

Wed. May 31, 2023

Room F

OS21 シミュレーションの品質保証とV&V、UQ

[F-01] OS21 シミュレーションの品質保証と V&V、UQ (1)

座長:森口 周二(東北大学)

9:30 AM - 10:30 AM Room F (2F Conference Room 202B)

[F-01-01] システムズエンジニアリングと工学シミュレーションのモデルの統合*吉田 有一郎¹ (1. 東芝インフォメーションシステムズ株式会社)

9:30 AM - 9:45 AM

[F-01-02] トンネル掘削解析のデータ同化における V&Vの考え方*櫻井 英行¹、青野 泰久¹、山本 真哉¹、鎌田 浩基¹ (1. 清水建設株式会社)

9:45 AM - 10:00 AM

[F-01-03] ASME V&V40に基づいた木製椅子の剛性評価に対する V&V*松井 和己¹、倉田 和幸²、都筑 新³、三浦 孝広⁴、杉山 裕文⁵、山本 剛大⁶、棗田 智香子¹、渡邊 大⁷、山田 貴博¹ (1. 横浜国立大学、2. テルモ株式会社、3.

ダッソー・システムズ株式会社、4. サイバネットシステム株式会社、5. 山梨大学、6. 広島大学、7. 芝浦工業大学)

10:00 AM - 10:15 AM

[F-01-04] 水の流入を考慮した液状化時大規模流動解析の V&Vの試み*村田 宗一郎¹、一井 康二¹ (1. 関西大学)

10:15 AM - 10:30 AM

OS21 シミュレーションの品質保証とV&V、UQ

[F-02] OS21 シミュレーションの品質保証と V&V、UQ (2)

座長:松井 和己(横浜国立大学)

10:45 AM - 11:45 AM Room F (2F Conference Room 202B)

[F-02-01] コード間対照による鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析のコード検証*渡邊 英吾¹、飯島 昂也¹、山川 綾之¹、車谷 麻緒¹ (1. 茨城大学)

10:45 AM - 11:00 AM

[F-02-02] V&Vに向けた曲げ破壊型鉄筋コンクリートはりの Validation実験*羽生 隼輝¹、車谷 麻緒¹ (1. 茨城大学)

11:00 AM - 11:15 AM

[F-02-03] 幾何学的非線形性を考慮した RBSMを用いた

RCはりの破壊シミュレーションにおける妥当性確認

*山本 佳士¹ (1. 法政大学)

11:15 AM - 11:30 AM

[F-02-04] ASME V&V40に基づいた木材の曲げ試験に対する V&V福谷 勇輝¹、*増田 悠星¹、棗田 智香子¹、倉田 和幸²、松井 和己¹、都筑 新³、三浦 孝広⁴、山本 剛大⁵、杉山 裕文⁶、渡邊 大⁷、呂 学龍¹、山田 貴博¹ (1. 横浜国立大学、2. テルモ株式会社、3. ダッソー・システムズ株式会社、4. サイバネットシステム株式会社、5. 広島大学、6. 山梨大学、7. 芝浦工業大学)

11:30 AM - 11:45 AM

OS21 シミュレーションの品質保証とV&V、UQ

[F-03] OS21 シミュレーションの品質保証と V&V、UQ (3)

座長:吉田 有一郎(東芝インフォメーションシステムズ株式会社)

1:15 PM - 2:30 PM Room F (2F Conference Room 202B)

[F-03-01] 落石形状特性が到達分布に与える影響のモデル化吉田 大活¹、外里 健太¹、野村 怜佳¹、*森口 周二¹、寺田 賢二郎¹ (1. 東北大学)

1:15 PM - 1:30 PM

[F-03-02] 熱・流体・力学連成解析の Validationに用いる材料定数のばらつきの定量化検討*佐藤 伸¹、森岩 寛稀¹、伊藤 真一²、高田 雄大²、酒匂 一成² (1. 株式会社大林組、2. 鹿児島大学)

1:30 PM - 1:45 PM

[F-03-03] ASME V&V40に基づいた木材の圧縮試験に対する V&V*谷田 紗音¹、福谷 勇輝¹、棗田 智香子¹、高橋 由佳¹、倉田 和幸²、松井 和己¹、都筑 新³、三浦 孝広⁴、山本 剛大⁵、杉山 裕文⁶、渡邊 大⁷、呂 学龍¹、山田 貴博¹ (1. 横浜国立大学、2. テルモ株式会社、3. ダッソー・システムズ株式会社、4. サイバネットシステム株式会社、5. 広島大学、6. 山梨大学、7. 芝浦工業大学)

1:45 PM - 2:00 PM

[F-03-04] ASME V&V40 に基づいた木材接合部の剛性評価に対する V&V*都筑 新¹、油川 英史²、福谷 勇輝²、倉田 和幸³、松井 和己²、三浦 孝広⁴、山本 剛大⁵、杉山 裕文⁶、渡邊 大⁷、呂 学龍²、棗田 智香子²、山田 貴博² (1. ダッソー・システムズ株式会社、2. 横浜国立大学、3. テルモ株式会社、4. サイバネットシステム株式会社、5. 広島大学、6. 山梨大学、7. 芝浦工業大学)

2:00 PM - 2:15 PM

[F-03-05] 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

*青野 泰久¹、山本 真哉¹、鎌田 浩基¹、櫻井 英行¹ (1.
清水建設株式会社)

2:15 PM - 2:30 PM

OS21 シミュレーションの品質保証とV&V、UQ

[F-01] OS21 シミュレーションの品質保証と V&V、UQ (1)

座長:森口 周二(東北大学)

Wed. May 31, 2023 9:30 AM - 10:30 AM Room F (2F Conference Room 202B)

[F-01-01] システムズエンジニアリングと工学シミュレーションのモデルの統合

*吉田 有一郎¹ (1. 東芝インフォメーションシステムズ株式会社)

9:30 AM - 9:45 AM

[F-01-02] トンネル掘削解析のデータ同化における V&Vの考え方

*櫻井 英行¹、青野 泰久¹、山本 真哉¹、鎌田 浩基¹ (1. 清水建設株式会社)

9:45 AM - 10:00 AM

[F-01-03] ASME V&V40に基づいた木製椅子の剛性評価に対する V&V

*松井 和己¹、倉田 和幸²、都筑 新³、三浦 孝広⁴、杉山 裕文⁵、山本 剛大⁶、棗田 智香子¹、渡邊 大⁷、山田 貴博¹ (1. 横浜国立大学、2. テルモ株式会社、3. ダッソー・システムズ株式会社、4. サイバネットシステム株式会社、5. 山梨大学、6. 広島大学、7. 芝浦工業大学)

10:00 AM - 10:15 AM

[F-01-04] 水の流入を考慮した液状化時大規模流動解析の V&Vの試み

*村田 宗一郎¹、一井 康二¹ (1. 関西大学)

10:15 AM - 10:30 AM

システムズエンジニアリングと工学シミュレーション のモデルの統合

Integration of Systems Engineering Model and Engineering Simulation Model

吉田有一郎¹⁾

Yuuichiro Yoshida

1) 博(工) 東芝インフォメーションシステムズ(株) (〒1050023 東京都港区芝浦1-1-43 東芝浜松町ビル4階,

E-mail: yuuichiro.yoshida@toshiba.co.jp)

This paper describes about integration of systems engineering model and engineering simulation model. INCOSE and ASME V&V50 committee have been working on Model Characterization Pattern, MCP, which includes the feature-based pattern of requirements for engineering simulation. INCOSE and NAFEMS have been working on integration of modeling and simulation for systems engineering and engineering simulation. NAFEMS and ASSESS have been trying to extend MCP. The author showed the idea of automatic generation of simulation data using MCP combined with the method of feature-based product line engineering factory of ISO26580.

Key Words: Systems Engineering, MBSE, Engineering Simulation, Verification and Validation, ISO26580.

1. 緒言

航空宇宙産業、軍需産業等、複雑・大規模な製品を開発する産業では従来からシステムズエンジニアリングが適用され、近年では自動車産業における適用が急速に進んでいる[1]。現在、ドキュメントベースのシステムズエンジニアリングはモデルをベースとしたシステムズエンジニアリング (Model Based Systems Engineering, MBSE) へ移行しつつある。

MBSEは米国防総省 (DoD) が進めるデジタルエンジニアリング戦略の一部であり、MBSEに残る課題の1つは、システムズエンジニアリングのモデルと工学シミュレーションの物理的なモデルの統合とSEBoK[2]は述べている。

システムズエンジニアリングとISO9001はプロセスアプローチでありV&Vも同一である。システムズエンジニアリングとISO9001に基づく工学シミュレーションは要求事項が滑らかに接続する[3]が、物理的モデルの作成に必要なモデル要求事項の表現形式は標準化されていない。

本稿では、欧州と米国で進められている、システムズエンジニアリングのモデルと工学シミュレーションのモデルを統合する活動[4][5][6][7]、及びフィーチャーベースのプロダクトラインエンジニアリング (Feature-based Product Line Engineering) 手法[8]に基づく工学シミュレーションの要求事項からのシミュレーションモデルの自動生成の可能性について述べる。

2. 米国におけるシステムズエンジニアリングと工学シミュレーションのモデルの統合の活動

文献[4]によれば、システムズエンジニアリングを推進

するINCOSEのMBSE Patterns WGのメンバがASME V&V50委員会に参加し、INCOSEとASME V&Vの連携が開始した。連携の目的は、(1)システムズエンジニアリングで使うシステムレベルのモデルの中にASME VVUQのフレームワークを取り込む、(2)物理シミュレーションのモデルを、システム開発のライフサイクル全体とサプライチェーン全体で、シミュレーションの非専門家でも利用可能な構造化されたモデル資産の形式で表現する、及び、(3)規制当局の要求するVVUQに対応し、長期間に渡り再利用可能なモデルとしてモデル利用コストを低減する等である。

Schindel[5]は、V&V50委員会のVerification and Validation Interactions with the Model Life Cycleの草案にModel Characterization Pattern (MCP, モデル特徴付けパターン)を採用する考えを述べている。MCP[4]は、種々のタイプ (数値シミュレーション, システムモデル, 機械学習等)のモデルを記述する情報 (モデルの要求事項)の統合フレームワークである。個別のモデルを特徴づける情報 (個別のモデルに対するユーザの要求)をMCPのデータ構造に適用すると、結果は個別のモデルとして構成されたMCP (configured MCP)になる。構成されたMCPはモデルラッパー (モデルを隠蔽する)メタデータとして参照される。MCPの最上位のインタフェースはステークホルダ・フィーチャーパターンであり、次の6種類のフィーチャーグループ (図1(a))がある。

・モデルの主題と焦点:モデルの主題または焦点を特定する。



(a) フィーチャーグループ



(b) モデル特徴付けパターン

図1 フィーチャーグループのフレームワークの上に構築するモデル特徴付けパターン[4]

- ・モデルの実用性: モデルの用途, ユーザ, 有用性, 及び価値を記述する.
- ・モデルの信憑性: モデルの信憑性を記述する.
- ・モデルの適用範囲とコンテンツ: モデルのコンテンツの適用範囲を記述する.
- ・モデルのライフサイクル管理: 関連するモデルのライフサイクル管理能力を記述する.
- ・モデルの表現: モデル及び関連する成果物で使用される表現を記述する.

個々のフィーチャーグループは更にいくつかのフィーチャーを内包し, 合計35個のMCPフィーチャーが用意されている. 一例を示すと, モデルの信憑性フィーチャーグループは, 次の7個のフィーチャーを内包している. 個々のフィーチャーはプライマリー (PK) 及び他の複数のアトリビュート (属性) を内包している.

- ・モデルエンベロープ
- ・妥当性確認済の概念モデルの信憑性
- ・検証済の実行可能モデルの信憑性
- ・信憑性のアセスメント
- ・信頼された構成可能パターン (のID)
- ・パターンベースのモデル要求事項 (汎用モデル要求事項パターンからの構成)

- ・標準の遵守

「標準の遵守」のプライマリーキーアトリビュートは”標準”であり, モデル, モデル化, モデルのVVUQ, セキュリティ, 情報技術に適用可能な標準, または他のモデルをサポートする標準を特定する. フィーチャーはオブジェクト指向プログラミングのクラスと考えられる.

フィーチャーグループのフレームワーク上に構築するモデル特徴付けパターンを図1 (b) に示す. 文献[4]では, モデルに対する要求事項の標準形式がMCPで提供され

ば, シミュレーションベンダは自社のシミュレータ用のシミュレーションモデルを自動生成できると考えている.

3. 欧州におけるシステムズエンジニアリングと工学シミュレーションのモデルの統合の活動

英国のNAFEMSとINCOSEは2013年にSMS (System Modeling and Simulation) WG[6]を設立し, システムズエンジニアリングと工学シミュレーションのモデルの統合の活動を開始した. SMS WGによるSMSの説明は「MBSEの実施において, ひとまとまりの部品, サブシステム, システム, 及びプロセスを, 明確に記述し, 概念化し, 設計し, 分析し, 検証と妥当性確認をするために, 複数の異なる分野にまたがる, 機能, アーキテクチャ, 及び振る舞いのモデル (物理, 数理, 及び論理の表現がある) を使うこと.」である. これに対し工学シミュレーションの説明は「物理に基づく数理 (数値) モデル, 論理モデル, 及びモデルが表現する物理モデルから抽出した適切なデータを, 概念, 現実システム, 現象, プロセスの表現として利用し, 技術的要求事項及び運用における振る舞いを検討する.」である. SMS WGの活動の目的は「システムズエンジニアリングと工学シミュレーションのモデリングとシミュレーションの視点を組み合わせ, ライフサイクル全体で, システムズエンジニアリングに必要なコミュニケーションと調整を改善すること.」である.

SMS WGには複数の焦点技術チームがある. SMS標準エコシステムチームはMBSEと工学シミュレーションのモデルの統合を可能にする適切な国際標準の成熟度と産業適用を確認し促進している. SMS標準エコシステムチームは次の標準に注目している.

- ・Modelica協会の標準. FMI/FMU, SSP (System Structure and Parameterization)

- ・システムズエンジニアリング利用を前提とする航空宇宙産業の標準. ISO10303-209:Application protocol: Multidisciplinary analysis and design (空力弾性関連), ISO10303-243:Application protocol: For modelling and simulation information in a collaborative systems engineering context (MoSSEC), 及びMBSEのためのNAS9300-520 (Long term archiving and retrieval of analytical models described by specification or executable code, containing differential, algebraic, and discrete equations) .

- ・Web標準. OSLC (Open Services for Lifecycle Collaboration) 他.

- ・OMG標準. ReqIF (Requirements Interchange Format), SysML (Systems Modeling Language), UAF (Unified Architecture Framework) 他.

SMSモデリング&メタデータチームは, SMSのモデリングとモデル特徴付け, 及びメタデータの扱いの標準化の動向を調査・検討し, 次のメタデータに注目している.

- ・NAFEMS傘下のASSESSが推進するUMC4ES (Unified

Model Characterization for Engineering Simulation) [7]

- ・NAS9300-520
 - ・システムズエンジニアリングにおけるシミュレーション用メタモデルの標準形式であるMIC (Model Identification Card)
 - ・OAIS (Open Archival Information System)
 - ・INCOSEが推進するMCP
 - ・MoSSEC
- SMSモデリング&メタデータチームは、これらモデル特徴付けの категорияとメタデータの比較とマッピングを支援している。UMC4ESは、MCPのデータ構造と内容を拡張し、MoSSEC, MIC, AP209を取り込む方針で開発されている。

4. ISO26580

ISO26580[8]はフィーチャーベースのシステムとソフトウェアのプロダクトラインエンジニアリング (Feature-based Product Line Engineering) の規格であり、フィーチャーベースPLEファクトリー (図2) を規定している。

ISO26580では、多様な顧客要求事項に対応するバリエーションを有する製品ファミリーを、製品のフィーチャーのツリー構造であるフィーチャーカタログとして表現する。フィーチャーカタログが表現する製品ファミリーの全ての製品は予め設計、検証、妥当性確認が済んでおり、製品データは製品データベースであるシェアドアセットスーパーセットに格納されている。製品コンフィグuratorを使い、個別の顧客の1つ1つの要求事項を満たすフィーチャーを、フィーチャーカタログのフィーチャーツリーから選択する。次に、選択結果としての、個別の製品のフィーチャーツリーであるフィーチャー表ポートフォリオ (Bill of Features Portfolio) に対応する製品データをシェアドアセットスーパーセットから引き出すことにより、個別の製品のデータであるプロダクトアセットインスタンスが得られる。プロダクトアセットインスタンスには製品組み立て後の試験関連データ等も含まれる。製品は製品データに基づき製造され、組み立てと試験を経て出来上がる。

MCPを利用した工学シミュレーションの要求事項の標準形式に対し、要求事項を満たす工学シミュレーションの仕様をフィーチャーの集合として、ツリー構造の工学シミュレーション・フィーチャーカタログの形式で整理しておくことにより、既存のシミュレーションのデータを利用した、シミュレーションデータの自動生成 (シミュレーションデータの自動的再利用) が実現可能と考えられる。シミュレーションベンダでの製品化に期待したい。

5. 結言

欧州と米国で進められている、システムズエンジニアリングのモデルと工学シミュレーションのモデルの統合活動について述べた。また、フィーチャーベースのプロダ

クトラインエンジニアリングの考え方に基づく、工学シミュレーションの要求事項の標準形式MCPからのシミュレーションデータの自動生成 (シミュレーションデータの自動的再利用) の可能性について述べた。

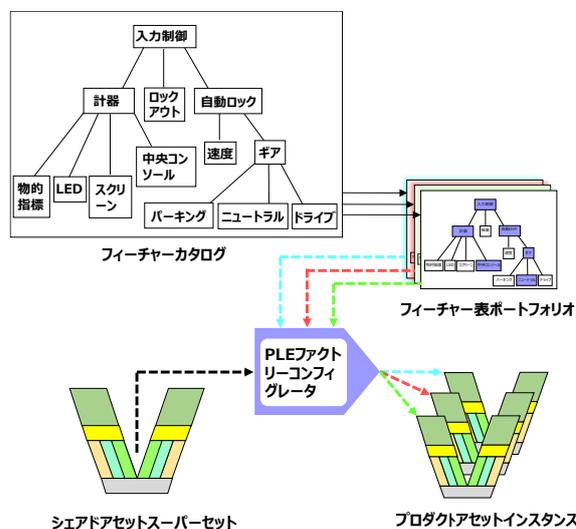


図2 フィーチャーベース PLE ファクトリー [8]

参考文献

- [1]例えば、ダニエル・クロブ、岡部英幸、システムズエンジニアリングとフランス産業界の動向、日本機械学会誌, Vol.119 No.2277, pp.650-653, 2016.
- [2]Giachetti, R., Digital Engineering. https://sebokwiki.org/wiki/Digital_Engineering
- [3]吉田有一郎、システムズエンジニアリングのV&Vと工学シミュレーションのV&V、第27回計算工学講演会, 2022.
- [4]The Model Characterization Pattern (MCP). https://www.omgwiki.org/MBSE/lib/exe/fetch.php?media=mbse:patterns:model_characterization_pattern_mcp_v1.9.3.pdf
- [5]Schindel, B., Verification and Validation Interactions with the Model Life Cycle: Status of a VV50 Working Group, ASME Virtual Symposium on Verification and Validation, May19-20, 2021. https://www.omgwiki.org/MBSE/lib/exe/fetch.php?media=mbse:patterns:model_life_cycle_working_group_status_v1.2.5.pdf
- [6]Coleman P., Systems Modeling & Simulation (SMS) Working Group Update for MBSE workshop-30 Jan 2022, 2022 Annual INCOSE international workshop, Torrance, CA, USA, Jan29-Feb1, 2022. https://www.omgwiki.org/MBSE/lib/exe/fetch.php?media=mbse:incose_mbse_iw_2022:iw2022_smswg_update.pdf
- [7]ASSESS Efforts for a Unified Model Characterization for Engineering Simulation (UMC4ES), An ASSESS Insight Webinar Presentation, Feb 2021, 2021. <https://www.assessinitiative.com/wp-content/uploads/ASSESS-Efforts-for-Uniform-Model-Characterizations-for-Engineering-Simulation.pdf>
- [8]ISO/IEC 26580:2021, Software and systems engineering- Methods and tools for the feature-based approach to software and systems product line engineering, 2021.

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られる。

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

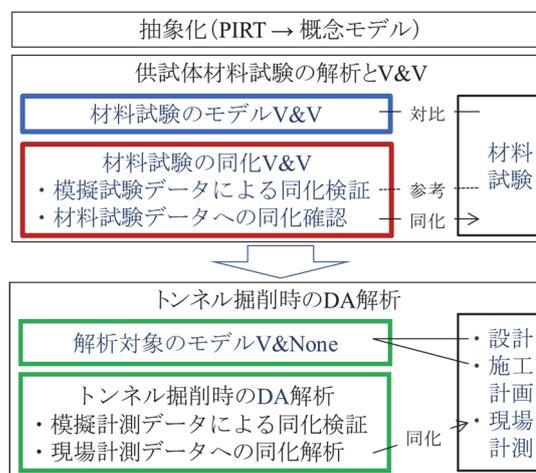


図-1 トンネル掘削のデータ同化解析の枠組み

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を定量化(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。

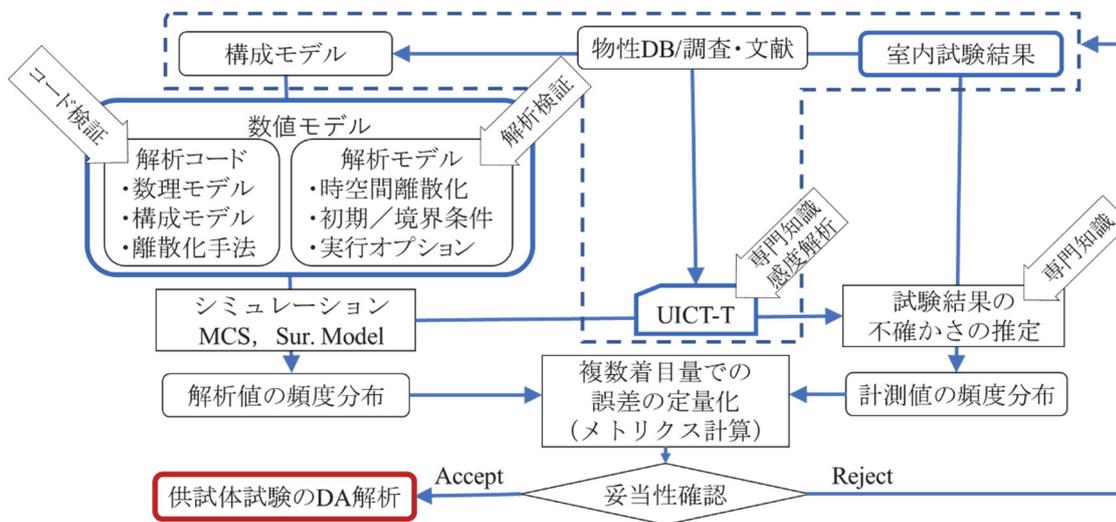


図-2 供試体材料試験のモデルV&V

【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

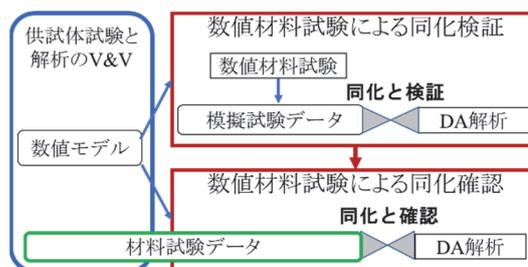


図-3 供試体材料試験のモデル V&V と同化 V&V

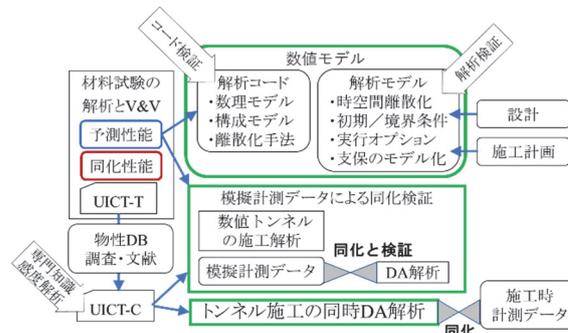


図-4 トンネル掘削時の DA 解析の方針

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ている。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ている。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.

ASME V&V40に基づいた 木製椅子の剛性評価に対するV&V

V&V Examples for Stiffness Simulations for Wooden Chair based on ASME V&V 40

松井 和己¹⁾, 倉田 和幸²⁾, 都筑 新³⁾, 三浦 孝広⁴⁾, 杉山 裕文⁵⁾,
山本 剛大⁶⁾, 棗田 智香子¹⁾, 渡邊 大⁷⁾, 山田貴博¹⁾

MATSUI Kazumi, KURATA Kazuyuki, TSUZUKI Arata, MIURA Takahiro, SUGIYAMA Hirofumi,
YAMAMOTO Takeki, NATSUMEDA Chikako, WATANABE Dai & YAMADA Takahiro

- 1) 横浜国立大学大学院環境情報学府 (E-mail: kzm@ynu.ac.jp)
- 2) テルモ株式会社 (Email: Kazuyuki_Kurata@terumo.co.jp)
- 3) ダッソー・システムズ株式会社 (E-mail: arata.tsuzuki@3ds.com)
- 4) サイバネットシステム株式会社 (E-mail: t-miura@cybernet.co.jp)
- 5) 山梨大学大学院総合研究部 (E-mail: hirofumis@yamanashi.ac.jp)
- 6) 広島大学大学院先進理工系科学研究科 (E-mail: takeki@hiroshima-u.ac.jp)
- 7) 芝浦工業大学システム理工学部 (E-mail: dai-wata@shibaura-it.ac.jp)

In this study, we introduce an example for establishing the credibility goals for a computational model related to typical mechanical structures based on ASME V&V-40. As shown in the documents, the risk-informed credibility assessment concept is a key feature in V&V-40 comparing with the conventional ones (V&V-10 and -20). This paper aimed to illustrate how establishing risk-informed credibility may be put into practice, with some objectives. a) present examples that demonstrate model risk and credibility approaches that are consistent with this framework, and b) illustrate how the gradations for each credibility factor can be adapted for this example, mechanical evaluation of wooden chairs.

