

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 8 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760408

研究課題名（和文） 弾性波法を適用したコンクリート付着界面の損傷度評価手法の開発

研究課題名（英文） Damage Evaluation of Bond Surface in Concrete by Elastic Wave

研究代表者

大野 健太郎（OHNO KENTARO）

首都大学東京・都市環境科学研究科・助教

研究者番号：80571918

研究成果の概要（和文）：本研究では、コンクリート表層部の欠陥検出ならびに内部損傷の評価について、弾性波法を用いて検討した。その結果、コンクリート表層部のひび割れ検出には、共振型センサを用いて弾性波速度を指標とするところで、損傷の有無が判断可能であることが示された。また、供用されている鉄筋コンクリート部材に弾性波法を適用し、弾性波速度トモグラフィを適用することで、表層および内部の損傷を視覚的に評価可能であることが示された。

研究成果の概要（英文）：In this study, surface cracks and internal defects in concrete were investigated by elastic wave techniques. As a result, surface cracks could be evaluated by employing elastic wave velocity in the case that elastic waves were detected by resonance sensor. In addition, elastic wave techniques were applied to reinforced concrete members in-service. Surface crack and internal defects in the concrete members were identified by tomography method of elastic wave velocity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：弾性波トモグラフィ法，弾性波速度，アコースティック・エミッション法，ヘルスマモニタリング

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の延命化は重要な課題であり、補修・補強を繰り返しながら、今後も長い年月供用していくことが望まれる。ここで、橋長 15m 以上の道路橋 15 万橋における建設後 50 年を超える橋梁数に着目すれば、今から 20 年後にはその半数以上が建設後 50 年を超えるとされており、これらの補修・補強、維持管理が早急に求められている。

補修・補強の代表的な工法として、劣化および損傷箇所をはつり出し、新たな補修材によって断面を修復する工法（断面修復工法）が挙げられる。本工法においては、既設コンクリートと補修材が一体となって荷重に抵

抗することが求められる。一体性確保のために、母材コンクリートの打継処理面には凹凸を設けるための処理が実施される。打継処理には、母材コンクリートへのマイクロクラックを誘発しないウォータージェット工法が採用されるが、施工環境やコスト面からエアーチッパーや電気チッパーによるはつり出しが行われる。その場合、はつり完了後の母材コンクリート面では、母材コンクリート内に微細ひび割れを生じさせる懸念があり、またこれらの微細ひび割れによって、付着強度が十分に得られないことがある。また、打継完了後の健全性診断では、目視調査、打音検査等が実施されるが、内部微細ひび割れの確

認は困難である場合が多い。

## 2. 研究の目的

本研究では、コンクリート構造物の断面修復工法に着目して、以下の3点を明らかにすることを目的とした。

### (1) 母材コンクリートの付着界面凹凸性状とせん断付着強度の関係

既設コンクリートと補修材が一体となって荷重に抵抗するためには、両者が一体となって挙動することが求められ、両者の界面で生じるせん断力を超える付着力が要求される。せん断付着強度は、母材コンクリートの付着界面の凹凸性状により大きく変化することから、凹凸性状とせん断付着強度の関係を整理し、その破壊性状についてアコースティック・エミッション (AE) 法を適用して検討する。

### (2) 付着界面処理により発生する表層ひび割れの弾性波法による検出性能の検討

既設コンクリートをはつる際に、エアータッパーや電気チッパーでは、コンクリート表層部に微細ひび割れを生じさせる懸念がある。本検討では、これらの表層ひび割れを弾性波法により検出するための基礎検討を行う。

### (3) 既設コンクリート構造物の弾性波法およびAE法による損傷度評価

上記(2)では、はつり作業により生じる表層ひび割れを弾性波法により検討しており、この手法は、供用中の既設コンクリート構造物の損傷度評価手法にも適用可能と考えられる。そこで、供用中のコンクリート構造物に弾性波法を適用し、損傷度評価の適用性について検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 母材コンクリートの付着界面凹凸性状とせん断付着強度の関係

