

200ガル程度の地震動を受ける各種配電柱の耐震性

桑原 洋*・清水全生**・畠山 昭***

配電柱の固有周期は、配電柱の種類、装柱形式、地盤条件により概ね1.0~2.0秒にある。この範囲の卓越周期成分をもつ地震動は、東京の沖積低地で発生する可能性があり、配電柱の耐震安全性が問題となる。各種配電柱の折損、倒壊、変圧器の落下に対して実験結果に基づいた耐震評価基準を設定し、最大加速度200ガル程度の上記の地震動に対して適用したところ、特殊な条件では地震被害が考えられるが、一般的な条件では地震被害は生じないものと判断された。

Keywords : electric pole, natural period, nonlinear lumped mass model, earthquake damage

1. はじめに

市民生活を支えるライフラインの中で電力施設は地震後の復旧が早いことは一般に認められている。しかし、日常生活に占めるエネルギーのうち電気にたよる比重がますます大きくなっていること、また電気の貯蔵ができないことから復旧時間を極力短くすることが望まれている。配電柱の耐震性については、過去の地震被害事例をもとに研究や検討が進められ、その結果、最近では被害件数はずっと少なくなってきた。

ロマプリータ地震(1989年10月)では地震直後に需要家140万件が停電したが、48時間後には2.6万件を残すだけであった。サンフランシスコ市全域に停電がおよんだ最大の原因は、電源系統が半島の根元から先端に向けて放射状となっており、これらの地域への電力供給のなかめである変電所が被害を受けたためである¹⁾。配電設備は我国の規格とは異なるが、柱上変圧器の落下や油漏れが約150個のほか、数は不明であるが電柱の倒壊・傾斜も見られた¹⁾。

一般に、配電柱は電気設備技術基準²⁾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定されていることから、個別の地震被害形態に対する評価基準が必ずしも明確になっていない。

ここでは、配電設備の地震被害のうち停電につながり、復旧に多くの時間と労力が必要となる配電柱の折損、倒壊・傾斜、変圧器の落下に対する耐震性の評価基準を示した。さらに配電柱の種類、装柱形式、地盤条件を考慮し、配電柱と地盤の連成振動モデルを設定し、供給安定

表-1 地盤の物性値

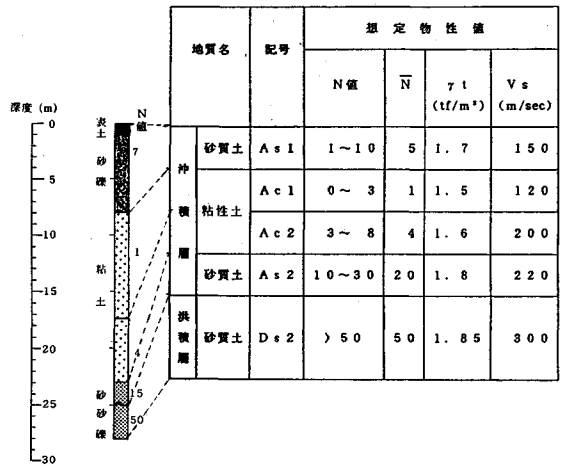


図-1 ボーリング柱状図

性の確保の観点から最低限必要と判断される200gal程度の地震動に対して解析的に耐震性を評価した。

2. 検討に用いる地震動

配電柱の固有周期は、配電柱の種類、地盤条件により異なるが、概ね1.0~2.0秒のあいだにあることから地表面地震動の卓越周期がこれに対応するものを選定することとする。

(1) 東京の沖積低地に想定される地震動

検討に用いる地震動は、当該地点において大きな加速度観測記録がないことから、次元重複反射理論により想定される地表面地震動を算出することとした。表層地盤は、東京沖積低地のうち沖積層厚が厚い場合と平均的な場合³⁾について地震応答解析を行った結果、卓越周期はいずれも1.2秒であったが沖積層の厚さが平均的な場合の方が地表面加速度値が大きいことから図-1の柱状

* 正会員 東京電力(株) 送変電建設所副所長 (〒170 豊島区東池袋 1-25-8)

** 正会員 佐藤工業(株) 技術本部長

*** 正会員 東京電力(株) 建設部課長

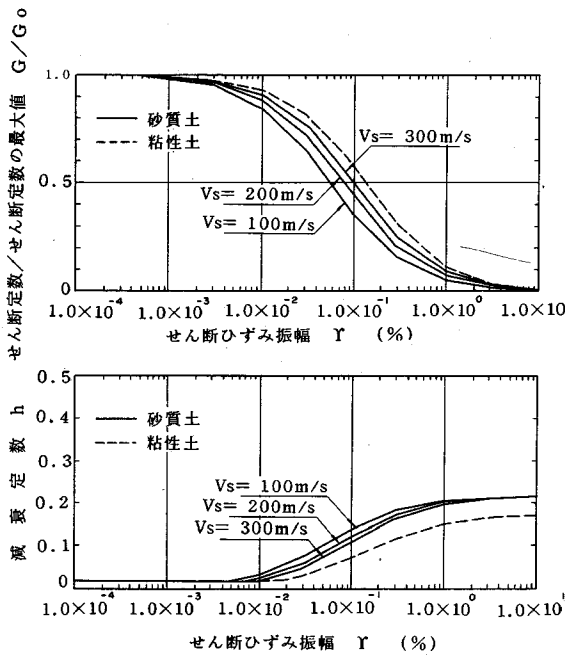
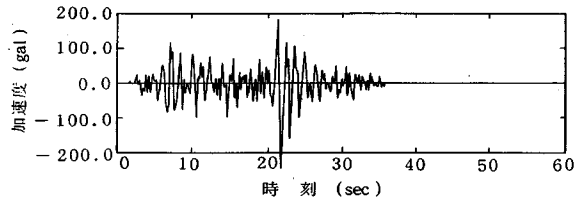
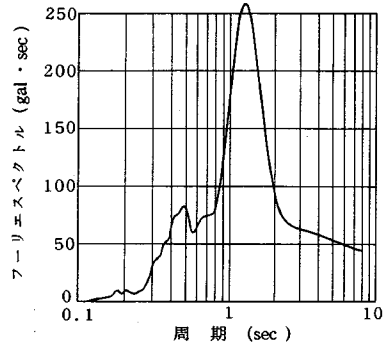


図-2 地盤の動的変形特性



(a) 地表面加速度時刻歴 (α max=244.7 gal)