Key Words : *V&V examples, Risk informed credibility, Mechanical simulations*

1. はじめに

日本計算工学会のHQC研究会活動や、それにもとづいて発行されている学会標準^[1-3]に代表されるように、工学分野におけるシミュレーション結果の品質保証については国内外で活発に議論されている。このような活動の根底にある考えかたがV&V (Verification (検証) and Validation (妥当性確認)) と呼ばれるものであり、数値シミュレーションに特化したV&Vの規格として最も広く知られているのがASME V&V^[4-6]である。AIAAやNAFEMS, 土木学会なども同様の規格類を提示しているが、基本的な概念はほぼ同様であり、シミュレーションモデルや解析手法が適切であるかどうかを議論する基本的な枠組みが提示されている。しかしながら、V&Vに関する記述は概念的であることが多く、一般の技術者が通常のシミュレーション業務にどのように適用していくのかという問題に直面することが多い。

前報^[7]において筆者らは、ASME V&V-40にもとづいて、シミュレーションの信頼性評価にリスクマネジメント手法を用いるための概要を報告した。市販の木材で作成する簡単な椅子に対する強度・剛性評価を目的として、シミュレーションに生じるリスクを分析したうえで、モデルに求められるV&Vレベルを決定した。本稿では、最終

的な椅子のシミュレーションの品質を担保するために、これを階層構造に分解し、それぞれの段階においてV&V-40のプロセスを適用する手順を紹介する。

2. 木工椅子に対する強度評価

(1) 概要とQI (Question of Interest)

本稿では、Fig.1(a)に示すようなホワイトウッドなどの一般的な木材で製作する椅子を取りあげ、その強度評価に利用する数値シミュレーションモデルの信頼性を評価する。一般的な設計プロセスを念頭においたV&Vでは、PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table)を作成するなどして、複数のQIを設定することになるが、ここではJIS S1203:1998で規定される座面の強度試験をクリアすることを旨として、「通常条件下において使用中に壊れないこと」をQIに設定する。また、JIS規格を引用して、最終製品の強度を評価するプロセスにおける許容差をそれぞれ、力±5%、質量±0.5%、寸法±0.5mmと規定する。

(2) 強度評価の方針とCOU (Context of Use)

設計案が十分な強度を有していることを汎用CAEソフトによる有限要素シミュレーションを実施して、天板などの構造部材に作用する最大応力を評価する。これらのシミュレーション結果に基づいて最終設計案を決定したのち、最終案の試作品に対してJIS S 1203に基づく強度試

験を実施して設計案の可否を確認する。したがって、本稿におけるV&Vはこれらの強度評価に用いる有限要素モデル・シミュレーション（以降、シミュレーションモデル）を対象とする。なお、使用木材の材料特性（弾性特性や破壊強度）は、シミュレーションモデルのV&Vに先立って実施する材料試験で評価する。実際には、シミュレーションモデルから得られた結果（応力値）に安全率を乗じたものと材料の基準強度を比較することになる。

(3) モデルリスク

ASME-V&V40の特徴はシミュレーションモデルの影響（Model Influence）と、間違っただ判断によるリスク（Decision Consequence）からモデルリスクを評価してシミュレーションモデルに求めるV&Vレベルを決定する点にある。つまり、シミュレーション結果が意志決定に与える影響と、間違っただ判断がどのような結果につながるのかというリスクをモデルリスクとして評価する。

a) シミュレーションモデルの影響

ここでの意志決定は複数の設計案から最終案を決定することに対応するが、強度評価は基準を満たすかどうかの○×判定となることが多い。基準を満たさない設計案は確実に排除しなければならないこと、ならびに最終設計案の強度評価を試作品に対して実施する予定であることから、影響度を以下の3段階に分類することを想定したときの「MEDIUM」に設定する。

low: 安全評価にほとんど影響しない

MEDIUM: 影響はあるものの致命的ではない

high: 安全評価に決定的な影響を及ぼす

b) 間違っただ結論によるリスク

シミュレーション結果に基づく工学的判断に誤りがあった場合に想定されるリスクを以下の3段階に分類する。いま検討している強度限界は椅子の天板が曲げ変形によって破壊する状況を想定しているため、ここで想定すべき誤った判断は強度不足であるにもかかわらず基準を満たすと判定することに対応する。対象物は一般的な状況下で使用されることを想定しているため、使用中に天板が破壊することは使用者に何らかの怪我を負わせることにつながる現象である。最終案に対する試験によって回避できる可能性はあるものの、Model Influenceを評価する際に「試作テストを実施すること」を理由にリスクレベルを一段階下げたことから、さらにここでも同様の理由でリスクレベルを下げるべきではないと判断して「HIGH」と定義する。

low: 使用者にも機能にも影響しない

medium: 椅子としての機能は喪失するものの使用者に危害は及ぼさない

HIGH: 使用者に怪我をさせる可能性がある

これまでのリスク分析から、シミュレーションモデルのリスクは「MEDIUM-HIGH」という評価となり、Model Risk Matrix（文献6, Fig. B-2.1.4.2-1）におけるレベル4相

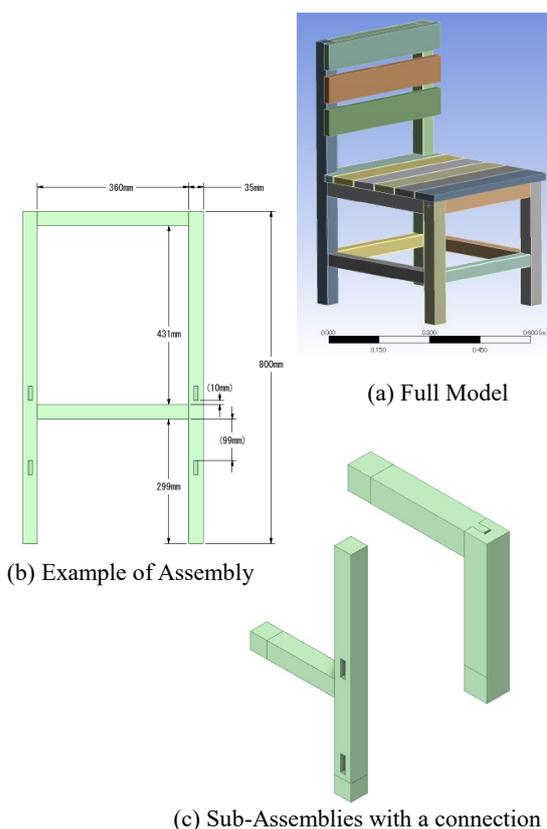


Fig.1 Wooden Chair and its Breakdown Structures

当だと判断する。さらに、このリスクレベルとValidation Metric（文献6, Tab. B-2.1.4.2-1）に基づいて、以下のようなValidation Metricを設定する。これらの指標はV&V-40の例題Bに対して定義されたものであるため、本件への流用することの妥当性は事前に検討した（他のリスクレベルに対応するValidation Metricは文献6を参照）。

Validation Metric: (リスクレベル4): 実験もしくはシミュレーションのいずれかにおいて不確かさの検討を要求するものとするが、その対象は代表的なものに限定してよく、ばらつきの統計学的な分析までは求めない。なお、実験とシミュレーション結果の差は5%よりも小さいレベルとする。

3. モデルの階層化とV&V

ASME V&Vでは完成品をアセンブリ、サブアセンブリ、部品、材料試験という階層構造に分解し、各層で設定したシミュレーションモデルに対してV&Vを実施するボトムアップアプローチ（Bottom up Approach）が推奨されている。本研究では、完成品の椅子全体をフルモデル、骨組み構造として考えられる一部の枠組構造をアセンブリ、接合部（ほぞ接ぎもしくは三方接ぎ）をひとつだけ含むものをサブアセンブリ、それらを構成する部材、構成材料のような階層構造を設定する。

このとき、椅子全体を構成するすべての部品や接合部、材料まで落とし込み（Breakdown Structures）、それらひとつひとつにV&Vを実施することが最も厳格な手順である。

しかしながら、ここで対象とする木工椅子は類似の構造部材がいくつか存在するため、代表的な構造部材についてのみV&Vを実施して全体の工数を削減する。その目的を達成するために以下のような「あたりづけのシミュレーション」を実施して部材や接合部の影響度を評価する。

このシミュレーションの概要を以下のように定義する。

- **RI (Reality of Interest):**

JISに規定された強度試験（座面中央に載荷した際に、椅子を構成する各部材の重要度を知りたい。

- **COU (Context of Use):**

椅子全体に規定の荷重を作用させたときに、部材や接合部に生じる内力を評価して、内力のパターンや、パターンごとの重要度ランキングを作成する。

- **シミュレーションモデルの影響: LOW**

木製椅子を構成する部材間での相対的な重要度を評価するためのものであるため、「安全評価にほとんど影響しない」と判断した。

- **間違った結論によるリスク: LOW**

あくまでも事前準備のためのシミュレーションと位置づけているので、「使用者にも機能にも影響しない」と判断した。

- **Validation Metric: リスクレベル1**

上記のリスク分析から、あたり付けのためのシミュレーションのリスクは「LOW-LOW」という評価であり、Model Risk Matrixにおけるレベル1相当であると判断して、Validation Metricを次のように設定する。

Validation Metric: (リスクレベル1) : 目視などによる比較でよい一致が見られること。

(1) あたり付けのシミュレーション（部材・接合部）

部材ごとに作用する荷重を把握することが目的であるので、椅子全体をばり要素で構成したシミュレーションモデルを準備した。このとき、接合部においてすべての荷重を伝達させることで、安全側（作用する内力を大きく評価する側）の評価とするために、すべての接合部を剛結であると設定した。

SRQ (System Response Quantities)は、各部材の軸に垂直な面に作用する軸力（引張・圧縮）とねじりトルク、せん断力、曲げモーメントとするが、後者はばり部材の座標系に依存しない不変量（最大・最小せん断力、最大モーメント）で評価する。このとき、原則として各内力パターンについて最大値と同程度のものを◎、無視できるレベルで低い判断できるものを△、これだけでは判断できないものを○とまとめたものをTab.1に示す。この結果から、少なくとも重要度（影響度）が大きいと判断できる部材と荷重パターンの組み合わせ（表中の◎）については、可能な限り部材レベルでのV&Vを実施すべきであると結論づけられる。特に、椅子側面の上部に設置する貫部材（Tab.1中のBeam in side/Upper）はほとんどのケースで◎となっており、椅子全体の挙動をモデル化する際に重要

な部材であることが推察できる。したがって、この部材に対するV&Vプロセス、あるいはその際に定義する「シミュレーションモデルの影響」は他の部材よりも高いレベルを要求するべきだろうと判断する。

(2) 材料試験とそのV&V

木材の機械的特性を把握するための材料試験はJISなどで規定されているため、原則としてはそれに従ってシミュレーションに必要な材料パラメータを同定する。そのプロセスにおけるV&Vについては別報⁸⁾で紹介する。

(3) 接合部の力学挙動に対するV&V

本研究で対象とする木製椅子では部材の断面寸法は天板を除いてすべて同一であるため、実質的にはほぼ接ぎと三方接ぎの2種類だけを比較すればよい。特に変形が小さく接触状態がほとんど変化しないような状況に対して、接合部のモデルに対するV&Vをハンマリング試験と比較しながら実施した⁹⁾。

4. まとめ

本稿では、木工椅子の強度評価を題材としてV&V-40が規定するリスク評価にもとづくV&V計画とその実装例を紹介した。ここで示したように、リスクマネジメント手法に基づいてV&V計画を立案・提示する際には、常にリスク評価や行動計画のレベル階層をあわせて提示することになる。

謝辞: 本研究を実施するための木工製作や試験片作成などについては、株式会社オフ・コーポレイション殿にご指導とご支援をいただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 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(JSCES-HQC001:2014), 2014.
- [2] 日本計算工学会: 工学シミュレーションの標準手順(JSCES-HQC002:2015), 2015.
- [3] 日本計算工学会: 学会標準(HQC001&002)事例集(JSCES-HQC003:2015), 2015.
- [4] ASME: *ASME V&V-10 2019 Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*, ASME 2019.
- [5] ASME: *ASME V&V-20 2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer*, ASME 2009.
- [6] ASME: *ASME V&V-40 2019 Assessing Credibility of Computational Modeling Through Verification and Validation: Application to Medical Devices*, ASME 2018.
- [7] 松井和己ら: ASME V&V40 に基づいた木製椅子に対するシミュレーションの品質保証, 計算工学講演会論文集, 27, 2022.
- [8] 谷田紗音ら: ASME V&V40 に基づいた木材の圧縮試験に対するV&V, 計算工学講演会論文集, 28, 2023 (投稿中) .
- [9] 都筑新ら: ASME V&V40 に基づいた木材接合部の剛性評価に対するV&V, 計算工学講演会論文集, 28, 2023 (投稿中) .

水の流入を考慮した液状化時大規模流動解析のV&Vの試み

A Trial of V&V of Numerical Analysis of Liquefaction Induced Landslide Considering Water Inflow

村田宗一郎¹⁾, 一井康二²⁾

Soichiro MURATA and Koji ICHII

1)関西大学 社会安全研究科 大学院生 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町7-1, E-mail:k194391@kansai-u.ac.jp)

2)博(工) 関西大学 社会安全学部 教授 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町7-1, E-mail: ichiik@kansai-u.ac.jp)

V&V is important for quality assurance of analysis results. However, V&V of non-linear dynamic analysis is still very difficult. In this study, I tried to check the mesh size effect on the dynamic analysis with water inflow, as a part of V&V process. As a result, the mesh size did not affect the deformation level of soil layers although the local layer's deformation is significant in the landslide with water inflow.

Key Words : Liquefaction, V&V, FEM, Mesh Size,

1. はじめに

日本では、昭和39年(1964年)新潟地震発生以降、液状化に関する研究が行われてきた。現在では、液状化を考慮した動的解析が設計実務で使用される機会も増えている。このような設計実務に用いる地盤の動的解析においては、V&V(検証と妥当性確認)が解析結果の品質保証の観点から重要である。そこで、これまでにV&Vに関する研究がいくつか行われている。例えば、原子力学会は2018年に検証と妥当性確認の手順を含むガイドラインを作成している¹⁾。また、地震応答解析に関しても土木学会がガイドラインとその実践事例を作成している²⁾。しかし、非線形の挙動を対象とした動的解析のV&Vは難しい。

2018年にインドネシアで発生した地震では、液状化による大規模な地すべりが発生した³⁾。この事例は被圧地下水の関与⁴⁾と透水性の低いシルト層直下などでの水膜現象⁵⁾が可能性として挙げられている。そして、村田・一井(2023)⁶⁾は清田(2020)⁴⁾を参考に地下水の流入を考慮した動的解析を行い、観測された変形量に比べると小さいものの、水膜現象による流動の再現に成功している。

しかし、水膜現象が発生した場合、局所的に変形が集中した領域が生じ、地盤のメッシュサイズが解析結果に影響を与える可能性がある。これに対して、被圧地下水や水膜現象を考慮した動的解析のV&Vはあまり事例がない。そこで、水の流入を考慮した動的解析の検証の一環としてメッシュサイズに着目した検証を試みた。

2. 既存の研究について

(1) FEM解析におけるメッシュ収束性の検証

FEM解析では、メッシュサイズを細分化すれば理論的に近づく解析精度が向上する。しかし、モデル化に問題がある場合はメッシュサイズを細分化しても、誤差が小さ

くならない場合がある。例えば、山田・櫻井・鈴木(2017)⁷⁾では、地下水の揚水・注水問題において、メッシュ収束性の検証を行っている。その結果、解析領域形状の近似精度の問題からメッシュ分割を細かくしても精度の向上につながらない量があることが示されている⁷⁾。つまり、対象となる問題に応じたメッシュのサイズや形状が必要である。

(2) 水の流入を考慮した液状化による大規模流動解析

2018年9月28日にインドネシアのスラウェシ島でマグニチュード7.5の地震が発生した。この地震では1°~1.5°⁴⁾と非常に緩やかな斜面において大規模な地すべりが発生し、約2000人³⁾が犠牲になった。清田(2020)⁴⁾はこの事象には液状化の発生に加えて被圧地下水が関与している可能性があるとして報告している。そこで、村田・一井(2023)⁶⁾は地下水の流入を考慮した動的解析を行い、図-1⁶⁾のように地下水の流入があると地盤の流動量が増加することを示した。しかし、図-1に示された流動量は観測された流動量に比べると小さい値である。再現解析の詳細については参考文献⁶⁾を参照されたい。

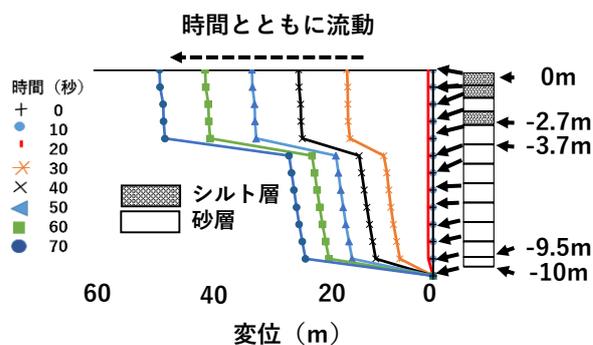


図-1 水の流入を考慮した動的解析の解析結果の例⁶⁾
(各節点の水平変位)

表-1 解析で使した地盤パラメータ^{6), 15)}

初期せん断剛性	49,334 kPa ($\sigma_m' = 98$ kPa 時)
体積弾性係数	128,655 kPa ($\sigma_m' = 98$ kPa 時)
質量密度	2.064 g/cm ²
強度定数 c, ϕ	$c = 0, \phi = 35.16^\circ$
最大減衰定数	$h_{max} = 0.24$
ダイレイタンスのパラメータ	$\varepsilon_d^{cm} = 0.15, r\varepsilon_d^c = 2.0, r\varepsilon_d^s = 1.6, q_1 = 3.8, q_2 = 1.0, l_k = 2.0, r_k = 0.49, c_1 = 1.0, s_1 = 0.005$
透水係数	砂層 = 1.0×10^{-9} m/s シルト層 = 1.0×10^{-12} m/s,
終局定常状態のせん断強度	設定しない ($q_{us} = 0$)

自重解析は地盤の傾斜角に応じた重力加速度を各要素に与えて、各地盤要素の初期応力状態を設定するためのものである。

地震応答解析では解析モデルの最上面(地表面)で水圧が0の値になるように境界を設定した。また、側面は不透水境界とし、最下層部より水を流入させた。水の流入量は解析開始18秒後から1m²あたり2m³/sとした。

(5) 地盤パラメータについて

表-1に地盤パラメータ¹⁵⁾(物理的パラメータとダイレイタンスパラメータ)を示す。本検討では村田・一井(2023)⁶⁾で参照した物理的パラメータ、液状化パラメータを使用した。また、水の流入によるひび割れを考慮し、透水係数は比較的大きい値を設定した。パラメータの詳細については参考文献^{6), 15)}を参照されたい。

4. メッシュサイズの影響の検討結果

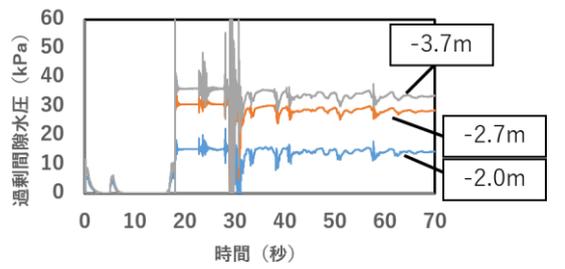
(1) 過剰間隙水圧

図-5に過剰間隙水圧の時刻歴を示す。今回はシルト層直下の過剰間隙水圧に着目した。両ケースとも水を流入した解析開始18秒後から過剰間隙水圧が上昇している。その後、過剰間隙水圧の減少が時折みられるが平均的には一定の値で推移している。この間隙水圧の減少は要素のせん断変形に伴うサイクリックモビリティにより剛性が回復したことによるものと考えられる。ケース1とケース2とで過剰間隙水圧の減少のタイミングや減少量の多少の差はあるもののほぼ一致している。

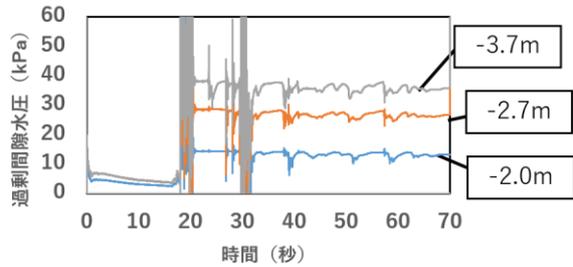
(2) 各節点の水平変位

図-6には地表面の水平変位の比較を示すが、2ケースの差はほとんどない。メッシュサイズの細分化を行っても地表面の変位に大きな影響はないことが分かる。

図-7に各節点の水平変位を示す。ケース1とケース2共に地震開始30秒後から水平変位が大きくなっていることが分かる。また、シルト層直下の要素(-2.7m直下の要素)ではせん断変形が極めて大きくなっている。これは水膜



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-5 過剰間隙水圧の時刻歴

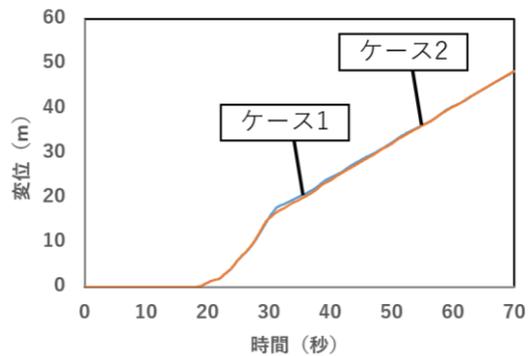
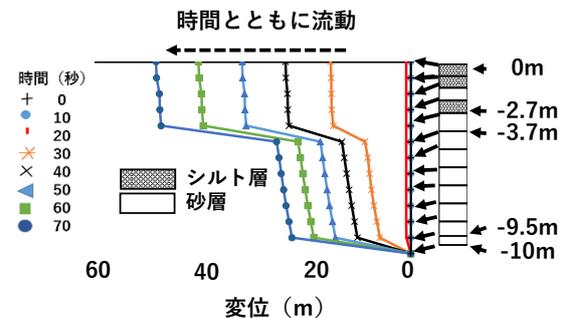
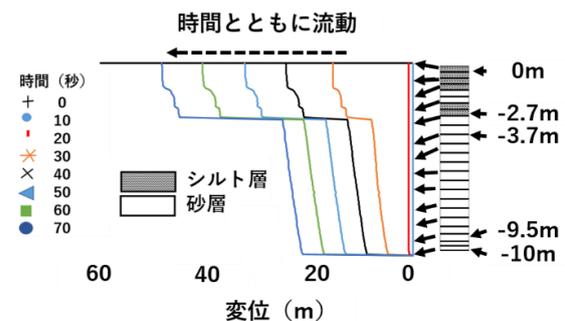


図-6 地表面の水平変位



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-7 各節点の水平変位

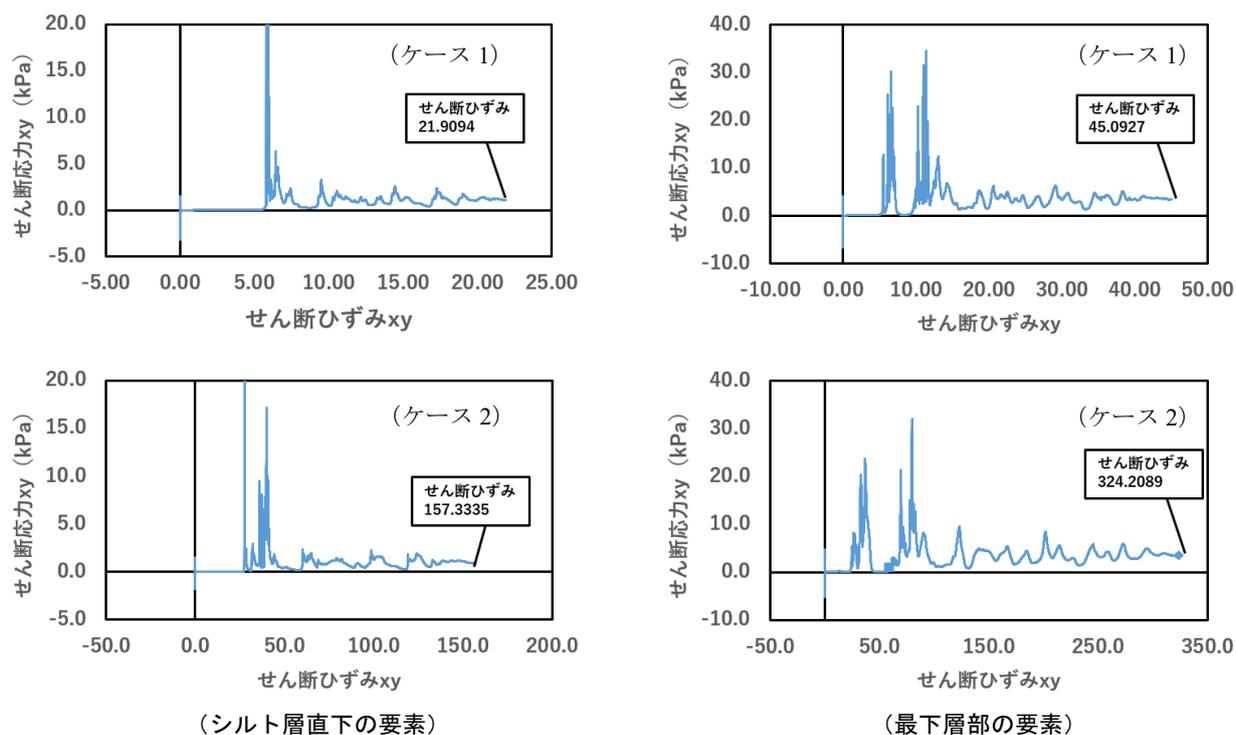


図-8 せん断応力せん断ひずみの関係図

現象に相当する形で変形が集中したと思われる。なお、メッシュサイズの細かいケース2では-2.7mより上の要素の変形の分布をケース1に比べてより細かく把握することが出来ている。

(3) せん断応力せん断ひずみの関係図

図-8に特にせん断変形の大きかったシルト層直下の要素と一番下の要素のせん断応力せん断ひずみの関係図を示す。シルト層直下の要素、最下層部の要素とも、ケース1とケース2とで多少の差はあるものの、全体的に似た挙動を示している。しかし、ケース2の解析終了時のせん断ひずみの値はケース1の値に比べ約7倍程度の値を示している。これはメッシュ数を8倍にしていることに伴い、一つの要素の高さが8分の1倍となり、同じ変形量になるには一つの要素が負担するせん断ひずみの値が8倍になる必要があるためである。なお、ここではケース2の要素のせん断ひずみの値はケース1のせん断ひずみの値の8倍の値には到達しなかったものの、ケース1の要素の高さに対応する要素のせん断ひずみの値を合計するとほぼ8倍になる。

5. 結論

本検討では水の流入を考慮した解析を対象に地盤モデルの行の細分化を行い、メッシュ依存性の検証を行った。その結果、以下のことが分かった。

- メッシュを深さ方向に細かくした場合でも、解析結果はメッシュの細分化前とほぼ一致することが分かった。このことから、従来の経験に基づいて設定した層厚1m程度のメッシュサイズでも変形量の評価という観点での実務上の検討は十分であると考えられる。

- メッシュを深さ方向に細かくすることで変位の分布をより細かく把握することが出来る。このことから、変形が集中する層よりも上部の層の内部における変形状態を把握するには、より細かいメッシュを用いることが望ましいと考えられる。

今回は深さ方向に着目してメッシュの細分化を行っているが、今後はメッシュの幅の細分化など、更なる検証を行っていく必要がある。

謝辞：本稿ではFLIPコンソーシアムが無償で提供するFLIP-ROSE（体験版）を使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 一般社団法人日本原子力学会：シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015, 2015.
- 公益社団法人土木学会：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-, 2022
- インドネシア気象・気候・地球物理学庁, Katalog Gempabumi Signifikan dan Dirasakan | BMKG (最終閲覧日：2023年3月23日)。
- 清田隆, R. F. HIDAYAT, 多田直人, 早川潤：2018年Sulawesi地震による液状化に起因する大規模地盤流動ver.1.4, <https://www.jiban.or.jp/wp-content/uploads/2018/10/2018SulawesiEQv1-4.pdf>, (最終閲覧日：2022年6月3日)。
- 樺澤和宏, 國生剛治：液状化地盤の水膜現象による流動の模型実験とエネルギー的検討, 土木学会論文集, 2004巻, 771号, pp.135-145, 2004.

