

論文の内容の要旨

論文題目 **Enhancement of integrated earthquake simulation with high performance computing and its application**

氏名 ソブハニネジャド ゴラムレザ

本論文は、統合地震シミュレーション (Integrated Earthquake Simulation, IES) にハイパフォーマンスコンピューティング (High Performance Computing, HPC) を備えさせるための技術開発と、HPC を活かした応用を検討している。IE は、都市のモデルを使って、地震発生過程、構造物応答過程、社会対応過程の 3 つの過程をシームレスに計算するものである。都市の建物・構造物を一棟一棟モデル化するため、より広い地域をより高い時間分解能で計算するためには、HPC を具備させることは本質的に重要である。IES の主目的は、想定された地震シナリオに対応する、対象都市での地震ハザード (強震動分布) と地震ディザスター (地震被害) の予測である。IES の使用頻度は決して高いものではなく、シミュレーションシステムの維持・更新のためには、主目的以外の目的を設け、ユーザを増やすことが必要である。

本論文は大きく 2 部に分けられる。第 1 部の内容は、IES に HPC を備せさせる技術開発である。シミュレーションシステムをレイヤ構造としたこと、共通モデルデータ (Common Modeling Data) の設計、MPI ライブラリの利用がその内容である。第 2 部は HPC を備えた IES の応用である。リアルタイムハザードマップの自動構築、脆弱性カーブの構築、耐震応答解析用のモデルセットの構築が検討されている。

第 1 部では、既存の IES のデータフローを分析し、欠点を解消するより効率的なデータフローを考案している。既存の IES はラッパー型のデータフローである。すなわち、システムのコントロールルームと、地震発生過程・構造物応過程・社会対応過程のシミュレーションの間を取り持つラッパーを使用している。データの種類や、シミュレーションの解析手法の種類が増えると、ラッパー型はコードの負荷が増大する。実際、データが N 種類、解析手法が M 種類であると、解析手法の入力データを作るためには、 $N \times M$ 通りのデータ変換ないしラッパーが必要となる。新しいデータフローはレイヤ型である。データ、シミュレーション、ビジュアライゼーションの独立のレイヤを 3 つ設定し、コントロールルームはレイヤ間のデータ通信を管理する。データ通信に前述の CMD を利用し、データレイヤの実体を CMD に、次に CMD をシミュレーションレイヤの入力モデルという変換を行う。データ変換は 2 段階であるが、データと解析手法が N 種類と M 種類でも $N+M$ のデータ変換ですむ。各レイヤの間を通信されるデータは構造も量も膨大であるため、高い堅牢性が要求される。直接 MPI ライブラリを利用する代わりに、データの実体を量は大きいが単純な構造に変換することで堅牢性を確保した。

HPC を備えた IEC の性能を検証するため、効率性の検証を行った。共有メモリと分散メモリの環境下で、対象とする都市のサイズとシミュレーションに使う解析手法を変え、計算ノードの増加に伴う計算時間の短縮を実測し、効率性を定量化した。効率性の基本的な性質として、都市のサイズが増え問題の規模が大きくなると、計算ノードの増加に伴う効率性の低下が下がる傾向がみられる。特に、非線形の複雑な解析手法を使う場合、効率性の低下が下がる傾向は顕著である。これは、システム内のノードの通信によるオーバーヘッドが問題規模の増加とともに相対的に小さくなることを意味しており、システムの有効性を示唆するものである。効率性の指標も定量的に求められ、システムのスケーラビリティが確認された。

第 2 部は、HPC を備えた IES の新たな応用を検討している。第 1 の応用は、大地震発生後、計測された地震動を使って IES を動かし、その結果を動画等を使って可視化するリアルタイムハザードマップである。IES シミュレーションの他、可視化結果をウェブに自動的に載せることを目標に、IES_WEB と称するシステム開発を行った。地震観測ネットワークを観測する要素、IES を動かす要素、ウェブに可視化結果を載せる要素、そして各要素の健全性をモニタする要素を設計した。東京 23 区を対象に IES_WEB を構築した。現有の計算環境では、地震発生から構造物被害予測の可視化までを半日程度で処理することが可能であることが示された。

第 2 の応用は、既存構造物群の耐震性を評価するフラジリティカーブの構築である。さまざまな地震動を想定した IES のシミュレーションにより、地震動の強さと被害の程度を評価するフラジリティカーブを構築できることを示した。既存構造物の管理者が耐震補強の計画を立案する際、IES を利用して得られる個々の構造物のフラジリティカーブを比較することで、各構造物の優先順位を合理的に付けることが可能となった。

第 3 の応用は、開発中の地震応答解析手法の検証に供するモデルセットの構築である。従来、相応数の入力モデルを使って地震応答解析手法の検証は行われる。構造物の構造形式や材料特性、そして、その組み合わせは多岐多様であるため、IES を使って自動構築される多数の入力モデルは、この検証をより確実なものとする。CMD を介した入力モデルの構築を堅牢なものとするすることで、質の高い入力モデルを多数自動構築できることが示された。

以上、本論文は HPC を備えた IES とその応用を具体的にシステムとして開発したこと結論として整理している。また、IES のスケーラビリティや、東京 23 区の IES_WEB の性能は定量的に検討した結果を踏まえ、限られた範囲ではあるが、開発されたシステムの有効性も実証したことを整理している。この二点が本論文の結論である。