

深層学習を用いた電柱の劣化診断装置の開発

[研究代表者] 岩月 栄治 (工学部土木工学科)
 [共同研究者] 小塚 晃透 (工学部電気学科)
 津田 紀生 (工学部電気学科)

研究成果の概要

全国に設置されている約 3600 万本の電柱のうち、高度経済成長期に設置されたものは耐用年数を超えつつある。これらを維持管理するためには定期的な点検が必要だが、一律的な点検方法はなく、点検者の技量に委ねられている。このようなことから、一律的な判定を行うことが可能な機器の開発が必要となっている。

(1) ヒューム管及び2m電柱の劣化状態の把握
 塩水噴霧による劣化促進環境を継続しているヒューム管と2m電柱の劣化状態の観察を行った。表面の変位を直接的に測定するような測定手法では、長期の劣化を判定することに適応できないことが、あらためて分かった。また、超音波伝搬速度は測定者の人為的なばらつきと、コンクリートの乾湿の状況による測定値の変化もあるが、おおむね長期の劣化状況を把握できそうであることが分かった。

(2) ヒューム管の自然電位と内部鉄筋の腐食状況
 コンクリートの腐食部分を研り、内部の鉄筋の腐食状況を確認すると、表面は腐食しているが鉄筋断面の減少までには及んでいない状況であった。このことから、自然電位による内部鉄筋の腐食劣化は、ひび割れを事前に導入して塩水噴霧による腐食促進を実施していても、鉄筋が破断するほどの腐食は発生していないことが分かった。

(3) 超音波伝搬速度と波形スペクトルから算出した伝搬速度の比較
 ヒューム管で超音波伝搬速度と波形スペクトルから算出した伝搬速度の比較では、ほぼ同等の数値となった。測定機器が異なっても、同じ振動子を用いれば測定誤差はほとんど生じないことが分かった。

(4) 実際の電柱を用いた劣化異常の検知方法検討
 これまでの結果から、電柱に振動子による超音波をバイポーラ電源によって振幅を増幅して発信し、その波形をFFT変換によって取得した。データの整理では受信波形に対してSTFTしたデータを画像化し、データ量削減によるグレースケール化を行いデータ学習・検証に利用した。学習・検証データからの損失値によって劣化診断を可能であること方向性が見いだせたことから、これを検証するために実際の電柱を建柱して測定を行い、深層学習による判定の基礎データを得ることとした。

研究分野：コンクリート工学

キーワード：深層学習、劣化診断、電柱

1. 研究開始当初の背景

電柱は全国に約 3600 万本設置されており、高度経済成長期に設置されたものは耐用年数を超えつつある。これらを維持管理するため定期的な点検が必要である。現在の点検方法は、目視によるひび割れや欠けの観察によっており、一律的な点検方法ではなく、点検者の技量に委ねている。

また、点検を実施する技術者の養成も必要である。このようなことから、一律的な判定を行うことが可能な機器の開発が必要となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電柱の劣化状況を一律的に診断化可能

な機器の開発を最終目的としており、AI や深層学習を取り入れた分析データを基に判定を行うことを目指し研究を行った。

3. 研究の方法

これまでの先行研究は、2017 年度愛知工業大学プロジェクト研究 B、2018 年度愛知工業大学技術研究所プロジェクト研究 A による研究が発端となっている。この研究では、電柱を模擬した円筒のコンクリート製ヒューム管を用い、超音波伝搬速度を計測した。実験に用いたヒューム管は、健全管の他に、曲げひび割れを導入した管（軸方向に直角方向のひび割れ）、圧縮ひび割れを導入した管（軸方向に平行なひび割れ）を用いた（写真 1）。計測においては圧縮・曲げの加圧力を導入した状態での超音波伝搬速度を測定し、変形（ひび割れの開口幅）が大きいほど超音波伝搬速度が減少する状態を確認した（図 1）。ここで得られた知見を基に発明届と特許出願を行い、さらに実際の電柱を用いて超音波伝搬速度の計測を行った。超音波伝搬速度においては、計測機器メーカー（株式会社マルイ）による測定の他に、超音波伝搬時の伝播波形をオシロスコープによって FFT 変換しスペクトル解析を行う事で特徴の検出を行った（図 2、図 3）。



