

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06166

研究課題名(和文) 超音波法を用いたRC部材の鉄筋腐食劣化の潜伏期から加速期までの定量化手法の確立

研究課題名(英文) Evaluation of Rebar Corrosion from Dormant Stage to Acceleration Stage by Ultrasonic Method

研究代表者

渡邊 健 (WATANABE, Takeshi)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・准教授

研究者番号：50332812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート梁の供試体を用いて、供試体中に鉄筋を配筋し、その埋設した鉄筋を腐食させ、その潜伏期から進展期の評価を超音波法により試みた。また、アコースティック・エミッション法を併用し、腐食ひび割れの検出を行った。

その結果、超音波法の結果より、腐食期間の初期に波形パラメータが上昇し、ひび割れが目視によって確認される電食期間の約半分程度の日数から減少に転じていくことが確認された。AE法の結果より、電食開始から十数日経過した後にマイクロクラックの多発が確認された。このことより超音波パラメータの初期の増加は、鉄筋腐食による膨張圧の影響であり、ひび割れの発生以降から低下することが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate rebar corrosion process from dormant stage to acceleration stage by ultrasonic testing (UT) and acoustic emission method (AE), electrolytic corrosion tests were applied to RC beam specimens.

As the results, it was clarified that amplitude and energy which were calculated from wave form in UT were increasing in dormant stage, and the parameter start to decrease due to corrosion induced cracks. The corrosion induces cracks were detected by AE. It is observed that the time to start increasing of micro cracks agreed with the decreasing of the decreasing of parameter in UT.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：超音波法 鉄筋腐食 ひび割れ 潜伏期 加速期 アコースティックエミッション法

1. 研究開始当初の背景

現在、社会基盤構造物として広く使用されている鉄筋コンクリート構造物の維持管理は、国内外で非常に重要な課題となっている。それらの鉄筋コンクリートを維持管理において主流であるのは、目視による点検を行い、変状をグレード化し、それに応じて対応を決定しているものである。これらの維持管理の問題の一つとして、変状が顕在化してから対応する場合は、劣化が進行しており補修や補強が大掛かりなものとなり、技術的にも経済的にも負担が大きいことが挙げられる。そこで、これらの事後対応の維持管理から、予防保全的な維持管理への移行することにより、維持管理費の低減や構造物の長寿命化の効果が期待されている。

コンクリート構造物の劣化において、大きな問題の一つに塩害による鉄筋腐食が挙げられる。鉄筋の腐食による断面減少や破断は、構造物の耐荷性を低下させる要因であるため、鉄筋を以下に健全に保つかが重要となる。一方、鉄筋の腐食による劣化は、目視でコンクリート表面にひび割れなどの変状が確認できる段階では、潜伏期、進展期をすでに経て後の加速期と判定されることになる。これは、劣化が大きく進行している状態であり、その補修・補強は大掛かりなものとなることが多い。

よって、表面に変状が生じるよりも早い段階で鉄筋腐食を検出することが重要となり、そのような技術が求められている。自然電位法や分極抵抗法などの手法により鉄筋の腐食環境を評価することは可能であり、腐食量を予測する手法が提案されているが、それらでは腐食量を直接的に評価していないという課題がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋腐食を、非破壊試験方法の一つである超音波試験を用いて評価するものである。超音波は、波長が短く周波数の高い弾性波を利用する手法であり、鉄筋腐食に起因する膨張による鉄筋表面の変化および腐食に起因する微細なひび割れによって、超音波の反射波の変化に着眼して評価可能か検討することを目的とする。具体的な目的としては、予防保全的手法として、腐食をコンクリート表面にひび割れや錆汁などの変状が目視によって確認されるよりも早く検出する方法の確立である。また、表面にひび割れが確認された後に、鉄筋の腐食量・断面減少率や腐食によるコンクリートの劣化を定量的に評価する手法を確立することである。

