

建設分野の設計・施工・研究開発を支える数値シミュレーション

Numerical Simulations Supporting Design, Construction and R&D in Construction Field

鈴木 紀雄
Norio Suzuki

I. はじめに

高性能コンピュータを自由に使えるようになった現在では、「数値シミュレーション」が理論・実験と並ぶ第三の道具として、理学・工学から経済学・社会学までの幅広い分野で実業務や研究開発に活用されている。建設分野でも様々な目的で数値シミュレーションを用い、研究開発や計画・設計・施工に役立てている。

この特集では、数値シミュレーションの概要と建設分野での活用例を述べる。

II. 数値シミュレーションの概要

1. 数値シミュレーションとは

「シミュレーション」は「模擬」という意味で、対象を模したモデルを作り、実現象で働いていると考えられる法則を用いてモデルの挙動を予測すること、さらに、モデルの挙動から実現象を近似的に予測することを指す。

一般的に理学・工学の法則は方程式で表されるが、代数的な方法（注1）で解を求めることが不可能なものが多い。このような問題を、記号ではなく数値を使って近似的に解く方法を「数値解析」（注2）と呼ぶ。通常、膨大な計算を処理するためにコンピュータの使用が必須なので、「コンピュータ解析」とも呼ばれる。

したがって、「数値シミュレーション」とは「コンピュータを使って、実現象を予測すること」を意味している。

2. 数値シミュレーションの長所

実験と比較すると、一般的に、数値シミュレーションには次のような長所があるため、実務や研究開発に適している。

- ① 解を得るまでの時間が短い
- ② コストが低い
- ③ ①, ②により、やり直しや追加が容易である
- ④ 実験できない大規模あるいは複雑な対象を扱える
- ⑤ 実験ではセンサーを設置した位置のデータしか得られないが、解析では多数の位置のデータが得られる
- ⑥ 実際には計測できない物理量や目に見えない現象のデータが得られる
- ⑦ 可視化が容易である

3. 数値シミュレーションの信頼性の確保

常に数値シミュレーションに付いて回る解の信頼性という課題には、次のように対処している。

(1) 解析プログラムの精度の確認

数値シミュレーションを安心して利用するには、コンピュータプログラムが信頼できる結果を出すことを確認しなければならない。この確認作業は“V&V (Verification and Validation)”と呼ばれている。

一つ目の“Verification”とは狭い意味での「検証」のことであり、理論的な正解が得られている問題をコンピュータで解き、正解に十分近い解が得られるかどうかをチェックする。

二つ目の“Validation”は「妥当性確認」と訳される。これは実用的な精度が得られるかどうかのチェックで、実現象や実験を模擬したモデルで解析し、得られた結果を測定結果と比較して解析プログラムが実現象を近似的に再現できることを確認する。これまでは解析担当者が独自に V&V を行ってきたが、近年、学協会に Verification に用いる理論的問題や Validation で使う実験を定める動きが見られる。

(2) 実行者のスキル

数値シミュレーションは対象のモデル化から始まる。対象が複雑な場合には、本質を損なわない範囲で単純化が必要になる。また、対象を細かい要素に分割する解析法が多いが、正しい答えを得るには適切な分割が重要である。数値解析を実行するには、いくつかの数値（入力データ）を与えなければならないが、入力データには十分な知識がないと数値を決められないものが多数ある。また、解析結果を鵜呑みにせず、妥当なものであるかどうかを判断することが重要であるが、これにも知識や経験が求められる。

このように、数値シミュレーションを実施し信頼できる結果を得るにはスキルが必要なので、設計者、専門化した解析担当者、該当分野の研究者といった技術者の中で、適切な人材が担当するようにしている。

III. 建設分野における数値シミュレーションの活用

建設業は単品生産を行うため、個々の案件ごとに計画、設計、施工の各段階で様々な解析が行われている。また、研究開発では、実験と並び数値シミュレーションが重要な手段となっている。ここでは、目的別に、数値シミュレーションの適用例を紹介する。各項目につけた「特集 No.」は、4 ページ以降の概要の番号を表している。

1. 災害リスクの低減

我が国は、古来、地震や台風・豪雨に襲われてきたが、近

年では南海トラフ地震や首都直下地震の発生が迫っていると言われ、地球温暖化の影響と考えられる風水害の激甚化も著しい。感染症は法的には災害とされていないが、新型コロナウイルス感染症の蔓延は「災害級」と言われている。このような災害に備えた構造物や都市を構築するために、主に設計段階で、様々な数値シミュレーションを活用している。

