ISSN 0288-9994

一般財団法人　建　設　工　学　研　究　振　興　会

年　　報

Annual Report of Society
for the Promotion of Construction Engineering

61

令 和 8 年 4 月
April　2026

一般財団法人　建　設　工　学　研　究　振　興　会
Society for the Promotion of
Construction Engineering

目　　次

研　究　報　告

原子力発電所敷地内における第四系地層変状の生成メカニズム・・・・・・・・・・・・ 1
山　田　正太郎

広域河道植生の樹高ならびにバイオマス推定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
風　間　　聡

計算力学・CAE 分野の国際的な研究動・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
寺　田　賢二郎
松　原　成志朗

緩和の変形依存性を考慮した非晶性樹脂の粘弾性構成則 ・・・・・・・・・・・・・・・ 9
寺　田　賢二郎
松　原　成志朗

報　　告

岩盤－水－化学連成理論解析の構築と膨潤性地山トンネルの設計・施工の合理化 ・・13
星　　啓太郎

3D プリンティング技術を用いた土木構造物生産を見据えた構造最適化法の開発 ・17
韓　　霽　珂

Contents

Research Reports

Generation Mechanism of Quaternary Ground Deformation at a Nuclear Power Plant Site … 1
Shotaro YAMADA

Estimation of vegetation height and biomass in river channels …… 3
So KAZAMA

International research trends in computational mechanics and CAE …… 5
Kenjiro TERADA
Seishiro MATSUBARA

Viscoelastic constitutive law of amorphous polymers considering strain dependent relaxation behavior …… 9
Kenjiro TERADA
Seishiro MATSUBARA

Reports

Development of coupled rock-water-chemical theoretical analysis and rationalization of design and construction for tunnels in expansive bedrock …… 13
Keitaro HOSHI

Development of Structural Optimization Methods for the Production of Civil Engineering Structures Using 3D Printing Technology …… 17
Jike HAN

原子力発電所敷地内における第四系地層変状の生成メカニズム

Generation Mechanism of Quaternary Ground Deformation at a Nuclear Power Plant Site

山田　正太郎　Shotaro　YAMADA

1．はじめに

青森県東通原子力発電所敷地内に分布する第四系段丘堆積物において，図 1 に示すような地層の撓みが確認されている．原子力発電所敷地内の第四系に変状が認められた場合，その成因が断層活動などの急激な地殻変動に起因するか否かは，構造物の安全性評価上，重要な検討事項である．地質調査および X 線回折分析により，第四系直下の新第三系泊層に吸水膨潤性鉱物の存在が確認され，この層の膨潤が撓みの原因である可能性が指摘されている．一方，図 2 に示す地中レーダー探査が示す通り，このような地中の起伏は複数確認されており，しかも周期性が認められるが，膨潤のみではこのようなパターンが発現するメカニズムまでは十分に説明できない．そこで本研究では，泊層が過去の沈降により形成された地層境界によって水平変位を拘束された状態で膨潤し，その結果，内部応力が蓄積され座屈が生じたとの仮説を立てた．以下では，この仮説の妥当性を，膨潤性岩盤モデルを用いた有限要素分岐解析により検証する．

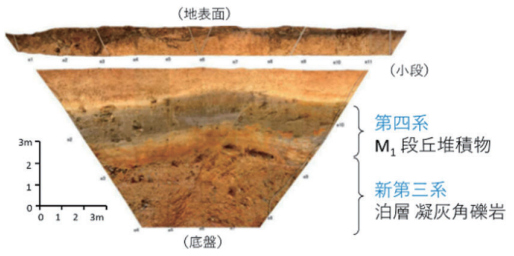


図 1 トレンチ掘削で確認された第四系の撓み[1)]

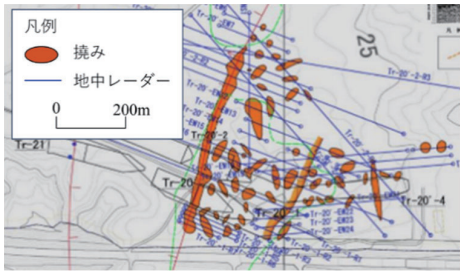


図 2 地中レーダー探査で確認した第四系の起伏[2)]

2．解析方法

本研究では，Hoshi et al. (2026)[3)]による粘土鉱物の結晶層間の電気-化学-力学作用を考慮した膨潤性岩盤モデルを用いる．このモデルでは，間隙流体のイオン濃度に応じて層間距離が変化する．このマルチフィジックスな構成則を，有限要素解析コードに実装して解析を行った．また，本研究では，分岐解析を行うために LDL^T 分解に元づく手法を採用した．

現地の地層構成を考慮して，下層(10m)と上層(0.5m)に非膨潤性岩盤，中層(0.5m)に膨潤性岩盤を配置した三層の水平成層地盤を仮定した．解析モデルの全体寸法は，水平方向 15m，高さ方向 11m に設定した．境界条件として，モデル両側面の水平変位および下面の鉛直変位を固定した．また，現地サイトが過去に海進・海退の履歴を受けた際に，間隙水のイオン濃度に変化が生じたと仮定して，イオン濃度を 1.0mol/L から 1.0×10^{-7}mol/L へと徐々に低下させた．

3．解析結果

図 3 に解析モデルの初期状態，分岐直後，および最終ステップにおける変形状態を示す．(a)

は分岐解に誘導した場合（分岐経路），(b)は誘導しなかった場合（主経路）の結果である．色の違いは，層構成を示しており，中層で膨潤を生じさせている．主経路では鉛直方向の変形のみが生じるのに対し，分岐経路では波状の変形が現れている．これは膨潤に伴う水平方向の膨潤圧により，一種の座屈現象が発生したためであると考えられる．特に，最初に出現した分岐点で分岐解に誘導したにも関わらず，2 波分の起伏が形成された．梁の座屈の場合，1 次モードで 1/2 波分の変形が現れることを考えるとこの特徴は特筆に値する．

次に現地においてある周期性を持った分岐パターンが現れることの必然性を検討するため，解析領域幅を 30m に拡張して解析を行った．図 4 に鉛直変位分布を示す．幅 15m のケースでは 2 波分，幅 30 m のケースでは 4 波分の起伏が現れ，共にイオン濃度 7.57×10^{-7} mol/L において分岐が生じた．梁の座屈では長さの増加に伴い波長が伸び，座屈荷重が低下するが，本解析では解析領域の幅が広がっても，波長も分岐荷重に相当するイオン濃度も変化しなかった．紙幅の都合上，結果は割愛するが，膨潤層厚を大きくして計算すると波長が大きくなることが確認された．これらの結果は，現地における起伏の周期が解析領域の大きさではなく，層厚や地盤剛性といった力学特性によって自律的に決定されることを示唆している．

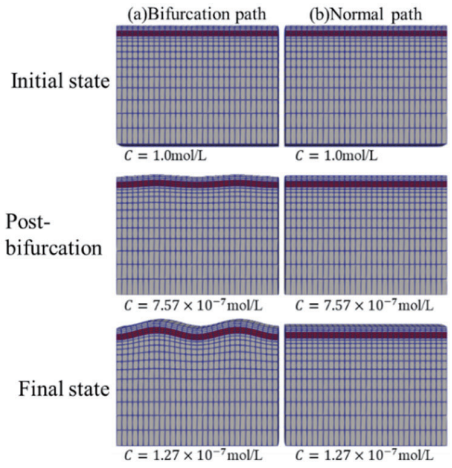


図 3 変形図

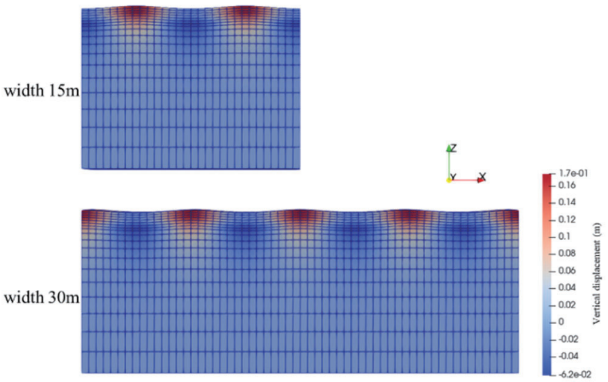


図 4 鉛直変位分布

4．おわりに

本研究では，原子力サイトの第四系で確認された地層変状が，新第三系の膨潤に起因する分岐現象として説明可能であること，また起伏は膨潤層の厚さや剛性によって決まる一定の波長を持って現れることを数値計算により示した．

参考文献：

1) 東北電力 (2014): 東通原子力発電所敷地内断層の活動性等の評価に係る追加地質調査報告書.
2) 中満隆博 (2025): 見かけ活断層の諸相－東通原子力発電所の場合－.
3) Hoshi et al. (2026): Tunnel excavation and swelling analysis of expansive bedrock with multiphysics elasto-plastic model capable of describing different swelling behavior due to exchangeable cation, Computers and Geotechnics, Vol. 193, 107956.

