サイエンティフィック・システム研究会 2011 年 8 月 25 日
SS 研 HPC フォーラム 2011

構造物と都市の地震シミュレーション

堀 宗朗

東京大学 地震研究所

[アブストラクト]

地震災害の軽減の第一歩は被害予測である．大規模数値計算を利用したシミュレーションは，合理的な被害予測の手法として期待されている．重要構造物のシミュレーションでは，1,000万超の自由度を持つモデルで揺れや損傷・崩壊過程を解析する．都市の地震シミュレーションでは，建物群から構成される都市モデルを構築し，都市全体が揺れる過程を解析する．本講演では，この地震シミュレーションの現状と展望を概説する．

[キーワード]

有限要素法，並列計算，都市モデル，マルチエージェントシミュレーション

1. はじめに

3.11 の東日本大震災を契機として，我が国の地震防災は根本的な見直しが必要であるとの声がある．津波は甚大な被害をもたらし，被災地の復旧・復興も容易ではない．継続時間の長い震動による地盤の液状化も重要な課題である．被害の分析を進めると同時に，次の大地震に備えることも不可欠である．情報化が加速するとともに少子高齢化が進む我が国そのもの変化を見据えた，より合理手的な備えとなることが望まれている．

東日本大震災の被害の分析と次の大地震に備えるために，高度なシミュレーション技術の利用が期待されている．これは構造物と都市の地震シミュレーションである．構造物のシミュレーションでは，構造物の詳細なモデルを使い，想定された地震動に対する損傷・被害を予測する．都市のシミュレーションは，想定された地震が引き起こす都市内の地震動分布，建物・構造物の地震応答，そして避難や復旧等の被害対応を予測する．

このような構造物と都市の地震シミュレーションを実現するためには，革新的な数値解析手法の開発が必要である．数値解析手法の開発は「京」計算機のプロジェクトとしても取り上げられており，さまざまな取り組みがなされている．革新的な数値解析手法の開発には，新しい理論や新しい実験も不可欠である．本稿では，この視点も含め，構造部と都市の地震シミュレーションの現状とその将来展望を紹介する．

2. 現状

地震動に対する構造物のシミュレーションは，耐震設計では標準的に利用されている．しかし，設計では，構造物の 2 次元モデルを使うことや，地震動を水平加速度の最大値に置き換える等，簡略化されたシミュレーションが行われる．建築・土木構造物が巨大であるため，シミュレーションの簡略化は必要である．それ以上に，複雑な非線形挙動を示す梁・柱・壁等の部材のシミュレーションは難しく，実験によるモデルのパラメータチューニングが不可欠であり，このため，簡略化を余儀なくされる．より合理的に耐震性を評価するためには，そして，数値計算に比べ実験が高価になる傾向を考えると，大規模数値計算を前提とするものも，実験によるパラメータチューニングを最小限とするシミュレーションが望まれている．

地震に対する都市のシミュレーションは，できるだけ細かい空間分解能で地震動分布を推定し，一棟一棟の構造物の地震応答，そして被害が発生した場合での人や組織の対応を予測することになる．現在，過去の被害データの分析に基づく統計解析により，地震動分布，地震応答，被害対応を内挿・外挿することが主流である．

しかし，統計解析に基づくシミュレーションでは都市の変化に追随することには限界がある．この限界を超えるため，地盤や構造物に関する都市基盤情報を利用した都市モデルを構築し，物理過程や人・組織の活動を解析するシミュレーションが期待されている．

3. 将来

構造物のシミュレーションは，数値解析手法として非線形有限要素法を用いる．これは偏微分方程式の数値解法であり，大規模並列計算の利用等，解析手法としての非線形有限要素法の高度化は進んでいる．残された課題は，コンクリートや地盤等の建設材料の材料特性のモデル化と微小な亀裂の発生・進展がもたらす損傷・破壊過程の取り扱いである．設計データから 1,000 万超の自由度を持つ忠実な構造物の解析モデルが作成できれば，構造物のシミュレーションによる耐震性の予測は十分信頼性の高いものとなる．このようなシミュレーションにより，部材レベルや構造物の縮小モデルの実験は最小限ですますことができる．

非線形有限要素法に組み込まれる材料特性のモデルは，構造工学一般の分野でも未解決の問題が含まれている．地震動という繰り返しが作用すると，材料の特性は複雑に変化するからである．また，微小な亀裂の発生・進展も，不連続性・特異性を含むため，数値解析は決して単純ではない．著者のグループは，大規模数値計算を活用できる新しい解析理論を提案している．これは，材料特性の再定式化と関数の離散化手法に関わるものである．数値解析手法の高度化に物理と数理の観点からの検討は不可欠であるが，この解析理論は，この観点の検討から導かれたものである．

都市のシミュレーションは，次世代型のハザードマップの構築が目的となる．これは「京」計算機のプロジェクトの目標でもある．過去のデータの統計分析に頼った現在のハザードマップと異なり，被害を客観的に計算するシミュレーションに基づく次世代ハザードマップは，起こりうる被害をより明確にする上で有効である．なお，このシミュレーションは，災害・応答・対応に関して蓄積された膨大な数値解析手法を有効利用する．一つの都市に対し，各種数値解析手法の入力となる複数の都市モデルを構築し，その結果を集めてハザードマップを作成することになる．シミュレーションの基盤は，数値解析手法の統合システムであり，高度なシステム開発が必要である．統合システムの構築理論とともに，有効性を実証するような数値実験も必要である．

極低頻度災害である大地震に対し，地震災害過程のシミュレーションの有効性を検証することは決して容易ではない．治水等と連携した総合防災を進めるためにも，地震以外の自然災害に都市の地震災害過程の解析が利用できることが望まれる．これにも統合的なシステムの開発が必要である．

4. おわりに

「京」計算機のプロジェクトでは，世界のコンピュータサイエンスをリードするような，高度な数値解析手法の開発が必要である．構造物と都市の地震シミュレーションに関しても同様である．耐震設計や都市計画に関する知見を活かし，新しい理論・実験の協力を受けた，大規模数値計算を活用するシミュレーションを実現することが，求められているのである．

高度な数値解析手法の開発は，必ず副産物を生む．現在，上級 PC では，100 万程度の自由度の解析モデルの線形応答解析を数日で終了する能力がある．中程度の PC クラスタでは， 100 万棟の建物の線形地震応答解析に 1 日は要しない．さらなる高速化・大規模化には疑問の余地がない．実務も念頭に，進化する計算環境を有効利用する数値解析手法の高度化が望まれる．

[参考文献]

(1) M. Hori, Introduction to computational earthquake engineering, 2nd edition, Imperial College Press, 2011.

(2) 防災科学技術研究所，兵庫耐震工学研究センター，http://www.bosai.go.jp/hyogo/

(3) 海洋研究開発機構，「HPCI 戦略プログラム」（分野 3），http://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/index.html