母材コンクリートの打継処理において、図-1に示すように界面凹凸性状を無処理、小目粗し(細骨材が露出する程度)、大目粗し(粗骨材が露出する程度)の3水準として、無機系補修モルタルを打継いだ供試体を作製し、図-2および図-3に示すせん断付着強度試験および割裂引張試験による付着強度試験を実施した。また、それぞれの破壊過程をAE法により考察した。

### (2) 付着界面処理により発生する表層ひび割れの弾性波法による検出性能の検討

図-4に示す寸法の供試体を作製し、コンクリート表層部にひび割れを模して人工結果を埋設した(図中の(1),(2),(3))。実験で

は、シャープペンシルの芯圧接方法により弾性波を励起し、それぞれの検出位置において弾性波を検出した。弾性波の検出には、3種類のAEセンサを使用した。1つは、広帯域型のAEセンサであり、その他は、共振周波数60kHz、150kHzの2種類の共振型AEセンサである。また、ひび割れの検出評価においては、各センサ位置での最大振幅値、卓越周波数および弾性波速度を指標として、使用するセンサと評価指標を組み合わせた考察を行った。



(a) 無処理 (b) 小目粗し (c) 大目粗し  
図-1 付着界面の処理状態

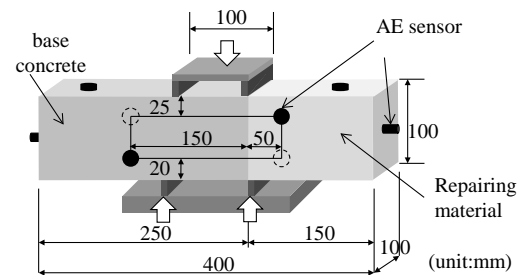


図-2 せん断付着強度試験

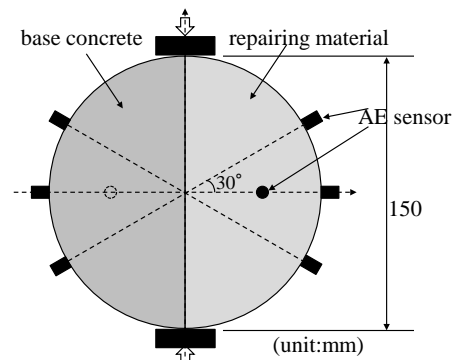


図-3 割裂引張強度試験による付着強度試験

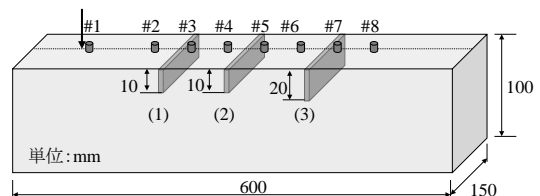


図-4 表層ひび割れの検出に使用した供試体

(3) 既設コンクリート構造物の弾性波法およびAE法による損傷度評価

供用中の鉄筋コンクリート構造物の二階建て駐車場において、図-5に示す領域の鉄筋コンクリート床版を対象に弾性波法を適用した。弾性波の励起は、テストハンマによる打撃と空気砲により行い、それぞれの入力方法により得られた弾性波の弾性波速度を求め、弾性波トモグラフィ法により視覚的な損傷部の把握について検討した。なお、対象とした床版の表面には、図-6に示すように長さ920mmの表面ひび割れが存在している。

また、4.4tonの車両を4CH方向から1CH方向へ低速走行させ、AE計測を行い、弾性波トモグラフィ法の結果と比較した。

#### 4. 研究成果

(1) 母材コンクリートの付着界面凹凸性状とせん断付着強度の関係

図-7に付着界面の凹凸性状と付着強度の関係を示す。なお、図中の横軸となる粗さパラメータは、付着界面をレーザー変位計により測定した後、算術平均粗さにより定量化したものである。図より、母材コンクリートにおける付着界面の凹凸性状（粗さ）が増加するにつれて、得られるせん断付着強度および引張付着強度は大きくなり、それぞれの強度は付着界面の粗さと直線関係にあるといえる。