(b) フーリエスペクトル

図-4 東京沖積低地に想定される地震動(地表面)

| 深さ (m) | 層厚 (m) | 土質 | Vs (m/sec) | Go (tf/m ²) | Y (tf/m ²) | 最大応答 | | | | |
|-----------|-----------|----|---------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-----------|--|
| | | | | | | 最大応答加速度 (cm/sec ²) | 最大応答変位 (cm) | 最大せん断応力 (kgf/cm ²) | Y max (%) | |
| 8.00 | 8.00 | 砂 | 150 | 3903 | 1.70 | 0 | 7.66 | 0.021 | 0.005 | |
| | | | | | | 245 | 7.65 | 0.021 | 0.019 | |
| | | | | | | 244 | 7.64 | 0.021 | 0.019 | |
| | | | | | | 243 | 7.63 | 0.021 | 0.019 | |
| | | | | | | 242 | 7.62 | 0.021 | 0.019 | |
| | | | | | | 241 | 7.61 | 0.021 | 0.019 | |
| | | | | | | 240 | 7.60 | 0.021 | 0.019 | |
| | | | | | | 239 | 7.59 | 0.021 | 0.019 | |
| | | | | | | 238 | 7.58 | 0.021 | 0.019 | |
| | | | | | | 237 | 7.57 | 0.021 | 0.019 | |
| 17.50 | 9.50 | 粘土 | 120 | 2200 | 1.50 | 170 | 6.22 | 0.326 | 0.457 | |
| | | | | | | 156 | 5.18 | 0.361 | 0.589 | |
| | | | | | | 180 | 3.95 | 0.384 | 0.690 | |
| | | | | | | 189 | 2.58 | 0.399 | 0.774 | |
| | | | | | | 204 | 1.04 | 0.407 | 0.823 | |
| | | | | | | 206 | 0.444 | 0.448 | 0.102 | |
| | | | | | | 204 | 0.93 | 0.468 | 0.110 | |
| | | | | | | 203 | 0.80 | 0.494 | 0.119 | |
| | | | | | | 200 | 0.62 | 0.520 | 0.129 | |
| | | | | | | 200 | 0.53 | 0.544 | 0.137 | |
| 26.00 | 3.00 | 砂 | 220 | 8900 | 1.80 | 197 | 0.38 | 0.153 | 0.119 | |
| | | | | | | 189 | 0.38 | 0.153 | 0.119 | |
| | | | | | | 185 | 0.14 | 0.188 | 0.128 | |
| | | | | | | 185 | 0.14 | 0.188 | 0.128 | |
| | | | | | | 185 | 0.14 | 0.188 | 0.128 | |
| | | 砂礫 | 300 | 16990 | 1.85 | 185 | 0.14 | 0.188 | 0.128 | |
| | | | | | | 185 | 0.14 | 0.188 | 0.128 | |
| | | | | | | 185 | 0.14 | 0.188 | 0.128 | |
| | | | | | | 185 | 0.14 | 0.188 | 0.128 | |
| | | | | | | 185 | 0.14 | 0.188 | 0.128 | |

図-3 東京沖積低地の地震応答解析結果

図を採用した。なお、地盤物性値は表-1に示す値を採用した⁴⁾。動的物性値の歪依存特性は、東京湾岸の軟弱層の広い範囲での調査結果にもとづき図-2のように設定した。基盤入力波形は、卓越周期の長い1968年5月16日の十勝沖地震の室蘭波を基盤位置にもどし、地震工学的基盤面での最大加速度を200 galとしたものを用いた。

ここで、配電設備全体はネットワークを形成し、一部地域の被害に対しても迂迴して電力供給が可能なこと、個々の配電柱は、設置個所、装柱形式の条件により耐震性が大きく異なることから最低限の耐震性を確保する観点から200 galを設定した。

地震応答解析結果ならびに地表面時刻歴波形とその

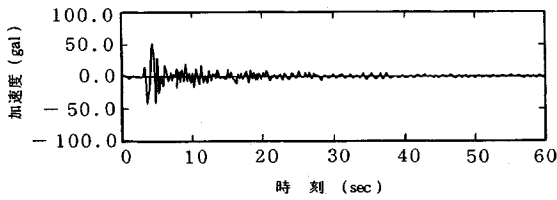
表-2 K変電所の観測記録

| 地震番号 | 日時 | 地表面最大加速度 (gal) | | 卓越周期 (秒) | | | |
|------|---------|----------------|------|----------|------|------|------|
| | | X | Y | X | | Y | |
| | | | | 長周期側 | 短周期側 | 長周期側 | 短周期側 |
| 1 | 80.9.24 | 11.6 | - | 1.15 | 0.30 | - | - |
| 2 | 82.7.23 | 15.3 | - | 1.26 | 0.37 | - | - |
| 3 | 82.8.12 | 6.8 | - | 1.17 | 0.25 | - | - |
| 4 | 83.2.27 | 51.7 | - | 1.17 | 0.41 | - | - |
| 5 | 83.8.8 | 13.4 | - | 1.20 | 0.43 | - | - |
| 6 | 84.1.1 | 15.3 | 18.6 | 1.19 | 0.43 | 1.32 | 0.31 |
| 7 | 84.2.14 | 4.3 | 5.7 | 1.15 | 0.34 | 1.20 | 0.38 |
| 8 | 84.3.6 | 22.8 | 15.4 | 1.31 | 0.47 | 1.41 | 0.41 |
| 9 | 85.10.4 | 46.0 | 67.6 | 0.95 | 0.41 | 1.19 | 0.41 |

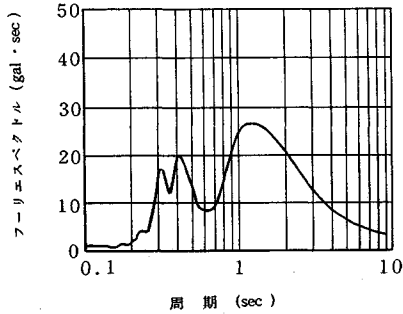
下線は最も卓越する周期を示す。

フーリエスペクトルを図-3、図-4に示す。

なお、沖積低地における実地震波の卓越周期として、江東区のK変電所において観測された地表面地震動の



(a) 加速度時刻歴



(b) フーリエスペクトル

図-5 K変電所観測例(地震番号4)

