

配電柱の地震時挙動に及ぼす架線の影響

畠山 昭*・桑原 洋**・清水全生***

配電柱の地震時挙動に及ぼす架線の影響を多質点モデルの解析により調べた。その結果、架線の振動効果は小さく、非線形のばねとしての拘束効果が大きい。その影響は隣接柱の設置条件などにより変化する。しかし、これらの配電柱の挙動はゆるい砂質地盤やコンクリート埋込条件の架線を付加質量とした単柱モデル解析により、折損などの被害の発生の有無を評価できることがわかった。

Keywords : electric pole, electric wire, earthquake, nonlinear lumped mass model, restraining effect

1. はじめに

配電柱は、電気設備技術基準¹⁾によりその設計条件が定められており、通常発生する地震力よりもその影響が一般に大きい氷雪、風圧および電線の不平衡張力により耐力が規程されている。

既往の地震時における配電設備の被害としては、配電柱の折損、倒壊、傾斜、沈下、配電線の断線、混線ならびに変圧器などの設置機器の落下、ずれなどであるが、いくつかの地震被害を経験し、その対策が強化されてきたためその被害件数は、近年大きく減少している。このうち配電柱の折損、変圧器の落下、電線の断線の被害に対する改善効果が大きい²⁾。

従来より配電柱の地震時挙動については、実物大の起振実験、模型実験、数値解析など地道な研究³⁾が続けられ、架線でつながれていない状態であれば、地盤を適切に評価しさえすれば解析により被害を推定することは実用上問題がない程度となっている。しかし架線につながれた配電柱の地震時挙動については、観測記録も乏しく実物大の振動実験⁴⁾もほとんど行われていないことから、不明な点も多い。

ここでは配電柱の地震時挙動に与える架線の影響を把握するため、架線を含めた配電柱の多質点モデルによる数値解析を行い、配電柱の耐震性を評価する際の課題である架線の影響について検討を行った。

2. 架線の影響

架線には高圧線、低圧線、通信線などがある。これらの架線が地震時に配電柱にあたえる効果としては、隣接

柱の挙動を着目している配電柱に伝達する拘束効果と架線自体の振動が配電柱の挙動に影響を及ぼす振動効果が考えられる。

(1) 拘束効果

架線は引張力に対してはバネとして、圧縮力に対しては抵抗しない部材として働き、配電柱に影響をあたえる。しかし、架線には配電柱に架設された状態で自重による引張力(初期張力)が作用しており、地震時にはこの初期張力からの増分張力が問題となる。架線の水平張力と配電柱の支間距離の関係は、式(1)で表される非線形バネとして扱うことができる⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} H &= \frac{w_0 \{ (L + \Delta L)^2 - 4f^2 \}}{8f} \\ L &= l \cdot \frac{\sinh \phi}{\phi} \\ \phi &= \frac{Cl}{2} \\ C &= \frac{w_0}{H} \\ \Delta L &= \frac{H}{2EA} \left(l + L^2 \cdot \frac{C}{2} \cdot \coth \phi \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 H : 水平張力 (kgf)

w_0 : 架線の単位長さ当たりの重量 (高圧線 4.59 kgf/m, 低圧線 1.89 kgf/m)

L : 架線長 (m)

ΔL : 架線の弾性伸び (m)

f : サグ (m)

l : 配電柱の支間距離 (m)

E : 架線のヤング係数 (= 1.2×10^6 kgf/cm²)

A : 架線の断面積 (cm²)

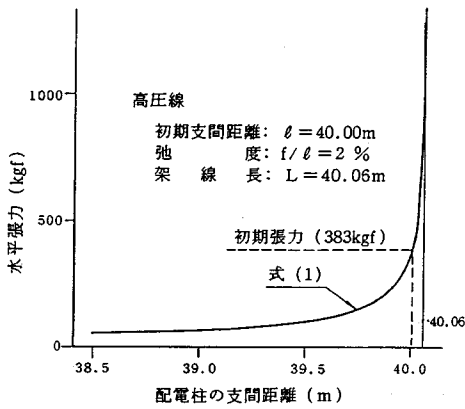
(2) 振動効果

架線の振動としては、架線方向の縦振動と架線直交方向の横振動がある。架線の縦振動は、支間距離 40 m の

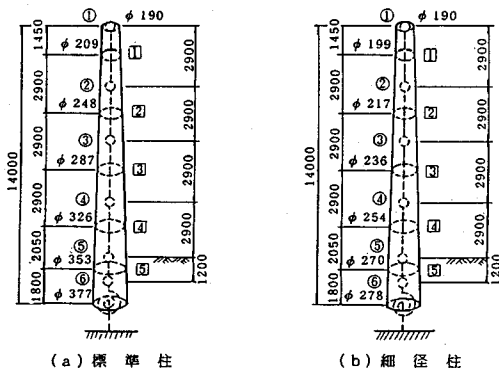
* 正会員 東京電力(株) 建設部 課長
(〒100 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

