

**愛知工業大学教育・研究特別助成**  
**AIT Special Grant for Education and Research**  
**令和2年度中間報告書**

種 目	研究 分野横断型 研究期間：令和2年度～令和4年度		
課 題 名	深層学習を用いた電柱の劣化診断		
研究代表者	津田 紀生（工学部 電気学科 教授）		
研究分担者	小塚 晃透（工学部 電気学科 教授） 岩月 栄治（工学部 土木工学科 教授）		
助 成 額	1,631,000 円（令和2年度）	実支出額	708,475 円

費目別決算

（単位：円）

区 分	合 計	設備備品費	消耗品費	旅 費	その他
経費内訳	708,475	362,807	327,375	0	18,293

専門分野：計測

キーワード：電柱、劣化診断、超音波振動子、深層学習

### 1. 研究開始当初の背景

国内のコンクリート柱（電柱）は、厳格な規格に基づき、コンクリートと鋼材で構成されている。コンクリートは、引張荷重に弱い為、内部の鋼材が引張荷重を分担する。また電柱は、工場において遠心成形製造されるため、現場でコンクリートを打設する土木構造物と比較すると品質が良い。この為、設置後の電柱は、中性化や塩化物イオンの浸透が遅くなると考えられてきた。

しかし、長年電柱を使用していると、強風により電柱が曲がった時に、空隙やひび割れなどの欠損が電柱表面に発生する。これらは、電柱が元の状態に戻ると、外観からは確認するのが難しい。しかし、この空隙やひび割れから塩化物イオンが電柱内部に浸透したり、二酸化炭素などの影響によりコンクリートの中性化が進行したりして電柱内の鋼材を腐食させる。

電柱表面に生じた欠陥の検査方法は、空隙やひび割れの長さや大きさの目視によって検査し、空隙やひび割れがある程度の大きさになってきたらハンマーを用いた打音検査を行い、劣化度を判定するのが一般的である。しかしながら、打音検査の場合、音を聞き分ける能力が作業者に求められる為劣化の状態を判別出来るようになるのに時間がかかる。

近年、深層学習を利用した劣化判断に関する研究が様々な分野で進んでおり、深層学習を利用する事により、電柱の劣化判断ができれば、作業者の熟練度に依存せず誰でも判別する事が可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究は、打音時にコンクリート内を伝搬する超音波の伝搬速度や周波数を深層学習で学習し、技術者の熟練度や周囲の環境に影響されず、誰でも現場で劣化を判別できる学習モデルを作成し、超音波を利用した、電柱組込み型の安価な装置を開発する事である。

一般的に、コンクリートは不均一な材質の為、超音波の伝搬信号には多くのノイズが含まれる。その為受信信号の中から求める信号を選択するには、数千回に及ぶ平均化処理等が必要な巨視的超音波法を利用する。そこで、深層学習を用いて、目的の信号を求める技術を確認したい。また、今回の研究を通じて、様々な学習データを集め、深層学習が何に注目して判断しているのかが分かれば、深層学習に頼らなくても、電柱自身が定期的に劣化を判断するような、スマート電柱の実現につながると思われる。

### 3. 研究の方法

令和2年度の研究は、新型コロナウイルスの影響により、当初予定していた、コンクリート柱製造業社の試験場を使った実験は行えなかった。そこで、大学内でヒューム管を使った実験に変更し実験を行った。

○実験対象：

図1に実験に使用したヒューム管を示す。学内では、ヒューム管4種類（健全管、縦ひび（2本）クラック幅0.05mm・0.25mm、横ひび（1本）クラック幅0.25mm）を使い実験を行った。



図1. 実験に使用したヒューム管

コンクリート柱倒壊のメカニズムを精査すると、以下に示す3つのメカニズムにより倒壊していることが分かってきた。

#### (1) 地上数メートルの部分でコンクリート柱が折れている場合。

この場合、コンクリート柱内の鉄骨は、腐食で切れておらず、折れた電柱内で繋がっている。主に、台風などの強風時や震度5以上の地震により倒壊した場合に発生する現象。コンクリート柱設計時の安全係数を増加させる事により、コンクリート柱の強度を増加させ、倒壊を防ぐ。