広域河道植生の樹高ならびにバイオマス推定

Estimation of vegetation height and biomass in river channels

風間　聡　So KAZAMA

１．はじめに

広域かつ高頻度なモニタリングには衛星リモートセンシングが有効だが，主流の NDVI などの指標は二次元情報に限られ，水理計算やバイオマス量推定に不可欠な樹高の把握が困難であった．航空機 LiDAR 等は精緻な三次元計測が可能であるが，コスト面で広域・継続的な適用に課題がある．近年，衛星データと機械学習を組み合わせた広域樹高推定技術が進展しているものの，これを河川の動的な環境評価や洪水解析に利用した事例は少ない．本研究は河道内植生の成長量を考慮した気候変動への緩和・適応策の評価手法の構築を目的とする．具体的には，最新のリモートセンシング・機械学習技術を用いて樹高およびその成長量を推定し，洪水氾濫解析と連携させることである．

２．データセット

広域的な植生分布と樹高の推定は，2019 年から 2024 年の Sentinel-2 光学画像および Nico らによる全球樹高予測モデルを用いた．バイオマス量推定モデルの構築や植生の物理量関係の特定には，静岡県の航空機 LiDAR データおよび北海道開発局管轄のヤナギ林毎木調査データを活用し，sentinel-2 より正規化植生指標（NDVI），拡張植生指標（EVI），葉面積指数（LAI）と組み合わせて解析した．

３．研究方法

バイオマス量推定は，広域かつ高頻度なモニタリングを可能にするため，衛星データと機械学習を組み合わせた推定モデルを構築した．正解データは，静岡県の VIRTUAL SHIZUOKA による高密度航空機 LP（Laser Profiler）データを採用した．LP データから作成した CHM（Canopy Height Model）と RGB オルソ画像由来の植生指数（ExG）を用いて樹木領域を特定し，10 m メッシュ内の樹木形状を四角錐と仮定してバイオマス量を算出した．これを目的変数，Sentinel-2 の観測データおよび樹高データを説明変数として，勾配ブースティング決定木（XGBoost）による回帰モデルを作成した．

植生の成長量を評価するため，2019 年から 2024 年の樹高データ差分を解析した．年平均気温と地形データを入力因子とし，0.6 m/year 以上の樹高増加を示す高成長領域を特定する分類モデルを構築することによって，効率的な資源管理に向けた基礎情報を整備した．

４．結果

XGBoost による推定モデルの精度は決定係数 R2=0.67，RMSE 157 m^3 であった(図-1)．これは，航空機 LiDAR を用いた局所推定（R2 ＝ 0.8）には及ばないものの，光学衛星のみを用いた既往の広域推定研究（R2＝0.60-0.75）と比較して同等の水準である．特に，水面反射や混合画素の影響を受けやすい河道内という困難な環境下において，R2=0.67 を達成したことは，広域スクリーニングツールとしての実用性を示している．また，低植生域での過大評価を抑制するために導入した Soft Gating は，MAE の低減および外れ値の抑制に寄与した．しかし，改善幅は 1.2%と限定的であった．これは，衛星データを 3 ヶ月中央値として利用している時間分解能と，流出や伐採などの実際の植生状態との間に不可避なタイムラグが存在することを示唆する．

河道管理の最適化に向け，年間の樹高変化量に基づく成長ポテンシャルの評価を行った．名取川水系における実地検証により，伐採地での負の変化や，竹林繁茂地での年間 5m 以上の正の急成長をデータから捕捉できることを確認した．これに基づき構築した高成長地点（0.6 m/年以上）の分類モデルは，正解率およびマクロ平均 F1 スコアともに 0.70 に達し，ROC 曲線における AUC は 0.789 を記録した．これは複雑な自然環境下における予測として，実用的な精度が得られたことを示している．特徴量の寄与度分析においては，河道の最大傾斜が最も高く，次いで平均方位が重要視された．この結果から，高水敷における植生の成長速度は，水はけや土壌の安定性，日射受光量といった地形的な立地環境に強く支配されていることが示唆された．予算制約のある河川管理において，優先的に伐採すべき再繁茂リスクの高いエリアを特定するための基礎情報として極めて有用である．

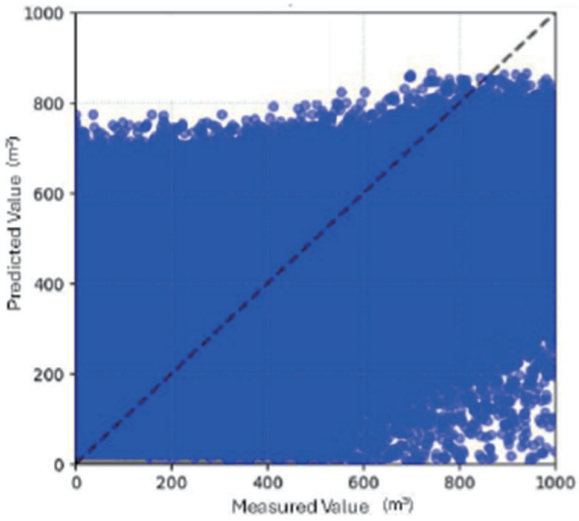


図-1 バイオマス推定量と観測量の比較

参考文献：

1) 池本敦哉，金子恭也，平賀優介，風間聡，広域洪水解析のための植生粗度係数推定，土木学会論文集 B1(水工学)， 82 巻 ， 2026（投稿予定）.

計算力学・CAE 分野の国際的な研究動向

International research trends in computational mechanics and CAE

寺田　賢二郎　Kenjiro　TERADA

松原　成志朗　Seishiro　MATSUBARA

１．はじめに

2026 年 3 月 12 日に計算力学・CAE 分野の国際的な研究動向に関する国際ワークショップ「International Symposium on Advanced Computational Mechanics for the Next Generation」を開催した．本ワークショップでは，計算力学・CAE 分野を先導する著名な海外研究者 15 名による招待講演を通して世界最先端の研究を調査した．本稿では，各講演の概要を整理するとともに，本分野における国際的な研究動向をまとめる．

２．基調講演の内容

基調講演では，マルチスケール・マルチフィジックス解析手法，材料モデリング，損傷・破壊解析といった基盤の数値解析手法, Virtual Element Method のような有限要素法を基軸とする新しい数値解析手法，機械学習やニューラルネットワークを活用したデータ駆動型解析，生成 AI，代理モデルなど，昨今，流行りの AI 技術との融合を目指す次世代計算力学・CAE 技術に関するものが取り上げられていた．以下，各講演の概要をまとめる．

Jörg Schröder（University of Duisburg-Essen, Germany）: Recent development in micromagnetic simulations

磁性材料に対する磁気シミュレーションに関する最新の研究成果が示された．特に，磁性材料内部で形成される磁区構造やスピンダイナミクスを対象とした数値解析技術の高度化について説明があった．また，大規模並列計算を利用した高精度・高速シミュレーション技術についても議論され，次世代磁気デバイスや高機能磁性材料設計への応用可能性が示された．さらに，材料科学と計算力学の融合領域として，マルチフィジックス解析やデータ駆動型解析技術との連携についても紹介され，微視構造レベルでの材料機能予測の重要性が強調された．

Marek Behr（RWTH Aachen University, Germany）: Recent developments in space-time meshing: fluids, solids, and fluid-structure interaction

流体解析，固体解析，および流体・構造連成問題を対象とした時空間メッシュ法の研究成果が示された．時空間有限要素法では，空間方向と時間方向を同時に離散化することで，高精度かつ安定性の高い

解析が可能となることが強調された．特に，移動境界問題や自由表面流れ，大変形を伴う流体・構造連成問題への適用事例が紹介され，航空宇宙分野や生体内血流解析などへの応用可能性が示された．また，時空間一体型解析による数値安定性の向上や計算効率化についても議論が行われた．

Antonio Huerta（Universitat Politècnica de Catalunya, Spain）: Machine learning surrogates to accelerate design in parametric topology optimization

パラメトリック・トポロジー最適化を高速化するための機械学習に基づく代理モデルについての成果が報告された．従来のトポロジー最適化では，多数回の有限要素解析が必要となるため計算コストが非常に高いという課題があるが，ニューラルネットワークを用いた代理モデルを利用することで，構造性能予測や最適設計探索を高速に実施できることが示された．また，生成 AI や Reduced Order Model との組み合わせによる設計自動化の可能性についても言及された．

Jiun-Shyan Chen（University of California San Diego, USA）: NN-enhanced computational method

