

繰り返し载荷を受けるPCaPC電柱の破壊過程の把握と 建替評価に関する一提案

上野, 貴行
九州電力総合研究所社会インフラグループ

玉井, 宏樹
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 : 准教授

安川, 華乃子
九州大学大学院工学府土木工学専攻 : 修士課程

池田, 博嗣
九州電力経営監査室業務・保全監査グループ

他

<https://hdl.handle.net/2324/7182186>

出版情報 : Journal of structural engineering, A. 70A, pp.807-818, 2024-03-23. Japan Society of Civil Engineers

バージョン :

権利関係 : © 2024 by Japan Society of Civil Engineers



繰り返し載荷を受ける PCaPC 電柱の破壊過程の把握と 建替評価に関する一提案

Grasp of the failure progress of PCaPC utility poles subjected to cyclic loading
and a proposal for the replacement evaluation

上野貴行[†], 玉井宏樹*, 安川華乃子**, 池田博嗣***, 阿部陵****, 井手健太*****
Takayuki Ueno, Hiroki Tamai, Kanoko Yasukawa, Hirotsugu Ikeda, Ryo Abe, Kenta Ide

[†]九州電力, 総合研究所社会インフラグループ (〒815-8520 福岡県福岡市南区塩原 2-1-47)

*博(工), 九州大学大学院准教授, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

**九州大学大学院修士課程, 工学府土木工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

***博(工), 九州電力, 経営監査室 業務・保全監査グループ (〒815-8520 福岡県福岡市中央区 2-1-82)

****九州電力, 総合研究所社会インフラグループ (〒815-8520 福岡県福岡市南区塩原 2-1-47)

*****九州高圧コンクリート工業, 技術開発グループ (〒869-1205 熊本県菊池市旭志川辺 1349-4)

The purpose of this research is to suggest the utility poles replacement evaluation method from the structural dynamics perspective. This study shows the result of bending test of utility poles subjected to cyclic loading to clarify the failure progress of utility poles by cyclic loading, and measurement of utility poles behavior to confirm the correlation between damage and dynamic characteristics. As a result, as for the bending test, it was confirmed that failure of utility poles subjected to cyclic loading is caused by flexural compression failure by the accumulation of fatigue damages of the concrete. As for dynamic characteristics, it was confirmed that there is the correlation between damage and change of dynamic characteristics, especially natural period and damping.

Keywords: PCaPC utility poles, full scale experiment, cyclic loading, dynamic characteristics

キーワード: PCaPC 電柱, 実物大実験, 繰り返し載荷, 振動特性

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、高度成長期の1960~1970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」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、供用年数ごとに損傷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年で損傷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

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: Takayuki_ueno@kyuden.co.jp

評価は十分にされていないと思われる。

電柱の設備保全については、定期的な点検などを行っており予防保全に努めている面も見られるが、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損傷評価については、構造物の振動特性の変化から損傷を検出する検討が行われている^{6,7)}。電柱の損傷を定量的に把握するには、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、電柱の損傷度合い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。

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）の損傷度合いと振動特性の相関関係を明らかにすることを目標とし、その基礎として実物電柱を用いた繰返し載荷による曲げ載荷実験を実施し、曲げ耐荷特性と終局特性を確認した。更に、繰返し載荷により損傷を受けた電柱を振動させ、振動中の加速度を計測し、電柱の損傷度合いと振動中の加速度の相関関係について確認した。

2. 対象とする電柱について

本章では、本研究で対象とする電柱の規格、形状ならびに構造、製造方法、材料の設計値および品質上の基準について記載する。

対象電柱は、表-1に示す通り JIS A 5373：プレキャストプレストレストコンクリート製品に規定される1種ポールと呼ばれる規格に該当する電柱のうち、最も一般的な13-19-7.0と、電柱の規格の影響を把握するために9-19-5.0、11-19-5.0を1本ずつの3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、

表-1 本実験で使用した電柱

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

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、13-19-7.0の規格のものを代表して図-1に示す。構造形式はプレストレストコンクリート構造（PC構造）で外観形状は、底部（元口）から頂部（末口）に向かって断面が小さくなっていくテーパポールとなっている。鋼材の配置は、全長の

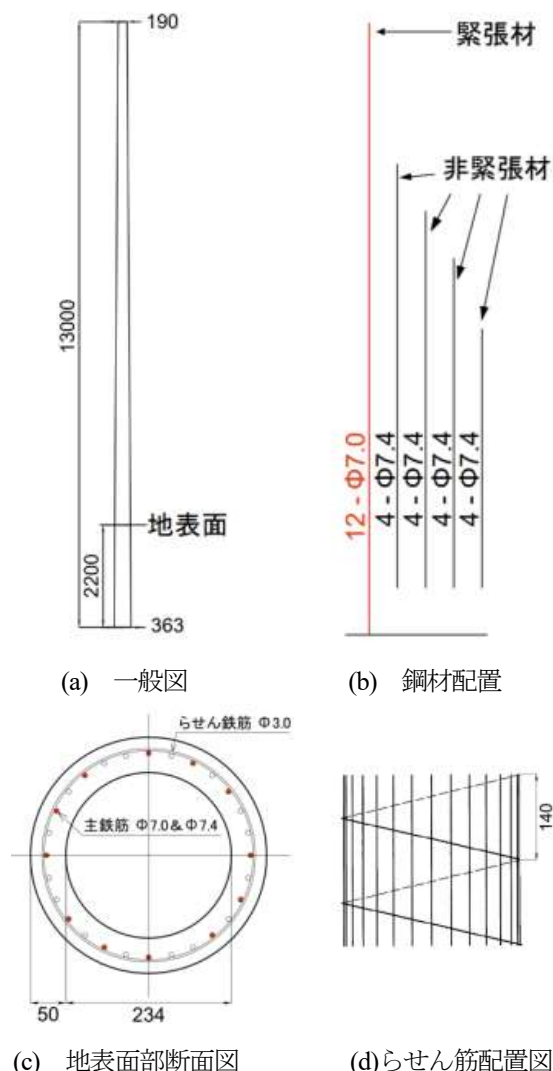


図-1 電柱の設計図例（規格：13-19-7.0）

異なる緊張材と非緊張材が主鉄筋として同一円周方向上に配置されている。製作過程における特徴の一つとし、遠心成型によるコンクリート打設により製作されているため電柱は中空断面となっている。打設されるコンクリートは、遠心力の効果により中央に集まった水分を取り除くため、密な状態を形成し一般的に強度が高くなっている。