3. 研究の方法

(1) 供試体の作製

本研究では、鉄筋コンクリート梁の供試体を複数体作製し、内在塩を含めて劣化を促進させたシリーズ、人工欠陥で欠陥を再現した

シリーズ、電食試験によって強制的に鉄筋を腐食させるシリーズ、鉄筋を複数配筋したシリーズで実験を行った。供試体の代表的な形状を図-1に示す。

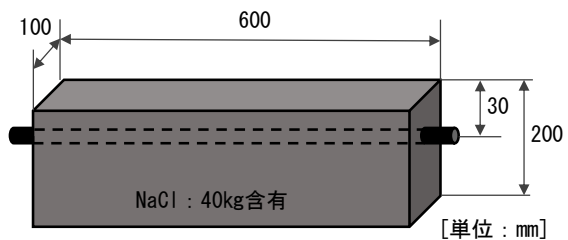
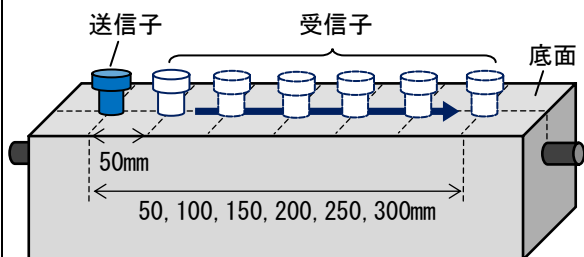


図-1 供試体概要

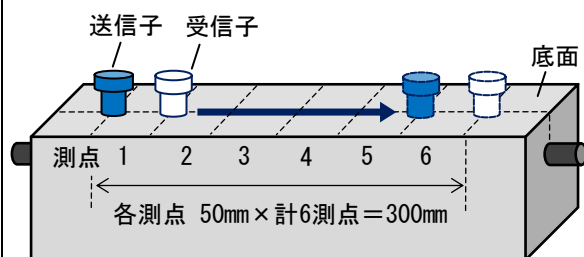
(2) 超音法による計測

本研究では、送信側探触子、受信側探触子(探触子直径: 30mm~40mm のものを使用)を同一面に配置する表面法を適用して測定を行った。測定は、かぶり側表面を測定面として、探触子を設置した。その際、探触子の設置方向や測定手法を複数パターン設けて測定および検討を進めた。以下にその代表例を示す。

計測の概要図を図-2に示す。ここでは、測定範囲は供試体底面の長さ方向の中心 300mm を対象に測定を実施した。パターン1では送信側探触子を供試体端面から 50mm の位置に設置し、受信側探触子との探触子間距離を 50, 100, 150, 200, 250, 300mm と延ばしていく手法にて、計 6 測点で測定を行った。パターン2では探触子間距離を 50mm で固定とし、1 測点の計測ごとに両探触子を 50mm 移動させる手法にて、計 6 測点で測定を行った。パターン2は探触子直下での鉄筋腐食に伴う変状について評価を行った。測定は入力電圧 400V、入力



(a) パターン1



(b) パターン2

図-2 超音波法の測定手法

周波数 200kHz で行い、サンプリング周期 10MHz で波形データを記録し、得られた波形データから波形パラメータを抽出した。本研究では、伝搬速度、振幅および波形面積（エネルギー）を主なパラメータとして使用した。図-3は、波形面積の算出イメージである。波波形面積（エネルギー）は、波形の面積を積分的に算出したもので、塗りつぶした面積となる。

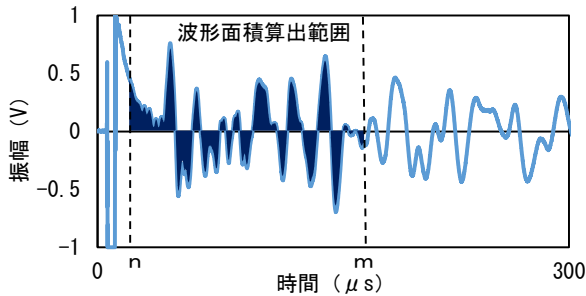


図-3 波形面積の算出

(3) アコースティック・エミッション (AE) 法による計測

AE法は、外的要因により材料内部から発生する弾性波が材料内部を伝搬し、表面に設置したAEセンサによって電気信号に変換され、その後、増幅器により信号を増幅させ、帯域通過型フィルタでろ過された信号を検出する手法である。この検出されたAE信号を解析し、鉄筋腐食による劣化の進展を評価する。超音波法と併用することにより、超音波波形が、内部のひび割れ進展によってどのように変化するかを検討するために計測を行った。本研究で実施した計測の代表例の写真を写真-1に示す。

