

論文 振動加速度に着目した電柱の劣化評価手法の実用性検討

上野 貴行*1・玉井 宏樹*2・池田 博嗣*3・井手 健太*4

要旨: 電柱は、本格的な修繕・建替などの維持管理が喫緊の重要な課題である。しかし、現行の建替評価基準では力学的な観点からすると評価は十分でないと考えられ、力学的な評価に基づいたより現実的な電柱の建替評価基準と現場でも適用できる非破壊検査による評価方法の確立が必要である。上記の課題に対して、電柱の劣化を振動特性の変化から評価できる可能性が示唆されているが、実用化に向けていくつか課題がある。そこで、本研究では、建替評価基準と非破壊検査による評価方法の提案を目的に、振動加速度に基づく電柱の劣化評価手法の実用性について検討し、現場における実用的な振動の計測方法について整理した。

キーワード: 電柱, スペクトル, 加速度, 振動数, 劣化評価

1. はじめに

配電柱（以下、電柱）は、発電所で作った電力を最終的に利用者へ送り届ける配電線を支える設備で、広く利用されている。現在使用されている電柱は、高度経済成長期の1960～70年以降に、大量に設置されたものが大半を占めており、本格的な修繕・建替などの維持管理が喫緊の重要な課題である。

電柱の修繕・建替の方針は、2021年に電力広域的運営機関が策定した「高経年設備更新ガイドライン」¹⁾に整理されており、電柱は65年を標準期待寿命とされている。高度経済成長期以降に設置された電柱は、この標準期待寿命から考えれば修繕・建替が必要な時期を迎えていると言える。しかし、標準期待寿命に基づき建替・修繕計画を建てた場合、九州電力の試算では、1年間の電柱取替施工能力が3万本/年に対し、高度経済成長期以降に建設された電柱の本数は1年間に約8万本となっており、年間の建替え本数が電力会社の施工能力を上回ることが容易に予想される。

「高経年設備更新ガイドライン」¹⁾に示されている現況の標準期待寿命は、「配電設備の高経年化に対応した技術動向と課題調査専門委員会」で報告された供用されている設備の調査結果より示されている²⁾。報告書によると調査方法は、国内で実際に供用されている電柱の外観観察を行い、供用年数ごとにひび割れ等の劣化が発生している電柱の割合を確認するものであった。調査の結果、塩害等の影響がない地域では供用65年、塩害の影響が大きい地域では供用45年で劣化が発生した電柱の割合が10%を超えることが確認された。現在の標準期待寿命は、上述した外観の目視評価から整理されている結果であり、力学的な評価は十分にされていないと思われる。

現況の電柱建替評価については、「コンクリートポール診断テキスト」³⁾に整理されており、ひび割れ・表面あれ等の「劣化変状の種類」毎に定められた「劣化レベル（通常はⅣ・Ⅴ）」に、塩害・凍害等の「周辺環境」等を加味して判断することを推奨している。上述した現況の建替評価基準は、外観目視で調査できる範囲とし、非破壊試験装置を用いた評価は対象外としている。即ち、鉄筋に異常はなく、台風などの風荷重による損傷を受けただけの力学的な損傷のみを受けた様な電柱の評価は十分整理されていない。以上より、現行の建替評価基準でも力学的な観点からの評価は十分でないと考えられ、力学的な評価に基づいたより現実的な電柱の建替評価基準と現場でも適用できる非破壊検査による評価方法の確立が必要である。

ここで既往の電柱に関する研究について整理すると、電柱の劣化診断に関する研究では、岩月ら⁴⁾による超音波伝播速度に着目したひび割れ診断による検討や、松尾ら⁵⁾による衝撃弾性波法を用いた内部空隙の大きさや内部鋼材の腐食程度の評価に関する検討等が行われている。次に、コンクリート構造物の劣化評価については、構造物の振動特性の変化から劣化を検出する検討が行われている⁶⁾。既往の研究からもわかるように振動特性を利用することが得策であると考えられるが、電柱の劣化具合と振動特性の相関関係を定量的に明らかにした既往研究は存在しない。そもそも、電柱の曲げ耐荷特性や終局特性についても、定量的に明らかにされているとは言い難い。

