

検討数が数千オーダーである立体フレームモデルの時刻歴応答解析

正会員 ○筒井寛太*1 同 郷原昌樹*2 同 水島靖典*3 同 永野康行*4

2. 構造—3. 応用力学・構造解析—b. 数値解析法 (FEM・BEM・モード重量法・剛体-ばねモデル)

立体フレームモデル, パラメトリックスタディ, 地震応答解析, 動的陽解法, 並列計算

1. はじめに

近年におけるコンピュータの発展に伴い、建物の地震応答解析に対して質点系振動解析のみならず、立体フレーム解析や詳細有限要素解析などが行われ始めている。質点系振動解析は、基本的な概念がシンプルで計算コストが低いことから、我が国における時刻歴応答解析において広く用いられている手法である。しかしながら、複雑な形状をしている建築物に対して質点系振動解析を行うことは、床や壁を質点に集約してモデル化を行っているため容易ではない。立体フレーム解析は、柱や梁等を指定した断面特性を持った線材要素に置換し、それらの線材要素を節点で結ぶことで実際の建物と同様の架構でモデル化する手法である。この手法は、質点系振動モデルに比べて詳細な応答挙動を把握する事ができるため、長周期地震等による部材の非線形特性を評価した大規模な建物全体の挙動の把握などの需要は高まっている。詳細有限要素解析は、部材の形状をそのままに四面体や六面体の有限な要素に切り分けてモデル化する手法である。この手法は立体フレーム解析に比べてより実状に応じた適切なモデル化が可能のため局所的な変形などを把握できる。しかしながら、未知数の数が他の解析手法に比べて膨大で、計算コストが非常に大きく、現状では、建築物全体の地震応答解析にはほとんど用いられていない。水島ら¹⁾は、立体フレームと詳細有限要素解析について、建築物全体の地震応答比較を行っている。

一般論として、地震応答解析についての世の中の需要が変化の中で、適材適所で利用するソフトウェアを抜本的に変更する可能性がある。従来の建築構造設計で多く用いられている立体フレーム解析プログラムは、静的陰解法により解析を実行している。静的陰解法は多元連立一次方程式を解く必要がある

ため、解析に必要な計算時間が多くなる傾向がある。そのため、立体フレームモデルでの地震応答解析時間を短縮することは設計者にとって重要な課題である。一方、動的陽解法は連立方程式を解く必要がないため、並列計算との親和性が高く、静的陰解法に比べて計算時間を抑えられる傾向がある。設計者は、立体フレーム解析に動的陽解法を採用する場合、静的陰解法による立体フレーム解析の結果との違いについて、パラメトリックスタディを用いて把握することが重要である。しかしながら、立体フレーム解析は質点系振動モデルに比べて変数が膨大であるため、検討数が数千オーダー必要であると考えられる。また、設計者が実務において検討可能なスタディー数は十数個程度で、数千オーダーのパラメトリックスタディすることは現実的ではない。本報告の目的は、自動で数千個の立体フレームモデルを生成する枠組みを利用し、生成された立体フレームモデルの時刻歴応答解析についてパラメトリックスタディを自動で実施する。そして、2つのプログラムによる時刻歴応答解析結果について収集することで、両者の地震応答解析結果の差異について分析を行うための準備を行うことである。本研究の概念図を図1に示す。

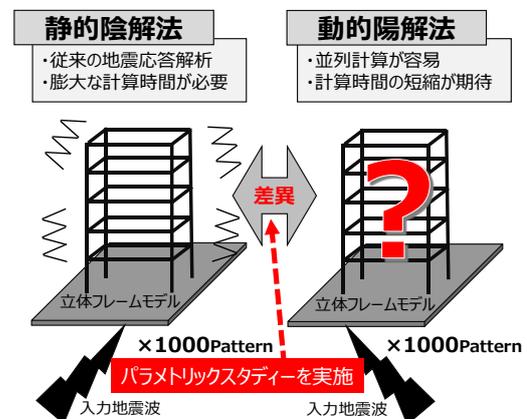


図1 本研究の概念図

Time history response analysis of three-dimensional frame models with the number of studies in the order of thousands

