

15-NA17

社会インフラの破壊・非破壊シミュレーションの高度化に資する 大規模数値解析

中畑和之（愛媛大学）

コンクリート構造物の老朽化が社会問題となっており、定量的かつ高精度な維持管理技術の構築が望まれている。本課題では、コンクリート部材の劣化・破壊現象の解明から、損傷診断のための非破壊検査手法の構築までを視野に入れた、包括的なモデル化・シミュレーションの開発を目的とする。ここでは、(A) 複合作用下における破壊現象のモデル化とシミュレーションの実施、(B) 非破壊検査のための波動の順解析・逆解析技術の高度化、(C) プログラムチューニングおよび数値データ処理の高度化、の研究を 11 名の研究者が分担して遂行している。コンクリートの劣化予測を考える上で、マルチスケール・マルチフィジクスを包含した有限要素モデルの導入は不可欠であり、さらに非破壊検査は大規模な波動解析を必要とする。本課題では、計算力学、計算機科学だけでなく、実験力学の研究者が連携した分野横断的体制で研究を行っている。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

京都大学

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

本研究は、(A) 複合作用下における破壊現象のモデル化とシミュレーションの実施、(B) 非破壊検査のための波動の順解析・逆解析技術の高度化、を大きな柱とし、研究者が分担して研究を遂行する。また、これらに共通する計算手法、計算機の課題を改善するために、(C) プログラムチューニングおよび数値データ処理の高度化を行っている。(C)は主として、構成拠点である京都大学の研究者が中心となり、(A)と(B)の研究者と連携して取り組む。(A)については、FE 解析、破壊力学および材料力学を専門とする以下の研究者、高瀬、猿渡(東北大)、車谷(茨城大)、牛島・鳥生(京大)が担当する。(B)は波動解析、逆問題および最適化問題を専門とする研究者、京谷・寺田・加藤(東北大)、中畑(愛媛大)、斎藤(群馬大)が担当する。(C)、小山田・深沢(京大)が担当する。

2. 研究の目的と意義

国土交通省によれば、建造後 50 年以上経過した社会基盤インフラストラクチャー（社会インフラ）の割合について、2021 年度には、道路橋で約 28%、河川管理施設で約 40%、海岸岸壁で約 29%になるとの集計結果があり、老朽化に伴う事故が懸念されている。近年の財政事情に鑑み、すべて新設の構造物で補うことは困難である。従って、適切な健全度診断による余寿命の評価と、安全を担保した経済的なリノベーションを図ることが現状の最善策であろう。特に、社会インフラの中でもコンクリート部材は多用されており、これらを非破壊的に検査する方法として、X 線透過試験、赤外線、AE、打音法、衝撃弾性波法、超音波法など多くの手段が提案されている。しかし、コンクリート部材の内部の状態を定量的に検査する決定的な手法は確立されていない。

コンクリート部材に適した非破壊検査技術を開発するには、まず、破壊・劣化現象の把握が必要である。コンクリートは、補強用鉄筋と組み合わせて使用される場合がほとんどで、鉄筋とコンクリートの相互作用下における劣化を考える必要がある。特に、被覆

するコンクリートは健全であっても内部の鉄筋が腐食した事例も多く、この場合の構造部材の余耐力を精度よく予測することが肝要である。また、鉄筋は健全であるが、被覆するコンクリートが劣化している場合もある。例えば、アルカリ骨材反応、中性化、塩害等が有名である。このような場合、内部ひび割れの場合は外側からは見えないため、何らかの方法によってそれを推定することが必要となる。劣化のメカニズムを把握し、プロアクティブな非破壊検査技術を確立することによって効果的な維持管理手法が提案できよう。

本課題では、破壊現象の解明から長期的な劣化予測、さらには損傷度診断のための非破壊検査手法の構築までを視野に入れて、包括的な数値解析・シミュレーションを実施する。適切なモデルの元で将来起こりうる事象を予測し、プロアクティブな維持管理技術を提案することによって、社会インフラの維持管理の高度化に貢献する手法の開発が本研究の最終目的である。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

現在の社会インフラの維持管理は、即時的な対応が主であり、対症療法的であると言わざるを得ない。コンクリートの破壊現象をモデル化し、定量的な非破壊検査へと繋げるためには、上述のように、物理・化学問題を時間・空間のマルチスケールへ拡張した非常に複雑な問題を解くことになる。関連する物理・化学の専門知識が必要となり、関連する研究者が相互連携して研究を行う必要がある。また、劣化のメカニズムを熟知し、プロアクティブな非破壊検査技術を確立するためには、診断・検査を専門とする研究者との知識の共有も必要である。さらに、これらの数理モデリングは必然的に大規模となることは明らかであり、大規模数値解析を効率的に行うためには、計算アルゴリズムの改良や

並列化コードのチューニング、あるいはプリ・ポスト処理の最適化など、ソフト・ハードウェア分野のノウハウも必要である。

これらの技術開発が提示できれば、逆の観点、すなわち、劣化予想箇所にモニタリングセンサを予め設置する、あるいは新設時に維持管理が容易になるような構造設計にする等、土木建設工学における全く新しい維持管理技術を提案できる。症状の発生の原因を調べ、その原因を取り除く療法、すなわち原因療法へと維持管理方針を変えることができる。従って、現在の維持管理計画に大きく貢献するという意味に於いて、本研究の意義は大きい。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

H26 年度 JHPCN 課題「社会インフラの破壊・非破壊シミュレーションの高度化に資する大規模数値解析」に採択して頂いた。以下に、その内容をまとめる。

(1) 物理・化学作用による破壊現象のモデル化とシミュレーションの実施

上述のようにコンクリート部材の劣化は、物理的要因と化学的要因が複雑に連成して生じる。物理的作用によるひび割れ進展を扱うには、コンクリートを非均質材料として捉え、メゾスケールのモデル化が必要である。H26 年度は、実際のコンクリート供試体を対象に、X 線 CT 画像を撮影し、断面画像を重ねることによって 3 次元モデルを作成した。ここでは、拡張ボクセル有限要素法を応用し、 $4 \times 4 \times 4$ ボクセルを 1 ボクセル要素として、 $160 \times 160 \times 160$ ボクセル要素で応力解析を行った。非均質な微視構造を有する材料の応力状態を精度良く表現し、現実的な骨材分布で破壊シミュレーションを行うことができた。

また、空隙およびクラックに浸透する化学物質の流動を精度良く計算するために、多相場モデルに関する検討を行った。3 次元多相場モデルを用いて、コンクリートの亀裂を模

擬した多孔質体内の lock-exchange 問題を 3 次元領域で計算し、亀裂内の浸透流について検討した。間隙に沿った浸透流による熱の移動が確認でき、高温流体が(密度小)が上層を、低温流体(密度大)が下層を進行する過程が再現された。