写真 1 使用したヒューム管と超音波伝搬速度の測定状況

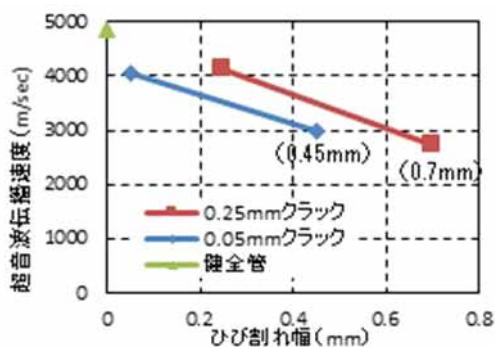


図 1 ヒューム管の超音波伝搬速度とひび割れの関係

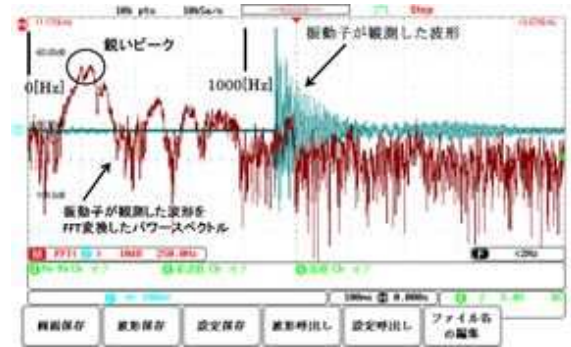


図 2 健全なヒューム管のスペクトル

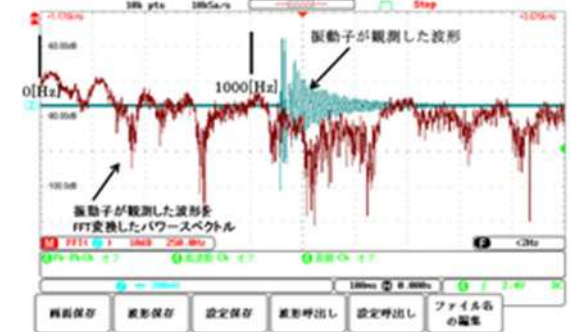


図 3 ひび割れ有のヒューム管のスペクトル

引きつづき、2020 年に愛知工業大学教育研究プロジェクト分野横断型において研究を継続し、これまでのヒューム管の他に、実際の電柱と同等に作製した長さ 2m のコンクリート円筒管（2m 電柱）を新たに用いて、塩分浸透による劣化促進環境での超音波伝搬速度と自然電位測定を行った（写真 2）。この研究では P 波振動子をバイポーラ電源を用いて駆動し、単一の周波数を探触子に入力した時に発生する複数の周波数を使って深層学習し欠陥検出の研究を行った。

異常の検知は、AnoGAN(Anomaly Detection with Generative Adversarial Networks)を用いた。学習後の損失値から異常度を求める方法であり、学習に用いたデータを再現することができるかによって異常度が決まり、再現できるものが正常であり再現できないものを異常と判断する。

次に、異常検知にマハラノビス距離が利用できないかについても検討を行った。マハラノビス距離は、健全管・劣化管から得られたデータに対し STFT(short-time Fourier transform)処理した画像から最大ピクセル値に対応する周波数と時間を抽出し、そのデータを 2 次元配列に格納した後、算出した。パワースペクトルを縦軸、周波数を横軸とした図に、2 次元配列とマハラノビス距離をプロットし判

別を行った。

実験では健全管のデータ 1900 枚、劣化管のデータ 25 枚を用意した。画像データを 7:3 の割合で分割し、学習用データとテスト用データとして使用した。STFT 画像の最大ピクセル値における周波数と時間から求めた。

マハラノビス距離は、探触子への入力信号の振幅電圧が 120Vpp、60Vpp では異常検知可能であるが、30Vpp、15Vpp の振幅では異常検知不可能である事が分かった。