TSUTSUI Kanta, GOUHARA Masaki, MIZUSHIMA Yasunori and NAGANO Yasuyuki

2. 材料特性テスト

解法の異なる 2 つのプログラムにおける材料特性について把握し、両者の解析結果を比較する。本節では、単純な一部材モデルの材料特性テストを実施した。解析には汎用の動的陽解法ソフトウェア²⁾ (LS-DYNA R12.0) を用いた。

2-1. 一軸曲げ単調载荷テスト

単純な一部材モデルにおいて一軸曲げ単調载荷テストを行い、一軸曲げ時の荷重変形関係を確認した。解析モデルは、非線形材料特性のビーム要素とした。また、曲げ耐力の入力値は 248.2kN・m とし、降伏後挙動を荷重曲線によって定めた。荷重は、モデルの自由端側にせん断方向に単調载荷を与えた。解析モデル概念図と、一軸曲げ単調载荷の結果についての曲げモーメントと回転角の関係を図 2 に示す。

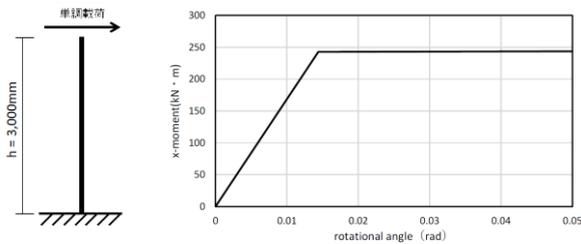


図 2 モデル概念図及び一軸曲げの解析結果

解析の結果より、248.2kN・m で降伏し入力値と同様であることを確認した。また、降伏後について荷重曲線で定義した通りの挙動を確認した。以上より、一軸曲げ単調载荷テストにおいて 2 つのプログラムに差異が無いことを確認した。

2-2. 二軸曲げ単調载荷テスト

耐力相関を支配するパラメータを入力した状態で、二軸曲げ単調载荷テストを行い、二軸曲げ相関挙動の確認を行った。解析モデルは、一軸曲げ単調テストと同様の設定とする。一方で、荷重については自由端側にせん断方向の単調载荷を与えた後、軸力方向に単調荷重を与えた。本検討では、降伏関数 (ψ) を式 1 で表される単純べき乗則として用いた。

$$\psi = \left| \frac{M_s - m_s}{M_{ys}} \right|^\alpha + \left| \frac{M_t - m_t}{M_{yt}} \right|^\beta - 1 \quad \text{式 1}$$

ここで、 M_s 、 M_t はそれぞれ第一軸、第二軸周りの曲げモーメントを表す。 M_{ys} 、 M_{yt} は降伏曲げモーメントである。 m_s 、 m_t は降伏関数の中心を表す曲げモーメントである。 α 、 β はべき乗則を支配するパラメータであり、本検討では 2.0 とした。また、軸力比をパラメータとして、0.3~3.0 倍の間で変化させた。二軸曲げ単量载荷テストの結果について、初期降伏曲げモーメントにプロットした、曲げモーメントと軸方向力の相関図を図 3 に示す。

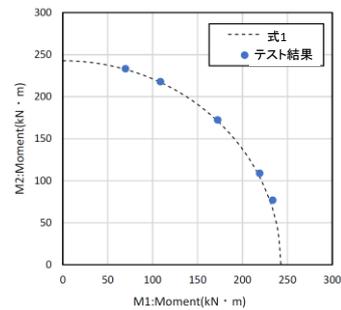


図 3 曲げモーメントと軸方向力の相関図

解析の結果より、降伏関数上にプロットが分布していることを確認した。以上より、二軸曲げ単調载荷テストにおいて、2 つのプログラムに大きな差異が無いことを確認した。

2-3. 一軸曲げ繰り返し载荷テスト

繰り返し変形を受ける部材の挙動について、一軸曲げ繰り返し载荷テストによって検討する。荷重はモデルの自由端側にせん断方向で与えた。解析モデルの概念図と繰り返し载荷波形を図 4 に示す。

