

数値シミュレーションにおける 信頼性の確保について

大瀧 健

1. はじめに

解析技術の進歩、コンピュータの進歩により数値解析が多用されるようになり、静的・動的解析を対象とした多くの高機能解析ソフトウェアが日常的に設計ベースで使用されるようになってきている。さらに、複雑な構造物を対象としたFEM解析においては、梁要素、板要素、ソリッド要素にインターフェース要素を組み合わせた解析モデルを構築し、材料非線形や幾何非線形解析、複合非線形解析を行うことも少なくない。

このような解析では、性能設計や維持管理（モニタリング）的な側面から設計荷重による応力や変位を直接求めて許容値と比較したり、これまで実験などで検証していた耐震補強設計を解析のみで検証したりするケースが多い。すなわち、従来の設計で想定するような保守的な結果ではなく、より精度の高い結果が求められるようになってきており、これは構造物の要求性能を照査するという性能照査型の設計思想にマッチしている。

このようにソフトウェアのソルバーおよびプリポストが進化し、高度で高機能な解析ツールが容易に使用できる環境が整う一方で、解析内容がブラックボックス化していることも事実であり、モデルの構築や境界条件、要素分割、パラメータ設定は使用者の判断にゆだねられるだけでなく、使用するプログラムの選択、妥当性、適用性もユーザーの判断に任されているのが現状である。すなわち、初心者にも容易に高度な解析が行えるようになった反面、実務においてどの程度、信頼性のある解析が行われているかは不明なままである。

性能照査のようなクリティカルな解析結果が求められる現状では、社会資本を形成する構造物を対象とする場合、不適切な解析によって得られた結果は重大な事故にもつながりかねない。そこでいかにしてその信頼性を確保するかということが重要になってくる。この解析結果の信頼性を確保

するための方法論のひとつがV&V(Verification & Validation)と言われるものであり、近年その重要性が認識されてきている^{1),2)}。ここではV&Vの考え方を学会等の現状も踏まえて概説するとともに、我々が取り組むべき課題について述べる。

2. 国内におけるV&Vの取組み

V&Vは工学シミュレーションの品質および信頼性保証の方法論として米国機械学会ASME³⁾や英国NPOのNAFEMS⁴⁾などが牽引役となって欧米において先駆的に取り組まれてきた。わが国でも日本原子力学会、日本計算工学会等を中心にV&Vの規格策定のための活動がなされ、日本計算工学会が2014年以降、「工学シミュレーションの品質マネジメント」ほか3冊の標準書^{5)~7)}を刊行し、2016年には日本原子力学会が「シミュレーションの信頼性確保のためのガイドライン⁸⁾」を策定している。次節で述べるが計算工学会の標準書はISO9001に沿って工学シミュレーション業務を行う場合の要求事項をまとめたものであり、原子力学会のガイドラインはASMEの考え方を基本としたV&Vである。

土木学会では2014年より応用力学委員会において「土木分野の数値解析におけるV&Vに関する小委員会⁹⁾」が活動を開始し、また2016年より地震工学委員会において「地盤・構造物の非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法の体系化に関する研究小委員会¹⁰⁾」が活動中である。2021年には応用力学委員会と地震工学委員会と合同でガイドラインを出版する予定となっている。

日本コンクリート工学協会においても、コンクリート分野におけるシミュレーションのV&Vを提示することを目標として、2019年より「コンクリート工学におけるシミュレーションの検証と妥当性確認に関するFS委員会¹¹⁾」が活動を開始している。

3 数値シミュレーションにおける V&V の考え方

3.1 ISO9001 における V&V

ISO9001 は品質マネジメントについての規格であり、ここにおける V&V は解析プロセスが正しく行われたことを確認することが検証 (Verification) であり、最終的に成果品として要求事項を満足しているかを検査することが妥当性確認 (Validation) である。わが社における品質管理体制も ISO9001 に基づき、図-1 に示すフローに従って対象業務について実施するようになっている。ここで、「検証」では管理技術者が「検討のプロセスにおいて必要とされる根拠 (準拠基準等)、検証方法、仮定等が適切かを判断し、問題があった場合には処置策を検討するとともに適切な処置がなされたかを確認すること」を、妥当性確認では、照査技術者が「成果品が最終的に発注者の要求事項と合致しているかを確認すること」を定めている。

