

論文 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

上野 貴行^{*1}・池田 博嗣^{*2}・玉井 宏樹^{*3}・井手 健太^{*4}

要旨：コン柱は、本格的な経年対策を必要とする時期を迎えている。しかし、現在の建替評価基準は、外観目視で調査できる範囲のみ整理されており、コン柱に変状が無い場合は、経年劣化を適切に評価されていない可能性がある。変状の無いコン柱の建替評価は、経年劣化の進行に伴う力学的な評価や、外観目視以外の評価方法による評価に関しての知見が少ないのが現状である。そこで本研究は、建替評価基準の検討に先立ち繰り返し載荷によるコン柱の曲げ試験と、振動試験を実施した。その結果、曲げ試験と振動試験で得た物性値は劣化の進行に伴い変化することが確認され、コン柱の劣化評価に適用できることが示唆された。

キーワード：コン柱、弾性係数、振動特性、スペクトル、劣化評価

1. はじめに

コンクリートポール（以下、コン柱）は、配電柱や通信柱及び一般構造柱としてインフラストラクチャの一翼を担う重要な設備である。特に配電柱は、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。

一方でコン柱は、高度成長期の1960～70年以降に、大量に設置されており、本格的な修繕・建替などの計画を必要とする時期を迎えている。

コン柱に発生する変状の種類と発生要因ならびに変状が発生した際のコン柱の性能低下に関しては、「コンクリートポール診断士テキスト」¹⁾に整理されている。また、同テキストによると、現状の建替評価基準は、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提案している。

この建替評価基準は、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。コン柱に変状が現れない場合は、「劣化レベルⅠ」の「観察」対象と判定され、建替対象とならず、劣化を適切に評価されていない可能性がある。外観に変状のない場合の建替評価は、今後、コン柱の適切な修繕・建替を実施するためにも重要であるが、現状の建替評価は、経年劣化が進行したコン柱の力学的な評価²⁾や外観目視以外の方法による劣化評価に関する知見が少なく十分とは言えない。

コン柱を用いた力学的評価に関する近年の知見としては、佐々木らによる研究³⁾がある。佐々木らはコン柱に地震を模擬した荷重を振動台にて載荷し、コン柱の支持条件が破壊性状に及ぼす影響について整理している。上

記のようなコン柱の力学的評価を実施した研究^{例えば4)}は、後述の新柱の力学的評価が多く、後述の撤去柱についての知見は少ない。

劣化評価に関する近年の知見としては、常本ら⁵⁾による研究がある。外観に損傷が無い場合は、中性化の進行から材料劣化を評価するよう化学的な劣化については整理されているが、外観に損傷がない場合における地震や風荷重等による物理的な劣化の進行に関する評価方法は整理されていない。

そこで、本研究では、外観目視上は変状の無いコン柱に対して、1方向繰り返し載荷による『曲げ試験』を行うことで「物理的な劣化」を促進させ、載荷回数の増加と共に変化する後述する力学的な物性値の挙動を把握した。また、未使用のコン柱（以下：新柱）と実際に配電柱として供用されたコン柱（以下：撤去柱）を比較し、経年劣化の進行が物性値の変化に与える影響を確認した。

併せて、建替評価手法の検討に先立ち、コン柱の振動中の加速度を計測する『振動試験』を行った。振動試験は、所定の繰り返し回数で時刻歴加速度を計測し、劣化の進行に伴う変化を確認した。また、曲げ試験で得た物性値の変化との整合を確認することで、劣化評価手法のパラメータとして有効となるかを検討した。