** 正会員 東京電力(株) 送変電建設所副所長

*** 正会員 佐藤工業(株) 技術本部 次長



図一 架線の水平張力と支間距離の関係 (高圧線)



図二 対象配電柱 (単位: mm)

高圧線について棒部材の軸方向振動として固有振動数を求めると1次で43 Hz程度と高周波の領域に入るため、地震動の卓越周波数、配電柱の固有振動数を考慮すると配電柱の振動に及ぼす影響は小さいものと想定される。また、横振動については、張力の変動をとまなう上下方向の横振動と張力の変動をとまなわない水平横振動がある。

ここでは、架線も多質点によりモデル化することとするが、上下方向の振動については固有振動数が張力に依存することから複雑な非線形振動となり、解析的な取り扱いが困難であることから考慮していない。

3. 配電柱と架線のモデル化

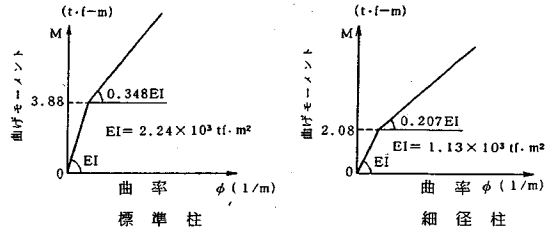
(1) 配電柱

対象配電柱は、関東地方で最も多く設置されているプレストレストコンクリート製の曲げ圧縮耐力1000 kgf/本、長さ14 mの標準柱ならびに狭い道路に適用され圧縮耐力、長さが標準柱と同じ細径柱とし、これらを曲げ剪断型の多質点モデルで表した(図一2、表一)。変圧器等の付属物については取付位置に重量に応じて質点を設けた。配電柱の曲げに対する復元力特性は、強度試験

表一 配電柱諸元

乳点番号	配電柱重量		標準柱		細径柱	
	標準柱	細径柱	断面積	断面2次モーメント	断面積	断面2次モーメント
①	78 kgf	97 kgf	119 cm ²	8821 cm ⁴	134 cm ²	7981 cm ⁴
②	190	209	148	16370	161	11777
③	227	242	179	27714	192	17208
④	266	267	208	42853	225	24001
⑤	208	206	228	56074	236	28334
⑥	201	189				
計	1170	1210				

付加設備重量 (kgf)	高圧線	低圧線	変圧器	開閉器
	183.6	75.6	350×2台	205



図三 配電柱の骨格曲線 (地盤部)

表二 地盤のパラメータ

地盤	K_0 (tf·m ²)	α	β	M_y (tf·m)
砂質土 (N=5程度)	24.00	8.00	1.08	4.0
粘性土 (N=2程度)	26.19	1.06	1.51	1.4
粘性土+アスファルト舗装	31.43	0.34	1.63	1.2
コンクリート埋込	∞	—	—	—

* 実験結果は細径柱により求められた値であるが標準柱についても適用することとした。

結果にもとづきバイリニア型とし、その骨格曲線を図一3のように設定した。

配電柱と地盤間のバネ特性については、実規模水平繰り返し載荷実験結果²⁾により回転中心を根入れ長の1/2の位置とし、復元力特性はRamberg-Osgood型モデル(式(2))で表し、通常、配電柱が設置される場合の軟らかい地盤としてN値5程度の砂質地盤、ならびにコンクリート中に埋込まれた状態を想定した。また、粘性土(N値2程度)、アスファルト舗装がある場合についても一部検討した。これらの地盤パラメータ値は、実験結果にもとづき表二のように設定した²⁾。

$$\theta = \frac{M}{K_0} \cdot \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{M}{M_y} \right)^\beta \right\} \dots \dots \dots (2)$$

- ここに、 θ : 地盤ばね回転角 (回転中心位置)(°)
- M : 作用モーメント (回転中心位置)(tf·m)
- K_0 : 初期剛性 (tf·m²)
- M_y : 降伏モーメント (tf·m)
- α, β : 形状決定パラメータ