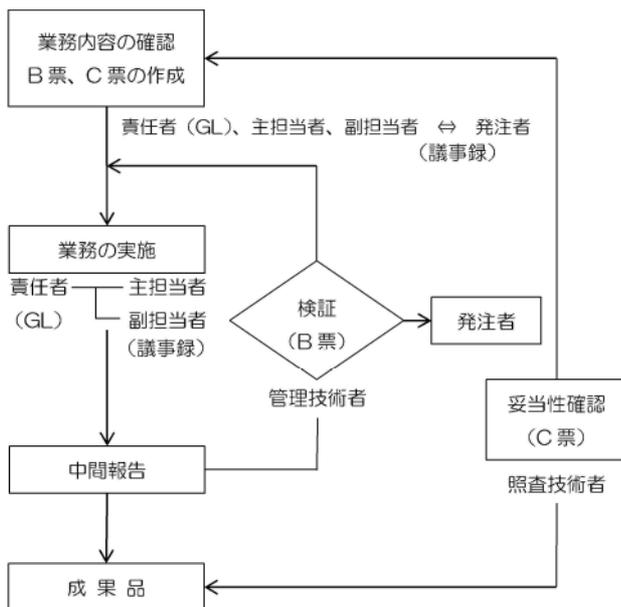


図-1 品質管理フロー¹²⁾

3.2 ASME における V&V

ISO9001 が「顧客」を最上位に位置付け、解析のプロセスを重要視しているのに対し、ASME における V&V は着目すべき現実 (Reality of Interest) を表す解析モデルの構築に主眼を置いたものであり、検証と妥当性確認を以下のように定義している³⁾。

- ・検証：計算モデルが、基礎となる数学モデルとその解を正確に表現していることの検証

- ・妥当性確認：解析モデルが、所期の目的に照らして現実問題を正確に表現しているかの確認

ASME ガイドラインに示される V&V のプロセスを図-2 に示す。ここで、解析モデルは概念モデル (Conceptual Model)、数学モデル (Mathematical Model)、計算モデル (Computational Model) の順に構築される。「概念モデル」とは実現象を理想化した物理モデルであり、「数学モデル」は「概念モデル」を記述するために必要な数式 (偏微分方程式) である。この数学モデルを離散化してコンピュータで解くためのコードが「計算モデル」である。