2. 繰り返し載荷による曲げ試験

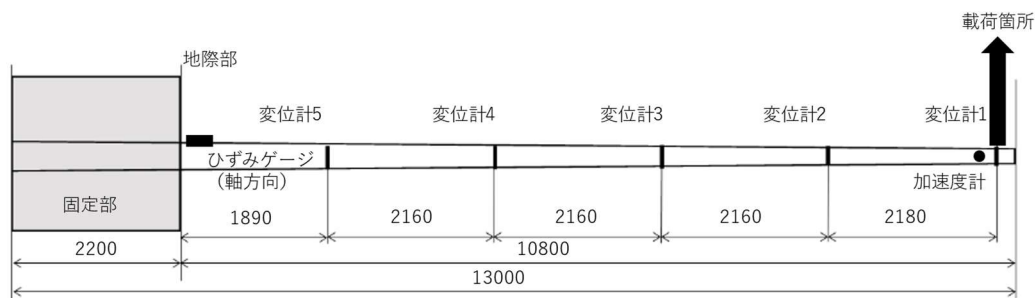
本章では、曲げ試験で用いた試験体やその試験方法、試験結果（繰り返し載荷回数の増加に伴うコン柱の変位、ひずみ、弾性係数の変化）について述べる。また、新柱と撤去柱の比較結果から経年劣化の進行が物性値の変化に与える影響について考察する。

*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 九州電力（株）総合研究所 社会インフラグループ（非会員）

*3 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門（正会員）

*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（非会員）



図－１ 曲げ試験の機構図と計測器の設置位置（単位：mm）

2.1 試験体の仕様

コン柱の構造形式は、プレストレストコンクリート構造（PC 構造）が主流で、その外観形状は、頂部（末口）が底部（元口）に比べて細くなった形状のテーパポールが一般的であり、JIS では 1 種ポールと呼ばれる。

表－１ 試験体一覧

試験体	規格	分類	供用年数（年）
No.1	13-19-7.0	新柱	-
No.2			-
No.3		撤去柱	26
No.4			15

実験で使用したコン柱の規格は、13-19-7.0(左から丈尺(m)-末口直径(cm)-設計荷重(以下、 $P=7.0\text{kN}$ とする)(kN))であり、九州管内で最も利用されているものとした。試験体の状態は、No.1 と No.2 が新柱で、No.3 と No.4 が撤去柱である。撤去柱の供用期間は、No.3 が 26 年間、No.4 が 15 年間で、表－１ に示す。撤去柱の外観について No.3 は、全体的に軽度な表面の劣化が見られ、No.4 は先端に向けて若干の湾曲が見られた。なお 2 本の撤去柱が設置されていた場所や周辺環境については不明である。

2.2 試験内容

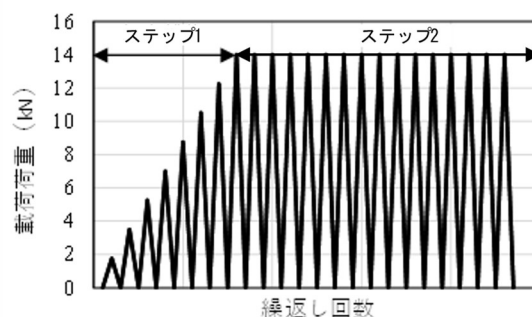
(1) 試験方法

試験方法は、JISA 5373 を参考とした（図－１、図－２ 参照）。試験体の固定は、コン柱を横に寝かせた状態で、コン柱の元口から延長 2.2 m の範囲を木製まくら木と圧力ジャッキを用いる方法とした。载荷箇所は、末口より 0.25m 下方の位置にワイヤーを取り付け、载荷荷重は、計測できるウインチで図中の矢印の方向へ引っ張ることとで与えた（図－２ 参照）。

载荷荷重の条件は、1 方向の繰り返し载荷で、载荷の最大を $8P/4$ （規格上要求される破壊荷重の下限値）とした。载荷のステップは、JISA 5373 と九州電力の関連会社である九州高圧コンクリート工業(株)で行っているコン柱の品質確認試験を参考に、物性値の変化を詳細に確認するため、2 ステップとした。ステップ 1 は、荷重を P



