

jh130013-NA08

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

中畑和之（愛媛大学）

インフラの経年劣化が社会問題となっており、早急な維持管理技術の構築が望まれている。ここでは、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。本課題は、(A)劣化のメカニズム解明のための数値解析、(B)プロアクティブなメンテナンスに資する数値解析、(C)プログラム高度化および数値データの効率的な処理、の3つの研究を14名の研究者が分担して遂行している。(A)については、力学・化学挙動をモデル化した有限要素法を用いて、鉄筋コンクリートのき裂進展や化学的劣化現象について数値解析を行った。(B)は、イメージベース有限積分法を導入し、コンクリート中の電磁波・超音波の伝搬をシミュレートした。(A)・(B)の数値解析は実験結果と定性的・定量的に一致することを示した。(C)については、拠点大学側研究者の技術サポートにより、(A)の手法に大規模計算のための最適なチューニングを行った。

1. 研究の目的と意義

高度成長期に建設された日本国内の土木構造物の老朽化が懸念される中、社会インフラの健全度や安全性の検証は最重要課題である。平成 24 年 12 月に発生した中央道の笹子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、これによって社会インフラの信頼性は完全に失墜した。劣化したインフラはスクラップアンドビルドという選択肢があるが、劣化が懸念されるインフラの数は膨大であり、近年の財政事情を鑑みると、すべて新設の構造物で補うことは困難である。従って、診断による経済的・効果的な補強・補修が望ましく、安全を確保しつつ長寿命化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、アコースティックエミッション、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を定量的に検査する決定的な手法は確立されていない。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」では、伝搬速度測定方法に関する項目のみで、損傷や欠陥の定量的な評価に関する規格は未整備である。

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。予め、劣化箇所や損傷時期が予測できれば、プロアクティブなメンテナンス手法が提案できよう。そのためには、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、包括的な数値解析・シミュレーションの開発が望まれる。適切なモデル化の元で将来起こりうる事象を予測し、プロアクティブなメンテナンス技術を提案し、コンクリートの維持管理の高度化と効率化に貢献する手法を開発することが本研究の目的である。本研究によって、供用中のインフラの健全度を定量的かつ高精度に評価できれば、国民の安全確保はもちろん、インフラの経済的なアセットマネジメントにも繋がるという意味において、本研究の意義は大きい。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した拠点名および役割分担

本研究では、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)のネットワーク型拠点のうち、京都大学を共同研究先としており、計算機環境としては CRAY XE6 を利用した。研究者は、総勢 14 名であり、そのうち拠点となる京都大学の研究者は、小山田・岩下・牛島の 3 名である。それ以外

の研究者は、中畑（愛媛大）、京谷・寺田・加藤・高瀬（東北大）、車谷（茨城大）、浅井（九州大）、永井（岐阜大）、榎山（中央大）、松本（産総研）、藤岡（水資源機構）であり、主として土木建築工学に携わる研究者である。

具体的な研究内容は次節で示すが、本課題は次の 3 つの項目：(A)劣化のメカニズム解明のための数値解析、(B)プロアクティブなメンテナンスに資する数値解析、(C)プログラム高度化および数値データの効率的な処理、に分担して研究を遂行している。(A)については、茨城大、九州大、岐阜大の研究者が、(B)は東北大、愛媛大の研究者が主として解析コードを作成し、計算を実行している。(C)は、拠点である京都大の研究者が中心となり、中央大、産総研、水資源機構の研究者が検討を行っている。また、(A)、(B)、(C)について、モデル化の方法や計算技術、研究の進捗について頻りに情報交換を行っている。また、本研究で得られた数値解析結果は実験データと比較を行い、妥当性を検証している。

(2) 共同研究分野

コンクリートの健全性を評価する上で、ひび割れの状態を観察することが重要である。コンクリートは脆性材料であるため、引っ張り力が作用したときにはひび割れを生じる。実際には、微視サイズのひび割れから、さらに荷重が作用して巨視的な割れに進展し、崩壊に至る。従って、ひび割れをモデル化するためには、空間的・時間的なマルチスケールモデリングが必要となる。また、コンクリートは化学的な作用によってもき裂が進行する。従って、物理的な外部要因と化学的な内部要因による相互作用によってき裂は進行するため、マルチフィジクス問題を扱うことになる。

コンクリートの内部を非破壊検査するために、超音波・電磁波の物理波動を利用することは有効である。この波動のシミュレーションを効率的に行うには陽的解法が適しており、一般的に陽的解法の数値解析のメッシュは波長にくらべて十分小さくする必要がある。また、非破壊検査技術は、

基本的には逆問題を解くことに相当し、解の精度だけでなく解析時間の短縮も要求される。このように、コンクリート構造物の損傷のモデル化とメンテナンス技術の向上に資する数値解析を実施するには、必然的に大規模なモデルを高速に解くことが要求される。従って、本課題は「超大規模数値計算系応用分野」として、計算機を有効に活用して取り組むグランドチャレンジ的な研究である。

