

トンネル掘削解析のデータ同化における V&V の考え方

A framework of verification and validation for data assimilation of tunnel mining simulation

櫻井 英行¹⁾, 青野 泰久²⁾, 山本 真哉³⁾, 鎌田 浩基⁴⁾

Hideyuki Sakurai, Yasuhisa Aono, Shinya Yamamoto, Hiroki, Kamada

- 1) 博士(工) 清水建設 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17, hideyuki.sakurai@shimz.co.jp)
- 2) 修士(工) 清水建設 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17, y.aono@shimz.co.jp)
- 3) 博士(工) 清水建設 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17, s-yama@shimz.co.jp)
- 4) 修士(工) 清水建設 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17, hiroki.kamada@shimz.co.jp)

A framework of tunnel mining simulations with data assimilation (DA) is presented. In the tunnel construction of railways and roads, numerical analyses are used to predict the present and future state of rocks and supports as the mining progresses. Research on DA, which combines measurement data and analysis, have begun as a more reliable prediction technique. This paper discusses the total concept of the framework, including related laboratory rock tests, from the viewpoint of V&V (verification and validation) for performance assessment of the numerical models as the analysis engine of DA.

Key Words : verification and validation (V&V), data assimilation, numerical analysis, tunnel, rock test

1. はじめに

鉄道や道路等のトンネル建設において、トンネル壁面の計画的な変位計測等に加えて、施工過程を模擬した数値解析が、岩盤と支保の状態推定や設計変更、工事進捗によるそれらの将来予測に活用されている。更に、計測と解析を融合させた予測技術としてデータ同化(DA)の研究も進められている[1]。DAは、その予測エンジンとなる数値モデルに含まれる不確かさやモデルの不完全さを考慮、許容した上で現実の観測データに数値モデルを同化させながら解析を進める技術である。解析結果の信頼性を定量的に評価できる点でも、多種多様な不確かさを扱わなければならないトンネル掘削解析での実用化が期待される。

一方、現状のトンネル掘削解析を俯瞰すると、パラメタの逆解析や合わせ込みにより、計測データを表現できる数値モデルを導出している報告が多い。数値モデルの正確度(真値との差)と精度(結果のバラツキ)で表される予測性能は必ずしも検討されないままに解析が実施されているように思える。しかし、施工管理における岩盤や支保の現状把握、工事進捗による将来予測の信頼性を定量的に評価、向上させるためには数値モデルの予測性能の把握は欠かせない。DAも同じで、DAが数値モデルの不完全さを許容するとは言え、それが何に起因するもので、予測にどの程度影響するかについては事前に把握しておくことが重要であると考ええる。

著者らは、トンネルの施工管理に資する DA 解析の研究開発を進めている[1]。DAは、アンサンブルベースの逐次型データ同化を用いるが、手法開発と並んで解析全体の枠組みを V&V (Verification and Validation : 検証と妥当性確認) のような数値モデルの信頼性評価手

法を含めて構築することが極めて重要になると考えた。本論文では、その試案を示すものである。

2. 全体的な枠組み

図-1 は、トンネル施工時の DA 解析を行うための枠組みとしての試案である。目的の施工時解析を実施する前に、対象岩盤の供試体材料試験とその解析の V&V が数値モデルの性能評価や DA の解析方針の設定に有益な手続きになると考えた。材料試験は、一般には、トンネル施工時解析に用いる岩石の物性を取得し、岩盤物性や応力ひずみ関係のモデル化のために行われる。並行して試験そのものを対象とした解析が行われることは稀である。しかし、室内試験では、施工中の変位計測に比べ正確度・精度に優れた計測が可能であるほか、施工中の計測開始後からの相対変位ではなく、試験開