なお履歴法則は、Masing則に従うものとし、減衰定数は既往の研究成果³⁾を参考として配電柱2%、地盤回転ばね5%とした。

(2) 架線

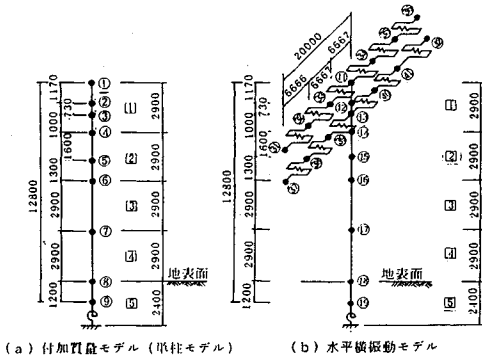


図-4 架線直角方向モデル

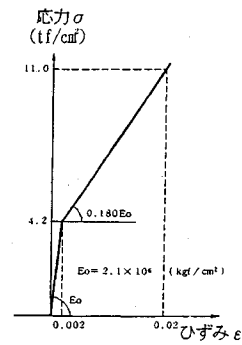


図-6 支線の骨格曲線

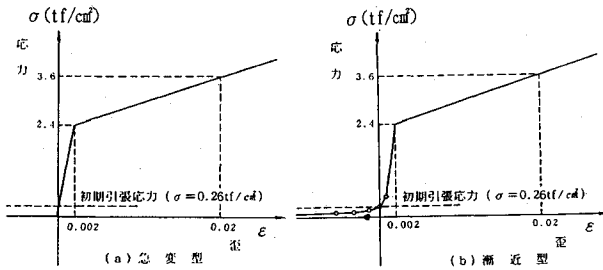
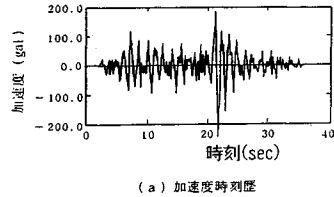
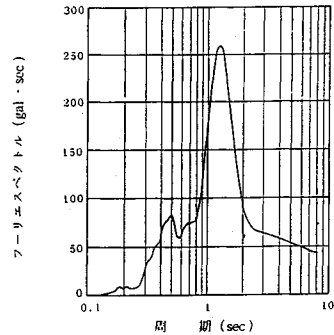


図-5 架線の骨格曲線



(a) 加速度時刻歴



(b) フーリエスペクトル

図-7 入力地震動

架線の及ぼす影響は、配電柱の振動方向により異なることから、架線直角方向と架線方向で架線のモデル化を変えることとした。架線直角方向の挙動は架線の拘束効果が小さいと考えられることから、①架線質量を配電柱に付加した付加質量モデル（以下単柱モデルという）、②架線の横振動を考慮した水平横振動モデルの2ケースを考えた（図-4）。

架線方向の挙動については、架線の拘束効果、架線自身の縦振動による張力変化を考慮し、1スパンを4分割、3質点で離散化し、三連柱および二連柱モデルにより検討した（図-11, 14参照）。架線の復元力特性は、圧縮力が作用した場合の応力～ひずみ関係を考慮してスリップ型とし、弾性領域からスリップ領域への遷移過程を①急変型と②漸近型の2ケースとした（図-5）。なお、架線の減衰定数は1%とした。

(3) 支線

配電柱の支持力を補強するために取りつけられる支線については、支線のたわみ、取付部のゆるみ、アンカーの引抜き変形等も考えられるが、ここでは配電柱の折損に対する危険側の評価としてこれらを無視し、材料変形のみを考慮した。復元力特性は、スリップ型のバイリニアモデルとし、その骨格曲線を図-6に示す。

(4) 入力地震動

配電柱の固有周期が1.0～2.0秒にあることから、長周期成分が卓越している1968年十勝沖地震の室蘭での観測波形（NS方向）を基盤位置にもどし、最大加速度

を200 galに調整したものを基盤入力波形とした。解析に用いた地震動は東京の沖積低地を想定した地盤に対し、1次元重複反射理論で得られた波形を用いた。この加速度時刻歴（ $\alpha_{max} = 244.7$ gal）およびフーリエスペクトルを図-7に示す。

4. 架線直角方向の配電柱の挙動

(1) 単柱モデルによる解析

配電柱の種類、地盤条件を変えて固有値解析、ならびに地震時の配電柱各部の最大加速度、最大変位、最大曲げモーメント、最大剪断力を求めた（表-3、図-8）。その結果

- ① 配電柱の挙動は1次モードが卓越する。
- ② 地盤条件が配電柱の挙動にあたる影響は標準柱よりも細径柱の方が小さい。つまり砂質土では、細径柱も標準柱もあまり変わらないが、コンクリート埋込の場合では、細径柱の応答は、砂質土における