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

上記(1)に示したように、本研究グループは、土木建築工学における応用力学の研究者が中心となり、これに計算機科学分野のメンバーを加えた連携体制である。コンクリートの損傷のメカニズムを解明し、プロアクティブな非破壊検査へと繋げるためには、複数の研究者のツールを利用し、1 つの大きなメソッドとなるように有機的に結合することが肝要である。このためには、共同利用・共同研究拠点方式での研究推進が最適であると考えられる。拠点方式では計算機資源も豊富であり、実現象を忠実にモデル化するためにも、大容量メモリ、マルチコアを搭載した大型計算機の利用は不可欠である。さらに、計算におけるデータのプリ・ポスト処理、あるいは実験データとの融合等、大規模データをハンドリングするためには、大容量ストレージを確保することが必要となる。また、これらの数理モデリング・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、計算機科学分野のノウハウも必要である。

以上のように、マルチフィジクス、マルチスケール解析等の順解析、および数値シミュレーションを援用した逆解析、計算コードのチューニング・大規模可視化など、大規模計算機を利用して、グランドチャレンジ的な問題に取り組むには、本体制は適切なものである。社会インフラの安全利用に寄与すべく、各研究者の知識・技術を如何にうまく融合できるかがキーとなる。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

(A) 劣化のメカニズム解明のための数値解析

コンクリート構造物の経年劣化の要因は、過酷な荷重条件、中性化・アルカリシリカ反応(ASR)・塩害等の化学的要因などが考えられる。その多くは力学的要因と化学的要因が複雑に絡んでいる。ここでは、①力学的要因によるき裂の発生と進展について、コンクリートの破壊力学に基づくシミュレーションの開発を行う。また、②化学的な劣化要因の1つである ASR 取り上げ、それによる鉄筋膨張現象とき裂進展を再現し、劣化メカニズムの解明を試みる。本年度は、①と②は独立した事象としてモデル化する。

① コンクリートのき裂発生モデルとき裂進展シミュレーションの高度化

鉄筋を有する鉄筋コンクリート部材に荷重が作用すると、鉄筋周辺のコンクリートに様々なひび割れが生じる。鉄筋周辺に生じる主なひび割れとして、鉄筋軸と直角に生じ、部材表面に進展する「横ひび割れ」、鉄筋軸方向に生じる「縦ひび割れ」、部材表面には現れないが、鉄筋表面付近に発生する「内部ひび割れ」がある。このうち、内部ひび割れに関しては、部材表面からは見えないため、鉄筋コンクリートの力学性能や耐久性の評価を難しくさせている。荷重作用下における内部ひび割れの発生・進展を連続的に可視化でき、かつ内部ひび割れを定量的に評価するには、破壊力学モデルに基づく数値シミュレーションの適用が必要となる。ここでは、有限要素法を用いて、ひび割れ進展をモデル化する。

損傷過程にある弾性体の準静的釣り合い問題を考える。 C^e を一般的な等方弾性テンソルとすると、損傷を考慮した構成則は以下のように規定される。

$$\sigma = (1 - D) C^e : \varepsilon^e \quad (1)$$

D は損傷の度合いを $0 < D < 1$ で表す損傷変数であり、損傷が無ければ 0、完全に破壊すれば 1 となる。ここで、等価ひずみ(文献 5)を用いて上記の

構成則に損傷モデルを組み込む。ここで提案する損傷モデルは、要素における構成関係として考慮されるので、離散ひび割れモデルのように、ひび割れを不連続な境界面として表現することができない。しかし、破壊エネルギーがパラメータとして考慮されているので、要素分割を細かくすることによって、損傷分布を近似的にひび割れと見なすことができる。

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、図-1 に示すような鉄筋をコンクリートに埋め込んだ有限要素モデルを作成した。鉄筋については、異形鉄筋における節も正確にモデルに取り入れた。節の間隔は 30mm であり、解析メッシュは鉄筋の節が十分に表現できるよう、モデルは約 65 万要素とし、一次の四面体要素を用いる。境界条件は、鉄筋が一軸引張状態となるように、鉄筋の左端の長軸方向変位を拘束し、右端に長軸方向の強制変位を与える。鉄筋の降伏応力を 300MPa とし、降伏ひずみに相当する変位を 400 ステップで増分的に載荷する。鉄筋はヤング率 200GPa、ポアソン比 0.3 の線形弾性体とし、コンクリートはヤング率 30GPa、ポアソン比 0.2 であり、破壊エネルギーや圧縮引張強度比等は実際のコンクリートを想定して設定した。なお、横ひび割れを誘導するために、試験体の側面にあらかじめ切欠きを設けている。

