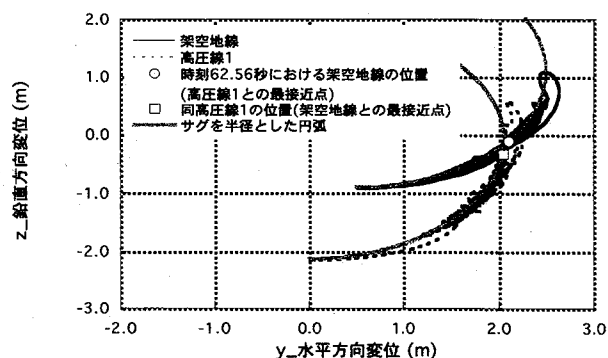


図-15-2 混触シミュレーション結果：ケース No.6

の生じる可能性は無視できないものと考えられる。実際、これまでの観測では65度の吹き上げ角が観測された例がある。上記1)～3)以外の解析条件は前章4.2～4.4節に示した条件と同様とした。解析ケースの一覧を表-5に示す。

5.2 解析結果と考察

表-5に示したNo.1～6の解析ケースの中で、混触の可能性が認められたNo.4、No.6の結果を、それぞれ図-15-1、図-15-2に示した。前章同様、解析では架空地線、高圧線1を別個に扱い、それぞれに共通の外力を与えた。このため、各架渉線に作用する風荷重の相違と混触の関係の考察、及び時間断面における混触の評価、判定は厳密には不可能と考えられる。したがってここでは、図-4中にGD、HDで示した、架空地線、高圧線1それぞれの径間中央のyz平面内における変位のリサージュ

ジュに交点が存在する場合、混触発生の可能性があると判断することとした。

図-15-1, 図-15-2には架空地線、高圧線1が互いに最も接近した位置、及び各架渉線に対して両端支持点の中点を中心に、サグを半径として描いた円弧を併せて示した。

これらの図より、架空地線と高圧線1とが最も接近したとき、完全には接触しないが、互いの距離は非常に小さなものとなることがわかる。したがって、両架渉線それぞれのリサージュに交点が存在する場合、混触の可能性は充分にあるということが出来る。また、各架渉線に対するサグを半径とした円弧の交点付近で混触が発生すると推定できる。

No.4, 6の解析で与えた条件は、いずれも、

1) 平均風速が20m/s,

2) 吹き上げ角が図-9の2倍

であることから、混触の発生条件に関しては、平均風速及び鉛直方向の風速成分が支配的であると考えられる。また、水平方向の横たわみ振動に鉛直方向の振動成分が加わることににより、サグを半径とした円弧に沿って高圧線が架空地線に接近する場合に、混触の可能性があるということが出来る。

6. まとめ

本検討では、配電線路の混触について考察するため、架渉線の風応答をシミュレートし得る解析コードを開発した。当コードには、準定常的に架渉線に作用する空気を扱い得る入力機能を設けた。そして、試験線を対象とした解析モデルに対し、固有値解析、風応答シミュレーションを実施し、それぞれの結果を観測結果と比較することにより、モデル及び解析コードの妥当性を検証した。さらに、数ケースのシミュレーションにより混触事故の発生原因について考察した。

現時点ではコードの検証計算においては入力の一部を仮定し、コードの検証、及び混触原因の検討は、応答変位のみに基づいて行った。したがって今後、観測データの処理・評価をさらに進め、解析コードの検証、混触事故原因の検討の精緻化を図ると共に、混触防止対策の検討を実施する。

参考文献

- 1) 清水幹夫, 石川智巳, 高橋毅, 泉邦和, 佐藤順一, 横山一雄: 幾何学的非線形性を考慮した送電線のスリットジャンプの解析, 構造工学論文集, Vol.41B, pp. 305-313, 1995.3
- 2) 鷺津久一郎・宮本博・山田嘉昭・山本善之・川井忠彦: 有限要素法ハンドブック II 応用編, 培風館, pp. 12-149, 1990.11
- 3) 日本機械学会: 固体力学におけるコンピュータアナリシス, コロナ社, pp.85-107, 1988.7
- 4) 岡内功・伊藤学・宮田利雄: 耐風構造, 丸善株式会社, pp.101-224, 1977
- 5) 山下隆弘, 濱田義之, 河内啓二, 渡部勲, 柴田恵一, 加藤淳, 中田年雄, 杉崎哲: 難着雪絶縁電線の異常振動とその防止対策, 古河電工時報, No.86, pp.88-96, 1990.6
- 6) 堀越俊夫, 丹羽宣之, 濱田義之, 藤野陽三, 鈴木貞二, 水沼勲, 小池洋二, 内山和広, 鈴木淳: 難着雪絶縁電線の自励振動とその制振対策, 藤倉電線技報, 第80号, pp.33-42, 1991
- 7) 内田進午, 丹羽宣之, 鈴木貞二, 高橋敦, 水沼勲, 小池洋二, 遠藤正徳, 内山和広, 二本柳一之: 低揚力難着雪絶縁電線の開発(その2), フジクラ技報, 第82号, pp.34-39, 1992
- 8) 日本電気協会電気技術基準調査委員会: 配電規定(低圧及び高圧) JEAC7001-1992, 電気技術規定配電編, 1992
- 9) 藤井啓一, 谷口均: 強風時の配電線路の揺動に関する研究(中間報告), 中国電力技研時報, 86号, pp.33-52, 1996.3
- 10) 岩谷祥美: 任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション, 日本風工学会誌, 第11号, pp.5-18, 1982.1
- 11) 塩谷正雄: 強風の性質-構造物の耐風設計に関連して-, 開発社, pp.51-96, 1992.10
- 12) 岩谷祥美: 与えられたパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元風速変動のシミュレーションとその精度の検討, 日本風工学会誌, 第36号, pp.11-26, 1988.7
- 13) 田村幸夫・佐々木淳・塚越治夫: RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第454号, pp.29-38, 1993.12

(1996年9月6日受付)