様　式　C－19、F－19－1、Z－19　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４年　６月１４日現在

機関番号：１２３０１
研究種目：挑戦的研究（萌芽）
研究期間：2019～2021
課題番号：１９Ｋ２２０２５

研究課題名（和文）ＰＣ構造物の健全性評価に向けた広帯域超音波法への加振ドップラ技術の導入

研究課題名（英文）Introduction of vibro-Doppler technique to wideband ultrasonic echo method for health assessment of PC structures

研究代表者
三輪　空司（Takashi, Miwa）

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：３０３１３４１４

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　4,900,000円

研究成果の概要（和文）：　PCコンクリート構造物の鋼棒保護用シースのグラウト充填不足検知法として広帯域な超音波法エコー法が用いられるが，コンクリート内の骨材等による不要散乱波によりPC鋼棒からの反射波の特定が困難となる場合があった．
　そこで，本研究では鋼材を電磁加振し，そのドプラエコーから振動する鋼材のみの応答を選択的に受信可能な広帯域超音波ドップラ計測システムを開発した．PC供試体での実験的検討により樹脂製シースにおいて通常エコー信号では充填率0%に比べ充填率100%は1.5倍と差がみられないものの，振動物体に対応するエコー信号では5.5倍のコントラストが得られ，グラウト充填有無を評価可能であることを示した．

研究成果の学術的意義や社会的意義
鉄筋コンクリート(RC)構造物は引張応力に弱いコンクリートを鉄筋で補強した複合材料であるが、よりひび割れに強い材料として、あらかじめ鋼材によりコンクリート軸方向に圧縮応力を加え、たわみによるひび割れ発生の影響を低減するプレストレストコンクリート(PC)構造物が開発され、これまで6万橋ものPC橋が建設されてきた。しかし、それらの平均経過年数は30年を超えており、今後、更なる老朽化によるPC橋の安全性が危惧されている．本研究により，グラウト充填不足の評価法として，従来法よりもより4倍程度高いコントラストが期待できる評価パラメータを抽出でき，今後の非破壊検査への応用に期待できる．

研究成果の概要（英文）：A broadband ultrasonic echo method is used to detect insufficient grout filling in the sheaths of PC concrete structures for the protection of steel rods. However, it is sometimes difficult to identify the reflected wave from the PC steel bar due to unwanted scattered waves caused by aggregates in the concrete.
　In this study, a broadband ultrasonic Doppler measurement system was developed to selectively receive the response of vibrating steel bars from the Doppler echoes of the vibrating steel bars by electromagnetic excitation of the steel bars. However, the contrast of the echo signal corresponding to the vibrating object was 5.5 times higher than that of the normal echo signal.

研究分野：計測工学

キーワード：非破壊検査　超音波エコー法　加振　PC構造物　健全性評価

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート(RC)構造物は引張応力に弱いコンクリートを鉄筋で補強した複合材料であるが、橋梁の RC 床版等ではたわみによるひび割れが発生する。そこで、あらかじめ鋼材によりコンクリート軸方向に圧縮応力を加え、鉛直上向きの初期応力を与えることで、たわみの影響を補うプレストレストコンクリート(PC)構造物が開発され、これまで 6 万橋もの PC 橋が建設されている。しかし、それらの平均経過年数は 30 年を超えており、今後、更なる老朽化による PC 橋の安全性が危惧されている。

PC 構造物は図-1 のようにコンクリート内にシースで保護された圧縮用 PC 鋼材を配し、PC 鋼材の防錆を目的としたグラウト材を充填した構造となっている。しかし、グラウトの充填が不足し、そこに水分が混入すると PC 鋼材が腐食し、破断に至った例も多く報告されるなど PC 鋼棒のグラウト充填不足の検知が PC 構造物の安全管理上極めて重要、且つ喫緊の課題となっている。

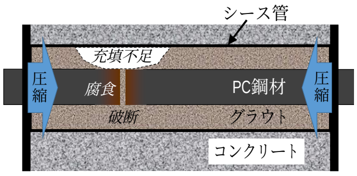


図-1 PC の構造と劣化の様子

非破壊的なグラウト充填不足の調査法として、実用的には広帯域超音波法が用いられてきた。しかし、広帯域超音波はコンクリート内に無数に存在する骨材による多重散乱波や PC 鋼材以外の鉄筋、空洞等からの不要反射が多数発生し、PC 鋼材からの反射波の特定が困難となることが本質的な問題となっている。そのため、従来の超音波の反射エコーを解析するだけの既存手法では誤判定も多く、新たな技術開発が求められている。