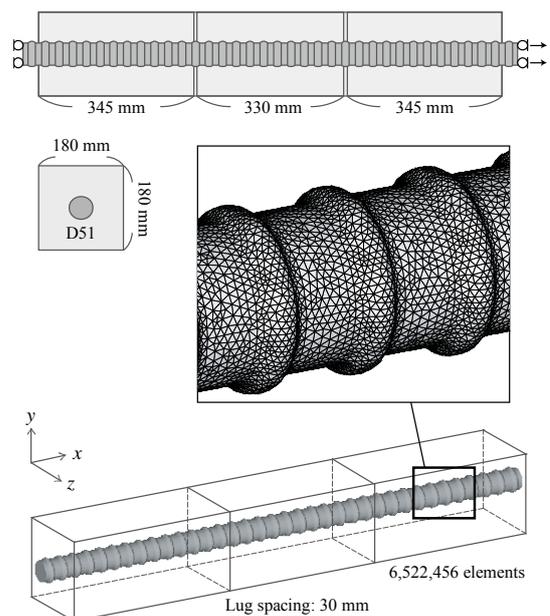


図-1: 鉄筋コンクリートの有限要素モデル

解析結果を図-2 に示す。鉄筋の両端から損傷が開始するとともに、人為的に導入した切欠きから貫通（横）ひび割れが生じている。その後、節周辺から内部ひび割れが発生し、先に生じた横ひび割れに寄り添うように、内部ひび割れが斜め方向に進展していく様子が再現されている。横ひび割れの後に生じた内部ひび割れは、最寄の横ひび割れに向かって、コーン状に進展していることが分かる。この結果は、既往の実験で観察されている挙動をほぼ一致しており、数値シミュレーションが力学的に妥当であることを示す結果となった。

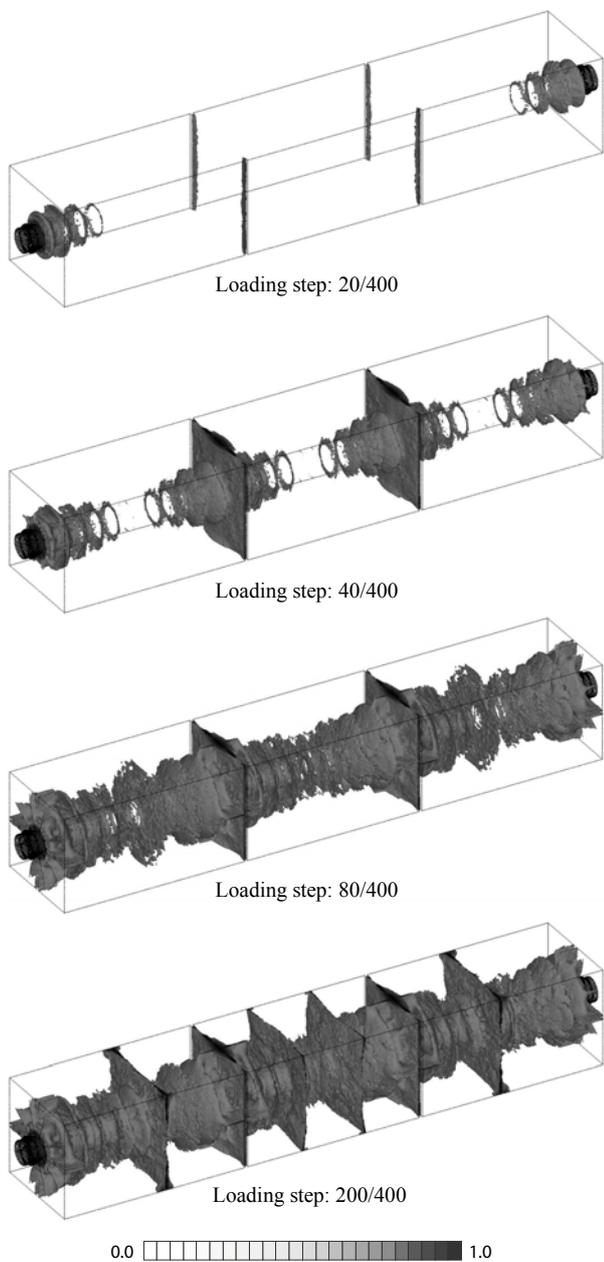


図-2: 鉄筋の引っ張りによるひび割れの発生シミュレーション

このように、鉄筋の節までを考慮した異形鉄筋周辺のコンクリートの破壊挙動を 3 次元で詳細に再現した例は、これまでにほとんどなく、実際の挙動に近いシミュレーション結果を再現できたことは本研究の主要な成果である。

② ASR による材料劣化のモデル化

ASR とはコンクリート材料の母材であるモルタル内部のアルカリイオンと介在物である骨材が反応し、骨材表面にゲル状の物質が生成されることで内部膨張が生じる現象である。この内部膨張に伴い材料界面のはく離、あるいは母材内部に微視的なひび割れが進展していくものと考えられている。この一連の流れをモデル化する。コンクリート中へのイオンの浸透には拡散、移流、吸着などの現象が考えられるが、本研究においては拡散現象のみを考慮するものとした。基本的には、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も有限要素法で解析を行い、この両者を組み合わせることで、拡散膨張を考慮した不連続面進展解析手法の構築を行うことにした。このコンクリートのアルカリ骨材反応を想定した連成解析の手順を図-3 に示す。