この結果から、マハラノビス距離を用いた異常検知は、入力信号波形の振幅が小さくなると異常が検知できなくなる。その為、実験装置の小型軽量化には向いてないと判断した。

次に、AnoGAN による異常検知は、健全管の STFT 画像 1900 枚を学習用データとして用意し、学習後に健全管 25 枚、劣化管 25 枚でテストを行い、異常度を求めた。

学習後のテストにおいて、異常データとして使用した塩水噴霧処理を行なった健全管と横ひび割れ管の STFT 画像を示す（図 4）。AnoGAN では、損失値を比較することで異常を検出できる。テスト画像と AnoGAN により生成した画像、生成時の損失値は AnoGAN の推論工程において求めたスコア計算値とした（図 5）。損失値の平均は、健全管で 126、健全管（塩水噴霧）で 200、横ひび割れ管（塩水噴霧）で 170 となった。健全管（塩水噴霧）が高い値と

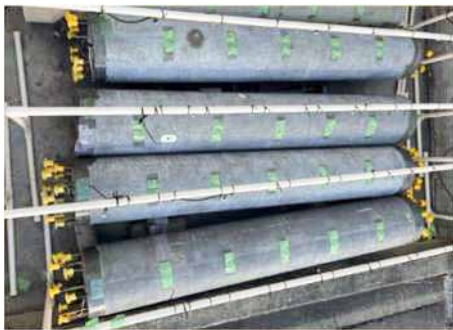


写真 2 2m電柱の塩水噴霧の状況

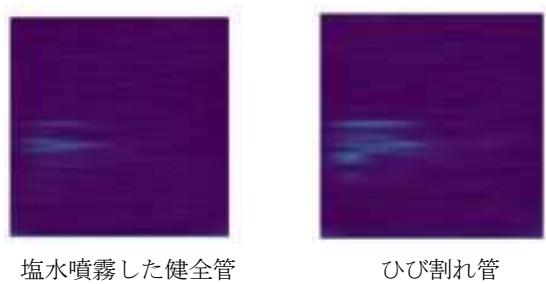


図 4 塩水噴霧した健全管とひび割れ管の STFT 画像

ラベル	健全	健全 塩水	横ひび 塩水
テスト 画像			
生成 画像			
損失値	126	196	169

図 5 テスト画像および GAN により生成した画像と生成時の損失値

なった原因として、表面に傷がないことから超音波が伝播しやすく、コンクリート自体の劣化により異常値として高い値を算出したと考えられる。劣化管の中で横ひび割れ管（塩水噴霧）が損失値 170 であるため、閾値を 150 程度にすることで検知可能であることが分かった。

以上の先行研究の結果から、本研究として以下を実施する。

- ①これまでに計測してきたヒューム管や 2m電柱の具体的な劣化状態（表面変異、ひび割れの拡大、超音波伝搬速度、自然電位による内部鉄筋の腐食状態の推定、コンクリートを研って内部鉄筋の実際の腐食状態の観察）を明確にして、これまでの超音波の伝播波形、FFT スペクトル等との比較を行う。
- ②実物の電柱（12～14m）をキャンパス内に建柱し、本多電子㈱で試作したセンサを設置して揭示変化の長期測定を開始し、データを得る。
- ③実物の電柱で測定した長期のデータを基に、電柱の劣化診断を行える測定器の構想を確定する。

4. 研究成果

(1) ヒューム管及び 2m電柱の劣化状態の把握

これまでの研究を発展することとして、塩水噴霧による劣化促進環境を継続しているヒューム管と 2m電柱の劣化状態の観察を行った（写真 3）。ヒューム管と 2m電柱の超音波伝搬速度の変化は、測定当初では 4000～4500m/s 程度であったが、4 年の塩水噴霧によって 2500m/s を下回るまでに低下した（図 6）。またヒューム管及び 2m電柱の表面

に設置した変位測定チップ（ステンレス製）の変位測定結果は 2～3 年間の長期では人為的な測定誤差や測定チップ自体の劣化や測定者が代わることも含めた測定誤差の影響が大きかった。以上から、表面の変位を直接的に測定するような測定手法では、長期の劣化を判定することに適応できないことが、あらためて分かった。また、超音波伝搬速度は測定者の人為的なばらつきと、コンクリートの乾湿の状況による測定値の変化もあるが、おおむね長期の劣化状況を把握できそうであることが分かった。



