

土木・建築構造物のレジリエンスを評価する構造解析技術

米澤 健次 穴吹 拓也
佐々木 智大 平田 寛

Structural Analysis Technology to Assess the Resilience of Civil Engineering and Building Structures

Kenji Yonezawa Takuya Anabuki
Tomohiro Sasaki Hiroshi Hirata

Abstract

To enhance resilience against severe disasters, accurate evaluation of the damage and integrity of civil engineering and building structures affected by disasters and acquisition of data for immediate recovery are important. An accurate structural analysis technology is essential for this purpose. This paper introduces the efforts of the Obayashi Corporation to advance structural analysis technology, focusing on reinforced concrete (RC), steel, and geotechnical structures. For RC structures, an evaluation method for crack behavior using the finite element method is discussed. For geotechnical structures, the advancement in constitutive models for soil, including liquefaction, and artificial intelligence-related identification techniques for material parameters are addressed. For steel structures, the improvement in analysis accuracy with respect to the behavior under cyclic loading is discussed.

概要

激甚災害に対するレジリエンスを向上させ、持続可能な社会を構築するためには、被災した土木・建築構造物の損傷や健全性を精度よく評価でき、即時の復旧に資するデータを得ることが重要である。その有力なツールとして、精度の高い構造解析技術が不可欠となる。RC構造、鉄骨構造および地盤を対象として、土木・建築構造物のレジリエンスを精度よく評価することを目的とした構造解析技術の高度化に関する大林組の取り組みを紹介する。RC構造の解析技術としては、FEMによるひび割れ幅や長さの評価手法について、地盤の解析技術としては、液状化現象を含めた地盤材料構成則の高度化およびAI関連技術による解析変数の同定技術について述べる。また、鉄骨構造の解析技術としては、繰返し荷重下の挙動および座屈を伴う破壊現象に対する解析精度の高度化について述べる。

1. はじめに

2024年能登半島地震や2018年西日本豪雨における大規模災害など、大地震、豪雨による激甚災害が近年多発しており、防災・減災に対する関心が高まっている。いかなる災害が発生しても被害を最小限とし、迅速に復旧できる強さとしなやかさを備えた国土・地域・社会を構築するため、防災・減災等に資する国家レジリエンスの強化に関する取り組みが活発に行われている。

レジリエンスを向上させ、持続可能な社会を構築するためには、被災した土木・建築構造物の損傷や健全性を精度よく評価でき、即時の復旧に資するデータを得ることが重要である。その有力なツールとして、精度の高い構造解析技術が不可欠となる。

大林組は、コンクリート系構造物を対象として、独自の材料構成則を導入したFEM解析ソフト「FINAL[®]」¹⁾を開発し、1985年から現在に至るまで継続的にその解析精度の向上と適用範囲の拡大に取り組み、今では広く実務

に活用されている。また、近年では、構造物の形状を忠実に再現した詳細なモデルによる非線形解析のニーズに応え、FINALを基に、演算速度を飛躍的に高速化して大規模解析を可能にした「FINAL-GEO[®]」²⁾を開発した。また、FINAL-GEOには液状化地盤を含む地盤の非線形挙動を対象とした解析機能を追加するとともに、地盤材料構成則を充実させてきた。

これらの取り組みにより、FINAL-GEOでは、地盤及び構造物全体を詳細に再現した大規模モデルによる連成解析が可能となった。FINALおよびFINAL-GEOの解析精度は、数多くの静的載荷実験、振動台実験および遠心模型実験との比較を通して検証されている^(例えば3)~5)。また、FINALおよびFINAL-GEOを用いた解析に対して、土木学会の数値解析認証(技術評価第0023号)を取得するなど、特に地震やシビアアクシデント時における重要構造物の構造安全性の評価に多く用いられている^(例えば6)。

鉄骨構造物に対しては、金属材料のような主に延性材料分野で発展した汎用構造解析ソフト「Abaqus」⁷⁾を活

用し、ユーザーサブルーチンの機能を用いて、独自の材料構成則を導入し、鉄骨部材が破壊に至るまでの挙動の再現性を向上させている。

本報では、RC構造、地盤および鉄骨構造を対象として、土木・建築構造物のレジリエンスを精度よく評価することを目的とした構造解析技術の高度化に関する大林組の取組みを紹介する。

2. RC 構造解析技術の高度化

RC 造建物に対して地震力が作用すると、コンクリートのひび割れや鉄筋の降伏といった損傷が生じる可能性がある。建物の継続使用や補修・補強の可否を数値解析に基づき判断する際には、それらの損傷の発生範囲や進展状況を精度よく再現することが求められる。本章では FINAL による RC 構造のひび割れ性状に対する評価法の高度化に関する取組みについて紹介する。

2.1 コンクリートのひび割れ性状の評価

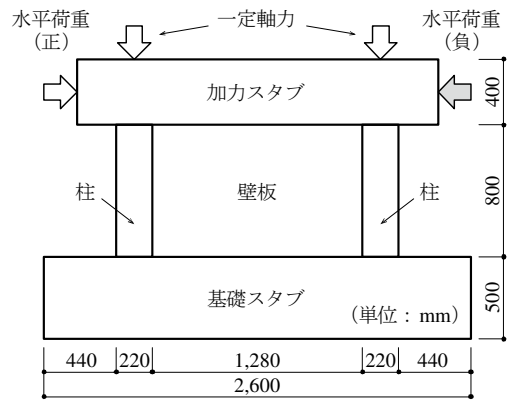
地震により生じるコンクリートのひび割れ幅は、地震後の RC 造建物の損傷程度を計る際にしばしば用いられる指標の一つである。例えば、原子力施設の RC 造建屋においては、地震後の機器支持機能、負圧維持機能、漏洩防止機能、遮蔽機能等の評価指標として用いられる⁸⁾。また、一般構造物においても、鋼材腐食に対する耐久性や水密性能への影響度から、補修・補強の可否を判定する指標として用いられる⁹⁾。即ち、数値シミュレーションによりひび割れ幅を定量化できれば、建物の持続的な使用に資するデータの一つとなる。