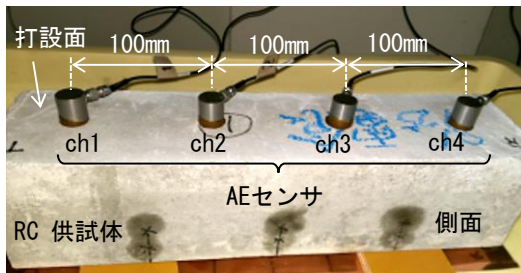
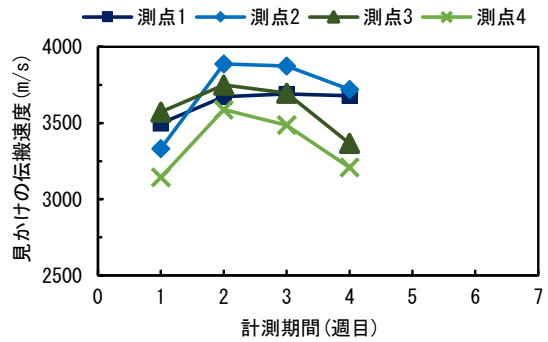


写真-1 AE計測状況

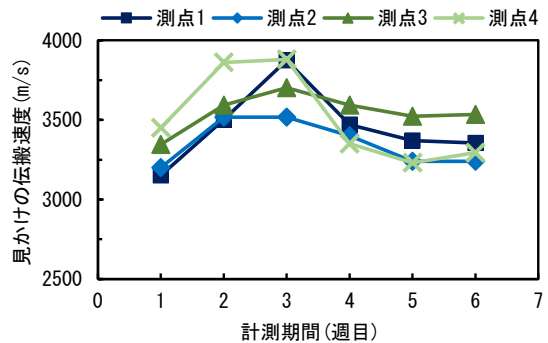
4. 研究成果

(1) 内在塩を含有した供試体での超音波法による検出結果

NaClを40kg/m³含有して作製した供試体を用いて、腐食の進行状況に伴う変化に着目するために1週間ごとに測定を行い、波形パラメータの経時変化に着目した。各腐食段階においてパラメータに変化が生じた段階において供試体を切断し、腐食による内部ひび割れが発生していないかを確認し、鉄筋の腐食量を測定した。腐食量はコンクリートから



(a) 4週目までの計測結果



(b) 6週目までの計測結果

図-4 パターン(2)における伝搬速度の変化

5cm 間隔ではつり出した鉄筋を10%クエン酸水素二アンモニウムに24時間以上浸漬し、錆を取り除き、腐食前の鉄筋との質量比を算出し、鉄筋の質量減少率を腐食量として評価した。NaClを含ませた供試体に関しては、事前に自然電位の測定を実施し、ASTMに規定されている「90%以上の確率で腐食あり」の自然電位-350mV以下を示したため、測定開始時からすでに鉄筋は腐食環境にあったと言える。本実験では3体の供試体で実験を行っているが、その内2体は後に述べるように測定開始以降、3週目から4週目にかけて波形パラメータの変化が確認できたこと、6週目において供試体表面にひび割れが検出されたことから、4週目と6週目の計測終了後に、1体ずつ供試体を切断し、2体の供試体のパラメータの変化に着目して考察を行った。残り1体については2体の供試体でひび割れが発生した6週目ではひび割れは生じなかった。

図-4にパターン(2)における見かけの伝搬速度を示す。1週目から3週目にかけて伝搬速度が増加傾向を示し、3週目から4週目以降にかけて伝搬速度が減少した。3週目までの伝搬速度の増加については材齢の増加に伴う内部組織の緻密化、鉄筋腐食による膨張圧によってコンクリートの表層部が緻密化したためであると考えられる。4週目以降の伝搬速度の減少については、鉄筋腐食による内部ひび割れの発生に起因するものと考えており、実際に4週目測定後、1体の供試体を切断し断面を確認したところ鉄筋周辺

からかぶり厚さ方向に対して内部ひび割れが発生していることが確認された（写真-2参照）。腐食量は4週目の段階において1.6%と算出されている。



写真-2 ひび割れの様子（4週後）

以上のことより、内在塩に伴う鉄筋腐食では、内部ひび割れが発生する以前とひび割れ発生後において波形パラメータに変化を及ぼすことが確認できたといえる。また、見かけの伝搬速度の変化は、鉄筋腐食に伴いコンクリート内部に発生するひび割れの影響が大きい可能性が示された。

(2) 電食実験における超音波法およびAE法での結果

コンクリートは W/C55%とし、使用材料としてセメントは早強セメントを、骨材は徳島県産の砕石砕砂を使用した。供試体は、100×100×400mmの角柱供試体を用い、D13鉄筋を底面からのかぶり30mmの位置に1本配筋したものを3体作製した。供試体は脱型後、14日間の湿布養生を実施した。養生終了後、コンクリートの含水状態の違いが超音波法の測定結果に及ぼす影響を除去するために、高周波容量式モルタル・コンクリート水分計にて、コンクリート表面3箇所を測定し、表面含水率の平均値が10±1.0%を満足するまで、温度20℃、湿度60%の恒温室内に静置した。