- [6] 村田宗一郎, 一井康二: 被圧地下水の流入を考慮した液状化による地すべりの再現の試み, 地盤工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」, vol.40, No.1, pp.65-72, 2023.
- [7] 山田俊子, 櫻井英行, 鈴木誠: 注水/揚水孔の簡易有限要素モデルのコード検証, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.73, No.4, pp.450-459, 2017.
- [8] Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O., and Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(3), pp. 360-392, 2011.
- [9] 一井康二, 上田恭平, 溜幸生, 中原知洋.: FLIPを用いた地盤地震応答解析の最前線, 地盤工学会誌, 第63巻, 第10号, 2015.
- [10] (財)沿岸技術研究センター: 液状化解析プログラム FILPによる動的解析の実務【理論編】, 2013.
<https://www.flip.or.jp/file/riron.pdf> (最終確認: 2023年3月23日)
- [11] Zienkiewicz O. C., and Bettess, P.: Soil and other saturated media under transient, dynamic conditions; general formulation and the validity various simplifying assumptions, *Soil Mechanics Transient and Cyclic Loads*, John Wiley&Sons, pp.1-16,1982.
- [12] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., and Zhu, J. Z.: *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Six edition*, Elsevir, 2000.
- [13] Ozutsumi, O., Iai, S.: Adjustment method of the hysteresis damping for multiple shear spring model. *Proc 4th International Confrence on Recent Advances in Gotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Paper No.1, 68, pp.1-6, 2001.
- [14] 独立行政法人国際協力機構,
<https://www.jica.go.jp/index.html>, (最終確認: 2023年3月23日) .
- [15] 山本航, 飛田哲男: 2018年スラウェシ島地震における緩斜面地すべりの発生メカニズムに関する解析的検討, 第40回地震工学研究発表会, No.1596, 2020.

OS21 シミュレーションの品質保証とV&V、UQ

[F-02] OS21 シミュレーションの品質保証と V&V、UQ (2)

座長:松井 和己(横浜国立大学)

Wed. May 31, 2023 10:45 AM - 11:45 AM Room F (2F Conference Room 202B)

[F-02-01] コード間対照による鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析のコード検証

*渡邊 英吾¹、飯島 昂也¹、山川 綾之¹、車谷 麻緒¹ (1. 茨城大学)

10:45 AM - 11:00 AM

[F-02-02] V&Vに向けた曲げ破壊型鉄筋コンクリートはりの Validation 実験

*羽生 隼輝¹、車谷 麻緒¹ (1. 茨城大学)

11:00 AM - 11:15 AM

[F-02-03] 幾何学的非線形性を考慮した RBSMを用いた RCはりの破壊シミュレーションにおける妥当性確認

*山本 佳士¹ (1. 法政大学)

11:15 AM - 11:30 AM

[F-02-04] ASME V&V40に基づいた木材の曲げ試験に対する V&V

福谷 勇輝¹、*増田 悠星¹、棗田 智香子¹、倉田 和幸²、松井 和己¹、都筑 新³、三浦 孝広⁴、山本 剛大⁵、杉山 裕文⁶、渡邊 大⁷、呂 学龍¹、山田 貴博¹ (1. 横浜国立大学、2. テルモ株式会社、3. ダッソー・システムズ株式会社、4. サイバネットシステム株式会社、5. 広島大学、6. 山梨大学、7. 芝浦工業大学)

11:30 AM - 11:45 AM

10:45 AM - 11:00 AM (Wed. May 31, 2023 10:45 AM - 11:45 AM Room F)

[F-02-01] コード間対照による鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析
のコード検証

*渡邊 英吾¹、飯島 昂也¹、山川 綾之¹、車谷 麻緒¹ (1. 茨城大学)

11:00 AM - 11:15 AM (Wed. May 31, 2023 10:45 AM - 11:45 AM Room F)

[F-02-02] V&Vに向けた曲げ破壊型鉄筋コンクリートはりの Validation実験

*羽生 隼輝¹、車谷 麻緒¹ (1. 茨城大学)

幾何学的非線形性を考慮したRBSMを用いたRCはりの破壊シミュレーションにおける妥当性確認

Validation in Failure Simulation of Reinforced Concrete Members
Using RBSM with geometric nonlinearity

山本佳士¹⁾

Yoshihito Yamamoto

1) 博(工) 法政大学 デザイン工学部 教授 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33, E-mail: y.yamamoto@hosei.ac.jp)

In recent years, simulation has been increasingly used as a tool for design verification and decision-making in the engineering field. In response to this trend, V&V (Verification and Validation) concepts and specific methods have been developed to assure the reliability of simulation and to clarify the process. The V&V standard of the American Society of Mechanical Engineers requires the evaluation of various uncertainties in numerical simulations and the evaluation of the mean and variation of the response values of the analysis results. This method provides a quantitative and unambiguous assessment of accuracy. In this study, the validation of the numerical simulation method proposed by the authors for reinforced concrete (RC) beams that are subject to flexural failure, especially for post-peak behavior including localized compressive failure and buckling behavior, which cannot be reproduced by existing techniques and have not been validated, is carried out in accordance with the ASMEV&V standard, including quantification of uncertainties.

Key Words : RBSM, Collapse simulation, Geometric nonlinearity, V&V, UQ

1. はじめに

近年、原子力発電施設等の重要な土木・建築構造物の設計においては、設計作用を超えるようなケースに対しても安全性の検討を行うことが求められている。ひび割れ、圧縮破壊の局所化、鉄筋の付着すべり、座屈等、RC部材内の要素レベルの破壊挙動から部材全体の倒壊挙動までを精度良く再現可能な数値解析技術の確立は、上記のような安全性の検討のための有用なツールになるものと考えられる。

RC構造物を対象とした数値解析手法は、有限要素法を中心に数多くの研究が行われてきており、静的荷重下、地震作用下等における複雑な非線形域の応答を再現できるようになってきている。しかしながらポストピーク挙動の再現となると未だいくつかの課題が残されており、特に、コンクリートの圧縮軟化・局所化挙動、およびその拘束圧依存性挙動の再現は現状においても難しい課題として残されている[1]。さらに、過大な作用を受けて、構造部材中で圧縮破壊の局所化が起きた後、鉄筋の座屈等を経て部材が倒壊していくような、大変位・大回転を伴う挙動までとなると、その再現は一層難しく、国内外でこれを再現できた例はない。

一方、著者らは、RC部材レベルの破壊挙動、特に現状のコンクリートの数値解析技術では再現が困難な圧縮軟化・局所化挙動、拘束圧依存性挙動までを再現可能な、剛体バネモデル(RBSM)を開発している[2,3]。また、一般的にRBSMは、微小回転の仮定に基づいているため、材料レベルで破壊が局所化した後、鉄筋の座屈等を経て大変位・

大回転を伴って部材あるいは構造システム全体で倒壊していく挙動までは再現が困難であった。そこで著者らは、RBSMを大変位・大回転挙動を伴う倒壊問題へ適用するために、幾何学的非線形性を考慮可能な3次元RBSMの開発を行っている[4-7]。ただし、提案モデルの妥当性確認は十分できていない。

本研究では、コンクリートの圧縮軟化・局所化挙動、鉄筋の座屈挙動を経て、RC部材が倒壊するまでの挙動の再現を目的として、著者が提案している、有限回転を含む幾何学的非線形性を考慮した3次元RBSMの妥当性確認の過程を示す。具体的には、同一条件で15体の試験を行った、鉄筋降伏後にコンクリートの圧縮破壊により荷重低下が生じ、さらに、鉄筋の座屈に終局に至ったRCはりの曲げ載荷実験を対象として、提案手法を用いて解析を行い、ASMEV&V標準に沿った不確かさの定量化を含む妥当性確認を試みる。

2. 提案手法の概要

(1) 幾何学的非線形性を考慮したRBSM[5-7]

本研究では、Voronoi分割によるランダム多面体要素を用い、さらに大変位・大回転挙動を再現できるよう拡張した3次元RBSMによりコンクリートをモデル化した。RBSMはKawai[8]により提案された離散体解析手法の一つであり、対象を剛体要素とバネの集合体としてモデル化し、要素間に分布するバネのエネルギーを評価することにより、対象の力学的挙動を追求する手法である。バネに非線形構成モデルを導入することで、ひび割れ、すべり

等の不連続挙動を簡便に表現することができる。図-1に示すように、RBSMでは、剛体要素内の代表点に並進3、回転3の計6自由度を設定し、要素内に剛体変位関数を仮定する。一般的なRBSMでは、要素の剛体変位関数に、微小回転の仮定に基づく回転マトリクスを用いているが、本研究では、RBSMと低減積分ティモシェンコはり要素の等価性に着目して新たに開発した、有限回転を含む幾何学的非線形性を考慮した手法を用いた[5-7]。

図-2に提案手法の概要を示す。提案手法では、2つの剛体要素間の力学モデルとして、図中の青線で示すように、Voronoi面を断面を持つ、幾何学的非線形性および有限回転を考慮した低減積分ティモシェンコはり要素を仮定する。ここで、Voronoi分割の性質上、Voronoi面は2つの母点を結ぶ線分の垂直二等分面になる。Toi[9]は、RBSMの積分点位置が2つの剛体要素の自由度設定点のちょうど中間の断面に位置している場合、その要素剛性マトリクスは、同様にはり軸方向中央断面に1点の積分点を持つ低減積分ティモシェンコはり要素の要素剛性マトリクスと、完全に一致することを明らかにしている。すなわち、断面をVoronoi面とし、Voronoi母点を節点とする、低減積分ティモシェンコはり要素のネットワークからなる構造は、要素配列にVoronoi分割を適用し、Voronoi母点を自由度設定点としたRBSMと、微小変形の仮定のもとでは完全に一致する。紙面の都合上、結果は省略するが、検証解析によりこれらは実際に一致することを確認している。すなわち、2つの剛体要素間の力学モデルとして低減積分ティモ

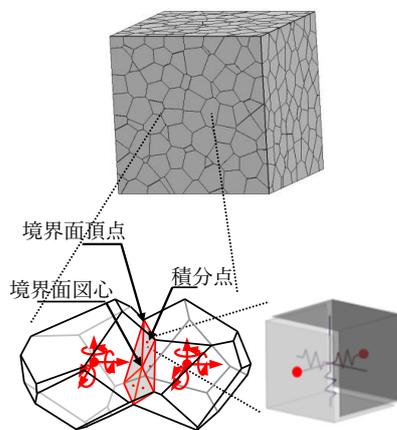


図-1 RBSMの概要

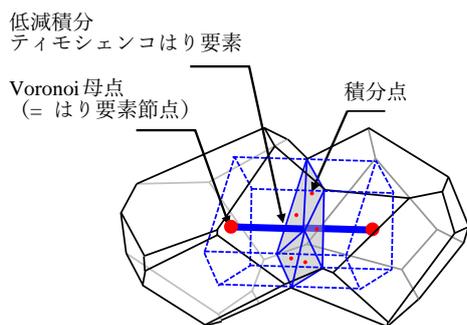


図-2 RBSMと等価な低減積分ティモシェンコはり要素

シェンコはり要素を仮定すれば、微小変形領域においては、従来の微小回転の仮定に基づくRBSMと等価になり、さらに、有限回転を含む幾何学的非線形性を考慮することで、大变位・大回転挙動の再現が可能になる。

また、提案手法では、ティモシェンコはり要素の断面内の積分点は、従来の著者らが提案している手法と同様に[2]、Voronoi面の重心と頂点からなる三角形の重心に配置(図-2)する。さらに、提案手法では、積分点で得られるGreen-Lagrangeひずみの、はり軸方向の垂直ひずみ成分および軸方向を含むせん断ひずみ成分(2成分)を、従来のRBSMにおける垂直バネおよびせん断バネのひずみと仮定し、著者らが提案している従来の構成モデルを適用して応力を算定し、これを第2 Piola-Kirchhoff応力として評価して内力計算を行った。また、コンクリートを表現する各バネの構成モデルは、微小変形を仮定したRBSMで妥当性、有用性を確認しているモデルと同一のもの[2,3]を使用した。

(2) 鉄筋モデル[4]

鉄筋のモデル化にSaito[10]らによって提案された、離散鉄筋要素を用いる。離散鉄筋要素では、鉄筋は一連のはり要素としてモデル化され、要素節点において長さゼロのリンク要素によりコンクリート剛体要素に結合される。リンク要素は、鉄筋軸方向(1成分)、鉄筋直交方向(2成分)に配置されたバネおよび各軸回りの回転バネからなり、鉄筋軸方向のバネに非線形構成モデルを導入することで、鉄筋-コンクリート間の付着すべり特性を表現する。ここで本研究では、離散鉄筋要素に、前述の幾何学的非線形性を考慮した低減積分ティモシェンコはり要素を用いた。はり要素断面を微小セル区間に細かく分割し、各セル区間の部材軸方向の垂直応力-垂直ひずみ関係に対して1軸の非線形構成モデルを与えることにより、鉄筋の軸方向および曲げに対する材料非線形性を考慮している。鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、鉄筋-コンクリート間の付着応力-すべり関係には、従来手法と同様のモデルを用いた[13]。

3. RCはりの破壊実験を対象とした妥当性確認

(1) 妥当性確認の概要

本研究ではRC部材の圧縮破壊および鉄筋の座屈を含むポストピーク挙動を再現することを所期の利用目的とし、着目する現象をRCはり部材における曲げ載荷試験、着目する応答指標を、はり上縁コンクリートの圧縮破壊後の残存耐力および鉄筋座屈時のたわみとした。なお、著者らは既往研究において、最大荷重および最大荷重時たわみを応答指標として妥当性確認を行っているが[14]、本研究は、さらにその後の破壊過程における挙動に着目している。

解析の正確度は、ASME V&V10で推奨されている、以下の式で算定される指標 M^{SRQ} を用いて評価した[15]。

$$M^{SRQ} = \frac{1}{\overline{SRQ}^{exp}} \int_{-\infty}^{\infty} |F_{SRQ}^{mod}(y) - F_{SRQ}^{exp}(y)| dy \quad (1)$$

ここで、 $F_{SRQ}^{mod}(y)$ および $F_{SRQ}^{exp}(y)$ は応答量SRQに関する解析結果および実験結果の累積分布関数、 \overline{SRQ}^{exp} は実験で得られた応答量SRQの平均値である。

実験により得られた応答値の累積分布は、詳細は以降に示すが、同一条件で複数回実施した実験の応答値より算定される。解析の応答値の不確かさの定量化は以下のように実施した。まず、解析の入力条件のうち、着目する応答指標の不確かさに与える影響が大きい因子を抽出する。本研究では、コンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度を不確かさ因子として抽出した。つづいて、例えばモンテカルロ法などにより不確かさを評価するが、本研究例のように計算負荷が大きい場合にはこの方法は実用的ではない。その他の方法としては、応答曲面法など、比較的少数のパラメータセットを用いて応答値を算定し、その結果から代替モデルを作成し、代替モデルを用いてモンテカルロシミュレーションを行う方法などが適用されている。本研究では、後者の方法を適用した。具体的には、後で示す、少数のパラメータのセットで解析を実施して応答値を算定する。その結果から応答値の線形重回帰式を導き、これを代替モデルとして解析の応答値の不確かさを定量評価する。

(2) 実験概要

妥当性確認の対象とする実験は、RCはり部材の曲げ載荷実験である。この実験の特徴は、同一条件で15体の供試体の載荷を行っているところにあり[7,16]、全ての供試体で、鉄筋降伏後にコンクリートの圧縮破壊により荷重低下が生じ、その後、一定の荷重値を保ってたわみ変形が進展した後、鉄筋の座屈により2段階目の荷重低下が見られている[7,16]。図-3に試験体の概要を示す。コンクリート

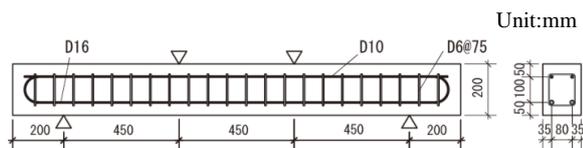


図-3 RC はり供試体の概要

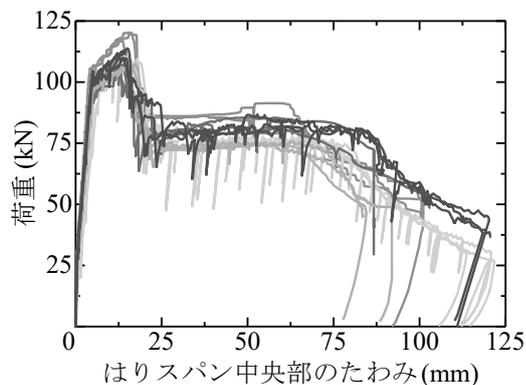


図-4 荷重-たわみ関係



写真-1 RC はりの破壊性状

の圧縮強度は45.4N/mm²、引張側主鉄筋、圧縮側主鉄筋、スターラップの降伏強度はそれぞれ401N/mm²、398N/mm²、632N/mm²である。

図-4および写真-1に実験により得られた荷重とはりスパン中央のたわみ量の関係および試験終了後の破壊性状を示す。前述のように、全ての供試体で、鉄筋降伏後にコンクリートの圧縮破壊により最初の荷重低下が生じ、その後、一定の荷重値を保ってたわみ変形が進展した後、鉄筋の座屈により2段階目の荷重低下が確認された。ここで、本妥当性確認において設定した着目する応答指標である、はり上縁コンクリートの圧縮破壊後の残存耐力、および鉄筋座屈時のたわみとは、それぞれ、荷重-たわみ量関係における、鉄筋座屈時に生じた2段階目の荷重低下時の荷重値およびたわみ量である。

(3) 解析概要

図-5に要素分割図を示す。終局時において破壊が局所化する等曲げ区間においては、平均的要素寸法は20mmとした。計算負荷を低減させるためにせん断スパンでは、要素寸法が、はりの端部に向かって徐々に大きくなるように設定した。なお、2.(1)でも述べたように、使用した構成モデルおよび材料パラメータのセットは、最大粗骨材寸法程度の要素寸法(10~30mm)を用いることで軟化、破壊局所化領域などを含むコンクリートの各種応答力下の応力-ひずみ応答を再現できることが確認されているものである[2]。図-5に中の梁上部に配置した2つの載荷板要素を変位制御することで静的載荷を実施した。

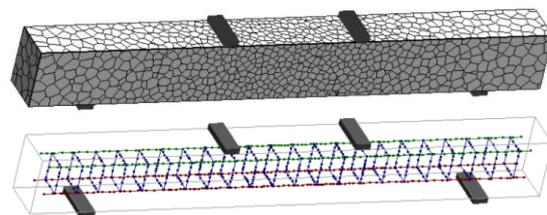


図-5 要素分割図

(4) 代替モデルの作成および不確かさ定量化

代替モデル（本研究では、線形重回帰式）の作成のために、前述の2つの因子（①コンクリートの圧縮強度、および②鉄筋の降伏強度）を3水準で変化させ、それぞれの値のすべての組み合わせを考慮した、計9ケースの解析を実施した。なお、それぞれの因子の3つの水準は、平均値、および平均値から、コンクリートの圧縮強度および主鉄筋の降伏強度は $\pm 2\sigma$ だけ振って値を設定した。ここで、 σ は標準偏差であり、コンクリートの圧縮強度は材料試験結果に基づいた値である[16]。鉄筋降伏強度の標準偏差は試験値が得られておらず仮に設定した値である。

図-6に、計9ケースの、RBSMモデルにより得られた残存耐力、および鉄筋座屈時のたわみの値と、同じパラメータセットを線形重回帰式回帰式に代入して求めた残存耐力および座屈時たわみの値の対応関係を示す。図より座屈時たわみの線形回帰式の推定精度がやや低いことが分かる。

つづいて、得られた線形回帰式を用いて、解析により得られた残存耐力、および鉄筋座屈時のたわみの不確かさを定量評価する。図-7に解析および実験により得られた累積分布を示す。 M^{SRQ} を評価した結果、残存耐力では11.6%、座屈時たわみでは33.1%となった。

4. 結論

本研究は、RC部材の圧縮破壊および鉄筋の座屈を含むポストピーク挙動を再現することを所期の利用目的とし、着目する応答指標を1) 残存耐力および2) 座屈時たわみ

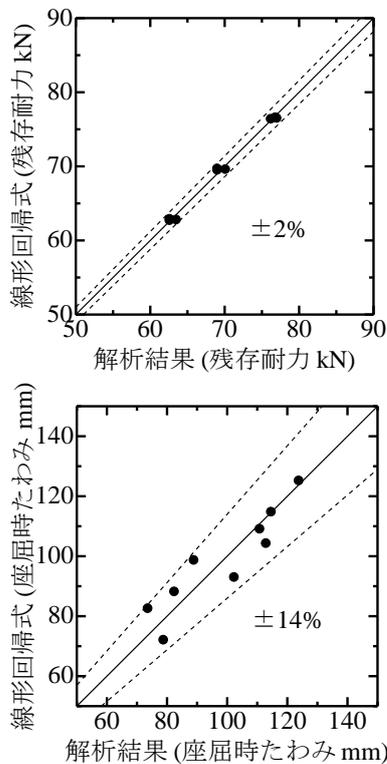


図-6 解析結果と線形回帰式との比較

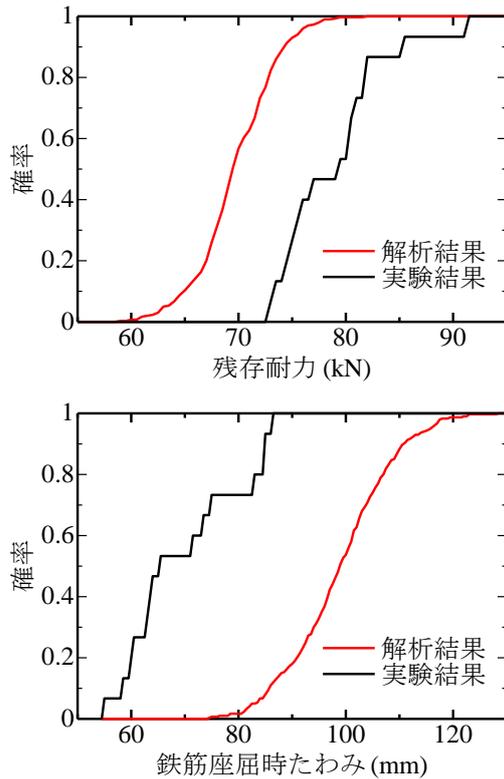


図-7 実験および解析の応答値の累積分布の比較

として検討を行ったものである。

同一条件で15体実施した実験結果、および不確かさを定量化して得られた解析結果の累積分布同士を比較して正確度 M^{SRQ} を評価した結果、残存耐力では11.6%、座屈時たわみでは33.1%となった。特に座屈時たわみの正確度は低いと考えられ、モデルの見直しをする必要がある。また、本研究では、不確かさ定量化の際に、線形回帰式を代替モデルとして用いたが、特に座屈時たわみの場合には精度が低く、不確かさ因子の再検討、合理的な代替モデルの作成方法等も併せて検討する必要がある。

参考文献

- [1] 日本コンクリート工学協会, コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会: コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用, 日本コンクリート工学協会, 2003.
- [2] 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集E, Vol.64, No.4, pp.612-630, 2008.
- [3] Yamamoto, Y., Nakamura, H., Kuroda, I. and Furuya, N.: Crack propagation analysis of reinforced concrete wall under cyclic loading using RBSM, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol.8, Issue7, pp.780-792, 2014.
- [4] 伊佐治優, 山本佳士, 中村光, 三浦素人: 幾何学的非線形性を考慮した離散鉄筋要素を導入した3次元RBSMによるRC部材のポストピーク挙動解析, コン

- クリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 2号, pp.67-72, 2017.
- [5] 伊佐治優, 山本佳士, 中村光, 三浦泰人: 破壊の局所化および大回転変位を伴うRC構造物の破壊シミュレーションのための新しい離散体解析手法の開発, 計算工学講演会論文集, Vol.22, 2017.
- [6] 北川晴之, 山本佳士, 中村光, 三浦泰人: RBSMによる曲げ破壊するRCはりのポストピーク挙動評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 2号, pp.73-78, 2019.
- [7] Yamamoto, Y., Isaji, Y., Nakamura, H. and Miura, T.: Collapse Simulation of Reinforced Concrete Including Localized Failure and Large Rotation Using Extended RBSM, Proceedings of 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-10), 2019.
- [8] Kawai, T.: New discrete models and their application to seismic response analysis of structures, Nuclear Engineering and Design, VI.48, pp.207-229, 1978.
- [9] Toi, Y.: Shifted Integration Technique in One-Dimensional Plastic Collapse Analysis Using Linear and Cubic Finite Elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.31, pp.1537-1552, 1991.
- [10] Saito, S. and Hikosaka, H.: Numerical analyses of reinforced concrete structures using spring network models, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Japan Society of Civil Engineers, No.627, V-44, pp.289-303, 1999.
- [11] Timoshenko, S. and Gere, J.: Theory of elastic stability, McGraw-Hill Inc., 1961.
- [12] 伊佐治優, 山本佳士, 中村光, 三浦泰人: 有限回転を考慮した3次元RBSMによるコンクリート材料のポストピーク挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.91-96, 2016.
- [13] 田上和也, 中村光, 斉藤成彦, 檜貝勇: 繰り返し荷重を受ける鉄筋の座屈モデルに関する研究: 構造工学論文集, Vol.47A, pp.725-734, 2001.
- [14] 山本佳士, 坂敏秀, 車谷麻緒: RBSMを用いた鉄筋コンクリート部材の破壊シミュレーションにおける不確かさ評価と妥当性確認, 計算工学講演会論文集, Vol.26, 2021.
- [15] ASME: Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME Standard V&V 10-2006, 2006.
- [16] 山本佳士, 上田尚史, 小倉大季, 車谷麻緒: RCはりの耐荷・変形性状の再現性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 2号, pp.229-234, 2019.