各材料の設計値は、全ての電柱で共通であり、一般的な値としてコンクリートは、圧縮強度 $60\sim75\text{N/mm}^2$ 程度である。緊張材は、降伏強度 1325N/mm^2 、静弾性係数 205kN/mm^2 で、非緊張材は降伏強度 1080N/mm^2 、引張強度 1230N/mm^2 、静弾性係数 205kN/mm^2 である。

なお、品質上の基準については、JISA 5373 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 倍荷重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載荷しても破壊しないように設計されている。

3. 繰り返し載荷による実物電柱を用いた曲げ載荷実験

本章では、繰り返し載荷による電柱曲げ載荷実験の結果から、電柱が終局状態に至るまでの過程について述べる。なお、本研究における電柱の終局状態は、繰り返し載荷により品質上の基準である「設計荷重の 2 倍荷重時に破壊してはならない」を満たさなくなった時として整理した。また、電柱の規格（長さ）による差異についても考察する。

3.1 実験概要

実験方法は、JIS A 5373 に記載される 1 種ポールの曲げ耐力試験を参考とした（図-2 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 A 5373 で規定された根入れ深さである全長の 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。固定方法については、一般的な電柱の設置方法が地中に全長の 1/6 の範囲を埋設するだけで問題ないと規定されているため、地中でも多少の変形が発生すると考えられ実際の電柱の設置状態に近くなることから完全な固定端にはしていない。載荷の機構は、JISA 5373 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載荷となるように緩やかな速度で末口より載荷荷重が計測できるウインチで引っ張る方法とした。なお、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。

載荷方法は、片方向繰り返し載荷とした。一般的に、JIS A 5373 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、電柱に繰り返し載荷を行う場合は、耐震性能評価を目的とした正負交番載荷による試験が既往の研究⁹⁾で行われている。しかし、本



図-2 載荷の様子

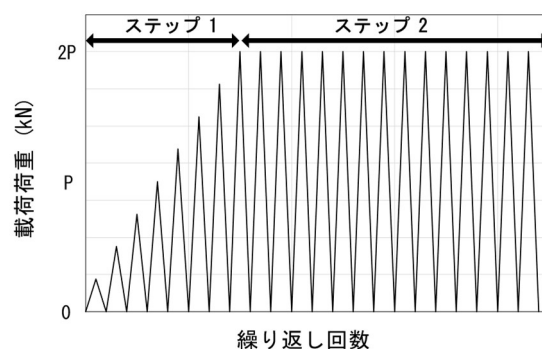
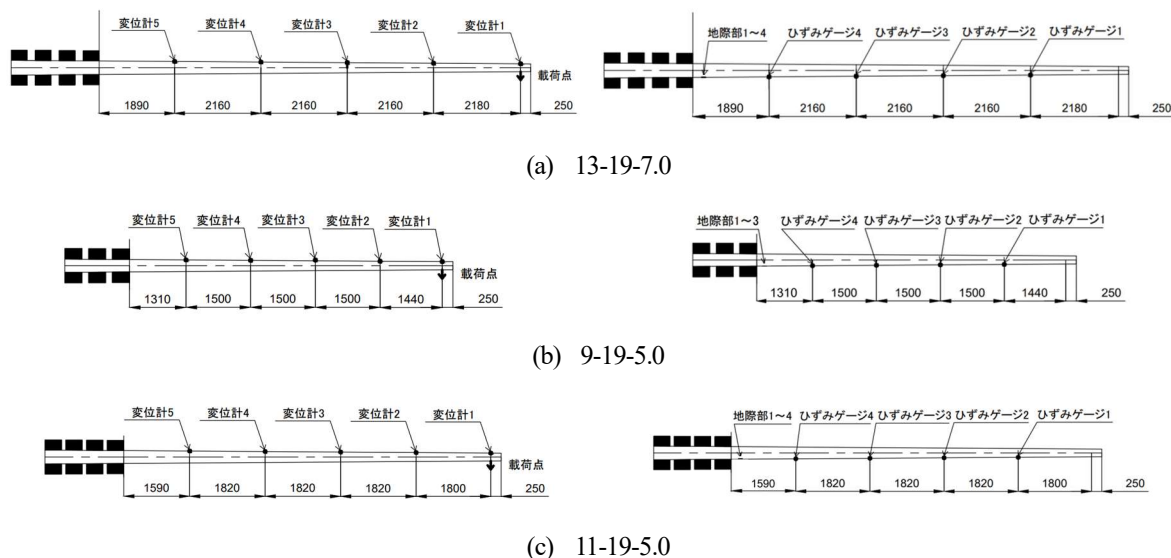


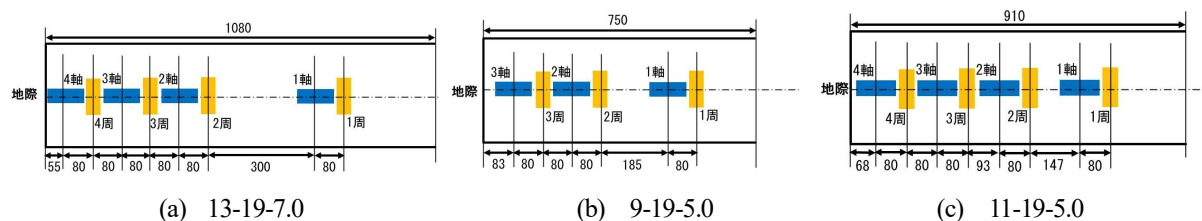
図-3 載荷荷重のサイクル

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てできる既往の規格・基準や文献は少なく、上記の様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、設計荷重 7.0kN の場合は 1.75kN 、 5.0kN の場合は 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-3 に各載荷ステップのサイクルを示す。

計測項目は、変位および電柱の軸方向・周方向のひずみとした。変位の計測機器は、ワイヤー式の変位計を使用した。変位計の設置箇所は、荷重載荷位置から固定部までを 5 等分する位置とした（図-4 参照）。ひずみの計測機器は、ひずみゲージを用い、その設置箇所は、載荷



図ー4 変位計およびひずみゲージ設置図 (mm) (左：変位計，右：ひずみゲージ)



図ー5 地際部ひずみゲージ設置図 (mm) (青：軸方向，橙：周方向)



(a) 引張側ひび割れ (載荷中) (b) 圧縮側ひび割れ (載荷 250 回) (c) 圧縮側ひび割れ破壊前 (載荷 380 回)

図ー6 繰り返し載荷中の電柱で確認したコンクリートひび割れ (13-19-7.0)