表-3 加速度, 速度, 変位の最大値 (SCT地点, EW方向)

| | 加速度 (gal) | 速度 (cm/sec) | 変位 (cm) | 卓越周期 (秒) | 最大応答加速度 (h=0.05) (gal) |
|-----|-----------|-------------|---------|----------|------------------------|
| 最大値 | 168.0 | 62.9 | 22.5 | 2.1 | 983 |

一例を表-2に示す。この表より、各観測波形の卓越周期は、概ね長周期側で1.0~1.4秒、短周期側で0.30~0.45秒であり、1.2秒前後の波形が多く、前述の想定地震動の卓越周期と同様な値となっている。この加速度時刻歴およびフーリエスペクトルの一例を図-5に示す。

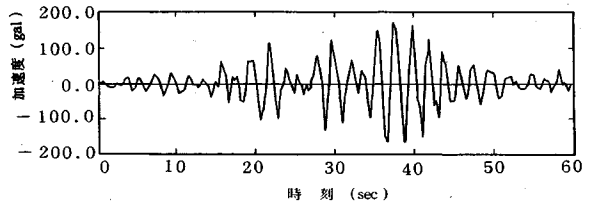
(2) メキシコ地震波

1985年9月19日に発生したメキシコ地震では震源からはるか離れたメキシコ市の軟弱地盤上で卓越周期2.0秒前後の周期の長い地震動が観測されている。

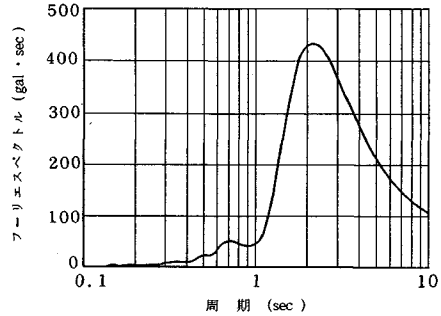
市内の軟弱地盤のSCT地点EW方向で観測された地震記録の加速度, 速度, 変位の最大値を表-3に、加速度波形, フーリエスペクトルを図-6に示す⁹⁾。

この地震動の特徴としては、

- ① 卓越周期が2.0秒程度と長く、国内で観測されている地震動に比べて速度, 変位が大きい。
- ② 地震動の継続時間は60秒以上であり、このうち主要動だけでも30秒以上となっており、継続時間が長い。
- ③ 観測された地表面地震動の応答加速度SA(減衰定数h=0.05)は、卓越周期2.1秒、最大値983galとなり、固有周期2.0秒程度の構造物に対して大きな破壊力を有する。



(a) 加速度時刻歴



(b) フーリエスペクトル

図-6 メキシコ地震動 (SCT地点, EW方向)

であるが、このような特異な地震動が発生した要因はメキシコ市の地形・地質条件によると言われており⁹⁾、東京近辺では同様の地震波形の発生の可能性はほとんど考えられないが、波形の違いの影響を見るため検討に用いることとした。

3. 解析モデルと解析方法

配電柱の耐震性を評価するため配電柱と地盤の連成振動モデルを設定し、地震応答解析を行うことにより、地震時被害(配電柱の折損, 倒壊・傾斜, 変圧器の落下)を推定する。

解析にあたっては、配電柱の種類, 機器・架線の装柱形式, 地盤条件, 入力地震動をパラメータとした。

(1) 配電柱の種類・装柱形式

配電柱の種類は、一般に広く用いられているプレストレストコンクリート製で、長さ14m、設計曲げ強度500kgf/本のコンクリート標準柱、標準柱と長さ・強度が同一で狭い道路に適用される外径の小さい細径柱、今後市街地で使用が増すことになるプレストレストコンクリート製で、長さ12m、設計曲げ強度800kgf/本のコンパクト柱および長さ12m、設計曲げ強度700kgf/本の鋼管柱とした。ここで、設計曲げ強度は電気設備技術基準²⁾では片持梁の曲げ試験による柱頭水平荷重で示され、曲げ強度に対して、2倍の安全率をもつように規定されている。