図－２ 曲げ試験の機構（写真）



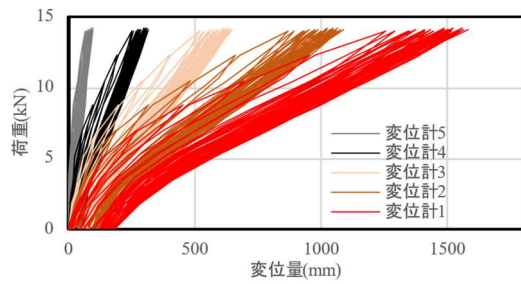
図－３ 荷重载荷ステップ

$/4$ 、 $2P/4$ 、 $3P/4$ …と载荷→除荷を繰り返しながら $8P/4$ まで $P/4$ ずつ増加させた（以下、処女载荷）。ステップ 2 は、载荷の最大である $8P/4$ で载荷→除荷をコン柱が破壊するまで繰り返し継続した。図－３に各载荷ステップのサイクルを示す。

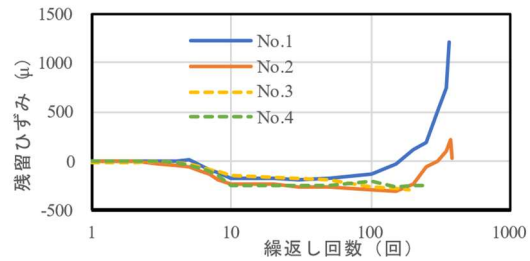
(2) 計測項目

計測項目は、コン柱の軸方向のひずみ及び変位とした。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、载荷時に圧縮応力が掛かる側の点で、応力が大きい地際付近の 1 箇所とした（図－１ 参照）。計測頻度は、ステップ 1 では载荷荷重 $P/4$ 刻みで毎回とし、ステップ 2 では繰り返し回数 10 回毎に $P/4$ 刻みで実施した。

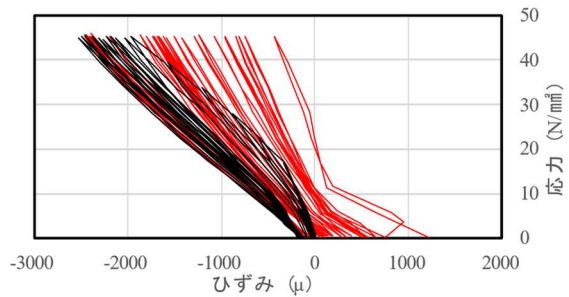
変位の計測機器は、ワイヤー式の変位計を使用した。変位計の設置箇所は、载荷箇所から地際部までを 5 等分する位置とした。計測頻度は、ひずみの計測と同様のタイミングとした。



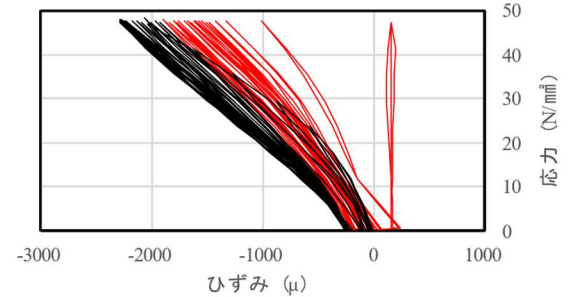
図－4 荷重-変位曲線



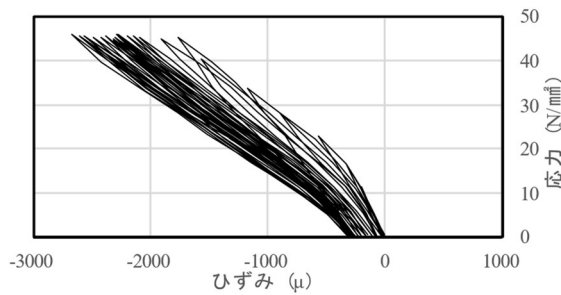
図－5 残留ひずみの変化（引張を正とする）



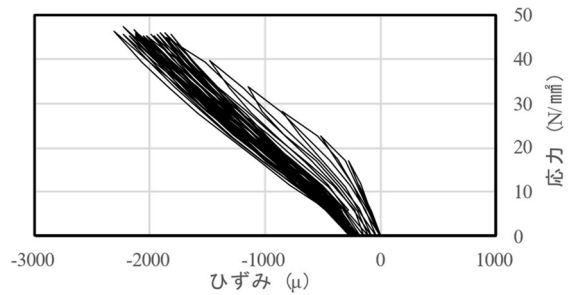
(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No. 3