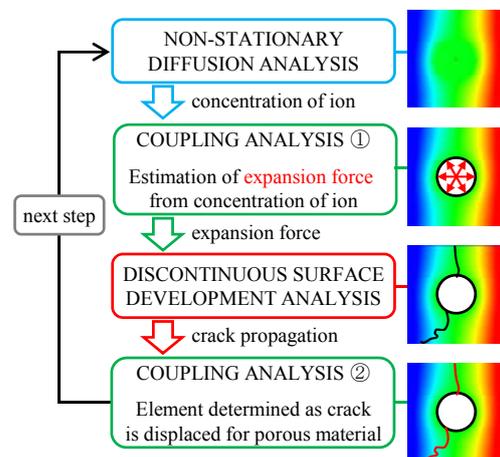


図-3: 拡散膨張・不連続面進展の連成解析フロー

解析手順としては、まず非定常拡散問題を解き拡散物質の空間分布を予測する。次に、濃度の空間分布の結果を基に膨張力を決定する。この際、膨張力によって引張り応力が基準値を超え不連続面と判定される領域（要素）は、拡散係数の高い仮想空隙領域に置換し、再び拡散問題を解く。以

上の手順を繰り返すことで、浸透・拡散に伴う不連続面進展解析を実施する。

アルカリシリカ反応では、コンクリート内のアルカリ反応性骨材と微細空隙中のアルカリ溶液が化学反応することにより生成するアルカリシリカゲルが吸水・膨張し、骨材周辺からひび割れが進展する。本研究ではアルカリシリカゲルの吸水による体積膨張を骨材の体積膨張として表現した。具体的には、次式に示すように、濃度に比例した膨張ひずみを骨材要素のみに与えることにした。

$$\begin{aligned} \{\varepsilon^c\} &= \{\varepsilon_x^c \quad \varepsilon_y^c \quad \varepsilon_z^c \quad \gamma_{xy}^c \quad \gamma_{yz}^c \quad \gamma_{zx}^c\}^T \\ &= \{\alpha c \quad \alpha c \quad \alpha c \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 α は膨張係数、 c はイオン濃度を表す。この膨張ひずみをもとに膨張力を評価し、この力を駆動力とした非線形問題を解く。

損傷モデルは連続体損傷力学を導入し、損傷変数 D を用い、要素剛性（材料割線係数）を段階的に減少させる。損傷変数は $0 \leq D \leq 1$ であり、 $D=0$ のときには健全な状態を示し、 $D=1$ は最終的な破壊状態を表す。ただし、このときの D は①のモデルとは異なっており、②では弾性係数の低下によって損傷状態を表すような次式を採用した。

$$D = \frac{E_0 - E}{E_0} \quad (3)$$

E_0 は非損傷状態の弾性係数、 E は損傷後の弾性係数である。なお、コンクリートは引張り応力に弱い材料であり、圧縮強度に比べて引張強度は、約 1/10 程度である。そこで、圧縮と引張強度の相対的な影響度を考慮した相当ひずみを用いて破壊損傷を定義している。

コンクリート板を想定した 3 次元数値モデルを図-4 に示す。本研究では、非均質材料の微視構造のモデル化に優れ、かつ要素除去により 3 次元問題のひび割れの進展を簡易的に表現できるボクセル FEM をベースとした。なお、解析モデル作成については、球形の骨材をランダムに配置することで作成し、総要素数は 1200 万とした。境界条件は yz 平面以外全面の変位を拘束し、非拘束面である $x=1$ の yz 平面から拡散物質を浸透させるものと

した。図-5 に解析結果を示す。まずは骨材界面から損傷が進展し、その後、骨材が凝集している箇所から界面剥離後のひび割れが連結し始める。最終的には自由表面まで損傷が進展する。結果としてアルカリシリカ反応の特徴である表ひび割れパターンを定性的に表現することができた(文献3)。