上記の様な課題について、筆者らの既往の研究では、実際の電柱を用いた繰り返し載荷曲げ試験と加振試験を行い、繰り返し載荷により損傷を蓄積させた電柱の劣化

*1 九州電力（株）総合研究所 社会インフラグループ（正会員）

*2 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門准教授 博士（工学）（正会員）

*3 九州電力（株）経営監査室 業務・保全監査グループ 博士（工学）

*4 九州高圧コンクリート工業（株） 技術品質本部 技術開発グループ

度合を固有周期などの値の変化から評価できる可能性が示唆されているが、電柱の規格による計測結果への影響や、現場での具体的な試験方法の整理などの課題が挙げられている。

そこで、本研究では、一般的に広く用いられているプレキャスト製プレストレストコンクリート電柱（PCaPC電柱）の振動加速度による劣化評価手法の提案を目標とし、繰り返し载荷により損傷を蓄積させた電柱の振動加速度の変化について、電柱の規格が及ぼす影響について検討を行った。また、振動加速度を用いた劣化評価方法の実用性の検討として、実際に供用されている電柱に対し、風荷重あるいは人工的な荷重を加え電柱を振動させた際の加速度の計測を行った。

2. 振動加速度に基づく劣化評価における電柱の規格の違いが計測結果に及ぼす影響

本章では、繰り返し载荷により損傷が蓄積する電柱に対し、振動加速度の計測を行い、損傷の蓄積に伴う計測結果の変化に対する電柱の規格の影響について検討した。

2.1 実験概要

(1) 使用する電柱について

対象電柱は、JIS A 5373（以下、JIS 規格）に規定される 1 種ポールと呼ばれる規格に該当する電柱のうち、表-1 に示す 4 種類とした。規格の表記は左から丈尺 (m)・末口直径 (cm)・設計荷重 (以下、P とする) (kN) を示している。設計荷重については、経済産業省で定められている「電気設備の技術基準の解釈」⁸⁾にてその根拠が示されており、「風速 40m/s (10 分間平均) の風荷重が作用した場合を想定した荷重」とされている。試験に用いる電柱の状態については、全て未使用の新品 (以下、新柱) とした。詳細な形状および配筋については、最も一般的な 13-19-7.0 の規格のものを図-1 に示す。なお、品質上の基準については、JIS 規格に「コンクリート電柱は、ひび割れ試験曲げモーメント (設計荷重) の 2 倍载荷時に破壊してはならない」と示されており、電柱は設計荷重の 2 倍の大きさの荷重を载荷しても破壊しないように設計されている。

(2) 実験方法

载荷機構は、JIS 規格に記載される 1 種ポールの曲げ耐力試験を参考とした (写真-1 参照)。電柱の固定は、電柱を横に寝かせた状態で、電柱の元口から JIS 規格で規定された根入れ深さである延長の 1/6 の範囲を木枠と圧力ジャッキにて締め付ける方法とした。载荷の機構は、JIS 規格に記載される 1 種ポールの曲げ耐力試験と同様に末口から 0.25m 下方にワイヤーを取り付け、衝撃を与えない静的载荷となるように緩やかな速度で末口より载荷荷重が計測できるウインチで引っ張る方法とした。な

表-1 試験体一覧

試験体名	使用状態	長さ	設計荷重 (kN)
13-19-7.0	未使用	13m	7.0kN
9-19-5.0	未使用	9m	5.0kN
10-19-7.0	未使用	10m	7.0kN
11-19-5.0	未使用	11m	5.0kN