(d) No. 4

図－6 応力-ひずみ曲線（引張を正とする）

2.3 試験結果

(1) 荷重-変位曲線の変化

設置箇所ごとの変位は、図－4に示す通り、末口に近いほど大きく、劣化の進行に伴い延伸している。なお、この傾向は全試験体で同様であり、図－4には、No.1の値を代表値として示している。

(2) 破壊回数の変化

破壊回数は、No.1が383回、No.2が361回、No.3が186回、No.4が239回で、破壊時の変位（最大変位）とともに表－2に示す。なお、破壊回数の定義は、コンクリートが圧壊するまでの繰返し回数である。

新柱の破壊回数は、約370回程度で、撤去柱よりも大きい結果となった。撤去柱2本の破壊回数は、両者に差があるものの、供用年数が短いNo.4の破壊回数が、多い結果となった。

(3) 最大変位の変化

最大変位は、表－2に示す通り、No.1が1651mm、No.2が1514mm、No.3が1597mm、No.4が1657mmで、供用

表－2 各試験体の破壊回数と最大変位

試験体	破壊回数	最大変位(mm)
No.1	383	1651
No.2	361	1514
No.3	186	1597
No.4	239	1657

の有無や破壊回数との相関関係は認められず、新柱と撤去柱で大きな差異は見られなかった。

(4) 残留ひずみの変化

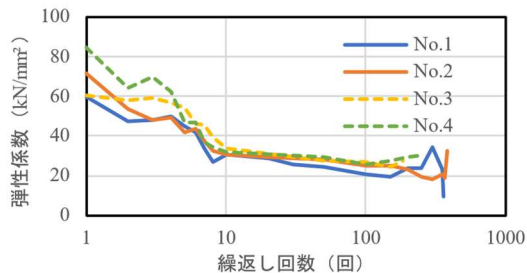
残留ひずみについて、撤去柱における軸方向の変化は、図－5に示す通り、圧縮側にとどまっている。一方、新柱の残留ひずみは、当初圧縮側へ変位するが、破壊が近くなると引張側に転じる傾向を示した。

(5) 応力-ひずみ曲線の変化

引張を正とする全試験体の応力-ひずみ曲線の変化は、図－6に示す通り、残留ひずみと同様に、撤去柱が圧縮

側にとどまっているのに対し、新柱は当初圧縮側への変位する（図中の黒線）が、破壊が近くなると、引張側に転じる（図中の赤線）傾向を示した。

(6) 弾性係数の変化



図－7 弾性係数の経時変化

全試験体の弾性係数の変化は、図－7に示す通り、劣化の進行に伴い、徐々に低下する傾向が見られ、30～40kN/mm²に漸近し、個体差は見られなかった。なお、弾性係数の算出方法は、載荷荷重が $P/4$ （応力で 5.6N/mm^2 ）と $2P/4$ （応力で 11.2N/mm^2 ）との区間の応力ひずみ曲線の勾配とした。

2.4 撤去柱の供用による劣化に関する考察

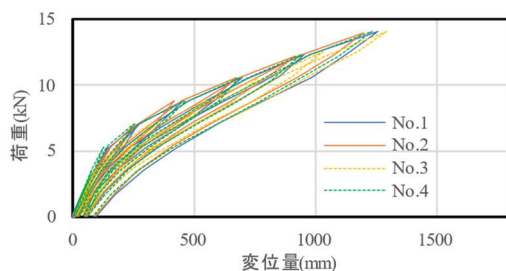
曲げ試験の結果より、撤去柱は、新柱と比較すると少ない回数で破壊に至った。このことから、撤去柱は、新柱に比べ経年劣化が進行している可能性が考えられた。