表-3 単柱モデルの固有値解析結果

配電柱の種類	地盤条件	1次			2次		
		固有周期(秒)	制振回数	モーダル減衰(%)	固有周期(秒)	制振回数	モーダル減衰(%)
標準柱	砂質土	1.46	1.42	2.74	0.30	0.50	2.37
	粘性土	1.44	1.42	2.69	0.30	0.50	2.36
	粘性土+アスファルト舗装	1.41	1.42	2.60	0.30	0.50	2.33
	コンクリート埋込	1.16	1.43	2.00	0.25	0.50	2.00
細径柱	砂質土	1.85	1.41	2.47	0.36	0.49	2.27
	コンクリート埋込	1.46	1.42	2.00	0.30	0.49	2.00

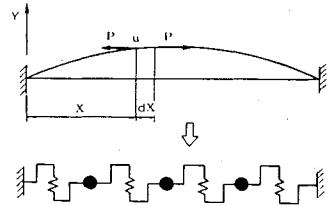


図-9 水平横振動モデルの架線のモデル化

表-4 水平横振動モデルの固有値解析結果

配電柱の種類	地盤条件	1次			2次		
		固有周期(秒)	制振回数	モーダル減衰(%)	固有周期(秒)	制振回数	モーダル減衰(%)
標準柱	砂質土	1.46	1.47	2.37	0.31	-0.65	2.31
細径柱	コンクリート埋込	1.13	1.46	2.00	0.26	-0.76	1.93

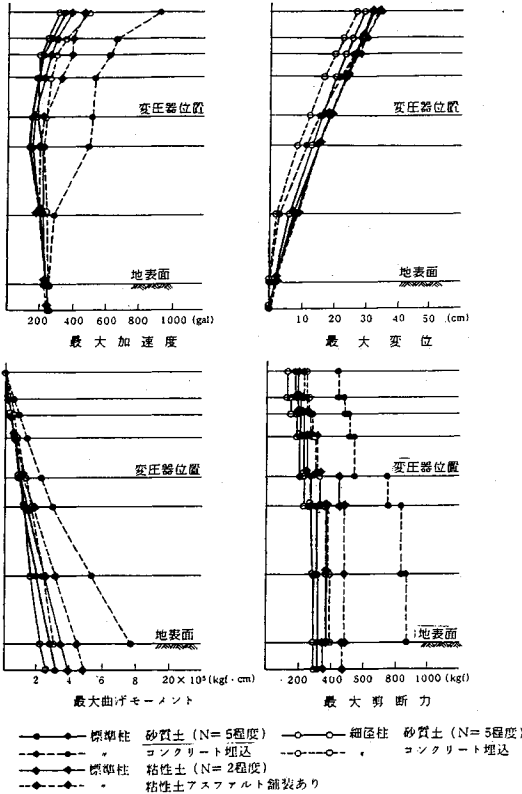


図-8 単柱モデルの解析結果

応答に大きく近づいてくる。

- ③ 粘性土、アスファルト舗装では、各応答値は砂質土とコンクリート埋込のあいだにあり、砂質土に近い結果を示している。

したがって、砂質土およびコンクリート埋込の地盤条件の場合が、液状化などの特殊な場合を除けば配電柱の応答値の最大・最小値を示すものと考えられる。

(2) 水平横振動モデルによる解析

両端で固定され一定の張力で引張られている架線の振動は、次のように表される (図-9)⁶⁾。

$$\frac{P}{A} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{W}{g} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、P:張力 (kgf)
A:架線の断面積 (cm²)

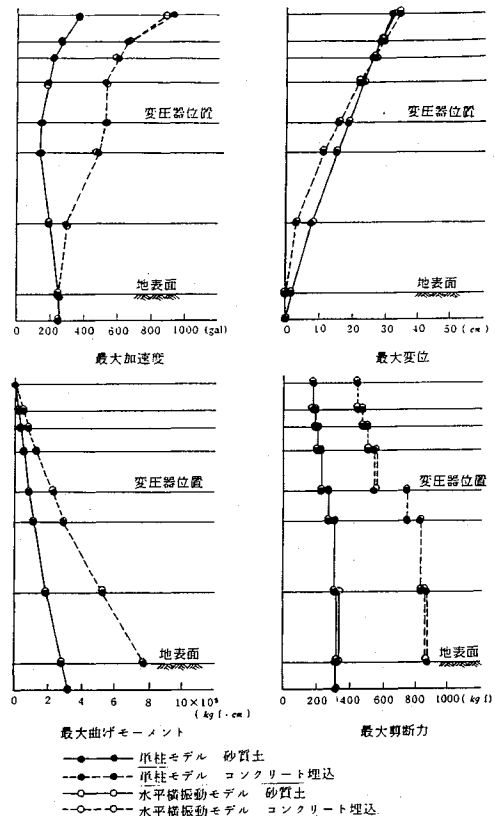


図-10 単柱モデルと水平横振動モデルの結果の比較

- W:架線の単位体積重量 (kgf/cm³)
- g:重力加速度 (=980 cm/sec²)
- u:架線の水平方向変位 (cm)
- x:架線の位置 (cm)
- t:時間 (sec)

