

平成 22 年 6 月 21 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008～2009

課題番号：20860100

研究課題名（和文） ラム波およびレイリ波によるコンクリート構造物の健全性評価

研究課題名（英文） Evaluating soundness of concrete structures by Lamb and Rayleigh waves

研究代表者

蔡 華堅 (CHAI HWA KIAN)

飛鳥建設株式会社技術研究所

研究者番号：70506823

研究成果の概要（和文）：

コンクリート構造物の維持管理や健全性診断に効果的な新たな非破壊評価手法を確立するために、弾性波成分であるラム波やレイリ波の適用性について検討した。基礎実験を実施したことで下記の成果を得た。(1)コンクリート弾性特性によってラム波の分散が考察できた。(2)レイリ波の振幅変化とひび割れ深さの関係を用いて定量的な深さ評価手法が確立できた。(3)レイリ波の位相速度を利用してコンクリートの内部損傷をトモグラフィ技術による可視化できると確認した。

研究成果の概要（英文）：

Research was carried out to examine the feasibility of Lamb and Rayleigh in establishing efficient non-destructive evaluation methods for maintenance and diagnosis of concrete structures. The following are findings based on fundamental experimental studies: (1) Dispersion of Lamb waves due to the change in elastic properties of concrete was confirmed; (2) A quantitative method for evaluating concrete crack utilizing the relation between Rayleigh wave amplitude change and crack depth can be proposed, (3) With phase velocity of Rayleigh waves as input, defect inside concrete can be visualized using tomography reconstruction technique.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,530,000	759,000	3,289,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：コンクリート，非破壊評価，レイリ波，ラム波，位相速度，振幅，ひび割れ深さ，内部損傷

1. 研究開始当初の背景

日本国内では、2025年には建設後50年以上の公共構造物は65,000件を超えると推測され、橋梁、トンネル、管渠などの社会資本施設の老朽化が問題とされている。これらの構造物を適切に維持管理し、長期間供用を継続していくためには、構造物の健全状態を迅速かつ高精度に評価可能な非破壊診断技術の確立が望まれている。

老朽化したコンクリート構造物の健全性評価に対して重要なパラメータである強度やヤング係数などの強度特性について、構造物全体にわたる多数のデータを把握することが、劣化した構造物の効率的な補修・補強計画を策定するために必要不可欠である。しかしながら、現在、広く行われている採取したコンクリートコア供試体による評価試験は、精度の面で優れているものの、コンクリートコアを採取する破壊試験であるために、その採取数に限界があり、構造物全体の劣化状態を把握する適切な評価診断手法とは言い難い。さらに、コンクリート構造物の劣化状態を診断する非破壊検査手法として用いられる反発度法や超音波法では、コンクリートの表面の状況、センサの設置状況によって測定精度が大幅に影響されるという問題がある。

コンクリート構造物の損傷検出技術の中では、弾性波法は広く一般的に用いられている。この手法は、実体波である縦波（P波）の伝播速度や受信した波の周波数解析によって、ひび割れの深さを推定する。しかし、この縦波は検出できるひび割れの深さに限界があるとともに、波の分散による減衰が大きいなどの問題があり、コンクリート構造物を対象とした非破壊検査手法として実用性や精度に問題がある。さらに、縦波は、ひび割れ面の一部が接触している、もしくは水、粉塵など充填物が存在する場合、それらを介して波が伝播し、ひび割れ深さの測定に誤差が生じることがある（図-1参照）。また、表面に生じたひび割れ以外の、コンクリート構造物内部の損傷状況の検出が難しいという問題もある。

一方、弾性波のエネルギーの半分以上を持つ表面波成分であるレイリ波が、精度の高い手法となる可能性があるという注目されつつある。その伝播、分散、エネルギー減衰（振幅低下）特性によるひび割れの評価方法（図-2参照）の適用性については、近年、国内外による研究例がある。レイリ波を用いる手法は、縦波による手法に比べ精度の面で優れているが、深いひび割れの場合には、測定精度が低下することがあるなど、実用化に向けて解決すべき課題が残されている。

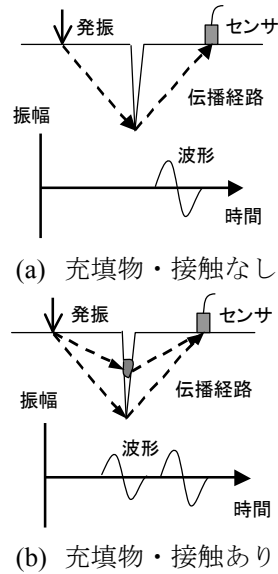


図-1 ひび割れ面での充填物・接触によるP波伝播経路への影響

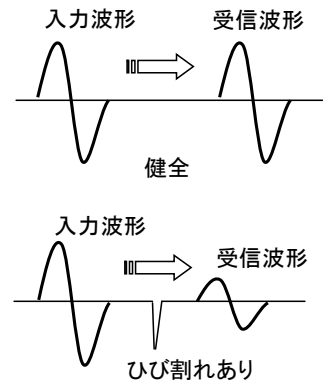


図-2 ひび割れの存在によるレイリ波の減衰

2. 研究の目的

本研究では、コンクリート構造物の維持管理や健全性診断に効果的な新たな非破壊評価手法の確立のための基礎資料を得ることを目的として、弾性波のうちこれまで使用例の少ない表面波成分（レイリ波-Rayleigh wave）や板波成分（ラム波-Lamb wave）による伝播、分散およびエネルギー減衰などの特性に着眼して構造体コンクリートの強度等の品質および構造物の内部損傷の状態を迅速かつ高精度に評価する手法の開発に向けた実験的な検証を行う。