時に圧縮応力が掛かる側の側面で、変位計 2~5 と同様の位置の 4 箇所と、応力が最も大きくなる固定部において変化を詳細に確認できるように地際から 1/10 の長さの範囲に 13m, 11m は 4 箇所, 9m は 3 箇所とした (図ー5 参照)。ひずみの計測方向は電柱の長さ方向 (以下、軸方向) と断面方向 (以下、周方向) の 2 方向とし、すべての計測位置で両方向を計測した。計測頻度は、載荷ステップ 1 では、載荷荷重 $P/4$ 刻みで毎回実施し、載荷ステップ 2 では繰り返し回数 10 回毎に $P/4$ 刻みとした。

3.2 曲げ載荷実験結果

(1) 破壊に至るまでの電柱の変状

実験結果について、まず、結果の詳細は、現場で最も多く供用されている 13-19-7.0 の試験結果を代表に整理する。その後他の電柱と結果を比較し、電柱の規格 (長さ) の影響について確認する。載荷ステップ 1 の際に確認された電柱の変状については、圧縮側のコンクリートには変状は無く、引張側のコンクリートにはひび割れの発生 (図ー6(a)参照) が見られた。引張側のコンクリートのひび割れは、5.25kN ($3/4P$) 載荷時に発生し、その後は、



図-7 破壊した電柱と破壊箇所

載荷荷重の増大とともに既存のひび割れの拡大と新たなひび割れの発生が確認された。なお、引張側のひび割れは、載荷中には目視でも確認できるが除荷後はプレストレスの影響でひび割れが閉じ視認できなくなる程度にまで小さくなる特徴がある。

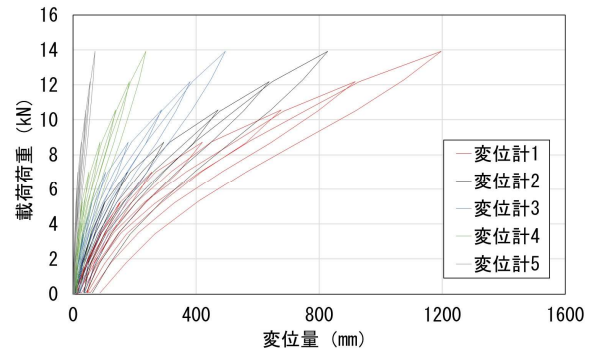
載荷ステップ2の際には、圧縮側のコンクリートにも地際部近傍で図-6(b)に示すような微細なひび割れが確認されるようになった。この圧縮側地際部のひび割れは、繰り返し載荷により図-6(c)の通り進展しており、破壊に至る要因であることが伺える。なお、こちらのひび割れは上述した引張側のコンクリートで確認されたひび割れとは異なり、荷重を除荷しても大きさはほとんど変わらなかった。引張側のひび割れは荷重を除荷すると応力状態が圧縮側へ推移し開いたひび割れが閉じると考えられるが、圧縮側のひび割れは除荷すると応力状態は引張側へ推移することからひび割れが閉じないものと考えられる。

破壊後の電柱の写真を図-7に示す。破壊の形態は、地際部近傍のコンクリートの圧縮破壊であり、爆裂を伴う脆性的な破壊であった。鉄筋の破壊時の状況は、緊張材・非緊張材ともに座屈し、らせん筋は破断していた。これらの鉄筋の損傷はコンクリートが圧壊するとともに発生したものである。

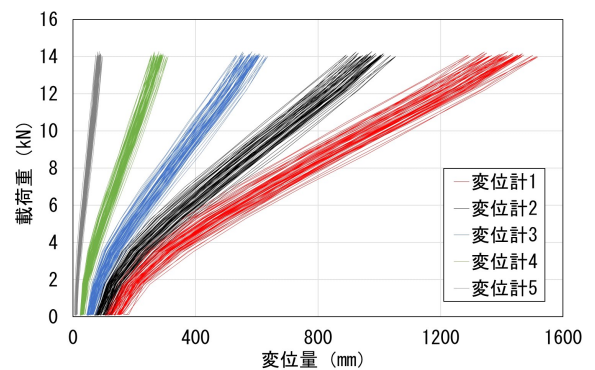
(2) 荷重－変位関係

荷重－変位関係は、図-8に示す通り、末口に近い箇所の方が変位が大きくなった。末口付近に設置した変位計の計測結果より、載荷ステップ1における2P載荷時の変位は1200mm程度であったが、載荷ステップ2における破壊前（繰り返し載荷回数380回）の最大ひずみは1518mmとなっており、載荷荷重の増加と繰り返し載荷の進行に伴い延伸している。

繰り返し載荷回数と最大変位の変化は、図-9に示す通り、載荷ステップ1では、載荷荷重が大きくなるとともに最大変位が大きくなった。載荷ステップ2では、繰



(a) 載荷ステップ1



(b) 載荷ステップ2

図-8 荷重－変位関係（13-19-7.0の場合）

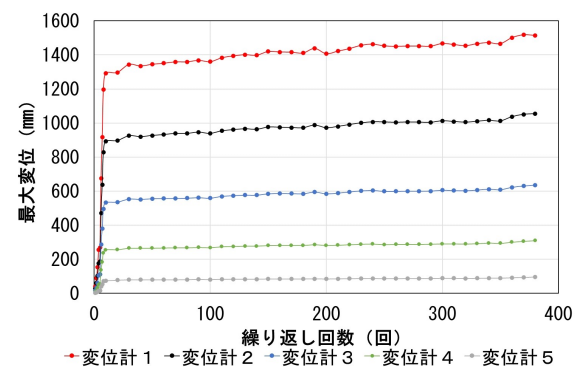


図-9 繰り返し載荷回数と最大変位の関係
（13-19-7.0の場合）

り返し載荷回数の増加に伴い最大変位が大きくなっているが、その変化の勾配はどの区間をみても同様であり、繰り返し破壊回数に近づくにつれ、劣化の進展や破壊の予兆と思われるような挙動の変化は確認されなかった。

なお、本実験では繰り返し載荷回数10回毎に計測しているため、破壊直前の載荷時（繰り返し載荷383回目）の計測は行っておらず、380回以降で最大変位の勾配の急激な変化が発生する可能性もある。力学的損傷による建替え評価を行うため、電柱の損傷の蓄積を確認する指標は、短時間で急激に変化するものよりある程度の期間で変化が見られるものを扱う方が望ましいと考える。そ