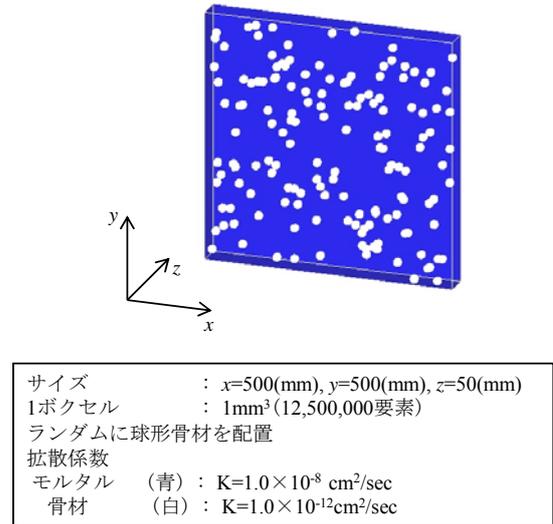


図-4: コンクリート板を想定した数値モデル

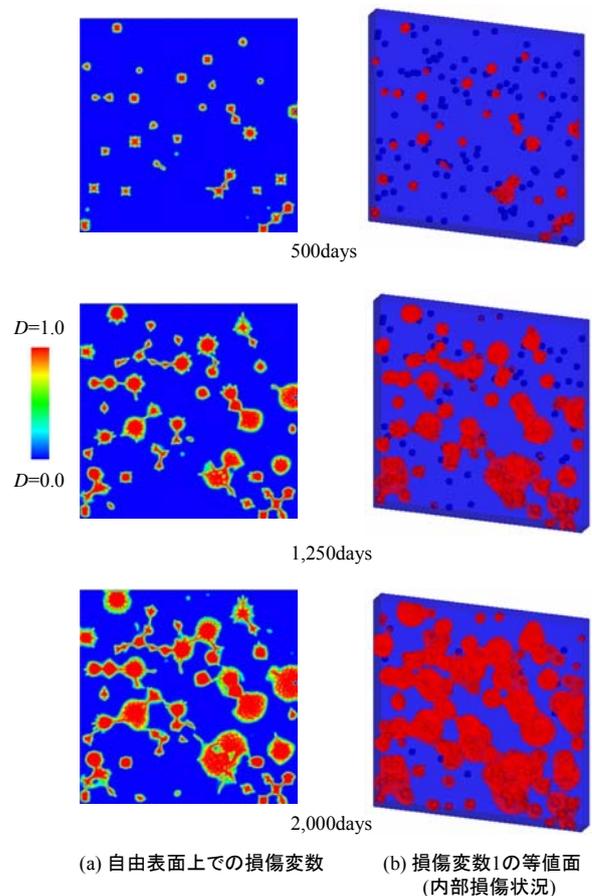


図-5: 損傷モデルを導入した連成解析結果

(B) プロアクティブなメンテナンスに資する数値解析

PC 橋や大型プラント等に見られるコンクリート部材の内部きずや鉄筋の損傷等を非破壊的に評価するために、様々な方法が適用されている。この中で、超音波法や電磁波法は、データを保存でき、しかも検査用機材が小規模で設置しやすいため、現場検査では広く採用されている。超音波は空隙・空洞の検出には適した方法であり、電磁波はそれが難しい。一方で、鉄筋や塩ビ管の検出には電磁波は適している。従って、両方の波動の性質を理解し、その特徴を活かした利用が望ましい。ここでは、超音波および電磁波を利用した非破壊検査手法のシミュレーションの開発および、現実サイズの数値モデルを高速に解くためにコードのチューニングを行う。また、大規模数値シミュレーションを実施し、数値解を求めるとともに、波形の計測実験を行い、両者の比較を行った。

①き裂・表面割れの非破壊評価のための弾性波探査のモデル化

コンクリートは、セメント硬化体に骨材を混入させて強度を発現させたものである。実際には、これ以外に、多少のエントラップドエア(気泡)が入る。従って、コンクリートを伝搬する波動は骨材・気泡によって散乱し、結果として減衰が顕著となることが実験的に知られている。なお、コンクリート中を伝搬する波動は、厳密には弾性波と呼ばれるが、本研究で対象とするものは 100kHz 以上の超音波領域の波動であるので、ここでは超音波と呼んでいる。本研究では、き裂・表面割れの非破壊検査の前に、コンクリート中を伝搬する超音波の伝搬特性を明らかにすることを試みた。数値解析結果は、計測実験と比較することで妥当性の検証を行う。

ここでは、イメージベース処理を導入して、3次元コンクリート構造を高精度にモデル化する。これを動弾性有限積分法(EFIT)に入力することによって、超音波の伝搬をシミュレーションする。EFIT による波動伝搬の 3次元シミュレーション結果を図-6 に示す。数値モデルは、直径が 100mm、

高さが 150mm の円筒形であり、骨材含有率(体積率)は 50%である。骨材の粒径分布は、後に示す計測実験と同等とし、コンクリート内部に最大粒径が 10mm の骨材をランダムに配置した。骨材の縦波速度は 5113m/s、密度は 2570kg/m³であり、これらは、実際の骨材を 1 辺が 10mm の立方体に切り出して計測した。セメント硬化体の縦波速度は 3841m/s、密度は 2014kg/m³である。直径 25.4mm の超音波プローブをコンクリートモデル上面の中心部に設置し、鉛直方向に表面力を与えることで超音波を励起した。励起信号波形は、中心周波数が 400kHz のリッカー波とした。