配電柱の装柱は、高圧線, 低圧線, 変圧器など種々の付加物で構成されており、現状の装柱形式は長い間の技術開発, 改良を経て、設置箇所の条件に応じて、種々の

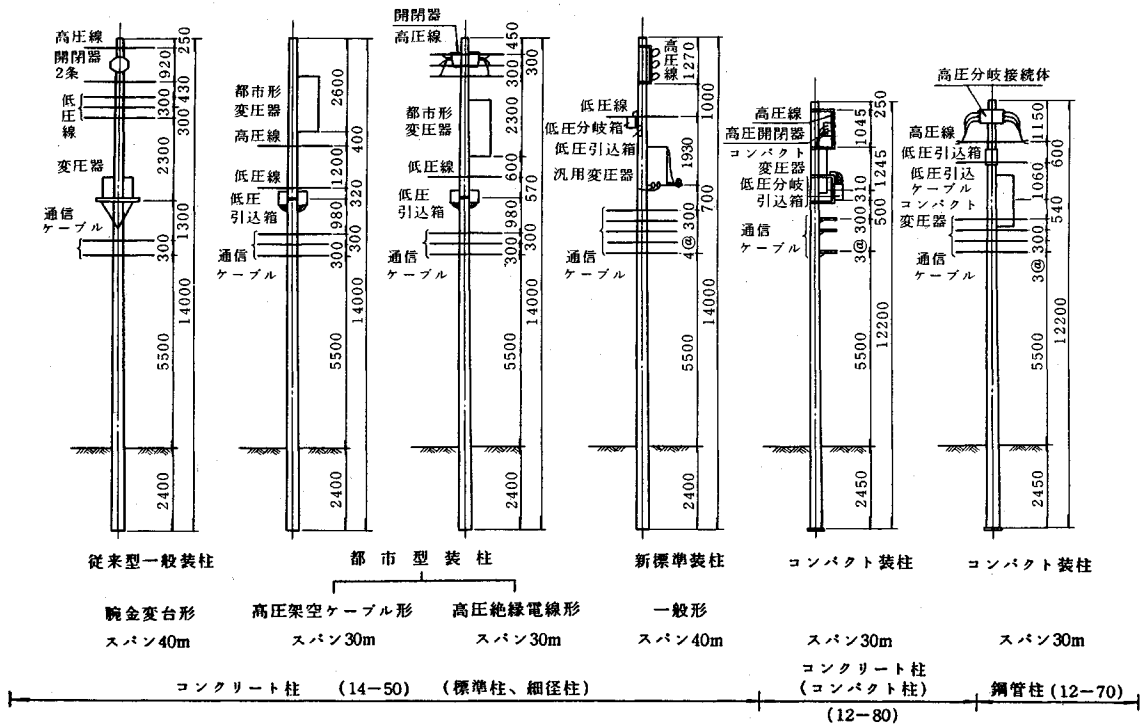


図-7 配電柱の種類・装柱形式

表-4 各地盤のパラメータ

| 種 別 | $K\theta$ (tf・m/度) | α | β | M_y (tf・m) |
|--------------------|--------------------|----------|---------|--------------|
| コンクリート柱：砂質土 | 24.00 | 8.00 | 1.08 | 4.0 |
| コンクリート柱：粘性土 | 26.19 | 1.06 | 1.51 | 1.4 |
| コンクリート柱：舗装 | 31.43 | 0.34 | 1.63 | 1.2 |
| 鋼管柱：砂質土 | 22.00 | 10.89 | 1.25 | 3.7 |
| 鋼管柱：粘性土 | 27.50 | 0.54 | 1.68 | 1.2 |
| コンクリート鋼管柱：コンクリート埋込 | ∞ | - | - | - |

組み合わせにより成っている。ここでは、現状の代表的なものとして、従来型一般装柱, 都市型装柱の高圧架空ケーブル形, 高圧絶縁電線形, 新標準装柱およびコンパクト装柱とした。

検討の対象とした配電柱の種類, 装柱形式を図-7に示す。

(2) 地盤条件

配電柱の支持地盤条件は、電柱の折損に厳しい結果をあたえるコンクリート埋込と倒壊・傾斜について厳しいN値5程度の砂質土を基本とし、必要に応じてN値2程度の粘性土、ならびに粘性土(N値=2程度)+アスファルト舗装とした。

配電柱の根入れ部は全長の1/6と少なく、質量も小さい。また、変圧器などの機器を装柱しておりトップヘビーな構造となっているため根入れ部の復元力特性は回転が卓

越すると考え、実規模載荷実験の結果⁷⁾より Ramberg-Osgood型モデルを採用した。なお、履歴法則は Mas-ing 則に従うものとした。各地盤のパラメータ値を表-4に示す。

また、地盤ばねの回転中心位置は上述の実験結果より地表面から根入れ長さの1/2~2/3の範囲にあったが、安全側を考慮し1/2の位置とした⁸⁾。

(3) 入力地震波

2. で述べた地表面加速度波形を用いた。ここで東京の沖積低地に想定される地震波を想定地震動A, メキシコ地震波を想定地震動Bとする。

(4) 解析方法

配電柱の耐震性は、支線取付部の剪断による折損など特殊な場合を除けば、架線方向および架線直角方向のいづれにおいても配電柱の架線による拘束および振動効果

● 基本質点 ○ 付加質量

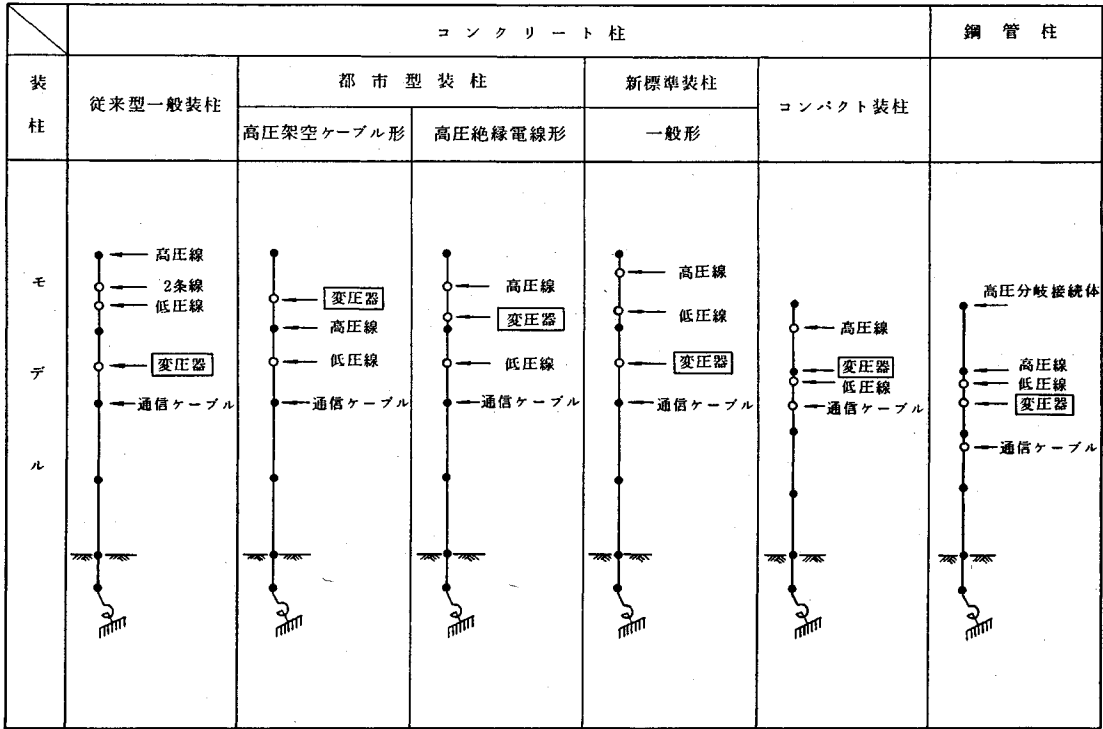


図-8 配電柱のモデル化

表-5 不平均張力の値

| 振れ角 | 作用位置 | 不平均張力 (kgf) |
|---------|------|-------------|
| 5° の場合 | 高压線 | 100 |
| | 低压線 | 41 |
| 15° の場合 | 高压線 | 300 |
| | 低压線 | 124 |

の影響は少なく、架線や変圧器などの付加荷重を質点で置き換えた単柱モデルにより評価できる⁹⁾ことから図-8に示す多質点モデルを採用した。

減衰定数は⁹⁾、既往の研究成果をもとにプレストレストコンクリート柱2%、鋼管柱1%、地盤回転ばね5%とした。

また、架線の平面的な屈曲に伴い常に一方向から架線張力を受けている角度柱についても解析を行った。解析モデルは単柱モデルと同じであるが、架線の振れ角度に応じた不平均張力を架線取付け位置に作用させた。