ニューラルネットワークを活用した新しい計算力学手法について紹介された．Physics-Informed Neural Network（PINN）などのデータ駆動型の解析技術を利用することで，従来の有限要素法では計算負荷が高かった問題に対して，高速かつ高精度な解析が可能となることが示された．また，非線形問題や不確実性を含む問題への適用事例についても議論され，実験データと数値解析を融合した解析手法の有効性が紹介された．さらに，従来手法では困難であった逆問題解析への展開可能性についても言及された．

Manfred Bischoff（University of Stuttgart, Germany）:On the distribution of redundancy in structures」

構造物内部における冗長性分布に関する理論的研究が紹介された．構造システムにおける荷重伝達経路や局所破壊時の力の再分配メカニズムを解析することで，安全性と軽量化を両立する設計指針についての最新の研究成果が示された．また，冗長な荷重経路を適切に配置することで，構造全体の信頼性向上が可能となることが示され，航空宇宙構造物や大型建築物への応用可能性が紹介された．加えて，損傷許容設計との関連についても議論された．

Francisco Chinesta（Arts et Métiers Institute of Technology, France）: Towards efficient generative design

固有的一般化分解（PGD）の最新の研究成果や，生成設計技術の効率化に向けた研究について紹介された．CAE 解析と AI 技術を統合することで，多数の設計案を短時間で生成し，性能評価を行うアプローチが説明された．特に，Reduced Order Model やデータ駆動型モデリングを利用した高速設計技術が重要視されており，設計プロセスの自動化や効率化につながる研究として注目されていることが示された．

David Chen（National Taiwan University, Taiwan）: Deep material network for multiscale nonlinear problems

マルチスケール非線形問題に対する Deep Material Network についての最新の研究成果が紹介された．

複雑な材料挙動をニューラルネットワークによって効率的に表現することで，従来のマルチスケール解析よりも高速なシミュレーションが可能となることが強調された．特に，複合材料や非線形材料の解析において有効であり，材料設計への応用が期待される結果が示された．

Leong Hien Poh（National University of Singapore, Singapore）: An accessible FE implementation of neural network surrogates in Abaqus

ニューラルネットワークモデルの商用有限要素解析ソフトウェア Abaqus への実装が紹介され，これを'利用した応用例が示された．既存の CAE ソフトウェア環境に AI 技術を組み込むことで，実用的かつ利用しやすい解析環境を構築できることが例示された．産業界で広く利用される解析ソフトウェアとの統合は，AI 技術の実用化を促進する重要な方向性であることを確認した．

Tong-Seok Han（Yonsei University, Republic of Korea）: A virtual experiment framework for microstructure characterization and property evaluation of cementitious materials

セメント系材料の微視構造の特性評価および物性評価のための仮想実験のフレームワークについての最新の研究成果が紹介された．材料内部の複雑な微細構造を数値的に再現し，力学特性や耐久性を評価する技術について解説された．また，実験データとシミュレーションを融合することで，材料特性を高精度に予測するアプローチについても議論され，建設材料分野への応用可能性が示された．

Varvara Kouznetsova（Eindhoven University of Technology, Netherlands）: A homogenization and multiscale journey

均質化法およびマルチスケール解析に関する研究の発展について紹介された．ミクロ構造情報をマクロスケール解析へ効率的に反映させるための理論と数値手法が説明され，非均質材料の高精度解析における有効性が示された. 特に, 複合材料や周期構造材料を対象とした均質化理論の適用事例が紹介され, 微視構造と材料特性の関係性について議論が行われた．また，マルチスケール解析を利用した高精度材料設計への展開可能性についても紹介され，今後さらに重要となる解析技術であることが示された．

Julien Yvonnet（Gustave Eiffel University, France）: FEM phase field fracture simulation on RVEs

代表体積要素（RVE）に対する有限要素法ベースのフェーズフィールド破壊解析に関する最新の研究成果が紹介された．複雑な亀裂進展挙動を高精度に再現する手法としてフェーズフィールド法が注目されており，マルチスケール破壊解析への応用可能性が議論された．

Eduardo De Souza Neto（Swansea University, United Kingdom）: Multiscale contact revisited: an approach based on the method of multiscale virtual power

マルチスケール仮想仕事法に基づく接触問題解析についての最新の研究成果が報告された．接触問題は非線形性が強く数値解析が困難な問題の一つであるが，マルチスケール理論を導入することで高精度

かつ安定な解析が可能となることが示された．また，複雑接触を伴う機械システム解析への応用が期待される結果が示された．

Peter Wriggers（Leibniz University of Hannover, Germany）: Virtual element method

Virtual Element Method（VEM）に関する基礎理論と応用研究について紹介された．VEM は複雑形状メッシュに柔軟に対応可能であり，従来の有限要素法では困難であった問題への適用が可能であることが強調され、幾つかの数値解析によりその性能の検証例が示された．また，構造解析や連成解析への応用事例が紹介され，新しい数値解析法としての有効性と発展可能性について議論が行われた．

Philipp Junker（Leibniz University of Hannover, Germany）: Time separated stochastic mechanics: a novel approach for the estimation of random fluctuations during microstructure evolution

微視構造進化過程におけるランダム変動推定のための新しい確率力学手法についての最新のけんきゅせ以下が示された．時間分離型アプローチを導入することで，不確実性を含む材料挙動を効率的に評価できること，および不確実性解析や信頼性設計分野において重要な研究方向であることが強調された．

İlker Temizer（Bilkent University, Turkey）: Locally hybridized finite element formulation for Kohn-Sham density functional theory calculations

Kohn-Sham 密度汎関数理論計算のための局所ハイブリッド有限要素法に関する最新の研究成果が示された．量子力学計算と有限要素法を融合することで，高精度な電子状態解析を効率的に実施できることが強調され，複雑な電子構造問題に対する数値安定性や計算効率向上についても議論された．そして，材料科学，ナノテクノロジー，電子材料設計分野への応用可能性が期待されることが示唆された．

３．まとめ

本ワークショップを通じて，計算力学・CAE 分野では AI・機械学習との融合，マルチスケール解析の高度化，Virtual Element Method などの新しい数値計算手法の開発が国際的に活発化していることが確認された．特に，ニューラルネットワークを利用した代理モデルやデータ駆動型の解析技術は，多くの講演で共通して取り上げられており，計算コスト削減と高精度化を両立する重要な技術として位置付けられると考えられる．さらに，CAE ソフトウェアとの統合や実験と数値シミュレーションを融合した実用化研究も進展しており，産業応用を強く意識した研究も国際的な潮流となっていることが確認された．

緩和の変形依存性を考慮した非晶性樹脂の粘弾性構成則

Viscoelastic constitutive law of amorphous polymers considering strain dependent relaxation behavior

寺田　賢二郎　Kenjiro　TERADA

松原　成志朗　Seishiro　MATSUBARA

1．はじめに

エンジニアリング・プラスチックは高強度かつ特定の機能性を有する熱可塑性樹脂の総称である．なかでもポリカーボネート（PC）は優れた採光性と耐候性を有し，土木・建築分野では高速道路の透光遮音壁や屋根材などに広く利用されている．これらの樹脂を長期間にわたって安心・安全に利用するためには，負荷・除荷をはじめとする多様な変形過程において強度を精確に予測することが求められる．しかし，現状の材料構成則の性能は除荷過程における力学挙動の表現に対して限定的であり，汎用的な負荷条件下において構造物の強度を精確に評価することはできない．そこで本研究では，緩和特性の変形依存性を考慮した非線形粘弾性構成則を提案し，樹脂特有の応力軟化とひずみ硬化に加え，幅広い変形帯を起点とする特有の除荷挙動を表現する．また，引張試験を模擬する有限要素解析を実施して本材料構成則が表現する構造的な振る舞いについても考察する．

2．負荷・除荷過程における力学挙動

PC の単軸圧縮試験で得られた変位速度依存の圧縮真応力と真ひずみの関係を図-1 に示す．左図より，樹脂は圧縮の大変形過程において特有の応力軟化とひずみ硬化を生じ，大きな粘性変形を残すことがわかる．一方，右図は応力軟化直前を起点とする負荷・除荷挙動を示し，ここで観察される力学挙動は概

