

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

清水建設 技術研究所 正 ○櫻井英行・正 桐山貴俊
徳島大学 正 渦岡良介・名古屋大学 正 中井健太郎・東北大学 正 森口周二

1. はじめに

工学シミュレーションを駆使したモノづくりは、CAE (Computer Aided Engineering)として定着し、産業界に欠くことのできない技術となった。自動車・家電等の製造業は、CAEなしには成立しないと言っても過言ではない。

一方で、開発や設計の現場では、**計算モデル**の基となる**数学モデル**や離散化手法、アルゴリズム等の特性を理解せずにシミュレーションを実行し、結果の確認・検証を十分に行わないまま使用してしまう場合があり、製品やその使用者に重大な悪影響を与えた事例もある¹⁾。製造技術において最も重要な概念である品質と信頼は、CAEの根幹をなす工学シミュレーションにおいても保証されなければならない。

この工学シミュレーションの品質・信頼性保証の方法論としてV&V (Verification & Validation: 検証と妥当性確認)があり、欧米では先駆的に取り組まれてきた。英国NPOのNAFEMS²⁾と米国機械学会ASME³⁾の活動は世界的に広く認知されており、それらのマニュアルやガイドラインは、製造業にも急速に浸透している。我が国でも原子力学会⁴⁾や計算工学会⁵⁾がガイドラインや標準書を整備しつつあるが、残念ながら、土木工学においては、コンクリート分野等でV&Vに関する取り組みが始められているものの、全般的には、他の工学分野と比して遅れていると言わざるをえない。土木学会応用力学委員会が、2014年度から「土木分野の数値解析におけるV&Vに関する小委員会」を立ち上げたばかりである。ただ、昨年、一昨年の年次大会で企画されたV&Vに関する研究討論会には、予想を大きく超える100名以上の参加者が集った⁶⁾。学会員の工学シミュレーションのV&Vに対する意識が非常に高いことは間違いない。

本稿では、このような実状を踏まえ、土木工学におけるシミュレーションの品質と信頼性保証の重要性を再確認し、V&V実施における課題について考える。

2. 土木工学における重要性

我が国の土木技術は世界最高水準にある。しかし、他の製造業のように工学シミュレーションが実際の構造物の開発や設計等に十分活かされてきたと言えるだろうか。こういった指摘もある。2010年の応用力学講演会で、当時東京工業大学の三木教授は、鋼橋の設計が進歩していないことに触れ、「日本の鋼橋標準設計は高価で重たく、国際競争には勝てない。示方書や便覧の設計式に捕らわれずに、FEMベースの設計への移行が重要である」と力説された⁷⁾。

また、今後、省人・省力化施工に対応するため、プレキャスト化が進むとすれば、機能性、経済性に優れたプレキャスト部材の開発に注力されると思われる。工場であれば、より合理的な構造・形態の部材製造が可能になり、その開発にCAEが多用されるはずである。

構造物の長寿命化の面でも、モニタリング・データに基づく構造物の状態の推定、また、その将来予測に工学シミュレーションの果たす役割は大きくなると考えられる。それには設計以上にシミュレーション結果に高い品質と信頼性が要求される。一般に設計のためのモデルは保守的な条件設定がなされるが、モニタリングでは計測データと整合するようなシミュレーションが必要である。保守的ではなく、現実合致したより高度な**計算モデル**が必要になる。

以上のように土木工学でもシミュレーションの果たす役割は、今後、増大するだけでなく、より高度なシミュレーションに対して、より高い品質と信頼性が要求されることが予想される。V&Vのような方法論の整備が重要になると考える。

3. 土木工学における課題

まず、代表的な二つのV&Vの考え方を示す。品質マネジメントにおけるV&V (**品質V&V**)とモデリングとシミュレーションにおけるV&V (**モデルV&V**)である。前者は、ISO9001に準拠した解析プロセスの品質管理を主眼においており、受託解析などの業務的なV&Vと言える。日本計算工学会標準⁵⁾がこれにあたる。**モデルV&V**はASMEのV&V²⁾に代表されるシミュレーション・モデル構築の方法論に主眼をおいたものであり、本質的なV&Vと言える。

ここでは、**図-1**に示す**モデルV&V**を中心に土木の工学シミュレーションの困難さを考えてみる。**モデルV&V**では、**概念モデル**→**数学モデル**→**計算モデル**の順にシミュレーションのためのモデルを構築する。**概念モデル**設定では、実現象の理想化、着目する物理量とその解析結果に対する正確さの要件等が検討される。このとき重要になるのが、**計算モデル**の用途(以降、IU: Intended Use)である。IUが決まっていなければ、すべてが始まらない。ASMEはIUをV&Vの最上位に位置づけている。**数学モデル**は、偏微分方程式であり、**計算モデル**は、それを数値解析手法で離散化し、コンピュータに実装したものである。検証は2段階に分かれ、最初の**コード検証**は、計算モデルに誤りがなく、IUを満足する精度の解を与えることができるかを評価する行為である。

キーワード: V&V, Verification and Validation, 検証と妥当性確認, シミュレーション, 数値解析

連絡先: 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株)技術研究所 社会システム技術センター TEL(03)3820-8419

次の検証は、目的の解析を実施する際の**解検証**である。ASMEは、**解検証**のゴールを離散化に伴う数値誤差の算定としており、異なる格子サイズで解析した結果を用いて格子収束性の評価指標も求めるGCI (Grid Convergence Index)⁸⁾を検証手段の一つとしている。最終的な**妥当性確認**では実験との対比を行う。シミュレーションと実験の双方に不確かさの定量化が要求される。**妥当性確認**では、**概念モデル**の検討段階で設定した正確さ要件を満足するか否かの観点で明確に合否判定が行われることになる。