振れ角度としては軽度な5°の場合と支線・支柱の補強が必要とならない最大角15°の場合の2ケースを想定した。不平均張力値を表-5に示す。

4. 耐震性評価基準

耐震性の評価項目は、電力の供給ならびに公衆安全にかかわる配電柱の折損、倒壊・傾斜ならびに変圧器の落下とし、解析結果を曲げ強度実験、実規模載荷実験の結

果や既往の研究成果と対比することにより表-6の評価基準を設定した。

ここで、配電設備には設置箇所、配置方式、装柱形式、および地盤条件など様々な場合があり、それらの全てについて、地震応答解析を行うことは適切とは言えない。

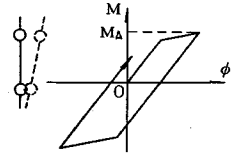
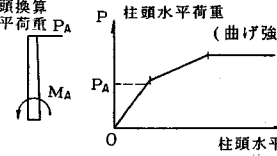
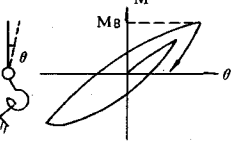
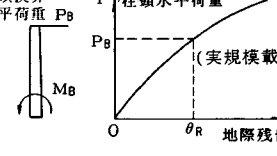
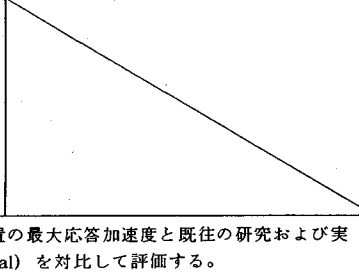
さらに、前述のとおり現状はその影響が大きい氷雪、風圧および電線の不平衡張力により静的に耐力が規定されていることなどを考慮し、耐震性の評価値を静的な柱頭水平荷重に換算している。

具体的には、配電柱の折損については、地震応答解析で得られた地際部の最大曲げモーメントを柱頭水平荷重に換算し、曲げ強度実験の結果と対比している。曲げ強度の実測結果の一例を表-7に示す。傾斜については、同様に柱頭水平荷重が作用したときの部材の弾性変形分を除いた残留傾斜角で評価し、先に実施した実規模載荷実験結果との対比を行っている。なお、傾斜の制限値を既往の研究成果より15°としている。

さらに、変圧器については、規定どおりに設置された場合には既往の振動台実験結果で変圧器に作用する加速度が1200 gal以下では落下を生じないことが確認されている¹⁰⁾。

なお、上記の柱頭水平荷重の算定には配電柱の固有周期に近い卓越周期をもつ地震波を用い、その応答も各次モードを合成した最大値を採用して、評価を行っている。

表—6 耐震性の評価基準

| 被害形態 | 地震応答解析結果 | | 実験結果との対応 | | |
|--|------------------|--|--|------------------|--|
| | 折損 |  <p>地際部の作用曲げモーメントと曲率の関係</p> |  <p>柱頭換算水平荷重 P_A</p> <p>柱頭水平荷重 (曲げ強度実験)</p> | 柱頭水平荷重と柱頭水平変位の関係 | |
| | | 地震応答解析で得られた最大応答曲げモーメント M_A と等価な柱頭換算水平荷重 P_A に対して強度試験結果のひびわれ荷重、破壊荷重と比較して評価する。 | | | |
| | 倒壊・傾斜 |  <p>回転中心位置の作用曲げモーメントと傾斜角の関係</p> |  <p>柱頭換算水平荷重 P_B</p> <p>柱頭水平荷重 (実規模載荷実験)</p> | 柱頭水平荷重と残留傾斜角の関係 | |
| 地震応答解析で得られた回転中心位置の最大応答モーメント M_B と等価な柱頭換算水平荷重 P_B に対して、実規模載荷実験の柱頭水平荷重と地際残留傾斜角の関係より地際傾斜角 (θ_R) を求め、変圧器の絶縁性能から決まる限界傾斜角 (15°) と対比して評価する。 | | | | | |
| 変圧器の落下 | 変圧器位置における最大応答加速度 | |  <p>地震応答解析で得られた変圧器位置の最大応答加速度と既往の研究および実験より得られた非落下加速度 (1200gal) を対比して評価する。</p> | | |

表—7 配電柱の曲げ強度の一例

(1) 標準柱

| 曲げ強度 (kgf) | 平均 | 標準偏差 |
|------------|------|------|
| 1 | 1207 | 88.8 |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |
| 6 | | |
| 7 | | |

(2) 細径柱

| 曲げ強度 (kgf) | 平均 | 標準偏差 |
|------------|------|------|
| 1 | 1196 | 26.5 |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |

表—8 各配電柱の1次固有周期

| 配電柱のタイプ | 1次固有周期 (sec) | | | | | |
|--------------------|--------------|-----------|----------|---------|------|------|
| | 地盤条件 | | | | | |
| 配電柱の種類 | 装柱形式 | コンクリート埋込 | 7/7フット舗装 | 粘性土 砂質土 | | |
| コンクリート標準柱 (14-50) | 従来形一般装柱 | 1.16 | 1.41 | 1.44 | 1.46 | |
| | 都市型装柱 | 高圧架空ケーブル形 | 1.30 | - | - | 1.64 |
| | | 高圧絶縁電線形 | 0.93 | - | - | 1.50 |
| | 新標準装柱一般形 | 1.10 | - | - | 1.55 | |
| コンクリート細径柱 (14-50) | 従来形一般装柱 | 1.46 | 1.83 | 1.84 | 1.85 | |
| | 高圧架空ケーブル形 | 1.62 | - | - | 1.94 | |
| コンクリートコア外柱 (12-80) | - | 1.11 | - | - | 1.42 | |
| 鋼管柱 (12-70) | - | 0.83 | - | 1.21 | 1.23 | |

