

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：23201
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2018～2023
課題番号：18K04314
研究課題名（和文）磁歪型弾性波装置によるコンクリートの表層品質・内部欠陥の革新的な非破壊診断手法

研究課題名（英文）Innovative Non-Destructive Diagnosis Methods for Quality of Concrete Surface and Internal Defects of Concrete by Elastic Wave Input System based on Magnetostriction Drive

研究代表者
内田 慎哉（UCHIDA, SHINYA）
富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：70543461
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、まず、動磁場解析や弾性波動解析を援用して、磁歪型弾性波装置を開発した。続いて、開発した磁歪型弾性波装置を活用して、コンクリート部材の応力推定、鉄筋の腐食程度の評価およびひび割れ深さの推定を試みた。その結果、表面波の位相速度や振幅減衰に着目することで、従来の非破壊試験では評価が困難な場合であっても、有効かつ的確な診断が可能であることを明らかにした。したがって、本研究で開発した「磁歪型弾性波装置による革新的な非破壊診断手法」は、極めて有効な診断手法になり得ることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
コンクリート分野の非破壊試験では、コンクリートの品質や内部欠陥を評価することが重要である。これまで様々な方法でアプローチしてきたが、適切な非破壊試験が無いのが現状であった。特に弾性波を利用した場合、入力方法が鋼球打撃、着目する弾性波が縦波のみと、場当たりの検討しか行っていなかった。それ故、年々高まるニーズに応えられず、この分野の信頼性を低下させてきた。これを打破するため、本研究では、「弾性波の入力方法」には「磁歪」、「受信する弾性波」は「表面波」とした。その結果、コンクリートの品質や内部欠陥を的確に評価することが可能となり、当該分野において技術革新を起こす礎を築くことができたと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, a magnetostrictive elastic wave device was initially developed using dynamic magnetic field analysis and elastic wave analysis. Subsequently, the developed magnetostrictive elastic wave device was utilized to estimate the stress in concrete members, evaluate the degree of corrosion in reinforcing bars, and determine the depth of cracks. As a result, by focusing on the phase velocity and amplitude attenuation of surface waves, it was revealed that effective and accurate diagnostics could be achieved even in cases where conventional non-destructive testing is difficult. Therefore, it was concluded that the "innovative non-destructive diagnostic method using a magnetostrictive elastic wave device" developed in this study can become an extremely effective diagnostic technique.

研究分野：工学

キーワード：コンクリート 非破壊検査 弾性波 表面波 磁歪 応力 鉄筋腐食 ひび割れ深さ

1. 研究開始当初の背景

土木・建築分野において非破壊試験で知りたい情報は、例えば、中性化深さ、含浸材浸透深さ、かぶりコンクリートの品質（耐久性）、PC グラウト未充填部や道路橋 RC 床版内部の水平ひび割れの有無、火災により加熱されたコンクリートや鉄筋の劣化程度、それら付着性状等がある。応募者も含め多くの研究者が様々な方法でアプローチしてきたが、評価に適切な非破壊試験が無いのが現状である。特に弾性波を利用した非破壊試験でこれらの課題をクリアできない最大の理由は、入力方法が常に鋼球等の打撃によるパルス波であり、評価指標（弾性波伝搬特性）としては縦波の速度、弾性波の振幅や周波数成分のみを利用していることが挙げられる。それ故、年々高まる非破壊試験のニーズに応えられず、この分野の信頼性を低下させている。これを打破するには、従来からの凝り固まった通り一遍の慣習（「弾性波の入力方法」や「弾性波伝搬特性」）からパラダイムシフトする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、まず、「磁歪型弾性波装置」の仕様を動磁場解析により決定し、「弾性波伝搬特性（表面波・位相）を抽出するための信号処理方法」を弾性波動解析により検討する。これらの結果を踏まえて、従来の非破壊試験では評価が困難なケースにおいても有効かつ確かな診断を可能にする「磁歪型弾性波装置による革新的な非破壊診断手法」を構築することが目的である。

3. 研究の方法

本研究では、まず、磁歪型弾性波装置を開発した。続いて、開発した磁歪型弾性波装置を活用して、「コンクリート部材応力」、「鉄筋腐食」および「ひび割れ深さ」を対象として、これらの非破壊診断手法の構築を目指した。