#### (2) コンクリート柱の地中部において、コンクリート柱内部の鉄筋の腐食が進んだ場合。

この場合、地中部の鉄筋の錆が、地上部まで進行している場合が多く、地上部のコンクリート損壊の目視検査から、コンクリート柱の折損事故を防止できる。

しかし、コンクリート柱を固定する根元にひび割れが存在すると、地上から見えない地

中部で鉄筋の錆とコンクリートの損壊が急激に進行する。このような場合、地中の状況を目視により確認するには、コンクリート柱の根本周辺の掘削を行わないといけない為、多額の費用がかかる。また、この部分は、地中部に溜まった水分によって、錆が進行する為、例え地上部のコンクリートが乾いていても、地中部のコンクリートは常に濡れている可能性が高く、コンクリート柱自体が含んでいる水分量が場所によって異なり、コンクリート柱自体の音波の伝搬速度や周波数が、コンクリート柱上部と異なると考えられる。

#### (3) コンクリート柱の連鎖倒壊により倒れた場合。

この現象は、強風によって飛ばされてきた看板、瓦などの建物の一部、倒木等がコンクリート柱やケーブルに引っかかり、コンクリート柱が1本倒壊した場合、ケーブルで繋がれた周囲のコンクリート柱が相次いで倒れる現象である。この現象を防止する為、強度の高いコンクリート柱を数本間隔で設置し、連鎖倒壊を防ぐ事が考えられている。

以上のように、コンクリート柱の倒壊には様々なメカニズムが存在する。そこで、コンクリート柱倒壊の原因として、コンクリート柱の安全係数を増加させれば倒壊を防げるものは、我々の研究対象から除き、既設のコンクリート柱の劣化を外部から超音波信号を入力し、判断する研究を行う事とした。そこで、令和2年度は、コンクリート柱内部を伝搬する信号のシミュレーション、コンクリートに印可した信号を用いて健全管とクラックの入ったコンクリート柱の判別、ヒューム管の塩害劣化の研究を行った。

### 4. 主要な設備備品

大学内で実験を進めるにあたり、コンクリート柱として、ヒューム管4本（健全管・縦ひび2本、横ひび1本）を図1に示す。

コンクリート内の欠陥を調べるのに、マルイ社製のP波センサ4個・S波センサ2個はマルイ製を所持している。P波振動子を図2にS波振動子を図3に示す。

コンクリート柱を打撃し、コンクリート柱内に信号を伝える場合、一定の力で打音しなければならない。そこで、実験ではソレノイ



図2. P波振動子



図3. S波振動子

ドを使用した。ソレノイドは、プッシュ型のものを使用し、一定の力でコンクリート柱に打撃を加えた。実験時、ソレノイドをヒューム管に固定する為の治具は、3Dプリンタで作成した。

ヒューム管をソレノイドで叩く場合、単打音の場合は、オシロスコープで波形を測定し、連続打音は IC レコーダーで波形を記録した。記録した波形から、オシロスコープを使って伝搬速度を求めたり、FFT (fast Fourier transform) 処理し、信号の周波数を求めた。

### 5. 研究成果 (現在までの研究実施状況)

コンクリート柱を伝搬する波は、過去に行われてきた多くの研究から、物体内部を伝搬する実体波である P 波 (縦波)・S 波 (横波) と物体表面を伝搬する波であるレイリー波・ラブ波があることが分かっており、P 波が最も伝搬速度が速く、次に S 波、ラブ波、最後にレイリー波と伝搬する。

ラブ波・レイリー波は表面波でありコンクリート柱の表面を伝搬する。一方、S 波・P 波は弾性波として、コンクリート柱内部を伝搬する。

電柱をゴムハンマーで叩き、P 波センサで伝搬信号を測定した波形データと FFT 処理した結果を図 4 に、同じくヒューム管をゴムハンマーで叩き、P 波センサで測定した伝搬信号と FFT 処理した結果を図 5 に示す。