(2) 非破壊検査の高度化のためのシミュレーションと逆解析技術の開発

超音波アレイ探触子を用いて、きずの位置や形状を 3 次元的に再構成する手法についてシミュレーションを行った。この方法は Delay and Sum 方式による映像化方法であり、動弾性有限積分法(EFIT)を用いて、超音波の受信波を模擬した。アレイ素子の数(100 個)だけ順解析の回数を要する。また、ボクセル数は $1000 \times 1000 \times 750$ (合計 7 億 5000 万)の規模で、3500 ステップの陽的更新を行った。計算時間は、京都大学スパコンシステム A の 4096 並列(Flat MPI)で約 15 分であった。きずを模した 5 つの人工欠陥が再構成できた。

また、粒子フィルタを用いてコンクリート内部の構造同定を行った。粒子フィルタでは、状態量を表す多数の粒子を数値計算し、計測値との尤度に基づいて粒子の生成・消滅を行う。本研究では、コンクリート中の骨材の体積含有率(骨材率)を超音波エコーから推定することを試みた。Intel Xeon Phi コプロセッサを利用した MIC 並列計算を EFIT に導入し、超音波エコー計算を高速化した。粒子フィルタの更新に伴い、平均値が真値に近づくことを示した。

(3) プログラム高度化および数値データの効率的な処理

グループメンバによる対面会議を 1 回開催した。また、拠点側からの技術的なアドバイスによって、(1)有限要素解析の大規模化および高速化、(2)Intel Xeon Phi コプロセッサを用いた波動解析の高速化が可能となった。

(1)の有限要素法は陰的に更新する方法であり、これまで計算効率が芳しくなかった。

H25 年度は、ソルバーを大規模計算用にチューニングすることによって、計算速度が格段に向上したことが特筆すべき成果である。

5. 今年度の研究成果の詳細

(A) 複合作用下における破壊現象のモデル化とシミュレーションの実施(高瀬, 猿渡, 車谷, 牛島, 鳥生)

上述のようにコンクリート部材の劣化は、物理的要因と化学的要因が複雑に連成して生じる。本年度は、鉄筋とコンクリートの複合材料としての破壊モデルを構築し、現実的なサイズで破壊シミュレーションを行う。また、固体中の温度変化に伴う内圧変化によるコンクリートの破壊現象を想定して、圧縮性流体-固体の連成場に対する数値解析手法について検討を行った。

[1] 腐食劣化した鉄筋・鉄骨コンクリート部材の高精度等価フレームモデルの提案

鋼材の腐食を考慮した RC 梁の繰返し載荷 3 点曲げ解析を行った。計算は商用コード (LS-DYNA)を利用した。図 1 に解析モデルを示す。RC 梁はコンクリート及び主鉄筋を SOLID 要素でモデル化し、せん断補強筋は梁要素でモデル化した。有限要素メッシュ数は約 220 万要素となった。鉄筋は応力ひずみ曲線を多点近似によって表現した等方弾塑性体とした。降伏応力 ρ_y は 393MPa, 引張強さ ρ_t は 582MPa である。コンクリートは圧縮強度を元に各パラメータを設定できる連続局面キャップモデルを適用した。コンクリートの圧縮強度 ρ_c は 36MPa とした。

繰返し載荷はモデル中央において強制変位によって行った。鋼材の腐食は主鉄筋の中央部から軸方向両側 175mm の区間を腐食区間とし、腐食による断面欠損割合に応じて断面積を減じることでモデル化を行った。腐食率は 0%, 14%, 24.5%とした。図 2 に変位-荷重曲線、図 3 にひび割れ進展状況を示す。

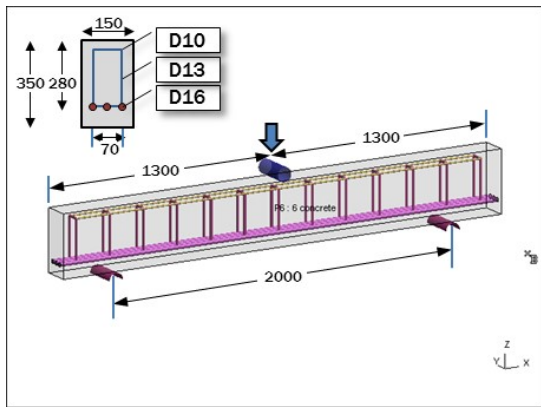


図 1: モデル概略図

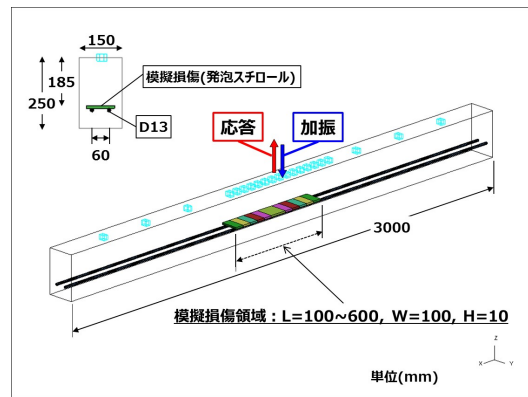


図 4: 強制加振モデル

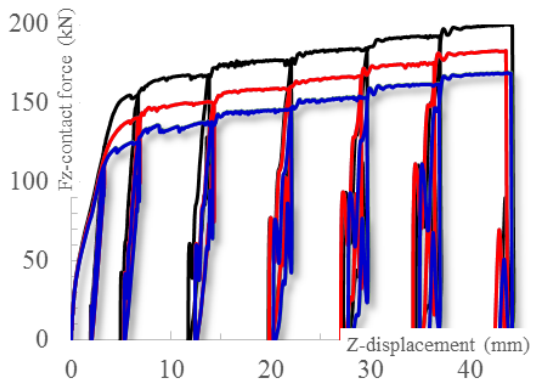


図 2: 変位-荷重曲線

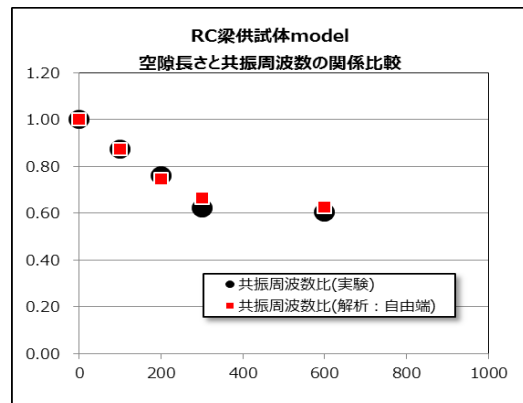


図 5: 横軸: 空隙 (模擬損傷) 長さ, 縦軸: 共振周波数

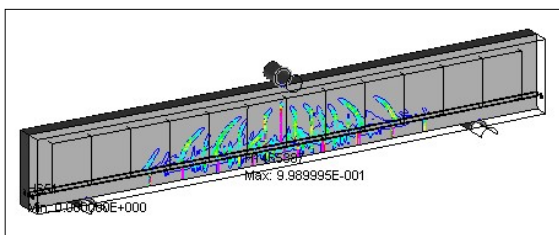


図 3: ひび割れ進展状況

計算時間は 512 並列で 32 時間であった。腐食領域の高精度なモデル化や損傷の詳細な表現にはさらなるモデルの微細化が必要であり、今後並列数の大規模化により解決を図る。

