

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246078

研究課題名(和文) アクティブNDEを取り入れた機能的コンクリート材料・構造物の開発に関する研究

研究課題名(英文) Development of efficient concrete materials and structures in conjunction with active NDE

研究代表者

廣瀬 壮一 (HIROSE, Sohichi)

東京工業大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：00156712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、数値シミュレーションを援用した非破壊評価(NDE)として定義するアクティブNDEを積極的に活用して、コンクリートの維持管理の視点に立つ新しい発想のもとでの機能的なコンクリート材料・構造物を開発するための基礎的研究を行った。具体的には、(1)コンクリートを対象としたNDEの数値シミュレーションの開発、(2)コンクリート材料に対する全波形サンプリング処理法や近似解を援用した開口合成法などの新しいNDEの開発、(3)ひび割れ制御機能を有するコンクリート構造物の設計、(4)コンクリート構造物のモニタリングと予測の4つの項目について研究成果を得た。

研究成果の概要(英文)：This project is a fundamental research aimed to develop efficient concrete materials and structures from innovative viewpoints of maintenance in conjunction with Active NDE, defined as a nondestructive evaluation (NDE), strongly supported by numerical simulation. The main research topics are as follows: (1) development of numerical simulation using EFIT (Elastodynamic Finite Integration Technique) and CQBEM (Convolution Quadrature time-domain Boundary Element Method) for NDE of concrete, (2) development of new NDEs suitable for concrete materials including FSAP (Full waveforms SAMpling and Processing) and SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) improved by approximate solutions, (3) design of concrete and fiber reinforced concrete structures with crack control function, (4) monitoring and prognosis of damage in concrete structures.

研究分野：応用力学

キーワード：非破壊評価 モニタリング 非線形超音波 きずイメージング ひび割れ進展 短繊維補強コンクリート  
数値シミュレーション メゾスケール解析・物質移動解析

### 1. 研究開始当初の背景

構造物の維持管理に対する重要性の認識が向上するとともに非破壊評価(NDE)の役割は大きくなっており、コンクリートに対してもX線、赤外線、AE、弾性波を用いた打音法や衝撃弾性波法、超音波法など、多くの非破壊検査技術が提案され、それらの適用性が検討されている。しかし、コンクリートに対する非破壊検査に係る多くの研究は対処療法的なものが多く、基礎から応用まで総合的に検討したものは少ない。そのため、一般にコンクリートに対するNDEの信頼性は高いとは言えない。例えば、超音波法は内部損傷を検出する代表的な非破壊検査手法の一つであるが、平成21年6月に日本非破壊検査協会規格として制定された「コンクリート構造物の弾性波による試験方法」における超音波法に関する規格は、音速測定方法に関する項目のみで、損傷や欠陥の定量的評価に関する規格は未整備のままである。しかし、コンクリートの維持管理の問題は待ったなしの状態であり、早急に信頼性のあるNDE、あるいは、これまでにない新たな方策が必要とされている。

コンクリートに適したNDE技術を開発するためには、まず、定量的な現象の把握が必要である。そのためには数値シミュレーションが欠かせない。最近の数値シミュレーションの進歩は目覚ましく、並列計算やGPGPUなどの新しい計算環境の出現とともに大規模な高速計算が可能となり、コンクリートのような複雑な材料中の波動伝搬や破壊挙動の解析なども行われている。数値シミュレーションの利点は、容易に様々な条件に対する解を得られる点である。これによって、コンクリートに適したNDE技術の開発を効率的に進めることができる。さらに、適切なモデル化の下で将来起こり得る事象を予測することも数値シミュレーションの大きな特徴である。本研究は、このような特徴を持つ数値シミュレーションを援用したNDE(本研究ではこれをアクティブNDEと呼ぶことにする)を積極的に取り入れた斬新な発想による機能的なコンクリート材料や構造物を創り、コンクリートの維持管理の高度化と効率化に資するものである。

