

jh140005

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）

社会インフラの経年劣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、コンクリート構造部材の劣化・破壊現象の解明、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)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、(B)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、(C)プログラム高度化および数値データの処理、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、さらに非破壊検査には大規模な波動解析が必要となる。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)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、(B)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。これは主として、構成拠点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、浅井(九大)、車谷(茨城大)、永井(岐阜大)、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以下の研究者、京谷・寺田・加藤(東

北大)、中畑(愛媛大)が担当する。(C)については、小山田(京大)・岩下(北大)が担当する。

2. 研究の目的と意義

平成 24 年の年末に発生した中央道の笹山トンネル崩落事故で複数の犠牲者が出たことは記憶に新しく、経年劣化が進む社会基盤インフラストラクチャー(以下、社会インフラ)の維持管理技術の構築は、産官学が連携して取り組むべき焦眉の事項である。劣化が懸念されるインフラの数は膨大であり、近年の財政事情に鑑みて、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、それによる安全を担保しつつ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。準脆性材料であるコンクリートの非弾性

挙動は、引張下のひび割れに支配されるといっても過言ではない。コンクリートは引っ張りに対する抵抗力は圧縮強度に比べて 1/10 程度しかなく、破壊時にはマクロなひび割れが発生する。マクロひび割れに成長するまでに、ミクロひび割れの発生・進展があり、それはセメント硬化体の微細構造の影響を受ける。つまり、セメント硬化体の微視的ひび割れ挙動から、完全なひび割れに至るまでのマルチスケールでのモデル化が必要となる。また、コンクリートは化学的水和反応によって硬化し、強度を発現するものである。逆に、供用中の化学的な作用も劣化・損傷に影響を与える。つまり、コンクリートの劣化は、物理的・化学的視点から考える必要があり、空間スケールは数十 cm から数メートル以上、時間スケールは数十年から 100 年以上という大きさを考えなければならない。以上のように、マルチスケール・マルチフィジクスをコンクリートの数理モデルに導入することは、劣化予測を考える上で非常に意義があるものであり、これによって、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

上述のように物理的な外因だけでなく、化学的な作用によっても劣化は進行するため、関連する物理・化学を専門とする研究者が集まり、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認するためには、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・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。このように、構造物の破壊のモデル化と非破壊検査技術の向上に資する大規模数値解析を実施するには、実験力学、計算力学、計算機科学の 3 つの柱が連携する体制が不可欠である。従って、本研究は分野横断的な研究・協力体制を形成するための最適な機会でもある。本研究の研究体制や実施内容の意義は非常に大きく、土木建設工学の将来のために非常に有用な研究と位置づけられる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

H25 年度 JHPCN 課題「構造物の劣化のモデル化とメンテナンス技術の向上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) 劣化メカニズム解明のための数値解析

物理的要因による鉄筋コンクリートの破壊や劣化のメカニズムを考察するために、異形鉄筋の節を考慮した詳細な鉄筋コンクリート部材の有限要素モデルを作成し、開発したプログラムを用いて、引っ張り試験のシミュレーションを実施した。既往の実験で観察されている節からコーン状に伸びるき裂(Goto クラック)が模擬できた。

また、化学的作用による劣化の 1 つであるアルカリ骨材反応のモデル化を行った。非定常拡散解析と内在物膨張に伴う不連続面進展解析とを組み合わせた連成解析手法を開発し、内部膨張により不連続面が進展する様子を解析した。損傷モデルを導入した連成解析手法では、損傷部分の剛性を段階的に減少させることで、モルタル部分にも損傷が段階的に進展する様子を再現することが可能となった。

(2) プロアクティブなメンテナンスに資する数値解析

コンクリート中を伝搬する超音波をイメージベース波動伝搬解析でモデル化し、その妥当性について計測実験で得られた結果と比較を行った。

骨材の含有率の増加に伴う、音速上昇、高周波成分の減衰について、実験と解析は定量的に一致した。本解析法のモデル化精度は十分であることを示した。

また、鉄筋検査を意図した電磁波レーダ法について、イメージベース波動伝搬解析によってモデル化およびシミュレーションを行った。電磁波の大規模波動伝搬解析が実用的な時間で実施できることを示した。