地震	建設地点での地震動の評価 (特集 01) 構造物の強度や変形能力の評価 (特集 02) 地震時の構造物の振動や変形の予測 軟弱地盤の液状化リスクの評価 (特集 03)
風	建物に作用する風の力の評価 (特集 04)
水害	内水氾濫・外水氾濫時の氾濫・浸水予測 (特集 05)
火災	時々刻々の避難状況の予測 (特集 06)
新型コロナウイルス感染症	室内での飛沫・マイクロ飛沫の 飛散・拡散の予測 (特集 07)

2. 建物の省エネルギーの実現

地球温暖化防止のために、建物での消費エネルギー削減が求められている。計画・設計時や運用段階で、数値シミュレーションにより消費エネルギー量を予測している (特集 08)。

3. ウェルネス空間の構築

心と身体の健康を保ち、いきいきとした生活・人生を送るというウェルネスの概念が広まっている。建物利用者の健康・快適性を、建物の環境・エネルギー性能と合わせて評価する「WELL 認証」制度も認知されてきた。ウェルネス空間の基本である快適な温熱環境・光環境・音環境の構築に数値シミュレーションを活用している。

温熱環境	室内の温度・湿度・気流の分布の予測 (特集 09)
光環境	明るさ感、色の影響などの評価 (特集 10)
音環境	音の室内空間分布、残響時間等の予測 (特集 11)

4. 建築計画の支援

建物内や周辺での人の滞留を生じさせない動線の作成や、知的生産性の高いオフィスに必要と言われる人の交流を作るために、計画段階で数値シミュレーションを利用している。

人流	屋内・屋外での人の流れの予測 (特集 12)
人の交流	オフィスレイアウトの影響評価

5. 周辺環境への配慮

建設工事現場で発生する騒音、振動、粉じんの伝播・拡散や、工事車両による周辺交通への影響を抑制する必要がある。竣工後には、周辺のビル風、振動の敷地周辺への伝播、屋外への騒音の伝播、臭気の拡散など、周辺環境を悪化させる要因を制御しなければならない。また、トンネル工事では、地下水の流れの変化が地表環境に及ぼす影響を最小限にすることが求められる。これらの要求に応える建設計画、施工計画を作るために、数値シミュレーションを用いている。

工事中	周辺への地盤振動伝播の予測 (特集 13) 周辺への騒音伝播、粉じん拡散の予測
-----	--

	自動車の流れの予測 (特集 12)
竣工後	周辺のビル風の予測 (特集 14) 周辺への地盤振動伝播、臭気拡散の予測 周辺への騒音伝播の予測 (特集 11)

6. コンクリートの劣化防止

鉄筋の腐食・膨張はコンクリートの耐久性に悪影響を及ぼす。原因となるひび割れや塩害を抑制するために、数値シミュレーション結果を材料選定や施工計画に反映させている。

ひび割れ	マスコンクリートの温度応力予測 (特集 15)
塩害	コンクリート内部の物質移動予測 (特集 16)

7. 施工の支援

作業員の安全を脅かし工程の遅延をもたらす現場事故の撲滅や、施工精度の確保のために数値シミュレーションを活用している。

トンネル工事	岩盤・地盤や支保構造物の変形・応力の 予測 (特集 17) 地下水流動の予測 ¹⁾
山留め工事	周辺地盤の変形量の予測 ²⁾
海上工事	作業船の揺動量の予測 ³⁾

8. 研究開発での活用

ここまでは実務での数値シミュレーションの活用法を紹介したが、ここでは研究開発ツールとしての使い方を挙げる。

(1) データの取得

費用や時間の制約から全ての必要な条件の実験を行えないときは、実施した実験結果を数値シミュレーションで再現できることを確認したうえで、実験できなかった条件で解析を行い、その結果を実験結果と同等に扱うことで必要なデータを揃えることができる (特集 18)。

(2) 現象の把握

解析を使えば、構造物内部の力の流れやひび割れの進展といった実験では計測や観察ができない情報が得られ、図や動画として可視化することも容易である。このような情報は、現象のメカニズムを理解するのに極めて有用である。

(3) 実験できない対象の検討

大型構造物を実験可能な大きさの模型にすると、部材の寸法が極端に小さくなり、物理的に実験模型を作成できないことがある。あるいは、広域の地震被害や風の流れを再現する実験は実施不可能である。このようなときは、信頼性の高い数値シミュレーションが研究開発ツールとなる (例えば 4, 5, 6)。

IV. おわりに

今後、コンピュータの性能向上、計算手法やプログラミング技術の進歩、新たなモデル化手法の開発や改良などにより、より大規模、より複雑な対象の挙動を短時間で推定できるようになるであろう。また、これまで計算できなかった現象の予測も可能となっていくであろう。

一方、実測データや実験データを活用する予測法の研究や実用化が進められている。機械学習、深層学習に代表されるAIが既知のデータから計算モデルを構築し、この計算モデルを使って同種の現象を予測する「データ駆動型(注3)」の手法が注目されている。この方法は生命科学・材料科学・化学などの分野で研究に適用されているが、建設分野では一部試行の段階である。また、数値シミュレーションと実測データを組み合わせることで予測精度を向上させる「データ同化(注4)」は気象予報・予測、海洋の水循環の解析などで応用されており、建設分野でも研究が進められている。