### 2. 研究の目的

本研究ではアクティブNDEを積極的に活用して、コンクリートの維持管理の視点に立つ新しい発想のもとでの機能的なコンクリート材料・構造物を開発するための基礎研究を行う。具体的には、(1)コンクリートに適したNDEの開発のための数値シミュレーション、(2)コンクリート材料に適した新しいNDEの開発、(3)ひび割れ制御機能を有するコンクリート構造物の設計、(4)コンクリート構造物のモニタリングと予測の4つの項目について研究を進める。

### 3. 研究の方法

(1)コンクリートに適したNDEの開発のための数値シミュレーション

最近、金属分野で注目されているアレイ超音波法をコンクリートへも適用することを念頭に、コンクリート中の超音波の伝搬解析を行う。用いる数値解析法は動弾性有限積分法(EFIT: Elastodynamic finite integration technique)であり、骨材による超音波の散乱減衰や分散などの現象を明らかにする。そして、実験によりコンクリート中の超音波伝搬特性を検証する。次に、コンクリートの破壊に伴って発生する高調波や分調波の非線形超音波について数値シミュレーションを行う。非線形超音波がき裂面の接触によって発生すると仮定し、演算子積分時間領域境界要素法(CQBEM: Convolution Quadrature Time-domain Boundary Element Method)を用いて非線形動的解析を行い、高調波や分調波の発生条件などを見出す。

(2)コンクリート材料に適した新しいNDEの開発

本研究では、送受信ビームを電子的に制御する通常のフェーズドアレイ超音波法ではなく、アレイ探触子を構成するすべての素子の組合せで超音波を送受信し、得られたすべての波形を個別に記憶した後、波形処理および開口合成(SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique)によるきずの画像化をする全波形サンプリング処理(FSAP: Full waveforms sampling and processing)法を採用する。さらに、FSAPにおける波形処理において、超音波波動場の近似解を用いてSAFTによる画像を補正する改良法についても検討を加える。

(3)ひび割れ制御機能を有するコンクリート構造物の設計

コンクリートは材料のばらつきが大きく、外部環境要因(水分、塩分の外部供給など)も不確実であるため、ひび割れの発生位置を厳密に予測することは難しい。しかし、維持管理や非破壊評価の立場からすると、ひび割れ発生をある範囲に限定できれば効率的な検査や管理を行うことが可能となる。本研究では、有限要素法(FEM)および剛体-バネモデル(RBSM)法を用いて、コンクリート材料および部材に発生するひび割れの特性を明らかにする。特に、コンクリートのひび割れ進展挙動や鉄筋の塑性変形、並びに、補強用短繊維の力学特性を数値計算においてモデル化することによって、コンクリートの破壊挙動を忠実に再現し、コンクリートのひび割れに影響する因子について検討する。

(4)コンクリート構造物のモニタリングと予測

構造物を適切に維持管理する上で、モニタリングによる状態監視と将来予測は重要な研究課題である。本研究では、リアルタイムモニタリング手法として超音波法と画像解析を

取り上げて、その有効性を示す。また、ひび割れ解析結果をもとに、物質移動解析を行って鉄筋周辺の塩分量分布の推定を行った。

#### 4. 研究成果

(1)コンクリートに適した NDE の開発のための数値シミュレーション

EFIT を用いて、コンクリート中を伝搬する超音波の数値シミュレーションを実施した。その一例を図 1 に示す【⑥:5.における雑誌論文の番号を示す。以下同様】。EFIT は差分法に類似した領域型数値解法なので、解析モデルの構築においては、X 線 CT イメージ図から自動的にモデル要素を作成し、GPGPU を用いて解析を実行した。入射波は試験体上面に設置した探触子から 400kHz を中心とする超音波が送信されたとした。骨材率の違いによって、コンクリート中を伝搬する超音波の音速ならびに減衰率に差が現れている。

き裂面の接触によって発生する非線形超音波を CQBEM によって 2 次元解析した例を図 2 に示す【③】。h=a/2 (2a:き裂長さ)の間隔で上下に隣り合う 2 つの水平き裂に、下方から波数  $ak_T=2.5$  なる平面縦波が入射したときの遠方散乱縦波の(a)振幅波形と(b)周波数特性を表したものである。この解析では、き裂面において接触条件を考慮しているために、波数  $ak_T=2.5$  の入射波を入力しているにも関わらず、 $ak_T=1.25$  において分調波が発生していることがわかる。これは、き裂面の開閉口による非線形波動と 2 つの水平き裂で挟まれた領