(3) プログラム高度化および数値データの効率的な処理

プログラムの高度化および数値データのハンドリング方法について、拠点大学の研究者を交えて 3 回会合が行われた。大規模計算時のジョブスケジューリングや問題点などを報告した。さらに、拠点大学の研究者から、大規模データの扱いや、プログラムチューニング等に関するアドバイスを受けた。(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)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(浅井, 車谷, 永井, 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。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。本年度は、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ために、有限要素法の高度化を行った。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。さらに、力学的負荷が作用している状態での、鉄筋コンクリートの破壊シミュレーションを行った。H26 年度は MPI 並列を導入し、

将来により大きなモデルサイズを扱うための基礎的検討を行った。

[1]コンクリート中の力学的負荷状態を模擬するための有限要素モデリング

コンクリートのような非常に複雑で非均質な微視構造を有する材料の応力解析を行うために、従来のボクセル有限要素法の問題点を改善させた拡張ボクセル有限要素法を開発した。この方法は、拡張有限要素法 (X-FEM) で用いられるエンリッチメントという近似を応用した方法であり、有限要素内部に材料界面を考慮することができ、界面の幾何形状に沿ったメッシュ生成を行う必要がないので、メッシュフリー的な解析が可能である。界面での応力の精度も良好であることを確認している。この方法を用いて、実際のコンクリートの微視構造の応力解析を行った。

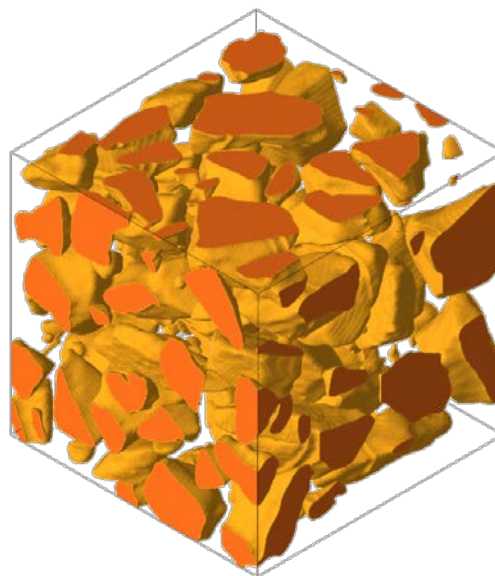


図-1 コンクリートの微視構造モデル

図-1 に、モルタルと粗骨材の 2 相構造からなるコンクリートの微視構造モデルを示す。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ている。ボクセル数は 640x640x640 である。本研究で開発した拡張ボクセル有限要素法では、4x4x4 ボクセルを 1 ボクセル要素として、160x160x160 ボクセル要素で応力解析を行う。材

料パラメータは、モルタルのヤング率を 20 GPa、ポアソン比を 0.2、粗骨材のヤング率を 50 GPa、ポアソン比を 0.2 とし、上下方向に引張の強制変位を与えて、応力解析を行う。

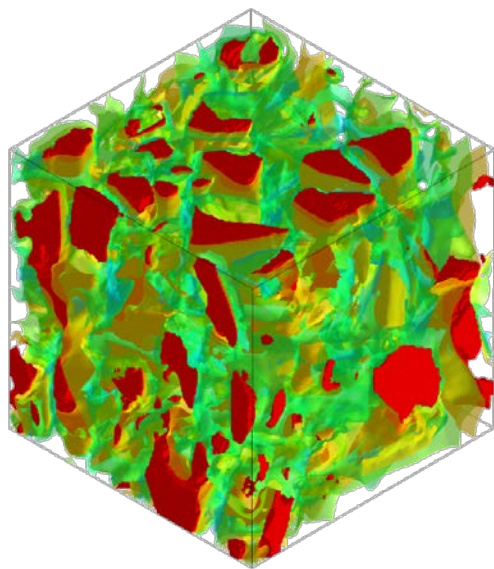


図-2 コンクリート内部の応力分布

図-2 に、モデル内部の最大主応力分布を可視化した結果を示す。ヤング率の大きい粗骨材が高い応力を受け持つ様子が適切に再現されており、モルタルと粗骨材からなるコンクリートの 2 相構造における複雑な応力分布を可視化することができている。従来のボクセル有限要素法では、材料界面をジグザグにモデル化するため、界面に不自然な応力集中や応力振動が発生することが知られている。図-2 の結果はボクセル要素のみを用いて解析した結果であるが、従来法のような応力の精度の低下は見られないことが分かる。以上より、本研究で開発した拡張ボクセル有限要素法は、従来法よりも精度のよい解析が行え、また幾何形状のモデルがあればコンクリートのような非常に複雑な微視構造の解析をメッシュフリー的に行える方法である。