将来は、数値シミュレーションとデータを活用した解析を適宜使い分け、精度の高い予測解析を効率的に行っていくことになると考えられる。

注

(注1) 代数的解法：四則演算とべき乗の有限回数の繰り返し、あるいは代数学の定理・公式により、問題の解や証明を得る解法。例えば、2次方程式 $ax^2 + bx + c = 0$ の解の公式 $x = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})/2a$ を導く過程や、 a, b, c が数値のとき、この公式で数値解を求めることは代数的解法である。

(注2) 数値解析：例えば、関数 $y = f(x)$ について、 $y = 0$ を Fig.1 のように繰り返し計算で解く方法は数値解法である。正解値に無限に近づけるが、完全に一致することはない。

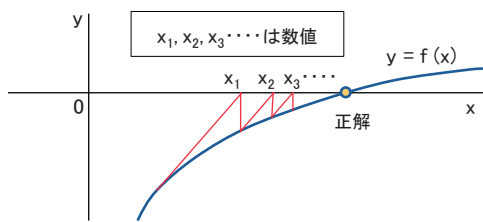


Fig.1 方程式の数値解法の例 (Example of Numerical Solution for Equation)

(注3) データ駆動型：数値シミュレーションは、人が作った理論(仮説)に従って挙動する計算モデルで予測を行う「仮説駆動型」の「演繹的」な手法である。これに対し、実験や実測のデータから計算モデルを作り、それを使って類似の事象を予測する方法は「データ駆動型(データドリブン)」の「帰納的」な手法である。膨大な数値計算を必要とする数値シミュレーションに比べ、モデル構築後は計算時間が少なくてよいという利点がある。

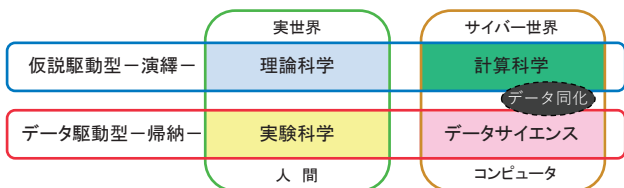


Fig.2 4つの科学的アプローチ (参考文献7)を改変 (Four Scientific Approaches)

(注4) データ同化：実測データを使って数値シミュレーションの精度を向上させる方法の一つ。例えば気象を予測するときは、現在の状態を出発点(初期値)として次の時刻の気象を計算する。数値シミュレーションだけで予測を続けるのであれば、前の時刻に予測した現在の状態を初期値とするが、時間が進むにつれて予測と真の値の差が蓄積され、予測精度は低下していく。そこで、予測された現在の状態と実測データから作った初期値を使って次の時刻の状態を予測するというプロセスを繰り返すことで、高い精度を維持できる。

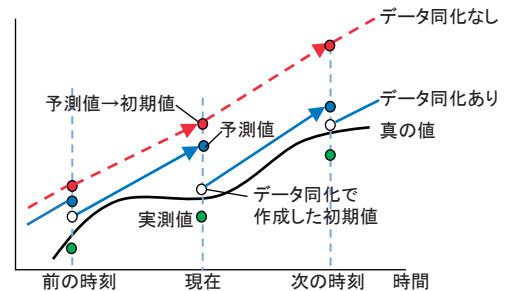


Fig.3 データ同化のイメージ (Image of Data Assimilation)

参考文献

- 1) 升元一彦ほか; 割れ目ネットワークモデルによる地下水流動及び物質移動の解析の評価, 鹿島技術研究所年報, 第62号, 2015.12, pp.21-26.
- 2) 實松俊明ほか; 施工過程を考慮した逐次計算に基づく山留め解析法とその適用性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第699号, 2014.9, pp.593-602.
- 3) 福山貴子ほか; 複数の浮体を対象とした動揺解析の現地施工計画への適用, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, 2015, I_239-I_244.
- 4) 堀裕輔ほか; 容器の貯蔵物との連成を考慮した3次元FEMによる動的性状評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019.9, pp.935-936.
- 5) 飯山かほり; 統合地震シミュレーション (IES) 技術の紹介〜システムとしての開発と現状〜, コンクリート工学, Vol.56, No.9, 2018, pp.783-788.
- 6) 伊藤嘉晃; LESを用いた広域街区中の高層建物の風圧予測, HPCI研究成果・令和2年度利用報告書, <https://www.hpci-office.jp/output/hp200226/outcome.pdf?1633174740>
- 7) 北川源四郎; データサイエンス時代の横幹連合, 横幹, Vol.12, No.2, 2018, pp.85-88.