表—9 地震応答解析結果

| 配電柱のタイプ | 地盤条件 | 想定地震動A $\alpha \max = 244.7 \text{ gal}$ | | 想定地震動B $\alpha \max = 168 \text{ gal}$ | | | | | |
|----------------------|-----------|---|----------------------|---|-------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 柱頭換算水平荷重 (kgf) | 地際残留傾斜角 ($^\circ$) | 変圧器最大応答加速度 (gal) | 変圧器地際残留傾斜角 ($^\circ$) | | | | |
| コンクリート標準柱 (14-50) | 従来形一般装柱 | 砂質土 | 246 | 0.8 | 144 | 404 | 2.7 | 243 | |
| | | 粘性土 | 302 | 1.0 | 159 | - | - | - | |
| | | アスファルト | 385 | 0.8 | 222 | - | - | - | |
| | 都市型装柱 | コンクリート埋込 | 684 | - | 528 | 371 | - | 259 | |
| | | 高圧架空ケーブル形 | 砂質土 | 233 | 0.7 | 177 | 408 | 2.8 | 302 |
| | | コンクリート埋込 | 734 | - | 576 | 424 | - | 278 | |
| | | 高圧絶縁電線形 | 砂質土 | 231 | 0.6 | 146 | 405 | 2.7 | 267 |
| | | コンクリート埋込 | 707 | - | 466 | 431 | - | 260 | |
| | | 新標準装柱 | 砂質土 | 239 | 0.7 | 144 | 413 | 2.9 | 226 |
| | | 一般形 | コンクリート埋込 | 740 | - | 376 | 424 | - | 253 |
| コンクリート細径柱 (14-50) | 従来形一般装柱 | 砂質土 | 199 | 0.4 | 180 | 327 | 1.6 | 201 | |
| | | 粘性土 | 225 | 0.6 | 182 | - | - | - | |
| | | アスファルト | 256 | 0.4 | 187 | - | - | - | |
| | 高圧架空ケーブル形 | コンクリート埋込 | 271 | - | 232 | 635 | - | 476 | |
| | 高圧架空ケーブル形 | 砂質土 | 183 | 0.3 | 147 | 321 | 1.5 | 241 | |
| コンクリートコンパクト柱 (12-80) | — | コンクリート埋込 | 314 | - | 253 | 676 | - | 473 | |
| | | 砂質土 | 302 | 1.6 | 204 | - | - | - | |
| 鋼管柱 (12-70) | — | コンクリート埋込 | 725 | - | 539 | - | - | | |
| | | 砂質土 | 268 | 1.1 | 256 | 377 | 2.4 | 357 | |
| | | 粘性土 | 393 | 1.2 | 380 | - | - | - | |
| コンクリート埋込 | 600 | - | 484 | 272 | - | 250 | | | |

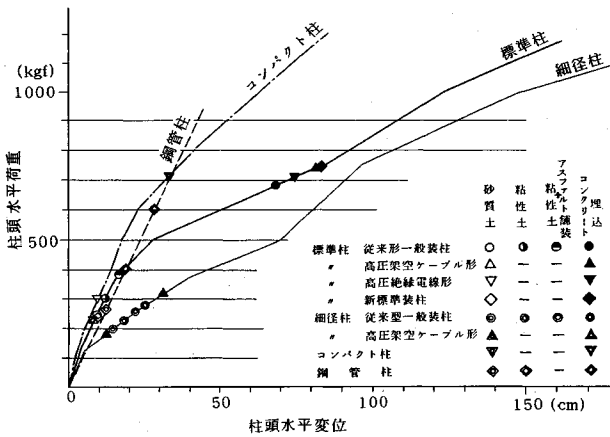


図-9 (a) 曲げ強度実験による柱頭水平荷重と柱頭水平変位 (想定地震動 A)

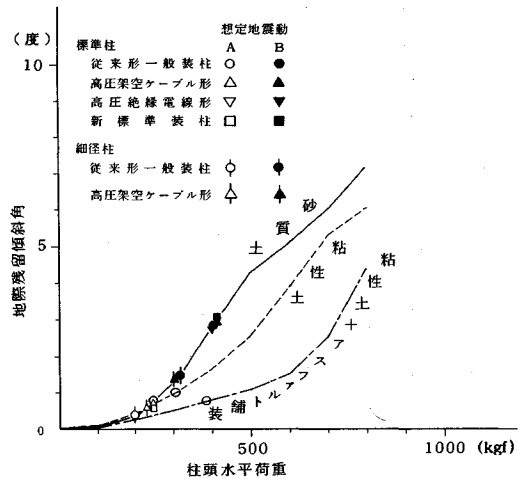


図-10 (a) 実規模裁荷実験による柱頭水平荷重と地際残留傾斜角の関係

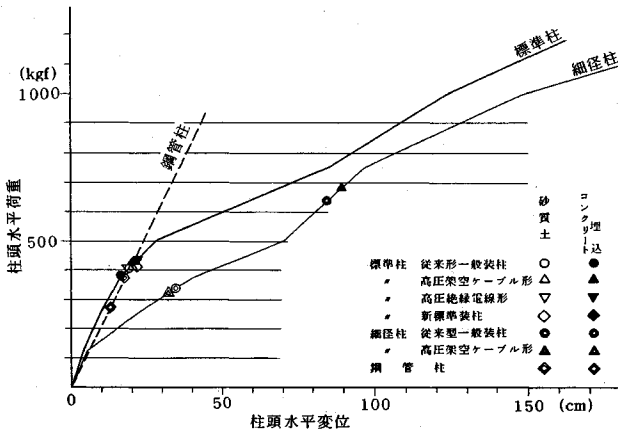


図-9 (b) 曲げ強度実験による柱頭水平荷重と柱頭水平変位 (想定地震動 B)

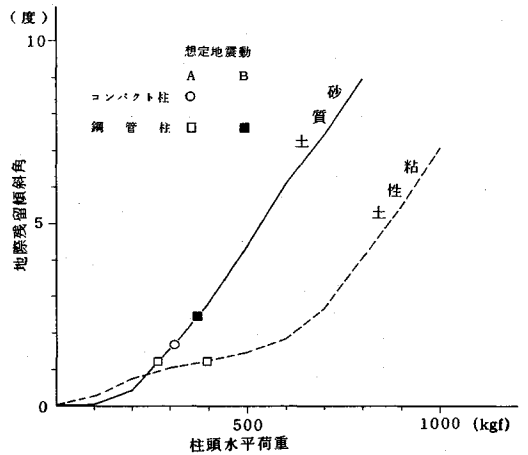


図-10 (b) 実規模裁荷実験による柱頭水平荷重と地際残留傾斜角の関係

5. 解析結果と耐震性の分析・評価

(1) 解析結果

各配電柱の種類、装柱形式、地盤条件に対する固有周期は表-8のとおりであり、装柱形式や地盤条件よりも配電柱の種類による影響が大きく、コンクリート埋込の条件で標準柱では0.93~1.30秒、細径柱では1.46~1.62秒、コンパクト柱では1.11秒、鋼管柱では0.83秒程度となっている。N値=5程度の砂質土条件では、それぞれ1.46~1.64秒、1.85~1.94秒、1.42秒、1.23秒である。N値2程度の粘性土の条件では、地盤の初期剛性がN値5程度の砂質土より若干大きくなるので固有周期は砂質土よりわずかに小さめの値となる。また、アスファルト舗装は固有周期を大きくは変えないことを示している。