計算には、32 コアのスレッド並列のみを使用した。計算時間は約 40 分、使用メモリは 30 GB であった。これよりも大きな計算を行うことは理論上可能であるが、コンクリートモデルを作成する

上で、X 線 CT 画像の撮影範囲や画素数に制約があるので、本年度はこの計算規模にとどめた。

[2] コンクリート中の化学物質の流動を模擬するための多相場モデルの検討

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 問題を計算し、亀裂内の浸透流について検討した。今回、熱伝導解析としたが、これはラプラス方程式であるので、化学物質の移動/拡散に容易に拡張できる。並列化手法としては、Flat MPI による 3次元領域分割法を用いた。計算対象とする多孔質体を図-3 に示す。計算領域の各方向(x_1 , x_2 , x_3)の長さは 0.64m, 0.08m, 0.32m であり、この領域内に直径 0.01m の球を各方向に 64×8×32 個 (計 16,384 個) 充填する。多孔質体は石灰岩コンクリートを仮定し、間隙はすべて水で満たされているとする。今回、流体の密度差は温度差によって与え、 $x_1 < 0.32\text{m}$ は低温領域、 $x_1 > 0.32\text{m}$ は高温領域とし、その温度差は 10K とした。なお、本解析手法では、固体内部の熱伝導も考慮される。流体計算格子数は各方向に 640×80×320(合計 16,384,000)、並列数は 32×8×16(合計 4,096 並列)とした。

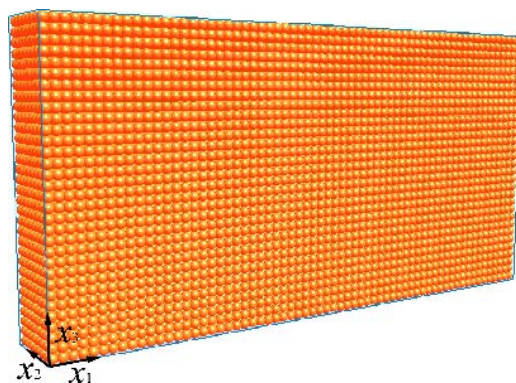
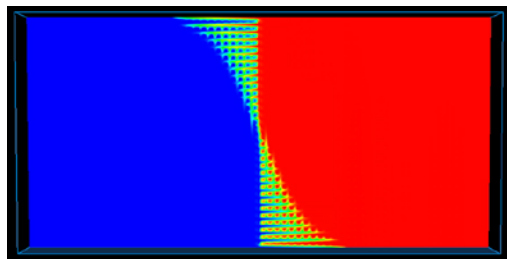


図-3 多孔質体の数値モデル

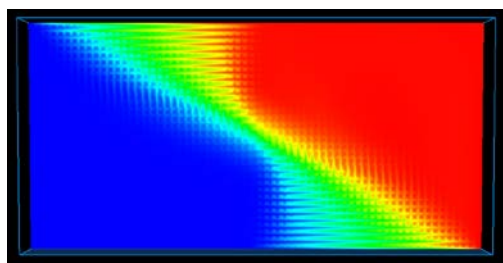
図-4 は計算によって得られた $x_2 = 0.04\text{m}$ における各時刻の温度分布を示す。間隙に沿った浸透流による熱の移動が確認でき、高温流体が(密度小)が上層を、低温流体(密度大)が下層を進行する過程が再現された。また、本解析手法では、流体領域の浸透流と同時に固体内部の熱伝導も計算することができ、得られた各断面の温度分布が示す

ように、流体領域と固体領域で温度変化に大きな違いが生じることを確認した。

同様の粒子数、物性値、格子数で並列数のみを変えて並列化効率の検証を行ったところ、4096 並列では 512 並列に対して約 5.7 倍の計算速度が得られた。



(a) $t = 10s$



(b) $t = 140s$

図-4 $x_2=0.04m$ の断面における各時刻の温度分布

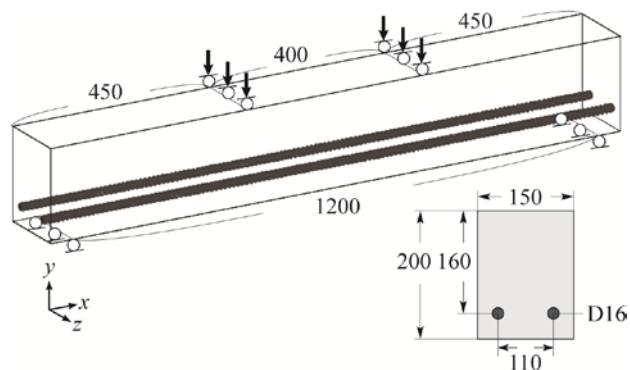
(2) 力学的負荷状態での鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション

ここでは、独自に定式化した損傷モデルを FEM に応用したひび割れ進展解析手法をコンクリートに適用し、鉄筋コンクリートの破壊シミュレーションを行った。図-5 に、鉄筋コンクリートはりの解析モデルを示す。実際の鉄筋コンクリートにはせん断補強筋が配置されているが、ここではモデルを簡単にするため、軸方向鉄筋のみを配置したモデルを解析の対象とする。鉄筋のメッシュ生成には、実際の異形鉄筋の幾何形状を忠実に反映させた。図-5 に示すような、コンクリートと鉄筋の材料パラメータを設定し、4 点曲げの数値実験を行う。有限要素メッシュは、全体を 200 万、400 万、800 万、1600 万要素とし、要素数の違いによる検討も合わせて行った。解析モデルには対称性があるので、実際には 1/4 領域を数値解析の

対象とした。解析ステップは 200 とし、MPI 並列により非線形解析を行った。

数値実験の結果として、モデル表面におけるひび割れの進展を図-6 に示す。本研究の解析手法は、ひび割れをひずみの局所化で表す方法であるので、ひび割れ進展解析の結果はひずみを可視化したものである。せん断補強筋のない鉄筋コンクリートはりによく見られる典型的な斜めひび割れが進展する結果が得られており、本研究の解析手法の有効性が示されている。また、要素数を変化させても、ほぼ同様の結果が得られており、要素数に大きく依存しない解析手法であることがわかる。これは、より実規模の構造を解析する際に、分割が粗くなってもある程度の精度が保障されることを意味しており、非常に重要な成果である。

この数値実験において、400 万要素のモデルを 128 の MPI 並列で計算したところ、約 1 日で計算が終了した。ここでのモデルは、実際の鉄筋コンクリート構造物の 100 倍未満と考えられる。このモデルで 50 万要素程度は必要であるので、実際規模の構造物の解析には約 5000 万要素の分割が必要と考えられる。並列台数を増加させれば、十分に実現可能なレベルであると考えられる。



Material parameter of concrete

E	ν	κ_0	G_f	k
30 GPa	0.2	0.0001	0.1 N/mm	20

Material parameter of steel

E	ν	σ_{y0}	Q	b
200 GPa	0.2	300 MPa	150 MPa	15

図-5 鉄筋コンクリートはりのモデル

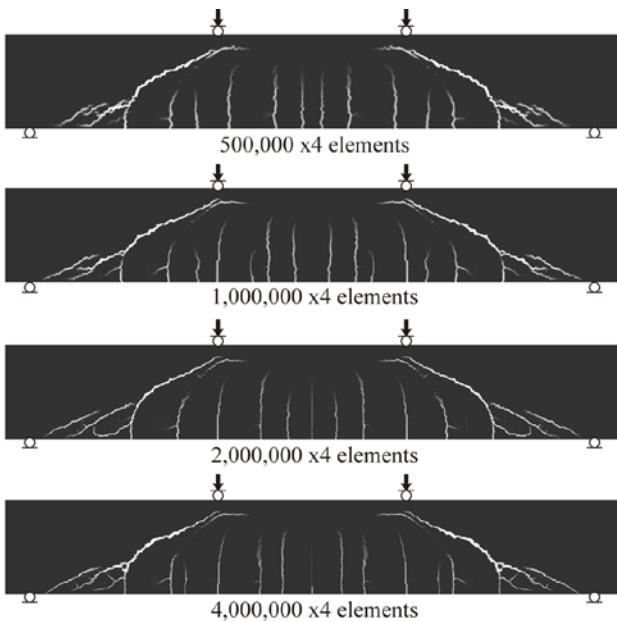


図-6 ひび割れ分布 (Step: 200/200)

(B)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 (京谷, 寺田, 加藤, 中畑)

H25 年度では, 弾性波および電磁波を利用した非破壊検査のための波動伝搬シミュレーションの高速化について検討を行った. H26 年度は, この高速化したシミュレーションを用いて, きずの映像化と内部構造の推定のための逆解析手法の開発へ展開した.