電食試験は陽極をD13鉄筋、陰極を銅板とし、濃度5%のNaCl水溶液に供試体を底面からの厚さ20mm程度まで浸漬させた状態で、電流密度2A/m²の定電流を通電させた。本実験では、通電を5日間行った後、表面含水率10±1.0%を満足する間の数日間、恒温室内の気中にて供試体を乾燥させ、乾燥後、超音波法による測定を行った。

図-5に代表的な見かけの伝搬速度の算出結果を示す。見かけの伝搬速度は、すべての供試体でひび割れが視認される以前の段階である通電期間の10～15日までに初期値から3～5%程度増加した後に減少傾向に転じた。見かけの伝搬速度の減少は供試体表面にひび割れが確認できた通電期間25日以降でも、初期値より大きく下回ると推察していたが、ほとんどの供試体で数%の減少にとどまる結

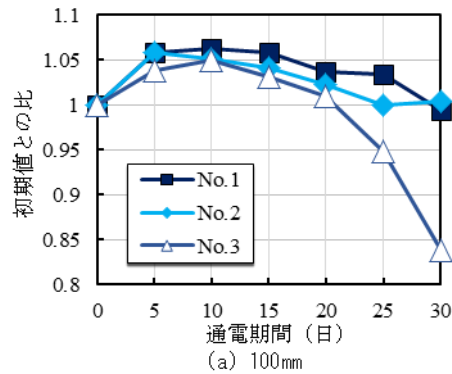


図-5 パターン1における見かけの伝搬速度

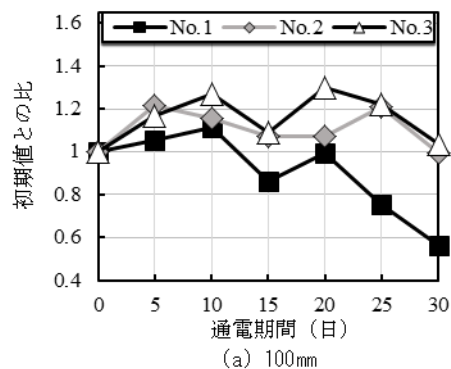


図-6 パターン1における波形エネルギー

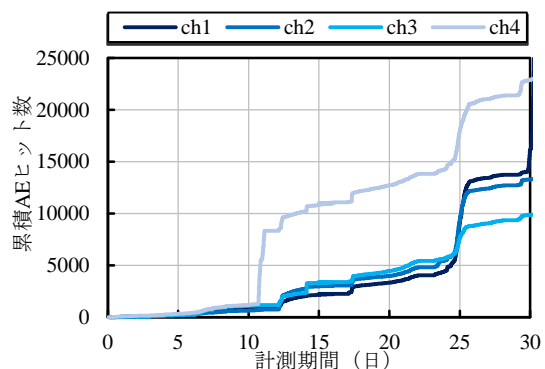


図-7 各AEセンサにおける累積AEヒット数

果となった。

図-6に波形エネルギーの結果を示す。波形エネルギーも同様に増加後、減少する傾向が確認できた。しかしながら、見かけの伝搬速度の数%の変動とは異なり、数10%の増加が確認でき、鉄筋腐食の進行に伴い初期値と大きな差が生じることが確認できた。これは、伝搬速度という指標は超音波が到達したことをのみを評価しているためだと考えられる。しかしながら、見かけの伝搬速度は減少傾向に転じて以降、減少し続けるのに対し、波形エネルギーは減少後、増加し、再び減少するなど、不安定な傾向が確認された。これは、ひび割れによる減衰と境界部からの反射が混在する影響だと考えている。