RC 構造の解析においては、ひび割れ位置が未知の場合にも適用しやすい分散ひび割れモデルが広く用いられる。分散ひび割れモデルは要素ごとの平均的なひび割れに基づきコンクリートのひび割れ発生を判定し、ひび割れが生じた場合にひび割れ直交方向の剛性低下を考慮するモデルである。このモデルは取扱いが比較的容易である反面、ひび割れの幅や長さを直接評価できない点が課題である。

そこで大林組では、分散ひび割れモデルを適用した非線形 FEM 解析で RC 構造のひび割れ進展状況やひび割れ幅を定量的に評価する手法の確立を目指している。

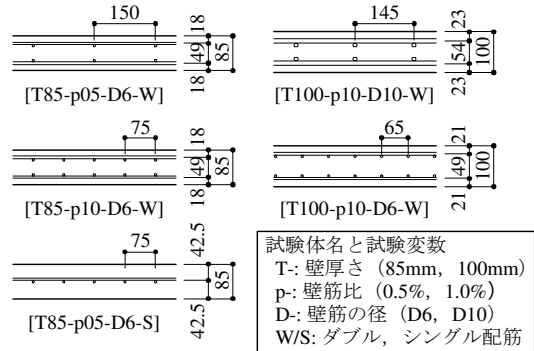
2.2 RC 造耐震壁の載荷実験によるひび割れの観察

RC 構造のひび割れ幅を定量的に評価できる解析手法の適用性を検証するためには、RC 部材に生じたひび割れを詳細に計測した実験データが必要である。そこで、5 体の RC 造両側柱付き耐震壁試験体を製作し、静的繰返し載荷を実施して、壁面全体に生じるひび割れの幅と長さを詳細に計測した。Fig. 1 に試験体緒元を、Photo 1 に試験体 T85-p10-D6-W の最終破壊状況を、Photo 2 にひび割れ幅の計測状況を示す。計測結果より、壁面のひび割れ幅やひび割れ間隔は壁筋比や壁筋の径の影響を受けることがわかった。更に、壁面のひび割れに関して二つの知



(a) 試験体形状

(コンクリート圧縮強度：31.6～34.8N/mm²，壁筋降伏応力：374N/mm²)



(b) 壁板断面

Fig. 1 試験体形状

Configuration of Specimens

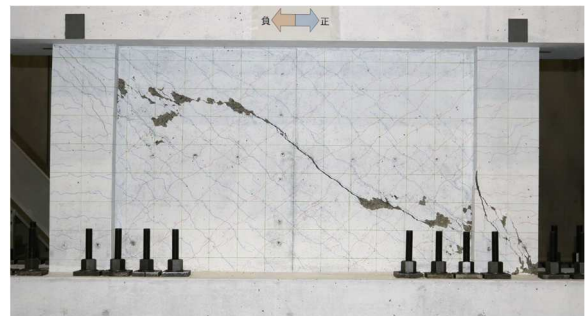


Photo 1 試験体T85-p10-D6-Wの最終破壊状況

Failure Mode of Specimen T85-p10-D6-W

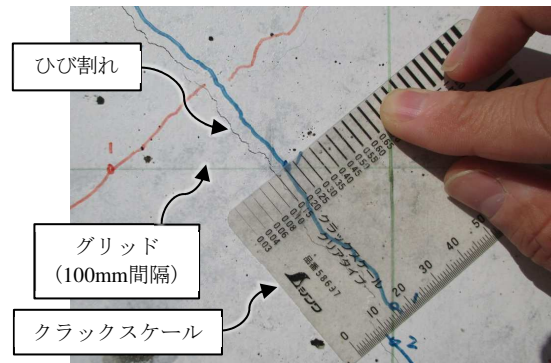


Photo 2 クラックスケールによるひび割れ幅の計測

Measuring of Crack Width Using Crack Scale

見が得られた。一つは、壁板のひび割れ面積（計測したひび割れ幅とひび割れ長さの積の総和）と耐震壁の変形角には正の相関があり、線形回帰式で表されると共に、その係数が配筋条件に依存しないことである。もう一つは、壁板の最大ひび割れ幅と耐震壁の変形角にも正の相関があるが、線形回帰式よりもべき乗回帰式の方がやや適合性が良く、その係数は配筋条件に依存することである。本実験の詳細は文献 10)を参照されたい。

2.3 ひび割れ進展指標による最大ひび割れ幅評価

2.2 節の実験を対象として、分散ひび割れモデルを適用した非線形 FEM 解析を実施した。Fig. 2 に解析モデルを示す。分散ひび割れモデルではひび割れ幅を直接評価することはできない。しかしながら、壁板部分の要素の垂直ひずみから壁の見付け面における壁板の面積増分を算定したところ、解析による壁板の面積増分は実験におけるひび割れ面積と良好に対応することがわかった。

この知見を三次元問題に拡張し、要素の垂直ひずみ増分からひび割れによる要素体積増分を評価し、配筋条件を考慮した係数を用いて、ひび割れの進展度合いを表す指標（ひび割れ進展指標 $Di(t)$ と称する。）の算定方法を定義した。また、ひび割れ進展指標を用いて、壁板の最大ひび割れ幅を推定する手法を提案した。