また、模擬損傷を導入した試験体モデルに対する強制加振試験のシミュレーションを行った(図 4)。図 5 に示すように、梁の損傷領域拡大に伴う振動応答の変化を精度よく予測可能であることを確認した。

[2] 鉄筋の弾塑性挙動とそれに起因するコンクリートのひび割れ進展のシミュレーション

鉄筋とコンクリートの非線形力学挙動をモデル化した数値解析手法を用いて、せん断補強筋の異なる RC はりの破壊挙動を 3次元で詳細にシミュレートした。前年度も同じ内容を報告しているが、本年度は実験と詳細な比較を行ったので、それについて述べる。破壊シミュレーションには、鉄筋に von-Mises 塑性モデル、コンクリートに修正 von-Mises 損傷モデルを用いた非線形有限要素法に基づく陰的な解析手法を採用している。鉄筋のヤング率は 200GPa, 初期降伏応力は 380MPa とし、コンクリートのヤング率は 29GPa, 破壊発生ひずみは、2~3 MPa で引張破壊が生じるように定めている。圧縮引張強度比 k は、

損傷モデルにおいて、理想的な一軸引張と一軸圧縮に対する強度比である。理想的な一軸圧縮の要素試験を行うことができれば、円柱供試体の圧縮強度よりも大きな値になる可能性があるため、ここでは、圧縮引張強度比 k を 10 と 20 で設定することとする。破壊シミュレーションに用いる有限要素モデルを図 6 に示す。ここでは、せん断補強筋 10 本の RC モデル(スパン 1200mm)を作成した。各モデルの要素数は、四面体要素を用いて、約 300 万要素である。非線形解析における増分幅がほぼ一致するように、各モデルの強制変位とステップ数を設定し、各モデルで材料パラメータを変えずに破壊シミュレーションを行い、数値解析と実験結果を比較する。

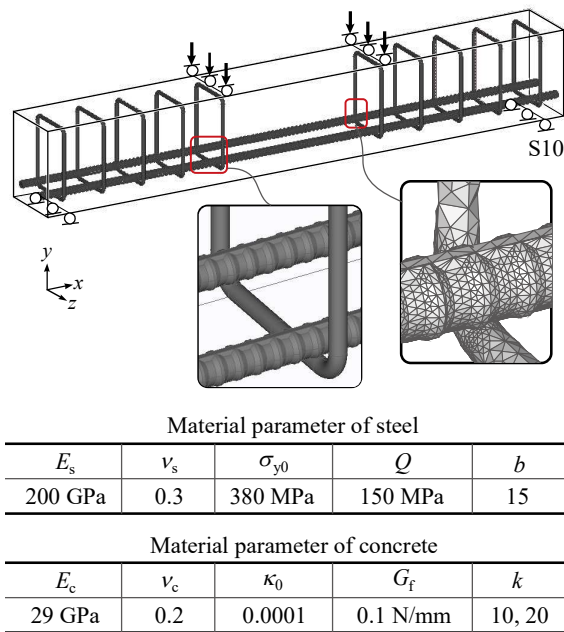


図 6: RC はりの数値モデル

図 7 に、実験と数値解析におけるひび割れ分布の比較を示す。実験結果は、目視で確認されたひび割れの分布である。数値解析の結果は、モデル表面での等価ひずみ分布とモデル内部の損傷変数の分布を示している。本研究では、コンクリートのひび割れを損傷によるひずみの局所化でモデル化しているため、ひずみの分布と損傷変数の分布をひび割れと見なすことができる。解析結果と実験結果

を比較すると、目視で確認されたひび割れの本数や分布を精度よく再現できている。ひび割れの発生パターンに着目すると、最初に曲げひび割れが発生した後、せん断補強筋が少なくなるにつれて、せん断破壊を示す典型的な斜めひび割れに発展する様子がシミュレートされている。

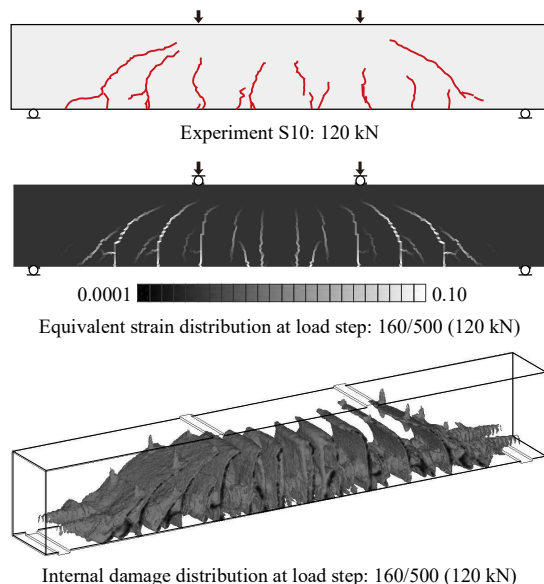


図 7: 実験と数値解析のひび割れ分布の比較

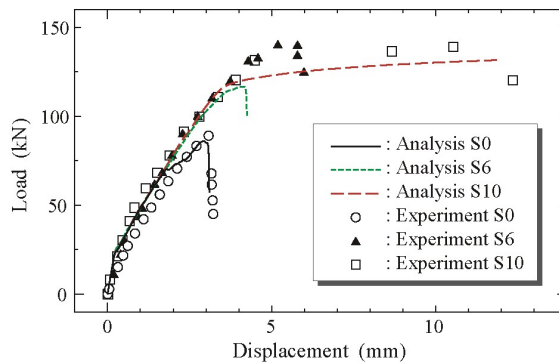


図 8: せん断補強筋 0,6,10 本の RC はりの荷重-変位関係の比較

また、図 8 は、実験と数値解析における荷重-変位関係の比較を示す。ここでは、せん断補強筋が 0 本と 6 本の場合の数値解析も行い、実験結果と比較している。実験結果と数値解析結果ともに、せん断補強筋の数が減るにつれて、延性的な曲げ破壊から脆性的なせん断破壊を示している。材料パラメータを変えずに、せん断補強筋のモデル化の違いのみ

で、数値解析結果は実験結果を定量的に再現できている。

[3] 固体中の温度変化に伴う内圧変化のシミュレーション

2次元の圧縮性流体・固体熱連成計算手法を用いて、温度変化に伴う固体中の空隙における内圧変化の評価シミュレーションを行った。本計算手法では流体の圧縮性が考慮されるため、固体の温度変化によって内部の空隙で生じる圧力変化を適切に計算することが可能である。また、本計算手法では固体と流体間に境界条件を設定する必要がなく、単純な直交構造格子を用いて固体内部の熱伝導と、任意形状の空隙内部における流体の対流を統一的に計算することが可能である。