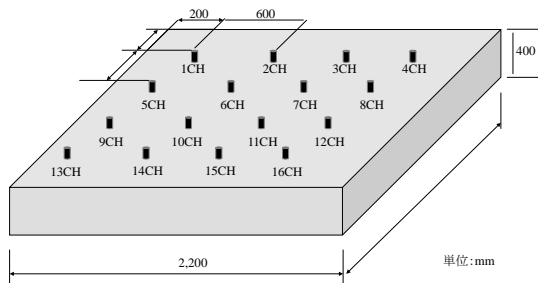


図-5 弾性波モニタリングおよびAE計測を行った鉄筋コンクリート床版

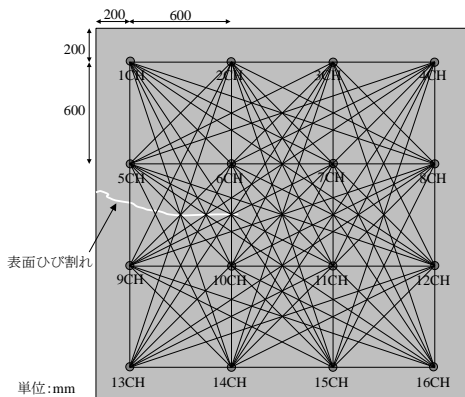


図-6 鉄筋コンクリート床版の表面ひび割れ

図-8および図-9に、せん断付着強度試験および割裂引張強度試験において得られたAE信号にSiGMA (simplified Green's functions for moment tensor analysis) 解析を適用した結果を示す。図-8より、せん断付着強度試験では、破断面の高さ中央付近に引張型のAE源が多く、荷点近傍にせん断型のAE源が多いことがわかる。また、図-9においても、高さ方向中央付近で引張型のAE源が多く、荷点付近でせん断型のAE源が多いことが確認された。