この手法では、解析者は判定基準とする最大ひび割れ幅 w_{cr0} 及び配筋条件に基づき、解析モデルの入力パラメータを定義する。解析により算定される $Di(t)$ が 1.0 に

達すると最大ひび割れ幅が w_{cr0} に達したと判定する。前述の解析モデルを用いた载荷実験シミュレーションで、ひび割れ進展指標 $Di(t)$ の適用性を検証した。Fig. 3 に $w_{cr0} = 0.2\text{mm}$ として得られた $Di(t)$ と実験における最大ひび割れ幅の比較を示す。 $Di(t)$ と実験結果は良好に対応し、 $Di(t)$ が 1.0 近傍において実験の最大ひび割れ幅が 0.2mm に達した。この結果より、 $Di(t)$ により最大ひび割れ幅の増大傾向を評価できることを確認できた。詳細は文献 11)を参照されたい。

2.4 疑似離散型ひび割れモデルの適用性検証

Sato らは分散ひび割れモデルを基に、RC 構造のひび割れ間隔やひび割れ幅を評価可能な、疑似離散型ひび割れモデルを提案した¹²⁾。このモデルでは、コンクリートと鉄筋の間に付着すべりが生じる区間（付着長さ）を仮定し、その区間内でひび割れによる応力再配分計算を繰り返す。この付着長さが複数の要素にわたると、ひび割れ発生要素が離散的に表れることになる。また、隣り合う要素間で連続するひび割れについては、ひび割れが連続するように、要素に生じたひび割れの重心位置を要素中心位置から移動させる。

Sato らの疑似離散型ひび割れモデルを FINAL に実装し、2.2 節の実験を対象とした非線形 FEM 解析を実施して、モデルの適用性を検証した。Fig. 4 に試験体 T85-p10-D6-W と解析によるひび割れ分布の比較を示す。解析結果のひび割れ線の色は疑似離散型ひび割れモデルにより

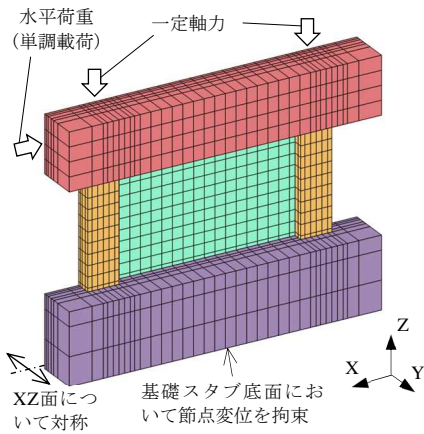
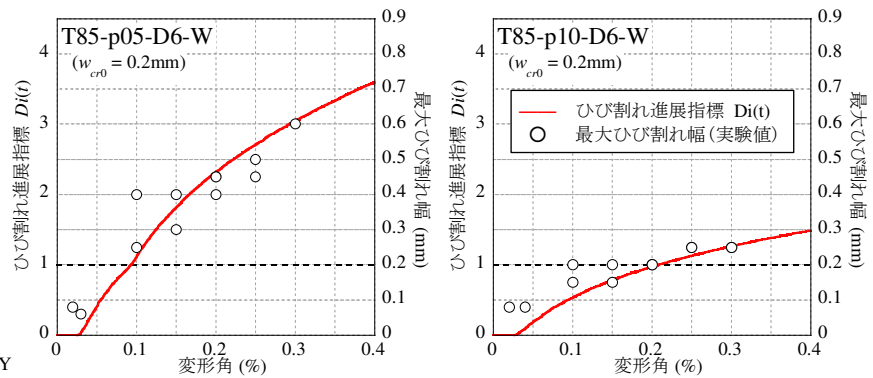
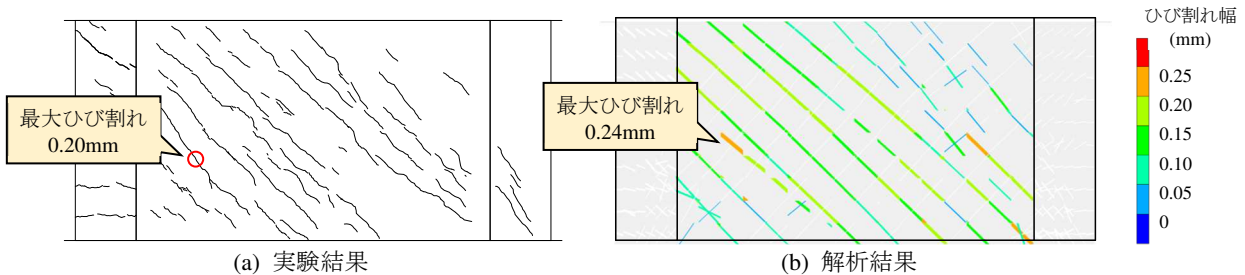


Fig. 2 解析モデル
Analytical Model



(a) 試験体T85-p05-D6-W (b) 試験体T85-p10-D6-W
Fig. 3 ひび割れ進展指標 $Di(t)$ による最大ひび割れ幅の評価
Maximum Crack Width Evaluated by Crack Propagation Index $Di(t)$



(a) 実験結果 (b) 解析結果
Fig. 4 疑似離散型ひび割れモデルによるひび割れ幅の評価（試験体T85-p10-D6-W，変形角0.2%）
Crack Width Evaluated by Discrete-Like Crack Model (Specimen T85-p10-D6-W, Drift Angle 0.2%)

得られたひび割れ幅の大きさを表している。図中に吹出しで示すように、壁板の最大ひび割れ幅の大きさや発生位置は、実験結果と解析結果で良く対応した。詳細は文献13)を参照されたい。