[1] アレイ探触子を用いたきずの 3 次元映像化シミュレーション

ここでは, 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振動素子で得られる散乱波を基に, きずを再構成する手法である. FSAP 方式では, 超音波の送・受信をアレイの 1 素子が行い, すべての素子の送受パターンをもとに, 遅延時間を考慮して集束ビームを作成する方法である. 図-7 に, 動弾性有限積分法(EFIT)を用いて, 集束ビームの伝搬の様子を可視化した例を示す. 図-7 は, 50×50×50[mm]の弾性体の上部にアレイ探触子(10×10=100 素子, 素子ピッチ 2.5mm, 中心周波数 2.5MHz)を設置したときの, 超音波の伝搬を計算し

ている. この弾性体には, きずを模した 5 つの人工欠陥(5mm 横穴)が設けてある. この数値モデルのボクセル数は 1000×1000×750(合計 7 億 5000 万)であり, 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 5 分であった.

図-7 で示したような超音波ビームが送信できたとして, その際に得られるきずからの散乱波をもとに, きずの再構成を行う. 超音波ビームを数値的に作るために, FSAP 方式はアレイの素子数分, EFIT のシミュレーションを繰り返す必要があり, 実際は, 超音波送信の回数分(100 回)の EFIT 解析を行った. 得られた数値波形を FSAP 方式に入力し, 開口合成処理を行うことで横穴の形状を再現した結果を図-8 に示す. 探触子は弾性体の上面の中心に置いている. この結果から, 5 つの横穴が再構成され, それぞれの位置も識別可能であることがわかる. アレイ探触子は送信方向を任意方向に設定できるとはいえ, 実際には超音波ビームの指向性に限界があるため, 探触子真下付近の横穴のみが再現されているのがわかる.

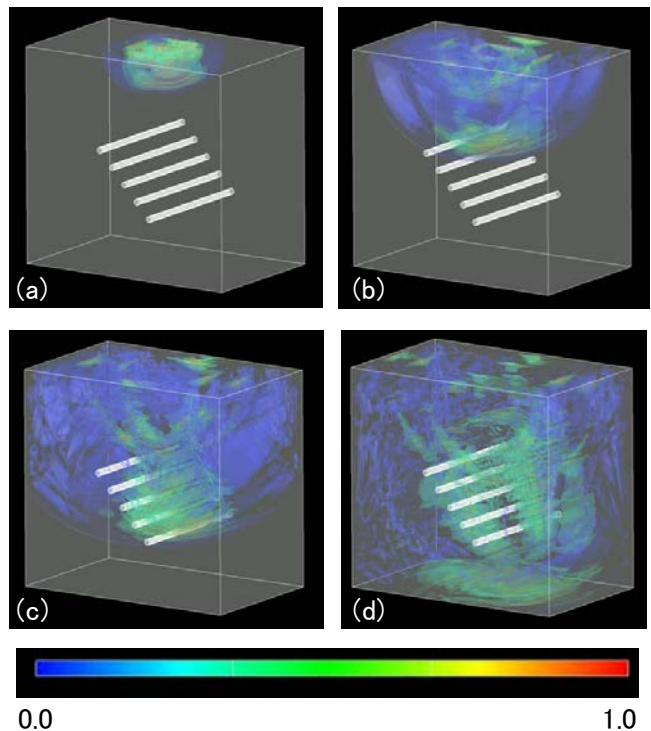


図-7 弾性体中の超音波の伝搬シミュレーション. 正規化した変位の絶対値に色をつけて表示したもの. (EFIT による 4096 Flat MPI 並列計算)

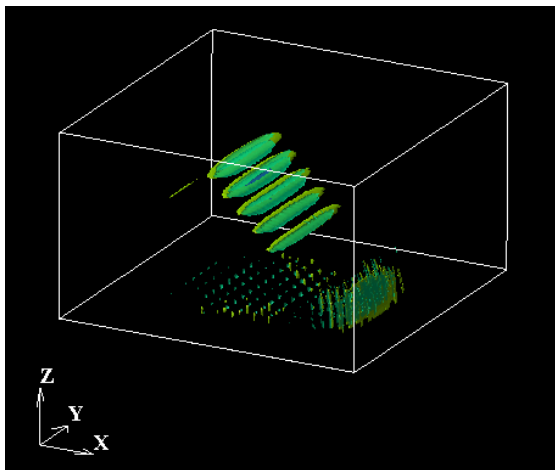


図-8 FSAP 方式による横穴の再構成シミュレーション. 10×10 素子のマトリクスアレイ探触子を使用. (再構成値の等値面表示)