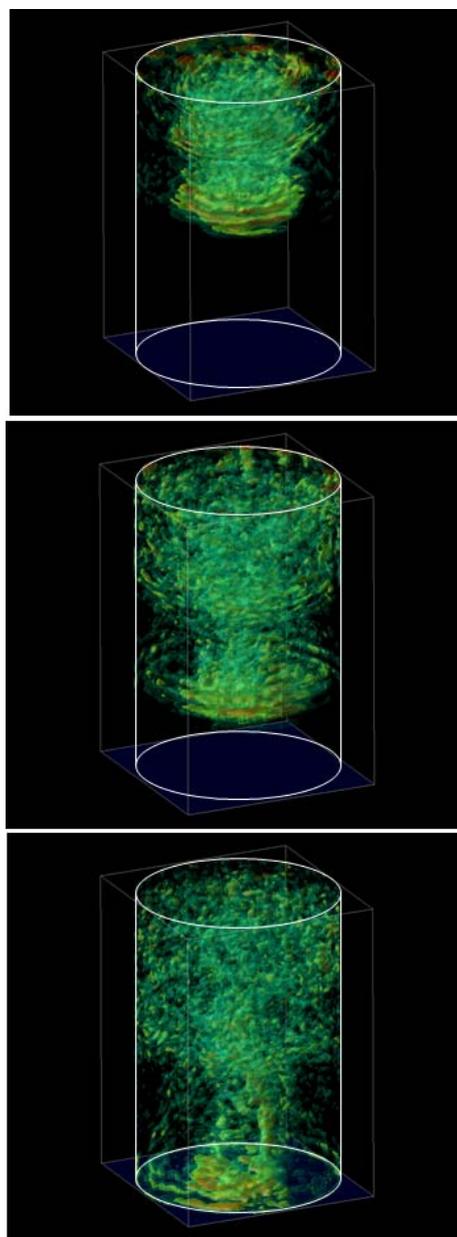


図-6: EFIT による骨材率 50%のコンクリート中を伝搬する超音波の 3次元可視化

図-6 によれば、超音波は時間と共に鉛直下方向に伝搬している。骨材によって、超音波は散乱し、モデル底面に到達するときには、波頭が崩れ、減衰していることがわかる。なお、本計算のボクセル数は 1 億 9 千万、更新数は 3000 であり、計算時間は 2048 プロセス並列(Flat MPI)で約 10 分であった。

次に、骨材率が 10%, 30%, 50% の 3 次元数値モデルをそれぞれ 10 個作成し、骨材をランダムに配置させて、図-6 と同様のシミュレーションを行った。このとき得られた縦波の伝搬速度を調べたものを図-7 に示す。骨材率が 10% の場合の平均速度は 3964m/s、30% のときは 4187m/s、50% のときは 4456m/s となった。骨材率が増加するにつれて、伝搬速度は増加する傾向にある。この本解析の妥当性を検証するために計測実験を行った。数値モデルと同サイズ・形状で粒径分布も同等なコンクリート供試体を作成した。各骨材率につき 3 体の供試体を作成し、伝搬速度を測定した。そのときの実験結果も図-7 に併せてプロットしている。この結果から、数値シミュレーションと計測実験の結果は良好に一致していることがわかる(文献7)。

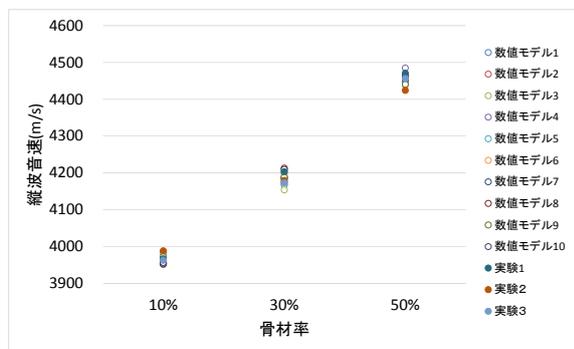


図-7: コンクリート中の縦波速度における数値解析と計測実験の比較

② 鉄筋位置推定のための電磁波レーダ検査

ここでは、コンクリート非破壊検査への応用を意図し、鉄筋位置検出に用いられる電磁波レーダ法のモデル化、および電磁波による鉄筋位置の逆解析を行った。電磁波をモデル化する場合、電磁波はコンクリートだけでなく空気中也伝搬するため、開領域を適切にモデル化し、無反射境界を組

み込む必要がある。ここでは、電磁界有限積分法(EMFIT)にイメージベース処理を組み合わせた 3 次元コードを開発した。鉄筋コンクリート床版の上表面から電磁波を放射した場合の、床版内部の電磁波の伝搬を可視化した結果を図-8 に示す。セメントと骨材の電気的な特性インピーダンスに顕著な違いは無いため、ここではコンクリートを均質体(誘電率=43.85pF/m, 透磁率=1.257μH/m, 導電率=0.001S/m)としてモデル化した。床版の高さは 400mm、幅は 850mm×900mm とし、直径 10mm の鉄筋をかぶり 150mm の深さに配置した。送信周波数は 1GHz である。ボクセル数は約 38 億、更新数は 3 万ステップである。図-8 は、ある時間ステップにおける電場の等値面および断面を表示したものである。電磁波が床版内部を球面状に広がり、鉄筋によって散乱されている様子がわかる。なお、計算時間は 2048 プロセス並列(Flat MPI)で約 30 分であった。