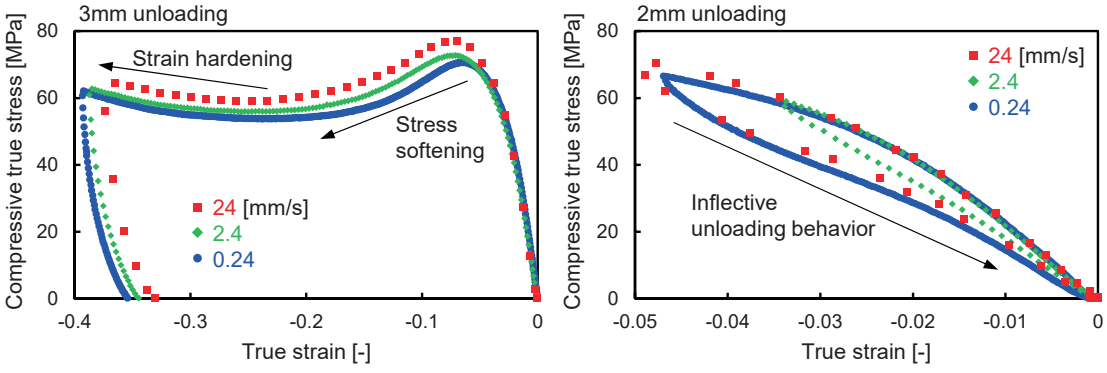


図-1 PC の単軸圧縮試験で得られた変位速度依存の圧縮真応力と真ひずみの関係

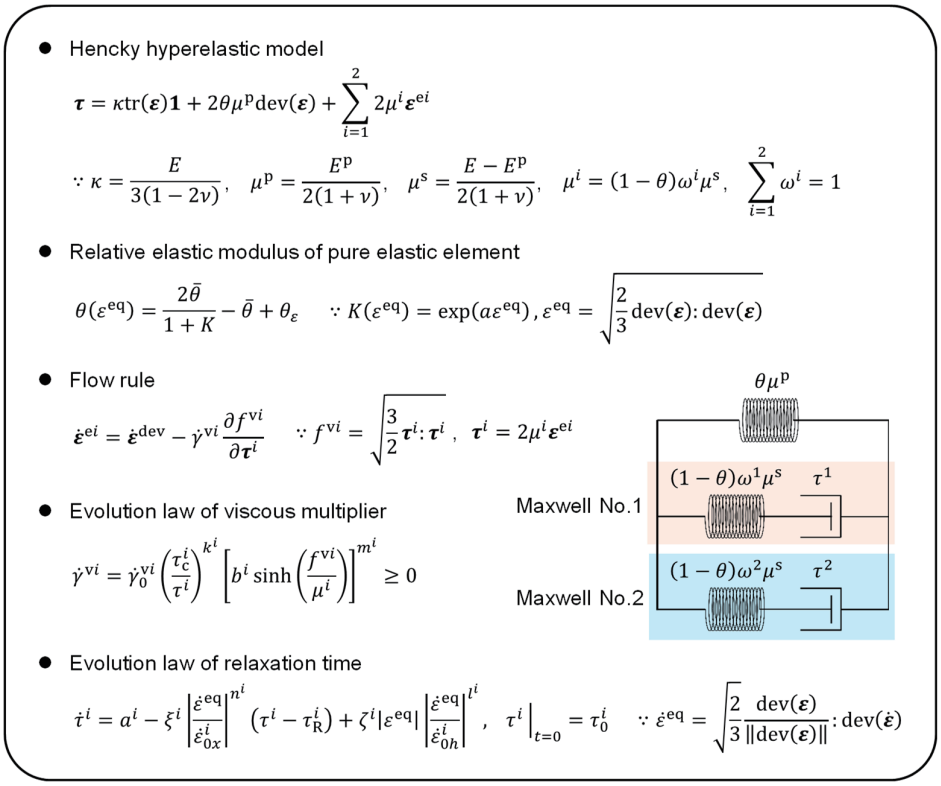


図-2 非晶性樹脂の負荷・除荷挙動を表現する非線形粘弾性構成則

ね粘弾性的であるが，除荷過程において途中で応力軌跡に変曲点が存在するような非線形性がある．

本研究では，左図に示す非晶性樹脂の基本的な力学挙動に加え，既往の材料構成則では表現不可能な右図の力学挙動を表現するために，図-2 に示す純弾性要素と 2 つの Maxwell 要素で構成される非線形粘弾性構成則を構築した．まず，純弾性要素の寄与を定量化する相対弾性係数θは樹脂の見かけの弾性係数を低減し，負荷過程で生じる粘性変形を少なくして微小変形域での残留ひずみを減らす働きをする．また，各 Maxwell モデルの弾性部分には Hencky 超弾性構成則，粘性部分には応力のひずみ速度感度の抑制を目的として反応速度論型の非 Newton 粘性則を採用した．さらに，応力軟化・ひずみ硬化の表現と応力のひずみ速度感度の抑制を目的として緩和時間の時間発展則を導入した．時間発展則の右辺第二項と第三項がそれぞれ応力軟化とひずみ硬化の表現を担っており，それぞれ真ひずみ速度の累乗に依存することで，ひずみ速度が速いほど緩和時間の減少と回復が強まるようになっている．

3．カーブフィッティング

図-1 に示す実験データに対して，提案する材料構成則を用いたカーブフィッティングの結果を図-3 に示す．図中上側に示す大変形域を含む負荷・除荷挙動に対する結果を観察すると，どの変位速度水準についても応力軟化とひずみ硬化を表現しており，概ね良好な結果が得られていることがわかる．特

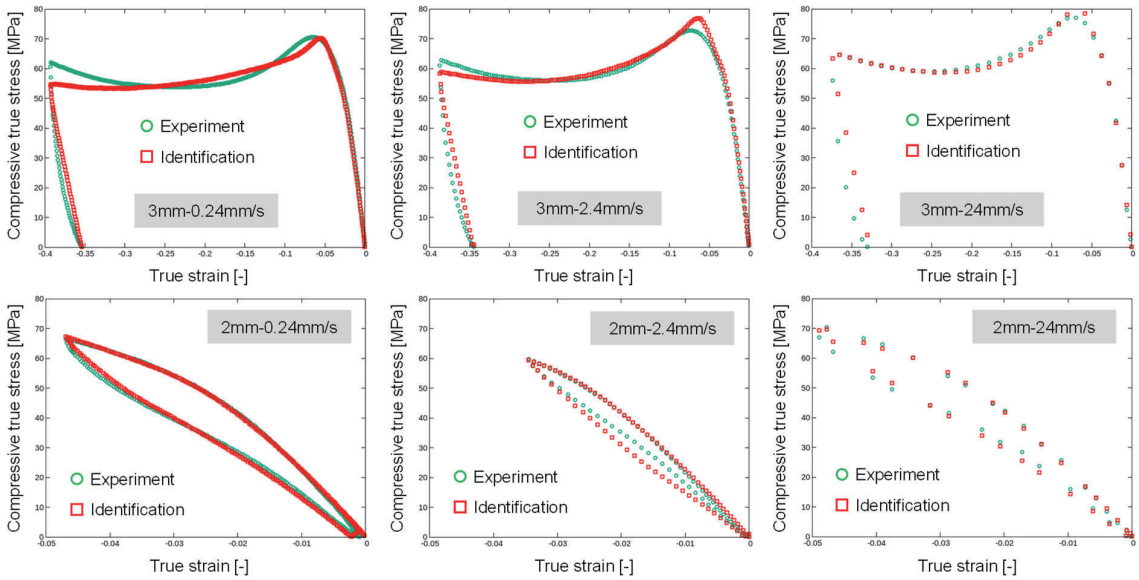


図-3 単軸圧縮試験データに対する材料構成則のカーブフィッティング結果

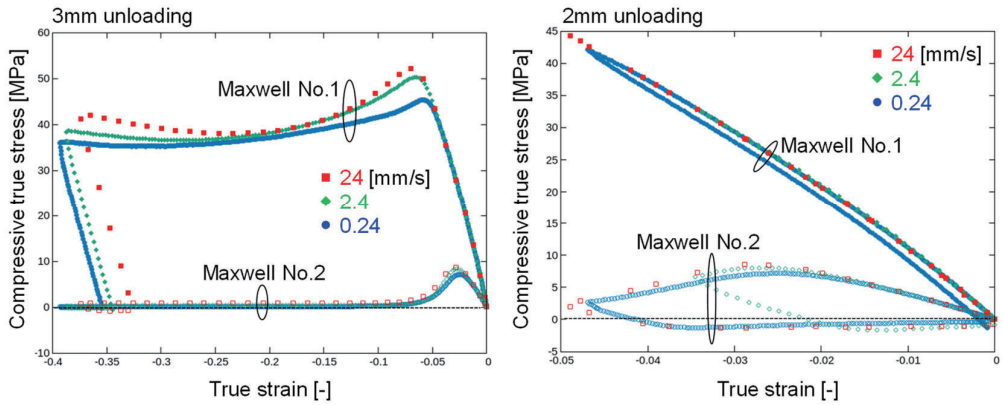


図-4 単軸圧縮試験において生じる各 Maxwell 要素の応力

に，本研究で提案する材料構成則は粘弾性モデルであるものの，この変形帯で生じる大きな残留変形を正しく表現できている．また，図中下側に示す応力軟化寸前を起点とする負荷・除荷挙動について，除荷過程途中での変曲点が存在する応力軌跡を含めて良好に再現できていることがわかる．つまり，本研究で提案する材料構成則は幅広い変形帯における負荷・除荷挙動を表現可能である．