本節では、撤去柱に劣化を与えた以下の3要因から撤去柱の経年劣化の進行の程度について考察する。

- ①供用中の地震荷重や風荷重の載荷による物理的な力
- ②中性化や塩害等の進行による化学的な変化
- ③緊張力の低下等に代表される経時的な変化を考えた。

なお②の化学的な変化については、今回使用した撤去柱の供用条件が不明であり整理が難しいため今後の課題とし、今回は扱わない。

(1) 撤去柱の物理的な劣化の進行について



図－8 処女載荷時の荷重-変位曲線比較

撤去柱の①物理的な力による劣化の進行については、図－8に示す全試験体の処女載荷時の荷重-変位曲線を比較することで考察する。

一般的に、弾性域を超える荷重が載荷された際のコンクリートの変位履歴は、載荷時と除荷時で異なる履歴を示す。この理由は、コンクリートにひび割れが発生する

ことで、変形が元に戻らず、残留変位が発生するためである。このことから、弾性域を超える荷重による物理的な劣化が進行している場合、荷重-変位曲線の挙動は、ひび割れが既に発生しているため、載荷時と除荷時で同じ経路を通り、新柱と撤去柱で挙動が異なるはずである。

本試験において、撤去柱の処女載荷時の荷重-変位曲線の変化は、載荷時と除荷時の経路が異なっており、新柱と同様であった。この結果から、今回の試験で使用した撤去柱は、載荷前に外観上の変化は見られたが、供用期間にコンクリート自体にひび割れを発生させる様な物理的な劣化は、あまり進行していなかったと考える。

(2) 撤去柱の経時的な劣化の進行について

撤去柱の③経時的な変化の進行については、残留ひずみの変化が、圧縮側から引張側へ推移する実験結果を用いて考察する。

PC コンクリート構造の場合、一般的に、緊張力が低下すると、コンクリートに発生していた圧縮ひずみ（負）が解放されることで膨張し、ひずみゲージに引張の残留ひずみ（正）が発生する。

上記を踏まえ、軸方向の残留ひずみに着目すると、新柱は緊張力の低下により引張側へ遷移する挙動を示しているが、撤去柱は、引張側へ遷移することは無かった。つまり、撤去柱は、試験中に緊張力の低下による圧縮ひずみの解放が発生しなかったことになる。

この結果から、破壊直前では両者とも緊張力が低下していると考えられ、撤去柱の緊張力が載荷前、即ち供用中に低下していたと考える方が妥当である。

緊張力の低下は、一般的に、構造物の引張り外力への抵抗性を弱めるため、コンクリートのひび割れを助長し、即ち劣化の進行を早める結果となる。

このことから、撤去柱の緊張力が元々低下していれば、劣化の進行に対する抵抗性は、新柱に比べて低くなっていたと考えられる。

この結果から撤去柱の緊張力が、弱まっていたことで、撤去柱が破壊にいたるまでの繰返し回数が、新柱よりも少なくなったと考えることが妥当である。

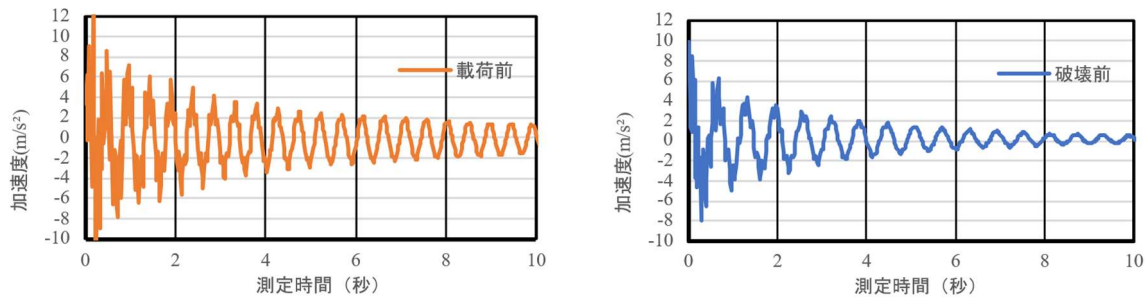
3. 繰返し載荷に伴う振動試験

本試験は、建替評価手法の検討に先立ち、現場で敷設されているコン柱でも計測可能な振動に着目し、劣化の進行に伴うスペクトルの変化と曲げ試験結果の整合性を確認することを目的に実施した。