２．研究の目的

そこで、本研究ではシース管やその内部の探査に有効な広帯域超音波法において、鋼材を電磁加振した際の超音波エコーのドプラ信号から振動物体のみの反射波を選択的に受信し、PC 鋼材の振動変位やその加振周波数依存性から PC 構造物の劣化を評価可能とする電磁加振超音波ドップラ法を新たに提案し、その有効性の検証を行うことを目的とする。

３．研究の方法

3-1　原理

超音波トランスデューサから計測対象である反射体に向けて中心周波数f_cの搬送波を有する帯域幅f_wの sinc パルスを送信し、距離l離れた反射体からの反射波を受信する。

また、この間、計測対象を単一周波数f_v、振動変位δで振動させると超音波の波長に対して、δが十分に小さければ反射波は位相変調を受け、静止物体の反射波に相当する無変調成分に加え、振動物体のみの反射波に対応する$\pm f_v$のドップラ変調成分の 2 種類の波に分離する。このとき受信波形のヒルベルト変換により得られる無変調成分の複素波形$\dot{g}_0(t)$及び、その正のドップラ変調成分のみを取り出して得られる複素波形$\dot{g}_+(t)$はそれぞれ以下で与えられる。

$$\dot{g}_0(t) = \dot{R}\mathrm{sinc}\left\{\pi f_W\left(t-\frac{2l}{v}\right)\right\} e^{j2\pi f_c\left(t-\frac{2l}{v}\right)} \quad (1)$$

$$\dot{g}_+(t) = \frac{2\pi f_c\delta}{v}\dot{g}_0(t) \quad (2)$$

孤立物体に対するドップラ波形$\dot{g}_+(t)$は$\dot{g}_0(t)$と相似な形状となり、その振幅は振動変位δに比例する。したがって、距離lにある反射体の振動変位$\delta(l)$は両者の振幅比として式(3)で与えられる。

$$\delta(l) = \left|\frac{\dot{g}_+\left(\frac{2l}{v}\right)}{\dot{g}_0\left(\frac{2l}{v}\right)}\right| \times \frac{v}{2\pi f_c} \quad (3)$$

3-2 開発した計測システムの概要

広帯域超音波ドップラシステムのブロックダイアグラムを図-2 に示す。超音波パルスは中心周波数 400 kHz の 4 サイクルのバースト波を 1 ms の繰り返し周期で 0.1 秒間発振し、増幅後 300Vpp で超音波トランスデューサから送信する。受信信号は 20 倍に増幅後、加振信号除去用の 50 kHz のハイパスフィルタを介して、サンプリング周波数 10 MHz の AD 変換器でサンプリングする。また、加振周波数は 240 Hz（振動周波数 480 Hz）とし、バイポーラアンプにより 7 A の電流に増幅して 500 巻きの励磁コイルに印可する。このコイル形状は数値解析により最適化を行っている。

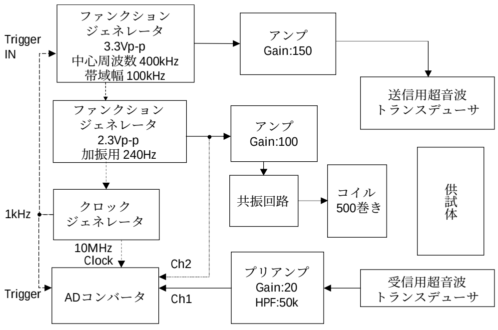


図-2 加振超音波ドップラシステムの概要

3-3　実験概要

本研究では、健全状態、劣化状態を模擬した 2 種類の PC 供試体を計測対象とした。図-3 に供試体の寸法を示す。シースは樹脂製であり、直径 22 mm、かぶり深さは 80 mm、シース内の PC 鋼材のかぶりは 88 mm である。シース内の充填度 100%(健全)、0%(劣化)として両者を比較した。

図-4 に実験の様子を示す。基礎研究として効率よく加振するため供試体直下にコイルを置き、コイル上面に超音波トランスデューサを置いて鋼管反射の計測を行った。

４．研究成果

樹脂管充填率 100%の PC 供試体における無変調成分とドップラ成分の時間波形を図-5 に示す。また、この結果は 10 回の同期加算を行った波形を示している。コンクリートの超音波の伝播速度は 4143 m/s であり、シース管、鋼材に対応する時間遅延の理論値は幾何学的関係から、それぞれ 40 μs、44 μs となるため、その時間に目印を記載している。図-5 の結果から樹脂管充填率 100%の反射波のピーク時刻は PC 鋼材からの反射波の遅延時間の理論値にほぼ一致した。そこで、無変調成分、ドップラ成分のピーク振幅から振動変位の算出を試みる。振動変位δは式(3)によって求められ、0.76 μm と算出される。