図-3 の結果に対応する材料構成則の各 Maxwell 要素で生じる真応力と真ひずみの関係を図-4 に示す．左図では，1 番目の Maxwell 要素が応力軟化やひずみ硬化の表現を担っているが，2 番目の Maxwell 要素は応力軟化直前でほぼ完全に緩和して機能していない．一方，右図では，1 番目の Maxwell 要素はほぼ弾性的に振る舞うが，2 番目の Maxwell 要素は変形とともに徐々に緩和している．このように，応力軟化前後で変化する樹脂の負荷・除荷挙動について，各 Maxwell 要素が明確に役割分担をできていることがわかる．

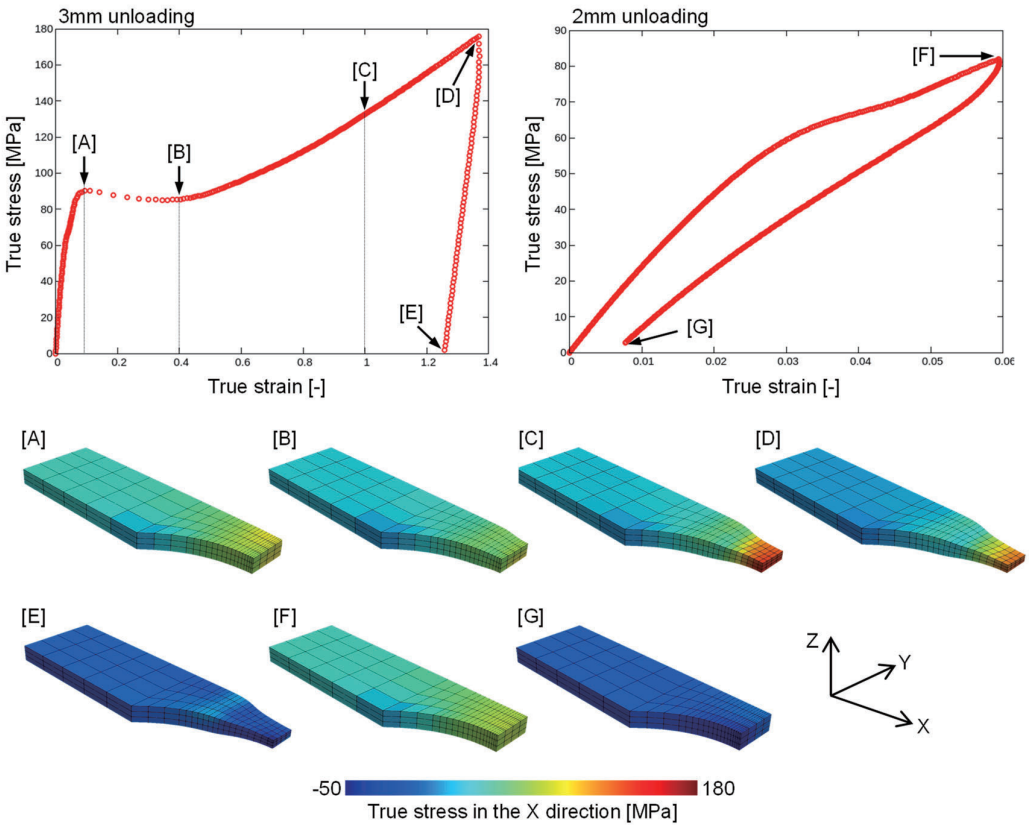


図-5 引張試験片の中心部における真応力・真ひずみ関係と各変形帯における試験片のX方向垂直応力分布と変形形状

4. 引張試験を模擬する有限要素解析

大変形域および応力軟化直前を起点とする負荷・除荷試験を模擬する有限要素解析の結果を図-5 に示す．左上の真応力・真ひずみ関係より，試験片の引張においても応力軟化とひずみ硬化を含む塑性的な力学挙動を表現できていることがわかる．また，右上の真応力・真ひずみ関係より，負荷過程における応力推移は若干，正しくないが，途中で変曲点のある粘弾性的な除荷挙動は表現できていることがわかる．各試験片の変形と応力分布をみると，応力軟化が生じる[A]から[B]への過程で試験片にネッキングが生じ，ひずみ硬化が生じる大変形領域（[C]，[D]）で中心部に変形と応力が集中することがわかる．そして，この変形は除荷が完了（[E]）しても残存する．一方で，応力軟化直前を起点とする場合では，除荷直前の段階（[F]）でも試験片は一様に変形するため，除荷の完了後（[G]）では，試験片の変形はほぼ回復している．

5. まとめ

本研究では，緩和特性の変形依存性を考慮した非線形粘弾性構成則を提案し，非晶性樹脂の幅広い変形帯における負荷・除荷挙動の表現に成功した．また，引張試験を模擬する有限要素解析を実施し，真応力・真ひずみ関係に整合する試験片の力学挙動を表現することに成功した．

岩盤−水−化学連成理論解析の構築と
膨潤性地山トンネルの設計・施工の合理化

Development of coupled rock-water-chemical theoretical analysis and rationalization of design and construction for tunnels in expansive bedrock

星　啓太郎　Keitaro　HOSHI

1．はじめに

膨潤性粘土鉱物を含む岩盤の膨潤現象によって既設トンネルの路盤が破壊する，あるいは，掘削中の新設トンネルにおいて施工の中断を余儀なくされるといった問題が随所に起きている．これらの問題は，高速道路の更新事業における既設トンネルの維持管理やリニア中央新幹線，北海道新幹線をはじめとする現在進行中の鉄道事業でのトンネル工事に多大な影響を及ぼす．特に鉄道トンネルでは底盤の僅かな変状が車両の脱線や事故に繋がるため，深刻な問題となっている．

このような現象は，鉱物結晶層間で生じる電気−化学現象と岩盤骨格で生じる内部構造劣化現象等が複雑に絡み合うことで発生するが，これらの現象を同時に評価する数理モデルは筆者らによる近年の研究が行われるまで提案されてこなかった．そのため，数値計算によって岩盤の膨潤挙動を予測することが困難であり，膨潤現象によるトンネル変状については経験的な対策方法に頼るしかないのが現状である．

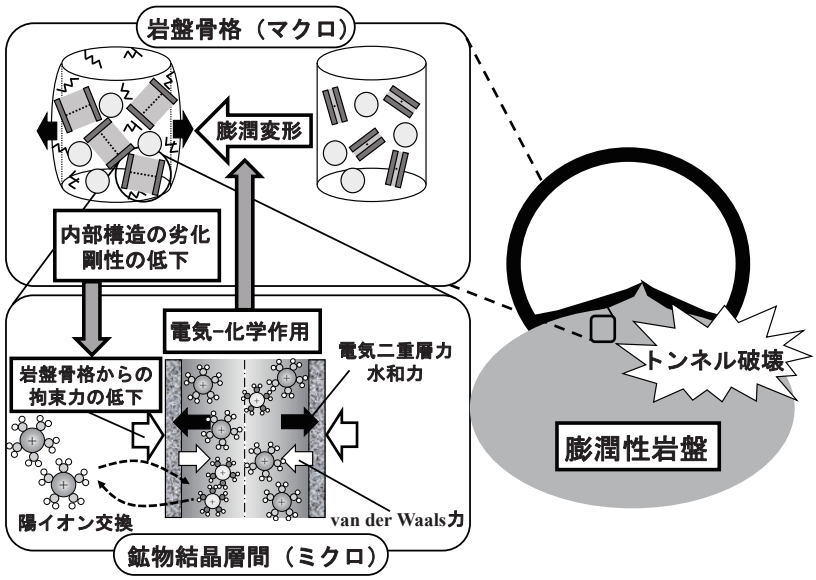


図 1 研究課題の概念図

このような工学的課題を解決するため，我々は粘土鉱物結晶層間の電気−化学−力学作用の力のつり合いとセメンテーションとその劣化を考慮した Cam-clay model を融合することで，膨潤性岩盤の力学モデル(Hoshi et al., 2022）を開発し，そのモデルの高度化に取り組んできた(Hoshi et al., 2024; 2025)．この研究