以上のように、従来は解析による評価が難しかったコンクリートのひび割れ幅について、ひび割れ進展指標を用いることで最大ひび割れ幅の増大傾向を評価可能とした。今後は耐震壁以外の部材にも適用対象を拡大したい。また、疑似離散型ひび割れモデルを導入し、RC造部材のひび割れ幅やひび割れ間隔を従来よりも詳細に再現できるようにした。今後はひび割れに関する実験データを蓄積し、ひび割れ幅の評価精度を更に向上させ、ひび割れ幅に基づく建物の機能・性能評価等に役立てたい。

3. 地盤解析技術の高度化

FINAL-GEOの地盤解析機能は、様々な地盤材料の複雑な非線形挙動に対応できる材料構成則と、土骨格・水・空気の動きを考慮した支配方程式に基づく有効応力解析で構成されている。本章では、これらの高度化に関する取組みを紹介する。

3.1 地盤材料構成則の高精度化

2011年東北地方太平洋沖地震以降、特に原子力発電所等のエネルギー関連分野において、より大きな設計用地震外力で設計することが求められるようになってきている。そのため、従来は液状化することがないとされてきた密な砂地盤も液状化すると判定され、液状化対策が求められるようになってきている。

密な砂地盤での液状化では、ある程度有効拘束圧が低下した後、載荷時にせん断剛性が回復し、除荷時に有効応力が低下することを繰り返し、偏差ひずみがある有限の値にとどまるサイクリックモビリティ現象が生じる。そのため、密な砂地盤は液状化が発生しても大きな変形は生じにくい。そのため、サイクリックモビリティ現象を適切に評価できれば、密な砂地盤での液状化対策を合理化できる可能性がある。

そこで、大林組では、このサイクリックモビリティ現象を適切に再現できる材料構成則の開発を進めている。

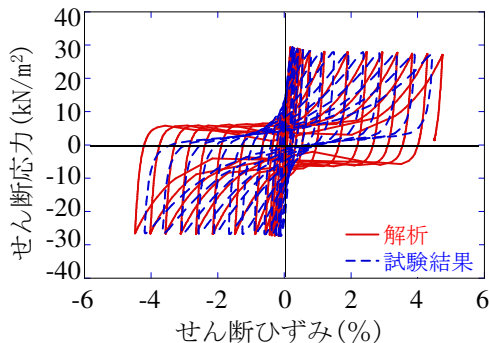


Fig. 5 中空ねじり試験の再現¹⁵⁾
Simulation of Twist Test

サイクリックモビリティ現象が生じている砂地盤では、有効圧-偏差応力平面においてバタフライ形の応力ループとS字形の偏差応力-ひずみ曲線が生じることが知られている。材料構成則には多数の既往研究があるが、その中でも修正Cam-clayモデルを降伏関数とし、回転硬化を考慮した下負荷面モデル^{14),15)}は、繰返し載荷に対する複雑な地盤挙動を適切に再現できるモデルとして知られており、FINAL-GEOにこのモデルを実装した。詳細は参考文献15)を参照されたい。

FINAL-GEOに実装した回転硬化修正Cam-clay下負荷面モデルを用いて相対密度85%の密に詰めた砂地盤を対象に実施した中空ねじり試験の結果の再現を試みた。拘束圧100kPa、応力比=0.284の条件で実施した中空ねじり試験の再現解析結果をFig. 5)に示す。サイクリックモビリティ現象特有の逆S字形のループを適切に再現できていることがわかる。

3.2 AI 関連技術による材料パラメータの同定

地盤材料特有の複雑な非線形挙動を適切に再現できるモデルの材料パラメータは非常に多くなる。これらの設定には、個々のパラメータが変形挙動に与える影響を把握することは当然であるが、複数のパラメータが相互に影響し合うことから、パラメータ同士の関係についても十分な理解が求められる。よって、高度な材料構成則を実務に適用する場合には、パラメータの合理的な設定方法が課題となっている。

各材料パラメータをランダムに設定して試算を実施し、材料試験結果から得られた液状化強度曲線を再現できるパラメータを探索(ランダム探索)した結果をFig. 6)に示す。12,755回と非常に多くの試算を実施したが、試験結果を適切に再現できる液状化強度曲線は得られなかった。すなわち、高度な材料構成則のパラメータ探索には極めて大きい試行回数が必要になると推測できる。

一方、近年のAI分野の発展も相まって、機械学習モデルの特性や学習アルゴリズムの挙動を制御する様々なパラメータを自動でチューニングする研究が盛んに行われ、特にベイズ最適化^{16),17)}が注目されている。

このベイズ最適化の手法を用いて、材料試験で得られた液状化強度曲線を再現できる材料パラメータを効率よ

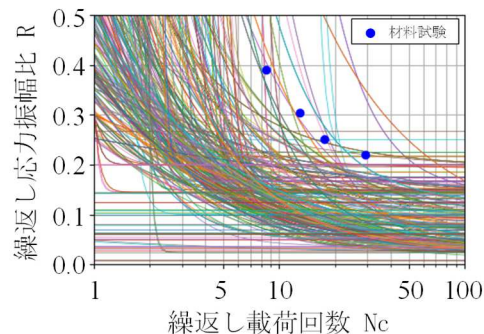


Fig. 6 ランダム探索の結果(液状化強度曲線, DA=5%)
Result of Random Search (Liquefaction Strength Curve, DA=5%)