となり、剪断波の伝播を表す波動方程式

$$G \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{W}{g} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \dots \dots \dots (4)$$

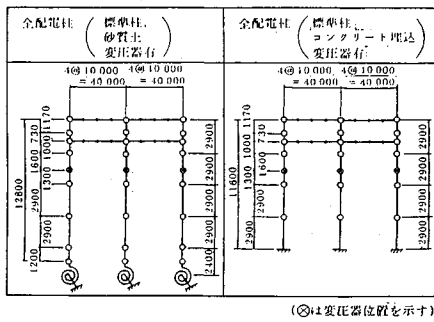


図-11 杉連柱の解析モデル

表-5 架線モデルの差による三連柱の解析結果

地盤	項目	三連柱モデル		単柱モデル	
		急変型	漸近型		
砂質土	1次固有周期 (秒)	1.46 (L0.0)	1.46 (L0.0)	1.46 (L0.0)	
	変圧器部	最大加速度 (gal)	1.47 (L0.2)	1.44 (L0.0)	1.44 (L0.0)
		最大変位 (cm)	18.8 (L0.3)	18.3 (L0.0)	18.4 (L0.1)
	地際部	最大曲げモーメント (tf·m)	2.84 (L0.1)	2.82 (L0.0)	2.79 (L0.99)
		最大剪断力 (kgf)	327 (L0.2)	321 (L0.0)	320 (L0.0)
	架線張力	高圧線 (kgf)	236 (L3.8)	32 (L0.0)	— (—)
		低圧線 (kgf)	38 (L2.2)	9 (L0.0)	— (—)
コンクリート埋込	1次固有周期 (秒)	1.13 (L0.0)	1.13 (L0.0)	1.16 (L0.0)	
	変圧器部	最大加速度 (gal)	5.43 (L0.6)	5.12 (L0.0)	5.28 (L0.3)
		最大変位 (cm)	15.0 (L0.99)	15.2 (L0.0)	15.6 (L0.3)
	地際部	最大曲げモーメント (tf·m)	7.41 (L0.98)	7.58 (L0.0)	7.77 (L0.3)
		最大剪断力 (kgf)	865 (L0.2)	847 (L0.0)	869 (L0.3)
	架線張力	高圧線 (kgf)	860 (L0.0)	88 (L0.0)	— (—)
		低圧線 (kgf)	218 (L0.90)	20 (L0.0)	— (—)

() は漸近型に対する比率

と比較すると、式(4)の剪断剛性 G を P/A で置き換えたものとなっており、架線は剪断剛性を P/A としたばね-質点系に置き換えることができる。

ばね定数は銅線の弾性係数と断面積より、高圧線では $K=172.8$ kgf/cm、低圧線では $K=71.1$ kgf/cm となる。

水平横振動モデルによる標準柱の解析結果を表-4、図-10に示す。この結果によれば架線の支間当りの重量(高圧線 183.6 kgf、低圧線 75.6 kgf)は配電柱の重量の10%程度であるため、架線の水平横振動は配電柱の挙動にほとんど影響を与えず、実用的には単柱モデルでとりあつかうことができる。

5. 架線方向の配電柱の挙動

配電柱の架線方向の挙動に与える架線の拘束効果・振動効果の影響を把握するため、三連柱を基本とした検討を行った。

(1) 架線の遷移過程のモデル化の影響

隣接する配電柱の影響を捉える標準的なケースとして、同一装柱、同一地盤条件の三連柱による解析を行った(図-11)。架線の遷移過程は図-5に示す急変型と漸近型の2ケースとした。中央柱の解析結果の比較を表-