このことから、両者の破壊過程は類似することが示唆された。

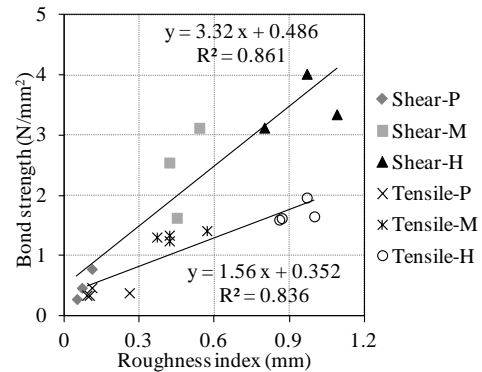


図-7 付着界面の粗さと付着強度の関係

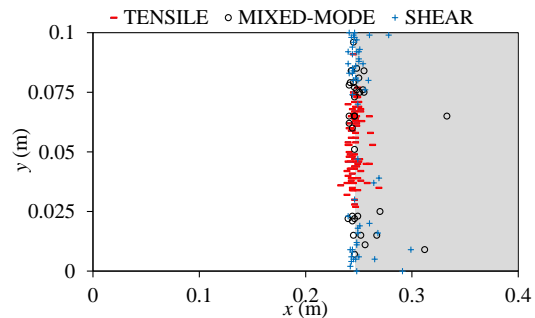


図-8 せん断付着強度試験におけるSiGMA解析結果

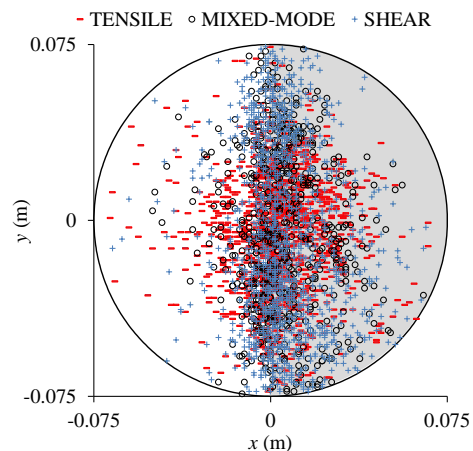


図-9 割裂引張強度試験におけるSiGMA解析結果

(2) 付着界面処理により発生する表層ひび割れの弾性波法による検出性能の検討

図-10 に弾性波速度を指標とした場合のひび割れ検出性能の結果を示す。図中の矢印は、表層ひび割れの位置を示している。図より、150kHz の共振型センサ (R150) を使用した場合、ひび割れ通過後に弾性波速度が低下していることがわかる。一方、卓越周波数、最大振幅値による振幅減衰率を指標とした場合では、ひび割れによる影響は顕著に表れなかった。このことから、表層ひび割れの検出を弾性波法によって評価するには、共振型センサを使用し、弾性波速度を評価指標とすることで、ひび割れ検出が可能であることが示された。

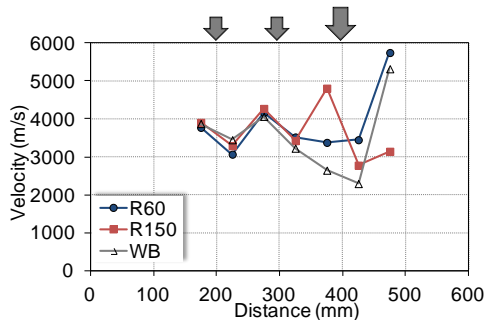


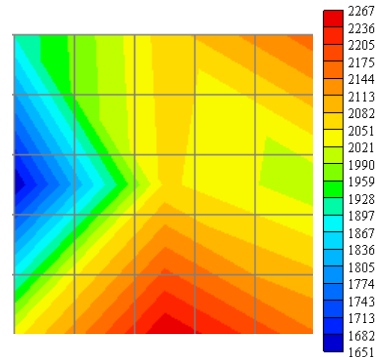
図-10 弾性波速度を指標としたひび割れ検出性能の結果

(3) 既設コンクリート構造物の弾性波法およびAE法による損傷度評価

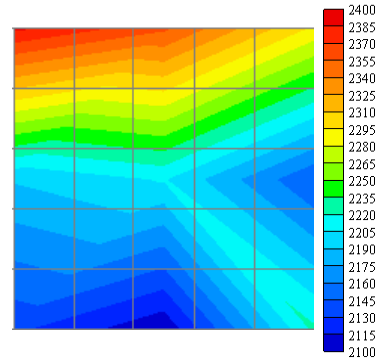
図-11 に鉄筋コンクリート床版に弾性波法を適用し、検出波形の到達時間およびセンサ設置座標から求めた弾性波速度をトモグラフィ法に適用した結果を示す。ハンマ打撃により弾性波を励起した結果の図-11(a)より、弾性波速度が比較的小さい領域(青色)と図-6 に示した表面ひび割れ位置がほぼ対応していることがわかる。これより、ハンマ打撃による弾性波の入力では、コンクリート表面の損傷を視覚的に得ることが可能であることが確認された。一方、空気砲により弾性波を励起した結果(図-11(b))では、ハンマ打撃とは異なる結果を示しており、コンクリート表面ひび割れの影響は反映されていない。

ここで、鉄筋コンクリート床版に4.4tonの車両を低速走行させて得られた累積AEヒット数をコンター図として示した結果を図-12に示す。図-12より、AE計測で多くAE信号が検出された領域は、8CHおよび16CH付近であり、この領域は図-6に示した表面ひび割れとは異なる位置である。このことから、AE法により得られた結果は、コンクリート内部に損傷が存在している可能性を示唆するものと考えられる。このことを踏まえると、図-11(b)に示した空気砲により弾性波を励起した結果は、コンクリート表層の状態を反映

した結果ではなく、コンクリート床版内部の状態を反映した結果であることが推察される。これは、図-13に示すように、弾性波の入力方法の違いにより、卓越周波数が異なり、コンクリート床版内を伝搬する弾性波経路が異なることに起因するものと考えられる。