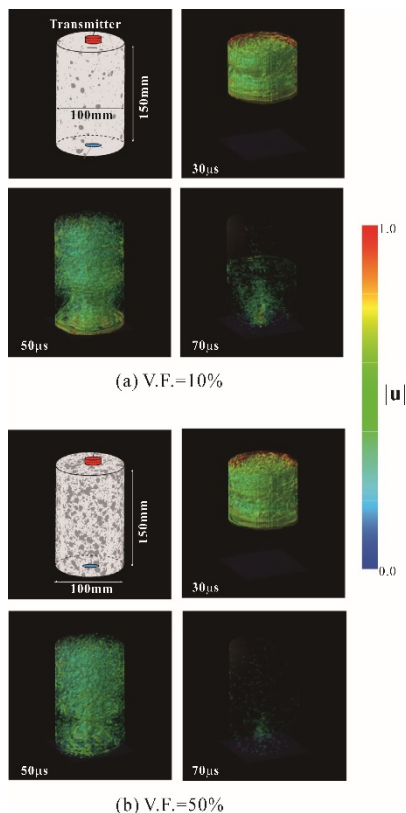


図 1 骨材率(a)V.F.=10%, (b)V.F.= 50%の円柱コンクリート試験体を伝搬する超音波の変位振幅の数値解析結果。

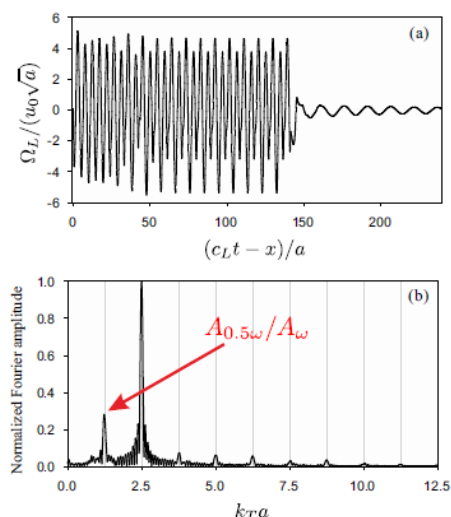


図 2 h=a/2 (2a:き裂長さ)の間隔で上下に隣り合う 2 つの水平き裂に、鉛直下から  $ak_T=2.5$  なる平面縦波が入射したときの遠方散乱縦波の(a)波形と(b)周波数特性。

域での擬似共振現象が相まって発生したもので、2 次元解析によって分調波のシミュレーションに成功した初めての解析例である。

(2)コンクリート材料に適した新しい NDE の開発

コンクリートは非均質材料であるゆえに、散乱減衰が大きく、数百 kHz までの比較的 low 周波の超音波を用いる必要がある。このため本研究では、400kHz を中心周波数とする 24 個の探触子からなるリニアアレイ探触子を試作し、FSAP によって、骨材率 V.F.=10%と 50% の 2 種類のコンクリート試験体の下部にある水平スリットの画像化を試みた。単素子で得られた超音波波形からはスリットによる反射波を確認することは困難であったが、FSAP を適用すれば図 3 に示すようにスリットを明瞭に画像化できることがわかった。なお、FSAP はマトリックスアレイ探触子を用いた 3 次元画像化にも拡張されている【⑦】。

SAFT を原理とする画像化では被検体の速度を仮定して画像化を行う。そのため、横波を用いた画像化では、しばしば縦波によるアーチファクトが混入する。本研究では、FSAP で得られた波形に超音波の近似解を乗算して縦波によるアーチファクトを消去することに成功した【④,⑤】。一例として、図 4(a)に示すように右上に小横穴を持つ円形断面の試験体に対して、試験体上部に設置したアレイ探触子で得られた SAFT 画像を示す。

図 4(b)と(c)は近似解による波形処理の前後の画像である。図 4(b)の中央に示された画像は試験体底面からの反射縦波によるアーチファクトであるが、図 4(c)ではそれが消滅して全体的にノイズが減少していることがわかる。