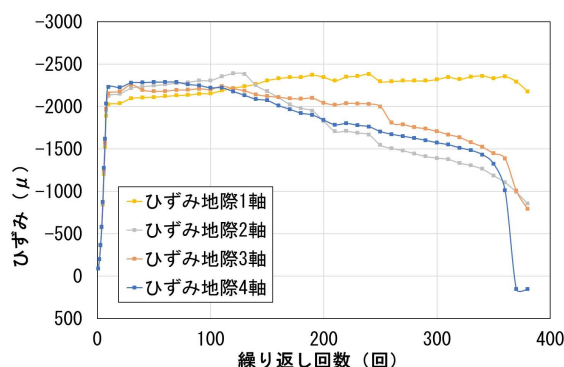


図-10 圧縮側軸方向最大ひずみの変化
(13-19-7.0 の場合)

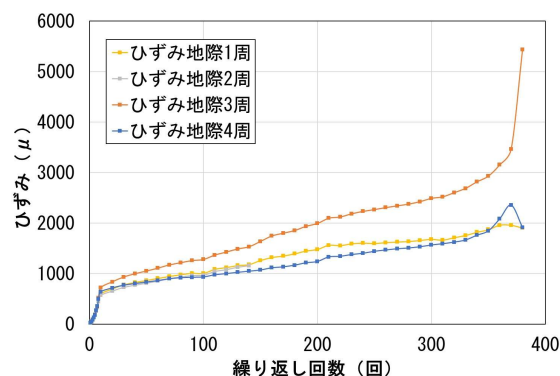


図-11 圧縮側周方向最大ひずみの変化
(13-19-7.0 の場合)

のため、最大変位の変化は電柱の力学的な観点に基づく建替え評価を整理する場合の指標としては、破壊前の挙動の変化がある程度の期間を持って評価できないと考えられ、適切ではないと思われる。

(3) コンクリート表面のひずみ

荷重および繰り返し回数の増加に伴うひずみの変化について、軸方向の最大ひずみの変化は、地際部の計測結果のみを図-10に示す。ひずみゲージ1~4の結果は変位計と同様の結果であったため省力する。計測したひずみは、引張を正としている。载荷ステップ1では変位と同様に荷重の増加に伴い軸方向の最大ひずみが大きくなった。载荷ステップ2では、繰り返し载荷回数の増加により最大ひずみの増加が確認されているが、地際部のひずみの挙動は、途中から減少に転じており、頂部や中腹部のひずみとは異なる傾向を示した。このひずみの減少は、地際部の中でも、前述した写真に示す損傷が発生した周辺でこの傾向が顕著となっている。

周方向の最大ひずみの変化については、図-11に示す通り、载荷ステップ1では、軸方向に作用する曲げ応力のポアソン効果により引張ひずみが生じており、载荷荷重の増加に伴い、ひずみも増加している。载荷ステップ2では、地際部のみ繰り返し回数の増加に伴いひずみが増大していることが確認された。こちらも前述の軸方向ひずみと同様に外観上に損傷が確認された箇所に近い場所で傾向が顕著であった。さらに破壊直前になると地際部の周方向のひずみが局所的かつ急激に増加することが確認された。

(4) 繰り返し荷重による電柱の破壊について

本節では、繰り返し荷重の载荷による電柱の破壊について、上述の外観の変状、変位およびひずみの挙動から整理する。本実験での電柱の破壊は、地際部のコンクリートの圧壊であったことから地際部の圧縮側コンクリートの変状と計測データに着目した。

まず、外観の変状で確認された圧縮側のひび割れは、繰り返し载荷とともに増加していくことで破壊に至っていることが外観の観察からも確認でき、電柱の繰り返し载荷による破壊の中で破壊箇所を決定づける重要な変状

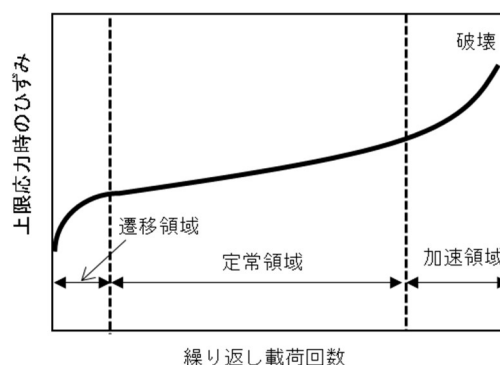


図-12 コンクリートの疲労時の最大ひずみ変化¹⁰⁾

であると言える。

次に、ひび割れ発生箇所に近い軸方向最大ひずみ・残留ひずみの減少は、ひび割れが確認された繰り返し回数あたりから減少が始まっていることや、その他の地際部のひずみには同様の傾向が無く、局所的な変化であることから、前述の圧縮地際部のひび割れが原因であると推察される。メカニズムとしては、ひび割れの進展に伴いひずみゲージ周辺のコンクリートの剥離・ひび割れが進行したことで応力の伝達に影響を及ぼしたものと考えられる。

最後に、周方向ひずみの変化は、载荷ステップ2において繰り返し回数の増加に伴い最初は緩やかに上昇し、グラフは上に凸の形状であるが、破壊直前は、急激にひずみが増加してグラフは下に凸の形状へ変化している。この挙動は、図-12に示すコンクリートの疲労破壊時のひずみ変化のグラフの傾向と酷似している。本実験では繰り返し载荷を行っているため疲労の影響がある可能性は高い。このことから本実験での繰り返し载荷による圧縮側地際部の周方向ひずみの増加および電柱の破壊は、コンクリートの疲労によるものと考えられる。

以上より繰り返し载荷による電柱の破壊の進展のメカニズムは、圧縮側地際部の周方向のひずみの増加より圧縮地際部コンクリートの疲労が進展することで、材料性能の低下が進み生じたものであると推察された。なお、