(a) ハンマ打撃入力による結果



(b) 空気砲入力による結果

図-11 弾性波トモグラフィ法による結果

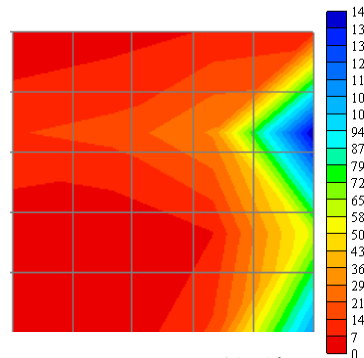


図-12 AE計測結果

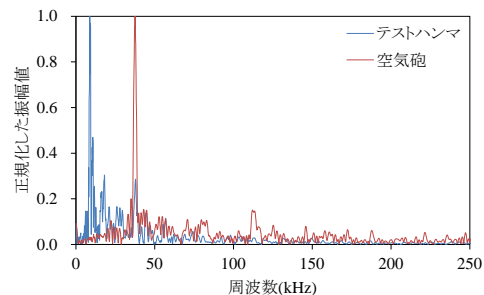


図-13 入力信号の周波数スペクトル

## 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 8 件)

- (1) 黒原創, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: AE法によるコンクリートと補修材のせん断付着強度試験における破壊機構の考察, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 34, No. 2, 2012, pp. 1375-1380
- (2) 川瀬麻人, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: コンクリートの割裂引張強度試験における破壊過程に関する考察, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 34, No. 1, 2012, pp. 334-339
- (3) 中嶋彩乃, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: コンクリートの破壊エネルギーに断面欠損率ならびに骨材寸法が与える影響, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 34, No. 1, 2012, pp. 346-351
- (4) 黒原創, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦, 川瀬麻人: AE法を用いたコンクリートのひび割れ分類手法に関する考察, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, 査読有, Vol. 4, 2012, pp. 289-296
- (5) 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: 弾性波法による小型コンクリート供試体の表層部ひび割れ検出に関する基礎的検討, 査読有, Vol. 4, 2012, pp. 459-464
- (6) Junlei ZHANG, Kentaro OHNO, Kimitaka UJI, Atsushi UENO and Yuko OGAWA: Investigation of Shear Bonding Behavior between Base Concrete and Polymer-modified Mortar with CFRP Grid, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III & Alexander et al. (eds) 2012 Taylor & Francis Group, London, 査読有, CD-ROM, 2012, pp. 1253-1258
- (7) 大野健太郎, 張軍雷, 宇治公隆, 上野敦: CFRP格子筋とポリマーセメントモルタルで補強した供試体の界面破壊性状のAE法による考察, 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集, 査読有, Vol. 12, 2012, pp. 23-30
- (8) Kentaro OHNO, So KUROHARA, Kimitaka UJI and Atsushi UENO: Comparison of Failure Process in Bond Strength Tests between Shear and Splitting Tensile in Concrete with Repairing Material by Acoustic Emission, Progress in Acoustic Emission XVI, 査読有, Vol. 16, 2012, pp. 13-18

[学会発表] (計 3 件)

- (1) 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: AE法によるコンクリートの破壊エネルギー試験におけるクラック形成に関する一考察, 第 56 回日本学術会議材料工学連合講演会, 2012 年

10月29日, 京都テルサ

(2) 大野健太郎, 佐藤佑亮, 宇治公隆, 上野敦: 弾性波法によるコンクリート表層部のひび割れ検出手法に関する基礎検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012 年 9 月 6 日, 名古屋大学

(3) Kentaro OHNO, Kimitaka UJI, Atsushi UENO and Ayano Nakashima: Investigation of Fracture Energy and Fracture Process Zone in Concrete under Three-point Bending by Acoustic Emission, 54<sup>th</sup> Meeting of Acoustic Emission Working Group, 2012 年 5 月 22 日, Hyatt Regency, Princeton and MISTRAS Group Headquarters, Princeton(アメリカ合衆国)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

大野 健太郎 (OHNO KENTARO)

首都大学東京・都市環境科学研究科・助教

研究者番号: 80571918