計算領域を図 9 に示す。図 9 に示されるように、対象とする固体の空隙率は 7.33% である。各空隙については、計算領域を 2.5 [mm] 幅の正方形格子で分割し、各格子内に直径 0.5 ~ 1.0 [mm] の空隙をランダムに配置した (合計 2,048 個)。空隙内の流体は理想気体とし、プラントル数は 0.717, 比熱比は 1.4 とした。固体の熱伝導率は流体の 10 倍とし、その他の物性値については初期状態の流体と同じとした。計算領域の左側面および右側面の温度 T_h , T_c はそれぞれ 500 [K], 300 [K] で一定とし、上部および底部は断熱条件とした。また、計算領域内の初期温度 T_c は 300 [K], 空隙内の初期圧力 P_0 は 1.01325×10^5 [Pa] とした。計算格子数は各方向に 3,200 × 6,400, 並列計算手法として Flat MPI による領域分割法を利用し、並列プロセス数は各方向に 32 × 64 の合計 2,048 並列とした。

図 10 に $0.0 \leq x_1 \leq 1.0$ [mm], $79.0 \leq x_2 \leq 80.0$ [mm] の領域 (図 9 で拡大された領域) における各時刻の等温線を示す。なお、図 10 の点線は流体と固体の境界面を表す。図 10 に示されるように、計算開始と共に左側面で固体が加熱され、領域内の温度が上昇していく状況が確認できる。また、固体の熱伝導率を流体の

10 倍に設定したため、特に $t = 0.012$ [s] (図 10 (a)) から分かるように、固体部分における等温線の間隔は空隙内部に比べて大きくなっており、熱伝導率の差異を反映した妥当な結果が得られたと考えられる。

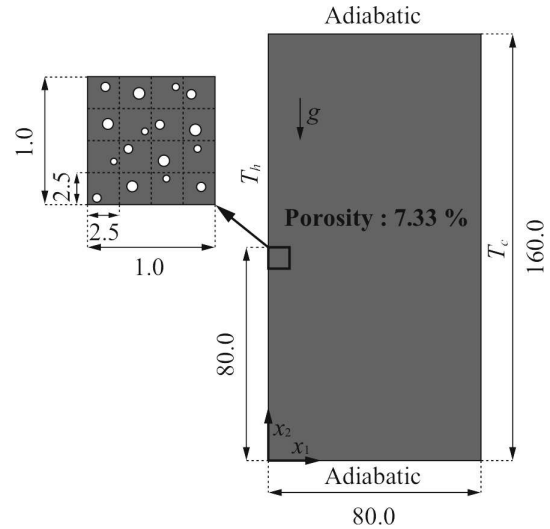


図 9: 計算領域 (長さの単位 : [mm])

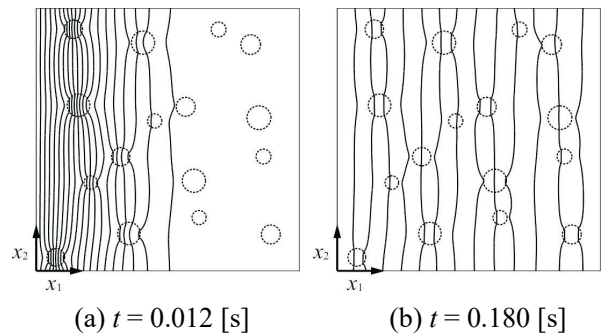


図 10: 各時刻における等温線 (領域: $0.0 \leq x_1 \leq 1.0$ [mm], $79.0 \leq x_2 \leq 80.0$ [mm], 等温線の間隔 : 10 [K])

温度変化に伴う空隙内部の圧力変化を確認するために、計算領域を図 11 のように間隔 2.5 [mm] で x_1 方向に分割し、分割された各領域内の無次元平均温度 T^* , 空隙内の無次元平均圧力 P^* を算出した。なお、 T^* , P^* は、 $T^* = (\bar{T} - T_c) / (T_h - T_c)$, $P^* = (\bar{P} - P_0) / P_0$, と定義される。ここで、 \bar{T} は分割された各領域の平均温度 (単位: [K]), \bar{P} は各領域に含まれる空隙内圧力の平均値 (単位: [Pa]) である。また、 T^* , P^* の定義点は各領域の中心点とした (図 11 の黒丸)。図 12 に $t = 0.18$ [s] における T^* および P^* の水

平方向分布を示す。なお、図 12 において x_1^* は水平方向座標 x_1 を計算領域の水平方向長さ 80 [mm] で無次元化した無次元座標である。図 12 に示されるように、加熱面 ($x_1^* = 0$) 付近では温度、空隙の内圧が共に上昇している。各空隙はそれぞれが完全に閉じており、外部への流体の移動は生じない。したがって、各空隙内部における流体の状態変化は定積変化であり、温度上昇に伴って空隙内部の圧力が上昇するという計算結果は妥当であると考えられる。

以上、本研究では圧縮性流体と固体の熱連成計算手法を用いて、固体を加熱した際に生じる空隙の内圧上昇を計算できることを確認した。

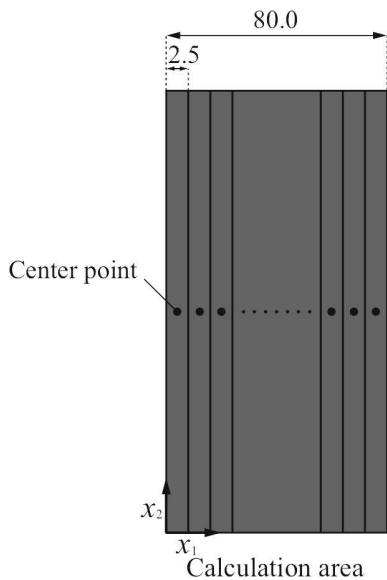


図 11: 一定間隔で x_1 方向に分割された計算領域 (単位: [mm], 各領域の x_1 方向: 2.5 [mm])

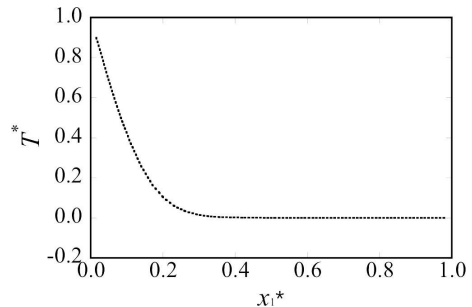
(B) 非破壊検査のための波動の順解析・逆解析技術の高度化 (京谷, 寺田, 加藤, 中畑, 齋藤)

ここでは、コンクリート中の弾性波の伝搬および散乱を模擬するために、Biot モデルを用いた大規模境界要素解析 (順解析) を行った。また、コンクリート中のきずを再構成するためのアレイ映像化 (逆解析) についても検討を行っている。また、コンクリートのある位置における異方性材料剛性から、材料の