このように波動解を用いた波形処理によって画像が改善されることがわかった。

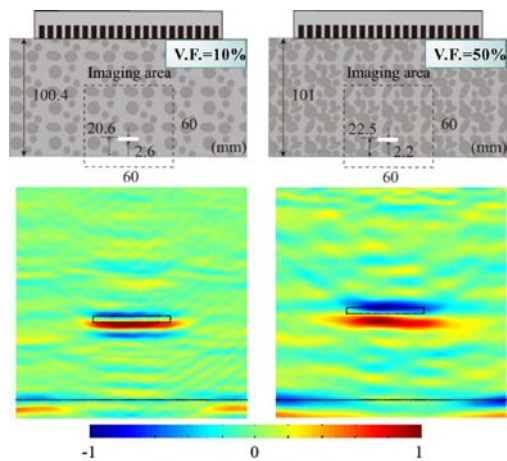


図3 骨材率 V.F.=10%と 50%のコンクリート試験体下部のスリットに対する FSAP による画像。

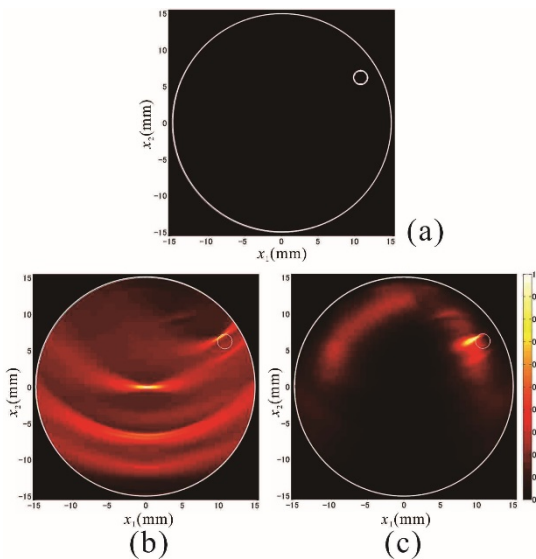


図4 円筒形試験体の小横穴に対する (b)通常の SAFT 画像と近似解による修正を施した SAFT 画像。

### (3)ひび割れ制御機能を有するコンクリート構造物の設計

本研究では、有限要素法(FEM)および剛体バネモデル(RBSM)法を用いて、次のようなコンクリート構造・部材の破壊シミュレーションを行った。①鉄筋コンクリートの3次元破壊シミュレーション、②異形鉄筋周辺の内部ひび割れモードのシミュレーション、③ASRによる損傷を受けた鉄筋コンクリート構造物、④鉄筋腐食した短繊維補強コンクリートのはく落挙動、⑤短繊維の配向に伴う繊維補強セメント系材料の曲げ挙動。これらの内の代表的な解析例を以下に示す。

図5は、せん断補強筋(スターラップ)のないRCはりの4点曲げ試験におけるひび割れ進展挙動をFEMによって解析した結果を示す【2】。ここでは、ひび割れを準脆性材料の破壊力学を考慮した修正 von-Mises 損傷モデルを用いてひずみの局所化で近似しており、