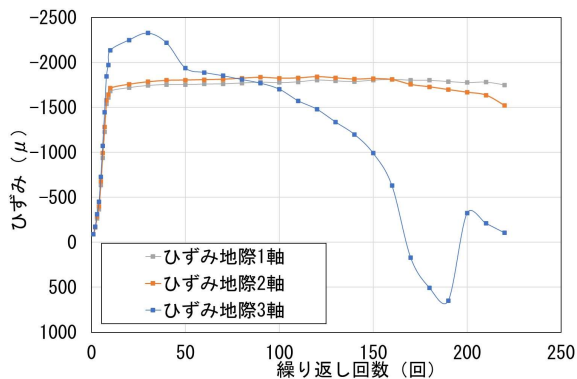


(a) 9-19-5.0

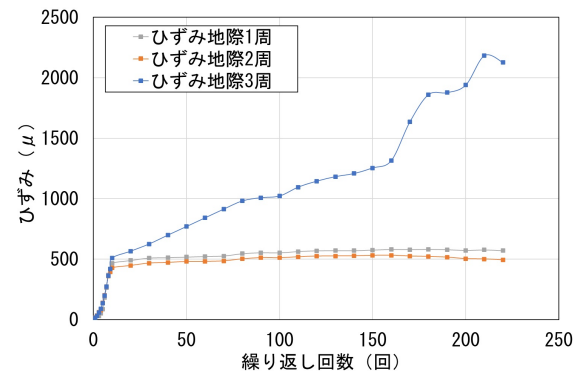


(b) 11-19-5.0

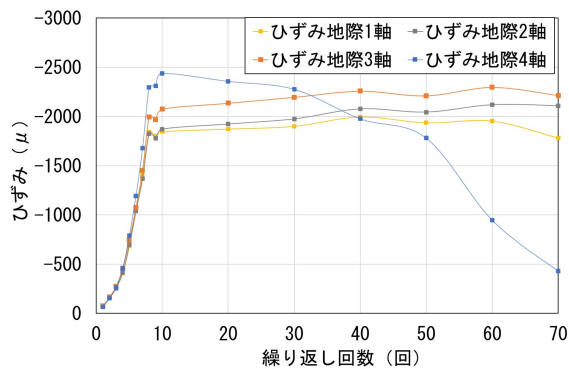
図-13 破壊直前の電柱圧縮側地際部の損傷



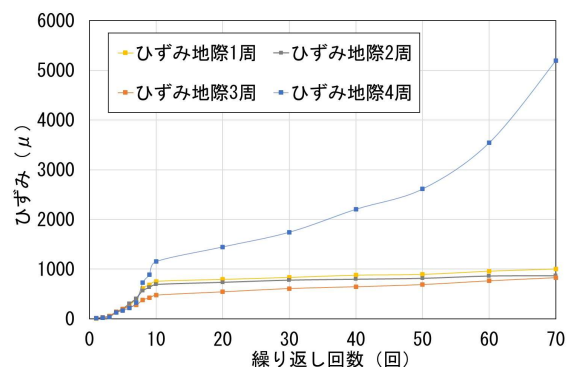
(a) 9-19-5.0



(a) 9-19-5.0



(b) 11-19-5.0



(b) 11-19-5.0

図-14 各電柱の圧縮側最大軸方向ひずみの変化

図-15 各電柱の圧縮側最大軸方向ひずみの変化

本実験は、載荷する最大荷重がかなり大きい (13-19-7.0 の場合、破壊荷重の約 0.86 倍) ため、載荷 1 回の損傷の蓄積が大きく低サイクル疲労にあたる。実際の風荷重から想定される疲労は、載荷荷重が設計荷重以下と想定されるため高サイクル疲労についての検討が必要である。

(5) 電柱の規格(長さ)が与える破壊への影響

本節では、上述した結果のうち、破壊メカニズムと関係があり、かつ力学的な損傷の蓄積を評価するうえで有効と考えられる外観の変状、地際近傍の軸方向および周方向の最大ひずみの変化を比較し、電柱の規格の違いによる破壊メカニズムへの影響について整理する。

電柱規格の影響について、9-19-5.0、11-19-5.0 の試験結果を 13-19-7.0 の結果と比較すると、外観の変状は、圧縮

側地際部のコンクリートにひび割れが同様に確認された (図-13(a)(b)参照)。軸方向最大ひずみは、ひび割れの発生によるものと思われる減少が見られ (図-14(a)(b)参照)、周方向最大ひずみは破壊直前で急激に増加する挙動となっており (図-15(a)(b)参照)、13-19-7.0 と全く同じ傾向を示した。電柱の破壊性状は、図-16 のとおり圧縮地際部のコンクリートが圧壊しており、鉄筋の座屈とらせん筋の破断も見られ、こちらも 13-19-7.0 と同様であった。ひずみの挙動や破壊性状の比較から、電柱の破壊メカニズムは、長さなどの規格に関わらず同様であることが確認できる。

以上より、繰返し載荷等の電柱の力学的な劣化による破壊メカニズムは電柱の規格や使用状態によらず同じ



(a) 9-19-5.0



(b) 11-19.5.0

図-16 破壊後の各電柱

表-2 各電柱の破壊までの繰り返し載荷回数

試験体名	破壊までの繰り返し載荷回数(回)
13-19-7.0	383
9-19-5.0	221
11-19-5.0	75

傾向を示すことを確認した。ただし、塩害や ASR など劣化が著しい場合については別途検討が必要であると考えられる。

最後に、電柱の破壊に至るまでの繰り返し載荷回数については、表-2 に示す通り、長さだけでなく、設計荷重（載荷荷重）や緊張材の本数が異なるため一様に比較はできないが特に規則性は見られなかった。既往の文献でコンクリートの疲労試験では、疲労寿命（破壊までの繰り返し回数）が同じ試験条件でも数百回以上の差でばらつくことが既往の実験でも確認されており¹¹⁾、今回の試験結果も上記の様なばらつきの範囲内にあるものと考えられる。このような疲労寿命のばらつきは、試験体のコンクリートの静的強度や乾燥状態等様々な条件によっても報告されているが、事態は十分に把握されていない。また上述の通り配筋の本数等も試験体ごとで異なるため配筋の違いにより靱性が異なっている可能性も考えられる。本実験は、繰り返し載荷による電柱の破壊に至る過程の確認を目的としていたため、破壊回数のばらつきについては今後長さ以外の配筋等の条件も含めて構造解析から別途検討を行う予定である。

4. 振動中の加速度に着目した電柱の劣化評価の検討

本章は、建替評価手法の検討に先立ち、現場で供用されている電柱でも容易に計測可能な振動に着目し、振動中の加速度の計測結果から、劣化の進行に伴う時刻歴加速度及びパワースペクトルの変化と曲げ試験結果の相関性を確認することを目的に実施した。

4.1 実験概要

実験の機構は、曲げ試験と一対で行っているため、曲げ試験と同一である。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、曲げ試験中の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。

振動に着目した計測項目は、時刻歴の変位・速度・加速度の選択肢があるが、電柱の先端での引張り変位が約 40mm 程度、固有周期が約 0.6 秒、スペクトルを鋭利に出すための測定間隔が 0.01 秒を考慮すると、変位・速度の計測が困難と判断し、加速度を選択した。

加速度計は ARF-50A（東京測器）を用い、設置箇所は、解析がより鮮明になることを期待し、加速度が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解析条件から 2 のべき乗であることを踏まえ、20.48 秒間（測定間隔 0.01 秒、計測個数 2048 個）とした。