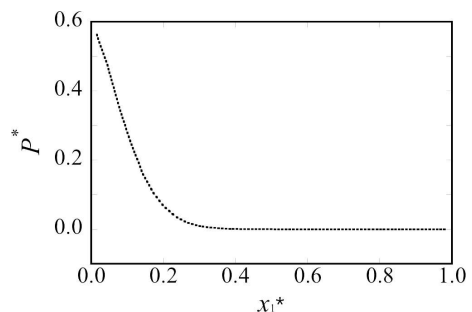
微視構造に内在するマイクロクラックを予測する手法 (逆解析) についても示す。

[1] Biot モデルを用いた波動の散逸を考慮した大規模波動解析

固体中の空隙に流体が飽和した材料の波動伝搬問題は、Biot によりモデル化されており、飽和多孔質弾性波動問題と呼ばれる。飽和多孔質弾性波動問題を波動問題に有効な手法の 1 つである時間領域境界要素法を用いて解析する場合、時間領域境界要素解析に必要な基本解を閉じた形で得ることが難しいという問題点が生じる。そこで、本研究では、時間領域境界要素法の定式化で必須な境界積分方程式に現れる畳み込み積分に、演算子積分法と呼ばれる畳み込み積分の近似解法を適用することで、この問題を解決した。演算子積分法を用いることで、時間領域基本解を直接使用することなく、ラプラス変換域基本解を用いることで、数値解を求めることに成功した。



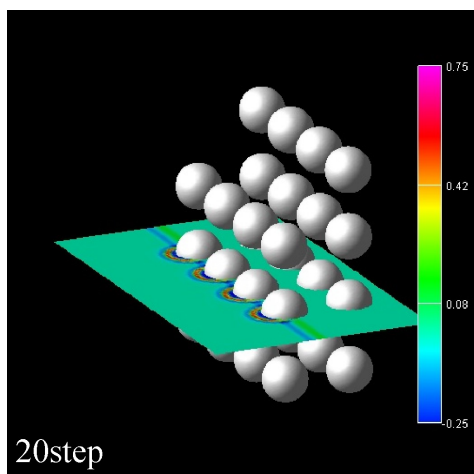
(a) T^* の分布



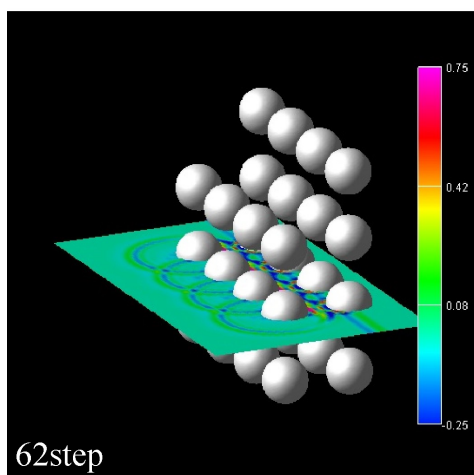
(b) P^* の分布

図 12: x_1 方向に分割された各領域内における T^* および P^* の分布 ($t = 0.18$ [s])

一方、時間領域境界要素法の欠点の 1 つである計算負荷の低減についても検討を行っている。まず、MPI-OpenMP のハイブリッド並列化を開発した手法に適用することで、3 次元飽和多孔質弾性体中に存在する球形空洞による入射波の散乱問題を解析した。解析結果の一部を図 13 に示す。空洞は全部で 28 個であり、1 つの空洞当たり 512 三角形要素で離散化した。また、全時間 step 数は 64 とした。そのため、全自由度は $28 \times 512 \times 4 \times 64 = 3670016$ (空洞数 \times 要素数 \times 1 要素当たりの自由度 \times 全時間 step 数) である。境界要素法を使用しているため、空洞の表面のみを離散化していることに注意されたい。並列化は 1



(a)



(b)

図 13: 飽和多孔質弾性体中の球形空洞による入射縦波の散乱(a)20step, (b)62step における空洞周辺の変位場

ノードに 1MPI プロセスを割当て、合計 64 ノード使用し、1 ノード当たり 32OpenMP スレッドで並列化を実行している。図 13(a)より入射縦波が先頭列の球形空洞により散乱され、図 13(b)より 2 列目の空洞にも散乱されている様子を見て取れる。なお、この場合の境界要素解析に要した計算時間(内点計算を除く)はおよそ 1.7 時間だった。現在は、さらなる高速化を目指し、高速多重極法を適用することを行っている。

[2] 全波形サンプリング処理によるコンクリートの内部鉄筋・空隙の再構成

超音波アレイ探触子を用いて、きずの位置や形状を 3 次元的に再構成する手法について検討を行った。再構成原理は、全波形サンプリング処理方式(FSAP 方式)をベースとしており、平面アレイ状に配列した素子で得られる散乱波を基に、散乱体(きずや鉄筋)を再構成する手法である。ここでは、動弾性有限積分法(EFIT)を用いて、シミュレーションで生成した波動から、コンクリート中の鉄筋の形状を再構成する。FSAP 方式では、アレイの素子数分、超音波の送受信をする必要があり、EFIT のシミュレーションを繰り返す。

図 14 に示すように、 $500 \times 500 \times 350$ [mm]のコンクリートの上部にマトリクスアレイ探触子($16 \times 16 = 256$ 素子, 素子ピッチ 14mm)の設置を想定する。この数値モデルのボクセル数は $1000 \times 1000 \times 700$ (合計 7 億)である。モデル内には直径 20 mm の鉄筋が深さ方向に平行に 5 つ存在する。数値解析では、探触子が接触するボクセルの垂直応力グリッドを、200kHz の入射波形で励起することで超音波を発生させている。EFIT は、3600 ステップの陽的更新を行う。

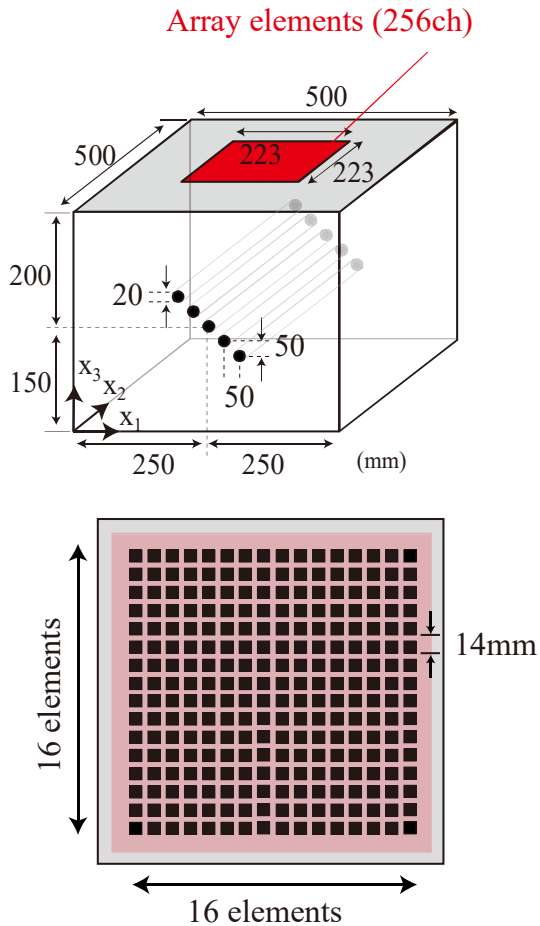


図 14: 3次元コンクリートモデル(上)とマトリクスアレイ探触子のモデル(下)