地震応答解析結果のうち、地盤部作用最大曲げモーメントより算出される柱頭換算水平荷重、配電柱の残留傾

斜角、変圧器に作用する最大応答加速度を表-9に示す。また、図-9,10には曲げ強度実験結果ならびに実規模裁荷実験結果により得られた柱頭水平荷重と柱頭水平変位の関係、柱頭水平荷重と地際残留傾斜角の關係に表-9に示す地震応答解析より算定した柱頭換算水平荷重をプロットしたものを示す。

表-9の解析結果は、配電柱のタイプ・地盤条件による固有周期と入力地震動の卓越周期の關係で異なり、想定地震動Aの場合、柱頭換算水平荷重と比較すると、砂質土からコンクリート埋込までの条件の違いにより、標準柱で231 kgf~740 kgf、コンパクト柱で302 kgf~725 kgf、鋼管柱で268 kgf~600 kgfと地盤条件の影響が大きい。一方、細径柱では、地盤条件の影響は小さい。一方、想定地震動Bでは細径柱で321 kgf~676 kgfと大きく異なるが、標準柱では地盤条件によらずいずれも同程度

表—10 一方向張力モデルの解析結果

(1) 変圧器位置の最大応答加速度，応答変位と地際残留傾斜角度

| 項目 | 振れ角度 | 一方向架線張力モデル A | 単柱モデル C | 比率 A/C |
|-------------|------|--------------|---------|--------|
| 応答加速度 (gal) | 5° | 138 | 144 | 0.96 |
| | 15° | 163 | 144 | 1.13 |
| 応答変位 (cm) | 5° | 26.2 | 18.4 | 1.42 |
| | 15° | 34.6 | 18.4 | 1.88 |
| 地際残留傾斜角 (°) | 5° | 1.58 | 0.95 | 1.66 |
| | 15° | 2.41 | 0.95 | 2.53 |

(2) 断面力の比較 (地際部)

| 項目 | 振れ角度 | 断面力 | | | 単柱モデル C | 比率 A+B/C |
|----------------|------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|
| | | 地震時付加 A | 常時 B | 合計 A+B | | |
| 曲げモーメント (tf・m) | 5° | 2.40 (212) | 1.56 (137) | 3.96 (349) | 2.79 (246) | 1.42 |
| | 15° | 2.02 (178) | 4.68 (412) | 6.70 (590) | 2.79 (246) | 2.40 |

() 内柱頭換算水平荷重 (kgf)

の値を示している。

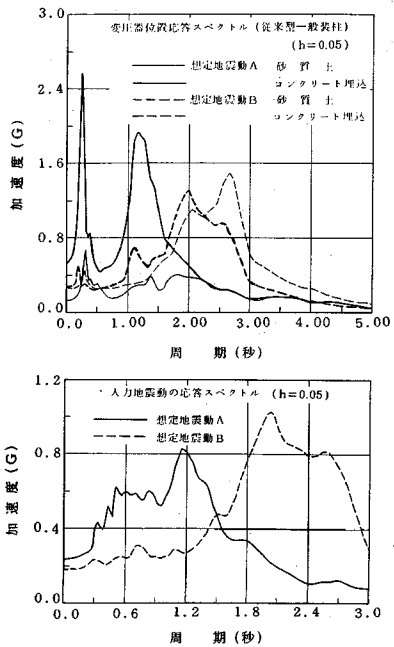
ここで、表—9 に示す応答結果のうち最大値は、柱頭換算水平荷重では、標準柱新標準装柱のコンクリート埋込条件で想定地震動 A における 740 kgf、地際残留傾斜角は標準柱新標準装柱の砂質土条件で想定地震動 B の 2.9°、変圧器最大応答加速度は標準柱都市型装柱高圧架空ケーブル形、コンクリート埋込条件で想定地震動 A の 576 gal である。

一方向架線張力モデルの結果は表—10 に示すとおりであり、コンクリート標準柱、従来型一般装柱の砂質土地盤で、振れ角が 5° の場合には単柱モデルの 1.6 倍程度まで、振れ角が 15° の場合には、2.5 倍程度まで応答値が増大する。なお、振れ角が 15° 以上になる場合には、通常支線あるいは支柱による補強が行われるが、この場合には最大応答加速度が単柱モデルの最大 6 倍程度となるとともに支線取付部において剪断力が最大 5 倍程度発生することが認められている⁸⁾。

(2) 分析と評価

表—9 に示す解析結果は、配電柱の種類、装柱形式によりかなり異なるが、入力地震動によっても大きく異なる。これを変圧器位置の最大加速度に着目すると、標準柱の場合、想定地震動 A ではコンクリート埋込は砂質土の 3 倍以上の応答値となるが、想定地震動 B では同等か砂質土の方が大きな値を示す。

図—11 に想定地震動の違いによる変圧器位置の応答スペクトルの差異を示すが、前述した表—8 の各配電柱



図—11 変圧器位置応答スペクトル

の固有周期との関係を用いて以下に分析を行う。

標準柱従来形一般装柱では、想定地震動 A のコンクリート埋込の場合の卓越周期 (1.16 秒) と入力地震動の卓越周期 (1.2 秒) がほぼ同じで共振をするが、砂質土の場合には地盤の非線形挙動により卓越周期が明確とならず、また、応答値も小さくなる。これは高圧架空ケーブル形でも同様の傾向が認められた。したがって、表—9 に示すように地盤条件がコンクリート埋込と砂質土の変圧器最大応答加速度値は従来型一般装柱では 528 gal と 144 gal、高圧架空ケーブル形では 576 gal と 177 gal の差となっている。想定地震動 B では、コンクリート埋込と砂質土の応答スペクトル曲線は想定地震動 A の場合と比べると差がないため、想定地震動 B による変圧器位置の最大加速度は地盤条件による差があまり認められない結果となっている。