ASME V&V40に基づいた 木材の曲げ試験に対するV&V

Verification and Validation for bending test based on ASME V&V40

福谷勇輝¹⁾, 増田悠星¹⁾, 棗田智香子¹⁾, 倉田和幸²⁾, 松井和己¹⁾, 都筑新³⁾,
三浦孝広⁴⁾, 山本剛大⁵⁾, 杉山裕文⁶⁾, 渡邊大⁷⁾, 呂学龍¹⁾, 山田貴博¹⁾

FUKUTANI Yuki, MASUDA Yusei, NATSUMEDA Chikako, KURATA Kazuyuki,
MATSUI Kazumi, TSUZUKI Arata, MIURA Takahiro, YAMAMOTO Takeki, SUGIYAMA Hirofumi,
WATANABE Dai, LYU Xuelong & YAMADA Takahiro

1) 横浜国立大学大学院環境情報学府 (E-mail: kzm@ynu.ac.jp)

2) テルモ株式会社 (E-mail: Kazuyuki_Kurata@terumo.co.jp)

3) ダッソー・システムズ株式会社 (E-mail: arata.tsuzuki@3ds.com)

4) サイバネットシステム株式会社 (E-mail: t-miura@cybernet.co.jp)

5) 広島大学大学院先進理工系科学研究科 (E-mail: takeki@hiroshima-u.ac.jp)

6) 山梨大学大学院総合研究部 (E-mail: hirofumis@yamanashi.ac.jp)

7) 芝浦工業大学システム理工学部 (E-mail: dai-wata@shibaura-it.ac.jp)

Wood, a biomaterial, exhibits variability in its mechanical properties. In this study, the objective is to quantify the bending Young's modulus variability of wood based on the results obtained from the material tests. Differences in Young's modulus in bending due to different derivation methods using strain and displacement are also discussed. Understanding the bending Young's modulus variability of wood should be basis in any mechanical simulations for wooden products.

Key Words : 4-Point Bending Test, White Woods, Uncertainty

1. はじめに

シミュレーション結果の品質保証における基本的な考え方に V&V (Verification (検証) and Validation (妥当性確認)) がある。本研究では木工椅子を題材として、椅子の変形をシミュレーションで予測し実験と比較してシミュレーションモデルの妥当性を確認する^[1]。特に、ASME V&V-10^[2]が提示する階層型アプローチにおける最下層である材料試験を取りあげて、木材の物性値を同定するための曲げ試験に対するV&Vプロセスを実施する。

木材の機械的特性については、JIS Z2101:2009^[3]や構造用木材の強度試験マニュアル^[4]において様々な試験方法およびヤング係数の導出方法が規定されているが、治具の設置方法や荷重の負荷方法の詳細までは記述されていない。実験で得られる材料定数のばらつきは材料特性そのもののばらつきのみであることが理想であるが、実際には試験片形状の違いや治具との摩擦による影響が含まれる可能性がある。それらの影響を極力排除、あるいは適切に評価することが重要である。本稿では、まずは等方で均質な材料と考えられるポリアセタール材を用いて予備実験を実施し、材料試験方法の妥当性を確認する。

木材の曲げヤング係数を求める際には、文献^[3,4]では Bernoulli-Euler 梁の曲げ理論の式を利用したものが提示されている。しかしながら、木材のせん断弾性係数はヤング係数に比べて非常に小さいため、断面のせん断変形を無

視できないと考える。そこで本研究では木材の物性値を決める際に Timoshenko 梁の曲げ理論を用いる方法と比較して、文献で規定されている手法の妥当性を確認する。さらに、Timoshenko 梁理論を用いることで、曲げ試験で観測されたたわみを曲げ変形によるものとせん断変形によるものに分解して、軸変形とせん断変形それぞれに関する材料パラメータを決定する。

2. 試験条件

(1) 試験体

本研究では曲げヤング係数を評価するための4点曲げ試験を採用した。JIS規格に準じて試験体の寸法は20×20×280 [mm]の直方体として作成した。一般にホワイトウッド材として販売されている欧州唐檜の2x4製材60本から、1体、または2体ずつ計100体の試験体を採取し、すべての寸法を0.01 [mm]単位で計測した。このとき、試験体の概形を変化させるような欠点は含まないように配慮したが、試験体にまったく欠点が存在しない無欠点試験体ではない。また、試験体作成時には柁目や板目などの木取りは考慮していないため、これらが試験結果として得られる機械特性をばらつかせる要因になると考えられる。

(2) 試験機

曲げ試験の実験装置をFig.1に示す。試験にはテンシロン万能試験機(RTF-1350, 荷重容量50 [kN])を使用した。

支点間距離を240 [mm]、荷重点間距離は支点間距離の1/3である80 [mm]として、曲げ試験を行うための治具を設置した(Fig.2). なお、この治具上部には万能試験機とは独立したロードセルを設置できるようにしており、本実験では荷重容量50 [kN]のロードセル (9E01-L23-50KN)を設置した. 木材の下面のたわみを測定するために支点間中央にレーザー変位計(KEYENCE IL-065)を設置し、载荷部の変位はカンチレバー型の変位計で計測する. また、試験体中央のひずみの曲げ成分、軸成分を計測するために、試験体中央の上下面にそれぞれひずみゲージ(東京測器研究所製、ゲージ長 5mm)を貼付してひずみを計測する.

3. ポリアセタール材の曲げ試験

曲げ試験の妥当性を確認するための予備実験として、均一性材料であるポリアセタール材(POM, ヤング率約3 [GPa])に対する曲げ試験を行った. 予備実験では以下の2点に注目した.

- ・純曲げ状態になるか？ すなわち支持点・载荷点の拘束により軸成分の変形が生じていないこと
- ・純曲げの仮定において、中央のたわみと上下面のひずみそれぞれから算出する曲げヤング係数が一致するか.

(1) 純曲げ変形

負荷・除荷 1 サイクルにおいて、試験片上下面に貼り付けたひずみゲージそれぞれから得られるひずみを軸成分 ε_a と曲げ成分 ε_b に分解する.

$$\varepsilon_a = (\varepsilon_{\text{low}} + \varepsilon_{\text{up}}) / 2 \quad (1)$$

$$\varepsilon_b = (\varepsilon_{\text{low}} - \varepsilon_{\text{up}}) / 2 \quad (2)$$

この式を用いて評価した ε_a と ε_b の時間変化をFig.3に示す. 曲げ成分の最大値が5570 μST であるのに対して、軸成分の最大値は65 μST と十分に小さく、载荷部スパンにおいて純曲げ状態にあると判断した.

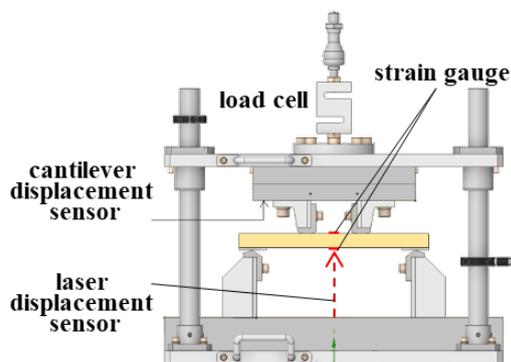


Fig.1 Bending test equipment

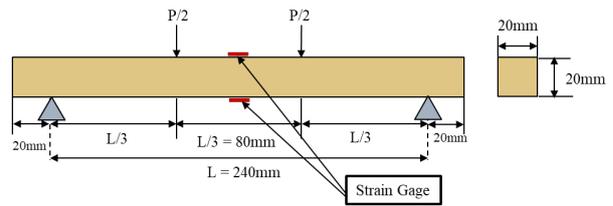


Fig.2: Illustration of dimensions for bending test

(2) たわみ、曲げひずみから算出する曲げヤング係数
構造用木材の強度試験マニュアル⁴⁾では、木材の4点曲げ試験における試験片中央のたわみとひずみは、それぞれBernoulli-Euler梁の理論を用いて次のように規定されている.

たわみ

$$w_{\text{center}} = \frac{\frac{L}{3} \left(3L^2 - 4 \left(\frac{L}{3} \right)^2 \right) P}{48I} = \frac{23}{1296} \frac{PL^3}{EI} \quad (3)$$

ひずみ

$$\varepsilon = \frac{h M}{2I E} = \frac{Lh P}{12I E} \quad (4)$$

ここで、 L は支点間距離、 I は断面2次モーメント、 P は荷重、 w_{center} は試験片中央のたわみ量、 h は試験片高さ、 ε は上下面のひずみゲージから得られる曲げ成分である. 上式から载荷時に得られる上下面のひずみ、試験体中央のたわみからそれぞれヤング係数の導出をする. それぞれのヤング係数の導出式を以下に示す.

たわみから

$$E_w = \frac{\frac{L}{3} \left(3L^2 - 4 \frac{L^2}{3} \right) P}{48I} \frac{P}{w_{\text{center}}} = \frac{23L^3}{1296I} \frac{P}{w_{\text{center}}} \quad (5)$$

ひずみから

$$E_b = \frac{Lh P}{12I \varepsilon} \quad (6)$$

このようにして求めたヤング係数は $E_w = 2.36 \text{ GPa}$ 、 $E_b = 2.32 \text{ GPa}$ であり、両者の差は1%程度であるため一致していると判断できる. つまり、ここでの予備実験から、実験装置が適切に4点曲げ試験を実施できること、すなわち実験装置の妥当性が確認できた.

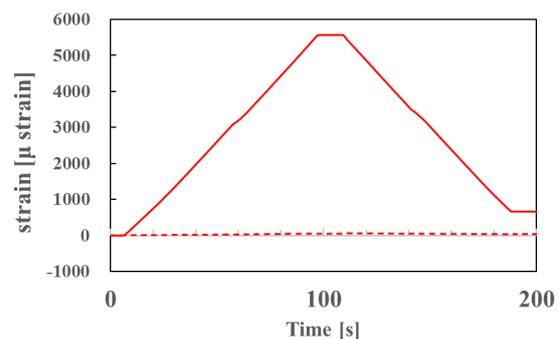


Fig. 3 Strain components in bending test

4. 木材の曲げ試験

2.1節で述べた木材の試験体100体に対して4点曲げ試験を行った。JIS Z2101で比例限度領域とされている8~17 [GPa](荷重換算でおよそ 200~400 [N])ではなく、木材に対する事前試験の荷重-たわみ線図から、比例領域が400~800[N]の範囲であると判断し、この区間における荷重・たわみ・ひずみそれぞれの変化量を用いて曲げヤング係数を評価した。この荷重範囲に対して式(5)、ならびに式(6)を適用して評価した E_w (平均 10.68 [GPa], 標準偏差 2.31 [GPa], CV 0.216), E_b (平均 13.27 [GPa], 標準偏差 4.32 [GPa], CV 0.325)の度数分布をFig. 4に、 E_w と E_b の相関関係をFig.5に示す。今回実施した木材の曲げ試験の中では、 E_w に比べ、 E_b のほうが大きな値となる傾向が見られる。また、2つの方法で求めたヤング係数が一致した試験片はほとんど存在しなかった。

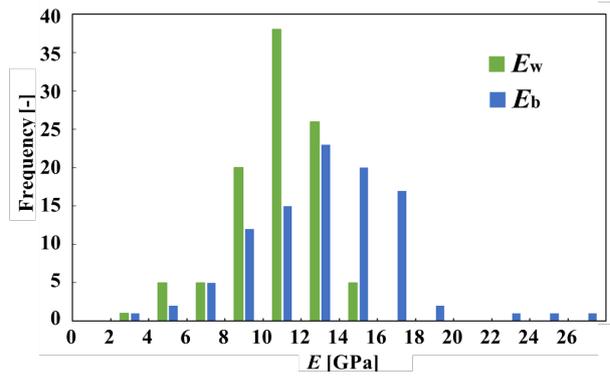


Fig. 4 Histogram of Elastic Modulus

5. 木材のたわみ変形に対する考察

実験結果より、木材のたわみはBernoulli-Euler 梁の曲げ理論を用いて求めたたわみ (式 (5)) より大きくなるのがわかる。そこで曲げ試験による木材のたわみは曲げ変形によるものに加え、断面のせん断変形が寄与していると考えられる。

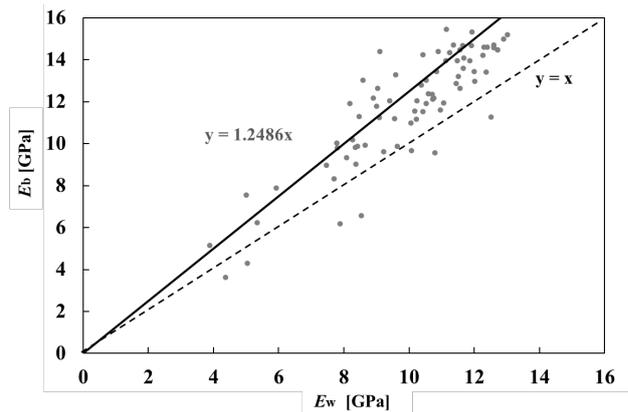


Fig.5 Relationship b/w $E_w - E_b$

木材は方向により力学的性質が異なり、木目に対して繊維方向(L), 半径方向(R), および接線方向(T)を主軸とする直行異方性体として扱われることが多い^[5]。文献では曲げ試験で評価できる繊維方向のヤング係数(E_L)に対して断面のせん断係数(G_{RT})が 1/1000 程度と非常に小さいことが指摘されている。したがって、せん断変形による試験片のたわみを無視することができない可能性を確認する。

曲げ試験によるたわみ変形を曲げ変形によるものとせん断変形によるものに分けて考えるためにTimoshenko梁の曲げ理論を用いる。Timoshenko梁理論による4点曲げ試験のたわみを次式に示す。

① $0 < x < \frac{L}{3}$ のとき

$$w_1(x) = -\frac{1}{12} \frac{P}{EI} x^3 + \frac{1}{18} \frac{PL^2}{EI} x + \frac{1}{2} \frac{EI}{GA} \frac{P}{EI} x \quad (7)$$

② $\frac{L}{3} < x < \frac{L}{2}$ のとき

$$w_2(x) = -\frac{1}{36} \frac{P}{EI} \{(1-x)^3 + x^3\} + \frac{2}{81} \frac{PL^3}{EI} + \frac{1}{6} \frac{EI}{GA} \frac{P}{EI} \quad (8)$$

ここで I は断面2次モーメント、 P は荷重、 A は断面積である。式(1)の右辺第1項、第2項はそれぞれ曲げ変形によるたわみ、右辺第3項はせん断変形によるたわみに対応する。断面内のせん断変形を一樣な場であると仮定し、せん断項の補正係数は1とした。せん断変形によるたわみが曲げ変形によるたわみに対して影響が小さい場合、右辺第1項、第2項が残り、Euler梁による4点曲げ試験の理論解と一致する。また、今回用いた試験片による中央のたわみは次式で表せる。

$$w_{center} \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{23}{1296} \frac{PL^3}{EI} + \frac{1}{6} \frac{EI}{GA} \frac{PL}{EI} = \frac{23}{1296} \frac{PL^3}{EI} + \frac{1}{6} \frac{EI}{GA} \frac{PL^3}{EI} = \frac{23}{1296} \frac{PL^3}{EI} + \frac{1}{6} \frac{EI}{GA} \frac{PL^3}{EI} \quad (9)$$

上式より曲げ変形とせん断変形によるたわみの寄与は $\frac{PL^3}{EI}$ の係数を比べることでわかる。ここで試験体が等方弾性体と仮定するとヤング係数とせん断係数の比はポアソン比を用いて次の式で表される。

$$\frac{E}{G} = 2(1 + \nu) \quad (10)$$

等方弾性体では $E/G = 3$ 程度でありこのとき曲げ成分に対するせん断成分は 1/60 程度であり無視できる程に小さい。しかし文献値による $E/G = 1000$ を考えると曲げ成分に対するせん断成分は 125/23 とたわみの寄与分はとても大きくなるため、4点曲げ試験においてせん断変形によるたわみを無視できないと判断する。

6. 樹脂の曲げ試験におけるE/G

POM材の試験片による4点曲げ試験から、荷重と中央のたわみの関係・ひずみの曲げ成分とモーメントの関係を

Fig.6, Fig.7に示す. 2つのグラフから100N ~ 400Nの荷重範囲において線形関係が成り立つと判断し, この範囲のひずみとモーメントからヤング係数 E を同定した. 同定したヤング係数から式(9)右辺第1項より100N ~ 400Nの荷重増分に対する曲げ変形によるたわみ増分を計算する. その後, 実験で計測したたわみ増分と曲げ変形によるたわみ増分から式(9)を用いれば E/G が評価できる.

均一性材料であるポリアセタール材を等方弾性体と仮定すると E/G はポアソン比を用いて式(10)で表せる. そこで樹脂材の中央上下面に2軸のひずみゲージを貼り, 軸方向のひずみとそれに垂直な方向のひずみを計測することでポアソン比を評価した.

式(9)を用いて求めた E/G と実験から得られたポアソン比, 等方性を仮定したときの E/G をTable.1に示す.

2つの導出から求めた E/G が同じオーダーであるため, 式(9)を用いてせん断変形に関するパラメータ E/G を求めることが妥当であると判断する.

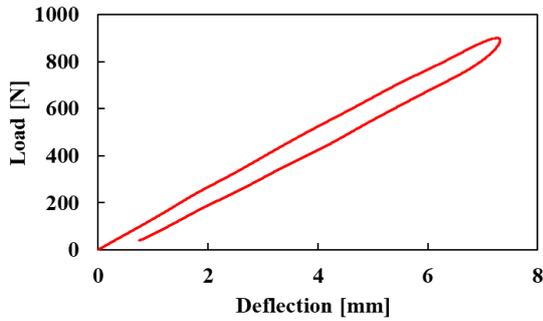


Fig. 6 Load vs Deflection

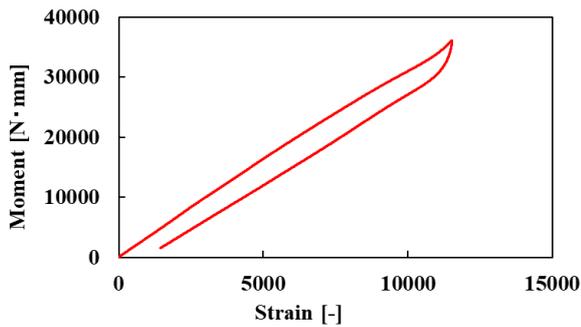


Fig. 7 Moment vs Strain

Table.1 Comparison of E/G

E/G by eq.(9)	1.79
Poisson's ratio	0.39
E/G by eq.(11)	2.78

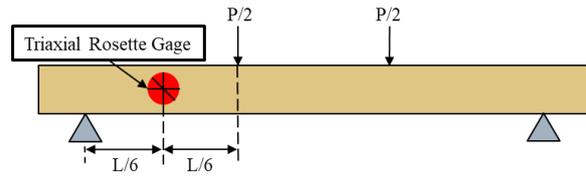


Fig.8 Position of Triaxial Rosette Gage

7. 木材の曲げ試験

・木材のせん断変形

木材のせん断変形が無視できないことを検証するため, Fig.8に示すように試験体の支点と載荷点の間の面に3軸ひずみゲージを貼り付け, せん断変形の様子を観察する. 800Nの載荷, 除荷の1サイクルにおけるそれぞれの最大せん断ひずみとゲージの位置におけるモーメントの関係をFig.9に示す. 等方弾性体と仮定したPOMに比べ木材のせん断ひずみが大きいことから, 5節で述べたように木材のせん断変形がたわみに与える影響を考慮したパラメータの決定が必要であると判断した.

・物性値の推定

4節で行った曲げ試験の実験結果に対して, 試験片中央で計測したひずみから式(3)を用いてヤング係数 E を求める. また, 6節で行った手順と同様の計算からせん断変形の寄与に関するパラメータ E/G を決定する. 実験から得られたヤング係数 E と E/G の度数分布をFig.10, Fig.11に示す.

E/G は20~80に分布しているものが多く, せん断変形によるたわみが曲げ変形によるたわみの1/10~4/10程度であることを確認した.

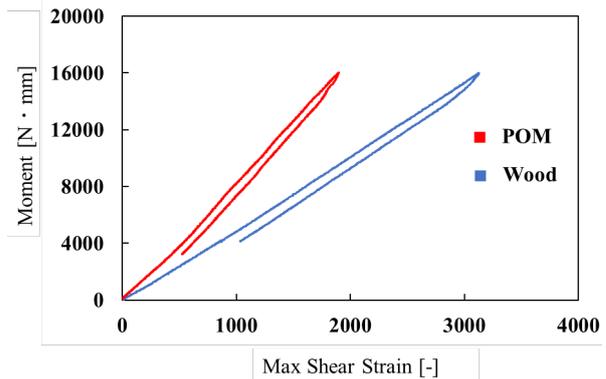


Fig. 9 Max Shear Strain b/w POM and Wood

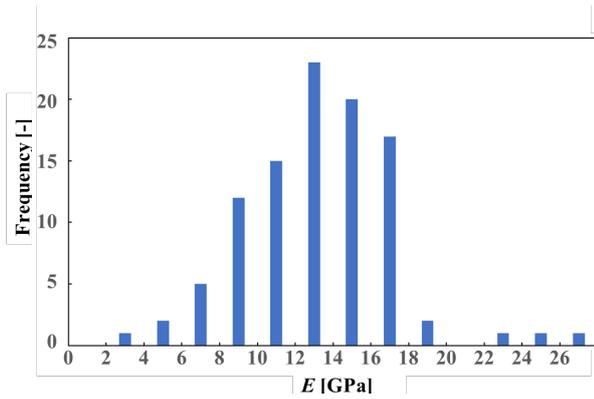
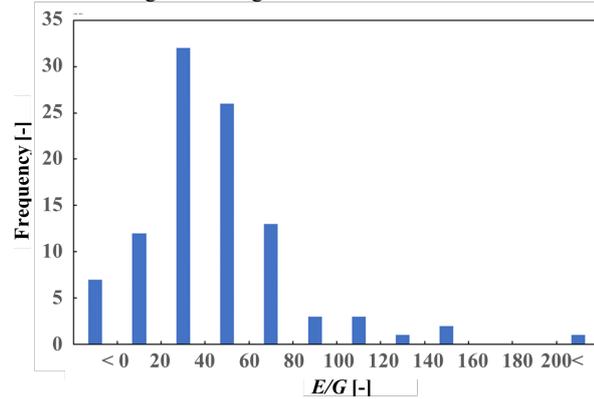


Fig. 10 Histogram of Elastic Modulus

Fig. 11 Histogram of E/G

8. おわりに

本稿では V&V プロセスの最下層である材料試験における曲げ試験の妥当性を確認した。式(5)の梁理論式は、載荷時の軸ひずみや断面の形状変化などを考慮していない点から生じたものであると考え、Timoshenko 梁理論を用いて実験の結果を評価した。今後木材のシミュレーションにこれらの結果を適用する際に、どのように定量化するのが適当であるかなどの検討をする。

参考文献

- [1] 松井和己, 倉田和幸, 三浦孝広, 都筑新, 渡邊大, 山本剛大, 杉山裕文, 棗田智香子, 山田貴博: ASME V&V40 に基づいた木製椅子に対するシミュレーションの品質保証, 計算工学講演会論文集, 27, 2022.
- [2] ASME: *ASME V&V-10 2019 Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*, ASME 2019.
- [3] 日本規格協会, JIS Z 2101:2009 木材の試験方法, 2009.
- [4] (公財)日本住宅・木材技術センター: 構造用木材の強度試験マニュアル, 2011.
- [5] 日本木材学会編: 木質の物理, 文永堂出版, 2007.

OS21 シミュレーションの品質保証とV&V、UQ

[F-03] OS21 シミュレーションの品質保証と V&V、UQ (3)

座長:吉田 有一郎(東芝インフォメーションシステムズ株式会社)

Wed. May 31, 2023 1:15 PM - 2:30 PM Room F (2F Conference Room 202B)

[F-03-01] 落石形状特性が到達分布に与える影響のモデル化

吉田 大活¹、外里 健太¹、野村 怜佳¹、*森口 周二¹、寺田 賢二郎¹ (1. 東北大学)

1:15 PM - 1:30 PM

[F-03-02] 熱・流体・力学連成解析の Validation に用いる材料定数のばらつきの定量化検討

*佐藤 伸¹、森岩 寛稀¹、伊藤 真一²、高田 雄大²、酒匂 一成² (1. 株式会社大林組、2. 鹿児島大学)

1:30 PM - 1:45 PM

[F-03-03] ASME V&V40 に基づいた木材の圧縮試験に対する V&V

*谷田 紗音¹、福谷 勇輝¹、棗田 智香子¹、高橋 由佳¹、倉田 和幸²、松井 和己¹、都筑 新³、三浦 孝広⁴、山本 剛大⁵、杉山 裕文⁶、渡邊 大⁷、呂 学龍¹、山田 貴博¹ (1. 横浜国立大学、2. テルモ株式会社、3. ダッソー・システムズ株式会社、4. サイバネットシステム株式会社、5. 広島大学、6. 山梨大学、7. 芝浦工業大学)

1:45 PM - 2:00 PM

[F-03-04] ASME V&V40 に基づいた木材接合部の剛性評価に対する V&V

*都筑 新¹、油川 英史²、福谷 勇輝²、倉田 和幸³、松井 和己²、三浦 孝広⁴、山本 剛大⁵、杉山 裕文⁶、渡邊 大⁷、呂 学龍²、棗田 智香子²、山田 貴博² (1. ダッソー・システムズ株式会社、2. 横浜国立大学、3. テルモ株式会社、4. サイバネットシステム株式会社、5. 広島大学、6. 山梨大学、7. 芝浦工業大学)

2:00 PM - 2:15 PM

[F-03-05] 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

*青野 泰久¹、山本 真哉¹、鎌田 浩基¹、櫻井 英行¹ (1. 清水建設株式会社)

2:15 PM - 2:30 PM

落石形状特性が到達分布に与える影響のモデル化

Modeling the Influence of Rock Shape on Run-out distribution of Rockfall

吉田大活¹⁾ 野村怜佳²⁾ 森口周二³⁾ 寺田賢二郎⁴⁾ 津田悠人⁵⁾ 吉田郁政⁶⁾
Taiki Yoshida, Reika Nomura, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada, Tuda Yuto, Ikumasa Yoshida

¹⁾工博 東北大学 工学研究科 修士 (〒 980-8547 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1,
E-mail: taiki.yoshida.p3@gmail.com)

²⁾工博 東北大学 工学研究科 助手 (〒 980-8547 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

³⁾工博 東北大学 工学研究科 准教授 (〒 980-8547 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

⁴⁾工博 東北大学 工学研究科 教授 (〒 980-8547 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

⁵⁾工博 東京都市大学 総合理工学研究科 博士 (〒 158-8557 東京都 世田谷区 玉堤 1-28-1)

⁶⁾工博 東京都市大学 総合理工学研究科 教授 (〒 158-8557 東京都 世田谷区 玉堤 1-28-1)

This study aims to numerically investigate the effects of rock shape on the run-out distribution characteristics of rockfall, and to construct a GPR-based model for a novel approach of rockfall risk assessment. To this end, a series of rock fall simulations are performed under various calculation conditions and rock shapes characterized by the concept of sphericity. The simulation results indicate a strong correlation between the two sphericities and run-out distribution. Based on the finding, we constructed a model to predict run-out distribution at a low computational cost. Although the prediction model could benefit from further improvement in accuracy, it could be concluded that the run-out distribution of rockfall can be predicted using two sphericities, material property, and slope angle.