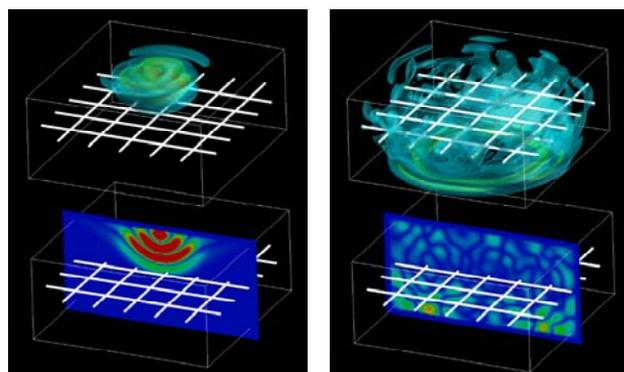


図-8: EMFIT による鉄筋コンクリート床版中を伝搬する電磁波の 3 次元可視化

次に、EMFIT による計算波形を用いて、鉄筋位置を再構成する逆解析シミュレーションを行った。この逆解析技術は、全波形サンプリング処理(Full-waveforms sampling and processing: FSAP)方式に基づくものであり、電磁波を送受信するアンテナをアレイ状に並べて、その送受信波形から鉄筋の位置および形状を再構成するものである。配筋状況を図-9 の上部に示す。鉄筋は深さ 90mm のところに水平方向にクロスするように配置され、鉄筋直径は 22mm、鉄筋間距離は 120mm である。アンテナサイズは 30mm×30mm のものを 64 個配置し

ている。FSAP 方式による鉄筋の再構成結果を図-9 の下部に示す。鉄筋が配置されている位置および形状を良好に再現できていることがわかる。

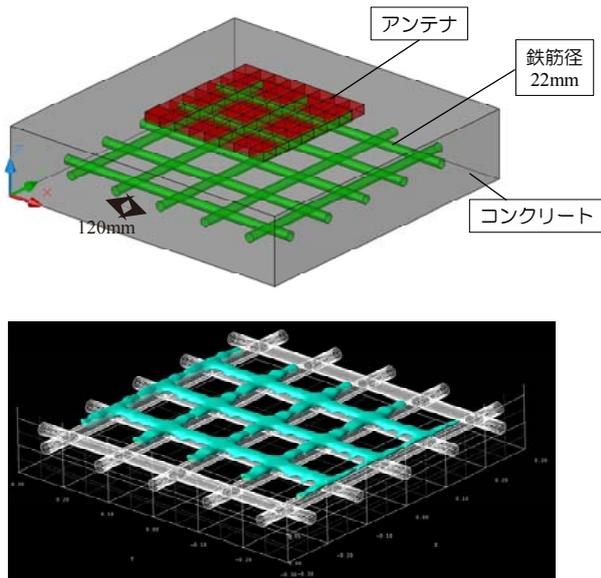


図-9: FSAP 方式による配筋の再構成シミュレーション

(C) 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に関するグループ会合は、2013 年 5 月 15 日 (中央大), 9 月 2 日 (中央大), 10 月 16 日 (京大) の 3 回に渡って行われた。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。その一例として、(A)-②の有限要素法で用いられているソルバーを大規模計算用にチューニングした例を報告する。

これまで、(A)-②の有限要素法は共有メモリ型のコードとなっており、数千万ボクセル以上の規模の有限要素解析が実施可能となるように、分散メモリ型の並列化コードへと拡張した。ここでは、並列化効率を向上させるために、3 次元 MPI 分割を導入した。図-10 に示すように、計算過程において、面で接し合う領域間 (6 面)、線で接し合う領域間 (各稜線の 12 線)、点で接し合う領域間 (各頂点の 8 点) での 26 領域間での通信が必要となる。拠点大学側の支援を受けて、コードをチューニン

グし、計算を実施した結果を図-11 に示す。赤の折れ線が 3 次元 MPI 実施時の効率であり、256 コア使用時(64 プロセス, 4 スレッド)に 180 倍程度の速度向上が見られ、スケーラビリティは良好なものとなった。