4. 研究成果

(1) 開発した磁歪型弾性波装置

図1に電磁ハンマを示す。直径15mmの打撃体が内蔵されており、1s間隔で一定の打撃力でコンクリートを打撃することが可能である。図2に振動センサを示す。振動センサは、磁性体コアおよび導線から構成される磁歪センサが内蔵されており、磁歪センサと直径30mmのローラーが内部で連結されている。なお、磁歪センサ単体の周波数応答は、インピーダンス/ゲイン・フェーズアナライザを用いて、peak-to-peak150mV、1~500kHzのスweep波により計測を行ったところ、1~295kHzの範囲においてフラットな感度特性であった。図3に電磁ハンマ（図1）と振動センサ（図2）を一体にしたユニットを示す。ユニットの寸法は、長さ134mm×幅92mm×高さ123mmである。



図1 電磁ハンマ



図2 振動センサ



図3 一体ユニット

(2) コンクリート部材応力

① 実験概要

本節で対象としたPC橋梁は、張出し片持架設工法で建設中の橋長335.40mの5径間連続PCラーメン橋である。計測は、閉合前4回（合成曲げ応力：0.25, 1.29, 2.46, 4.76N/mm²）、閉合後1回（合成曲げ応力：3.90N/mm²）、計5回行った。いずれの計測も、図4に示すP1柱頭部付近の箱桁（ブロック）内部の側壁面で実施した。

② 実験結果および考察

表面波の位相速度と合成曲げ応力との関係を図5に示す。図中には、回帰式および決定係数も併記している。図5より、合成曲げ応力が大きくなると表面波の位相速度が大きくなっていることがわかる。これは、合成曲げ応力の増加に伴い、コンクリート部材内部の微細な空隙が閉塞され、また組織も密実となり、表面波が伝搬しやすくなったためだと考えられる。ここで、一般的に、物体を伝搬する弾性波の縦波の速度が応力によって変化する現象は「音弾性効果」と呼ばれ

ている。この音弾性効果が、本研究の範囲内では、散乱の大きいコンクリート材料で、しかも表面波として確認できたと考えられる。



図4 対象とした建設中のPC橋梁

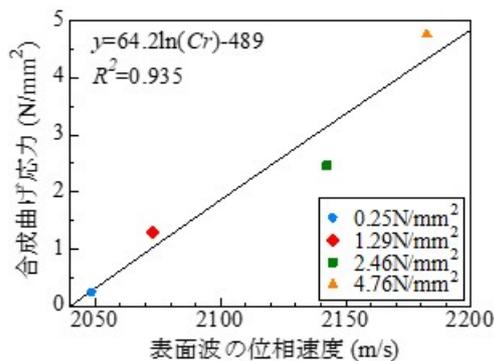


図5 位相速度と合成曲げ応力との関係

閉合後、閉合前と同様の計測を行い、得られた表面波の位相速度を図5中の回帰式に代入し、合成曲げ応力を推定した。推定結果を表1に示す。表中には、実際の合成曲げ応力(3.90N/mm²)、推定値および相対誤差(誤差(実際の曲げ応力と推定値との差)と真値(実際の曲げ応力)の比率(%))も示している。表より、合成曲げ応力を精度良く推定できていることがわかる。したがって、表面波の位相速度に着目すれば、本研究で開発した手法は合成曲げ応力の推定において有効であることがわかった。

表1 合成曲げ応力の推定結果

表面波の伝搬特性	合成曲げ応力 (N/mm ²)	推定値 (N/mm ²)	相対誤差 (%)
位相速度	3.90	3.70	5.05

(3)鉄筋腐食

①実験概要

供試体の概要を図6に示す。コンクリート部分の寸法は、幅300mm×高さ150mm×長さ850mmとした。鉄筋はD16の異形鉄筋を使用し、供試体の幅方向中央にかぶり50mmで1本配置した。鉄筋を促進腐食させるため、電食試験を採用した。電食試験の概要を図6に示す。3%食塩水を満たした容器内に、コンクリートのかぶり部分のみが浸漬するように供試体を静置した。鉄筋への通電は、鉄筋を陽極、ステンレス版を陰極とした回路を形成させた上で、500mAの直流定電流により行った。また、通電期間中は、食塩水の供試体への浸透および蒸発を考慮して、食塩水の量が一定となるよう適宜必要に応じて、3%食塩水を容器内に補充した。鉄筋腐食に伴うコンクリート表面層部の変状の程度を変化させるため、電食における通電期間(電食期間)を5ケース(0, 3, 6, 14, 18日)に設定した。電食試験終了後、鉄筋の腐食程度を把握するため、鉄筋断面減少率を求めた。具体的な除錆方法は、供試体から鉄筋をはつり出し、質量濃度10%のクエン酸二アンモニウム水溶液(60℃)に48時間鉄筋を浸漬し、その後、真鍮ブラシを用いて腐食生成物を除去した。