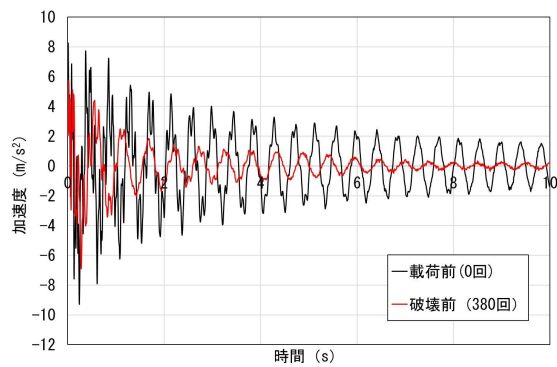
計測頻度について、与える荷重の違い（物理的な劣化進行の違い）が、振動特性に与える変化を詳細に捉えるため、載荷ステップ 1 では、 $P/4$ 刻みで荷重が増加する度に計測した。載荷ステップ 2 では、繰り返し回数 30 回まで 10 回毎に、それ以降は繰り返し載荷回数 50 回、100 回、150 回…と 50 回毎に破壊する直前まで計測することを基本とし（10,20,30,50,100,150…）、電柱の外観の変状に合わせて適宜計測を追加で行うものとした。

4.2 実験結果

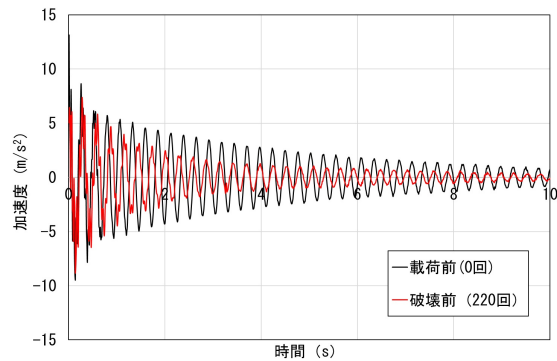
(1) 加速度の時刻歴応答とスペクトル解析

加速度の時刻歴応答は、図-17 に示す通り載荷前と破壊前を比較した結果、全試験体で傾向が共通し、振動 1 回の周期が長くなり、加速度の減衰が大きくなることを確認した。

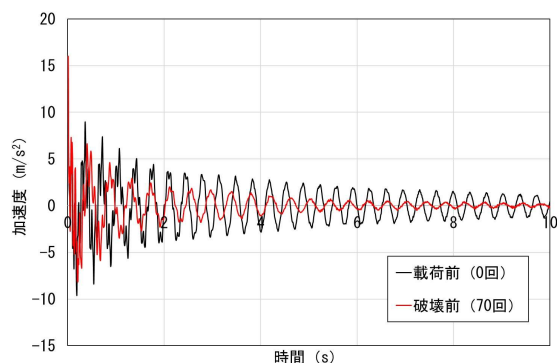
時刻歴応答で確認された固有周期の変化をより定量的かつ視覚的に分析するため、高速フーリエ変換を行った結果を図-18 に示す。この図において、図中の黒色のスペクトルが載荷前の計測結果、赤色のスペクトルが破壊前の結果、その間の青い部分が途中経過の結果を示すが、こちらも全試験体で傾向が共通していた。固有周期の変



(a) 13-19-7.0

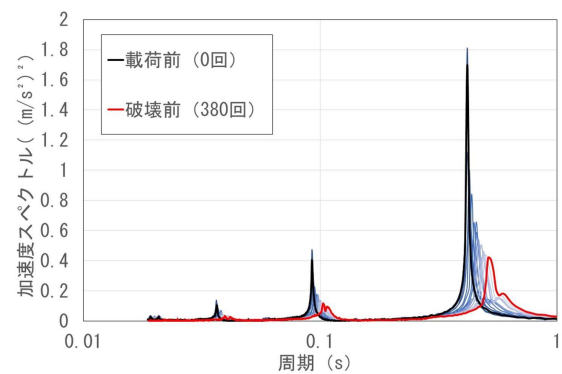


(b) 9-19-5.0

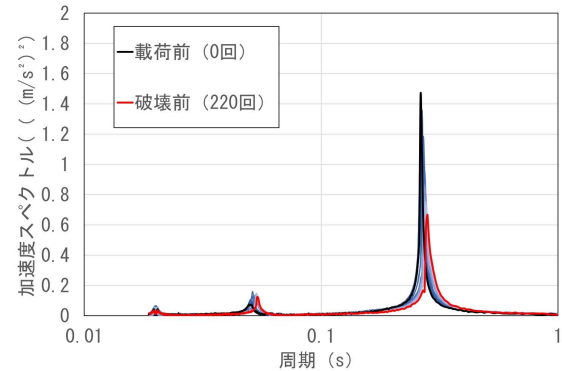


(c) 11-19-5.0

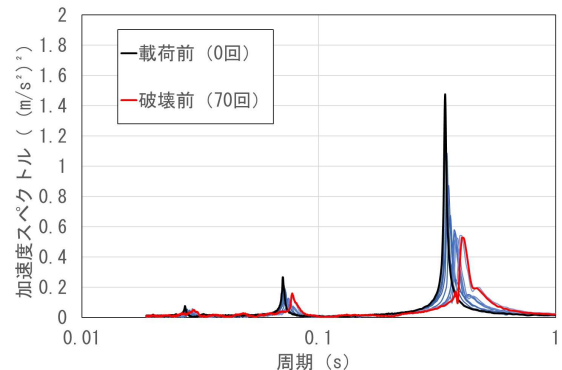
図-17 時刻歴加速度の計測結果



(a) 13-19-7.0



(b) 9-19-5.0



(c) 11-19-5.0

図-18 応答スペクトルの比較

化は、時刻歴応答でも確認された通り劣化の進行とともに、連続的に長くなっている。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。

(2) パワースペクトルの変化に関する考察

振動実験の結果、劣化の進行に伴い、時刻歴加速度においては固有周期が長くなり、加速度の減衰が大きくなることを確認した。スペクトルからは、固有周期が長くなる傾向を時刻歴加速度の結果よりも明確に確認でき、固有周期における加速度スペクトルのピーク値が連続的に減少する傾向も確認した。本節では振動実験結果と曲げ載荷実験結果との整合性について考察する。

固有周期の変化について、1質点系の振動の理論から考えると、固有周期は物体の剛性が小さいほど長くなることが一般的に知られている。本実験における電柱の剛

性の変化は、最大変位が繰り返し載荷に伴い増加していることや、ひび割れの発生などの外観変状が発生していることから、繰り返し載荷回数の増加に伴い減少しているものと推察される。従って、電柱の剛性が低下する、即ち、劣化が進行すると固有周期が長くなることは妥当と考えられる。