図 4、5 より、電柱とヒューム管で P 波の周波数成分が異なることが分かった。これは、コンクリート柱を構成する成分の配分が異なる為であると考えられる。

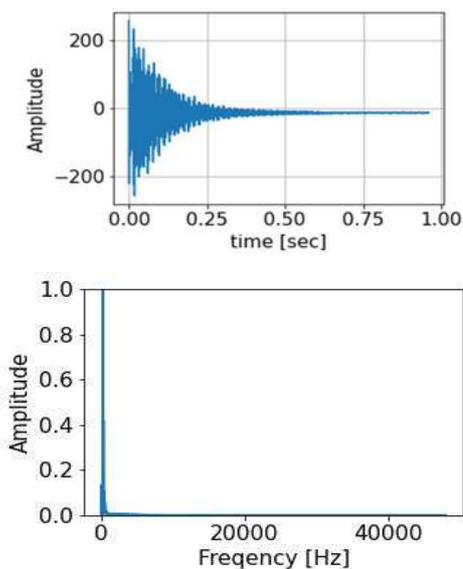


図 4. 電柱 : P 波センサで測定した打音波形と FFT 結果

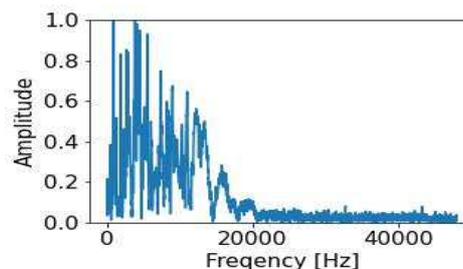
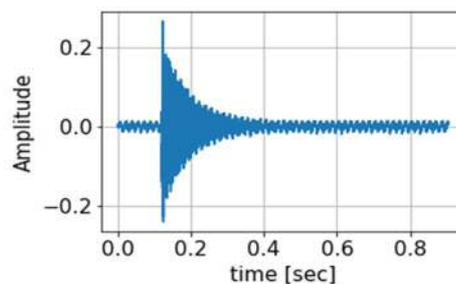


図 5. ヒューム管 : P 波センサで測定した打音波形と FFT 結果

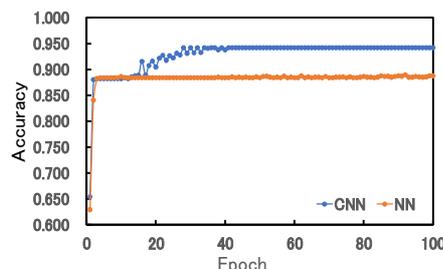


図 6. Epoch に対する正解率の変化の様子

また、ゴムハンマーでコンクリート柱を打撃する事で、コンクリート内を伝搬する P 波信号を測定でき、P 波信号の周波数は、低周波成分が多いことが分かった。

次に、ヒューム管をソレノイドで打撃した場合、健全管とひび割れが入った管のスペクトログラム像を利用し判別した。この時、NN (Neural Network) と CNN (Convolutional Neural Network) を利用し、どちらがより判別に向いているのか調べた。図 6 に Epoch に対する正解率の変化を示す。図より、CNN を用いた方がコンクリート柱表面のひび割れの判定率が高い事が分かった。

現在、ヒューム管は、内部鉄筋の劣化によるコンクリートの劣化を調べる為、毎週 1 回塩水噴霧し、ヒューム管表面のひび割れの状態の観測を続けている。

### 6. 次年度の研究計画

今年度の研究結果から、コンクリート内を伝搬する信号を P 波センサで測定し、コンクリート表面にひび割れがある場合とひび割れが無い場合の判断は、ある程度できる事が分

かった。そこで、次年度以降は以下の研究を行う考えである。

#### (1) 円柱コンクリートの円周方向に伝わる超音波信号判別技術の確立

コンクリート柱は中空の円形構造の為、円柱の長さ方向でなく、円周方向に伝搬する信号は、センサの設置場所が 180 度超えると信号が重なり、簡単に分離できない。また、コンクリート柱は材質が不均一な為、信号にノイズが多い。現在は、数千回程度の信号を平均化し、フィルタを用いる事により、ノイズ中から信号を判別する巨視的超音波法は存在するが、測定に時間がかかる。