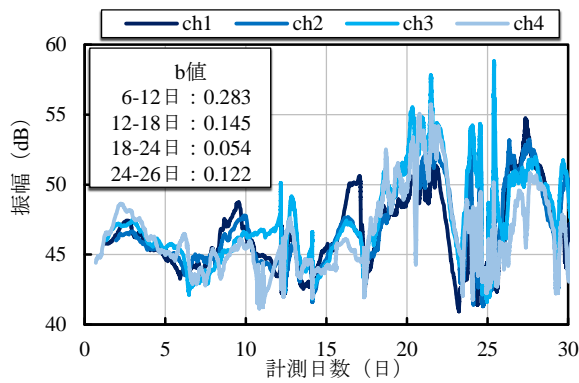


図-8 AE 振幅および b 値

通電中に各 AE センサで記録された AE ヒット数の累積値を図-7 に示す。累積 AE ヒット数はすべてのセンサで計測期間の 10 日付近まで緩やかな増加を示し、10~20 日の間に突発的な AE ヒット数の増加が数回確認され、25 日付近で急激に AE ヒット数が増加した。これらの結果を図-5 および図-6 の超音波パラメータにおける増加傾向は、腐食生成物の生成過程を評価していると考えられ、10~20 日において AE ヒット数の増加が確認できることから、超音波パラメータの低下は内部ひび割れによるものと示唆される

図-8 に AE で得られた信号の振幅の経時変化および累積 AE ヒット数の変化をもとに、任意の範囲で算出した b 値を示す。振幅は、母数 100 で移動平均を行った。振幅は、15 日付近まで、増減を繰り返し、15 日以降に急激に振幅が増加し、21~25 日付近で最も大きい振幅が確認でき、ひび割れが目視確認された時期とほぼ一致していた。b 値に着目すると、6~12 日の b 値から 12 日以降の b 値は小さくなっていることが確認でき、規模の大きい破壊現象が生じている可能性が示唆され、内部ひび割れがその時点で発生していると考えられる。

(3) 複数の鉄筋を埋設した場合での結果

鉄筋を 2 本埋設した供試体を作製し、(2)と同様に電食試験を実施し、その際の超音波伝搬特性について検討した。測定概要を図-9 に示す。

探触子を鉄筋軸方向と直行方向に設置した際の波形エネルギーと見かけの伝搬速度を図-10 に示す。縦軸は、初期値を 1 とした場合の変動割合を示す。図より、測定区間 I、II、III のいずれにおいても、波形エネルギーは通電後に一度上昇する傾向を示し、通電期間 21 日頃から低下傾向に転じた。見かけの伝搬速度においては 28 日頃までは、ほぼ一定に推移し、そこから 35 日にかけて低下し始めた。目視による観察では、通電後 35 日の時点で供試体表面にひび割れを確認した。これは、鉄筋腐食による膨張圧により鉄筋近傍からひび割れがコンクリート部に進展すると波形エネルギーおよび見かけの伝搬速度が低下するためと思われる。

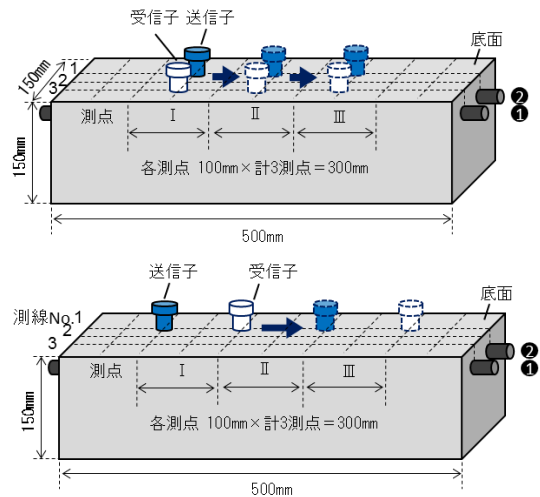


図-9 超音波法による測定の概略図

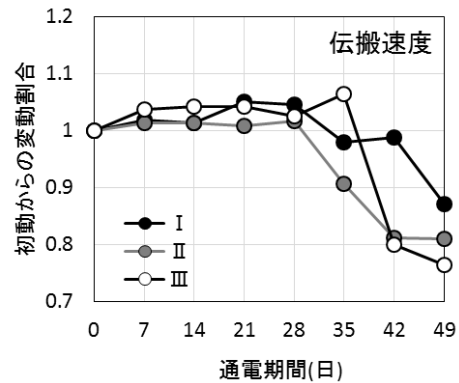
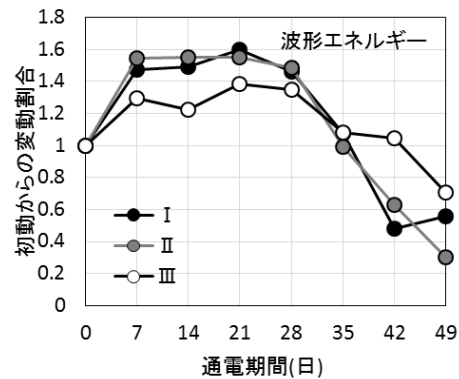