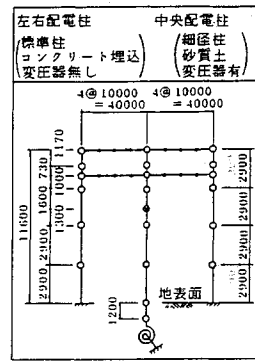


図-12 隣接柱の影響を考慮した三連柱の解析モデル

表-6 中央配電柱の解析結果

項目	急変型	漸近型	
1次固有周期 (秒)	1.21 (L0.0)	1.21 (L0.0)	
変圧器部	最大加速度 (gal)	4.32 (L0.3)	4.21 (L0.0)
	最大変位 (cm)	16.1 (L0.95)	17.0 (L0.0)
地際部	最大曲げモーメント (tf·m)	2.18 (L0.94)	2.29 (L0.0)
	最大剪断力 (kgf)	356 (L0.84)	429 (L0.0)
架線張力	高圧線 (kgf)	543 (L8.6)	292 (L0.0)
	低圧線 (kgf)	79.4 (L3.8)	235 (L0.0)

() は漸近型に対する比率

5に示す。

解析結果によれば、配電柱各部の最大加速度、最大変位、最大曲げモーメント、最大剪断力の値は各モデル間でそれほど差異はなく、架線の張力の検討をするのであれば、どのモデルであっても実用上問題にならない。急変型と漸近型の架線張力の違いは、急変型の解析時間間隔における解の収束性に問題があるためであり、時間間隔が0.01秒程度では急変型の架線張力値は信頼性にかけることを示している。

(2) 隣接柱の影響

(1)では中央配電柱と左右配電柱の条件をまったく同一としたが、ここでは中央配電柱と左右配電柱の挙動が極力異なるような条件を選定し、解析を行った(図-12、表-6、図-13)。

急変型の解析結果は、漸近型の解析結果と比較すると最大加速度、最大変位、最大曲げモーメントについては大き目の結果を示し、最大せん断力については変圧器位置より上部は大き目の値を示すが、それより下部では小さ目の値となっている。また、全体の挙動について見ると最大加速度は、標準柱のコンクリート埋込の単柱モデルに近い結果を示すが、最大変位、最大曲げモーメント、最大剪断力は砂質土の単柱モデルに近い結果を示しており、砂質土あるいはコンクリート埋込の単柱モデルの値を上廻るものは、最大加速度の地際部から4m区間のみである。

(3) 支線の効果

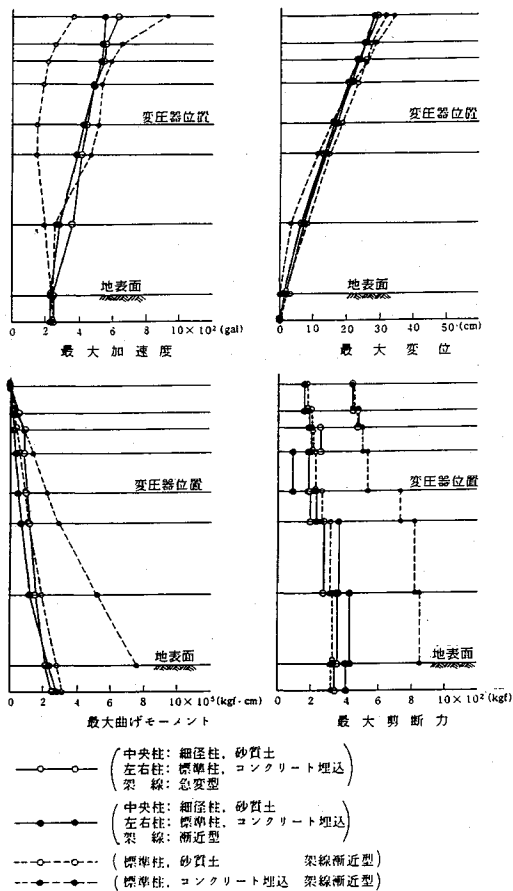


図-13 中央配電柱の最大応答結果

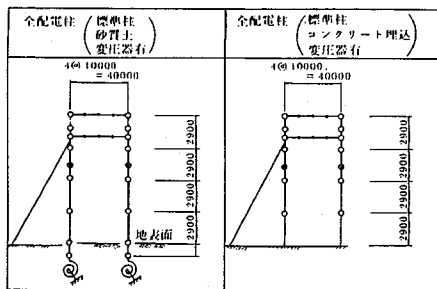


図-14 支線のある二連柱の解析モデル

配電柱の安定性を増すために取り付けられる支線は、架線の拘束効果の1つの極限と考えられるため、支線をもった二連柱の解析を行った(図-14、表-7、図-15)。

解析結果によれば、最大応答加速度が非常に大きくなり、単柱モデルの結果と比較すると2倍~6倍にも達する。この倍率は、地盤が柔らかい場合の方が大きな傾向を示す。また、支線取付部においては、単柱モデルと比較して3~5倍の大きさの剪断力の発生が認められ、たまた地震被害で見られる支線取付部における折損の現象を説明できる。なお、配電柱の終局剪断耐力は2000