時刻歴加速度に見られた減衰の増加については、一般的に、ひび割れが発生すると、ひび割れた箇所と同土が振動中に衝突し、内部摩擦を増加させることになり変化したものと考えられ、こちらも妥当と考えられる。

固有周期における加速度スペクトルのピーク値の減少については、一般的にパワースペクトルにおける各周期の応答値は、減衰定数が大きくなることで小さくなっていくため、上述した減衰の増加によるものであると考えられる。

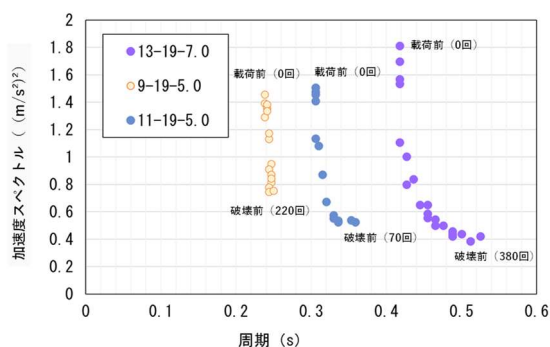


図-19 全試験体のスペクトルピーク値の比較

以上より、劣化の進行に伴う振動特性の変化については、ひび割れの発生やそれに伴う剛性の低下および減衰の増加が原因であると結論付けられる。よって固有周期と応答加速度の変化を確認することは、劣化進行の程度を判断できるパラメータとして有効であり、電柱の取替評価方法に適用可能と考える。

振動中の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-19に示す。この図より、それぞれの電柱で得られる固有周期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、変化の傾向は同じであるが、電柱の長さが短いほど周期が短くなる傾向を示している。そのため、もし実際の評価に固有周期を適用するならば、電柱の長さなどの影響については把握しておく必要がある。

また、載荷前と破壊前の固有周期の変化を長さごとに比較すると 9m のみ固有周期の変化が直線的になる結果となった。この結果は、前述の通り今回使用した電柱は長さ以外にも設計荷重や緊張材の本数も規格ごとに変わっていることから試験体ごとに靱性の差異が生じていると思われる。電柱の規格によってひび割れなどの損傷が振動に与える影響が変化する場合、評価時に考慮する必要があるため、今後長さ以外の条件も含めて詳細な検討を行う。

5. 電柱の力学的な評価に基づく建替評価の一提案

本章では、上述の曲げ載荷試験結果と振動試験の結果より、電柱の力学的な評価に基づく建替基準と、現場の供用電柱における劣化評価方法とその現状の課題について整理する。

電柱の力学的な評価に基づく建替の基準については、電柱に必要とされる最低限の性能、曲げ載荷試験の結果から見た建替基準の目安の観点から整理する。まず、電柱に必要な力学的性能を満足するかの基準は、JISA5373に規定される「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倍載荷時に破壊してはなら

ない」が適切であると思われる。既往の研究の中でも、堂本ら¹²⁾が外観の変状（コンクリートの剥離、鉄筋の腐食）と電柱の残存強度を比較し、劣化評価方法を整理する際にも利用されている。

次に、現在の規格内では整理されていない長期間にわたり供用され、台風などの風荷重を繰り返し受けた電柱の力学的な観点から見る建替評価について、曲げ載荷実験の結果から繰り返し載荷荷重による電柱の破壊は、圧縮を受けるコンクリートの疲労破壊である可能性が示唆された。

疲労による劣化の進行は、コンクリート標準示方書の中で、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4段階に大別されている。このうち潜伏期と進展期は、コンクリートの耐力に影響はないとされており、加速期からは耐力の低下が想定される段階となっている。上記の4段階では、繰り返し載荷を行う際の上限応力を載荷した際のひずみ（本実験における最大ひずみ）の変化にもそれぞれ特徴がある。潜伏期と進展期は、繰り返し載荷回数が増えても最大ひずみの増減はあまり見られないが、加速期・劣化期では、最大ひずみの増加が潜伏期・進展期に比べて急激に増加し、グラフの形状が上に凸から下に凸へと変化する。

本実験の周方向ひずみの変化でも、最大ひずみの増加が繰り返し載荷の途中から急激に進展する挙動が見られた後に破壊している。つまり周方向のひずみが急激に増加を始めた時に電柱は、疲労の劣化段階のうち加速期に入り、耐力の低下が進行して破壊に至ったと考えられる。

また、上述した JIS A 5373 に規定される「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倍載荷時に破壊してはならない」を満たすかの観点から見れば、最大ひずみの増加が急激に加速し始めてから破壊したことより、潜伏期と進展期ではこの基準を満たしていることも実験の結果から確認ができる。

上記の整理から、電柱の力学的な評価に基づく建替の基準は、繰り返し載荷による電柱の損傷が疲労による劣化の加速期に相当する状態まで進展したら建替を検討するように整理できないかと考える。

力学的な評価と関連した現場の供用配電柱における劣化の評価方法については、振動実験の結果からも振動特性を利用するのが適切であると考え。現状有効であると思われるパラメータは、実験の結果から劣化とともに変化が確認された固有周期や、時刻歴加速度の減衰の変化からこちらも変化していると思われる減衰定数、上記の数値と既知の数値（電柱の重量など）を利用して算出が可能となる剛性や粘性減衰係数等が候補に挙がる。

実際の評価の方法は、図-20 のイメージに示す様に、上述の振動特性から得られるパラメータの変化と、曲げ載荷試験で確認された疲労の進展のような電柱の力学的な損傷による劣化との関係を紐づけることで、振動特性のパラメータ変化から、長期間にわたり供用され、台風