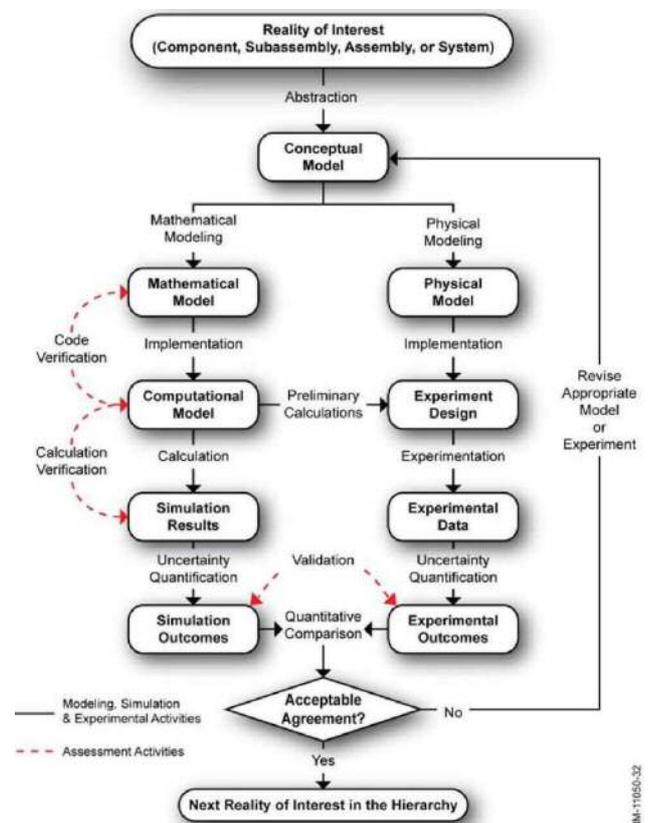


図-2 ASME V&V-10 における検証と妥当性確認³⁾

検証のプロセスはコード検証と解検証に分かれ、コード検証は厳密解との比較等により数学モデルや求解アルゴリズムが正しいことを検証するものであり、解検証は離散化による誤差を検証するものである。ただし、これらの検証はいずれも「着目すべき現実」の適切なモデルであることを保証するものではないため、妥当性確認が必要となる。言い換えれば検証は数学の領域であり、妥当性確認は物理学の領域である。妥当性確認は検証され

た計算結果と実験等による結果をそれぞれの不確かさを考慮したうえで比較することによって行う。この妥当性確認によって「実現象」に対する「概念モデル」の信頼性が示されるのである。

4. コンサルティングにおける V&V

我々の主な業務は数値シミュレーションによるコンサルティングであり ISO9001 に基づく V&V は品質管理プロセスとして当然必要となる。一方、ASME の V&V については市販の解析コードを使用することが前提となるため検証や妥当性確認は基本的にはできない。したがって市販の解析コードを使用した解析での信頼性確保には、ユーザーによるモデル化や使用方法（パラメータ設定）についての責任が大きい。限界状態設計法の安全係数のひとつである構造解析係数（一般に 1.0）は人為的なミスを想定しておらず、基本的にソフトウェアの使用者に起因する誤差をカバーすることはできない。特に全体系を対象とした大規模モデルでは局所的な現象を見逃す可能性も少なくない。数値解析におけるミスの発生理由の調査¹³⁾によれば、ソフトウェアの問題のほか、使用者のレベルや意識の問題が挙げられている（表-1）。また、汎用ソフトを使用した耐震解析のベンチマークテストの結果として解析結果にばらつきの生じた原因が示されており（表-2）、このような解析誤差を防ぐためにはモデル化のルール（分割数、構成則、収束条件、時間刻み、質量分布、境界条件等）の統一が必要であることが指摘されている¹³⁾。

表-1 数値解析でのミスの発生理由¹³⁾

ソフトの問題
<ul style="list-style-type: none"> 完全なブラックボックス 少々の間違いでも計算可能 最終結果に至る途中の過程がチェックできない
使用者のレベルと意識の問題
<ul style="list-style-type: none"> 解析理論の理解不足 数値解析（FEM 解析）であることの意識が薄い 見た目の良いCGによる出力結果を信じてしまう 実験やベンチマークと比較しない 応答値が小さく出るソフトを用いる 解析の重要性に対する認識が薄い

表-2 解析結果にばらつきの生じた要因¹³⁾

モデル化や解析法で規定されない項目
<ul style="list-style-type: none"> 梁要素の選択の差異（せん断変形の考慮の有無） 材料構成則の差異（ヤング係数 E=200 or 206GPa） 減衰の差異（Rayleigh 減衰の着目モードの差異） 要素分割、断面分割、時間分割の差異 収束計算の有無や誤差の指定の差異 構造のモデル化の差異（桁や支承部のモデル化など） 質量のモデル化の差異（分布質量 or 集中質量）
間違ったモデル化
<ul style="list-style-type: none"> オフセット要素の誤使用（過剰拘束）