[2] 粒子フィルタを用いたコンクリート内部の構造同定

粒子フィルタはベイズの定理に基づくモンテカルロ近似の一種であり、計測データに潜む状態量を推定する手法である。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、粒子フィルタを用いて図-9 に示すような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。ここでは、Intel Xeon Phi コプロセッサを利用した MIC 並列計算を EFIT に導入した。尤度評価に用いるのは、図-10 の上部に示すような超音波のエコー波形である。骨材率が大きくなるにつれて、骨材の多重散乱に起因する林状エコーの振幅が大きくなっている。1MHz の超音波をコンクリート上部の探触子から送信し、同じ探触子にて受信する。この受信波に FFT を施し、周波数スペクトルを得る。このスペクトル情報をもとに、骨材率の同定を行った。ここでは、初期粒子として、骨材率が 10%~60% まで分布した粒子を考える。図-10 の下部が、粒子フィルタの更新に伴う骨材率の分布の程度を示している。骨材率の真値は 20.5% であり、更新に伴い、粒子の分散が小さくなり、平均値が真値に

近づいていくのが分かる。なお、本年度は、少ない粒子数で同定が可能であったが、これは尤度計算に用いた情報が計測値でなかったことも大きな要因である。次年度は、計測データと融合させていくのが目標である。

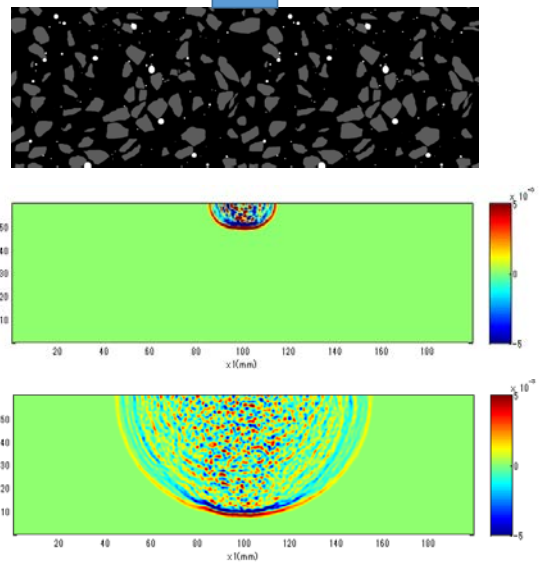


図-9 骨材率が 40% のコンクリート中を伝搬する超音波の伝搬シミュレーション

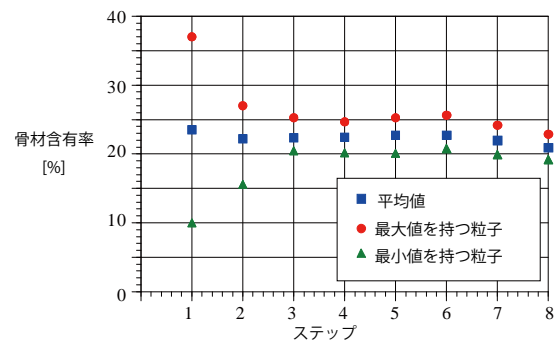
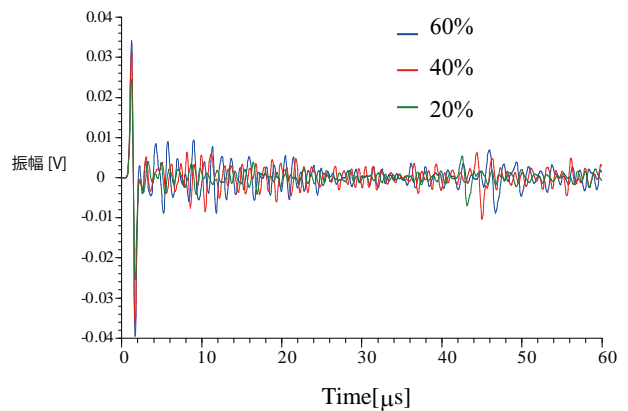


図-10 骨材率が 20% と 40% のときの受信波形 (上), 粒子フィルタによる骨材率の同定シミュレーション(下)