く探索することを試みた。試行回数と液状化強度曲線の誤差の推移をFig. 7に示す。試行回数は合計12,050回であったが、2,000回付近まで頻りに最適解を更新した後、5,861回目の試行において誤差は最小値0.00784に達した。Fig. 8に誤差の小さい上位10ケースの液状化強度曲線を示す。いずれの曲線についても試験結果に比較的近い曲線になっており、適切にパラメータの同定ができていくことがわかる。今回はある1つの条件の液状化強度曲線に着目して同定を試みたが、バイズ最適化の手法は複数の目的関数を対象にした多目的最適化にも適用可能である。今後は、深層学習モデル・大規模言語モデルなどのAI技術も応用し、限られた地盤調査結果から、地盤材料特有の現象を適切に再現できる材料構成則のパラメータを同定する手法を確立することで、前節の高度な材料構成則の実務設計への活用を目指す。

3.3 不飽和地盤の有効応力解析

近年、降雨と地震、浸透流と地震が複合的に作用することによる盛土や河川堤防、ため池堤体等の被害が多発している。また、2024年1月に発生した能登半島地震では、のと里山海道において多数の盛土が大規模に崩落した。これらの崩落は、地山谷地形の浸透水の流入と関与が深いことが指摘されている¹⁸⁾。水の動きと地震の複合外力が作用する土構造物および周辺地盤の安全性評価では、不飽和土から飽和土に至る飽和度に応じた地震時、地震

後の地盤挙動を適切に評価する必要がある。

不飽和土の地震時挙動を適切に評価するためには、土骨格の変形と水の流れの連成を考えた従来の二相系有効応力解析手法に、間隙空気の影響を加えた解析が求められる。FINAL-GEOには、計算コストの面で有利な間隙水と間隙空気を混合流体として1つに扱う擬似三相系の手法を実装した。詳細は、文献19)を参照されたい。

Fig. 9に高田らが実施した浸透流を考慮したため池堤体の遠心場における振動台実験(以下、遠心振動実験²⁰⁾)に対する再現解析の結果を示す。湛水高さW.L.=3.0mのケースでは堤体が湛水側・侵出面側の両方向に、W.L.=2.0mのケースでは湛水側にすべり変形するモードとなり、実験結果をよく再現した。地震時のため池堤体の性能評価をする上で重要となる天端沈下量についても解析は実験結果をよく再現した。従来手法では解析できなかった不飽和土中の浸透流の影響を含む解析も、三相系の手法を取り入れたことで適切に再現できるようになった。今後、この不飽和土の解析技術を活用して、頻発する複合災害への対策技術の開発をすすめる予定である。

4. 鋼構造解析技術の高度化

鋼構造の非線形FEM解析においてはAbaqus⁷⁾が世界標準であり、大林組でも多数の鋼部材実験のシミュレーション解析を通し、その有効性を確認してきた。一方、

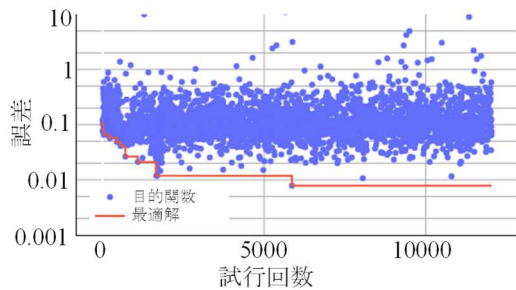


Fig. 7 試行回数と誤差の推移
Trials and Error

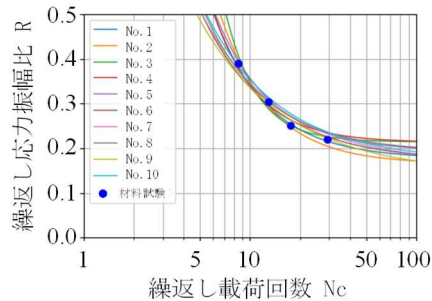


Fig. 8 誤差の小さい10ケースにおける液状化強度曲線
Liquefaction Strength Curves for Top 10 Cases with the Smallest Errors

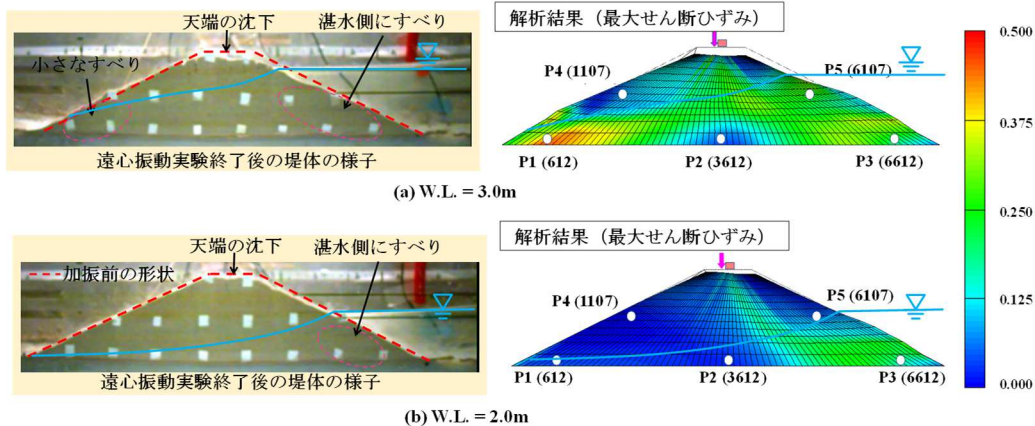


Fig. 9 遠心振動実験終了後の堤体の変形²⁰⁾と解析による最大せん断ひずみ分布図
Deformation of Dam after Centrifuge Shake Table Experiments and Analytical Result of the Maximum Shear Strain

Abaqusに実装されている鋼材モデル用の材料構成則（以下、混合硬化則）は、地震時を想定した繰返し载荷における部材耐力の低下を再現できない場合があることから、载荷履歴にかかわらず高精度な解析が可能な鋼材構成則の開発を進めている。本章では、混合硬化則を用いた解析例と解析上の課題を示し、それを解決するために開発した構成則の概要と解析例について紹介する。