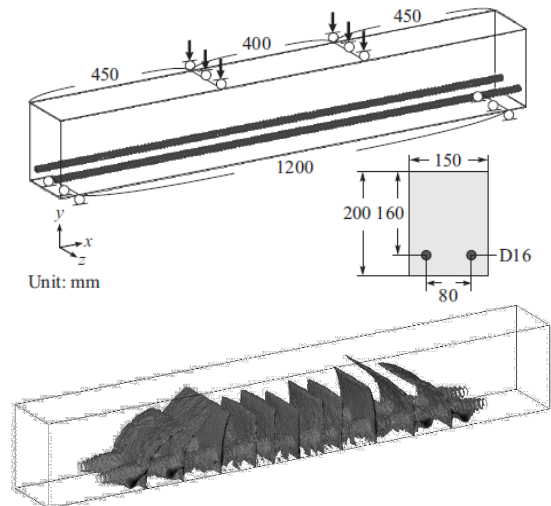


図5 せん断補強筋のないRCはりの4点曲げ試験(上図)におけるひび割れ進展挙動のシミュレーション結果(下図)。

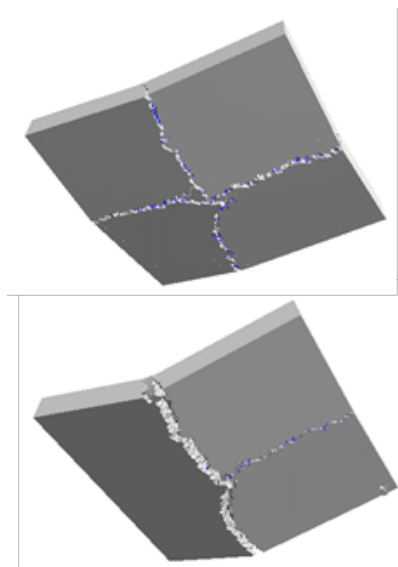


図6 短繊維の配向性(上:ランダムに配向, 下:一方向に規則的に配向)を考慮した繊維補強コンクリート板の曲げ破壊挙動。

ヤング率, ポアソン比, 破壊発生ひずみ, 破壊エネルギー, 圧縮引張強度比といった基本的なコンクリートの材料パラメータのみを用いてコンクリートのひび割れ挙動を定量的に再現できている。

図6は、短繊維補強セメント系材料における短繊維配向性の影響を評価するために、2方向曲げを受ける平板に対して繊維をランダムに配向させた場合と規則的に配向させた場合についてRBSMに基づくメゾスケール解析を行った結果である【13】。繊維の配向性が破壊挙動に大きな影響を与えていることが確認できた。

### (4) コンクリート構造物のモニタリングと予測

非破壊検査は構造物のモニタリングに適し

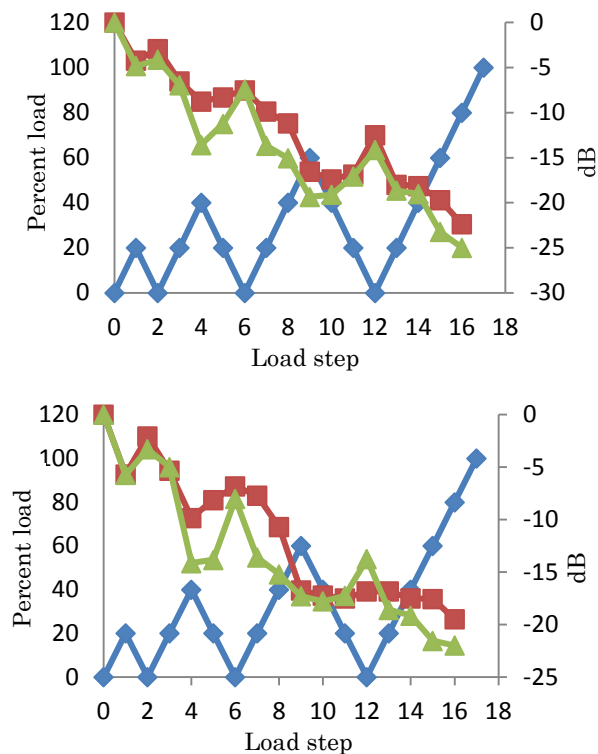


図7 変動荷重下(青線)での2次(上図)及び3次(下図)高調波の平均振幅の変化. 赤線: W/C=60%, 黄緑線: W/C=40%のコンクリートに対する結果.

た手法ともいえる. 例えば, 図7はコンクリート立方体試体の変動荷重の一軸圧縮試験において, 圧縮軸と直角方向に100kHzの中心周波数の超音波を透過させたときの2次(200kHz)及び3次(300kHz)高調波の振幅の変化を示したものである【①】. 漸増する変動荷重の変化に符号して高調波の振幅が変動していることがわかる. したがって, 高調波の振幅の計測によって, 作用する荷重あるいはコンクリートの損傷状態をモニタリングできる可能性を示している.