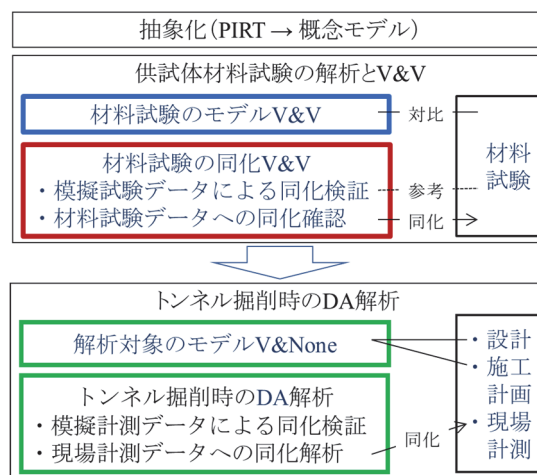


図-1 トンネル掘削のデータ同化解析の枠組み

始前からの絶対変位も分かる。更には、実際のトンネルでは設定が困難な荷重・境界条件も比較的明確である。試験装置と供試体との摩擦などが考えられるが、検討は難しくない。対象とするトンネル施工時解析を実施する前に、室内試験を対象とした数値解析とそのV&Vを実施することにより、施工時解析における多くの有用な情報が得られるはずである。最も大きいのは、試験と解析の誤差の算出により、数値モデルの予測性能を定量化できることである。さらに、V&Vでの不確かさの定量化(UQ: Uncertainty Quantification)は、DAで扱う状態変数の分布の設定等に活かすことができる。

3. 抽象化

最初の過程は、概念モデルの検討である。実現象の抽象化によって、地山の特性に応じて考えるべき現象を決定する。熱応力やクリープなどの現象ごとに考慮の要否などをPIRT (Phenomena Identification and Ranking Table) を用いて整理すると関係者間の円滑なコミュニケーションにも大変有益である。

4. 供試体材料試験の解析とV&V

概念モデルに基づき、供試体材料試験を計画し実施する。そして、図-1 に示す試験に対応する解析では2種類のV&Vを実施することとした。青枠のASME標準[2]に代表される“モデルV&V”[3]と赤枠のデータ同化に関するV&Vであり、後者を本研究では“同化V&V”と呼ぶこととした。

(1) 材料試験のモデルV&V

モデルV&Vは、着目する実現象のモデル化および解析の過程の検証、そして解析結果の妥当性確認までの一連のプロセスである。図-2は、その構成要素である。モデルV&Vの目的は、後続の同化V&Vで扱うべき物性等の不確かさの特性と数値モデルの予測性能とを評価することである。

試験結果は試験体によってばらつくため、V&Vにおいて重要となる不確かさ定量化(UQ)のためには試験を多数実施することが望ましい。しかし、通常は試験体数や時間、予算などの制約により十分な数の実施は難しい。そのため、既存の物性データベース(DB)や文献データを補完情報として用い、専門知識に基づき試験結果のばらつきの分布を検討することになる。その検討に基づく物性パラメタの不確かさの特性を試験方法などに起因する不確かさを含めて図中のUICT-T (Uncertainty Identification and Characterizing Table for Test) と称する不確かさ特性表に室内試験解析のUQのための方針として整理する。

以降、図中の主要な箱書きについて解説を加える。

【UICT-T】構成モデルのパラメタの他、試験方法、装置などに含まれる不確かさの特性を整理した表である。不確かさの性状、結果への感度、モデル化の方法(要否を含む)などの情報が含まれる。結果への感度が不明な場合は、事前に感度解析を行うことも考えられる。

【数値モデル】本稿では、解析コードと解析モデルを合わせて数値モデルと表現した。解析コードは一般には商用コードであると思われるが、使用する有限要素や解析オプションを選択することは、概念モデルに基づき、解くべき微分方程式や構成モデルを選定することに他ならないので、それらを確認しておく必要はある。

【解析コードとコード検証】コード検証は、設定した数理モデル(微分方程式、構成モデル)を精度よく正しく解けるかの検証である。商用コードの場合、コード検証は開発元で実施済みであるが、解析オプションやメッシュ収束性など、解析者が行うべき検証もある。

【解析モデルと解析検証】解析モデルは、メッシュ分割、境界条件などの入力データを指す。それを検証するのが解析検証である。メッシュの細かさ、時間刻み、収束判定許容値など、数理モデルの解が十分な正確度で得られることを検証する。