4.1 混合硬化則を用いた解析例と解析上の課題

4.1.1 混合硬化則の概要 Abaqusに実装されている混合硬化則はChaboche等の非線形移動硬化則^{7),21)}に等方硬化則を組み合わせたもので、各硬化パラメータを適切に設定することで、鋼材の繰返し塑性変形によるひずみ硬化やパウシンガー効果等の鋼材の基本性状を再現できる。Fig. 10に混合硬化則を用いたシミュレーション解析例²²⁾を示す。Fig. 10に示す通り、漸増振幅繰返し载荷に対しては鋼部材（鉄骨梁）の局部座屈による破壊を解析で精度よく再現できることが確認できる。

4.1.2 混合硬化則の課題 鋼材の解析に混合硬化則を適用する場合の課題として、

- 1) 繰返し载荷において硬化程度のひずみ振幅依存性を考慮できないこと
- 2) 大きな塑性ひずみを与えた後に小さな塑性ひずみの繰返し载荷を与えると応力が減少していく現象（繰返し軟化）を再現できないことが指摘されている^{7),24),25)}。

1)の具体例として、一定ひずみの多数回繰返し振幅を与えた既往鋼材試験²⁶⁾と混合硬化則の比較をFig. 11に示す。混合硬化則は、0.5%程度の小さなひずみ振幅を繰返し与えた場合は、鋼材試験結果を全く再現できておらず、応力を過大評価することがわかる。

4.2 提案構成則の概要と解析例

4.2.1 提案構成則の概要 先述した課題を解決するために大林組では新潟大学と共同で、大野の記憶曲面²⁴⁾を改良し、Chaboche等の非線形移動硬化則と組み合わせた繰返し载荷下での鋼材の硬軟化挙動を再現可能な材料構成則（以下、提案構成則）を開発し、Abaqusに実装した²⁷⁾。

Fig. 12に漸減振幅繰返し载荷、ランダム载荷を与えた場合の提案構成則と鋼素材試験の応力-ひずみ関係の比較²⁷⁾を示す。Fig. 12の通り、提案構成則の応力-ひずみ関係は既往試験結果とよく整合している。その他の様々な条件でも同様に良く整合する結果が得られ、载荷履歴に関わらず、鋼素材の履歴特性を精度よく再現できることを確認した。これにより、様々な地震等の外力を受ける鋼部材の座屈現象に対して、高精度なシミュレーション解析が可能となった。

4.2.2 部材解析による検証 混合硬化則に対する提案構成則の優位性を確認するために、鋼部材実験のシミュレーション解析を実施した²⁸⁾。Fig. 13に解析モデルを

示す。解析対象は、塑性率2~3の一定変位振幅で数百サイクルまでの繰返し変形を与えた鉄骨梁の多数回繰返し载荷実験である。このうち、比較的小さな振幅（塑性率2）の繰返し载荷を与え、局部座屈により耐力が劣化した試験体AD-2を取り上げる。解析対象は部材種別がFDランクのストレート梁で、局部座屈により耐力が劣化した試験体である。解析モデルは、柱及びパネル部分を除いて梁部分のみをモデル化し、実験条件を模擬できるように面外拘束を与えた。Fig. 14にAD-2の解析結果として荷重-サイクル数関係と、15サイクル目（※結果の差異が顕著なサイクル）の荷重-変形関係を、実験結果と重ねて示す。なお、比較検討のため、混合硬化則を採用した部材解析をFig. 14(a)に示し、提案構成則を採用した解析をFig. 14(b)に示す。混合硬化則を採用した解析では、AD-2の梁の最大せん断力を過大評価している。これは、塑性ひずみの累積による硬化度合いを過剰に見積もったためである。これに対し、提案構成則を採用した解析では、梁の最大せん断力、荷重-変形関係ともに実験と良好に対応し、実験の挙動を精度よく再現できていることから、混合硬化則の課題が解決されたことが確認できた。

Fig. 15にAD-2の実験結果と提案構成則の解析結果について、载荷終了後の局部座屈形状を示す。提案構成則を採用した解析の座屈波形状は実験結果と概ね対応した。

以上より、様々な载荷履歴を受ける鋼部材の座屈性状を精度よく再現するために、提案構成則の導入が有効で

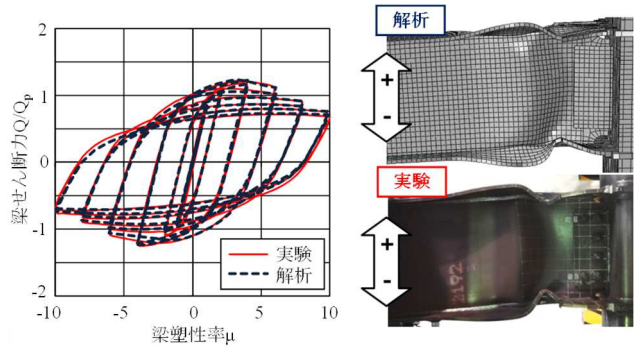


Fig. 10 混合硬化則を用いた解析例
Analysis Example Using Mixture Hardening Model

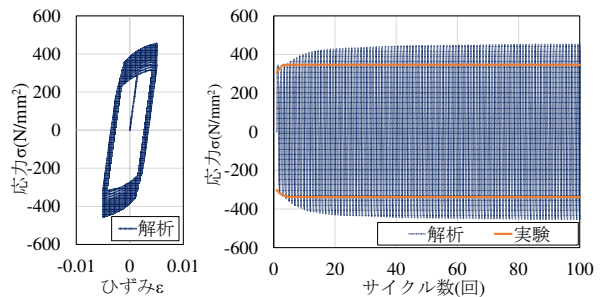


Fig. 11 混合硬化則の解析上の課題の例：
一定ひずみ振幅繰返しを受ける鋼材試験との比較
Example of Problems with Mixed Hardening Model