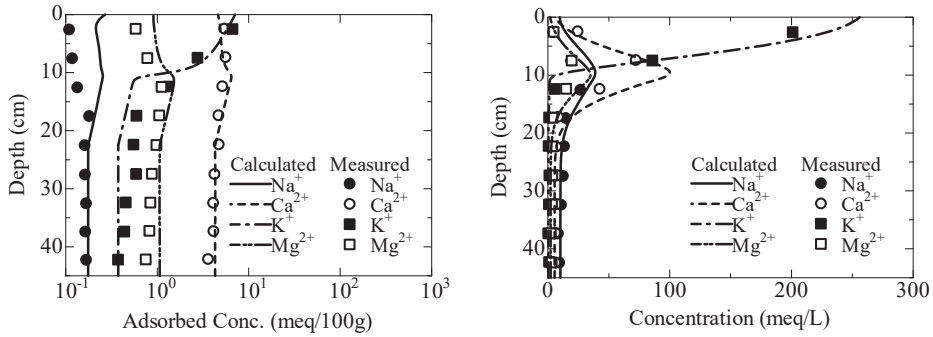
過程の中で鉱物結晶層間に存在する陽イオン種が膨潤特性に与えるメカニズムを数理モデル的考察から明らかにした．一方で，粘土鉱物結晶層間に存在する陽イオンは間隙水の化学組成に応じて容易に交換されるという性質を持つため，膨潤性地盤の力学挙動を予測する上では交換反応の影響が無視できない．そこで地盤の変形と地下水流の追跡に加えてイオン交換反応を考慮可能な連成解析手法を開発することが重要である．また，イオン種によっては，膨潤性が著しく低下するため，地盤内でのイオン交換現象と膨潤性の変化に着目することで，従来では全く行われてこなかった化学的な膨潤対策手法を提案できる可能性を秘めている．

2．研究手法

Hoshi et al.(2026b)では，地盤の変形と間隙水圧，間隙水中のイオン濃度の時間発展を解く水理-力学-化学連成解析手法を提案した．この手法では，二相混合体理論に基づく水理-力学連成手法である ***u–p*** formulation と地盤内の化学物質移動を解く移流分散方程式を連成する．一方，地下水環境は一般に Na^+, Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+}などを含む多成分系であり，導入部で述べたようなイオン交換反応が生じる．そこで本研究では，移流分散方程式をイオン交換反応を伴う多成分陽イオン輸送を考慮した方程式に拡張することで化学反応を考慮可能な新たな連成手法を提案する．具体的には，移流分散方程式の濃度発生項としてイオン交換による化学反応項を導入し，質量作用の法則と電気的中立条件を連立方程式として解くことで，陽イオンの化学平衡状態を決定する．なお，境界値問題の解法としては有限要素法を用いる．

3．研究成果

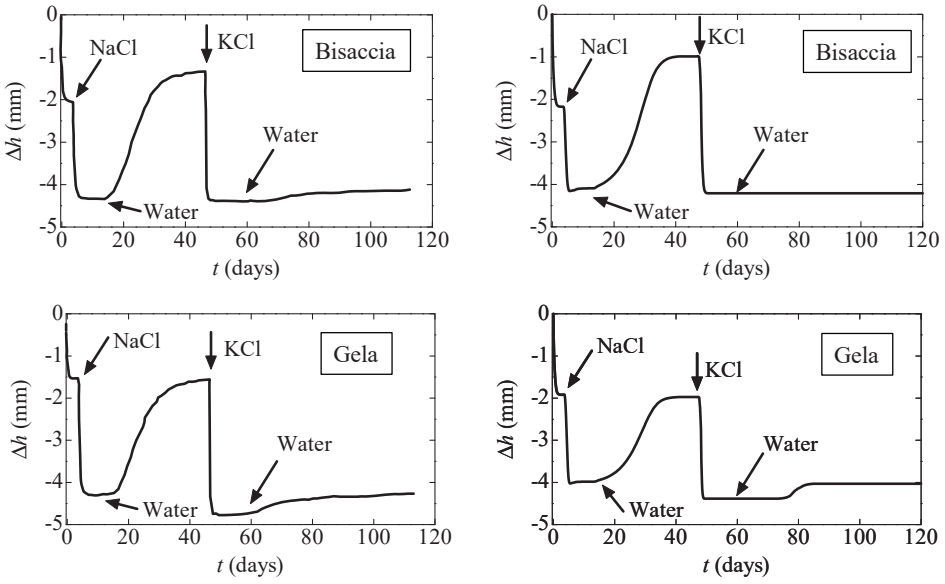
本研究で構築した連成手法の妥当性の検証は広城ら(1997)が行った多成分陽イオン輸送実験の結果とDi Maio and Fenelli(1997)が行った膨潤性土の繰り返し浸透圧密･膨潤実験との比較によって行う．まず，図 2 に多成分陽イオン輸送実験の結果との比較を示す．広城ら(1997)は畑地から不攪乱状態で採取した花崗岩風化土壌を充填したカラムに対して高濃度の KCl 溶液を連続滴下させる室内試験を実施し，試験後のカラム内部における陽イオン濃度の空間分布を詳細に調べている．室内試験では，Na^+, Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+} の 4 種の陽イオンを対象としている．なお，図 2(a)には KCl 溶液滴下から 5 時間経過後のカラム内の粘土鉱物に吸着した陽イオンの空間分布，図 2(b)には間隙水中の陽イオンの空間分布を示している．計算結果は実験結果を精度良く再現しており，提案手法が多成分系における交換現象を伴う陽イオンの移流分散挙動をシミュレート可能であることが確認された．



(a)固相　　(b)液相

図 2 多成分陽イオン輸送実験との比較

続いて，イオン交換現象と変形の連成問題に対する本手法の妥当性を評価するために Di Maio and Fenelli(1997)が行った膨潤性土の繰り返し浸透圧密･膨潤実験との比較を行う．Di Maio and Fenelli(1997)では，地中海性由来の複数の活性粘土（Bisaccia 粘土と Gela 粘土）に対して，間隙水を蒸留水や NaCl 水溶液，KCl 水溶液に繰り返し置換することで浸透圧密や浸透膨潤を生じさせている．図 3(a)に Di Maio and Fenelli(1997)による実験結果，図 3(b)に計算結果を示す．横軸に実験開始後の経過日数，縦軸に供試体高さの変化量 Δh をプロットしている．本研究で構築した連成解析手法ならびに数理モデルは陽イオン交換を伴う浸透圧密･膨潤による体積ひずみの時間変化をうまく捉えていることが分かる．また，全ての粘土に共通する傾向として，KCl に置換後の鉛直変位が NaCl 交換後に生じる鉛直変位に比べて著しく小さいことが分かる．これは，同じ一価陽イオンであっても，K^+の水和半径が Na^+に比べて小さいことに加えて，粘土鉱物のシリカシート表面で特異吸着現象が生じることによって，拡散層の電荷が減少した結果，電気二重層斥力が著しく低下するためである（Hoshi et al., 2025）．このように本研究では地盤中の陽イオン交換および粘土の変質による膨潤性の変化を記述可能な数値シミュレータを開発することに成功した．なお，紙面の都合上，本誌では詳細な説明は省略するが，特徴的な繰り返し浸透圧密･膨潤挙動（Bisaccia 粘土において浸透膨潤時の膨張量が浸透圧密時に生じた圧縮量を上回る，浸透圧密･膨潤プロセスを経て，浸透圧密終了時の供試体高さが減少していく等）が土骨格の弾塑性，結晶層間の電気化学的現象，イオン濃度の移流分散，陽イオン交換反応という現象の相互作用の結果として生じることが明らかになった．このような力学挙動に関する知見は，高レベル放射性廃棄物の地層処分など，膨潤性地盤を対象とする他の研究課題へも広く波及することが期待される．



(a)実験　　(b)計算

図 3 膨潤性土の繰り返し浸透圧密･膨潤実験との比較

4．まとめ

本研究では，混合体理論に基づく水理–力学連成解析手法である ***u–p*** formulation と地盤中の化学物質の輸送を記述する移流分散方程式に多成分陽イオン交換反応を導入することで，新たな水理–力学–化学連成解析手法を提案した．また，粘土鉱物の結晶層間で生じる電気–化学–力学現象を考慮可能な高度な弾塑性構成則を導入することで膨潤性土の浸透圧密・膨潤シミュレーションを行った．シミュレーション結果は浸透圧密・膨潤実験において生じる膨潤性粘土の特徴的挙動を捉えており，提案手法の妥当性が示された．

一方で，本研究手法を実際の膨潤性トンネルの設計・施工へと展開するためには，現場の計測データに基づいて数理モデルのパラメータや境界条件を合理的に同定する手法の確立が不可欠であり，これが今後の重要な検討課題である．また，最終的には従来経験に頼らざるを得なかった膨潤現象に対し，革新的な化学的膨潤対策手法を確立し，次世代の広域交通インフラの安全性および維持管理性の向上に貢献することを目指したい．