②実験結果および考察

腐食ひび割れが表面に目視で確認できない段階において測定した表面波の位相速度とその時の鉄筋断面減少率との関係を図7に示す。図より、鉄筋断面減少率が大きくなるほど測定される位相速度が小さくなっていることがわかる。これは、鉄筋腐食による鉄筋とコンクリート界面の剥離や鉄筋付近のひび割れの発生の影響を受けているためと考えられる。したがって、コンクリート表面で腐食ひび割れの発生が確認できない腐食の初期段階、すなわち進展期の初期段階において、かぶり部分の変状を評価できる可

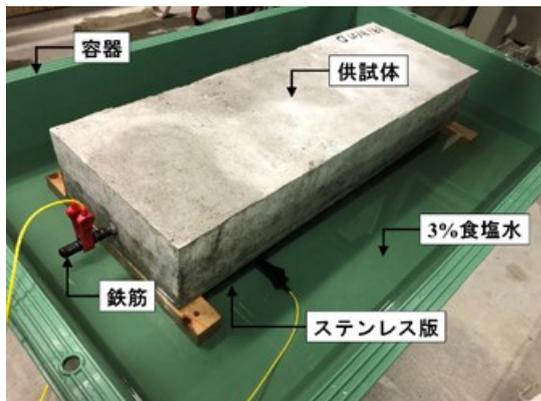


図6 供試体および電食試験の概要

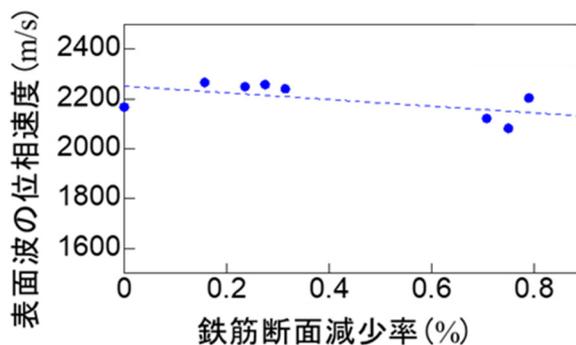


図7 表面波の位相速度と鉄筋断面減少率との関係

能性があることが示唆された。

(4) ひび割れ深さ

① 実験概要

図8に、供試体の概要を示す。供試体寸法は、長さ850mm×幅200mm×高さ300mmである。人工ひび割れは、コンクリートを打設する前に、型枠の長さ方向（供試体の長さ方向）中央位置において、厚さ5mmの発泡スチロールを設置することにより模擬した。人工ひび割れの深さは、50、75、100および150mmの4ケースに設定した。いずれも、コンクリート硬化後に、発泡スチロールは除去している。また、比較のため、人工ひび割れを有しない健全な供試体（健全供試体）も併せて作製した。したがって、供試体は全部で5体となる。

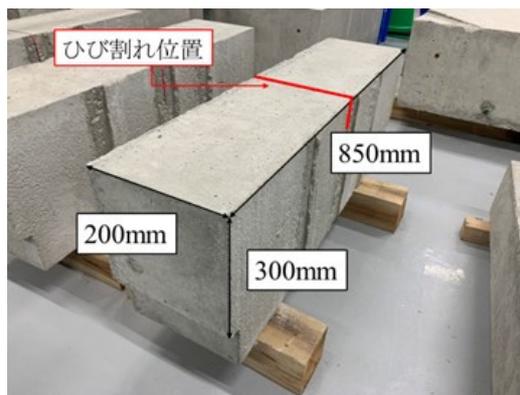


図8 供試体の概要

表面波の減衰特性によるひび割れ深さ推定式を算出するには、まず、I:健全供試体での表面波の伝搬時間から位相速度 C_R 1765m/s を求め、また ch. 1 の表面波の成分から周波数 f_R 6856Hz を算出し、表面波の波長 λ_R 258mm を計算した。続いて、II:人工ひび割れ前後の加速度センサ（ch. 3～ch. 6）の時刻歴波形から表面波成分を切り出し、FFTにより求めた周波数スペクトルから卓越周波数（表面波の周波数）のスペクトル強度 $A_3 \sim A_6$ を判読、その結果を式(1)に代入することで表面波の振幅減衰 F_R を求めた。最後に、III:ひび割れ深さ h は、振幅減衰 F_R と人工ひび割れ深さ/表面波の波長 (h/λ_R) との間に相関があることを利用して、式(2)で求めることができる。