3. 研究の方法

室内実験では、橋梁床版、トンネル覆工、ダムマスコンクリートなど構造物に見つかる一般的な損傷パターンを想定し、人工ひび割れや内部欠陥を導入したコンクリート供試体（図-3参照）を作成し、弾性波の計測を行った。また、本研究の計測方法によるコンク

リート強度特性の推測精度を検証するため、材齢に応じた材料試験も実施し、その非破壊検査結果とコンクリートのヤング係数やポアソン比などの強度特性との関連付けを行った。



(a) 異なる深さの人工ひび割れを有する立方体



(b) 発泡スチロール板による内部水平ひび割れを模擬した床版の型枠組立状況

図-3 弾性波計測用コンクリート供試体

ラム波の特性を活用するコンクリートのヤング係数およびポアソン比の推測手法の確立では、下記のパラメータを検討した。

- a) 最適なセンサ数
- b) センサ間距離の影響
- c) コンクリートのヤング係数とポアソン比
- d) 励起周波数と位相速度減衰との関係

一方、レイリ波による損傷の評価手法において、室内試験結果に基づき、下記のパラメータを検討した上で、信頼性の高いパラメータを絞り込み、コンクリートの損傷を最も定量的に評価できる波特性の解析方法を確立した。

- a) 表面までの深さ
- b) 損傷形状、分布
- c) センサ間距離の影響
- d) 励起周波数と伝播速度の影響
- e) 波の分散、エネルギー減衰

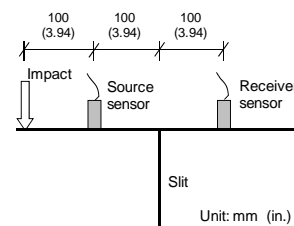
弾性波の発振は、パルス発振器、手動インパクトハンマーおよびシャープペンシルの芯を圧折させることによる発振とした。発振器の設定とインパクトハンマーの打撃部分の寸法を調整し、低周波数から数百 kHz までの励起周波数について検証を行い、損傷ケースに応じて最も有効な発振方法を検討した。

計測用センサは、加速度センサ（30kHz 共振型）、AE センサ（60kHz 共振型）および、高周波対応広帯域センサを用いた。

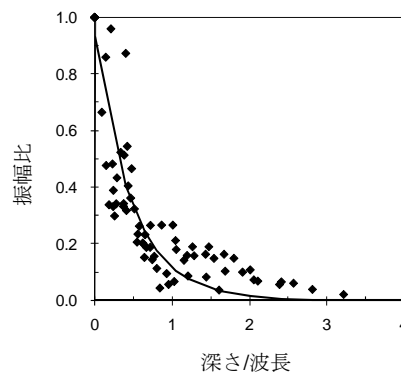
実験以外、数値解析ソフトを利用してモデルシミュレーションを随時実施して異なる計測条件によって弾性波の伝播特性を解明した。そのシミュレーション結果に基づいて実験をより効率的に調整できた。

#### 4. 研究成果

21 年度は、下記の結果を得られた。(1) 異なる深さの人工ひび割れを導入したコンクリートブロック供試体を用いて、異なる直径を有する鋼球ハンマーの打撃による弾性波計測を実施してレイリ波の減衰特性とひび割れ深さとの関係を調べた。その結果、レイリ波の振幅はひび割れが深くなるほどに低下する傾向が確認できた。また、レイリ波の圧縮側振幅、引張側振幅および圧縮・引張側それぞれ振幅の絶対値を平均した振幅によるいずれの振幅率とも、ひび割れ深さ/波長と良い相関が確認できた（図-4 参照）。



(a) センサ配置及び弾性波発振点



(b) 振幅とひび割れ深さとの関係

図-4 レイリ波振幅によるひび割れの深さを推測

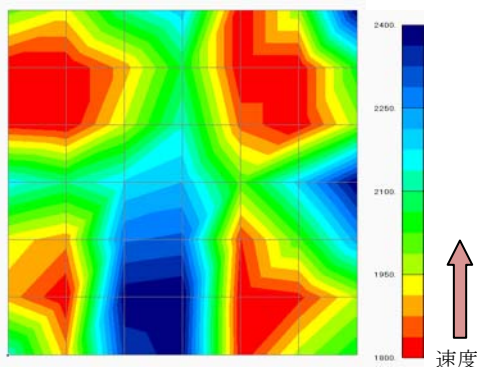
(2) コンクリート床版供試体を利用し、材齢に応じてハンマー打撃やシャープペンシル芯の破断によって励起したラム波の計測を実施した。また、円柱供試体による圧縮試験を行なってコンクリート材齢ごとの強度、ヤング係数やポアソン率を求めた。その結果、適切なセンサ種類、配置およびラム波の励起方法、波形処理方法においてラム波の位相速度分散傾向はコンクリート特性によって変化