Key Words : Rockfall, DEM, Sphericity, Predict Model

1. はじめに

落石は斜面災害の一種であり、特に山岳地帯で多くの人的被害や経済的損失をもたらしている。特に道路や鉄道における安全を考える上で、落石のリスク低減は重要な課題であり、わが国のように山岳地帯が広く分布する国々の共通の悩みである。落石リスクを低減するためには、その高精度なリスク評価が必要不可欠であり、近年では高度な数値シミュレーションを用いた研究が多く報告されている。これまでは、計算コストの低い質点系シミュレーションを用いた二次元解析が主体的に適用されてきたが、近年の計算機能力や数値解析技術の向上に伴い、個別要素法 (DEM: Discrete Element Method) [1] を代表とする非質点系手法がリスク評価の強力なツールとして認知されている。

落石に関する研究については、斜面の材質や粗さが岩塊の反発特性や摩擦特性に与える影響など、多くの研究成果が報告されている。一方で、岩塊の形状特性が落石の到達分布特性に与える影響については、未解明な部分が多く、体系的には整理されているとは言い難い。そのため、本研究では、個別要素法による落石シミュレーションの結果に基づいて、落石の形状特性が到達分布特性に対して与える影響を、物性値の影響を含めて評価することを目的とする。さらに、その分析結果に基づいて、到達分布特性を岩塊の形状特性から回帰するモデルを構築し、その有用性や可能性について議論する。

表-1 岩塊の物性値

密度 (kg/m ³)	体積 (m ³)	バネ定数 (N/m)
2650	1.0	1.0 × 10 ¹⁰

2. DEM (個別要素法)

DEM は、不連続体の接触や衝突を扱うことができる手法である。各要素を剛体ブロックとして表現し、要素同士の貫入を許容するという仮定に基づいて要素間力を評価し、剛体並進と剛体回転に関する運動方程式を解く。

本研究では、多角形要素を扱うことが可能である ESSI (Engineering Simulation and Scientific Software) 社の DEM ソフトウェアである Rocky-DEM[2] を用いる。各方向の接触力モデルに関しては、法線方向の接触力モデルにヘルツばね・ダッシュポットモデルを、接線方向の接触力モデルに線形ばね摩擦モデルをそれぞれ採用した。

3. 岩塊形状と到達分布特性の指標

岩塊モデル (以下、岩塊) の物性値を表 1 に、斜面モデル (以下、斜面) の物性値を表 2 にそれぞれまとめた。斜面勾配については 3 種類とし、全ての斜面勾配の条件で、斜面下から岩塊の重心までの鉛直高さを 6m とし、静かに落下させる。これにより、各斜面勾配での落石の初期位置における位置エネルギーを一定にしている。また、計算の試行毎に初期姿勢を変化させ、落石挙動のばらつきを表現する。

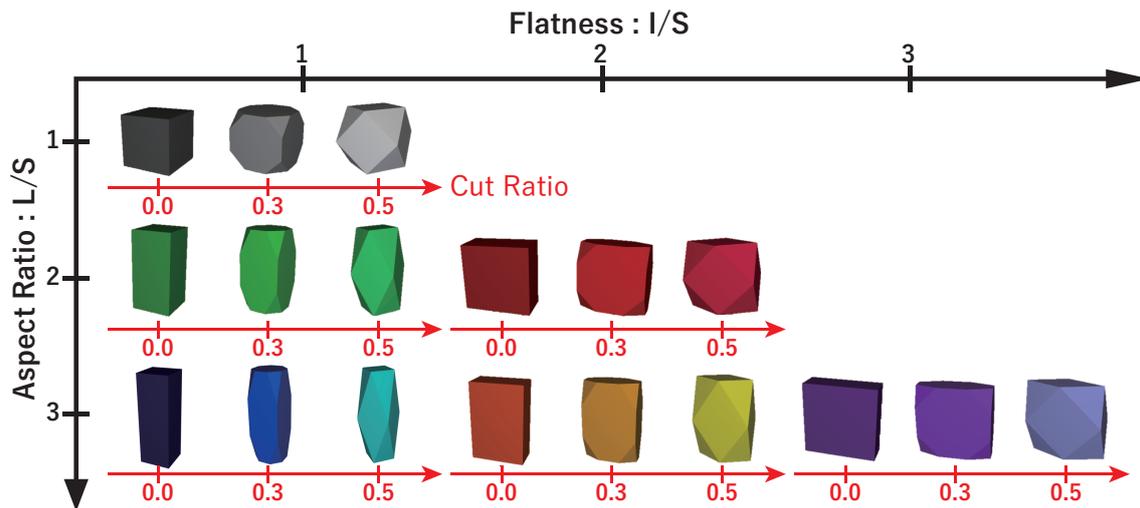


図-1 岩塊形状のイメージ

表-2 斜面の物性値

反発係数	0.1	0.3	0.5
摩擦角 θ	20度	30度	40度
斜面勾配	30度	45度	60度

落石の到達分布に対して、岩塊の形状変化が及ぼす影響を表現するために、岩塊のアスペクト比、扁平率、カット比をそれぞれ変化させ、複数の異なる岩塊形状を用意した。アスペクト比と扁平率の組み合わせで6種類の岩塊形状を設定し、この6種類の岩塊に3種類のカット比をそれぞれ適用することで、計18種類の岩塊を作成した。作成した岩塊のイメージを図-1に示す。

岩塊の形状特性を表現する指標として、球形度を用いる。先述のように、岩塊形状は、アスペクト比、扁平率、カット比をパラメータとして変化させているが、アスペクト比と扁平率は、対象とする方向が異なるだけでその物理的な意味は同じであり、さらにこれらの3つの指標が到達分布に与える影響は、互いの相関が複雑なものになると予想される。そのため、形状特性の指標として、それらの指標を直接的に用いるのではなく、多くの関連研究で到達分布との関係性が指摘されている球形度を岩塊形状の形状特性の指標として採用した。球形度は対象物体がどれだけ球体に近いのかを示すパラメータであり、球形度の値が1.0に近いほど、対象とする岩塊が球体に近いことを意味する。ただし、Reisら[3]によると、下記のように球形度には複数の定義が提案されている。

$$\Psi_W = \frac{\sqrt[3]{36\pi V^2}}{A} \tag{1}$$

$$\Psi_{B\&G} = \frac{D_i}{D_C} \tag{2}$$

$$\Psi_A = \frac{V}{V_C} \tag{3}$$

$$\Psi_{R1} = \frac{A}{\pi D_C^2} \tag{4}$$

$$\Psi_{R2} = \sqrt{\frac{A}{\pi D_C^2}} \tag{5}$$

$$\Psi_{R3} = \sqrt{\frac{D_i}{D_C}} \tag{6}$$

ここで、 A は対象物体の表面積、 V は体積、 V_C は最小外接球の体積、 D_i は最大内接球の直径、 D_C は最小外接球の直径である。 Ψ_W はWadell[4]が、 $\Psi_{B\&G}$ はBullardとGarboczi[5]が、 Ψ_A はAlshibliら[6]がそれぞれ考案した球形度の式であり、 $\Psi_{R1} \sim \Psi_{R3}$ はReisらが提案したものである。

次に、到達分布特性の指標について説明する。分布特性を定量的に表現するため、 x 方向（斜面断面方向）の到達距離の平均値（ X_{ave} ）、および z 方向（斜面延長方向）の中央線からの距離の平均絶対値（ Z_{ave} ）をそれぞれ定義した。また、到達分布のばらつきを表現するため、 x 方向と z 方向の変動係数（ X_{CV} 、 Z_{CV} ）も指標として採用した。

4. 形状特性が到達分布特性に与える影響の定量的評価

表2に示す各物性値を総当たりで変化させて27種類の計算条件を設定し、先述の18種類の岩塊モデルを考慮して、合計488ケースの落石シミュレーションを実施した。また、先述のように、落石経路のばらつきを表現するため、試行毎で岩塊の初期姿勢を100回変化させている。そのため、本研究で実施した落石シミュレーションは合計で48800回となる。以上の落石解析の結果をもとに、岩塊形状が到達分布特性に与える影響を定量的に評価する。

球形度と各到達分布特性の関係を主成分分析により分析した結果を図-2に示す。到達分布特性は赤（ x 方向）と青（ z 方向）で、球形度は緑で示している。図より、球形度は2つのグループに分類されることが理解できる。そのため、6種類の球形度は必要なく、2種類の球形度で各グループを代表させることが可能と考えられる。本研究では、各球形度と各到達分布特性指標の相関係数を確認し、 $\Psi_{B\&G}$ と Ψ_A の2種類の球形度を岩塊形状特性を表現する指標として用いるものとした。

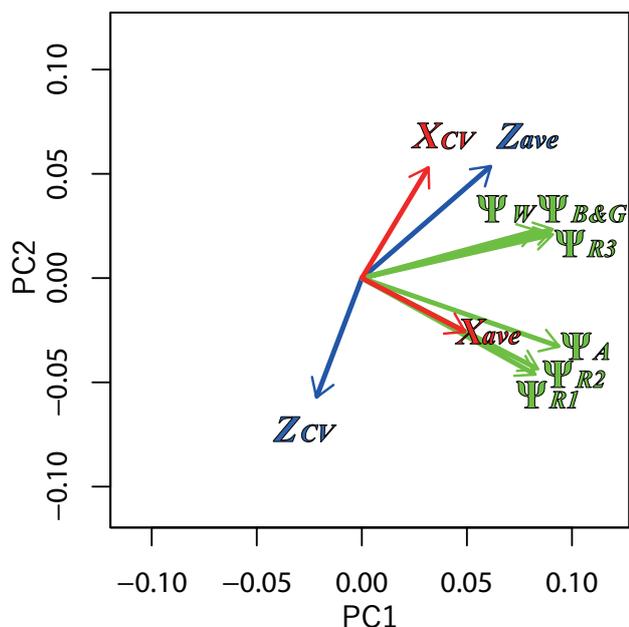


図-2 主成分分析の結果

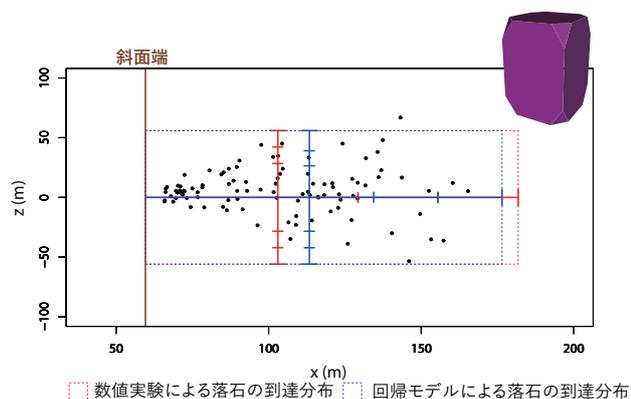


図-3 数値解析と回帰モデルの比較

5. 落石到達分布の回帰モデル作成

ここまで得られた知見に基づいて、斜面の物性値と岩塊形状の情報から到達分布を予測するモデルを構築する。具体的には、ガウス過程回帰（GPR: Gaussian Process Regression）を用いて、物性値（材料パラメータと斜面角度）と2種類の球形度（ $\Psi_{B\&G}$ と Ψ_A ）を説明変数とする落石到達分布の回帰モデルの構築した。また、その精度を検証するために、図-1に示した岩塊モデル以外の形状を持つ検証用の岩塊モデルを作成し、DEMシミュレーションを実施するとともに、その結果を回帰モデルで表現可能かどうかを確認した。図-3はその検証結果の一例であり、数値解析による落石の到達分布と、回帰モデルを用いて求めた落石の到達分布を比較している。この図より、回帰モデルは数値解析の結果を精度よく表現していることが確認できる。いくつかの検証ケースでは、やや精度が悪くなるものもあり、改良の余地は残されたものの、2種類の球形度と物性値を説明変数として、DEMシミュレーションによる到達

分布特性を回帰モデルで代替できる可能性を確認した。

6. 結論

本研究では、物性値と岩塊形状を変化させたDEMによる落石シミュレーションを実施し、その結果を分析することで、落石の到達分布特性と岩塊形状の関係を調べた。その結果、岩塊形状が落石の到達分布特性に及ぼす影響は、2種類の球形度（ $\Psi_{B\&G}$ と Ψ_A ）を用いて定量的に評価できることが明らかとなった。また、それらの球形度を説明変数とする回帰モデルは、数値シミュレーションによって得られる落石の到達分布を概ね再現できることを確認した。回帰モデルは、その精度について改良の余地は残されたものの、球形度と物性値を説明変数として到達分布特性を回帰できる可能性を確認した。

参考文献

- [1] Cundall, PA: A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics, pp.11-18, 1971.
- [2] Rocky DEM Inc: Rocky software version 4.3.1, 2015.
- [3] Emerson dos Reis and Canales, Bruno Godoy and Matheus Ferreira Felix de Andrade: Assessment of mathematical expressions for morphological parameters of solid particles based on common geometric shapes, Powder Technology, pp.215-225, 2020.
- [4] Hakon Wadell: Volume, shape, and roundness of quartz particles, The Journal of Geology, Vol.43, No.3, pp.250-280, 1935.
- [5] Jeffrey W Bullard and Edward J Garboczi: Defining shape measures for 3D star-shaped particles: Sphericity, roundness, and dimensions, Powder technology, Vol.249, pp.241-252, 2013.
- [6] Khalid A. Alshibli, Andrew Druckrey, Riyadh al-raoush, Taylor M Weiskittel, Nickolay Lavrik: Quantifying morphology of sands using 3D imaging, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.27, No.10, 04014275, 2015.

熱・流体・力学連成解析のValidationに用いる 材料定数のばらつきの定量化検討

Study of quantification for uncertainty of the material parameters
to use on validation of Thermo – Hydro – Mechanical coupling analysis

佐藤伸¹⁾, 森岩寛稀²⁾, 伊藤真一³⁾, 高田雄大⁴⁾, 酒匂一成⁵⁾

Shin Sato, Motoki Moriwa, Shinichi Ito, Yudai Takada and Kazunari Sako

1) 博(工) 株式会社大林組原子力本部設計第二部

(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2品川インターシティB棟, E-mail:sato.shin.ro@obayashi.co.jp)

2) 株式会社大林組原子力本部原子力環境技術部

(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2品川インターシティB棟)

3) 博(工) 立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

4) 鹿児島大学大学院 博士前期課程 海洋土木工学プログラム

(〒890-8580 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-24)

5) 博(工) 鹿児島大学学術研究院 (〒890-8580 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-24)

One of the validation methods is to quantify the uncertainty using the area difference of the cumulative distribution function. As part of international joint research, an in-situ test was conducted to understand the Thermo-Hydro-Mechanical coupled behavior, and the reproducibility of relative humidity has become a problem. In the Thermo-Hydro-Mechanical coupled analysis, the reproducibility of relative humidity depends on the retention curve. Therefore, the MCMC method was applied to the moisture characteristics obtained by the experiment to calculate the probability distribution and quantify the variation.

Key Words: Thermo-Hydro-Mechanical coupled analysis, MCMC method, Validation

1. はじめに

放射性廃棄物処分における施設設計や安全評価では、数値解析が多用される。そのため、数値解析の妥当性検証用のデータベース構築のため、国際的な共同研究が欧州の地下研究所を中心に行われている。その中の一つにスイス北西部のジュラ州にモンテリ岩盤試験場がある。ここでは、放射性廃棄物処分やCCSに係る国際共同研究として50種類にも及ぶ原位置試験が行われている^[1]。そのうちの一つに放射性廃棄物処分施設の人工バリアを1/2スケールで模擬した原位置ヒーター試験の一つであるHE-E試験があり、2011年6月から試験が継続されている。HE-E試験の目的は、熱・流体・力学（以降、THM）連成解析の検証に必要な試験データベースの構築及び要素試験から得られた挙動をフィールドスケールに拡張することの妥当性検証である。図-1^[2]にHE-E試験の概要図を示す。坑道中央に廃棄体を模擬するヒーターがブロックベントナイト上に設置されており、Heater1区間では砂を65%配合した砂ベントナイト混合土（以下、SB部）、Heater2区間では粒状ベントナイト（以下、B部）で埋戻されている。両区間はコンクリートプラグで分割されている。HE-E試験は埋戻し後、2011年6月4日から加熱試験を開始し、2012年10月7日付近でヒーター温度が設定温度140℃に達し、その後は定常状態となって現在に至る。埋戻し部の乾燥密度はSB部が1.383 Mg/m³、B部が1.513 Mg/m³である。また、ブロッ

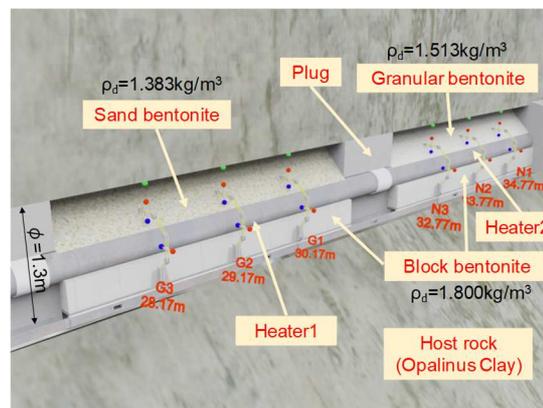


図-1 HE-E 試験の概要^[2]

クベントナイトは乾燥密度1.8 Mg/m³である。

これまでに、DECOVALEXプロジェクト^[3]などで複数の解析者によって試験の再現解析が実施され、定性的にモデル化の妥当性確認が行われている。一方で、ASME V&V 10.1^[4]では、不確実性を定量して、定量的に妥当性確認を行うことが要求される。再現解析における不確実性は、形状、材料、荷重及び境界条件などが考えられるが、本検討では、材料のばらつきに着目する。材料のばらつきは、多くの試験結果から統計処理を行い、正規分布等を用いて確率密度分布を定義することが多い。しかし、THM

連成解析を行う場合に必要となる、二相流特性のうち、水分特性曲線については、統計処理を行うほど多くの試験結果を得られていない場合がある。また、強度、ヤング係数及び透水係数のように、ある一つの値のばらつきを示すのではなく、水分特性曲線のように複数のパラメータで決定される特性に対するばらつきを定量化する必要がある。そこで、本研究では、ベイズ推定手法の一つであるマルコフ連鎖モンテカルロ法（以下、MCMC法）を用いて、保水性試験結果に対して水分特性曲線のモデルパラメータの推定し、ばらつきの幅を定量化する。

2. MCMC法の概要^[5]

MCMC法はマルコフ連鎖とモンテカルロ法を組み合わせたベイズ統計計算手法の一つであり、ベイズの定理を利用して事後分布を推定する際に、マルコフ性を仮定したモンテカルロ法を行うことで事後分布に従う乱数を発生させることができるアルゴリズムである。モンテカルロ法は、乱数を用いて近似計算を行う手法であり、与えられた関数を再現するように点列を抽出し、関数の積分をサンプリングされた点の和に変換するものである。マルコフ連鎖は、確率過程モデルの一つであるマルコフ過程で表現される。これは、現在の状態と過去の状態変化の間にある依存関係を単純化して「未来の状態は現在の状態のみに依存し、過去の情報には影響されない」と仮定しており、式(1)で表される。

$$p(X_{i+1}|X_i, X_{i-1} \dots X_1) = p(X_{i+1}|X_i) \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 X は状態を表している。このマルコフ過程において、時間と状態が離散的な場合をマルコフ連鎖と呼ぶ。マルコフ連鎖は、エルゴード性（既約かつ非周期的かつ正再起的）を満たす場合に、初期の状態に依存せず、ある定常分布に収束することが知られている。定常部分布とは、式(2)に示すようにマルコフ連鎖の遷移行列 \mathbf{P} に、状態に関する確率ベクトル $\boldsymbol{\pi}_i$ を掛けても状態が変化しないベクトル $\boldsymbol{\pi}_{i+1}$ を指す。

$$\boldsymbol{\pi}_{i+1} = \mathbf{P}\boldsymbol{\pi}_i \quad (2)$$

この定常分布と求めたい事後分布が一致するようなマルコフ連鎖を構築することができれば、そこから得られる状態ベクトル $\boldsymbol{\pi}_i$ は事後分布からのサンプルとしてみなすことができる。MCMC法とはこのマルコフ連鎖の定常性を生かして事後分布に従う乱数を発生させるアルゴリズムである。

本研究は、MCMC法の代表的なアルゴリズムの一つであるメトロポリス法を用いて分析を行った。図-2はメトロポリス法の計算フローを示す。メトロポリス法では、パラメータ $\theta_{(t)}$ を用いて計算された尤度 $L(\theta_{(t)})$ と、次の候補点となるパラメータ $\theta_{(t+1)} = \theta_{(t)} + \varepsilon$ (ε は正規乱数より発生) を用いて計算された尤度 $L(\theta'_{(t)})$ を比較することでパラメータの更新の判断を行う。この際、 $r = L(\theta'_{(t)})/L(\theta_{(t)})$ を

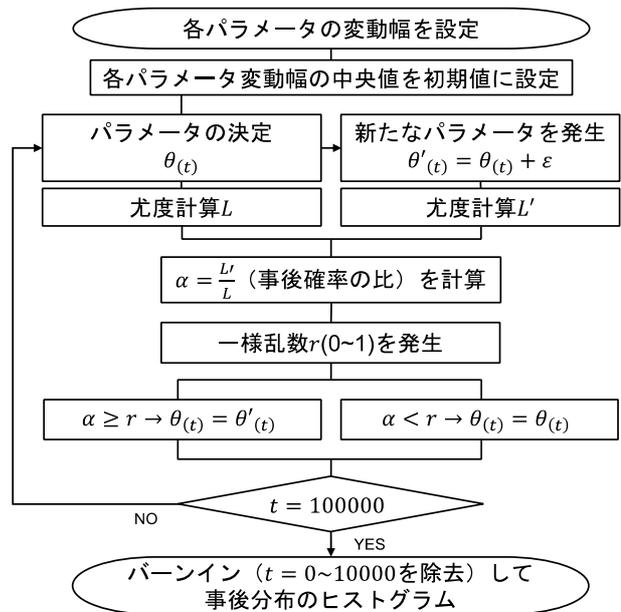


図-2 メトロポリス法の計算フロー図

算出し、 $r \geq 1$ の時、無条件でパラメータの更新を行い、 $r < 1$ の時、確率 α でパラメータの更新を行う。この時、確率 α は $0 \sim 1$ の一様乱数で与え、 $r \geq \alpha$ の時、パラメータの更新を行い、 $r < \alpha$ の時、パラメータの更新は行わず、次の候補点に移行する。この操作を何万回と繰返し、各パラメータが定常状態になるまで続ける。定常状態に収束した後、パラメータが収束していない部分を除去(バーンイン)することで、定常状態に収束後のパラメータの事後分布が得られる。なお、本研究では尤度計算に、次式(3)に示す多次元正規分布を仮定している。

$$L(\theta_{(i)}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^m |\mathbf{R}|} \exp \left[-\frac{(y - h(\theta_{(i)}))^T \mathbf{R}^{-1} (y - h(\theta_{(i)}))}{2} \right] \quad (3)$$

ここに、 \mathbf{R} は分散共分散行列、 m は試験データのプロット数、 y は試験データ、 $h(\theta_{(i)})$ は i 回目のパラメータ $\theta_{(i)}$ を用いた場合の水分特性曲線モデルによって得られた計算値を表している。

3. 着目するパラメータ

(1) 水分特性曲線に着目する意義

HE-E試験の計測は、埋戻し部が、温度、間隙圧力及び相対湿度であり、岩盤内は水圧と温度である。これまでの検討で、温度の再現性については、設定された熱伝導率で、高い再現性が得られることが分かっている^[3]。一方で、相対湿度の再現性については、解析コード内のモデル化方法に左右される^[3]、^[6]。具体的には、水相が熱せられることによって気化する相変換を構成式で考慮するか否かにより、ヒーター近傍の相対湿度変化の再現性に影響を及ぼすことが分かっている。他方、U. Kuhimann et al.^[7]はHE-E試験を対象に逆解析による二相流パラメータの感度解

析を実施している。検討の結果、解析結果に最も影響を及ぼすものの一つに水分特性曲線を表すモデルパラメータを上げている。相対湿度は、サイクロメトリック則⁸⁾によって表現されることが多く、式(4)及び式(5)になる。

$$\theta_g^w = (\theta_g^w)_0 \cdot e^{-\frac{(p_g - p_l) \cdot M_w}{R \cdot (273.15 + T) \cdot \rho_w}} \quad (4)$$

$$RH(\%) = \frac{\theta_g^w}{(\theta_g^w)_0} \cdot 100 \quad (5)$$

ここで、 $(\theta_g^w)_0$ は飽和状態における空気相中の水蒸気濃度、 p_l は水圧、 p_g は空気圧、 M_w は水のモル質量、 R は気体定数、 T は温度及び ρ_w は水の密度を表す。式(4)にサクション ($s = P_g - P_l$) 項があり、水分特性曲線に依存することが分かる。そこで、水分特性曲線の不確かさを定量化すれば、相対湿度変化の再現性を定量的に示すことが可能になる。なお、本研究で用いる水分特性曲線は、van Genuchtenモデルとし、式(6)による。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + (-\alpha \cdot \psi)^n} \right\}^{1 - \frac{1}{n}} \quad (6)$$

ここで、 S_e は有効飽和度、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、 α 、 n は水分特性曲線の形状に関するパラメータである。

(2) 対象とする試験

実験結果の相対湿度変化に着目し、埋戻し部の水分特性を対象とする。HE-E試験の埋戻し材は図-1に示したように、2種類のベントナイトが用いられている。Gaus I. et. al⁹⁾は各々の材料の水分特性として図-3及び図-4に示す結果を得ている。

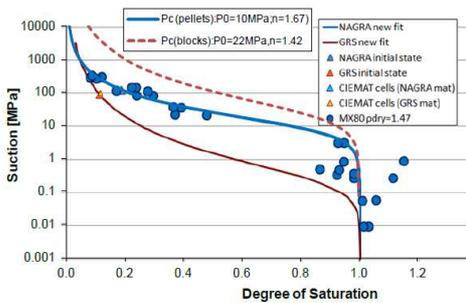


図-3 B部の対象材料の水分特性⁹⁾

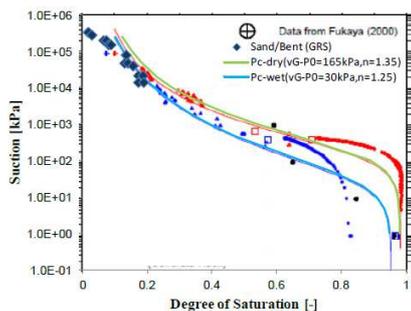


図-4 SB部の対象材料の水分特性⁹⁾

ここで、対象とする試験値は、B部については、乾燥密度1.47 Mg/m³のMX-80を対象として取得された青丸を対象とし、SB部については、青のひし形のデータを対象とした。これに対して、MCMC法を用いて水分特性曲線の推定を行う。