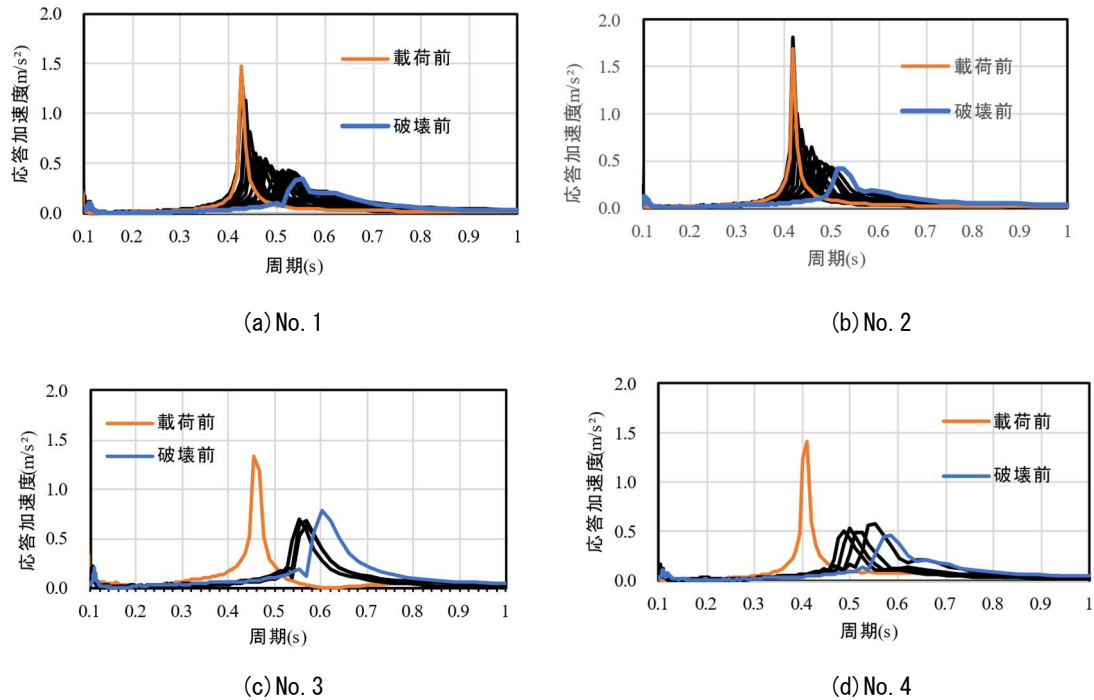
3.1 試験概要

(1) 試験方法

振動試験の機構は、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、試験体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、



図－９ 時刻歴加速度の計測結果



図－１０ スペクトル解析結果比較

曲げ試験中の試験体に損傷を与えないよう、 $P/4=1.75\text{kN}$ を越えない値として 1kN とした。

(2) 計測項目

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、新柱は、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、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。ステップ 2 では、試験の労力を減らす

ため、繰り返し回数 30 回まで 10 回毎に、それ以降は 50 回毎に破壊する直前まで計測を計測した。

撤去柱の頻度は、ステップ 1 では $P/4$ と $8P/4$ 載荷後にいき、ステップ 2 では 50 回毎とした。

3.2 試験結果

(1) 時刻歴加速度の変化

劣化の進行に着目した時刻歴加速度は、全試験体で共通し、回数が増加するほど、周期が長くなり、また、加速度の減衰が大きくなっている。図－9 は、その傾向を明確に表すため、No.1 試験体の載荷前と破壊直前とを記載した。

(2) 応答スペクトル解析における固有周期の変化

本項では、時刻歴加速度の変化を定量的かつ視覚的に分析するため、時刻歴加速度を応答スペクトル解析し、算出した固有周期と応答加速度に着目した。

全試験体の応答スペクトル解析は、図－10 に示す様に、図中の橙色が載荷前、青色が破壊直前であり、劣化の進行とともに、固有周期が連続的に長くなり、応答加

速度も連続的に減少する結果を得た。

3.3 固有周期と応答加速度の変化に関する考察

振動試験の結果、劣化の進行に伴い固有周期とその応答加速度が変化する傾向が見られた。本節ではスペクトルの変化と曲げ試験における物性値の変化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。