ある 1 素子から超音波を送信し、各素子で散乱波を受信する。送信素子を変えながら、これを繰り返して、計 256 素子×256 素子の組み合わせの散乱波形を得る。この波形を FSAP 方式に入力し、開口合成処理を行うことで、鉄筋の形状を再現した結果を図 15 に示す。図 15 の断面図からも、5 つの鉄筋は識別できることがわかるが、コンクリート境界面付近の鉄筋は再構成されていない。これは、マトリクスアレイ探触子から発振した超音波ビームが、鉄筋に鋭角で入射するために、探触子への反射波が小さくなるためである。

京都大学スパコンシステム A の 2048 並列 (Flat MPI) では約 25 分を要した。従って 256 素子すべての波形を得るのに 256 シミュレーション、計 107 時間程度を要した。

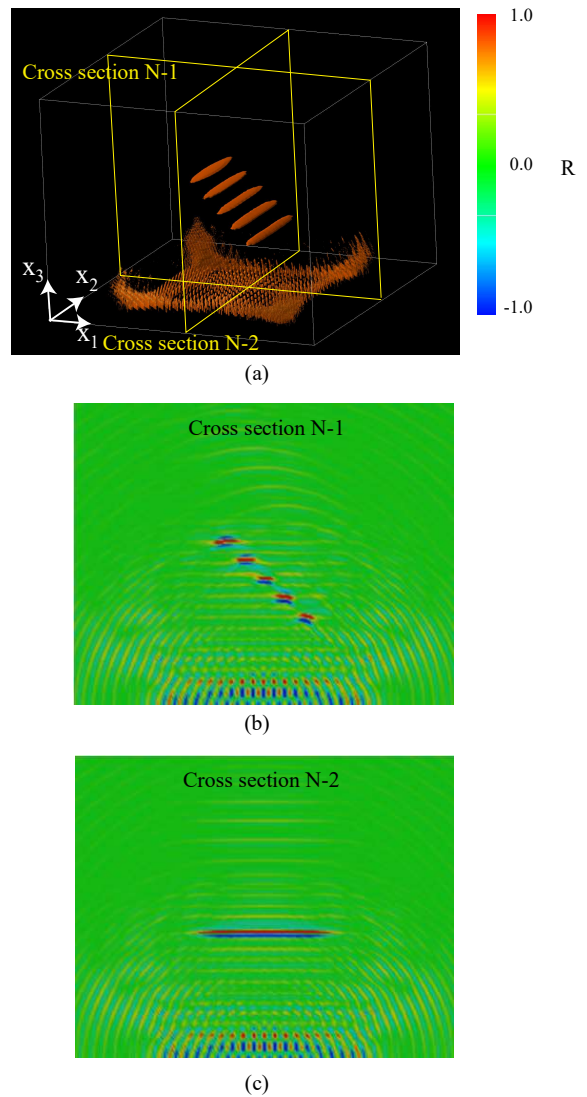


図 15: 5 つの鉄筋の再構成シミュレーション, (a) 等値面, (b)と(c)断面表示

[3] 有限要素法を用いた逆均質化法による内部ひび割れ分布の同定

劣化の主な要因であるひび割れが発現する初期段階にはマイクロクラックという状態があり、将来的な構造物の劣化を引き起こす要因となるため、早期発見が重要である。ここでは、コンクリート材料のある位置におけるマクロ的な異方性材料剛性（観測剛性 D^* ）が既知である仮定とした場合に、その材料微視構造に内在するマイクロクラックの劣化状況を予測するトポロジー最適化手法を開発し、数値シミュレーションを実施した。解析には京都大学スパコンシステム A を用いた。材料微細構造は周期境界を有し、材料

はコンクリートを想定してヤング率 25 [GPa], ポアソン比 0.167 とした. このシミュレーションでは, 一方向の単純なマイクロクラックを対象にひび割れ角度 $\theta = 0, 30, 45, 120, 135^\circ$ の 5 ケースについて同定を行った. 同定精度の検証が目的であるため, ターゲットとなる観測剛性 D^* については, 図 16 に示す 5 つのマイクロクラック分布を準備し, それぞれの観測剛性 D^* を均質化法によって求め, これを所与として扱うものとした.

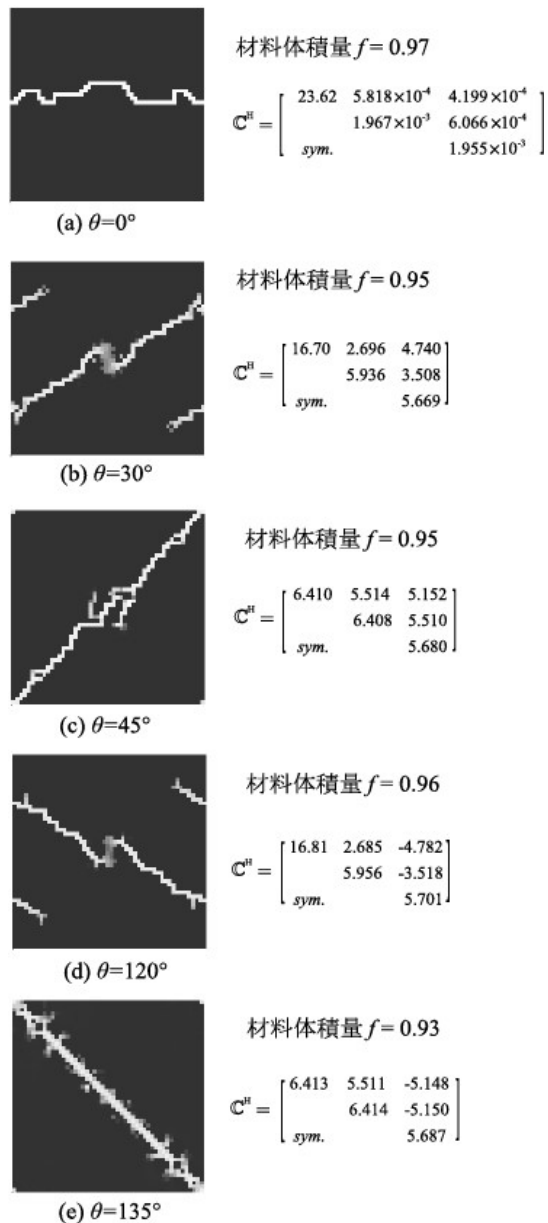


図 16 : 所与のクラック分布と観測剛性

図 17 は, その同定結果である. また, f は目的関数値である材料体積量を正規化した

もので, $f=1$ のときはマイクロクラックの存在しない健全な状態を意味する. まず, 図 17 の $\theta = 30^\circ, 45^\circ$ の同定結果について観察する. 同定によって得られた均質化材料剛性 C^H は, いずれの成分も観測剛性 D^* のそれと非常に近い値となっており, 高精度で同定されたことが確認できる. また, 得られたトポロジーを見ても, いずれもマイクロクラックの方向は再現できているといえる. ちなみに当該同定問題は, 一意に解が求まらない逆問題を扱っているため, 例え数値的な同定精度が高くても様々なクラック分布が解として得られることは分かっている.