4. MCMC法による解析結果

解析を実施するにあたり、各パラメータの変動幅を設定する。設定すべきパラメータは、式(6)で示した、 θ_s 、 θ_r 、 α 、 n の4つである。パラメータの変動幅は、表-1に示すように設定した。各パラメータの初期値については、それぞれの変動幅の平均値とした。

表-1 各パラメータの変動幅

	θ_s	θ_r	α	n
SB部	0.40~0.47	0.000~0.001	10 ⁻⁵ ~10 ⁻²	1~5
B部	0.42~0.48	0.00~0.05	10 ⁻⁸ ~10 ⁻³	1~3

MCMC法の試行回数は全てのパラメータが定常状態に収束した100,000回に設定した。尤度は各サクションに対する体積含水率の実験値と解析値の間に正規分布を仮定して、正規分布の平均値は各プロットの実験値とし、標準偏差は体積含水率の実験値の最大値と最小値の差の0.5%とした。バーンイン後のパラメータのヒストグラムを図-5、図-6に示す。横軸が各パラメータの変動幅で縦軸は相対度数で表している。それぞれのパラメータに対してピーク値を有する事後分布が得られた。このように、MCMC法では唯一の最適解を算出するのではなく、各未知パラメータを確率的に推定することができる。次に、図-5、図-6より得られたパラメータから算出された水分特性曲線を図-7、図-8にそれぞれ示す。ここで、バーンイン後の80,000個のパラメータから等間隔に500個の各パラメータを抽出することで500本の水分特性曲線で表している。

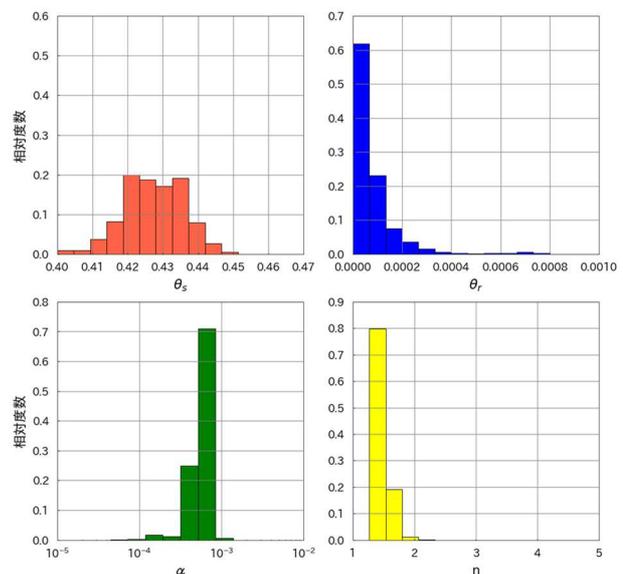


図-5 SB部のパラメータのヒストグラム

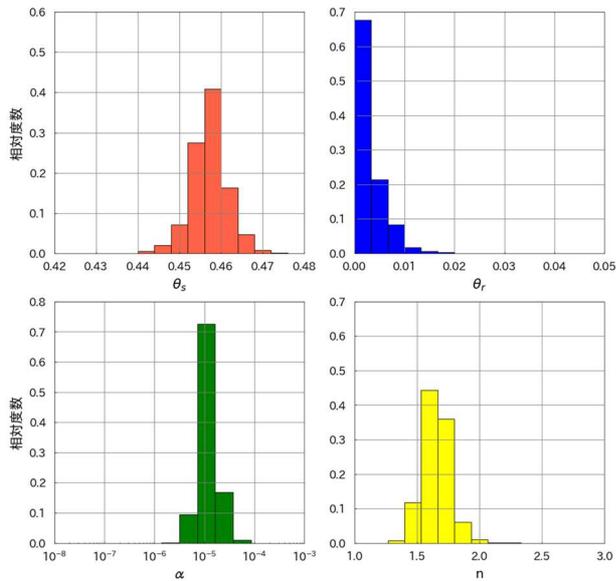


図-6 B部のパラメータのヒストグラム

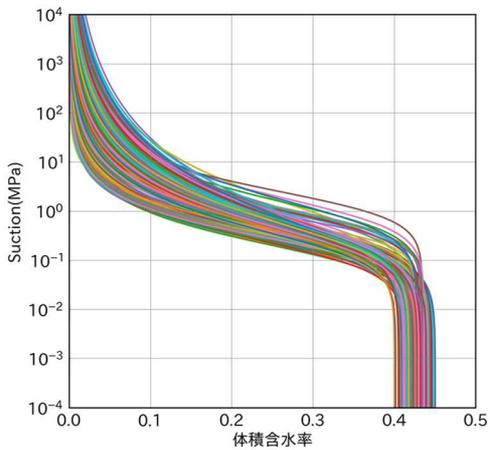


図-7 SB部の推定された水分特性曲線

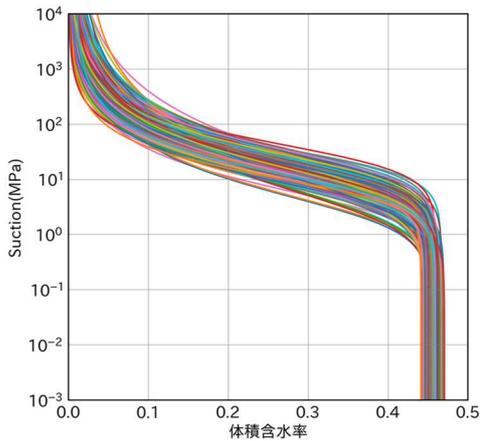


図-8 B部の推定された水分特性曲線

図-9及び図-10に実験結果とMCMC法より得られた水分特性曲線を比較している。同図では、実線が80,000本の水分特性曲線の平均値 μ であり、破線が $\mu \pm \sigma$ の範囲を示している。図より、ある幅を有する水分特性が得られており、水分特性のばらつきを定量的に示すことができる。

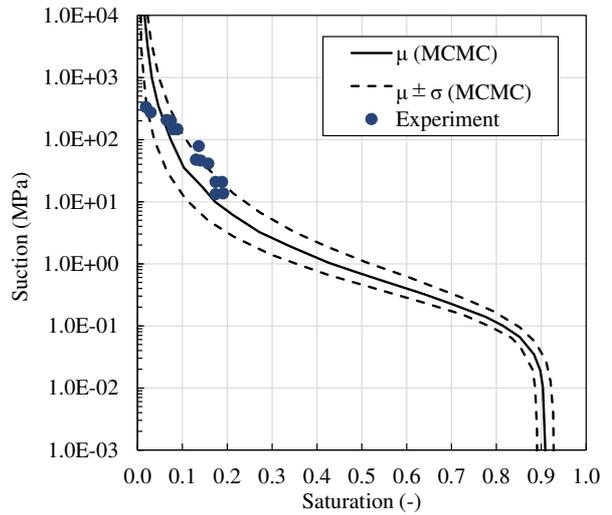


図-9 SB部の幅を有する水分特性曲線

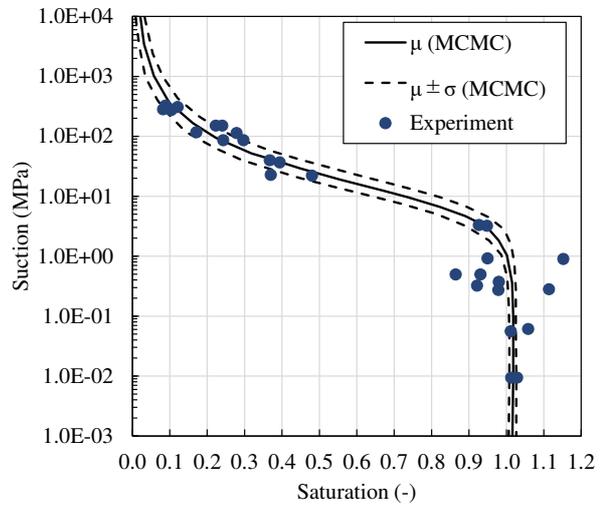


図-10 B部の幅を有する水分特性曲線

表-2 平均値 μ 及び $\mu \pm \sigma$ のvan Genuhtenパラメータ

		μ	$\mu - \sigma$	$\mu + \sigma$
SB部	θ_s	0.43	0.42	0.44
	θ_r	0.00	0.00	0.00
	α	5.5×10^{-4}	6.0×10^{-4}	5.3×10^{-4}
	n	1.41	1.50	1.34
B部	θ_s	0.46	0.45	0.46
	θ_r	0.00	0.00	0.00
	α	5.5×10^{-4}	5.5×10^{-4}	5.5×10^{-4}
	n	1.60	1.66	1.57

図-9及び図-10に示した平均値 μ 及び $\mu \pm \sigma$ のvan Genuhtenパラメータを表-2に示す。

5. THM解析における利用法

前章で得られた水分特性曲線を用いたTHM連成解析による、相対湿度の再現性の評価を実施した。SB部の相対湿度の再現結果を図-11に示す。

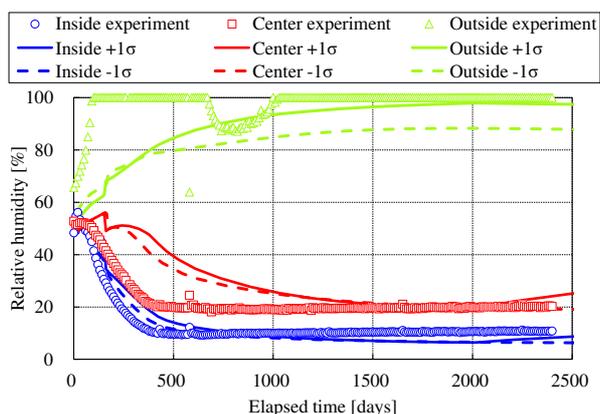


図-11 THM連成解析による相対湿度の再現性 (SB部)

ここで、計測結果を点で示し、 $\mu + \sigma$ の結果を実線で示し、 $\mu - \sigma$ の結果を破線で示す。実線と破線の幅がパラメータのばらつきによる応答値の相違になる。ASME V&V 10.1^[4]による評価を実施するのであれば、解析については、実験結果と解析結果 ($\pm 1\sigma$) の差から二点推定法を用いて応答値に関する確率密度分布を算出する。実験結果については、計測誤差等に関する確率密度分布を算出する。解析結果と実験結果から式(7)に示す累積密度分布の面積差を利用してシステム応答の計測基準値 M^{SRQ} を計算し、不確かさの定量化を行う。

$$M^{SRQ} = \frac{1}{|\overline{SRQ}^{exp}|} \int_{-\infty}^{\infty} |F_{SRQ}^{mod}(y) - F_{SRQ}^{exp}(y)| dy \quad (7)$$

ここで、 $|\overline{SRQ}^{exp}|$ は計測値の平均値、 $F_{SRQ}^{mod}(y)$ と $F_{SRQ}^{exp}(y)$ はそれぞれ、解析結果と計測値の累積密度分布である。以上により計算された、各時刻におけるシステム応答の計測基準値 M^{SRQ} から解析結果の妥当性を判断すれば良いことになる。

6. おわりに

本研究では、強度、ヤング係数及び透水係数のように、ある一つの値のばらつきを定義するのではなく、水分特性曲線のように複数のパラメータで決定される特性に対するばらつきを定量化する方法を示した。この方法は、多くの実験結果を統計処理するのではなく、いくつかの実験結果があれば、MCMC法を用いることにより、水分特性曲線のばらつきを定義することができることに特徴がある。検討の結果、パラメータの変動幅については、適切な範囲を指定すればある程度の範囲に計算が収束する

ことが分かった。今後は、パラメータの変動幅の妥当性について実験的な検討を実施する予定である。

参考文献

- [1] P. Bossart, et. al: 25 Years Mont Terri Rock Laboratory, 1996 – 2021 commemorative Publication, 2021.
- [2] I. Gaus, et. al.: EBS behaviour immediately after repository closure in clay host rock: HE-E experiment (Mont terri URL), Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, *Geological Society*, 400, 71-91, 2014.
- [3] Garitte, B., et. al.: Evaluation of the predictive capability of coupled thermo-hydro-mechanical models for a heated bentonite/clay system (HE-E) in the Mont Terri Rock Laboratory, *Environmental Earth Sciences*, 76, Article number 64, 2017.
- [4] ASME: An illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10.1, 2012.
- [5] 高田雄大ほか：加圧板法とマルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法を組み合わせた水分特性曲線推定方法の提案, *Kansai Geo-Symposium 2022 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集*, pp.214-219, .
- [6] Alcolea, A., et. al.: The Full-scale Emplacement (FE) Experiment Modeling Task Force, DECOVALEX Coupled Processes Symposium 2019, Brugg, Switzerland, *The DECOVALEX 2019 Project*, 18, 2019.
- [7] U. Kuhmann, et. al.: Inverse modelling of the HE-E experiment using iTOUGH2, Arbeitsberich, NAB 15-53, NAGRA, Dec. 2015.
- [8] Olivella, S., et. al.: Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media, *Engineering Computations*, Vol. 13, No. 7, pp.87-112, 1996.
- [9] Gaus I., et. al.: The HE-E experiment: Lay-out, Interpretation and THM modelling, Long-term Performance of Engineered Barrier Systems PEBS, D2.2-11: Final report on the HE-E experiment and D3.2-2: Modelling and Interpretation of the HE-E Experiment of the PEBS project, 2014.

ASME V&V40に基づいた 木材の圧縮試験に対するV&V

Verification and Validation for Compression Test based on ASME V&V40

谷田紗音¹⁾, 福谷勇輝¹⁾, 棗田智香子¹⁾, 高橋由佳¹⁾, 倉田和幸²⁾,
松井和己¹⁾, 都筑新³⁾, 三浦孝広⁴⁾, 山本剛大⁵⁾, 杉山裕文⁶⁾,
渡邊大⁷⁾, 呂学龍¹⁾, 山田貴博¹⁾

Sato Tanida, Yuki Fukutani, Chikako Natsumeda, Yuka Takahashi, Kazuyuki Kurata,
Kazumi Matsui, Arata Tsuzuki, Takahiro Miura, Takeki Yamamoto, Hirofumi Sugiyama,
Dai Watanabe, Xuelong Lyu & Takahiro Yamada

1) 横浜国立大学 (E-mail: kzm@ynu.ac.jp)

2) テルモ株式会社 (E-mail: kazuyuki_kurata@terumo.co.jp)

3) ダッソー・システムズ株式会社 (E-mail: arata.tsuzuki@3ds.com)

4) サイバネットシステム株式会社 (E-mail: t-miura@cybernet.co.jp)

5) 広島大学大学院先進理工系科学研究科 (E-mail: takeki@hiroshima-u.ac.jp)

6) 山梨大学大学院総合研究部 (E-mail: hirofumis@yamanashi.ac.jp)

7) 芝浦工業大学システム理工学部 (E-mail: dai-wata@shibaura-it.ac.jp)

In this study, we validate material tests to obtain Young's modulus of wood introducing in simulation as the lowest level of V&V process for wood products. Though the variation in material coefficient from experiments should ideally be only variation in material property itself, it could also include differences in specimen geometry and friction with experimental equipment. In order to eliminate them as much as possible, preliminary experiments are conducted using material other than wood. With the experimental methods determined in this way, compression tests in parallel/normal directions to wood grain are conducted and variations in Young's modulus are evaluated.

Key Words : V&V, Validation, Material Test, Uncertainty, Wood

1. はじめに

シミュレーション結果の品質保証における基本的な考え方にV&V (Verification (検証) and Validation (妥当性確認))がある。筆者らはこれまでに木工椅子を題材としてより簡単な事例でASME V&V-40^[1]に基づくV&Vプロセスを示してきた^[2]。

ASME V&V-10^[3]が提示する階層型アプローチにおける最下層は材料試験である。本稿では縦圧縮試験(木目に平行方向の圧縮)・横圧縮試験(木目に直交方向の圧縮)を行い、シミュレーションに用いる木材のヤング率を決定する。木材は自然由来の細胞質な材料であるため、特に個体差や機械的特性の異方性が強いことが広く知られており^[4]、それらを適切に評価したい。しかしながら材料試験において得られる結果のばらつきが材料に起因するものか試験環境に起因するものかを区別することは一般に困難である。そこでまず等方で均質な材料と考えられるポ

リアセタル材を使った予備実験を実施して理想的に圧縮荷重がかけられるか実験方法の妥当性を確認する。そして決定した実験方法でホワイトウッド製材の材料試験を行い、材料起因のばらつき(製材・木目の違い)を踏まえて実験結果を整理する。

2. 実験方法の妥当性

(1) 実験装置

本項では、圧縮試験装置が試験片を一様に圧縮するか実験装置の妥当性を確認する。等方で均質な材料と考えられるポリアセタル材(POM, ヤング率約3 GPa)を用いて単純圧縮試験を行った。

試験装置をFig.1に示す。圧縮試験装置はテンシロン万能試験機(RTF-1350, 荷重容量50 kN)を用い、圧縮部の水平を確保するための治具を設置した。なお、この治具上部には万能試験機とは独立したS字型ロードセ

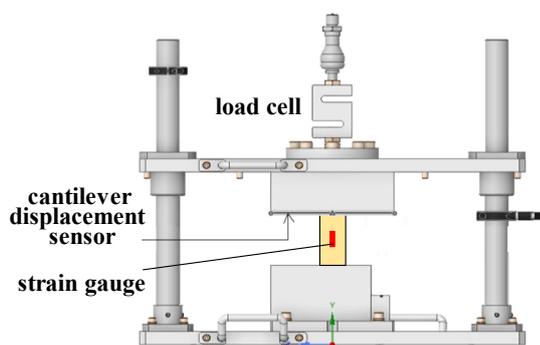


Fig.1 Compression test equipment

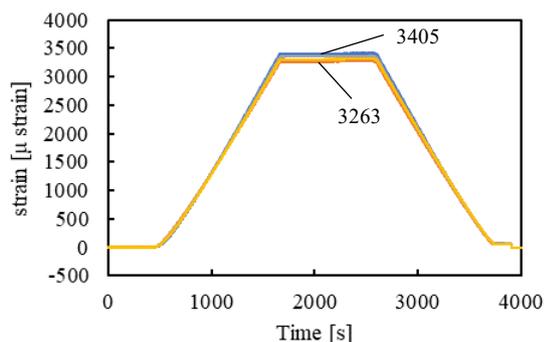


Fig.2 Time history response of strain gauges on 4 surfaces

ルを設置し、試験内容に応じた荷重容量のロードセルを使用した。変位はカンチレバー型変位計(CE-10)で、ひずみは試験片の側面4面にひずみゲージ(東京測器研究所製、ゲージ長5 mm)を貼り付けて測定した。POM試験片の形状は正方形断面の一辺を20 mm、高さを40 mmとし、寸法公差0.1 mm、各面の平行度と垂直度はそれぞれ0.1/100で加工した。POMを用いた予備実験では、荷重容量5 kNのロードセル(PSD-S1-5kN)を設置し、クロスヘッドの移動速度を1 mm/minで荷重が5 kNに達するまで載荷・除荷1サイクルの試験を行った。

試験片4面に貼ったひずみゲージの時刻歴応答をFig.2に示す。ゲージ値の差は最大でも生じているひずみに対して4%であり、4面のひずみはおおよそ一致しているといえる。よって試験片に対して一様な圧縮変形が加えられており、この圧縮試験装置は妥当であると判断した。

(2) 球面座の効果

木材の試験片を切り出す際に端面が傾く可能性がある。球面座を用いることで傾きを吸収し、曲げ変形が生じることなく適切に圧縮できるかを確認した。POM試験片の上面と下面に意図的に角度(Fig.3)をつけ、球面座の有無で結果を比較した。なお球面座を入れる場合には、カンチレバー型変位計を球面座の底面に当てるように設置して、球面座の摩擦や滑りによる変位・荷重のデータへの影響を取り除いた。

試験片a,bそれぞれについて、対面のひずみから軸成

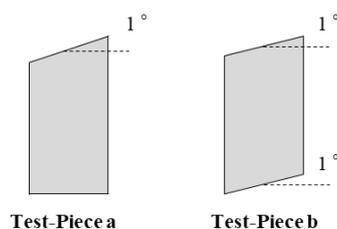


Fig.3 Test pieces to check the effect of spherical seat

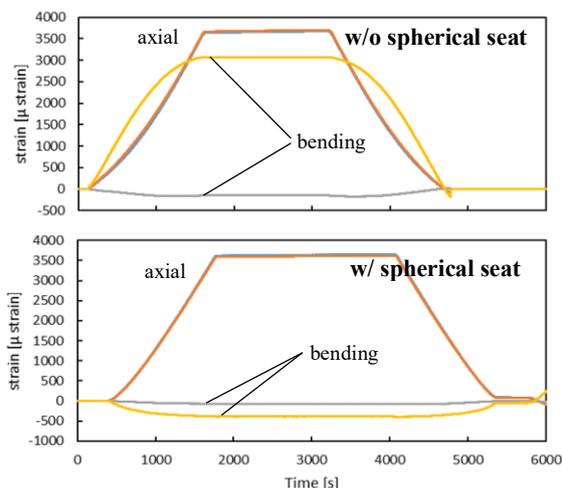


Fig.4 Strain components in Test-Piece a experiments

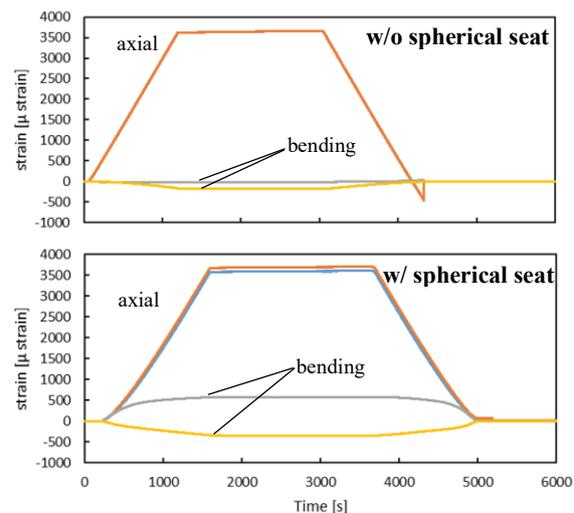


Fig.5 Strain components in Test-Piece b experiments

分(対面のひずみの和/2)と曲げ成分(対面のひずみの差/2)を算出し、それらの時刻歴応答をFig.4, 5に示す。上面のみが傾いている試験片aでは、球面座を用いることでひずみの曲げ成分が抑えられることが確認できた。一方で上下面が傾いている試験片bでは、球面座を用いた場合のほうが用いない場合よりも曲げ成分が2倍ほど大きかった。これらの結果より、試験片上面が傾いていても試験片上部に置いた球面座が傾きを吸収して適切に圧縮できるが、下面が傾いている場合には適切に圧縮できないといえる。上下面の傾きを吸収するため試験片上下に球面座を置くことも検討したが、その方法では2.1節で述べた圧縮部の水平を確保できない。

よって木材の圧縮試験において、下面に対して側面

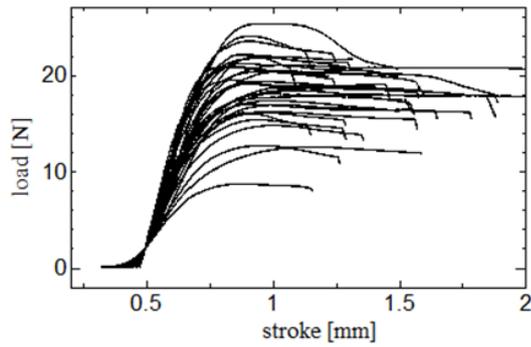


Fig.6 Load-Stroke graph of vertical compression tests

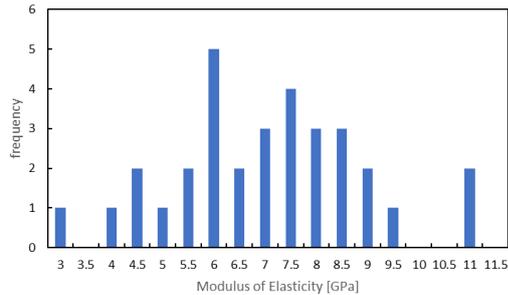


Fig.7 Histogram for vertical modulus of Elasticity

が垂直になるように試験片を削り出し、球面座を試験片上部に置いて実験を行うこととする。

3. 木材の圧縮試験

前節で決定した実験方法でホワイトウツドの縦圧縮試験（木目に平行方向の圧縮）、横圧縮試験（木目に直交方向の圧縮）を実施してヤング係数を求めた。実験方法の妥当性は確認済みであるため、この実験から得られるばらつきは材料自身のばらつきであると考えられる。

ヤング係数 E は、荷重-変位関係の線形であると判断できる範囲から次式で算出した。 ΔF はロードセルから得られる線形範囲における上限荷重と下限荷重の差、 A は試験片断面積、 l は試験片の初期長さ、 Δl は変位計から得られる ΔF に対応する変位である。

$$E = \frac{\Delta F l}{A \Delta l} \quad (1)$$

(1) 実験結果

a) 縦圧縮試験

JIS Z2101^[5]で規定された縦圧縮試験の手順に従って、正方形断面の一辺20 mm、繊維方向長さを40 mmとした試験片を各製材から1本ずつ、計32体作成した。荷重容量50 kNのロードセル(9E01-L23-50kN)を設置し、クロスヘッドの移動速度1 mm/minで最大荷重が確認できるまで圧縮した。

荷重-変位関係をFig.6に示す。この応答のうち線形と判断できる範囲から算出したヤング係数（縦弾性係数）のヒストグラムがFig.7（平均 7.29 GPa、標準偏差 1.82 GPa、変動係数 0.25）である。

Table 1 Young's modulus summarized for each lumber in lateral compression tests

lumber	A	B	C	D
# of test pieces	37	28	40	21
Averages [GPa]	0.102	0.232	0.359	0.162
SD [GPa]	31.2	59.2	157.6	77.8
CV	0.307	0.255	0.438	0.481

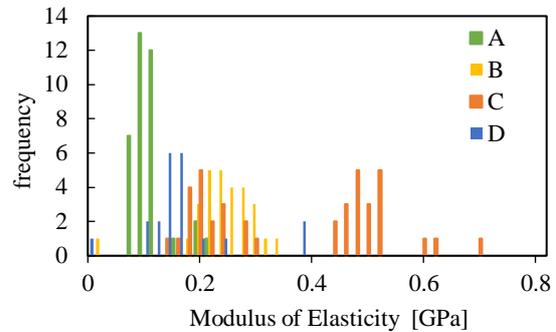


Fig.8 Histogram for lateral modulus of Elasticity

b) 横圧縮試験

JIS Z2101^[5]で規定された横圧縮試験の手順に従って、繊維方向に直交する向きに高さ（45 mm）を取り、1辺の長さを15 mmとする正方形断面となるように試験片を切り出した。横圧縮試験では、剛性が木目の影響を強く受けると推測して同じ製材内でも比較するため、1本の製材から試験片を40体ずつ、計160体ほど作成した。なお、製材内の採取箇所は隣同士で連続的になるようにした。これらの試験片に対して、荷重容量5 kNのロードセル(PSD-S1-5kN)を設置し、クロスヘッドの移動速度を1 mm/min、荷重の上限300 Nで実験を行った。

横圧縮試験の初回の載荷では木目部分ですべりが見られたため、除荷時の荷重-変位関係における線形部分からヤング係数（横弾性係数）を算出した。明瞭な線形応答が確認できなかった試験体についてはデータ整理の対象外とした。横弾性係数を製材ごとにまとめたものをTable 1に、全試験体から求めた横弾性係数を製材ごとに整理しながら作成したヒストグラムをFig.8に示す。

(2) 考察

製材を問わず実験結果を確認すると、縦弾性係数（Fig.7）は正規分布と解釈することもできるが、横弾性係数（Fig.8）は明らかに正規分布とはいえない。すなわちホワイトウツドの横弾性係数を一般的に定めることは難しいといえる。ただし同じ製材から切り出した試験片であればそれぞれの横弾性係数は正規分布であると判断できるため、製材固有の横弾性係数は評価できる可能性がある。

また横圧縮試験では同じ製材内の隣接する領域から

試験片を切り出したにもかかわらず、変動係数が製材間の差異を取り扱った縦圧縮試験より大きかった (Table 1)。これは横圧縮試験の変形モードでは同じ製材であっても個体差が大きいことを示しており、試験片に存在する年輪や木目などの内部/微視的構造などの影響を強く受けている結果であると推察できる。

4. おわりに

本稿では、V&Vの最下層である材料試験において、木材のヤング係数およびそのばらつきを評価した。まず等方で均質であると考えられるポリアセタールを用いた予備実験で試験片を一様に圧縮できるか試験方法の妥当性を確認し、決定した試験方法で異方性が強く不均質である木材の圧縮試験を行った。その結果、特に木目に直交方向のヤング係数については汎用的な値を定義することは難しく、製材ごとに評価しなければならないことがわかった。

参考文献

- [1] ASME: *ASME V&V-40 2019 Assessing Credibility of Computational Modeling Through Verification and Validation: Application to Medical Devices*, ASME 2018.
- [2] 松井和己, 倉田和幸, 三浦孝広, 都筑新, 渡邊大, 山本剛大, 杉山裕文, 棗田智香子, 山田貴博: ASME V&V40に基づいた木製椅子に対するシミュレーションの品質保証, 計算工学講演会論文集, 27, 2022.
- [3] ASME: *ASME V&V-10 2019 Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*, ASME 2019.
- [4] 日本木材学会編: 木質の物理, 文永堂出版, 2007.
- [5] 日本規格協会, JIS Z 2101:2009 木材の試験方法, 2009.