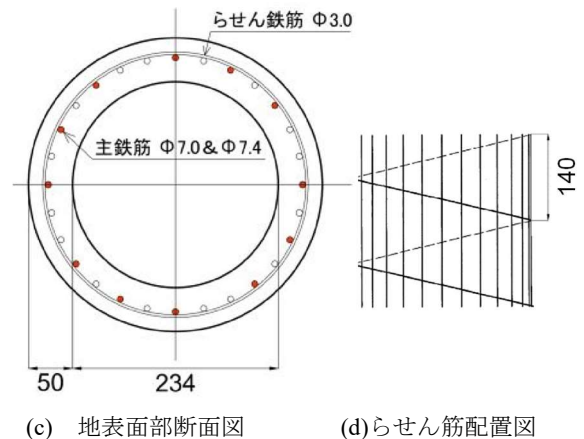
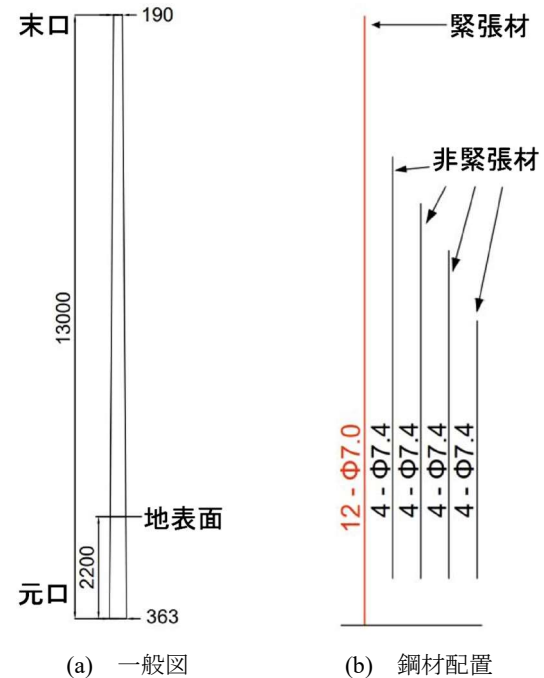


図-1 電柱の設計図例 (規格: 13-19-7.0)



写真-1 载荷の様子

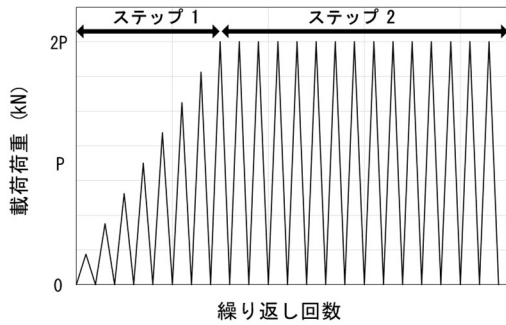


図-2 載荷荷重のサイクル

お、電柱は地面に接さないよう、載荷中は電柱の中央部付近にローラー付き台座を設置している。

電柱へ損傷を与えるための繰り返し載荷方法は、片方向繰り返し載荷とした。一般的に、JIS 規格に基づく電柱の品質評価のために行う強度試験では単調載荷で行われる。また、繰り返し載荷を行う電柱を用いた既往の研究では、耐震性能評価を目的とした正負交番載荷による試験が行われている。しかし、本研究では、電柱が供用中の 50 年を超える長期間で風荷重などが繰り返し作用し、損傷が蓄積した場合の残存耐力の評価を目的としており、このような観点から残存耐力評価を行うために参考にできる既往の規格・基準や文献は少なく、上記のような荷重の作用で電柱がどのような終局状態に至るのかも十分に把握されていない。そのため、本試験では、損傷の蓄積について整理が行いやすい片方向の繰り返し載荷により電柱が終局状態へ至るまでの過程を確認することとした。載荷荷重は 2 段階に分けて設定した。1 段階目は、載荷荷重の増加に伴う損傷状態の変化を確認するため、載荷荷重を $P/4$ (設計荷重の $1/4$ 倍である 1.75kN または 1.25kN) 刻みで品質上破壊してはならないとされる設計荷重 P の 2 倍 (以下、 $2P$) まで 8 段階の荷重で載荷→除荷を繰り返した。(以下、ステップ 1)。その後、2 段階目は 1 段階目の最大荷重である $2P$ の荷重を電柱が破壊するまで載荷→除荷を繰り返した (以下、ステップ 2)。図-2 に各載荷ステップのサイクルを示す。

振動の与え方は、電柱を引っ張ったワイヤーを瞬時に切断する方法とした。緊張力は、試験体に損傷を与えないよう、 $P/4$ である 1.75kN および 1.25kN を越えない値として 1kN とした。

加速度の計測について、加速度計は ARF-50A (容量 50m/s^2 , 出力 0.5mV/V) を用い、設置箇所は、分析がより鮮明になることを期待し、加速度が最も大きい電柱の末口付近とした。振動 1 回の計測時間は、振動が約 20 秒で収束することや、計測個数が高速フーリエ変換の分析条件から 2 のべき乗であることを踏まえ、20.48 秒以上 (加速度計測間隔 0.01 秒、計測個数 2048 個) とした。