参考文献

1) Hoshi, K., Yamada, S., Kyoya, T., (2022). Finite element analysis of expansive bedrock considering electro-chemo-mechanical coupling phenomena in crystal layers of clay minerals and internal structural degradation. Rock Mech. Rock Eng. 55, 7387–7407. https://doi.org/10.1007/s00603-022-02997-3

2) Hoshi, K., Yamada, S., Abe, Y., Kyoya, T., 2024. Construction of a multiphysics model for swelling bedrock based on a novel deformation gradient decomposition method. Comput. Geotech. 176, 106736. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106736

3) Hoshi, K., Yamada, S., Kyoya, T., 2025. Multiphysics model of swelling geomaterials based on Stern theory: Describing different swelling behaviors depending on exchangeable cation species. J. Rock. Mech. Geotech. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.01.022

4) Hoshi, K., Yamada, S., Abe, Y., Kyoya, T., 2026a. Tunnel excavation and swelling analysis of expansive bedrock with multiphysics elasto-plastic model capable of describing different swelling behavior due to exchangeable cation species. J. Rock. Mech. Geotech. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2026.107956

5) Hoshi, K., Yamada, S., Abe, Y., 2026b. A coupled hydro-mechanical-chemical simulation of osmotic consolidation and swelling in expansive soils. Comput. Geotech. 196, 108195. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2026.108195

6) 広城吉成, 神野健二, 籾井和朗, 横山拓史, 和田信一郎, 1997. 陽イオン交換容量の空間分布を考慮した不撹乱土壌中の陽イオン輸送解析. 土木学会論文集 579/II-41, 15–27. https://doi.org/10.2208/jscej.1997.579_15

7) Di Maio, C., Fenelli, G.B., 1997. Influenza delle interazioni chimico-fisiche sulla deformabilità di alcuni terreni argillosi, Riv. Ital. Geotec. 31(1), 43–59.

3D プリンティング技術を用いた
土木構造物生産を見据えた構造最適化法の開発

Development of Structural Optimization Methods for the Production of Civil Engineering Structures Using 3D Printing Technology

韓　霽珂　Jike HAN

1．はじめに

少子高齢化の進行に伴い，建設業における新規就業者の減少と既存就業者の高齢化が深刻化しており，生産性向上に向けた DX 化の推進は喫緊の課題となっている．さらに，持続可能な社会の実現に向けては，限られた資源の効率的活用が不可欠であり，建設分野においても GX 化への対応が強く求められている．こうした背景のもと，これらの課題を同時に解決し得る新たな技術として，3D プリンティングによる土木構造物の生産が国内外で注目を集めており，橋梁部材や擁壁などの試験的な製作事例が報告されている．しかしながら，従来工法による構造物と比較すると，その形状や構造は依然として単純なものにとどまっており，設計自由度を十分に活かしきれていないのが現状である．この主因の一つは，土木構造物の生産を見据えた 3D プリンティングのための構造最適化法が未確立である点にある．加えて，その基盤となる AM（Additive Manufacturing）と最適設計の融合領域は比較的新しく，設計理論・材料モデル・製造制約の統合に関して多くの未解決課題が残されている．

そこで本研究構想では，3D プリンティング技術を前提とした土木構造物の生産（図 1）を見据え，実材料挙動を考慮可能な構造最適化法の構築を目的とする．特に，積層造形に特有の異方性や材料分布の自由度に着目し，実材料特性を反映したマルチマテリアルトポロジー最適化法の開発を目指す．これにより，製造プロセスと整合した合理的な構造設計が可能となり，設計から施工に至る一連のプロセスの高度化に寄与することが期待される．本報告書では，2025 年度に取り組んだ上記の構造設計技術の基盤となる以下の研究項目について述べる．

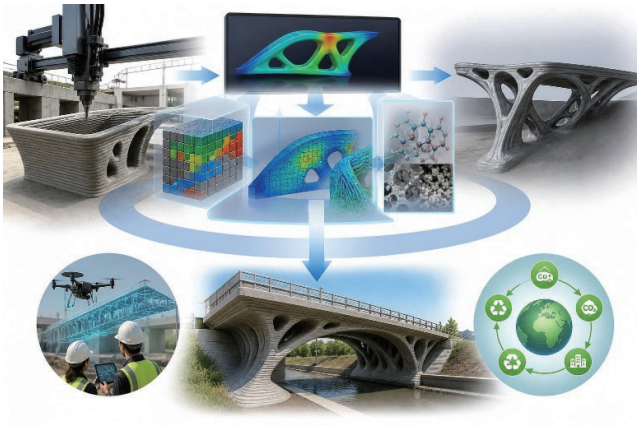


図 1 ：構造最適化法を内包した 3D プリンティング土木構造物の生産の概念図（GPT 作成）

２．実材料挙動を考慮可能な構造最適化法

従来の多くのトポロジー最適化に関する研究では，材料を線形弾性体として扱ってきたため，塑性変形や損傷といった実材料特有の非線形挙動を適切に評価することができなかった．その結果，最適化により得られた構造は局所的な応力集中を生じやすく，安全性の担保には実験と再設計を繰り返す必要があった．本研究では，コンクリート，ゴム，金属といった建設材料の非線形挙動を最適化計算に直接組み込むことに成功した．以下に，公開された論文の要旨をまとめる．

1) Han J., Matsubara S., Kondoh T., Izui K., Nishiwaki S., “A general formulation of topology optimization for nonlinear materials incorporating internal variables by the continuous adjoint method”, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 445, 118164, 2025. 10.1016/j.cma.2025.118164

本研究では，内部変数により非線形材料挙動（塑性・損傷）を記述する一般的な構成則をトポロジー最適化に統合し，連続随伴法に基づいて設計感度を厳密に導出した．これにより，従来困難であった履歴依存性を有する問題に対しても一般性のある最適化が可能となる枠組みを構築した．数値例として，順問題型および逆問題型の随伴定式化の比較（図２）を通じて，本手法の計算効率と汎用性を明らかにした．

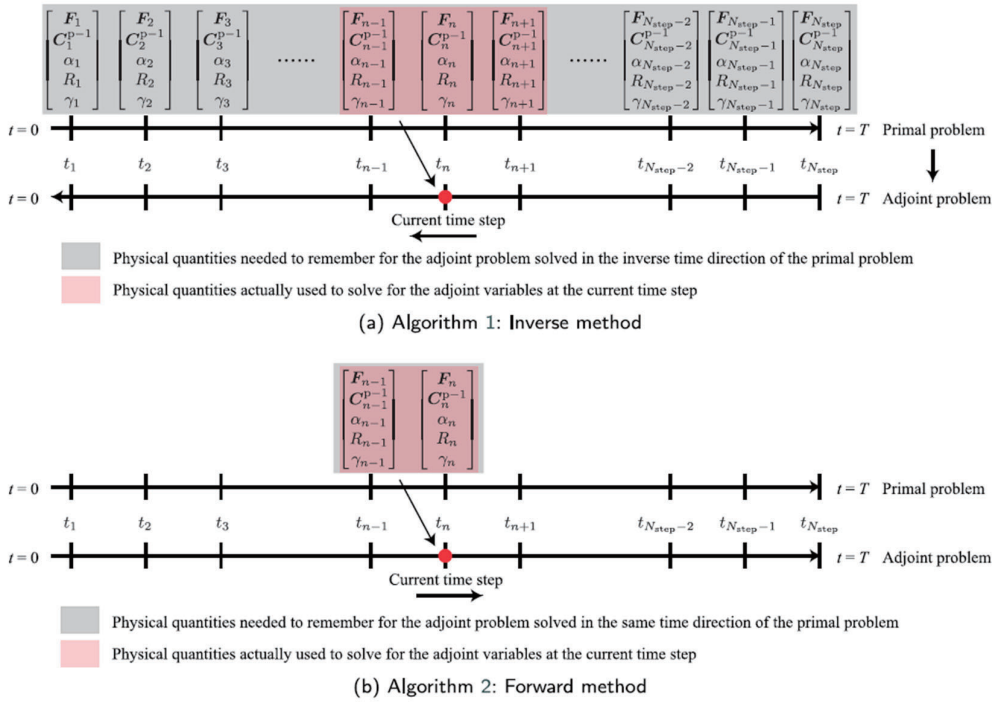


図２：順問題型および逆問題型の随伴定式化の比較

2) Han J., Sun Z., Luo Y., Nishiwaki S., “Material interpolation in finite strain topology optimization: A comprehensive assessment and a generalized energy-strain-combined interpolation scheme”, *Struct. Multidisc. Optim.*, 69, 122, 2026. 10.1007/s00158-026-04332-8

本論文は，有限変形トポロジー最適化における材料補間手法を体系的に比較（表１）し，実材料のような非線形挙動を扱うための物理的に一貫した定式化を明らかにしたものである．小変形では