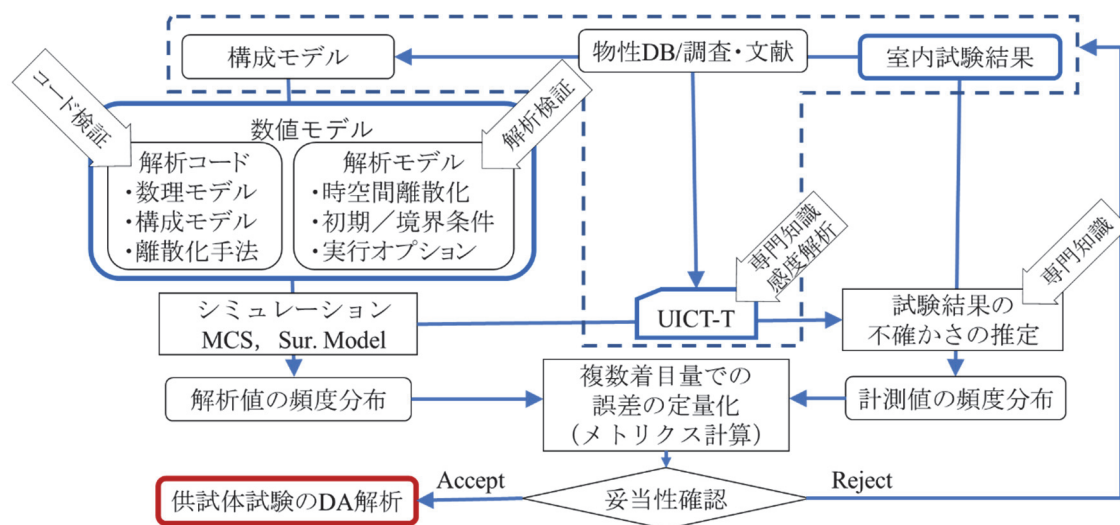


図-2 供試体材料試験のモデルV&V

【シミュレーション】ここではモデルに含まれる不確かさの伝搬解析を行って、この下の【解析値の頻度分布】を得ることが重要となる。MCS (Monte Carlo Simulation) を行うことが望ましいが、確率的現象として扱う方法や代理モデル (Surrogate Model) を用いる方法もある。時間や環境に限られる場合でも有用な方法として、近年の研究開発が盛んにおこなわれている。

【試験結果の不確かさの推定】複数回の試験結果は必ずばらつきを有する。しかし、統計量として扱うだけの十分なデータではないのが一般的である。試験結果と物性 DB, 文献データから UIC-T をまとめると同時に、専門家の経験と知識から計測結果の不確かさの定量的推定も行う。

【誤差の定量化】解析結果と試験結果の頻度分布からメトリクス (誤差指標) を計算する。施工時の一般的な計測は変位のみであるが、変位以外の複数の応答値でメトリクスを計算し、数値モデルの予測性能を評価できることは材料試験の利点である。メトリクスの計算式は着目量に応じて検討する必要がある。

【妥当性確認】妥当性確認では、メトリクスの値を許容できるかの判断を行う。岩石や岩盤を対象とする場合、上述の確かさに起因する誤差が最も大きいと考えられるが、数値モデルは、もとより実現象を抽象化した微分方程式や構成式のモデル化誤差、数値解析の離散化誤差、丸め誤差などを含んでいる。したがって、妥当性確認では、それらの誤差を勘案した“妥協”が必要である

(2) 材料試験の同化 V&V

図-3 はモデル V&V と同化 V&V の関係である。同化 V&V は、モデル V&V によって予測性能の評価が終わった数値モデルを用い、DA に関する性能を2段階で検討する。ここでは、V&V に準じて“同化検証”と“同化確認”と呼ぶ。

【模擬試験データによる同化検証】これは、双子実験とも呼ばれる。実際の試験データの代わりに、上記のモデル V&V 実施済みの数値モデルでの計算結果を観測データ (図-1 では模擬試験データ) とした DA 解析を行い、逆問題としての非適切性を評価し、物性パラメタなどの相関性などを考慮した DA 解析の合理化も図る。また、数値モデルは、微分方程式や構成モデルの段階で既にモデル化誤差を含んでおり、さらに、これに離散化誤差も加わる。そのため、一般には数値モデルは実現象を完璧に表現することはできない。同化検証では、完璧なシミュレーションを成しうる数値モデルを使用することにより、状態変数、ノイズなどのパラメタの設定を含めて、採用した DA のアルゴリズムが期待どおりの同化結果を与えうるかも検証する。