計測頻度は、与える載荷荷重の大きさの違いが、振動特性に与える変化を詳細に捉えるため、載荷ステップ 1 では、 $P/4$ 刻みで荷重が増加する度に計測した。載荷ステップ 2 では、繰り返し回数 30 回まで 10 回毎に、それ以降は繰り返し載荷回数 50 回、100 回、150 回…と 50 回毎に破壊する直前まで計測することを基本とし ($10, 20, 30, 50, 100, 150 \dots$)、電柱の外観の変状に合わせて適宜計測を追加で行うものとした。

2.2 結果及び考察

(1) 実験結果

計測した加速度に対し、高速フーリエ変換を行ったパワースペクトルの繰り返し載荷の進行に伴う変化を、13-19-7.0 を代表として図-3 に示す。計測した加速度の時刻歴変化は参考文献 7) を参照されたい。図中の黒色のスペクトルは載荷前の計測結果、赤色のスペクトルは破壊前の結果、その間の青色部分は途中経過を示す。振動数の変化は、繰り返し載荷による損傷の蓄積とともに、連続的に小さくなっている。加速度スペクトルのピーク値も連続的に減少することが確認された。

振動加速度のパワースペクトルに与える電柱の規格の影響については、本実験で得た全試験体の加速度スペクトルのピーク値を整理したものを図-4 に示す。この図より、それぞれの電柱で得られる振動数が異なることが確認できる。電柱の規格によるパワースペクトルの影響については、いずれの規格でも繰り返し載荷回数の増加とともに、振動数と加速度スペクトルが減少しており、変化の傾向は同じであったが、電柱の長さが短いほど周期が短くなる傾向を示した。

(2) 電柱の規格の影響に関する考察と今後の課題

実験の結果より得られる振動数は、電柱の規格によって変化することが確認された。そのため、実際の劣化評価において、電柱の規格と振動特性の関係について考慮する必要がある。具体的には電柱の規格ごとに劣化評価のしきい値を設定するか、電柱の規格 (長さ・断面積) を変数とした劣化評価に用いるしきい値の定式化のい

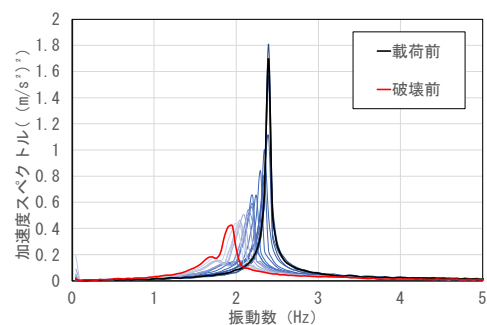


図-3 パワースペクトルの変化
(13-19-7.0 の場合)

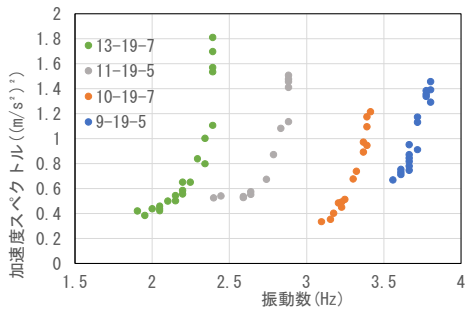


図-4 全試験体のスペクトルピーク値の比較

れが必要であると考え。振動数等の振動特性と柱・梁の規格（長さ・断面積等）の関係については、オイラーの梁の振動方程式において、梁の長さ・弾性係数・断面二次モーメント等の数値から振動数を算出することが可能であることが示されている⁹⁾。今後は、オイラーの梁の振動方程式や実験結果に基づく電柱モデル¹⁰⁾を用いた振動分析から規格ごとの振動数等の振動特性について整理し、振動特性を用いた劣化評価手法におけるしきい値の設定について検討する予定である。

3. 振動加速度を用いた劣化評価手法の実用性検討

本章は、電柱の非破壊検査による劣化評価手法への適用が見込まれる振動加速度の計測について、実際に供用されている電柱へ風荷重と人力による荷重を載荷し、振動させた際の加速度の計測結果から劣化評価方法としての実用性について確認した。