既存手法は等価である一方，有限変形や非線形材料を考慮すると，従来のパラメータ補間はボイドに非物理な応答を与え，応力評価や最適化結果の信頼性を損なうことを示す．これに対し，エネルギー密度とひずみを同時に補間する枠組みを導入することで，塑性や損傷を含む実材料挙動を自然に組み込める一般的な最適化手法を提案している．

表１：材料補間手法の比較（詳細は文献を参照されたい）

	Section 3.2.1	Section 3.2.2	Section 3.2.3	Section 3.2.4	Section 3.2.5
Interpolation	Parameter	Energy	Strain	Parameter and Strain	Energy and Strain
Active void stress	$\boldsymbol{P}$ 2nd para.	$\boldsymbol{P}_{\mathrm{v}}$ 2nd para.	$\boldsymbol{P}_{\mathrm{v}}$ 2nd para.	$\boldsymbol{P}_{\mathrm{v}}$ 2nd para.	$\boldsymbol{P}_{\mathrm{v}}$ 2nd para.
Active void strain	$\boldsymbol{F}$ 2nd para.	$\boldsymbol{F}$ and $\boldsymbol{\varepsilon}$ 4th para.	$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathcal{Q}}$ 2nd/3rd para.	$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathcal{Q}}$ 2nd para.	$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathcal{Q}}$ 2nd para.
Multi. mat. models	× 2nd para.	✓ 3rd para.	✓ 2nd para.	△ 4th para.	✓ 2nd para.
Multi. param. sets	× 2nd/5th para.	✓ 3rd para.	✓ 2nd para.	× 4th para.	✓ 2nd para.
Void sensitivity	Large/nonlinear 3rd/5th para.	Linear 3rd para.	Linear 2nd/5th para.	Linear/nonlinear 2nd/4th para.	Linear 3rd para.
Small deform. TO	△ 4th para.	✓ 4th para.	✓ or △ 4th para.	✓ 3rd para.	✓ 4th para.
Large deform. TO	× 4th para.	× 4th para.	× 4th/5th para.	✓ 3rd para.	✓ 4th para.

"X-st para." indicates the paragraph in which the corresponding discussion appears in each subsubsection. Also, "Small deform." and "Large deform." present the amounts of prescribed displacement loadings

３．マルチマテリアルトポロジー最適化法の開発

性質の大きく異なる複数材料を統一的に扱うことが可能なトポロジー最適化法の研究を行った．従来のマルチマテリアル最適化では，材料補間の制約から類似した材料系に適用が限定されていた．これに対し本研究では，材料係数の補間ではなく，材料挙動を規定するエネルギー密度関数の直接補間を導入することで，コンクリート，金属，ゴムといった異種材料を同一枠組みで取り扱うことを可能とした．以下に，公開された論文と投稿中の原稿の要旨をまとめる．

3) Han J., Izui K., Nishiwaki S., "Extended discrete material optimization: a generalized framework for multi-material topology optimization of nonlinear material constitutive models", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 451, 118682, 2026. 10.1016/j.cma.2025.118682

従来のパラメータ補間に基づく既存手法では，ボイドに対しても非物理な材料特性を仮定する必要があり，最適化結果が任意の設定に依存するという本質的な限界がある．本研究では，こうした制約を克服するために，材料の構成則そのものを扱う一般的な枠組みを導入し，非線形・非可逆挙動を含む実材料を直接最適化に組み込むことで，より物理的に妥当で信頼性の高い構造設計（図３）を可能とした．

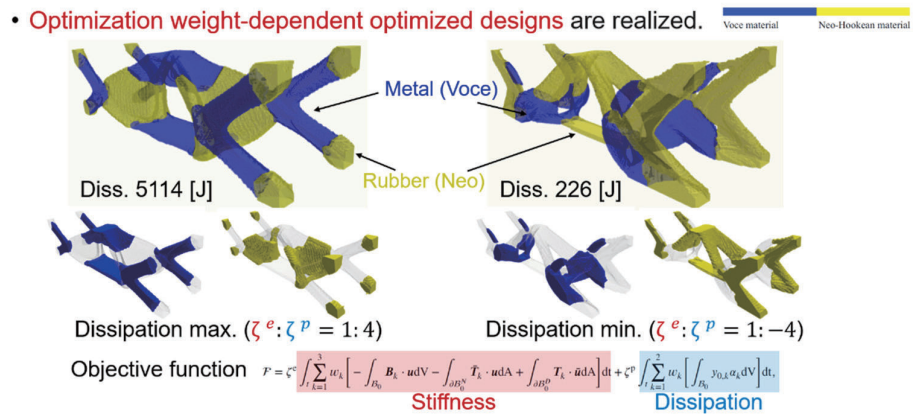


図３：ゴム材料と金属材料によるマルチマテリアルトポロジー最適化

4) Sun Z., Han J., Nishiwaki S., Luo Y., “Multi-material topology optimization for nonlinear heat conduction with temperature-dependent properties”, *Preprint.*

5) Sun Z., Han J., Nishiwaki S., Luo Y., “Multi-material topology optimization of strongly coupled nonlinear thermoelasticity considering temperature-dependent material properties”, *Preprint.*

本研究では，従来困難であった温度依存材料特性（熱伝導率や熱膨張係数など）を明示的に取り込み，さらに変形が熱伝導経路に影響を与える強連成熱弾性問題として最適化を定式化した．そのうえで，材料係数ではなくエネルギー密度関数を直接補間する手法を導入することで，異種材料間でも熱特性を含めた一貫した取り扱いを可能とした．特に，変形依存の有効熱伝導率を導入することで，構造変形に伴う熱伝導の異方化や経路変化を再現し，温度場と応力場の双方向連成を適切に評価できる枠組み（図４）を実現している．

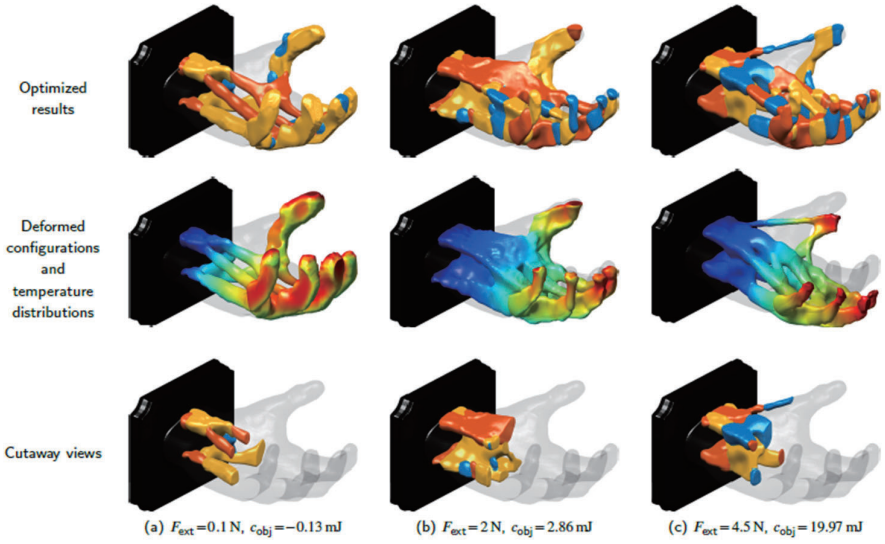


図４：熱機械連成問題に対するマルチマテリアルトポロジー最適化

4．まとめと今後の展望

本研究により，非線形材料挙動を考慮したマルチマテリアルトポロジー最適化の基盤は構築されたが，実際の AM による土木構造物生産を見据えると，さらなる課題として製造プロセスとの整合が挙げられる．特に，積層方向に依存する異方性やサポート材の必要性，オーバーハング制約といった造形ガイドラインを最適化問題に組み込むことが不可欠である．加えて，積層過程で生じる温度勾配に起因した残留応力や変形は，最終的な構造性能に大きな影響を及ぼすため，これらを予測・制御可能な数値モデルの導入が求められる．今後は，これらの製造起因の物理現象を最適化の制約条件あるいは目的関数として統合することで，設計段階から施工後の性能までを一貫して保証できる構造最適化法の確立を目指す．これにより，3D プリンティング技術の設計自由度を最大限に活かした，合理的かつ実装可能な土木構造物の創成が期待される．

一般財団法人　建設工学研究振興会

年　　報

令和 8 年 7 月 31 日　発　行

編集兼　一般財団法人
発行人　　建 設 工 学 研 究 振 興 会

印刷所　　有限会社　明　　倫　　社

仙台市青葉区上愛子平治１番 36
電　話　　796－８８７１

発　行　所

一般財団法人　　建 設 工 学 研 究 振 興 会
仙台市青葉区荒巻字青葉６番６号
（青葉山会館内　電話（227）４７１１）