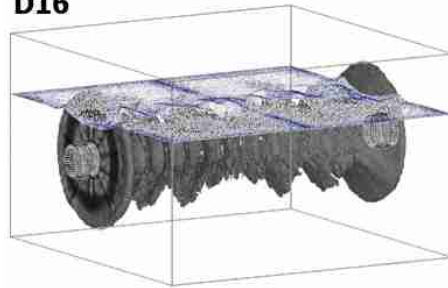
図8は, D16とD25の鉄筋径の異なる2種類の鉄筋コンクリートの鉄筋引張によって生じる内部ひび割れ進展及び内部ひび割れを考慮した塩分移動のシミュレーションを行った結果である【⑧】. 図中の灰色はひび割れの分布を示し, 青色は60日後における塩化物イオン濃度が $0.5\text{kg/m}^3$ の等値面を可視化したものである. 鉄筋径が大きいほど内部の塩分量が大きいなど, 実験結果と合致した結果が得られており, 数値シミュレーションによって物質変動の将来予測の可能性を示すことができた.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 37 件)

- ① J. Maximino C. Ongpeng, A. W. C. Oreta and S. Hirose, Effect of load pattern in the generation of higher harmonic amplitude in concrete using nonlinear ultrasonic test, J. Advanced Concrete Technology, 査読有,

### D16



### D25

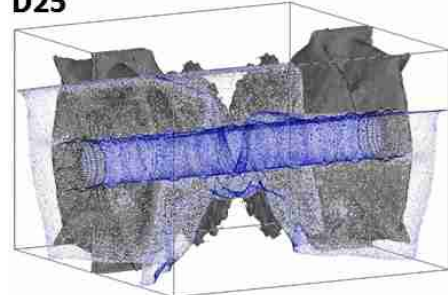


図8 2種類の異なる鉄筋径(D16, D25)の異形鉄筋の引張によって発生する内部ひび割れの分布(灰色)と塩化物イオン濃度の等値面.

Vol.14, 2016, pp.205-214

DOI:10.3151/jact.14.205

- ② 車谷麻緒, 根本優輝, 相馬悠人, 寺田賢二郎, コンクリートの破壊力学を考慮した鉄筋コンクリートの3次元破壊シミュレーションとその性能評価, 日本計算工学会論文集, 査読有, Vol.2016, 2016, p.20160004

DOI:10.11421/jsces.2016.20160004

- ③ 丸山泰蔵, 斎藤隆泰, 廣瀬壮二, 接触条件を考慮したき裂による2次元分調波励起シミュレーション, 土木学会論文集A2(応用力学), 査読有, Vol.71, No.2, 2015, pp.I\_299-I\_310

DOI:10.2208/jscejam.71.I\_299

- ④ Worawit Padungsriborworn, Akira Furukawa, Sohichi Hirose, Improvement of SAFT by Implementation of Approximate Wave Solution in Fluid-Solid Two-Phase Media: A Case Study on Imaging of Aluminum Rod with Side-Drilled Holes, Journal of Nondestructive Evaluation, 査読有, Vol.34: 15, 2015, 13pages

DOI:10.1007/s10921-015-0289-5

- ⑤ Worawit Padungsriborworn, Akira Furukawa, Sohichi Hirose, Applicability of effective region technique in ultrasonic imaging by AWS-SAFT, J. of JSCE, 査読有, Vol.3, 2015, pp.268-281

DOI:10.2208/journalofjsce.3.1\_268

- ⑥ Kazuyuki Nakahata, Gun Kawamura, Tomoyuki Yano, Sohichi Hirose, Three-dimensional numerical modeling of ultrasonic wave propagation in concrete and its experimental validation, Construction and Building Materials, 査読有, Vol.78, 2015, pp.217-223

- DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.049
- ⑦ 中畑和之, 堀口貴志, GPU 計算を実装した全波形サンプリング処理方式による内部欠陥の三次元超音波映像化, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.81(832), 2015, p.15-00471  
DOI:10.1299/transjsme.15-00471
- ⑧ 小林賢司, 車谷麻緒, 岡崎慎一郎, 廣瀬壯二, 破壊力学的損傷を考慮したコンクリート中の物質移動解析手法の開発とその性能評価, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol.71, No.2, 2015, pp.I\_161-I\_170  
DOI:10.2208/jscejam.71.I\_161
- ⑨ 伊藤 始, 渡辺 健, 轟 俊太郎, 高見 涼, 鉄筋腐食した短繊維補強コンクリートのはく落抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.37, No.1, 2015, pp.259-264.
- ⑩ Yuto Ohno and Ken Watanabe, Evaluation of cracking load with considering internal stress caused by shrinkage and creep of mortar, Concreep-10, 査読有, 2015, pp.649-656  
DOI: 10.1061/9780784479346.078
- ⑪ 中畑和之, 矢野智之, 川村郡, 齋藤隆泰, 廣瀬壯二, 骨材による多重散乱を考慮したコンクリート中の超音波の 3 次元伝搬シミュレーションと実験波形による検証, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.70, 2014, pp.I\_203-I\_211  
DOI: 10.2208/jscejam.70.I\_203
- ⑫ 車谷麻緒, 根本優輝, 岡崎慎一郎, 廣瀬壯二, 異形鉄筋周辺のコンクリートに形成する内部ひび割れモードの再現シミュレーション, 日本計算工学会論文集, 査読有, Vol.2014, 2014, p.20140008  
DOI:10.11421/jsces.2014.20140008
- ⑬ 小倉大季, 高橋圭一, 栗田守朗, 短繊維の配向に伴う繊維補強セメント系材料の曲げ特性のばらつき, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.36, 2014, pp.280-285.
- ⑭ 小倉大季, 高橋圭一, 栗田守朗, 国枝稔, 短繊維補強セメント系材料の繊維配向が力学性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.35, 2013, pp.295-300.
- ⑮ 中畑和之, 川村 郡, 岡崎慎一郎, 廣瀬壯二, 低周波アレイ探触子を用いた FSAP 方式によるコンクリート中の空洞欠陥の超音波映像化, 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.105-114.
- ⑯ 小倉大季, 国枝稔, 中村光, 野島昭二, 吉武謙二, 短繊維を離散化したメゾスケール解析による繊維補強コンクリートの剥落挙動解析, 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.417-424.

他 21 編.

[学会発表] (計 97 件)

- ① 中畑和之, 平岡拓也, 金井淳, 廣瀬壯二, メゾスケール構造に着目したコンクリート中の超音波伝搬特性に関する考察, 土木学会 第 70 回年次学術講演会, 2015 年 09 月 16 日~18 日, 岡山大学 (岡山県岡山市)  
他 96 件.

[その他]

ホームページ等

[http://www.cv.titech.ac.jp/~hiro-lab/study/jsps\\_grant/kakenA\\_H24.htm](http://www.cv.titech.ac.jp/~hiro-lab/study/jsps_grant/kakenA_H24.htm)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣瀬 壯一 (Hirose, Sohichi)

東京工業大学・大学院情報理工学研究所・教授

研究者番号 : 00156712

### (2) 研究分担者

齋藤 隆泰 (SAITOH, Takahiro)

群馬大学・大学院理工学府・准教授  
研究者番号 : 00535114

中畑 和之 (NAKAHATA, Kazuyuki)

愛媛大学・理工学研究所・准教授  
研究者番号 : 20380256

車谷 麻緒 (KURUMATANI Mao)

茨城大学・工学部・准教授  
研究者番号 : 20552392

岡崎 慎一郎 (OKAZAKI Shinichiro)

香川大学・工学部・准教授  
研究者番号 : 30510507

渡辺 健 (WATANABE Ken)

公益財団法人鉄道総合技術研究所・構造物技術研究部・副主任研究員  
研究者番号 : 40450746

小倉 大季 (OGURA Hiroki)

清水建設株式会社技術研究所・社会システム技術センター・研究員  
研究者番号 : 50624037

二羽 淳一郎 (NIWA Junichiro)

東京工業大学・大学院理工学研究所・教授  
研究者番号 : 60164638

古川 陽 (FURUKAWA, Akira)

東京工業大学・大学院情報理工学研究所・助教  
研究者番号 : 60724614