3.1 実験概要

実験に使用した供用柱は、高所作業車等の使用を考慮し、安全な作業スペースを確保する必要があったため、九州高圧コンクリート工業熊本工場内に設置されている供用柱とした。供用柱の規格は 14-19-5.0 で、付属品は 3 本の電線と架設物が設置されていた（写真-2 参照）。

計測項目は、振動加速度とした。本実験での加振方法は、前述した 1kN の荷重で引っ張る様な手法ではなく、自然風や人力といった小さな荷重での加振になる。そのため加速度計には、前述した加速度計よりも分解能が高い ARS-10A（(容量 10m/s², 出力 15mV/V)）を用いた。加速度計の設置箇所は、前述の実験では加速度が大きい電柱の末口付近にて計測していたが、現場計測における高所作業の危険性や作業の簡易化を考慮して、現場で最も設置が容易であると思われる地際から 1.5m 程度の高さ（以下、胸高部）と、末口付近と胸高部の中間にあたる地際から 6m 程度にあたる高さ（以下、中腹部）を加え 3 箇所計測を行った。計測する方向は、振動が計測しやすいように電線の拘束の影響が小さいと思われる電線と垂直な方向とした。振動 1 回の計測時間は、計測個数が高速フーリエ変換の分析条件から 2 のべき乗である



写真-2 振動計測に用いた供用柱



写真-3 作業員による振動の載荷方法

ことを踏まえ、20.48 秒（加速度計測間隔 0.01 秒、計測個数 2048 個）以上とした。

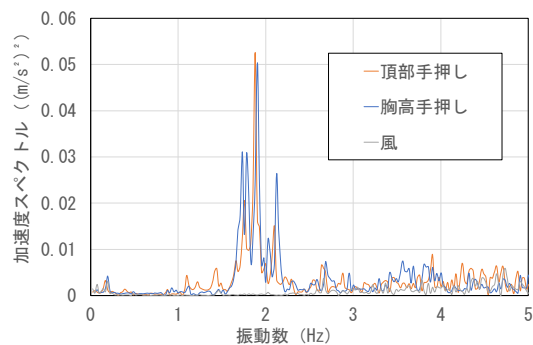
振動の与え方は、前述の実験においては 1kN の荷重で電柱の末口付近を引っ張り、引っ張ったワイヤーを切断する方法としていたが、本実験では現場計測時に実施しやすい載荷方法として風荷重による載荷と作業員による手押し加振の 2 種類とした。風荷重による振動は、自然風により発生すると思われる加速度を 1 分間計測した。その間の 1 分間の平均風速を地表にて風速計で計測した。作業員による手押しの載荷では写真-3 のように作業員が電柱に荷重を与え、電柱末口付近の振動が目視で確認できる程度の振動を与える方法とした。載荷位置は胸高部と末口付近の 2 箇所とした。末口付近への載荷は、電柱の点検時に用いられる高所作業車を用いて行った。

3.2 結果及び考察

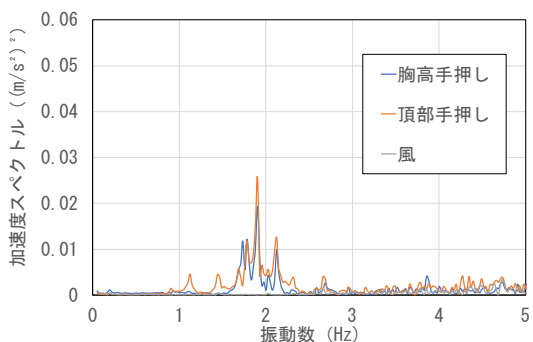
(1) 風荷重を用いて振動させた場合

図-5 にそれぞれの載荷方法で計測した振動加速度を高速フーリエ変換し得られたパワースペクトルを計測位置・載荷方法ごとに示す。

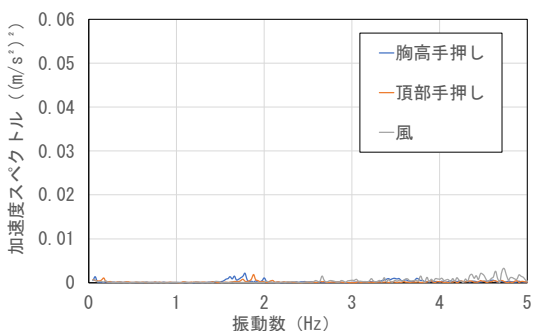
自然風による振動加速度の計測結果では、いずれの計測箇所においても既往の研究で確認されたような加速度スペクトルのピーク値は確認できなかった。自然風を用いて振動させた場合は、風速の大きさによってはピーク