次に、樹脂シース管充填率 0%の結果を示す。樹脂管充填率 0%の PC 供試体における無変調成分とドップラ成分を図-6 に示す。図より樹脂管充填率 0%の反射波のピーク到達時間は樹脂シース管からの反射波の理論値に一致することが確認できる。また、無変調成分、ドップラ成分は充填率によって違いが出ていることがわかる。無変調成分、ドップラ成分のピーク電圧から振動変位を算出すると 0.46 μm となり、充填率 100%の結果の 0.6 倍となった。これは、充填率 100%の PC 供試体では PC 鋼材の振動変位が受かるが、充填率 0%の供試体では PC 鋼材自体は振動していても、空気の音響インピーダンスが非常に高いため、シース管と空気層の境界面で超音波が全反射し、PC 鋼材からの超音波反射信号自体が受からないことに起因していると考えられる。

それぞれの充填度の供試体に対して同様の計測を 3 回ずつ行い、それぞれの成分の再現性を確認した結果、いずれの無変調成分もドップラ成分も振幅のピークが PC 鋼材の反射波の理論値に現れることを確認した。また、振動変位は充填率 100%の方が高い結果が出ていることから再現性も見られる。

最も顕著に差が出るパラメータの模索として、今回取得した 4 回分の計測結果の無変調成分、ドップラ成分、の振動変位をまとめた結果を図-7 に示す。図はそれぞれの成分のピーク電圧の値の平均値、標準偏差の平均を取った値を記した。無変調成分の充填率 100%の平均値は 0.12 V、充填率 0%の平均値は 0.083 mV、ドップラ成分の充填率 100%の平均値は 0.123 V、充填率 0%の平均値は 0.0224 mV であった。広帯域超音波法のように無変調成分どうしの反射振幅を比較した場合、充填率による変化が小さく、標準偏差を考慮した際には識別は困難であることが分かる。

一方、ドップラ成分の比較を行うと充填率 0%の平均値に比べ、充填率 100%の平均値は 5.5 倍程度となった。このことから、標準偏差を考慮しても、容易に充填率を識別できると考えられる。振動変位を比較すると 3.8 倍程度の差であったため、樹脂シース管を用いた充填率の異なる供試体の識別の比較パラメータとしては振動変位よりもドップラ成分の鉄筋反射波の振幅に着目する方が高い識別性能を有するといえる。

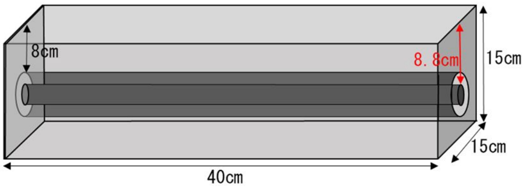
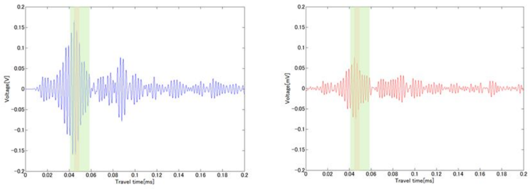