コンクリート配電柱は、設計曲げ圧縮強度の 80% 程度でクラックが入りはじめ、設計曲げ圧縮強度の 2 倍程度で折損が生じるが、配電柱の固有周期に近い卓越周期をもち、地震工学的基盤面での最大加速度が 200 gal 程度の地震動に対しては、耐震性評価基準から配電柱の折損、傾斜・倒壊、機器の落下の被害発生は生じないものと判断される。

図—12 はコンクリート標準柱に作用する地際部曲げモーメントの時刻歴の一例で、図中には柱頭換算水平荷重の値も示している。最大柱頭換算水平荷重は 740 kgf でコンクリート標準柱の曲げ強度 1 000 kgf の 3/4 程度であり、設計曲げ強度 (500 kgf) を越える値は 2 山程度、

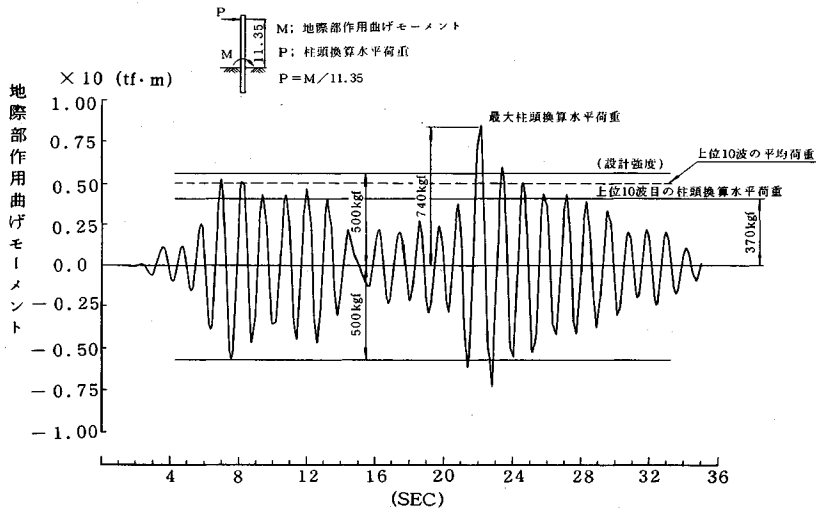


図-12 地盤部曲げモーメントの時刻歴(コンクリート標準柱・新標準装柱コンクリート埋込)

上位 10 波の平均荷重は設計曲げ強度を下廻っており最大値の 60% 程度となっていることから表-6 の折損に対する評価基準は安全側のものとなっている。

しかし、一方方向架線張力モデルで、振れ角が 15° の場合は、応答値が単柱モデルに比較して 2.5 倍程度に増大する。コンクリート埋込以外の地盤条件では単柱モデル自体の応答値が小さいことから被害を生じることはないものと考えられるが、地盤条件がコンクリート埋込の場合には、曲げ強度に近い柱頭換算水平荷重の発生も想定される。ただし、実際の配電柱ではコンクリート埋込のような折損の恐れのある地盤条件では、配電柱と設置孔の空隙にアスファルトを詰めるなど固定条件を緩和する処理がほどこされていて、地盤部作用曲げモーメントの発生を小さくおさえる工夫がなされている。

6. まとめ

配電柱の地震時被害のうち供給支障につながる配電柱の折損、倒壊、変圧器の落下ならびに供給支障とはならないが被害件数の多い配電柱の傾斜について、実規模載荷実験結果や配電柱の強度試験結果にもとづき耐震性評価基準を設定するとともに多質点非線形のパネマスモデルにより最大加速度が 200 gal 程度の地震動の被害の推定を行った。

解析にあたっては、配電柱の種類、装柱形式、地盤条件をパラメータとしている。ただし地盤条件については市街地で通常認められる地盤を対象としていることから、液状化の発生が想定される地盤や水田のような非常に軟弱な地盤については考慮していない。それによれば、

- ① 配電柱の固有周期はコンクリート標準柱、コンパクト柱では 0.9~1.7 秒、細径柱では 1.4~2.0 秒、

鋼管柱では 0.8~1.3 秒にある。

- ② 配電柱の固有周期の成分が卓越した地震動は、東京の沖積低地で発生する可能性がある。
- ③ 最大加速度 200 gal および卓越周期 1.2 秒程度の地震動に対しては、配電柱は停電を伴う折損、倒壊、変圧器の落下による地震被害を生じることはないもの判断される。
- ④ 一方方向架線張力を受ける角度柱では、地盤条件がコンクリート埋込の場合、曲げ強度に近い柱頭換算水平荷重の発生も想定されるため、地盤部をアスファルトで柔軟に仕上げるなど処理を確実に実施することが必要である。

参考文献

- 1) ロマプリーク地震東京都調査団：いつか東京にも, p. 124, 1990 年 2 月。
- 2) 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。
- 3) 東京都：東京都区部地震被害想定調査報告書, 1978 年 6 月。
- 4) 千葉県：千葉県地震被害想定調査報告書, 1982 年 3 月。
- 5) 岩崎敏男：メキシコ地震災害調査速報, 土木技術資料 (28-1), 1986 年。
- 6) (株) 応用地質：1985 年 9 月 19 日メキシコ地震被害調査速報, 1986 年 1 月。
- 7) 桑原洋他：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, pp. 193-202, 1991 年 3 月。
- 8) 畠山昭他：配電柱の地震時挙動に及ぼす架線の影響, 土木学会論文集, 第 435 号/VI-15, pp. 103-110, 1991 年 9 月。
- 9) 武藤清：「構造物の動的設計, 耐震設計シリーズ」,

pp. 277.

性の検討，電力中央研究所報告，1979年11月。

10) 増子芳夫：振動台加振実験による各種変圧器装柱の耐震

(1991.7.25 受付)

EARTHQUAKE RESISTANCE OF VARIOUS ELECTRIC POLES SUBJECTED TO GROUND MOTION OF 200 GALS IN PEAK ACCELERATION

Hiroshi KUWAHARA, Haruo SHIMIZU and Akira HATAKEYAMA

The natural periods of vibration of the electric poles ranges from about 1.0 to 2.0 seconds, which is controlled by types of poles, electric devices mounted on the pole, and the supporting ground conditions. Earthquake motions containing the same range of frequency components are likely to occur at the Tokyo alluvial plain.

The authors have devised the aseismic criteria of such structures based on the experimental simulation of typical damages, folding of pole, collapse or slant, and drop of mounted transformer.

It was confirmed analytically that electric poles would sustain without damages the earthquake input motion of 200 gals in peak accelerations..