さて、以上のASMEのV&Vに当てはめて土木の工学シミュレーションを考えてみる。言及するまでもないが、土木分野のシミュレーションに特徴的な難しさは、地盤のような多種多様な非線形材料を扱う必要があること、空間的・時間的にスケールが大きいことにある。

(1) コード検証 (Code Verification)

コード検証は、理論解等の厳密解が得られている問題で行うのが一般である。しかし、単純な線形問題に限られてしまう。近年、創成解を用いる方法⁸⁾が注目されているが、地盤のように多種多様な非線形材料を扱う場合、すべての因子を検証することは難しい。複数の解析手法の結果を比較するCode-to-Code照査が有効であると考えられる。適切なベンチマーク問題を体系的に設定し、トレース可能な形で入出力データと記録を蓄積することが重要であると考えられる。

(2) 解検証 (Calculation or Solution Verification)

解検証では数値誤差の算定を行う。GCIを用いて行う場合でも、メッシュに粗密がある場合や三次元の地質構造のように複雑形状の複合領域に対して実行することは容易ではない。典型的な問題を設定し、系統的にGCI等を実施して、トレース可能な形で入出力データと記録を蓄積し、数値誤差を算定するための戦略に活用できることが望ましい。

シミュレーションには、**妥当性確認**の際に必要な不確かさを定量化するためのパラメタ・スタディも必要となる。人工材料であるコンクリートでも金属材料に比べれば、物性値のバラつきは大きい。地盤に至っては、三次元的な分布を正確に知ることも不可能である。初期・境界条件も正確に分かっていることも稀である。地盤のような対象では、**図-2**に示すように、IUを現地調査の進展に対応付けて、シミュレーションの戦略を検討する必要もあると考える。

(3) 妥当性確認 (Validation)

ASMEは実験との比較を**妥当性確認**としているが、このセンスであれば、長期の将来予測や実地盤を対象とするような実験が不可能な問題では、**妥当性確認**は成立しないことになる。しかし、ASMEはこうも述べている。「理論に基づく予測は、裏付けデータ(evidence)の蓄積によって信頼に値するか否かの評価は可能であり、実施すべきだ。」実際、品質V&Vでは、独立した方法での比較も**妥当性確認**に位置づけており、Code-to-Code照査も一つの方法としている⁵⁾。

実験や観測との対比が困難な土木の工学シミュレーションにおいても信頼性提示の考え方を構築する必要がある。

4. おわりに

土木分野での工学シミュレーションの果たす役割は、今後、益々増大し、より高度なシミュレーションに対して、より高い品質と信頼性が要求される。工学シミュレーションに対する品質と信頼性確保の実用的な考え方、方法論の整備が非常に重要になる。前述の(1)~(3)の課題の対応については、学界と業界が協力し、オープンな環境を整備すること、そして、V&V記録のデータベースの充実と活用を含めた**モデルV&V**の考え方の構築が必要ではないだろうか。

参考文献

- 1) 後藤:構造設計におけるFEM解析の高度化と信頼性の向上、第15回鋼構造と橋に関するシンポジウム, pp.1-13, 2012.
- 2) <http://www.nafems.org/>
- 3) <https://cstools.asme.org/csconnect/CommitteePages.cfm?Committee=100003367>
- 4) http://www.aesj.net/sc_public_review/sc-pub82
- 5) <http://www.jsces.org/Issue/others/standards.html>
- 6) <http://www.jsce.or.jp/committee/amc/report.html#haiфу>
- 7) http://www.jsce.or.jp/committee/amc/doc/miki_100518.pdf
- 8) Roache J. P. Verification and Validation in Computational Science and Engineering. , Hermosa Publishers, 1998.

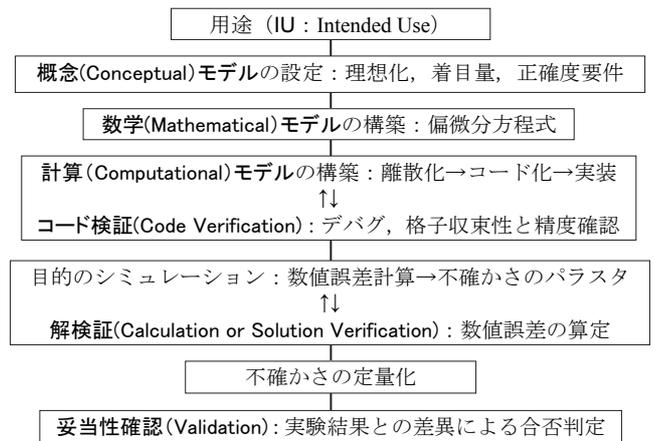


図-1 ASME V&V の流れ

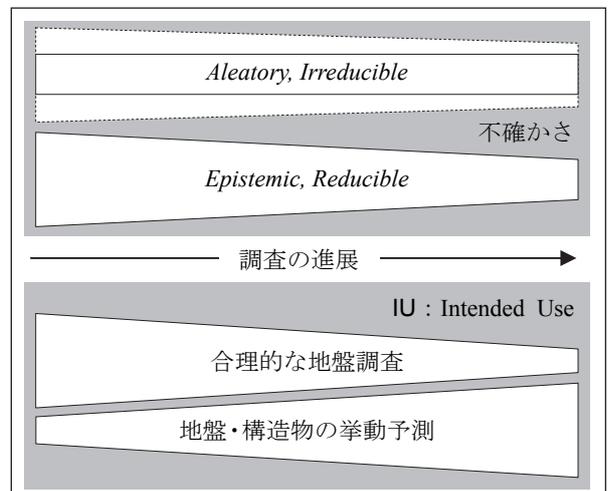


図-2 調査進展に伴うIUの変遷と不確かさ低減