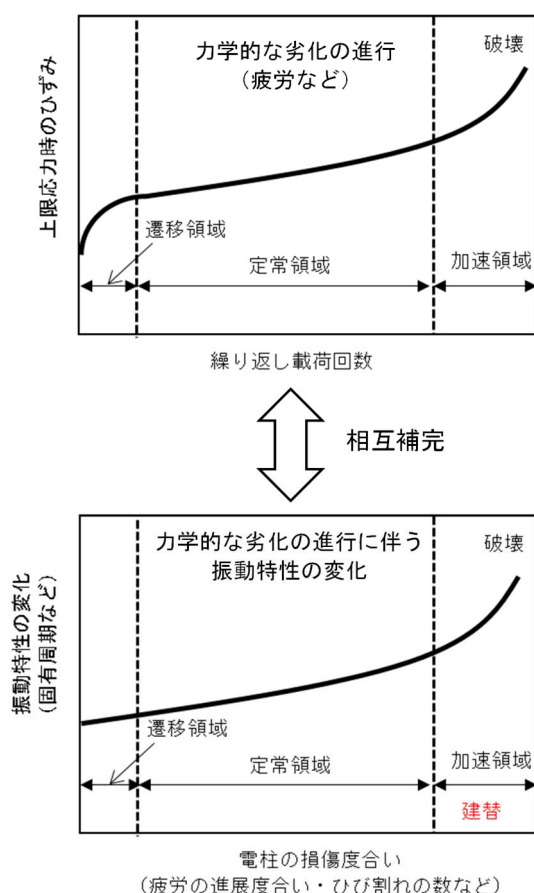


図-20 提案する電柱の建替え評価方法のイメージ

などの風荷重を繰り返し受けた電柱の力学的な損傷度合いを評価する方向で整理していくのが適切かと推察される。

具体的な現場での運用方法について、本実験においては電柱をワイヤーで引っ張り、荷重を開放し振動を与えたが、最終的には電力会社等で実施する電柱の定例点検時に、電柱へ加速度計を設置し、点検作業員が手で押す等の作業で電柱を振動させることで振動特性を計測して劣化状況の評価が行えるような方式にできないか検討している。

本研究の今後の課題は、電柱の力学的な損傷と振動特性の変化を紐づけていくにあたり、今回の実験結果も踏まえ、以下のような項目が挙げられる。

- 1) 振動実験の結果から固有周期などの振動特性は、電柱の規格の差異により変化することが確認されたため、電柱の規格（長さ・断面積・重量等）が振動特性に及ぼす影響を整理する必要がある。また、供用柱については、根入れ部の地盤条件が振動特性に影響する可能性も考えられるためこちらも今後検討が必要と考えられる。
- 2) 固有周期は、緊張力の大きさによっても変化することが既往の文献から整理されている¹³⁾。電柱の緊張力の低下は、クリープや乾燥収縮の影響で発生する可能性がある。つまり、電柱の固有周期などの振動特性は、

電柱自体の損傷だけでなく緊張力の低下でも変化することが予想されるため、緊張力が振動特性に与える影響を考慮したうえで劣化評価を行う必要がある。

- 3) 本実験で使用された電柱は供用されていない新品であり、現在標準期待寿命とされている供用 65 年に近い状態の電柱の力学的性能の評価は未確認であることから、実際に高経年化した電柱の性能について確認することが必要である。
- 4) 実際の台風による風荷重などの载荷荷重の大きさは、平均風速などを考慮すると設計荷重 P 以下であることが考えられる。そのため、実際の電柱における力学的劣化の進展は今回の実験よりもかなり長期の期間で発生するものと考えられる。今後は、载荷荷重の大きさの変更等も加味しつつ、電柱の力学的劣化の進展を評価することも必要と考える。

今後は、上述したような課題を踏まえ緊張力を意図的に変化させた電柱や供用 65 年に近い高経年の撤去柱を使用した実験、今回の曲げ試験結果を元に電柱のシミュレーションモデル¹⁴⁾を作成し、詳細な破壊メカニズムの解析や実試験では再現が難しい载荷条件による曲げ载荷シミュレーションを行い、力学的評価に基づいた電柱の建替基準の提案に向けて更なる検討を行っていく。

6. まとめ

本研究では、現況では十分に整理されていない電柱の定量的な劣化評価基準の確立のため、電柱の損傷度合いと振動特性の相関関係を明らかにすることを最終目標とし、繰り返し载荷による電柱の曲げ载荷実験と繰り返し载荷により損傷を受けた電柱の振動中の加速度の計測を実施した。結果は以下に示す通りである。

- 1) 繰り返し载荷実験の結果から、繰り返し载荷による電柱の破壊の進展のメカニズムは、圧縮地際部コンクリートの疲労損傷が進展することで、材料性能の低下が進み生じたものであると推察される。
- 2) 電柱の繰り返し载荷による破壊の進展のメカニズムは、電柱の規格を変えた電柱の曲げ载荷実験結果の比較から、鉄筋の腐食の進行などの影響が無い場合、電柱の規格によって変化することは無いと予想される。
- 3) 電柱の振動中の加速度の計測結果は、繰り返し载荷回数の増加に伴い振動の固有周期が長くなり、加速度の減衰が大きくなることが確認された。この加速度の変化は繰り返し载荷による電柱の損傷により引き起こされているものと考えられ、力学的な損傷と振動中の加速度で見られた変化を結び付けることで、電柱の建替評価に適用可能であることが示唆された。
- 4) 振動中の電柱の加速度の計測結果は、電柱の規格等によって固有周期なども変化することが確認された。振動に着目した電柱の劣化評価を整理する場合は、電柱の規格（長さ、断面積、重さ）や緊張力等の影響につ

いて検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 電力広域的運営推進機関：高経年設備更新ガイドライン(発行日 2021 年 12 月 17 日), 2021.
- 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, 愛知工業大学学術情報リポジトリ, <http://repository.aitech.ac.jp/dspace/handle/11133/3610> (参照:2023. 8. 15)
- 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, pp.33-34, 2001.
- 6) 古川愛子, 大塚久哲, 梅林福太郎：構造物の損傷に伴う振動特性の変化に関する実験的考察, 地震工学論文集, 第 28 巻, pp.1-9, 2005.
- 7) 阿部慶太, 名取努, 小湊祐輝, 関口琢己, 山野明義, 王林:固有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, Vol.72, No.1, pp.21-40, 2016.
- 8) 経済産業省：電気設備の技術基準の解釈, 2018.
- 9) 伊東佑香, 小林寿子：土木構造物に支持された PC 電柱の鋼材による耐震補強工法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.991-996, 2018.
- 10) 尾上幸造, 松下博通：液体浸漬によるコンクリートの圧縮疲労強度低下に関するエネルギー的考察, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.2, pp.166-178, 2010.
- 11) 松下博通：コンクリート構造物の耐久性状の問題点とその対策, コンクリート工学, Vol.33, No.4, pp.84-93, 1995.
- 12) 堂本瑞樹, 清水政利, 近藤優一, 工藤輝大, 上田洋, 飯島亨：コンクリート電柱の取替判定方法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.2, pp.47-52, 2017.
- 13) 小坪清真著：入門建設振動学, 森北出版, pp.162-164, 1996.
- 14) 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, pp.695-696, 2023.

(2023 年 9 月 4 日受付)

(2024 年 2 月 6 日受理)