

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15073

研究課題名(和文)大規模構造物の地震応答解析の品質保証に適した弾塑性理論の再構築

研究課題名(英文) Reconstruction of elasto-plastic theory considering quality assurance of seismic response analysis of large-scale structures

研究代表者

本山 紘希 (Motoyama, Hiroki)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・講師

研究者番号：00732281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：原子力発電所のような大規模な重要構造物は、通常の構造物に比べて、高い信頼性での地震応答評価が必要である。そのため、詳細な有限要素法の適用が求められている。一方で、理論の不備により地震応答解析の品質保証が難点であった。上記の解決のため、初年度に新しい弾塑性理論の構築を行った。本理論は、材料に適した領域サイズを陽に考慮した理論になっている。また、2年目には、この理論における大規模計算に必要な非線形計算手法を構築した。具体的大規模モデルの計算も実施した。最終年度は、手法の品質保証について学会発表を行うとともに、構造全体を考えるための材料の境界のモデル化手法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリートや地盤などの軟化材料では、ひずみの局所化などの問題が発生するため、信頼性の高い計算が困難であった。この問題は、元の弾塑性理論に依存するもので、解析解を精度よく計算する詳細な有限要素法でより顕著になる。この問題の解決には、正しい理論の構築という学術的な意義がある。また、詳細な有限要素法の適用が望まれる大規模重要施設での地震応答解析の品質保証が可能になるため、信頼性の高い安全性評価に資する技術であり、社会的な意義もある。

研究成果の概要(英文)：Higher reliability is needed to seismic response analysis of important facilities such as nuclear power plants. Though applying FEM of high-fidelity model is often required, by imperfection of elasto-plastic theory, we have difficulty in quality assurance of the seismic response analysis.

In order to solve the problem, I first reconstructed a new elast-plastic theory, which directly considers the area size suitable to target materials. In the second year, I constructed the nonlinear analysis method which is necessary to compute the theory. I also tried analysis of a large-scale model. In the third year, I constructed a modeling method of a boundary of materials which enable construction of whole structures. I also gave conference presentations about quality assurance of the computation.

研究分野：地震工学，応用力学

キーワード：地震応答解析の品質保証 弾塑性理論 大規模コンクリート構造物

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所の建屋や大規模橋梁などの土木・建築分野の重要施設の地震応答解析では、対象とする構造物が高い安全性を必要とする重要施設であることから、詳細な有限要素法による計算が求められるようになってきた。信頼性が要求される地震応答評価では、数値解析の品質保証は大きな課題である。数値解析の品質保証のためには数値解析の収束性の確認が第一歩となる。しかし、上述の構造物で考慮する必要がある、コンクリート・地盤材料では、要素分割を細かくするとひずみが局所化する問題があるため、収束性の確認は困難である。これは、現状の弾塑性理論に起因する問題であり、理論自体の再構築が必要だと考えられる問題である。

2. 研究の目的

大規模重要構造物における詳細な有限要素法を使用した地震応答解析の品質保証のために、現状のコンクリート・地盤材料などで発生するひずみの局所化の問題を解決する新しい弾塑性理論の構築を目的とする。また、構築した理論を定式化し、それをソフトウェアに実装して各種の計算を可能とすることで、検討した手法の実用性を確認することを目的とする。

3. 研究の方法

コンクリートや地盤材料などの材料を考えた、数値解析の品質保証に必要な新しい弾塑性理論の定式化を行う。理論の要点は、領域内の各点で成立する理論ではなく、材料に応じた適切なサイズの領域において成立する理論であることである。それにより、従来理論に見られたひずみの局所化の問題を克服することが期待できる。定式化・構築した方法をソフトウェアに実装し、コンクリート材料などの計算を通じて、数値解析の品質保証の検討を行う。

4. 研究成果

(1) 詳細な有限要素法において、要素を細かくすれば細かくするほどひずみの発生領域が局所化するという問題を解決するため、新しい弾塑性理論の定式化を行った。理論では、材料に特有の領域サイズを設定し、その領域の中で塑性ひずみを均質化することを考えた。

まずは、弾塑性理論の定式として、塑性ひずみを分離するために次の展開を行った。

$$d\sigma = c^{ep} : d\epsilon = c : d\epsilon - c : d\epsilon^p$$

ここで、 ϵ 、 ϵ^p および σ はそれぞれひずみテンソル、塑性ひずみテンソルおよび応力テンソルである。 c および c^{ep} は弾性テンソルおよび弾塑性テンソルである。また、 d は増分であることを示している。次に、解析領域内の点Aで成立する弾塑性の定式として次式を考えた。

$$d\sigma = c : d\epsilon - c : d\epsilon^{pM}$$

ここで、 ϵ^{pM} は図1のように点Aを中心とした半径rの球内で塑性化が開始した塑性ひずみが最大となる点の塑性ひずみである。この定式により、結果として塑性ひずみが最大となる点を含む半径rの領域において塑性ひずみが均質化されることになる。