することが考察できた。

22年度は、下記の結果を得られた。(1) 発泡スチーロによる模擬した、水平ひび割れを有するコンクリート床版供試体を用いて、受信センサの一面設置形式で衝撃弾性波計測を実施して、その得た計測結果を入力データとしてレイリ波の位相速度分布をトモグラフィ解析による計算し、ひび割れの可視化可能性を実験的に検討した。その結果、ひび割れの存在によってレイリ波の位相速度は低下すると考察できた。また、ひび割れの検出は発振したレイリ波の主要波長に依存すると分かった。さらに、レイリ波の位相速度によるセンサ一面設置トモグラフィの実現可能性が確認できた(図-5 参照)。(2) コンクリート角柱供試体による凍結融解試験を行い損傷レベルに応じて超音波加振機やシャープペンシル芯の破断によって励起したレイリ波の計測を実施した。その結果、劣化したコンクリートの相対動弾性係数が健全なものより低い、また、表面に伝播するレイリ波の振幅、中心周波数や伝播速度の大きな変化も考察できた。



(a) センサ配置状況



(b) 位相速度トモグラフィの算出結果例

図-5 レイリ波による内部水平ひび割れを検出

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Hwa Kian Chai, Dimitrios G. Aggelis, Shohei Momoki, Yoshikazu Kobayashi, Tomoki Shiotani, Single-side access tomography for evaluating internal defect of concrete, Construction and Building Materials, Elsevier Science, 査読有, 2010 (掲載予定)
- ② Hwa Kian Chai, Momoki Shohei, Dimitrios G. Aggelis, Tomoki Shiotani, Characterization of deep surface opening cracks in concrete: Feasibility of impact generated R-waves, ACI Materials Journal, American Concrete Institute, 査読有, Vol.107, No.3, 2010, pp.305-311.
- ③ 蔡華堅, 桃木昌平, 塩谷智基, Rayleigh波減衰特性によるコンクリートひび割れの定量評価に関する基礎研究, コンクリートの補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, Vol.9, 2009, pp.25-30.
- ④ 桃木昌平, 蔡華堅, 小林義和, 塩谷智基, 弾性波の減衰特性を用いたコンクリートの内部損傷可視化技術の開発, とびしま技報, 査読有, No.58, 2009, pp.27-32.

[学会発表] (計 6 件)

- ① Hwa Kian Chai, Dimitrios G. Aggelis, Shohei Momoki, Yoshikazu Kobayashi and Tomoki Shiotani, Tomography imaging of concrete by surface waves, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 1 日, 札幌.
- ② Hwa Kian Chai, Dimitrios G. Aggelis, Shohei Momoki, Yoshikazu Kobayashi and Tomoki Shiotani, Recent development in tomography techniques for non-destructive evaluation of concrete, 2nd Asia Pacific Young Researchers and Graduates Symposium, 2010.3.27, Hangzhou.
- ③ Hwa Kian Chai, Dimitrios G. Aggelis, Shohei Momoki and Tomoki Shiotani, Surface wave tomography for detecting internal concrete defects, The 5<sup>th</sup> Kumamoto International Workshop on Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete, 2009.9.18, Kumamoto.
- ④ Tomoki Shiotani, Hwa Kian Chai and Hiroyasu Ohtsu, Crack depth characterization by means of elastic wave approach, EIT-JSCE Joint International Symposium, 2009.9.8, Bangkok.
- ⑤ Hwa Kian Chai, Shohei Momoki and Tomoki Shiotani, Sizing deep surface cracks in concrete by attenuation of Rayleigh waves, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月 2 日, 福岡.
- ⑥ Hwa Kian Chai, Shohei Momoki and Tazaki Kenyu, Assessing surface-opening concrete

cracks by stress waves- Tomographic imaging for approximate investigation and Rayleigh waves for sizing, 1st Asia Pacific Young Researchers and Graduates Symposium, 2009.2.27, Kunsan.

〔産業財産権〕

○出願状況（計2件）

①

名称：非破壊検出システムおよび非破壊検出方法

発明者：蔡華堅, デイミリアス・ジー・アジリス,  
桃木昌平, 塩谷智基

権利者：飛島建設株式会社

種類：特許

番号：特願 2010-058196

出願年月日：2010年3月15日

国内外の別：国内

②

名称：ひび割れ深さ計測方法

発明者：蔡華堅, 桃木昌平

権利者：飛島建設株式会社

種類：特許

番号：特願 2009-174371

出願年月日：2009年7月27日

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

蔡華堅 (Chai Hwa Kian)

研究者番号：70506823