(a) 末口付近



(b) 中腹部



(c) 胸高部

図一5 载荷方法と加速度スペクトルの変化

値を得られる可能性がある。しかし劣化評価を行う際には、計測条件が天候に左右されるような方法よりも、常時計測を実施できる方が適切と考えられるため、自然風による振動の計測は現状実用的ではないと考えられる。

(2) 作業員による人力で振動させた場合

作業員の手押しによる振動加速度の計測結果では、胸高部手押しによる胸高部の計測結果を除き、前章の実験結果と同様に加速度スペクトルのピーク値を得ることができている。このことから作業員の手押しによる载荷は、前述の風荷重とは異なり常時計測可能な方法であることも踏まえて現場における振動の与え方として実用的であると考えられる。

パワースペクトルの傾向としては、1.9Hz 程度に最も大きなピーク値があり、その周辺にいくつかの少し小さなピークが確認された。1.9Hz 程度で確認されているピ

ークは供用柱の1次振動モードの振動数であると思われる。上記以外に確認されている1.7Hz~2.2Hzの範囲にあるピークについては、前述の素柱の結果では確認されていないものであったため、電線および架設物が付属し、一体となった振動モードが計測されているものと推察される。

計測位置とパワースペクトルの関係は、末口付近で最もパワースペクトルが大きく計測されており、地際に近づくにつれて得られるパワースペクトルの値が小さくなるが、胸高手押し時の胸高部を除いた全ての計測結果においてスペクトルから1次振動モードのものと思われる加速度スペクトルのピーク値は確認可能であった。

次に手押しの载荷位置について比較すると、胸高手押し時の胸高部のみ1次振動モードのものと思われるピーク値が結果から読み取りづらくなっているが、末口付近・中腹部では载荷位置に関わらず1次振動モードのものと思われるスペクトルのピーク値の大きさが同等であることが確認できた。

(3) 現場における実用性に関する考察と今後の課題

振動加速度計測による劣化評価方法の実用性評価は、計測位置・载荷方法ごとに作業の容易性・安全性も含めて表一2に整理した。

計測位置については、末口付近から遠い方が得られる加速度が小さくなることから評価が行いにくいと考えていたが、中腹部あたりで得られた加速度のパワースペクトルでも評価を行える可能性があることを確認できた。地際に近い胸高部では、パワースペクトルが1次振動モードの振動数で得られるパワースペクトルのピーク値が小さくなり評価が困難となったことを踏まえると、計測結果としての適切な計測位置の範囲は末口付近から中腹部周辺のある程度の高さがある箇所が適切と思われる。

作業の容易性・安全性については、地際に近い方が高所作業にならず安全であり、高所作業車なども不要となり設置も容易であることから、地際に近い方が適切と考えられる。以上より、振動の最適な計測箇所はある程度の高さの確保も重要であるが、計測位置が高い場所になると作業の容易性・安全性を考慮した場合に不適である

表一2 载荷条件・計測箇所の評価

計測条件	計測結果の実用性	作業安全性 容易性
末口付近载荷・頂部計測	○	×
末口付近载荷・中腹部計測	○	△
頂部载荷・胸高部計測	△	△
胸高部载荷・頂部計測	○	△
胸高部载荷・中腹部計測	○	○
胸高部载荷・胸高部計測	×	○

と思われるため、実験と同様に1次振動モードのスペクトルのピーク値を計測できる範囲で作業の容易性・安全性を確保できる、中腹部付近が適切と考えられる。

載荷方法について、風荷重はある程度の風速が見込めなければ評価ができない結果であったため、作業員の手押しを末口付近で行うか、胸高部で行うかの2項目について評価することとした。実用性については、末口付近での手押しと胸高部での手押しによる計測結果はパワースペクトルの形状が同様であることを確認できたためどちらも適切であると考えられる。しかし作業の容易性・安全性については、計測位置と同様に地際に近い方が高所作業の危険が無く安全かつ高所作業車なども不要となり作業が容易となることから、胸高部の方が適切であると考えられる。以上の結果より載荷方法は、得られたパワースペクトルが同様である結果と作業の容易性・安全性については胸高部が適切であることを踏まえ、胸高部へ作業員が手押しで載荷する方法が適切と考えられる。