上記を踏まえ、剛性を構成する弾性係数等の変化に着目すると、2.3(6)で述べた様に、全試験体の弾性係数が劣化の進行に伴い、徐々に低下する傾向が見られている。従って、弾性係数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。

応答加速度の低下については、一般的に、劣化が進行することで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、振動の減衰が大きくなることで発生したと考えられている。このことから劣化の進行に伴って応答加速度が低下することは、妥当と考えられる。

以上より、劣化の進行に伴う振動特性の変化について、固有周期の増加は、弾性係数等の低下が原因であり、応答加速度の低下は、ひび割れの発生等の物理的な劣化の進行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、コン柱の取替評価方法に適用可能と考える。

なお、今回の結果は、コン柱を素柱として計測した結果である。今後は、実際の供用柱での適用を考慮し、下記の課題も含めて検証を進める。

- ・コン柱は 13-19-7.0 以外にも様々な長さ・断面形状・設計荷重の規格があり、規格によらず評価方法を適用できるよう更なるデータの収集を行う必要がある。
- ・供用柱は、直立しているためひび割れがコン柱自身の自重とプレストレス力により閉口し、ひび割れの影響が変化する可能性がある。
- ・本試験の破壊条件は、コンクリートの圧壊のみしか整理しておらず、鉄筋および PC 鋼線の降伏等の破壊条件も含めて取替評価方法を整理する必要がある。
- ・今回は天端にて計測を行ったが、実際の計測では、天端より地際に近い方が作業は容易である。そのため実際の供用柱における計測を考慮した荷重の種類・計測位置の最適化が必要である。

4. まとめ

本研究では、物理的劣化の促進を想定した繰り返し載荷による曲げ試験を行い、載荷回数の増加(劣化の進行)

に伴うコン柱の物性値の変化、及び新柱と撤去柱の比較から経年劣化の影響を確認した。

併せてコン柱の時刻歴加速度をスペクトル解析し、建替評価手法の検討を行った。結果を以下に示す。

結果 1：曲げ試験の結果より、破壊回数は、新柱の方が撤去柱よりも多くなった。

結果 2：軸方向の残留ひずみの変化は、撤去柱が圧縮側へ遷移するのに対し、新柱は一旦圧縮側へ遷移するが、破壊直前では引張側へ転じる傾向が見られた。

結果 3：全試験体の弾性係数の変化は、劣化の進行に伴い、徐々に低下する傾向が見られた。

結果 4：時刻歴加速度の計測結果より、劣化の進行に伴い、固有周期が長くなり、加速度の減衰が大きくなった。

考察 1：コン柱の経年劣化について、結果 2 から撤去柱の緊張力は供用中に抜けていて(経時的な劣化が進行)、新柱の緊張力は劣化の進行により載荷の途中で抜けたと結論付けた。撤去柱は、緊張力が弱まっていたことで、破壊が新柱よりも早まった(結果 1)と考えることが妥当である。

考察 2：振動試験の結果と曲げ試験の物性値の変化を整合すると、結果 4 は曲げ試験の物性値の変化と対応していると考えられることから、コン柱の建替評価方法に適用可能と考える。

今後は、電柱の規格の影響、曲げ試験で確認した物性値の変化との関係性整理、様々な条件で供用された撤去柱および実際の供用柱のスペクトル変化に関するデータ収集などを実施し、実用化に向けた課題も踏まえて取替評価方法の整理を進めていく。

参考文献

- 1) 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，2018.10.01
- 2) 阿部 稜ほか：プレストレストコンクリート長尺柱の曲げ変位特性，令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回学術講演会，2022
- 3) 佐々木 崇人ほか：実物大のコンクリート柱(電車線路用)を用いた振動台試験，コンクリート工学年次論文集 Vol.38 No.2，pp859-864，2016
- 4) 桑原 洋ほか：架空配電設備の震害事例調査およびコン柱と地盤の変形特性に関する水平繰返し載荷実験，土木学会論文集第 427 号，pp193-202，1991.3
- 5) 常本 瑞樹ほか：コンクリート電柱の取替判定方法，鉄道と電気技術 28 号，pp48-53，2017.1.31