表-7 支線のある二連柱の解析結果

項目		地盤条件	砂質土	コンクリート埋込
固有周期 (秒)			0.52 (0.36)	0.50 (0.43)
変圧器部	最大応答加速度 (gal)		8.49 (5.90)	11.68 (2.21)
	最大応答変位 (cm)		4.8 (2.6)	5.7 (3.7)
地際部	最大曲げモーメント (tf·m)		4.33 (0.48)	3.63 (0.47)
	最大剪断力 (kgf)		287 (0.90)	590 (0.68)
支線取付部の剪断力 (kgf)			987 (4.81)	1638 (3.26)

() は単柱モデルに対する比率

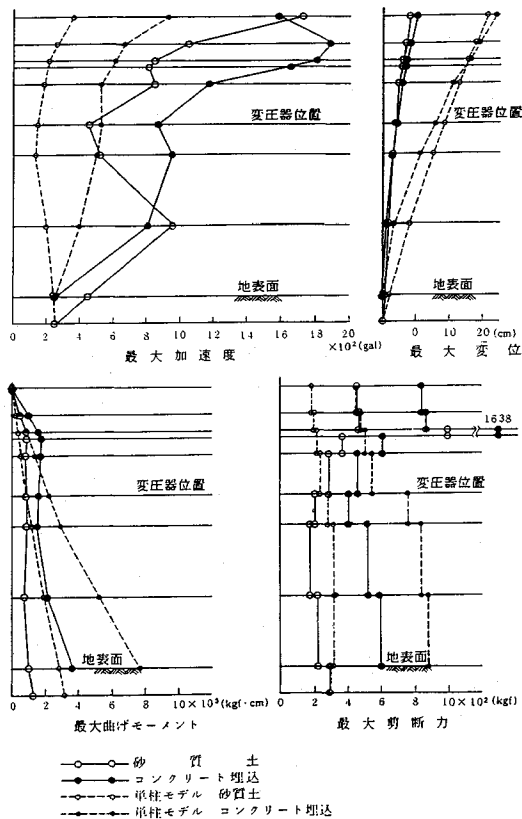


図-15 支線のある配電柱の最大応答値の比較

kgf/本程度である。

(4) 地震動の位相の影響

三連柱、二連柱では各配電柱に同一の地震動が同位相で入力するものとして解析しているが、ここでは極端な場合として各配電柱が逆位相で振動する場合について解析を行った(図-16、図-17)。すなわち、隣接する配電柱に入力される地震動が180°の位相差を持つ場合として1スパン逆位相モデル、同様に90°の位相差を持つ場合として2スパン逆位相モデルを設定した。

解析結果は、1スパン逆位相モデルよりも2スパン逆位相モデルの方が頭部の曲げモーメント、剪断力を除き大きな値を示している。また逆位相モデルの解析結果と単柱モデルの解析結果を比較すると、逆位相モデルの方