以上より、供用柱において振動加速度計測から電柱の劣化評価を実施する場合、計測方法は胸高部に作業員が人力で載荷を行い、電柱の中腹部付近で加速度計を設置することで作業を比較的容易かつ安全に行える実用的な非破壊の劣化評価方法として運用できると思われる。

今後の課題については、今回の計測結果からパワースペクトルを得ることはできたが、得られたパワースペクトルのピーク値が健全な状態であるかの評価を行うことは現状難しい。そのため今後は計測で得られる振動数などの振動特性について繰り返し曲げ載荷による損傷の蓄積による劣化の傾向と照会し、評価のためのしきい値を前章で確認した規格の影響も考慮しつつ整理する。また、今回は作業の都合上2章で扱った電柱の規格の供用柱を用いた振動加速度の計測や、電線・付属品による振動への影響評価も実施できていないため、今後は加振試験で使用した規格の供用柱での計測や前述の解析モデルを用いて振動加速度による評価の妥当性について詳細な検討を行う予定である。

4. まとめ

本研究では、電柱の振動加速度計測による劣化評価手法の提案を目標とし、繰り返し載荷により損傷を蓄積させた電柱の振動加速度の変化について、電柱の規格が及ぼす影響について検討を行った。また、振動加速度を用いた劣化評価方法の実用性の検討として、実際に供用されている電柱に対し風荷重あるいは人工的な荷重を加え電柱を振動させた際の加速度の計測を行った。結果は以下に示す通りである。

1)振動加速度計測の結果、電柱の規格ごとに振動数が変化することを確認した。振動特性に着目し劣化評価を

行う場合は規格の影響を考慮する必要がある。

- 2) 振動加速度に着目した電柱の劣化評価手法について、自然風（平均風速 3.1m/s）による振動加速度の計測結果では、いずれの計測箇所においても加速度スペクトルのピーク値は確認できなかったが、作業員の手押しによる振動加速度の計測結果では実験と同様のスペクトルのピーク値を得ることができた。このことから作業員の手押しによる載荷は、常時計測可能な方法であることも踏まえて現場における振動の与え方として実用的であると考えられる。
- 3)作業員による手押しの載荷方法について、載荷を胸高部に行い、電柱の中腹部付近で加速度計を設置することで作業を比較的容易かつ安全に行える実用的な非破壊の劣化評価方法として運用できると思われる。

参考文献

- 1) 電力広域的運営推進機関ホームページ：高経年設備更新ガイドライン，https://www.occto.or.jp/kouikikeitou/guidelines/files/koukeinena_setsubi_guideline.pdf（閲覧日：2023年8月15日）
- 2) 配電設備の高経年化に対応した技術動向と課題調査専門委員会：配電設備の高経年化に対応した技術動向と課題，電気学会技術報告，2019
- 3) コンクリートポール診断士協会：コンクリートポール診断士テキスト，2018
- 4) 岩月栄治，小塚晃透，本多祐二，疋田智美，佐藤正典：超音波を用いたコンクリート電柱検査に関する研究，総研21号プロジェクト共同研究成果概要11，30-31，2019.
- 5) 松尾亮治，古川浩一，水垣善夫：衝撃弾性波法によるコンクリート柱内部劣化の非破壊検査，日本機械学会九州支部講演集，54巻，33-34，2001
- 6) 阿部慶太，名取努，小湊祐輝，関口琢己，山野明義，王林：振動数と相関を有する健全度診断指標を用いた鉄道橋梁の健全度の状態監視手法，土木学会論文集A1，Vol72，No.1，21-40，2016
- 7) 上野貴行，池田博嗣，玉井宏樹，井手健太：繰り返し載荷を行ったコン柱の物性値の変化とスペクトルの変化に着目した建替評価に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集Vol.45，2023
- 8) 経済産業省：電気設備の技術基準の解釈，2018.10
- 9) 小坪清眞著：入門建設振動学，森北出版，162-164，1996
- 10) 安川華乃子，玉井宏樹，園田佳巨，上野貴行，池田博嗣，阿部亮：PCaPC電柱の静的曲げ特性把握のための非線形有限要素法による再現解析，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，2023