解析モデルの標準化については、例えば鋼橋については標準化の方法が提案されており^{14)・15)}、道路橋示方書¹⁶⁾においても設計振動単位の考え方や固有周期の算定方法、支承、基礎ばねの設定についての記述がある。また、コンクリート標準示方書¹⁷⁾には構造解析例としてモデル軸線の取り方やばね支持の例等が示されている。一方、海外では米国カリフォルニア交通局から出されている「橋梁の非線形解析のためのガイドライン¹⁸⁾」には動的非線形解析のモデル化について詳細なルールが示されている。

解析技術者はこれらを参考にして、解析コードが目的に合った結果を提供するかを簡易なモデルでの検証を積み重ねてモデル化のセンスを磨くことが重要である。また、コンピュータや解析コードに習熟しているだけではなく、解析対象の物理現象についての理解が必要であり、解析結果が適切であるか判断できる能力も求められる。すなわち解析理論、プログラム、実験、設計を一貫して経験した技術者が理想的であるが、技術が多様化、高度化、深化している今日ではそれも難しい。日本機械学会は「計算力学解析結果の信頼性を担保するためには計算力学ソフトウェアの品質保証に加えて計算力学技術者の力量管理が大変に重要である」との認識のもと、2003年より「計算力学技術者検定」を実施している。現在は個体力学、熱流体力学、振動の分野に限られるが、シミュレー

シミュレーションに係わる人材の能力向上および資格の面からシミュレーションの品質確保に貢献していると言える。

5. おわりに

土木分野に限らず数値シミュレーションの果たす役割は今後ますます大きくなるとともに、より高度で複雑な解析が求められるようになってくる。それと同時に解析結果の品質および信頼性の確保が重要となり、それを実現するために必要な方法論については述べたとおりである。特にシミュレーションによるコンサルティングを行う上で、その品質は最低限保証されなければならない、そのためには ISO9001 に基づく品質管理はもとより、モデル作成の重要性に対する認識、資格取得による能力向上等、数値解析に携わる技術者一人ひとりが数値シミュレーションの信頼性確保についての理解を深め、実務の中で実践していくことが重要である。

参考文献

- 1) 越塚誠一ほか：V&V の最近の進展，計算工学講演会論文集，Vol. 21 2016. 5
- 2) 渦岡良介ほか：土木の工学シミュレーションにおける V&V の重要性と課題，土木学会第 71 回年次学術講演会，2016. 9
- 3) Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10-2006, American Society of Mechanical Engineers (2006)
- 4) NAFEMS QSS:2007, Engineering Simulation - Quality Management Systems - Requirements, NAFEMS (2007)
- 5) 日本計算工学会：工学シミュレーションの品質マネジメント第 3 版，2017. 3
- 6) 日本計算工学会：工学シミュレーションの標準手順 第 2 版，2015. 5
- 7) 日本計算工学会：学会標準 (HQC001&002) 事例集，2015. 2
- 8) 日本原子力学会：シミュレーションの信頼性に関するガイドライン:2015, 2016. 7
- 9) V&V のススメ：土木分野における数値解析の課題，土木学会全国大会研究討論会，応用力学委員会，2015. 9
- 10) 地盤・構造物の非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法の体系化に関する研究小委員会・活動報告，土木学会地震工学委員会第 1 回研究会，2020. 5
- 11) 日本コンクリート工学会：コンクリート工学におけるシミュレーションの検証と妥当性確認に関する FS 委員会，JCI-TC195F
- 12) 株式会社クレアテック：受託業務実施・品質管理マニュアル，2014. 4
- 13) 後藤芳顕：構造設計における FEM 解析の高度化と信頼性向上，第 15 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文集，2012. 8
- 14) 日本鋼構造協会：鋼橋の耐震設計の信頼性と耐震性能の向上，JSSC テクニカルレポート No. 85，2009
- 15) 日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震解析と信頼性の向上，JSSC テクニカルレポート No. 93，2011
- 16) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017. 12
- 17) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，2017. 3
- 18) CALTRANS : Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California, 2008. 8