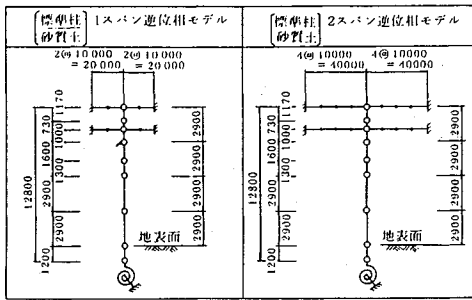


図-16 逆位相モデルの解析条件

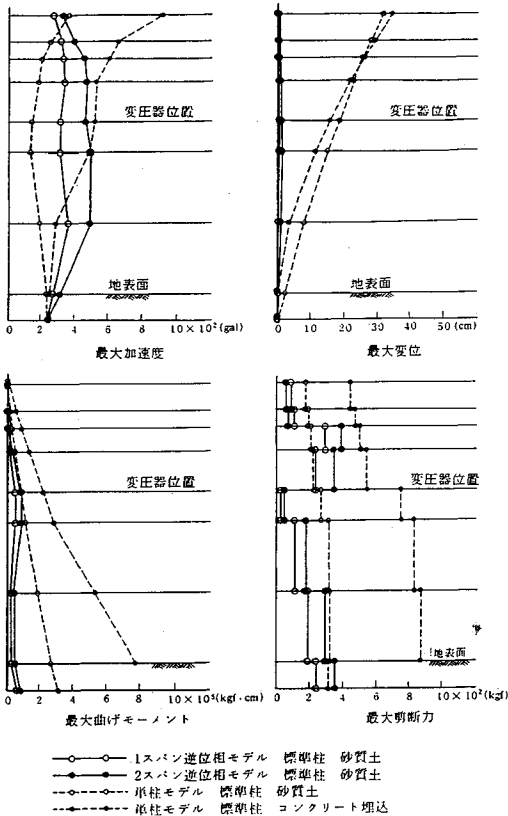


図-17 逆位相モデルの最大応答結果

が大きな値を示すのは地表部から上方4m区間の最大加速度の値のみである。

6. まとめ

配電柱の地震時挙動に及ぼす架線の影響を振動効果と拘束効果として捉え解析により検討を行った。

架線の振動効果のうち水平横振動については、単柱モデルと水平横振動モデルによる解析結果を比較したところ、現状の配電線程度の重量(260kgfで配電柱全体の10%程度)では、配電柱の振動にはほとんど影響をあたえないものと判断される。架線の縦振動については、

その効果を拘束効果と分離することは困難であるが、架線の固有振動数が高いことからその影響もきわめてわずかであると推定される。

架線の拘束効果については、架線方向の検討で架線の復元力特性、隣接柱の地盤ならびに装柱条件の差、支線の有無、入力地震動の位相差の条件を変化させて解析を行った。その結果、架線の復元力特性は漸近型の方が急変型より架線の挙動をよく表している。また、隣接柱の地盤・装柱条件、支線、入力地震動の影響により、配電柱の挙動はおおの異なるが、砂質土あるいはコンクリート埋込の単柱モデルの応答値と比較し、これを上廻るケースは、①隣接柱の地盤・装柱条件の違いでは配電柱下部の最大加速度、②支線がある場合では全体の最大加速度ならびに配電柱上部の最大曲げモーメントと最大剪断力、③入力地震動では配電柱下部の最大加速度に認められる。

配電柱の地震時被害とこれに対応する応答値は、変圧器の傾斜・落下と変圧器位置の最大加速度、配電柱の傾斜・倒壊と最大変位、配電柱の折損と最大曲げモーメント・最大剪断力、の関係にある。

現実の配電柱は、必ずしも平面上直線に配列されているわけではなく、また架線も多方向から取付けられる場合もあり、設置場所の条件によって千差万別である。これら配電柱の地震時被害を推定する場合、おのおのの設置場所の条件を反映し、個々の配電柱を評価することは、その本数が多いことから実務上不可能である。

しかし、ここで行った解析によれば、架線が存在することにより地震時の配電柱被害が増大すると考えられるのは、支線取付部の剪断による折損など特殊な場合のみと推定される。したがって、砂質地盤ならびにコンクリート埋込条件の単柱モデルによる解析結果をもとに、配電柱の地震時被害の発生の可能性を概ね評価することができるものと判断される。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁公益事業部編：電気設備の技術基準 63条風圧荷重の種別とその適用、64条架空電線路の支持物の基礎の安全率 など。
- 2) 桑原他：架空配電設備の震害事例調査および配電柱と地盤の変形特性に関する水平繰り返し載荷実験、土木学会論文集、第427号VI-14、1991年。
- 3) たとえば配電設備の耐震試験、試験結果報告、昭和54年9月 東京電力(株) 社内資料。
増子芳夫：振動台加振実験による各種変圧器装柱の耐震性の検討 昭和54年11月 電力中央研究所報告など。
- 4) 千場良信：電柱～地盤系の振動実験及び解析、昭和57年土木学会年次学術講演会講演概要集
- 5) 土木学会：構造力学公式集、昭和61年版、pp.293-294。
- 6) 小坪清真：土木振動学、森北出版、p.167。

(1991.4.12 受付)

THE INFLUENCE OF THE ELECTRIC WIRES ON THE BEHAVIOR OF THE ELECTRIC POLE DURING AN EARTHQUAKE

Akira HATAKEYAMA, Hiroshi KUWAHARA and Haruo SHIMIZU

The influence of the electric wires on the supporting poles during earthquakes was investigated by the analysis based on the lumped mass model.

The results indicated that the dynamic coupling of the wire and the pole in terms of the nonlinear restraining force imposed on the pole is dominant, and the effect of the vibration of the wire itself is negligible. The degree of the restraining effect is varied in the ground conditions supporting the neighboring poles and so on.

Comparison of these results with that of the single pole without wires indicated that the possible seismic damages in the combined pole and wire system is reasonably predicted by the analysis of the single pole supported on the loose sand or concrete base except for a rare type of the damages by the shear failure in the joint of the anchoring cable.