あることを確認できた。今後は、本技術を活用して、地震時に繰返し塑性変形を受ける鋼部材の耐震性能を適切に予測・再現することで、鋼構造物の安全性検証および合理的な設計に役立てたい。

5. まとめ

被災後の土木・建築構造物の損傷や健全性を精度良く評価でき、即時の復旧に資するデータを得ることができる構造解析技術の高度化に関する大林組の取組みを紹介した。本報の概要を以下にまとめる。

- 1) RC 構造に関しては、FEM 解析により求めたひび割れ進展指標により最大ひび割れ幅を評価する手法を示した。また、別法として、疑似離散型ひび割れモデルを導入して、ひび割れ間隔や幅を評価する方法を示した。

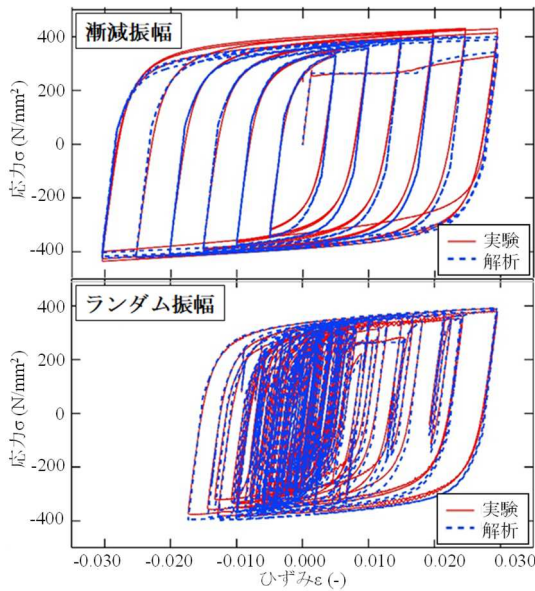


Fig. 12 提案構成則と鋼材試験の比較
Comparison of Proposed Steel Model and Steel Tests

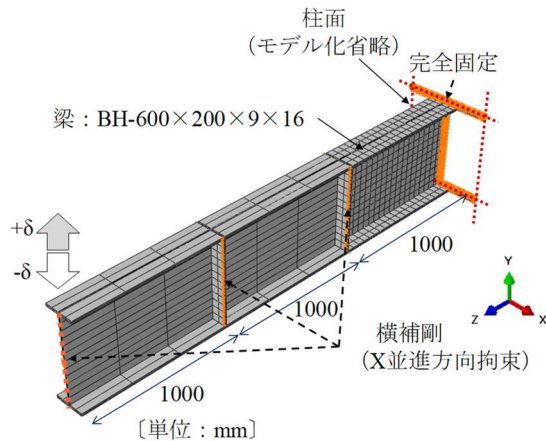


Fig. 13 試験体の解析モデル
Analytical Model of Test Specimen

- 2) 地盤に関しては、回転硬化を考慮した下負荷面モデルを FINAL-GEO に実装することで、不飽和から飽和地盤に対する液状化現象を含む土構造物の地震時挙動を高精度に再現できることを示した。また、AI 関連技術を活用して、地盤構成則のパラメータ同定を行うことで実用性を向上させる取組みを示した。
- 3) 鉄骨構造に関しては、載荷履歴にかかわらず高精度な解析が可能な鋼材構成則を提案し、Abaqus に実装した。このことで、様々な地震力を受ける鉄骨部材の破壊に至るまでの挙動を良好な精度で再現できることを示した。

引き続き、構造解析技術の向上に取り組み、さらなる高度化・高精度化を実現させ、構造物のレジリエンスの向上や、持続可能な社会の構築に貢献していきたい。

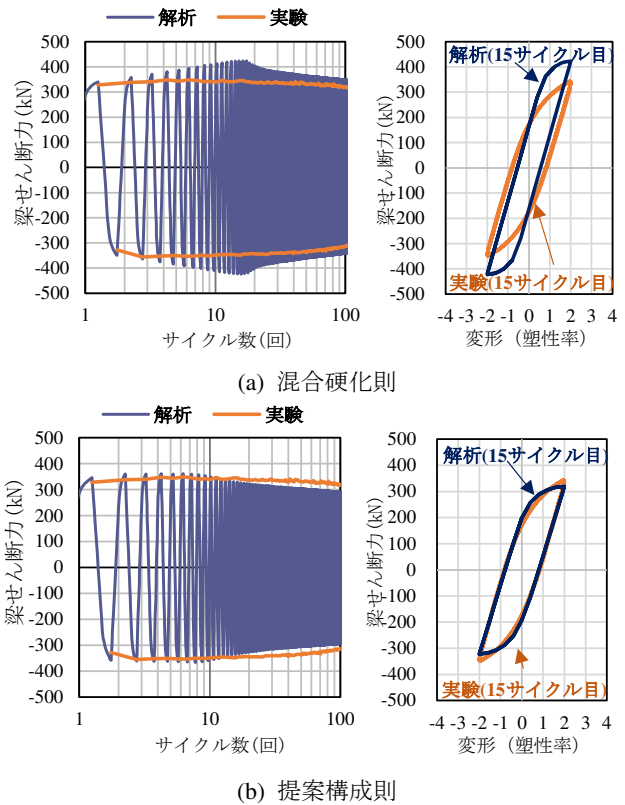
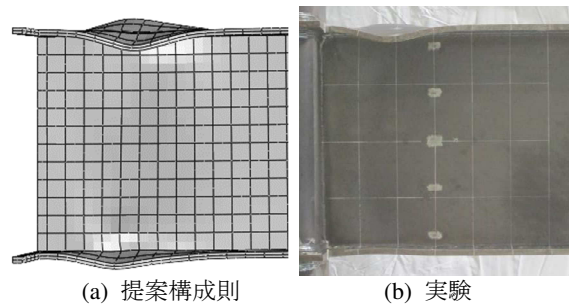