そこで、深層学習を利用して信号波形を学習させ、ノイズを含んだ波形信号の中から、信号波形を分離する技術の確立を目指す。

#### (2) 円柱コンクリート内の鉄筋を伝わる超音波信号の解析

地上から見えない地中部において鉄筋に錆が発生しているが、地上部にはコンクリートの劣化部が見えず、ひそかにコンクリート柱の根元部分で鉄筋の劣化が急激に進行しているケースを想定し、この劣化を早期に判断できる、安価な装置の開発を目指す。

具体的には、コンクリート柱内の鉄筋に直接超音波信号を伝え、その信号の伝搬速度から錆の進行度を判断する研究を行う。一般に、コンクリート内の鉄筋を伝搬する信号は、錆が発生すると、伝搬速度が遅くなることが過去の研究から報告されている。しかしながら、これらの研究は、コンクリート内に一本の鉄筋を配置した実験であり、実際のコンクリート柱で使われる鉄筋配置を考慮していない。実際のコンクリート柱では、縦に入る鋼材だけでなく、らせん筋が全長に渡り配置しており、複雑な構造となっている。そこで、以下の研究を行う。

2-1. コンクリート柱の一部をはつり、コンクリート柱内部の鉄筋に直接センサを取り付け、コンクリート柱表面から印可した P 波信号が、内部の鉄筋を伝わるか確認する。この時、鋼材もしくはらせん筋のどちらにセンサを取り付けるのが良いのか調べる。

2-2. 鉄筋を伝搬する超音波の伝搬速度と周波数を調べ、錆の進行によりどのように変化するのか調べる。また、コンクリート柱の水分量を測定し、超音波の伝搬信号への影響、コンクリート柱内部の鉄筋が錆びた場合の影響と、鉄筋一本に信号を伝え、全ての鉄筋の劣化及び破断を診断出来るかについて技術の確立を目指す。

2-3. コンクリート表面から入力した超音波を、効率的に鉄筋に伝搬する手法について検討を行う。具体的には、複数の超音波素子を用いた超音波の送受信である。既設の電柱

の鉄筋は、コンクリートに覆われている。このような電柱においても上記の評価が行えるように、コンクリートを介した超音波の送受信について検討する。

#### (3) ヒューム管の塩害劣化と超音波伝搬速度の関係のモニタリング

令和 2 年度に開始したヒューム管の塩害劣化と超音波伝搬速度の関係をモニタリングし、劣化と伝搬速度の関係を検討する。現時点で初期欠陥を施したヒューム管の自然電位が徐々に変化していることから、内部鉄筋の腐食が進行すると思われる、3 年度も継続してモニタリングを実施し、劣化と伝搬速度の関係を検討する。

#### (4) 鉄筋に欠陥を導入したコンクリート供試体の伝搬速度の測定

鉄筋に欠陥を導入したモデル供試体を作製し、伝搬速度を測定する。欠陥を劣化と見なして伝搬速度の特徴を把握する。

#### (5) 電柱の疲労試験における劣化と伝搬速度の関係の検討

電柱の疲労試験を行い、疲労程度と伝搬速度の関係を得ることを検討する。

#### (6) 鉄筋およびコンクリート柱を伝搬する超音波の解析

有限要素法を用いて、超音波の伝搬について解析を行う。鉄筋とコンクリートでは、材質が異なるため、音波の伝搬が異なる。境界面における音波伝搬について、解析できる有限要素法ソフトウェアを用いて解析を試みる。

### 7. 謝辞

本研究を遂行するにあたり様々な助言や指導を頂いた、本多電子佐藤正典さまに感謝致します。

### 8. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

荒井翔太・寺尾尚哉・岩月栄治・小塚晃透・津田紀生・佐藤正典、P 波と S 波スペクトログラム画像の深層学習を利用したヒューム管の劣化診断に関する研究、令和 3 年 3 月 9 日、令和 3 年電気学会全国大会、3-046、大阪大学 豊中キャンパス (オンライン開催)