$$F_R = A_5 + A_6/A_3 + A_4 \tag{1}$$

$$h = -85.14 \ln F_R \tag{2}$$

② 実験結果および考察

得られた結果を図9に示す。この図は、鋼球打撃による既存の手法での結果である。図より、全ての人工ひび割れに対して、誤差15%の範囲内でひび割れ深さを推定できていることがわかる。続いて、図10に、磁歪型弾性波装置で得られた振幅減衰 F と人工ひび割れ深さ/表面波の波長の比 (h/λ) との関係を示す。図より、明らかに無相関の結果になった。打撃による弾性波入力を簡便に行うことを目的に、磁歪現象を利用した弾性波入力装置を作製したものの、ひび割れ深さを推定するのは困難であった。今後は、この理由を明らかにした上で、弾性波入力装置の改良を行う必要がある。

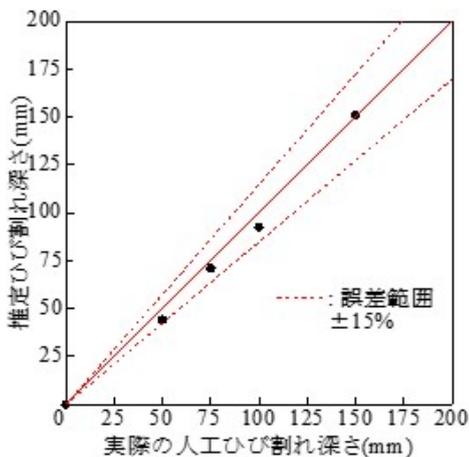


図9 人工ひび割れ深さの推定結果

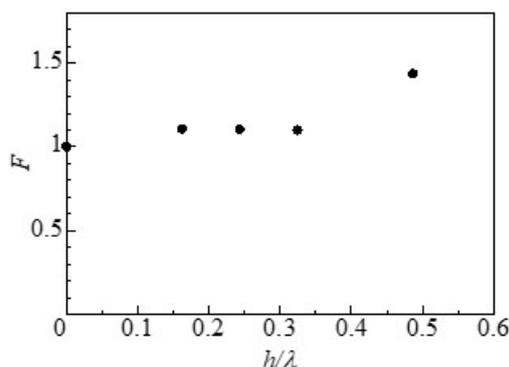


図10 F と h/λ との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 内田慎哉, 山本紗衣, 土井真郷, 桃木昌平	4. 巻 3
2. 論文標題 マルチチャンネル衝撃弾性波法に基づくPC橋梁に作用する合成曲げ応力の非破壊評価手法	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 インフラメンテナンス実践研究論文集	6. 最初と最後の頁 126-135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceim.3.1_126	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 山本紗衣, 内田慎哉, 藤井壮太	4. 巻 44
2. 論文標題 マルチチャンネル衝撃弾性波法により測定した縦波速度・表面波位相速度とPC箱桁橋に作用する合成曲げ応力との関係	5. 発行年 2022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 1324-1329
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 藤井壮太, 内田慎哉, 岩野聡史, 片岡繁人	4. 巻 43
2. 論文標題 衝撃弾性波法による鉄筋腐食に起因するコンクリート表層部の変状の非破壊評価手法に関する基礎的検討	5. 発行年 2021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 1217-1222
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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 青沼拓朗	
2. 発表標題 表面波の減衰特性に基づくコンクリートのひび割れ深さの推定に関する解析的検討	
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会 第76回年次学術講演会	
4. 発表年 2021年	

1. 発表者名 藤井壮太, 内田慎哉, 伊藤 始, 岩野聡史, 片岡繁人
2. 発表標題 衝撃弾性波法による塩害劣化したコンクリートの鉄筋腐食の評価手法
3. 学会等名 日本非破壊検査協会2020年度秋季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内田慎哉
2. 発表標題 衝撃弾性波法の更なるそして秘めたる可能性
3. 学会等名 iTECS技術協会（技術交流会）（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内田慎哉
2. 発表標題 コンクリート構造物の維持管理における非破壊試験の活用方法
3. 学会等名 日本リバコン協会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内田慎哉, 松橋貫次, 湊 利行, 栗原陽一, 伊藤 始
2. 発表標題 ウォーターカップリング磁歪センサによるコンクリートの弾性波伝搬速度の測定
3. 学会等名 日本機械学会（2019年度年次大会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

土木学会より、以下の研究論文について、「インフラメンテナンス優秀論文賞」を授与された。
内田慎哉，山本紗衣，土井真郷，桃木昌平：マルチチャンネル衝撃弾性波法に基づくPC橋梁に作用する合成曲げ応力の非破壊評価手法，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol.3，No.1，pp.126-135，2024.3.

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
---------	---------