【材料試験データへの同化確認】続く同化確認では、実際の試験データを用いた DA により数値モデルの同化性能や予測性能を確認する。複数の供試体での試験結果があれば、それぞれに対して同化確認を行うことが

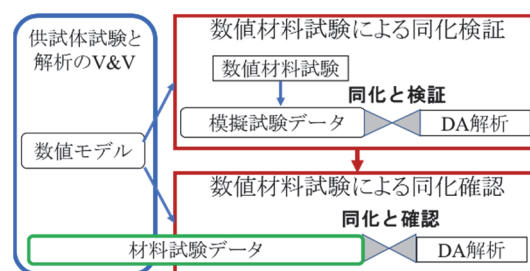


図-3 供試体材料試験のモデル V&V と同化 V&V

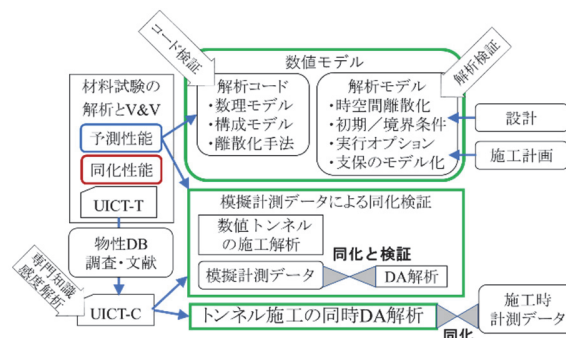


図-4 トンネル掘削時の DA 解析の方針

望ましいと考えている。同化確認によって許容しうる性能が得られない場合は、同化検証、さらにはモデル V&V や概念モデルにまで戻って、数値モデルや不確かさのモデル化を見直すことにもなりうる。

5. トンネル掘削時のDA解析

供試体材料試験の解析と V&V によって評価された数値モデルの予測性能とその数値モデルによる DA 性能に基づき、トンネル掘削時の DA 解析に進む。図-1 に示すように、まず、V&None によって解析対象の数値モデルの構築とその検証を行う。V&None とは V&V の後 V (Validation) を行わないという意味である。トンネル竣工後、あるいは、施工中の計測結果が得られない限り妥当性確認は行えないからである。トンネル掘削時の DA 解析は、ここでの検証後の数値モデルを用いて行うが、妥当性確認の前なので数値モデルの予測性能と同化性能は、前段の供試体材料試験の解析と V&V の結果に基づき評価することになると考えられる。

(1) 解析対象のモデル V&None

ここでは、トンネルの計画、設計、施工計画に基づき、トンネル掘削のシミュレーションのための数値モデルを構築する。数値モデルは、図-2 の岩石試験の数値モデルの構築と同様に解析コードと解析モデルからなる。

解析コードの岩盤に関する部分は、岩石試験のものと同じになるが、鋼製支保やロックボルト、コンクリートについては改めて検討し、必要に応じてそれらの組み合わせを含めたコード検証も必要になると考える。

解析モデルは、メッシュ分割、境界条件などの入力データを指す。メッシュの細かさ、時間刻み、収束判定許容値に加え、ここでは施工計画に基づく支保設置のタ

イメージを考慮した吹付けコンクリートやロックボルトなどの支保のモデル化法が適切であることも解析検証によって確認しなければならない。

(2) トンネル掘削時の DA 解析

現場計測データを使った DA 解析を行うに先立ち、上述の 3.(2)「模擬試験データによる同化検証」と同様に、現場計測データの代わりに上記(1)の検証済みの数値モデルによる計算結果を計測データ（図-1 では模擬計測データ）とした DA 解析を行う。

【模擬計測データによる同化検証】4.(2)で述べたとおり、同化検証では、逆問題の非適切性の良化のほか、完璧なシミュレーションを成しうる数値モデルを使用することにより、状態変数、ノイズなどのパラメタの設定を含めて、採用した DA のアルゴリズムが期待どおりの同化結果を与えるかを検証する。検証を行う前に、材料試験における不確かさの特性表 UICT-T に基づき、境界条件や初期条件や変位計測に関する事象など、UICT-T には含まれない多くの不確かさを検討し、不確かさ特性表 UICT-C (-C; Construction) として整理する。感度解析や専門知識による判断も必要になり、これだけでも大変大きな研究課題となると考えている。