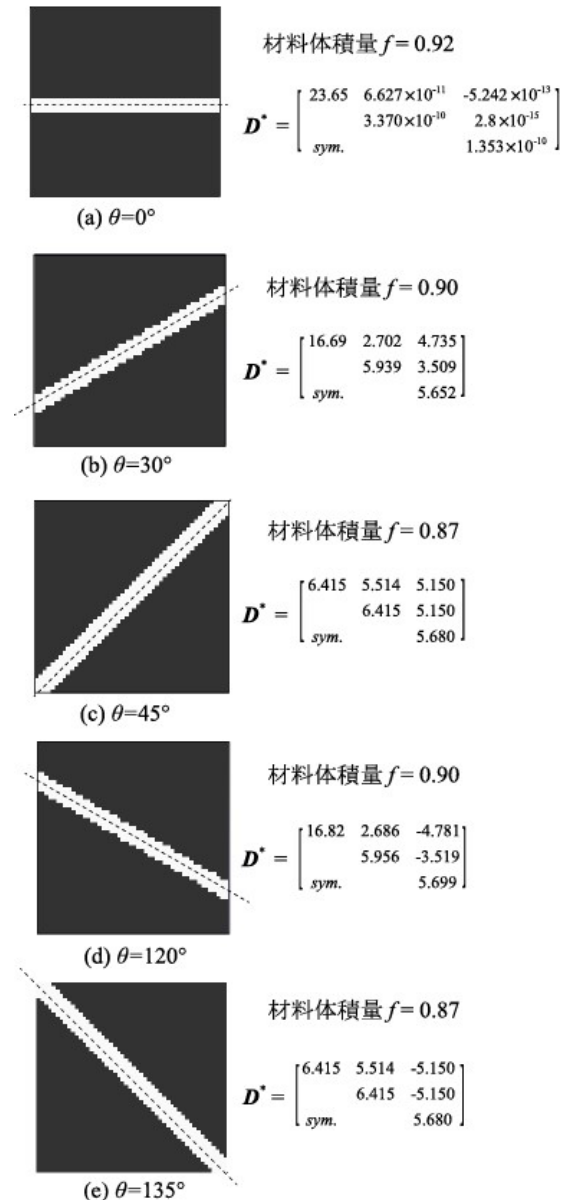


図 17 : 同定されたクラック分布と均質化剛性

次に、 $\theta=120^\circ$ 、 135° について同定を行った結果を考察する。左右対称となる $\theta=120^\circ$ と $\theta=30^\circ$ 、あるいは $\theta=135^\circ$ と $\theta=45^\circ$ の観測剛性および均質化剛性の成分をそれぞれ比較すると、(1, 3)成分と(2, 3)成分の符号が異なっているだけで、その成分の大きさはほぼ同じとなっていることが分かる。これは、力学的にも正しいもので均質化解析の妥当性と同定精度の高さを裏付けるものであると言える。その結果、 $\theta=120^\circ$ 、 135° のマイクロクラック分布も所与の角度を再現できていると言える。一方、 $\theta=0^\circ$ の同定結果をみると、得られたマイクロクラック分布の方向は再現できているといえるが、材料剛性の同定精度については他の 4 ケースの結果と比べてやや慎重に観察する必要がある。具体的には、均質化剛性 C^H の(1, 1)成分は、観測剛性 D^* のそれに対し精度よく同定できているが、その他の成分はそもそも観測剛性 D^* の成分が小さ過ぎるため、十分零に近い数値を示せたものの、所与の値のオーダー（桁数）に対してはやや隔たりがあるように思える。これは、観測剛性 D^* の(2, 2)成分が極めて小さい、すなわち、ひび割れに対して垂直である鉛直方向に対して力学的にほとんど剛性がないような極限的な状態を数値材料試験で同定しようとしているので、この結果に対する見解としては、同定精度が悪化したというよりも数値的に限界の状態を表している。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

(A) 合作用下における破壊現象のモデル化とシミュレーションの実施

[1] 今後、載荷試験により損傷を導入した実機試験結果のシミュレーションを行い、試験結果と比較することで、RC 構造物の破壊現象及びその評価手法の精度を確認する。また、腐食鉄筋の膨張など、コンクリートと鉄筋の相互作用について現実的なモデル化を取り入れていきたい。

[2] 鉄筋コンクリートの大規模有限要素モデルを作成し、鉄筋の塑性変形とコンクリートのひび割れ進展挙動をそれぞれ解析することで、鉄筋コンクリートの破壊挙動を 3 次元で詳細に再現することを予定している。

[3] 今年度は、圧縮性流体と固体の熱連成計算手法を用いて、固体を加熱した際に生じる空隙の内圧上昇を計算できることを確認した。今後は、鉄筋の有無など、内部の構造が温度や空隙の圧力上昇に与える影響について検討していく予定である。

(B) 非破壊検査のための波動の順解析・逆解析技術の高度化

[1] MPI-OpenMP を用いたハードウェアによる高速化のみならず、高速畳み込み演算を用いた時間方向の高速化、積分核に依存しない高速多重極法を用いた空間方向の高速化実現についても検討していく。

[2] 骨材による波動減衰を考慮したシミュレーションへの拡張を行いたい。また、コンクリート用のリニアアレイ探触子を試作しており、このシミュレーション結果と実験結果を比較する予定である。

[3] については、これまで一方向のマイクロクラックという単純なモデルを対象としていたがマイクロクラックが途中で分岐するような複雑なモデルに対して、どの程度の精度が得られるか、またその精度を担保するための手法の開発と大規模計算にチャレンジしていく。

(C) プログラムチューニングおよび数値データ処理の高度化

拠点側からの技術的なアドバイスによって、(A)の有限要素解析の大規模化および高速化に取り組んだ。今後は、チューニングしたコードを用いて大規模な計算にチャレンジしていく予定である。他の問題における大規模計算の効率化についても継続的に議論を行っていく予定である。

以上より、本年度は(A)、(B)、(C)について、

個々の研究者が独立した成果を上げている。個々の研究は予定通り遂行されているが、いずれは(A)で予測した破壊モデルを用いて(B)で非破壊検査シミュレーションを行う等、(A)と(B)を有機的に連携していくことを予定している。そのためにはより大きな計算スケールとなると予想されるが、現在の計算機資源で効率的な計算を行えるよう(C)との連携も図りたい。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. K. Nakahata, S. Tokumasu, A. Sakai, Y. Iwata, K. Ohira, Y. Ogura, High-speed ultrasonic imaging using scattering amplitude with a flexible array transducer, *NDT & E International*, Vol.82, pp.13-25, 2016.
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*, Vol.2016, pp.20160004, 2016.
3. 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*, Vol.81, No.832, 15-00471, 2015.
4. A. Ibrahim, A. Zabri, K. Nakahata, Identification of elastic parameters of an inclusion by a particle filter using ultrasonic waves, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol.10, No.1, Article 23, DOI:10.1186/s40712-015-0050-y, 2015.
5. 丸山泰蔵, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一, 時間方向に高速化された 3 次元音響波動問題に対する CQ-BEM, *計算数理工学論文集*, Vol.15, 12-151204, 2015.
6. 車谷麻緒, 川瀬晴香, 拡張ボクセル有限要素法の開発とその性能評価, *日本計算工学会論文集*, Vol.2015, pp.20150011, 2015.
7. 小林賢司, 車谷麻緒, 岡崎慎一郎, 廣瀬壮一,

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)*, Vol.71, No.2, pp.I_161-I_170, 2015.