図-10 波形エネルギーと見かけの伝搬速度

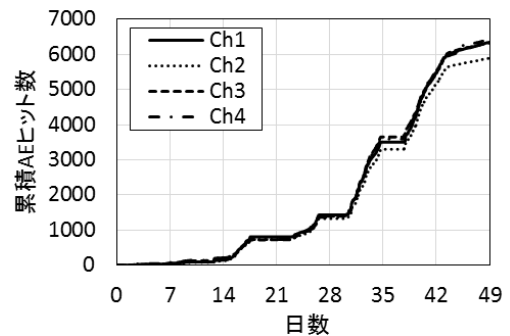


図-11 累積 AE ヒット数

通電期間中に得られた累積 AE ヒット数を図-11 に示す。図より、通電期間 14 日を経過

した頃からAEが増加する傾向が見てとれた。また、超音波計測後に電食を再開すると、再開後しばらくはAEがほとんど生じない現象が見られる。これは、腐食による鉄筋の膨張圧の上昇とひび割れ発生によるその開放が交互に生じたためと思われる。

超音波の結果と併せて考察すると、マイクロクラックの蓄積と進展があるレベルに達すると、超音波のパラメータが減少しており、これらは(1)や(2)と同様の傾向であった。

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 3件)

(1) 西山 航平, 渡邊 健, 福富 隼人, 橋本 親典, 石丸 啓輔 : 超音波法及びAE法による鉄筋腐食に起因するひび割れの評価, 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. 17, 113-118, 2017年.

(2) 福富 隼人, 渡邊 健, 西山 航平, 橋本 親典 : 超音波法およびAE法による鉄筋腐食の早期検出に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 39, No. 1, 1795-1800, 2017年

(3) 福富 隼人, 渡邊 健, 宮崎 一樹, 橋本 親典 : 超音波法による鉄筋腐食の早期発見に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 38, No. 1, 2169-2174, 2016年

[学会発表] (計 8件)

(1) 渡邊 健, 西山 航平, 橋本 親典, 福富 隼人 : 超音波法およびAE法による鉄筋腐食評価に関する実験的検討, アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, Vol. 21, 133-136, 2017年11月.

(2) Takeshi Watanabe, HAYATO FUKUTOMI, Kohhei Nishiyama, Akari Suzuki and Chikanori Hashimoto : Evaluation of Condition and Damage in Reinforced Concrete by Elastic Wave method, 12th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2017) and 13th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC 2017), Aug. 2017.

(3) 福富 隼人, 西山 航平, 渡邊 健, 橋本 親典 : 超音波法の測定方法に着目した鉄筋腐食の劣化度評価に関する検討, 土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, Vol. 23, 2017年5月

(4) 西山 航平, 福富 隼人, 渡邊 健, 橋本 親典 : AE法を適用した鉄筋腐食に起因するひび割れの評価, 土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, Vol. 23, 2017年5月

(5) Fukutomi Hayato, Takeshi Watanabe, Chikanori Hashimoto, Miyazaki Kazuki and

Keisuke Ishimaru : Evaluation of Ultrasonic Propagation Properties in Reinforced Concrete that Reproduced Rebar Corrosion by Artificial Defect and Chloride Damage, PROGRESS IN ACOUSTIC EMISSION XVIII, 539-544, Dec. 2016

(6) 福富 隼人, 渡邊 健, 橋本 親典, 宮崎 一樹 : 超音波法による鉄筋腐食の発生状況の定量的評価に向けた基礎的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 71, 951-952, 2016年9月

(7) Takeshi Watanabe, Miyazaki Kazuki, Fukutomi Hayato and Chikanori Hashimoto : EARLY DETECTION OF CRACK AND REBAR CORROSION DUE TO CHLORIDE DAMAGE BY UT, Structural Faults & Repair 2016, May 2016

(8) 福富 隼人, 渡邊 健, 橋本 親典, 宮崎 一樹 : 超音波を用いたコンクリート内部の鉄筋近傍における欠陥の検出に関する検討, 土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, Vol. 22, 2016年5月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 健 (WATANABE Takeshi)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部 (理工学域)・准教授

研究者番号 : 50332812

(2) 研究分担者

橋本 親典 (HASHIMOTO Chikanori)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部 (理工学域)・教授

研究者番号 : 10180829