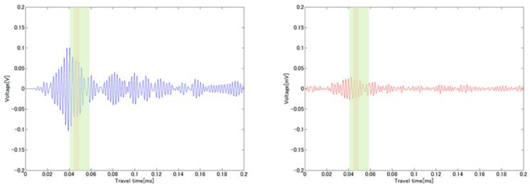
図-3 製作した PC 供試体の寸法

図-4 計測の様子



(a)無変調成分　　(b)ドップラ成分

図-5 充填率 100%における受信波形



(a)無変調成分　　(b)ドップラ成分

図-6 充填率 0%における受信波形

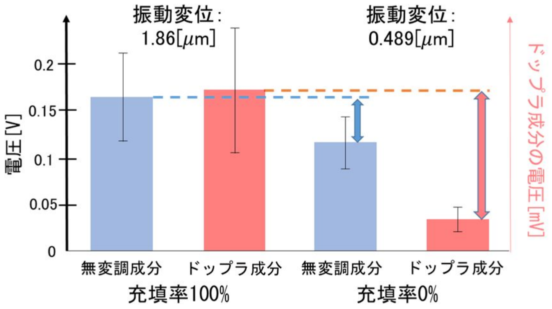


図-7 樹脂シース管の計測結果のまとめ

さらに、金属シース管についての比較も行ったが、充填率 0%の振動変位は 100%の振動変位の 1.2 倍、ドップラ成分どうしでは、1.4 倍、無変調成分どうしでは 1.6 倍程度の違いしか現れなかった。これは金属シースでは金属シースが選択的に振動しやすく充填率による違いが明瞭に現れなかったものと考えられる。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計7件（うち査読付論文　6件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 T. Miwa	４．巻 Vol.21, No. 7
２．論文標題 Non-destructive and quantitative evaluation of rebar corrosion by a vibro-Doppler radar method	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Sensors	６．最初と最後の頁 2546
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s21072546	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 K. Takahashi and T. Miwa	４．巻 Vol.21, No. 3
２．論文標題 local oscillator phase compensation technique for ultra-wideband stepped-frequency continuous wave radar based on a low-cost software-defined radio	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Sensors	６．最初と最後の頁 780
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s21030780	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 久保田遼平，三輪空司，小澤満津雄	４．巻 Vol. 20
２．論文標題 RC構造物のひび割れ進展と加振レーダ法における鉄筋振動変位増加との関係	５．発行年 2020年
３．雑誌名 コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告	６．最初と最後の頁 173-178
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 三輪空司，松井 隼平，中村和弘	４．巻 Vol.42
２．論文標題 加振パルスドップラレーダの開発と鉄筋振動変位の周波数依存性	５．発行年 2020年
３．雑誌名 コンクリート工学年次論文集	６．最初と最後の頁 1588-1593
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 三輪空司，高橋一徳，松井隼平	4．巻 41
2．論文標題 加振パルスドップラレーダによるRC構造物内鉄筋振動変位計測	5．発行年 2019年
3．雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6．最初と最後の頁 1781-1786
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 三輪 空司	4．巻 58,11
2．論文標題 加振レーダ法による構造物内の非破壊鋼材腐食評価	5．発行年 2019年
3．雑誌名 計測と制御	6．最初と最後の頁 843-847
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11499/sicejl.58.843	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

〔学会発表〕　計9件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

1．発表者名 三輪空司、松井隼平、中村和弘
2．発表標題 加振パルスドップラレーダの開発と鉄筋振動変位の周波数依存性
3．学会等名 コンクリート工学年次大会
4．発表年 2020年

1．発表者名 久保田遼平、三輪空司、小澤満津雄
2．発表標題 RC構造物のひび割れ進展と加振レーダ法における鉄筋振動変位増加との関係
3．学会等名 コンクリート工学構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム
4．発表年 2020年

１．発表者名 清水崇至、三輪空司
２．発表標題 電磁パルス加振による鉄筋振動計測のための 直交検波パルスレーダの開発
３．学会等名 電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
４．発表年 2020年

１．発表者名 中村和弘、三輪空司
２．発表標題 加振パルスドップラレーダによるコンクリートの鉄筋振動変位イメージング
３．学会等名 第37回センシングフォーラム
４．発表年 2020年

１．発表者名 山田玲央，三輪空司，小澤満津雄
２．発表標題 加振レーダ法における振動変位とコンクリートの弾性係数依存性
３．学会等名 第15回地下電磁計測ワークショップ
４．発表年 2019年

１．発表者名 松井隼平，三輪空司
２．発表標題 励磁コイル加振に伴うRC 構造物内鉄筋振動変位計測の鉄筋腐食評価への適用
３．学会等名 第36回センシングフォーラム
４．発表年 2019年

１．発表者名 清水崇至，三輪空司
２．発表標題 加振レーダ法のためのFEM磁界シミュレータを用いた励磁コイル形状の最適化
３．学会等名 第10回電気学会東京支部栃木･群馬支所合同研究発表会
４．発表年 2020年

１．発表者名 久保田僚平，三輪空司，小澤満津雄
２．発表標題 RC構造物中の鉄筋誘導加熱時のAE発生挙動と加振レーダにおける鉄筋振動変位との関係
３．学会等名 第10回電気学会東京支部栃木･群馬支所合同研究発表会
４．発表年 2020年

１．発表者名 中村和弘，高根沢彰兵，小松圭太，三輪空司
２．発表標題 鉄筋振動変位計測のための加振パルスドップラレーダの開発
３．学会等名 第10回電気学会東京支部栃木･群馬支所合同研究発表会
４．発表年 2020年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

－

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関