Fig. 14 部材解析結果 (提案構成則と混合硬化則との比較)
Load-Cycle Number Relationships



(a) 提案構成則 (b) 実験
Fig. 15 局部座屈形状の比較
Comparison of Local Buckling Shape

参考文献

- 1) Naganuma, K., et al.: Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Three-dimensional Finite Element Method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 586, 2004.8
- 2) 米澤健次, 他: 大規模・高速化非線形 FEM 解析ソフト「FINAL-GEO」, 大林組技術研究所報, No. 75, 2011.
- 3) 米澤健次, 他: 正負繰返し及び動的荷重を受ける RC 部材の 3 次元 FEM 解析の精度, 大林組技術研究所報, No. 72, 2008.
- 4) 米澤健次, 他: 大規模 FEM モデルによる RC6 層振動台実験に対する事前・事後解析, 大林組技術研究所報, No. 80, 2016.
- 5) 米澤健次, 他: 3 次元大自由度モデルによる地盤—構造物連成系の地震応答 FEM 解析, 大林組技術研究所報, No. 76, 2012.
- 6) 岩館礼, 他: 断層変位が作用する RC ボックスカルバートの影響評価手法確立に向けた取組み, 会誌「電力土木」, No. 418, pp. 9-16, 2022.3
- 7) Abaqus/Standard User's Manual Version 2020, 2020
- 8) 日本建築学会: 原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説, 2015
- 9) 日本コンクリート工学会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針 2022, 2022.6
- 10) 穴吹拓也, 他: 鉄筋コンクリート造耐震壁のひび割れの定量化手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 782 号, pp. 598-607, 2021.4
- 11) 穴吹拓也, 他: 非線形有限要素解析に基づく鉄筋コンクリート造耐震壁のひび割れ進展指標, 日本建築学会構造系論文集, 第 87 巻, 第 793 号, pp. 307-315, 2022.3
- 12) Sato, Y., et al.: Discrete-Like Crack Simulation of Reinforced Concrete Incorporated with Analytical Solution of Cyclic Bond Model, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 140, Issue 3, 2014.3
- 13) Mizukoshi, K., et al.: Applicability of Discrete-Like Crack Model to Box Culvert, 26th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Division III, Berlin/Potsdam, Germany, 2022.7
- 14) 橋口公一: 弾塑性論の新体系—下荷面の概念—, 土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 3, pp. 691-710, 2007.
- 15) Yamakawa, Y., et al.: Anisotropic Subgrading Surface Cam-clay Plasticity Model with Rotational Hardening: Deformation Gradient-based Formulation for Finite Strain, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech, 45(16), pp. 2321-2370, 2021.
- 16) 良川太河, 他: ベイズ最適化に基づく最適パラメータ探索法の研究動向と課題に関する一考察, 情報処理学会第84回全国大会, pp. 2-347-2-348, 2023.
- 17) Akiba, T., et al.: Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework, KDD'19: Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, pp. 2623-2631, 2019.
- 18) 森本励, 他: 能登半島地震による「のと里山海道(旧能登有料道路)」盛土崩壊とその地下水位推定—山岳・丘陵部道路盛土の地震時安定評価の簡便法提案—, 地盤工学ジャーナル, Vol. 12, No. 2, pp. 177-195, 2024.
- 19) 伊藤浩二, 他: 不飽和・飽和地盤の有効応力解析手法と地中構造物への適用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 78, No. 4 (地震工学論文集第 41 巻), pp. I_1-I_9, 2022
- 20) 高田祐希, 他: ため池堤体の浸透流を考慮した地震時挙動とその対策工の効果, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 76, No. 3, pp. 254-265, 2020.
- 21) Chaboche, J.L., et al.: Modelization of the strain memory effects on the cyclic hardening of 316 stainless steel, Trans. 5th SMiRT, Paper No. L11/3, 1979
- 22) 平田寛, 他: 薄肉ウェブをスチフナで補剛した水平ハンチ付梁の塑性変形能力, 大林組技術研究所報, No.79, 2015.
- 23) 藤本盛久, 他: 構造用鋼材の多軸応力状態における繰返し応力-ひずみ関係 繰返し力を受ける鋼構造溶接接合部の破壊挙動に関する研究-第1報, 日本建築学会構造系論文集, 第356号, pp.93-102, 1985.1
- 24) 大野信忠: 非硬化ひずみ領域を考慮した繰返し構成式, 日本機械学会論文集(A編), 48巻, 第434号, pp.1342-1350, 1982.10
- 25) 田中英一, 他: 比例および非比例繰返し負荷のもとで硬化/軟化挙動を記述できる粘塑性構成式の定式化, 日本機械学会論文集, 57巻, 543号, pp. 2767-2774, 1991.11
- 26) 笠井和彦, 他: 溶接を伴わない厚肉せん断パネルの弾塑性挙動と低サイクル疲労に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第586号, pp.195-202, 2014.12
- 27) Teranishi, M., et al.: Efficient stress integration algorithm of memory surface model with shrinking rule under plane stress field, Eng. Struct., Vol. 275, Part B, 115324, 2023.1
- 28) 平田寛, 他: 非硬化ひずみ領域モデルを用いた鉄骨梁復元力の多数回繰返し特性, 鋼構造年次論文集, 第28巻, pp.849-855, 2020.11