また、施工中の山岳トンネルの一般的な地山の挙動の計測は、トンネル長手方向に一定間隔に配置した観測点での変位計測（A 計測）である。材料試験とは異なり、計測開始後の相対変位で同化することになる。相対変位の大きさは、観測ノイズに埋もれてしまうほど小さいことも想定される。事前に施工過程を反映した同化検証を行うことにより、A 計測で十分か否か、補助的なデータを得るための計測や調査も必要かなど、問題の不適切性良化のための方法を施工管理に反映すべき項目として、着工前に関係者間で協議できることにも繋がると考えている。

【トンネル掘削時の DA 解析】

本研究は目標であるトンネル施工時の DA 解析については、まだまだ、試解析を実施してみたという段階に過ぎないため、ここでの工学的な言及は避けることとする。ただし、実施に際しては、非常に多く、そして大きな不確かさを扱わなければならないことは間違いない。前段の「模擬試験データによる同化検証」により、十二分な検討が非常に重要になるはずである。また、材料試験の V&V で得られた数値モデルの予測性能、それに基づく DA 解析の性能も掘削時の DA 解析の妥当性の評価には欠かせないものと考えている。

6. おわりに

トンネル掘削時の施工管理に資する数値モデルの開発とそれによる DA 解析の枠組みを示した。施工過程を模擬した施工管理のための DA 解析は、トンネルの断面設計で仮定されがちな安全側の条件設定ではなく、可能な限り岩盤や支保の状態を正しく把握、予測することが要件となる。したがって、DA 解析のエンジンと

なる数値モデルの予測性能と DA の同化性能を合理的に把握できる枠組みを解析技術としての DA 手法の開発と並行して進めることが非常に重要であると考え。ここで示した枠組みは、初期段階の試案であり、不備や曖昧な部分も多い。例えば、妥当性確認や同化性能評価のためのメトリクスがある。メトリクスの具体的な算出方法もさることながら、その許容値（妥協点）の具体的な設定も非常に難しい。近年は土木分野でも V&V の実施例に関する報告[4][5][6]も増えてきているが、この許容値については明確な根拠を添えて設定されているとは言い難い。しかし、その許容値を議論する前に、メトリクスがどの程度の値になるかの蓄積が重要ではないだろうか。性能が明確になってくれば、自ずと使い道も決まってくるように思うし、許容値としての線引きにも繋がるはずだ。そのためには、このような枠組みをたたき台として、既設トンネルの材料試験や現場計測データを活用した研究とその蓄積が重要であると考え。既設であれば、V&V の妥当性確認が可能なので、掘削時解析の数値モデルの予想性能も蓄積できる。著者らも研究途上[1][7][8]ではあるが、その研究を進めていくことで、トンネルの調査計画段階から材料試験、掘削予測解析、施工、それらに並行して行う解析といった系統的な枠組みの実現につながると期待している。

参考文献

- [1] 青野，山本，櫻井：データ同化による施工中の地下構造物の挙動の予測，第48回岩盤力学に関するシンポジウム，2022.
- [2] The American Society for Mechanical Engineers: ASME V&V 10-2019, Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, 2019.
- [3] 白鳥，越塚，吉田，中村，堀田，高野：工学シミュレーションの品質保証とV&V，丸善出版，2013.
- [4] 櫻井，渦岡，森口，山本，車谷，岡崎，上田，小倉，中井，西尾：土木分野におけるV&Vの現状～土木分野のV&Vに関する事例紹介，日本機械学会誌，Vol.123, No.1222, pp.15-21, 2020.
- [5] 土木学会：地盤・構造物の非線形解析法の検証と妥当性確認の方法-ガイドラインとその実践事例-，2021.
- [6] 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および不確かさ評価に関する研究委員会報告書，2022.
- [7] 青野，山本，鎌田，櫻井：地下構造物の施工時データ同化解析における岩石試験の解析のV&Vと検証例，第28回計算工学講演会論文集，2023.
- [8] 青野，奥野：ひずみ軟化を示す地山へのトンネル掘削を模擬したデータ同化解析（シンポジウム講演概要），第26回応用力学シンポジウム，2023.