写真3 塩水噴霧による劣化促進のヒューム管と2m電柱の状況



図6 超音波伝搬速度の低下状況の一例
(2m電柱、0.25mm 圧縮ひび割れ導入管)

(2) ヒューム管の自然電位と内部鉄筋の腐食状況

塩水噴霧を 3 年間実施したヒューム管の自然電位の分布では、 -350mV （飽和硫酸銅電極）となるエリアがヒューム管全体に広がっており、90%以上の確率で腐食していると判断された（図7）。この部分のコンクリートを研り、内部の鉄筋の腐食状況を確認すると表面が腐食しているが鉄筋断面の減少までには及んでない状況であった（写真4）。このことから、自然電位による内部鉄筋の腐食劣化は、ひび割れを事前に導入して塩水噴霧による腐食促進を実施していても、鉄筋が破断するほどの腐食は発生していないことが分かった。

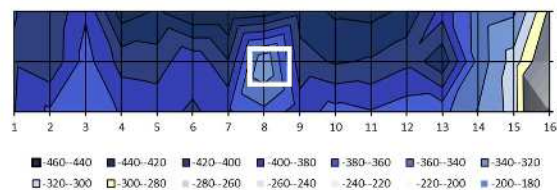


図7 自然電位の分布（ヒューム管、0.05mm 圧縮ひび割れ導入、2023年12月6日）



写真4 ヒューム管の内部鉄筋の腐食状況（図7の□部分）

(3) 超音波伝搬速度と波形スペクトルから算出した伝搬速度の比較

ヒューム管で超音波伝搬速度（楸マルイ製 使用）と波形スペクトルから算出した伝搬速度（楸Tektronix の測定器使用）の比較では、ほぼ同等の数値となった。健全管、0.1mm 曲げひび割れ導入、0.05mm 圧縮ひび割れ導入、0.25mm 圧縮ひび割れ導入であり、測定機器が異なっているにもかかわらず、同じ振動子を用いれば測定誤差はほとんど生じないことが分かった。

(4) 実際の電柱を用いた劣化異常の検知方法検討

これまでの結果から、電柱に振動子による超音波をパイポラ電源によって振幅を増幅して発信し、その波形をFFT変換によって取得する。データの整理では受信波形に対してSTFTしたデータを画像化し、データ量削減によるグレースケール化を行いデータ学習・検証に利用する。学習・検証データからの損失値によって劣化診断を可能であることの方向性が見いだせたことから、これを検証するために実際の電柱を建柱して測定を行い、深層学習による判定の基礎データを得ることとした。

電柱は 2024 年 3 月 15 日に八草キャンパスの北校地に設置した。電柱の種類は、14m分割柱、曲げ試験後の14m分割柱、12m電柱、曲げ試験後の12m分割柱の4本とした。曲げ試験は電柱の製作会社で実施し、許容応力の1.6

倍程度の引張荷重を与えてひび割れを導入したものである。



写真 5 北校地に建柱した電柱

次年度（2024 年度）の計画は、設置した電柱に、新たに開発した振動子（本多電子㈱製）を用いてデータを取得する。データはデータロガーによる自動測定とインターネットによるリアルタイムで確認できるようにする。電柱の劣化に関わる気象状況も観測機器を設置する。これらの自動測定と並行して㈱マルイの超音波測定器を用いて測定も行い、新たに開発した振動子との比較を行うことを計画している。長期に取得したデータを基に、診断機器の開発を検討することとする。

5. 本研究に関する発表

- (1) 古屋直樹、岩月栄治、小塚晃透、津田紀生、豊田昌弘、
“敵対的生成ネットワークと自己符号化器を用いた電柱に対する異常検知”、電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会（豊橋技術科学大学）、J6-6、2023 年 8 月 29 日
- (2) 古屋直樹、岩月栄治、小塚晃透、豊田昌弘、津田紀生、
“Autoencoder を利用したコンクリートポールに対する異常検知”、電子情報通信学会総合大会 情報・システムソサイエティ特別企画ジュニア&学生ポスターセッション（広島大学東広島キャンパス）、ISS-A-018、2024 年 3 月 7 日