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

(A) 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

[1]において、コンクリートのような非均質材料における拡張ボクセル有限要素法の有用性が示された。[2]では、多相場モデルを用いて多数の粒子から成る多孔質体内の浸透流解析を行った。今後の展望としては、高温または低温環境下における、コンクリート内部の浸透流の体積変化による破壊のシミュレーションを行っていく予定である。[3]では、MPI 並列計算を用いて、鉄筋コンクリートのひび割れ進展解析を行った。これは、本年度後期の成果であるが、次年度もこれを継続し、現実的なサイズを考慮して、より大規模な解析を実施する予定である。以上、(A)については、申請時の予定を大凡達成できた。次年度は、[1]や[2]のようなコンクリートのメゾレベルの非均質性を、マクロレベルのひび割れ進展解析へとつなぐようなマルチスケールモデリングを実施したい。

(B) 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

[1]では、数値シミュレーションによって、FSAP によるきずの 3 次元再構成が可能であることが示された。今後は、きずの大きさに応じて、アレイ探触子の素子ピッチや周波数等の最適パラメータを求めること、コンクリート材料に拡張することを予定している。また、実験データの比較も行いたい。[2]では、コンクリートの内部構造について、粒子フィルタによる同定シミュレーションを示した。収束までの同定経路は、システムノイズ、リサンプリングにおける乱数の選定、初期粒子の位置等に関連することがわかった。次年度は、コンクリートの非均質性や散逸性を考慮した 3 次元波動解析によって、逆解析の精度を高めること、さらに実験値との融合を行いたいと考える。

(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

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、(A)[1]の有限要素解析の大規模化および高速化、(B)[2]の 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。今後は、さらに大規模な計算にチャレンジしていく予定であり、他の問題における計算の効率化の検討についても継続的に連携を模索する予定である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. K. Nakahata, J. Chang, M. Takahashi, K. Ohira, and Y. Ogura, Finite integration technique for coupled acoustic and elastic wave simulation and its application to noncontact ultrasonic testing, *Acoustical Science and Technology*, Vol.35, No.5, pp.260-268, 2014.
2. 河西亮輔, 加藤準治, 中畑和之, 京谷孝史, 小川淳, EFIT による数値実験に基づく均質体表面のひび割れ深さ評価法の提案, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, Vol.70, No.1, pp.10-21, 2014.
3. K. Nakahata, G. Kawamura, T. Yano, and S. Hirose, Three-dimensional numerical modeling of ultrasonic wave propagation in concrete and its experimental validation, *Construction and Building Materials*, Vol.78, pp.217-223, 2015.

(2) 国際会議プロシーディングス

4. K. Nakahata and S. Hirose, GPU Accelerated ultrasonic simulation and implementation of SAFT reconstruction tool, *Proc. the Fifth US-Japan NDT symposium*, pp.48-54, 2014.
5. D. Toriu and S. Ushijima, 3D parallel computation for natural convections with multiphase model, *The 1st international conference on computational engineering and science for safety and environmental problems (COMPSAFE 2014)*, pp.555-558,

2014.

6. K. Nakahata, T. Yano, and S. Hirose, GPU accelerated 3D FIT simulation for ultrasonic wave propagation in concrete and its experimental validation, COMPSAFE 2014, pp.474-477, 2014.

(3) 国際会議発表

7. Y. Nemoto, M. Kurumatani and S. Okazaki, Simulation of 3D internal cracks formed in concrete around deformed bar using isotropic damage model, COMPSAFE 2014, pp.485, 2014.

(4) 国内会議発表

8. 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, 2015 年 6 月(投稿中).
9. 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, 2015 年 6 月(投稿中).
10. 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, 2015 年 6 月(投稿中).
11. 中畑和之, 紙田聖也, 高本龍直, 粒子フィルタによる介在物の弾性定数および分布率同定の試み, 日本非破壊検査協会 H26 年度秋季講演大会, pp.49-50, 2014 年 10 月.
12. 鳥生大祐, 牛島 省, 青木一真, 多相場モデルを用いた高温固体周りの自然対流の数値計算, 土木学会第 69 回年次学術講演会, CS11-010, 2014 年 9 月.
13. 鳥生大祐, 牛島 省, 青木一真, 圧縮性流体と固体の熱連成場における流体解析手法, 土木学会第 17 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.213-214, 2014 年 5 月.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

なし