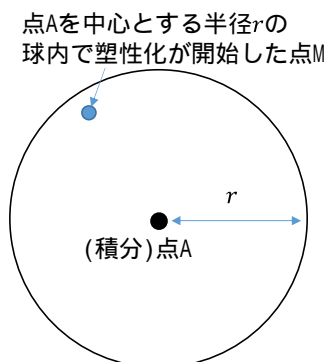


図1 点Aにおける弾塑性の定式のための領域の考え方

上記の弾塑性理論の考え方を基本に、支配方程式を導出して、ソフトウェアへの実装を行った。実装においては、解析初期に、各積分点を中心とした半径rの領域を探索して保有するとともに、点Aの計算において、図1の点Mの塑性ひずみなどの値を状態変数として使用できるようなモジュールを作成した。コンクリート材料に対して適用した。

(2) コンクリート材料は軟化材料であるため、元々その材料非線形を考慮した計算は安定させるのが難しい。上記の手法でも改めて、計算の難しさが確認された。そこで上記の定式を援用して、非線形解析の安定化のための手法を開発した。手法の要点は、軟化時にも解の探索に負の剛性を用いないことと、線形化仮想応力から計算される仮想的な物体力の考慮である。

具体的には、支配方程式

$$\epsilon = \text{sym} \nabla \mathbf{u}$$

$$\sigma = \mathbf{f}(\epsilon)$$

$$\nabla \cdot \sigma = 0$$

に対して、線形化仮想応力を次式で定義する。

$$\sigma^* = \mathbf{c} : \epsilon - \mathbf{f}(\epsilon)$$

これを用いることで、支配方程式を次のように展開する。

$$\nabla \cdot (\mathbf{c} : \nabla \mathbf{u}) - \nabla \cdot \sigma^* = 0$$

本式の第二項を仮想的な物体力として考慮することで、正の剛性であることが保証された弾性テンソル \mathbf{c} を使用して、解の探索が可能になる。

(3) 数値解析の品質保証で行うべき、解析手法の検証と妥当性の確認 (Verification & Validation, V & V) について、前者の解析手法の検証に着目し、数値創成解の手法を用いた検討を行った。解析条件と数値計算手法 (非線形解析手法) によっては、数値創成解との整合性に違いが生まれることが分かった (図 2)。適切な非線形解析手法が必要とされることなどを議論した。

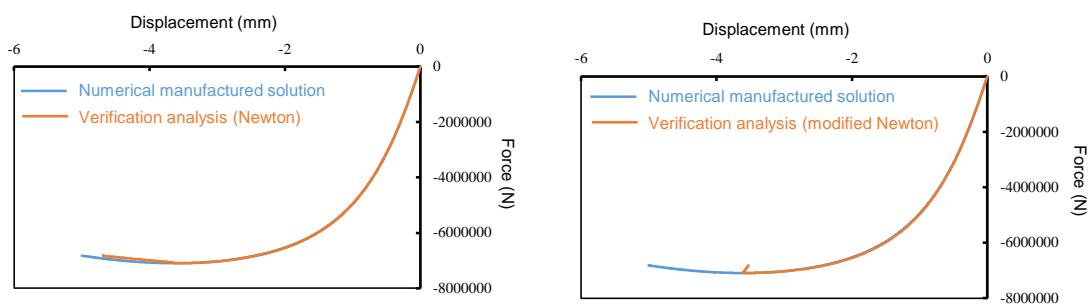


図 2 数値創成解と数値計算結果の比較 (非線形解法の違いによって異なる結果になる)

(4) 実際の鉄筋コンクリート構造物のモデル化を行った。基本的な計算を実施することで、モデルの妥当性を確認している。今後、これらのモデルを使用することで、さらに検討を深めて学会発表などを実施する予定である。

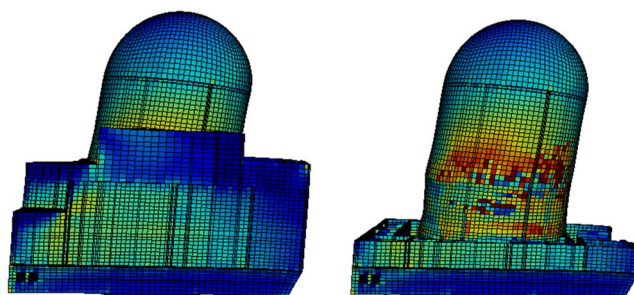


図 3 鉄筋コンクリート構造物のモデルと解析結果の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1. 著者名 Riaz Muhammad Rizwan, Motoyama Hiroki, Hori Muneo | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Review of Soil-Structure Interaction Based on Continuum Mechanics Theory and Use of High Performance Computing | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Geosciences | 6. 最初と最後の頁 72~72 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/geosciences11020072 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

| |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hiroki Motoyama, Muneo Hori |
| 2. 発表標題 Seismic Response Analysis of Large-Scale Reinforced Concrete Structures Using High-Fidelity Model |
| 3. 学会等名 Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2020（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|----------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 本山紘希、堀宗朗 |
| 2. 発表標題 コンクリート構造物の非線形有限要素解析手法の検証への数値創成解の使用の基礎検討 |
| 3. 学会等名 土木学会 第24回応用力学シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号） | 所属研究機関・部局・職 （機関番号） | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|