ASME V&V40に基づいた 木材接合部の剛性評価に対するV&V

Verification and Validation for Stiffness Evaluation of Wood Joints based on ASME V&V40

都筑 新¹⁾, 油川 英史²⁾, 福谷 勇輝²⁾, 倉田 和幸³⁾, 松井 和己²⁾, 三浦 孝広⁴⁾
山本 剛大⁵⁾, 杉山 裕文⁶⁾, 渡邊 大⁷⁾, 呂 学龍²⁾, 棗田 智香子²⁾, 山田 貴博²⁾

Arata Tsuzuki, Hidefumi Yukawa, Yuki Fukutani, Kazuyuki Kurata, Kazumi Matsui, Takahiro Miura
Takeki Yamamoto, Hirofumi Sugiyama, Dai Watanabe, Xuelong Lyu, Chikako Natsumeda & Takahiro Yamada

- 1) ダッソー・システムズ株式会社 (Email: arata.tsuzuki@3ds.com)
- 2) 横浜国立大学大学院環境情報学府 (Email: kzm@ynu.ac.jp)
- 3) テルモ株式会社 (Email: Kazuyuki_Kurata@terumo.co.jp)
- 4) サイバネットシステム株式会社 (Email: t-miura@cybernet.co.jp)
- 5) 広島大学大学院先進理工系科学研究科 (Email: takeki@hiroshima-u.ac.jp)
- 6) 山梨大学大学院総合研究部 (Email: hirofumis@yamanashi.ac.jp)
- 7) 芝浦工業大学システム理工学部 (Email: dai-wata@shibaura-it.ac.jp)

Numerical simulation is used as a means of providing scientific evidence regarding the performance and safety of medical devices. The ASME V&V40 guidelines are useful in clarifying the degree of credibility of computational models and the degree to which they can be used to make judgments when using numerical simulation. In order to create an easy-to-understand example for ASME V&V40, we have been studying the subject of woodworking chairs, and this submission reports on the status of our activities focused on joint modeling.

Key Words : ASME V&V40

1. はじめに

2018年11月に発行されたASME V&V40-2018¹⁾, Assessing Credibility of Computational Modeling through Verification and Validation: Application to Medical Devicesは、医療機器における数値シミュレーションの規格である。ASME V&V40のNONMANDATORY APPENDIX Bに事例が示されているもののend-to-endの事例になっていないなどの理由により、容易に理解することは困難である。筆者らはこれまでにFig.1に示す木工椅子を題材としてより簡単な事例でASME V&V40に基づくV&Vプロセスを示してきた²⁾。

本稿では木工椅子の接合部に対して振動特性から剛性評価する数値シミュレーションモデルについてASME V&V40に基づくこれまでの活動を紹介する。

2. 用語の説明

ASME V&V40における主要な用語についてまとめる¹³⁾。

- ・ **Question of Interest** (対象とする問題) : 取り組むべき具体的な疑問, 意思決定, 懸念事項。
- ・ **Context of Use** (以下COU, 適用範囲) : 定義したQuestion of Interest を解決するために使用される数値シミュレーションの具体的な役割と範囲。
- ・ **Model Risk** (モデルリスク) : 数値シミュレーションを使用することにより有害な結果をもたらす可能性。Model



Fig.1 Wooden chair for the subject structure

InfluenceとDecision Consequenceの組み合わせ。

- ・ **Model Influence** (モデルの影響) : 数値シミュレーションの寄与度 (僅か⇔主要因)。証拠が数値シミュレーションの結果のみか, それ以外の証拠も存在するか。
- ・ **Decision Consequence** (判断の帰結) : 数値シミュレーションの結果による誤った意思決定に起因する有害な結果の重要性 (軽微⇔致命的)。
- ・ **Model Credibility** (モデルの信憑性) : COUに対する数値シミュレーションモデルの予測能力に対する信憑性。

3. Question of Interest とCOU

Fig.1に示す木工椅子の設計案に対し, 接合部の剛性に着目して「接合部を含むアセンブリとしての自由振動を有限要素モデルが表現できるか。」というQuestion of Interestを定義する。このQuestion of Interestには, それぞれ

の部品の剛性はもちろんのこと、接合部の剛性が大きく影響することが予想されるため、COUを複数に分けて定義する。このとき、数値シミュレーションには汎用有限要素ソフトウェアAbaqusを用いる。

COU1：応答曲面の作成

木材の剛性は Fig.2に示すようにばらつきが大きいため、サンプルごとに計測した密度と1次固有振動数から繊維方向ヤング率を同定できるように、実験計画法を使って木材の繊維方向ヤング率と密度をパラメータとする部品単体の固有値解析を実施し、1次固有振動数の結果を出力とする応答曲面を作成する。

COU2：部品単体のシミュレーション

部品のサンプルごとに対してハンマリング試験から1次固有振動数、計測した質量から密度を求めCOU1で得られた応答曲面から繊維方向ヤング率を同定する。この繊維方向ヤング率を使って数値シミュレーションによる部品単体の固有値解析を実施する。そして、ハンマリング試験と数値シミュレーションによる固有振動数の結果を比較し妥当性を確認する。

COU3：接合部アセンブリのシミュレーション

三枚継ぎのアセンブリに対して数値シミュレーションによる固有値解析を実施する。アセンブリに対するハンマリング試験を実施しシミュレーションの結果と比較し妥当性を確認する。

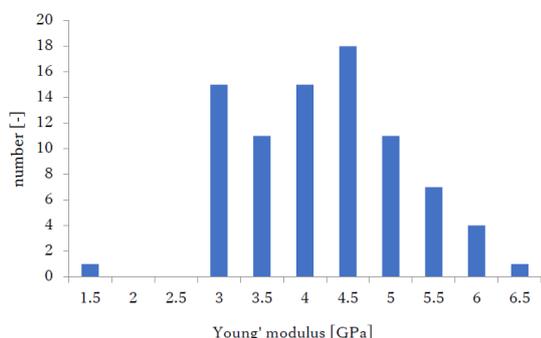


Fig.2 Compression test result

4. Model Risk

(1) Model Influence

このCOUに対するModel InfluenceはV&V40の例にならってTable1から「LOW（僅か）」を選択した。部品単体およびアセンブリに対して試作によるハンマリング試験(ベンチテスト)を複数実施し数値シミュレーション以外の証拠が存在するためである。また、静的な試験による接合部の評価を別途検討していることも理由である。

(2) Decision Consequence

このCOUに対するDecision ConsequenceはV&V40の例にならってTable2から「LOW（軽微）」を選択した。最終設計の根拠にするものではないためである。

(3) Model Risk

以上によりこの数値モデルのModel RiskはFig.3に示すように「LOW-LOW」とする。

Table1 Classification for model influence¹⁾

Model Influence	Description
LOW	The output of the model has a small influence on a design or safety decision.
MEDIUM	The output of the model has an important role in a design or safety decision.
HIGH	The output of the model has a dominant role in a design or safety decision.

Table2 Classification for Decision Consequence¹⁾

Decision Consequence	Description
LOW	A poor decision may result in increased clinician monitoring, no increased patient risk.
MEDIUM	A poor decision may result in short-term patient risk and increased clinician monitoring.
HIGH	A poor decision may result in immediate danger to the patient (e.g., injury or death), thus requiring significant clinician intervention up to and including immediate replacement of device.

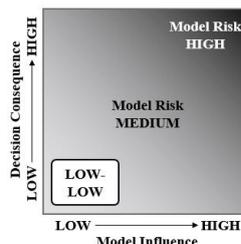


Fig.3 Model Risk for this COU

5. COU1（応答曲面の作成）のV&V活動

(1) メッシュサイズVerification

メッシュサイズは特徴形状であるほどの幅を2分割するように5mmを選択した。Model Riskが「LOW-LOW」であることからV&V40の例にならってTable3よりメッシュサイズのverificationを実施しないことを選択してもよいだろうが、長い脚と三枚継ぎについてより粗いメッシュサイズの10mmと比較し検証した。Table4に示すように長い脚と三枚継ぎの両モデルに対して、5mmから10mmのメッシュサイズに変更しても1〜5番目までのモード形状はよく一致しており、固有振動数の結果もよく一致しているため、5mmのメッシュサイズは妥当と判断した。また、数値モデルの計算時間は約1分であり、計算コストについても利用上問題ないと判断した。

Table3 Credibility scale for discretization error¹⁾

Credibility	Description
A	No grid convergence analyses are performed.
B	Applicable grid convergence analyses are performed, conservation equation balances are not checked.
C	Applicable grid convergence analyses are performed, but not for problem-specific QOIs. Conservation equation balances are checked; no estimation of discretization error is performed.
D	Conservation equation balances are checked; estimation of discretization error is performed for problem-specific QOIs.

Table4 Mesh size verification

	Mesh Size	Mesh Image	mode no.1	mode no.2	mode no.3	mode no.4	mode no.5
Part of Long Leg	10mm		284.88Hz	286.55Hz	734.36Hz	740.81Hz	765.30Hz
	5mm		284.77Hz	286.48Hz	732.44Hz	739.15Hz	764.84Hz
	Relative Error		0.04%	0.02%	0.26%	0.22%	0.06%
Assembly of Three way joint	10mm		166.24Hz	248.20Hz	530.98Hz	580.16Hz	637.79Hz
	5mm		166.67Hz	247.51Hz	530.80Hz	579.66Hz	636.70Hz
	Relative Error		0.34%	0.28%	0.03%	0.09%	0.17%

(2) 応答曲面の作成

実験計画法により繊維方向ヤング率と密度を入力パラメータとして部品単体の固有値解析を100回実施し、1次固有振動数の結果を出力とした応答曲面を作成した。Fig.4は長い脚に対して得られた応答曲面を示す。

木材の剛性は強い異方性を示すため、直交異方性を定義するのに必要な繊維方向ヤング率以外のパラメータを参考文献4)より求める。

$$E_Y = \frac{1}{10} E_X \quad (1)$$

$$E_Z = \frac{1}{20} E_X \quad (2)$$

$$G_{XY} = \frac{1}{10} E_X \quad (3)$$

$$G_{YZ} = \frac{3}{1000} E_X \quad (4)$$

$$G_{XZ} = \frac{1}{20} E_X \quad (5)$$

$$\mu_{XY} = 0.4 \quad (6)$$

$$\mu_{YZ} = 0.7 \quad (7)$$

$$\mu_{YZ} = 0.55 \quad (8)$$

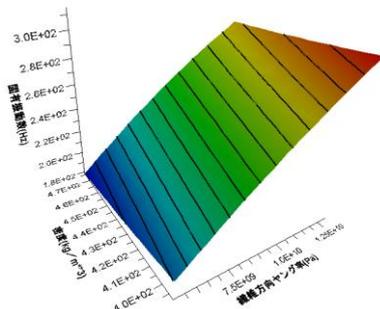


Fig.4 Response surface of long leg

(3) Use Error

固有値解析のAbaqus入力ファイルおよび出力結果の処理を解析者自身によって検証した。Model Riskが「LOW-LOW」であることからV&V40の例にならってTable5より内部および外部の検証は実施しないことを選択した。COU2とCOU3に対しても同様である。

Table5 Credibility gradation of Use Error activities¹⁾

Credibility	Description
A	Inputs and outputs are not verified.
B	Key inputs and outputs are verified by the practitioner.
C	Key inputs and outputs are verified by internal peer review.
D	Key inputs and outputs are verified by reproducing important simulations as part of an external peer review.

6. COU2 (部品単体のシミュレーション) のV&V活動

(1) 物性データの同定

接合部アセンブリを構成する長い脚, 短い脚, 貫部品各7本に対して, あらかじめハンマリング試験から1次固有振動数, 計測した質量から密度を求めておく。その後,

COU1で得られた応答曲面を使って繊維方向ヤング率を同定した。Table6は長い脚に対して同定した繊維方向ヤング率の値を示す。

(2) 部品モデルの妥当性確認

上記のように繊維方向ヤング率を同定した部品モデル(計21本)について, それぞれ固有値解析を実施してTable6に示すように得られた固有振動数がハンマリング試験の結果とよく一致することを確認した。

Table6 Identified Young's Modulus, Comparison of Eigenfrequencies by hammering test and Abaqus

sample #	Eigenfrequency from hammering test	Density from measured mass	Young's modulus(E _x) identified	Eigenfrequency from Abaqus	Relative error hammering test vs. Abaqus
#1	285.00 Hz	475.8 kg/m ³	12900 MPa	284.77 Hz	0.08 %
#2	251.25 Hz	395.7 kg/m ³	8330 MPa	250.93 Hz	0.13 %
#3	296.00 Hz	413.8 kg/m ³	12100 MPa	295.74 Hz	0.09 %
#4	293.75 Hz	465.7 kg/m ³	13400 MPa	293.37 Hz	0.13 %
#5	249.75 Hz	391.7 kg/m ³	8190 MPa	250.08 Hz	-0.13 %
#6	277.75 Hz	397.3 kg/m ³	10200 MPa	277.11 Hz	0.23 %
#7	282.75 Hz	406.0 kg/m ³	10800 MPa	282.07 Hz	0.24 %

7. COU3 (接合部アセンブリのシミュレーション) のV&V活動

(1) 接合部アセンブリのシミュレーション

COU2で用いた7組の部品モデルを使って, 三枚継ぎ接合部に着目したアセンブリモデルを作成した。三枚継ぎのみに着目するために, もう一方の接合部はアルミ板で挟み固定した。接触している部品同士の表面は固着として固有値解析を行った。

(2) 接合部モデルの妥当性確認

7組のアセンブリに対して, かつFig.5に示す3番目までのモードに対して数値シミュレーションとハンマリング試験による固有振動数の結果を比較した。Fig.6に示すようにおおむね傾向は一致しているものの数値シミュレー

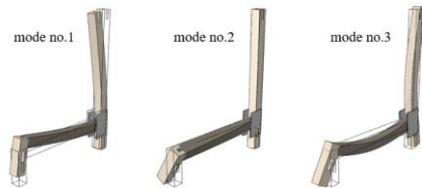


Fig.5 Mode shapes for three-piece joint assembly models

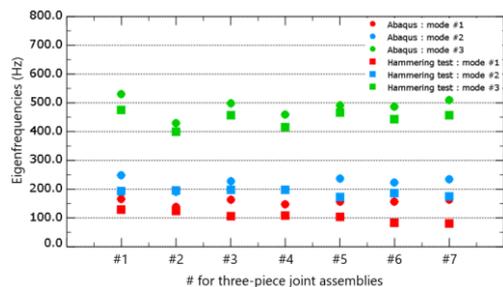


Fig.6 Comparison of Eigenfrequencies by hammering test and Abaqus for three-piece joint assemblies

ションに対してハンマリング試験の固有振動数は低い傾向にある。数値モデルでは接合部の部品同士が接触する領域を固着（結合拘束）としているために実験より高い固有振動数になったと考えられる。

また、その相対差は0.1%から50.8%であった。COU2において部品単体モデルの妥当性は確認されているため、この相対差のばらつきは接合部の影響であると考えられる。

(3) 接合部アセンブリ・シミュレーションの更新

接合部アセンブリ#1に対してFig.7に示すように5タイプの結合領域が異なる接合部モデルを作成し固有値解析を行った。結合領域を減らすことで3番目のモードの固有振動数は変化し小さくなっている。Fig.5に示すようにこのモードは、短い脚と長い脚を互いに開閉するモードであり接合部の影響が大きいためと考えられる。

一方で2番目のモードは貫がねじれ短い脚が回転するモードであり接合部の影響を含むが、結合領域を変更しても固有振動数の変化はわずかであった。

さらに、1番目のモードは結合領域を減らしても固有振動数の結果に変化がほとんど見られなかった。貫および長い脚の曲げモードであり、貫と短い脚の接合部は90度に保たれ接合部の影響を含まないためと考えられる。

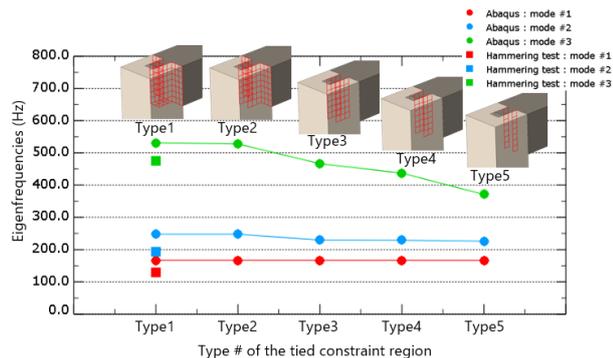


Fig.7 Effect of varying the tied region in the three-piece joint assembly model #1

8. まとめ

振動特性から同定した繊維方向ヤング率を使って、部品ごとの数値モデルから求まる固有振動数と実験結果がよく一致した。接合部を含むアセンブリは、今回最大50.8%の相対差を生じて接合部の影響によるばらつきが大きいことがわかった。接合部の結合領域を変更することで両脚の開閉モードに対する数値モデルの固有振動数を実験の固有振動数と近い値を得ることができた。一方で、近い値を得られなかった接合部の影響を含むモードがあり今後の課題である。また、接合部のばらつきを考慮したV&V40に基づくV&Vプロセスを今後検討する予定である。

参考文献

- [1] ASME : ASME V&V 40-2018 Assessing Credibility of Computational Modeling Through Verification and Validation: Application to Medical Devices, ASME 2018.
- [2] 松井和己, et al.: ASME V&V40 に基づいた木製椅子に対するシミュレーションの品質保証, 計算工学講演会論文集, 27, 2022.
- [3] 山田貴博 : 米国機械学会医療機器向けシミュレーション規格V&V40の考え方, 医療機器学, Vol.91, No.4, pp363-366, 2021.
- [4] 沢田稔 : 直交異方性材料としての木材の弾性および強度, 材料, 12巻, 121号, pp749-753, 196

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

V&V of Analysis of Laboratory Test in Prediction Framework of Behavior of Underground Structures
During Construction Phase and Verification Example of Data Assimilation

青野泰久¹⁾, 山本真哉²⁾, 鎌田浩基³⁾, 櫻井英行⁴⁾

Yasuhisa Aono, Shinya Yamamoto, Hiroki Kamada and Hideyuki Sakurai

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

A framework for excavation analysis utilizing data assimilation (DA) is being developed to keep safety during construction phases of underground structures. This paper shows that the position of the analysis of laboratory tests in this framework and V&V concept. Numerical experiments simulating triaxial compression test were conducted on a strain-softening model to confirm the applicability of DA. The ensemble distributions of E and ϕ were shifted toward the correct value by DA. On the other hand, because location of shear zone differs in each ensemble, the parameters that describe the softening behavior and residual state could not be estimated.

Key Words : Ensemble-based Data Assimilation, Underground Structures, Tri-axial Loading Test, Code Verification

1. はじめに

山岳トンネル、地下発電所等の地下構造物の工事では、施工前に得られる地山の情報が十分でないことから、施工段階に実際の地山状況を観察し、掘削にともなう地山の挙動および支保工の効果を計測により確かめながら、当初の設計や施工法を実際の地山状況に適合したものに修正する情報化施工が採用されている。設計や施工方法の変更の際には、基本的に過去の事例を参考にして、変更が行われている。地山の過大な変形、切羽の不安定化など、想定外の現象が発生、また、予見される場合、解析的手法によって設計を修正することもある。しかしながら、解析に必要な地山などの入力物性値の設定やモデル化には多くの課題があり、実際の地山挙動を適切に表現するには至っていない[1]。これに対し、施工中に得られる計測データを活用し、解析により地山の物性、未掘削箇所を掘削したときの地山変位、支保応力を予測する取り組みが行われている[2], [3], [4]。一方、対象はトンネルではないが、データ同化を活用し、土構造物の挙動の予測を行う取り組みがされており、解析結果の確率分布を評価できる点がデータ同化の利点であると述べられている[5]。

地山は不均質で力学特性が不明確であることから、著者らは参考文献[5]の取り組みのように、解析、計測などにより得られたデータに基づいた、信頼性が定量化された地山および支保の挙動の予測結果が示されるべきであると考えている。そのためには、①施工中に得られるデータの積極的な活用、②計測データや数値解析に使用する

パラメータなどの持つ不確かさ、およびこれらの不確かさが解析結果に及ぼす影響の定量的な把握が重要であると考えている。

一般に、計算モデルは実現象に対して理想化・簡略化された偏微分方程式、初期・境界条件、構成式などの数学モデルに基づき構築されているだけでなく、離散化誤差や丸め誤差等も含んでいるため、実現象を完璧に再現することはあり得ない。それに対し参考文献[5]などで扱われているデータ同化は、計算モデルのもつ誤差を考慮し、シミュレーションの実行中に観測データを活用して、計算モデルを修正し、性能を向上する技術である。データ同化ではパラメータの不確かさを考慮して数値解析を行うため、予測結果の信頼性を確率分布として定量的に提示できるのが特徴である。多種・多様な不確かさを扱わなければならない地下の掘削解析の信頼性を定量化し、向上させることが可能な解析スキームとして、データ同化が有望であると考えた。

以上の背景から著者らは図-1に示すデータ同化を利用した施工時の地下構造物における地山の変位、支保に作用する応力などの予測を行う施工時データ同化(DA)解析の研究を推進している[6], [7]。図-1はここで扱うアンサンブルベースのデータ同化の模式図である。上二つは、トンネル軸方向縦断の断面であり、青い丸は観測点、黄色い丸は変位の予測箇所を示す。上の縦断図は観測点の少ない掘削早期、下は掘削が進み観測点が増加した段階である。縦断図の下のグラフは、既に掘削した箇所、未掘削箇所

所の観測を開始してからの変位増分を、上二つの時点において予測した結果であり、横軸は切羽の位置、縦軸は変位の予測値である。青線は掘削早期の予測結果、赤線は掘削が進んだ段階の予測結果である。青、赤のそれぞれ実線は、予測結果のうち最も小さい値を示し、破線は最も大きい値を示す。これら二つのグラフは、データ同化の活用により、観測点の増加に伴い予測精度が向上することの期待を示しており、これまでの研究[6], [7]は、その可能性を確認するためのものであった

本稿では、トンネル施工時解析に先立って行う岩石材料試験を対象とした検討について述べる。著者らは施工時DA解析の大きな枠組みを考えた場合、岩石材料試験によるV&Vが重要であると考えた。まず、その位置づけについて概説し、ひずみ軟化材料を対象とした検証法と解析例を示し、得られた知見と課題を報告する。

2. 材料試験の解析とV&Vの位置づけ

図-2に櫻井ら[8]による地下構造物施工時DA解析の枠組みを示す。この枠組みでは、施工解析を行う前に、材料試験レベルでASME標準[9]のような数値モデルのモデルV&Vとその数値モデルによる同化V&V(櫻井ら[8]の呼称)を実施し、数値モデルの予測性能、データ同化の有効性の確認を行う。地下構造物施工時のDA解析では、地山の構造、物性など、不確かさの大きい事象を扱う必要があり、材料試験レベルでの数値モデルのV&Vの成果は、データ同化の方針策定と予測結果の妥当性確認に有効であると考えた。青枠のモデルV&Vでは、物性等の不確かさの特性と数値モデルの予測性能を評価する。赤枠の同化V&Vでは、まず数値モデルによる材料試験解析結果(模擬試験データ)を用いたデータ同化を行い、誤差がゼロの解析が可能な数値モデルで正しく同化できるかを検証する(同化検証)。続いて、実際の試験データを用いたデータ同化により、実現象への同化性能を確認する(同化確認)。以下、本稿では図-2赤枠の同化検証の一例を示し、得られた知見と課題を述べる。

3. 逐次データ同化

データ同化の手法には様々なものが存在するが、本研究では逐次型データ同化手法であり、アンサンブルベースのデータ同化手法であるESTKF(Error Subspace Transform Kalman Filter)[10]を採用した。ESTKFは比較的計算コストが小さいという利点がある。以下に施工時データ同化解析の枠組みを構成する岩石の荷重解析とデータ同化の組み合わせについて説明をするが、ESTKFの詳細な説明は紙面の都合上、割愛する。ESTKFでは、最初に以下のような状態空間モデルを設定する。

$$\mathbf{x}_n^{\text{FVM}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{v}_n) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{H}\mathbf{x}_n + \boldsymbol{\omega}_n, \quad \boldsymbol{\omega}_n \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{R}) \quad (2)$$