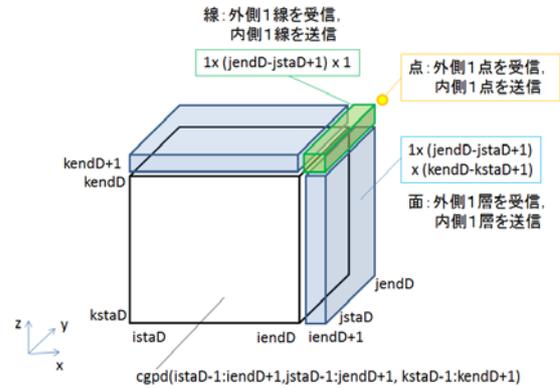


図-10: 近接領域とのデータ通信

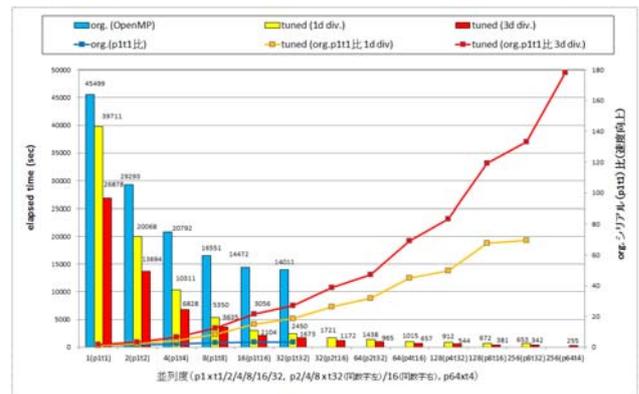


図-11: マルチコア計算時の並列化効率

(2) 当初計画の達成状況について

(A) 劣化のメカニズム解明のための数値解析

本年度は、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 3 次元有限要素モデルを作成し、破壊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結果に近い解析結果を得ることができた。また ASR のモデル化については、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。解析に用いるパラメータの値を変更すれば、モルタルへのひび割れ発生時間、およびひび割れ損傷幅などを調節可能であることを確認した。以上、実際の対象と同サイズの数値モデルで検討ができ、

概ね当初の予定通りに研究が実施できた。

(B) 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 EFIT でモデル化し、その妥当性について数値解析と計測実験で得られた超音波速度から検討を行った。その結果、両者は良好に一致し、本解析法のモデル化精度は十分であることを示した。本年度は、実サイズと同等な数値モデルを作成できた。大規模計算時のスケーラビリティも良好であった。コンクリート中を伝搬する電磁波について、EMFIT によってモデル化を行った結果、大規模波動伝搬解析が実用的な時間(1 件あたり数十分)で実施できることを示した。さらに、アレイアンテナを用いて FSAP 方式による鉄筋位置を再構成する逆解析技術を提案した。今後は、FSAP 方式による再構成の精度向上と、実験による妥当性の検証を行いたいと考えている。

以上、超音波と電磁波の大規模計算については、当初の計画を概ね満足するように研究が遂行できた。非線形超音波については、実施できなかったが、これは次年度の課題としたい。

(C) 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 3 回開催できた。また、拠点側からの技術的なアドバイスによって、有限要素解析の大規模化および高速化が実現できた。スケーラビリティも良好であり、さらに分散メモリ型とすることによって、実施時のメモリ節約も可能となった。

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、他の問題における大規模計算の効率化についても継続的に議論を行いたい。

4. 今後の展望

上述のように、(A) と (B) の個々の研究要素については、当初の予定を概ね満足するような成果を出すことができた。来年度も、継続課題として

JHPCN に採用されているので、(A) の研究知見を元に (B) におけるプロアクティブな維持管理法を提案できるように、有機的に研究を結合していきたい。また、一部の研究は、(C) の拠点大学側のサポートによって高度化された。しかし、他の問題も、大規模計算の効率改善の余地があるので、研究者間の連携をいままで以上に密にして、より大きな問題に取り組みたい。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. 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, (2014) 印刷中.
2. K. Nakahata, J. Chang, M. Takahashi, K. Ohira, Y. Ogura, Finite integration technique for coupled acoustic and elastic wave simulation and its application to noncontact ultrasonic testing, Acoust. Sci. & Tech., (2014) in press.
3. 渡邊茜, 浅井光輝, 損傷モデルの概念を導入したボクセル FEM による物質拡散とひび割れ進展問題の連成解析, 計算工学論文集, No. 20130007, (2013).
4. 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 樫山和男, コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol.2013, pp.20130015, (2013).
5. 車谷麻緒, 根本優輝, 岡崎 慎一郎, 廣瀬壮一, 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, 査読中.

(2) 国際会議プロシーディングス なし

(3) 国際会議発表

6. Y. Nemoto, M. Kurumatani, S. Okazaki,

- Simulation of 3D internal cracks formed in concrete around deformed bar using isotropic damage model, Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2014), Sendai, Japan, 2014. 4.
7. K. Nakahata, T. Yano, S. Hirose, GPU accelerated 3D FIT simulation for ultrasonic wave propagation in concrete and its experimental validation, COMPSAFE2014, Sendai, Japan, 2014. 4.
- (4) 国内会議発表
8. 河西亮輔, 加藤準治, 中畑和之, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 車トンネル覆工コンクリートの弾性ひび割れ照査に関する数値解析的研究, 土木学会第 68 回年次学術講演会 (2013).
9. 河西亮輔, 加藤準治, 中畑和之, 寺田賢二郎, 京谷孝史, トンネル覆工コンクリートの弾性波ひび割れ照査に関する数値解析的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会 (2013) (土木学会東北支部研究奨励賞受賞) .
10. 松本大史, 伊賀達郎, 中畑和之, 電磁波を用いた全波形サンプリング処理方式による鉄筋の映像化とその実験的検証, H25 日本非破壊検査協会秋季講演大会(2013) (日本非破壊検査協会新進賞受賞) .
11. 中畑和之, 廣瀬壮一, コンクリート構造部材を伝搬する超音波のモデル化とアレイ探触子を用いた内部空隙の再構成, 日本音響学会 秋季研究発表会(2013) (招待講演).
12. 渡邊 茜, 浅井光輝, 損傷理論を導入した物質拡散と不連続面進展の連成解析による材料劣化のシミュレーション, 第 18 回計算工学講演会 (2013).