8. M. Kurumatani, K. Terada, J. Kato, T. Kyoya, K. Kashiyama, An isotropic damage model based on fracture mechanics for concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.155, pp.49-66, 2016.

(2) 国際会議プロシーディングス

9. D. Toriu, S. Ushijima, Application of computational method for thermal interactions between compressible fluids and solids to natural convection around circular cylinders, *WCCM&APCOM 2016*, Seoul, Korea, 2016.(掲載予定)

(3) 国際会議発表

10. T. Saitoh, M. Shimoda, A. Furukawa and S. Hirose, Fast multipole boundary element method for elastic wave scattering in 2-D anisotropic solids, 6th International conference on computational methods (ICCM2015), Pullman Hotel, Auckland, New Zealand, 2015.
11. A. Furukawa, T. Saitoh and S. Hirose: A boundary element method for wave scattering in fluid-saturated porous rocks, BEM/MRM38, EM/MRM38, Balmer Lawn Hotel, New Forest, England, 2015.
12. M. Kurumatani, S. Abe, Y. Nemoto, Y. Soma, N. Henmi, A method for fracture simulation of concrete using an isotropic damage model, 13th US National Congress on Computational Mechanics, 2015.
13. M. Kurumatani, S. Abe, Y. Nemoto, Y. Soma, N. Henmi, A method for fracture simulation of reinforced concrete using a damage model based on fracture mechanics for concrete, 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics, 2015.

(4) 国内会議発表

14. 中野葵, 車谷麻緒, 鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション結果の可視化方法に関する研究, 第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会, CD-ROM, 2016.
15. 相馬悠人, 阿部俊逸, 車谷麻緒, 幾何学的非線形性を考慮した損傷モデルと塑性モデルによる鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション, 第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会, CD-ROM, 2016.
16. 星裕斗, 相馬悠人, 車谷麻緒, 鉄筋の幾何形状を考慮した RC はりの 3 次元破壊シミュレーションに関する研究, 第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会, CD-ROM, 2016.
17. 小塚祐輔, 邊見哲一, 車谷麻緒, 画像計測と数値解析による RC はりの破壊進展挙動の比較考察, 第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会, CD-ROM, 2016.
18. 安藏尚, 小林賢司, 車谷麻緒, 岡崎慎一郎, 内部ひび割れを考慮した鉄筋コンクリート中の塩化物イオン濃度の定量的予測手法に関する研究, 第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会, CD-ROM, 2016.
19. 邊見哲一, 車谷麻緒, 画像解析を用いた RC はりに発生する内部ひび割れ進展挙動の計測, 第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会, CD-ROM, 2016.
20. A. Zabri, K. Nakahata, Study on identification of wave velocity and density of defect using particle filter, 土木学会第 70 回年次学術講演会, CD-ROM, 2015.
21. 岸岡大樹, 中畑和之, 清 良平, 無指向型アレイアンテナを用いた電磁波レーダ法による鉄筋再構成, 土木学会第 70 回年次学術講演会, CD-ROM, 2015.
22. 泉英輝, 堀口貴志, 中畑和之, アレイ映像化のための全波形サンプリング処理方式の性能検証, 土木学会第 70 回年次学術講演会, CD-ROM, 2015.
23. 中畑和之, 平岡拓也, 金井淳, 廣瀬壮一, 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, CD-ROM, 2015.
24. 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一, 周波数領域境界要素法を用いた異方性飽和多孔質弾性体の 3 次元波動散乱解析, 土木学会第 70 回年次学術講演会, CD-ROM, 2015.
25. 丸山泰蔵, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一, 3 次元音響波動問題に対する CQ-FMBEM の時間方向の高速化について, 土木学会第 70 回年次学術講演会, CD-ROM, 2015.
26. 相馬悠人, 根本優輝, 車谷麻緒, 損傷モデルと塑性モデルを用いた RC はりの 3 次元破壊シミュレーション, 土木学会第 70 回年次学術講演会, CD-ROM, 2015.
27. 邊見哲一, 車谷麻緒, 実験・計測・解析による RC はりの破壊力学挙動評価に関する基礎的研究, 土木学会第 70 回年次学術講演会 CD-ROM, 2015.
28. 車谷麻緒, 小林賢司, 岡崎慎一郎, 損傷モデルを用い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, 土木学会第 70 回年次学術講演会, CD-ROM, 2015.
29. 加藤準治, 河西亮輔, 京谷孝史, 寺田賢二郎, 逆均質化法を用いた微細亀裂分布の同定, 土木学会第 18 回応用力学シンポジウム講演概要集, CD-ROM, 2015.
30. 根本優輝, 相馬悠人, 車谷麻緒, 鉄筋コンクリートの非線形有限要素解析とその V&V, 第 20 回計算工学講演会, CD-ROM, 2015.
31. 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一, 異方性飽和多孔質弾性体の 3 次元波動問題に対する境界要素法, 第 20 回計算工学講演会, CD-ROM, 2015.
32. 小林賢司, 車谷麻緒, 岡崎慎一郎, 損傷モデルを用いた損傷後の鉄筋コンクリート中の物質移動解析, 第 20 回計算工学講演会, CD-ROM, 2015.
33. 阿部俊逸, 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 幾何学

的非線形性を考慮した準脆性材料の損傷解析,
第 20 回計算工学講演会, CD-ROM, 2015.

34. 相馬悠人, 根本優輝, 車谷麻緒, 損傷モデルと弾塑性モデルを用いた鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション, 第 20 回計算工学講演会, CD-ROM, 2015.

35. 邊見哲一, 根本忍, 車谷麻緒, 画像解析を用いたコンクリートの破壊シミュレーションの V&V, 第 20 回計算工学講演会, CD-ROM, 2015.

36. 車谷麻緒, 川瀬晴香, 非均質構造解析のための拡張ボクセル有限要素法, 第 20 回計算工学講演会, CD-ROM, 2015.

37. 番場良平, 新宅勇一, 村松眞由, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 堤成一郎, 地震荷重を受ける鋼製橋脚のき裂進展評価, 第 20 回計算工学講演会, CD-ROM, 2015.

38. 新宅勇一, 村松眞由, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 堤成一郎, 車谷麻緒, 有限被覆法による自動き裂進展解析, 第 20 回計算工学講演会, CD-ROM, 2015.

39. 新宅勇一, 村松眞由, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 堤成一郎, 埋込型結合力モデルを導入した損傷構成則, 第 20 回計算工学講演会, CD-ROM, 2015.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

なし