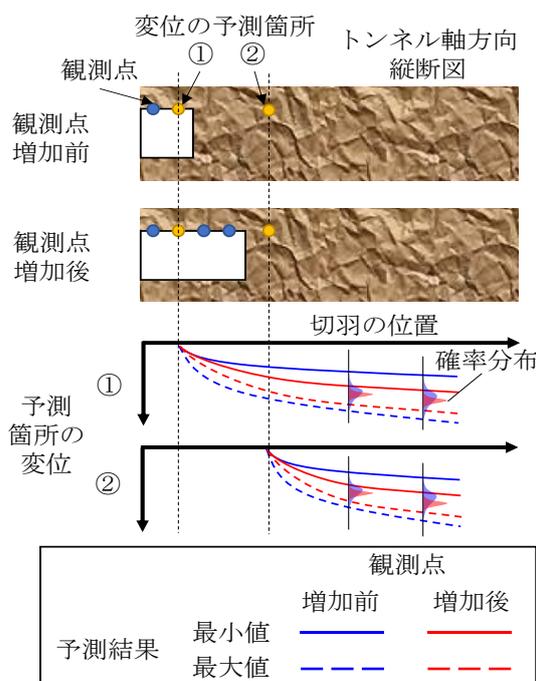


図-1 地下構造物施工時のDA解析で得られる予測結果のイメージ

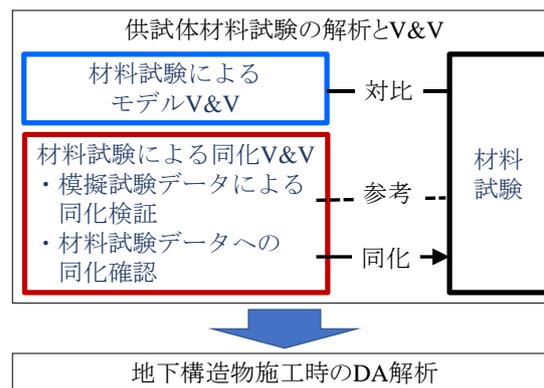


図-2 施工時DA解析の枠組み

ここで、 \mathbf{x} は節点の変位、要素の応力、岩石の物性などの状態変数で構成される状態ベクトル、 \mathbf{v} はシステムノイズ、添え字FVM、 n はデータ同化前の有限体積法(FVM)による解析結果(事前分布)、荷重ステップを表す。 \mathbf{f} はある荷重ステップ $n-1$ から n までの変数の時間発展を表現する演算子であり、本報告では商用ソフトウェアFLAC3Dを用いたFVMによる荷重解析が対応する。 \mathbf{y} は荷重により観測点に生じた変位で構成されるベクトル(以降、観測ベクトルとする)、 \mathbf{H} は線形の観測演算子である。また、 $\boldsymbol{\omega}$ は平均 $\mathbf{0}$ 、共分散行列 \mathbf{R} の正規分布に従う観測ノイズである。ESTKFの実際の手順は予測と観測更新の2段階に分けられる。予測においては、アンサンブルの各メンバーに対して、式(1)のように次の観測結果が得られる荷重ステップまでのシミュレーションを実行することで状態ベクトルの事前分布を得る。観測更新では、観測データや \mathbf{R} などの共分散行列を用いて各アンサンブルの状態ベクトルを更新する。

4. 模擬試験データによる同化検証

岩石の三軸圧縮試験を対象に、データ同化が正しく機能するか、同化検証により確認した。同化検証では、正解の条件を設定した解析モデル(正解モデル)により計算した結果を計測データと考え、正解と異なる条件のアンサンブル(予測モデル)により計算した結果と計測データを逐次データ同化させる。同化検証では通常知りえない真の値がわかるため、着目する問題に対し、データ同化が正しく機能するか否かの事前検証を行うことができる。本同化検証での具体的な検討内容は以下の①、②とした。

①データ同化により予測モデルの物性がどのように更新されるか

②予測モデルの軸差応力-軸ひずみ関係の予測結果がどのように変化するか

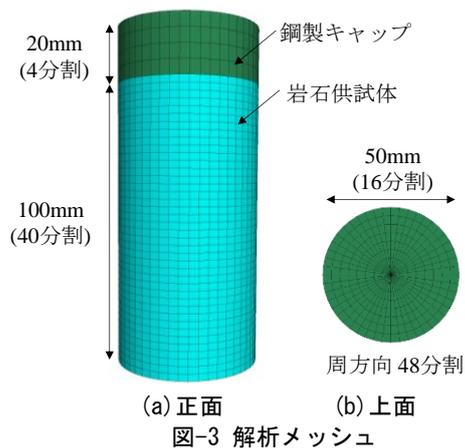
(1)解析モデル

図-3に同化検証に用いた解析メッシュを示す。岩石供試体と鋼製キャップのみモデル化し、それぞれひずみ軟化モデル、線形弾性モデルを仮定した。図-4に示すように、ひずみ軟化モデルの軟化時の挙動は塑性せん断ひずみ ϵ^{ps} の増加に伴う粘着力 c 、せん断抵抗角 ϕ の減少により表現される。 ϵ^{ps} は軟化から残留状態に変化する際の塑性せん断ひずみである。表-1に正解モデル、予測モデルの取り得る範囲の物性値を示す。 E はヤング率、 c_r 、 ϕ_r は残留状態の粘着力、せん断抵抗角である。下付き文字ensはアンサンブルの物性を意味し、ひずみ軟化を仮定しているため、 ϕ は $0 - \phi_{ens}$ の範囲から取得した。正解モデルの供試体のポアソン比 ν は0.3、 c は22.5MPa、 c_r は15.0MPa、キャップの E 、 ν は218GPa、0.3、拘束圧は12.0MPaとし、予測モデルも同じ値とした。

計測機器については、図-5に示すように LDT(Local Deformation Transducer)を軸方向、径方向にそれぞれ2個使用することを想定し、LDTによる変位の観測誤差は $2.5 \times 10^{-5}m$ とした。荷重は変位制御を想定し、1ステップごとに供試体の上面を $1.0 \times 10^{-5}m$ ずつ変位させて収束計算を行い、図-6にプロットした荷重ステップ1-5、19-25の絶対変位を各ステップの同化にそれぞれ用いた。正解モデルの荷重解析では、荷重ステップ22の段階で供試体にせん断帯が発生した。

(2)手順

以下に同化検証の手順を示す。最初に正解の物性値で荷重解析を行い、供試体の軸方向、径方向変位の模擬観測値を作成する。次に、表-1の予測モデルの行に示す一様分布の上下限値の範囲から一様乱数により複数の条件を組み合わせたアンサンブルを発生させ、所定の荷重ステップまで荷重解析を行い、供試体の物性、供試体の軸、径方向変位で構成される状態ベクトルを作成する。本同化検証では、 E 、 ϕ 、 ϕ_r 、 ϵ^{ps} を更新の対象とした。ひずみ軟化モデルを仮定しているため、 $\phi_{r,ens}$ は ϕ_{ens} よりも小さい範囲から求めた。サンプル数は計算時間とこれまでの経験から50とした。その後、正解の物性値とアンサンブルでそれぞれ



$$\Delta \epsilon^{ps} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\Delta \epsilon_1^{ps} - \Delta \epsilon_m^{ps})^2 + (\Delta \epsilon_2^{ps} - \Delta \epsilon_m^{ps})^2 + (\Delta \epsilon_3^{ps} - \Delta \epsilon_m^{ps})^2}$$

$$\Delta \epsilon_m^{ps} = (\Delta \epsilon_1^{ps} + \Delta \epsilon_3^{ps}) / 3$$

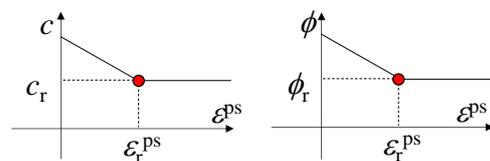


図-4 ひずみ軟化モデルにおける c 、 ϕ 、 ϵ^{ps} の関係

表-1 解析モデルの物性

	E (MPa)	ϕ (°)	ϕ_r (°)	ϵ_r^{ps}
正解モデル	5500	55	20	0.008
予測モデル	500-11000	15-65	$0 - \phi_{ens}$	$0 - 0.015$

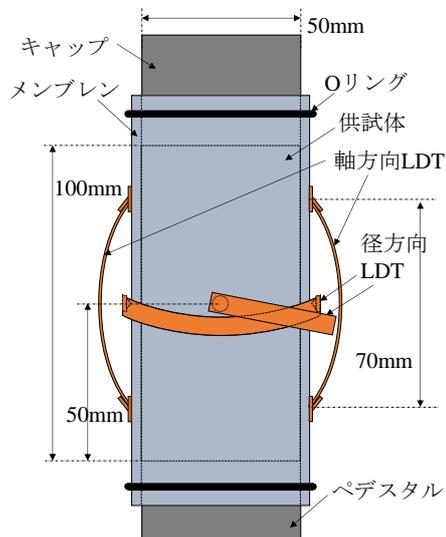


図-5 計測機器の位置

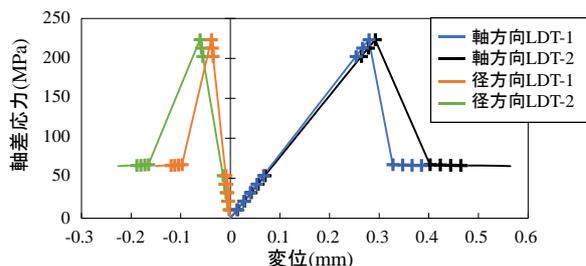


図-6 正解モデルの軸差応力-変位関係

れ計算した観測点の変位を同化し、先述した4個の物性値を更新する。更新されたひずみ軟化モデルの物性値が現実的でない場合(例えば負の値, $\phi^{DA} > \phi^{DA}$ など), 表-1に示す範囲から物性値を再生した。更新後の各パラメータにはアンサンブル平均の-10~10%のノイズを加え, 次の同化を行う荷重ステップまで荷重解析を行った。

著者らはこれまでに, 地山の物性値と節点変位の物理的関係を満足させるために, 特定の掘削段階に戻り, 同化後の地山の物性値を解析モデルに付与し, その後, 掘削解析を再び行う方法の有効性を確認しており[6], それを採用した。なお, この同化検証では観測ノイズが地山の物性の更新に及ぼす影響を排除するため, 観測ノイズは考慮していない。

5. 結果

(1) 岩石供試体の物性

図-7, 8に荷重ステップと同化前後の岩石供試体の物性, 変位の関係を, 図-9に荷重ステップ25における正解モデル, 予測モデルの降伏後の最大せん断ひずみのコンター図を示す。図-7の黒い線は正解の物性値, ○は各ステップの荷重解析に使用した物性値, △は更新後の物性値であ

る。両シンボルの視認性を向上させるため, それらが重ならないように配置している。シンボルの右側の線は事前分布, 事後分布の度数分布である。いずれの物性もデータ同化により分布が変化している。荷重ステップ1-5においては, 正解モデルと予測モデルに塑性域が発生しておらず, 弾性域の変位を用いて同化を行っているため, E のみ更新されている。荷重ステップ19では, ϕ が正解より小さいアンサンブルにせん断帯が生じ, ϕ の更新に有意な変位が得られたため, 正解より小さい ϕ の分布が正解に近づくように更新されている。荷重ステップ22では, 正解モデルにせん断帯が生じており, 正解より大きい ϕ の分布が正解に近づくように更新されている。 ϕ , ϵ^{ps} については, 同化により初期の分布に比べ変動係数が小さくなったが, 荷重ステップ25の事後分布の変動係数は E , ϕ に比べ大きい。図-8における, 正解モデルにせん断帯が発生する荷重ステップ22以降の予測モデルの径方向変位に着目すると, 正解に対し誤差が大きく, 正確に予測が行っていない。図-9より, 最大せん断ひずみが集中している箇所, すなわち, せん断帯の発生する位置が予測モデルごとに異なることで, ϕ , ϵ^{ps} の更新に有意な変位が得られず, ϕ , ϵ^{ps} は正解の値に収束しなかったと考えられる。

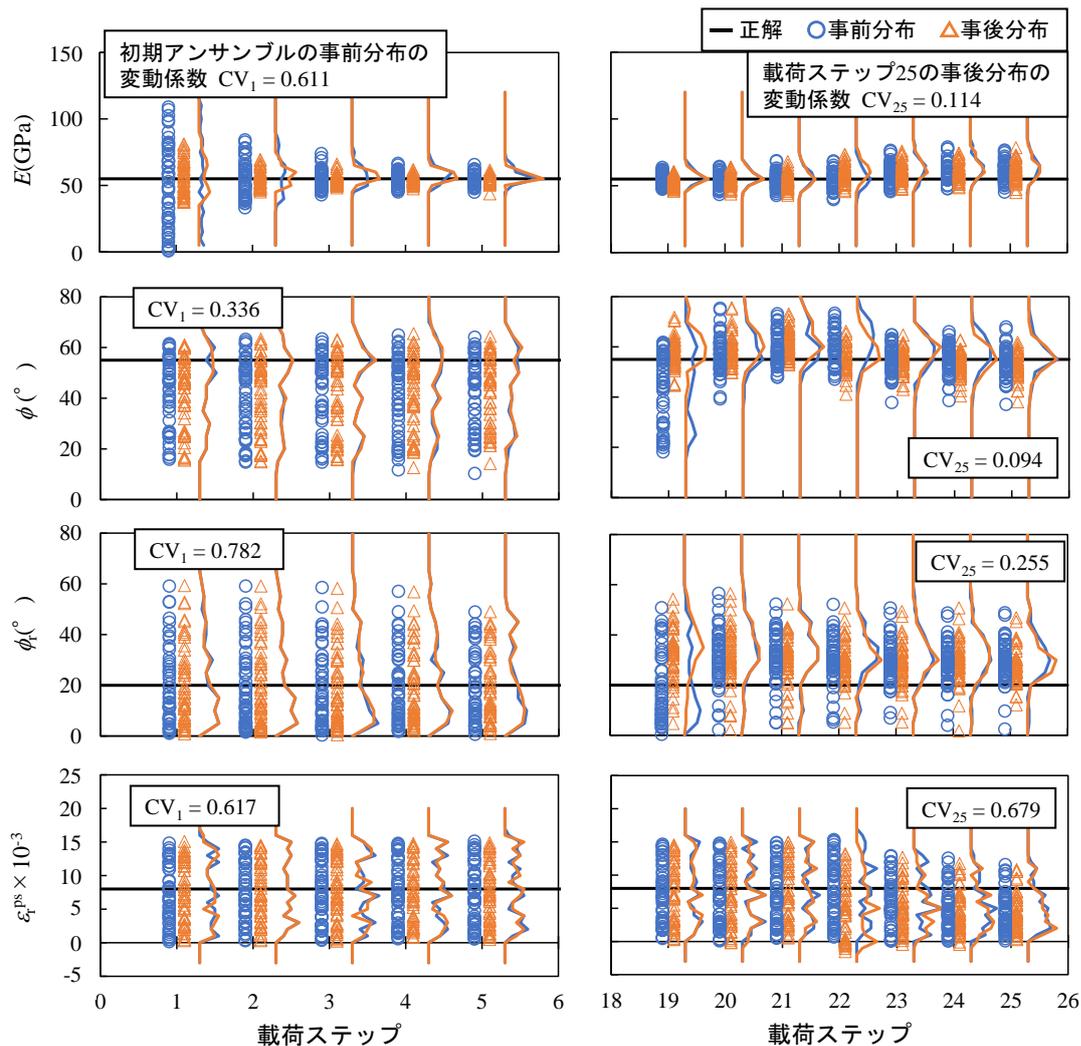


図-7 供試体の物性の事前分布, 事後分布

(2) 軸差応力-変位関係

図-10に正解モデル, 予測モデルを用いて計算した軸差応力-平均軸変位関係, 図-11に正解モデル, 予測モデルの破壊時の軸差応力, 荷重ステップ30における残留強度の分布を示す. 黒い線が正解モデル, 青い線, シンボルがデータ同化前の予測モデル, 橙色の線, シンボルが荷重ステップ25のデータ同化後の予測モデルの示す値である.

図-10, 11より, データ同化前においては, 物性のばらつきが大きいため, 弾性域における応力ひずみ関係の傾き, 破壊時と荷重ステップ30における軸差応力は, 正解との誤差が大きい. 一方, 荷重ステップ25のデータ同化後に

おいては, 物性が更新され, 正解に対しこれらの誤差は小さくなっている. しかし, 図-10の破壊後の挙動を見ると, 正解の挙動の予測が正確に行えているとは言い難い. これは, 前述した ϕ , ϵ^{ps} の推定が正確に行えていないことが原因である. また, 図-11 (a)における, 荷重ステップ25のデータ同化後の予測モデルの破壊時の軸差応力に着目すると, 正解に対し約60%の予測結果があり, 図-7に示すように, ϕ の変動係数は比較的小さいが, アンサンブルによっては破壊時の軸差応力を著しく過小評価する場合があることがわかった.

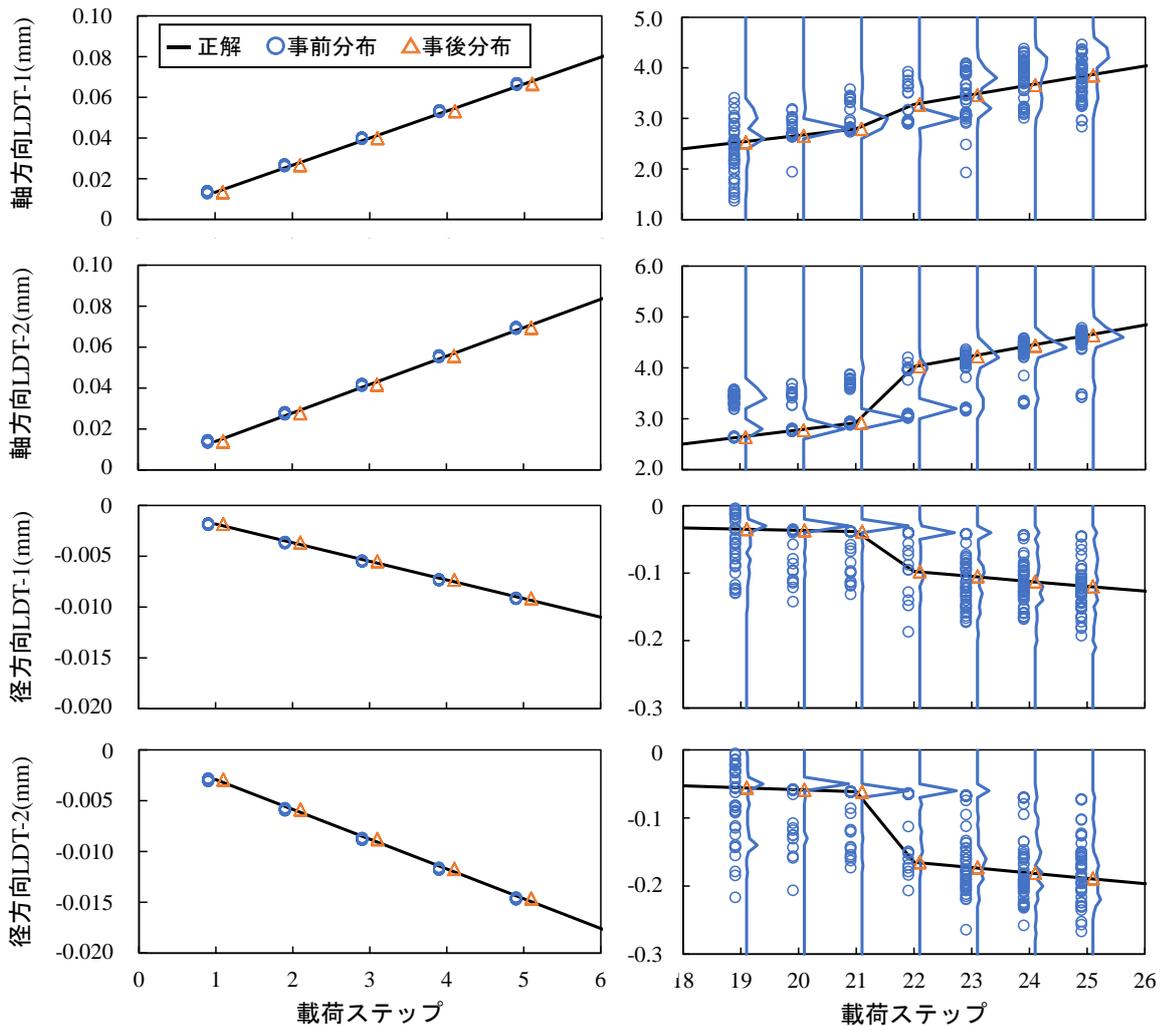
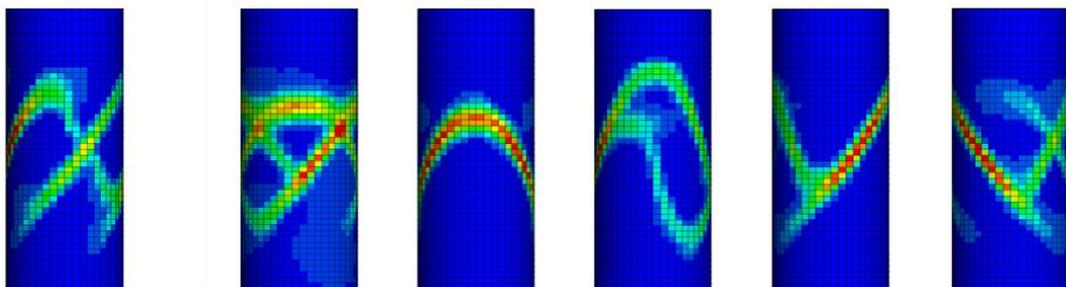


図-8 供試体の変位の事前分布, 事後分布



(a) 正解モデル

(b) 予測モデル (50個のうちの5個)

図-9 荷重ステップ 25 における塑性せん断ひずみのコンター

6. おわりに

施工時データ同化解析の枠組みの概要と、この枠組みを構成する材料試験の同化検証(解析結果を模擬試験データとしたデータ同化)の結果について説明した。同化検証では岩石供試体の三軸圧縮試験を想定し、軸方向、径方向変位を同化し、ひずみ軟化モデルを仮定した供試体のパラメータを更新し、以下の結果が得られた。

- ・正解の条件の解析モデル(正解モデル), アンサンブル(予測モデル)の弾性域の変位を同化することで、供試体のヤング率の分布が正解に収束する傾向が見られた。
- ・正解モデルの供試体が破壊する手前の荷重ステップの同化では、正解よりもせん断抵抗角 ϕ が小さいアンサンブルは、 ϕ が正解に近づくように更新され、正解モデルの破壊後の変位を同化すると、正解よりも ϕ が大きいアンサンブルは正解に近づくように更新された。
- ・正解モデルの供試体が破壊後の荷重ステップの変位を同化しても、 ϕ , ε^{ps} の推定が行えなかった。今回の同化検証の解析条件では、アンサンブルごとにせん断帯の発生する位置が異なり、 ϕ , ε^{ps} の更新に有意な変位が得られなかったためであると考えられる。
- ・供試体の軸差応力-平均軸ひずみ関係の予測性能はデータ同化により向上したが、正解の条件の予測が正確に行えているとは言い難い。これは ϕ , ϕ , ε^{ps} のばらつきによるものであると考えられる。

以上、岩石試験の同化検証の結果と得られた知見を示した。ひずみの局所化への対応については、解析では初期不整の導入も考えられるが、実験時の計測も含めて対応すべき課題であると考ええる。

参考文献

- [1] 土木学会：山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務 トンネルライブラリー, pp.119-130, 2006.
- [2] 樋川敦, 川原睦人, 金子典由：トンネル軸方向を考慮した逆解析手法による切羽前方の地質予測, 土木学会第58回年次学術講演会, 2003.
- [3] 山下雅之, 竹村いずみ, 杉本拓也, 吉永浩二, 前田薫：トンネル変形予測システム「PAS-Def」の開発と適用事例, 西松建設技報, vol.38, 2015.
- [4] 小島悠, 升元一彦, 宮嶋保幸, 福島大介, 宮石雅子, 黒川紗季：穿孔エネルギーを用いた解析モデルの高精度化とトンネル掘削シミュレーション, トンネル工学報告集, 第30巻, I-12, 2020.
- [5] 珠玖隆行, 村上章, 藤澤和謙, 西村伸一：地盤解析におけるデータ同化, 地盤工学会誌, Vol.59, pp.8-11, 2011.
- [6] 青野泰久, 櫻井英行, 山本真哉：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, pp.356-361, 2022.
- [7] 青野泰久, 奥野哲夫：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. (投稿中)
- [8] 櫻井英行, 青野泰久, 山本真哉, 鎌田浩基：トンネル掘削のデータ同化解析におけるV&Vの考え方, 第28回計算工学講演会, 2023. (投稿中)
- [9] The American Society for Mechanical Engineers: ASME V&V 10-2019, Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, 2019.
- [10] Nerger, L., Janjić, T., Schröter, J., and Hiller, W. : A Unification of Ensemble Square Root Kalman Filters. Monthly Weather Review. (2021): 2335-2345.

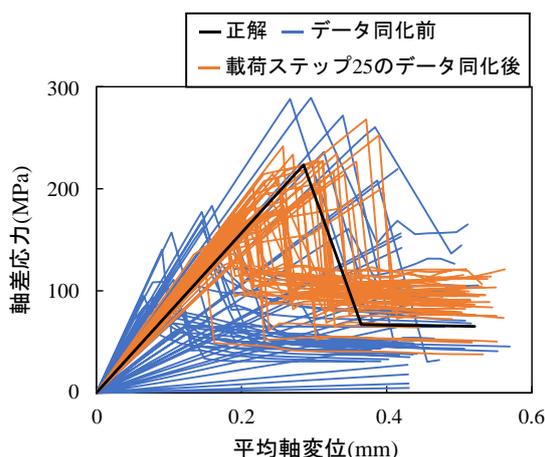


図-10 軸差応力-平均軸変位関係

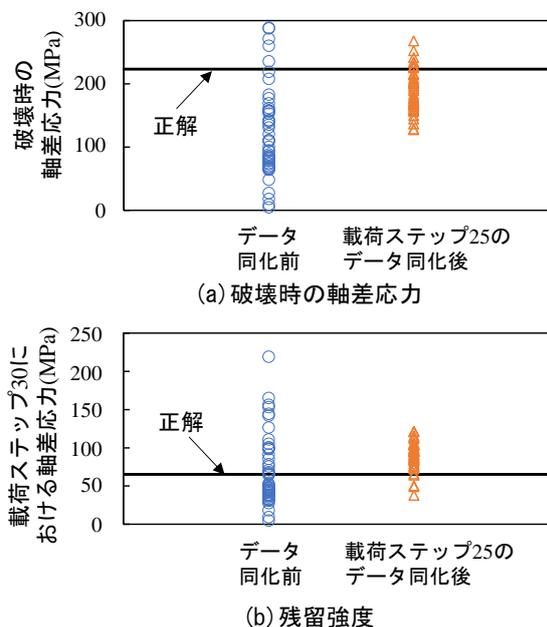


図-11 破壊時, 荷重ステップ 30 における軸差応力