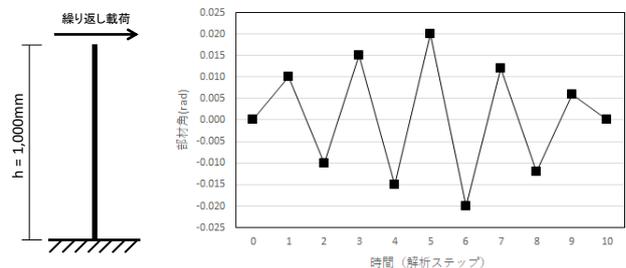


図 4 モデル概念図と繰り返し载荷波形

解析の結果、基準化曲げモーメント・塑性回転角関係により、等方硬化成分を表現していることを確認した。一方で、移動硬化を考慮するために、動的陽解法プログラムを用いる場合、移動硬化パラメータを入力することが必要であることを確認した。

3. 陰解法解析ファイル変換プログラム

陰解法解析ソフトウェア上で作成した、異なるパラメータを持つ複数の解析モデルを、動的陽解法ソフトウェア上で利用可能なモデルへ、自動変換するプログラムを作成した。

3-1. 自動変換プログラム概要

図 5 に自動変換プログラム概要、表 1 にプログラムの動作環境及び使用するモジュール情報をそれぞれ示す。本プログラムでは、陰解法解析モデルの要素及び節点データの変換には、汎用有限要素解析プログラム Nastran の入力ファイルの形式を中間ファイル形式として用いた。この多くの陽解法プログラムへの変換機能が備わる中間ファイル形式を用いることで、個別の陽解法解析プログラムに対する新たな変換プログラムの作成を省略した。また、解析モデルの修正は中間ファイルで行い、無償のオープンソースソフトウェアである pyNastran を用いた。

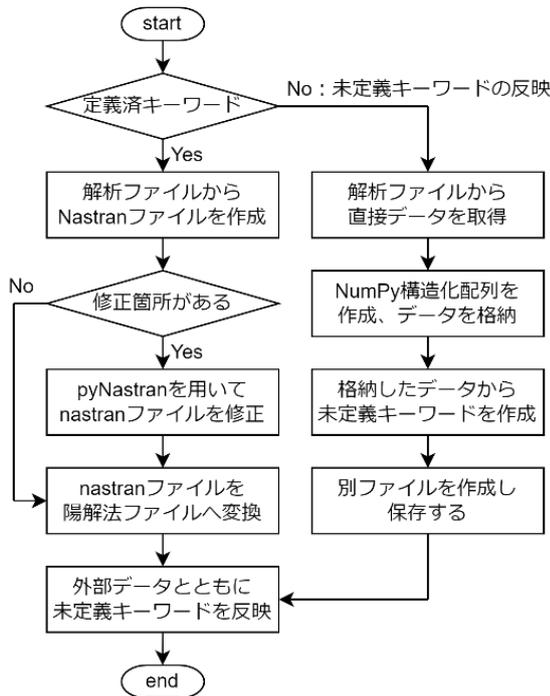


図 5 自動変換プログラム概要

表 1 動作環境及び各種モジュール詳細

動作環境及びモジュール名	バージョン
OS	Windows 10 Home
Python	3.9.7
NumPy	1.20.3
pyNastran	1.3.3

3-2. 材料データ及び外部データ反映

材料データ及び外部データを変換後の陽解法解析モデルへ反映させる。材料データは変換前の陰解法解析モデルから、材料データの作成に必要なデータを直接ファイルから読み込む。Python ではデータベースを扱うライブラリとして、一般的に pandas が用いられる。しかしながら、本プログラムでは処理速度向上のため、各列にデータ型を指定できる NumPy の構造化配列を用いた。構造化配列から必要なデータをそれぞれ取得することで、材料データを作成した。また、作成した材料データはそれぞれ別のファイルに保存し、本体解析モデルへ反映させた。そして、外部データは別ファイルとして保存し、材料データと同様に本体解析モデルへ反映させた。これらを用いて、1つの解析ファイルを作成し実行させた。

4. 連続実行動作

数千オーダーのパラメトリックスタディを自動で連続する枠組みを作成する。本研究の解析にはスーパーコンピュータを使用し、そのジョブ管理システムには一般的に用いられる PBS(Portable Batch System)を想定している。解析環境には、兵庫県立大学大学院情報科学研究科が所有する HPE クラスタ型計算機システム (表 2) を用いる

表 2 HPE クラスタ型計算機システム概要

OS	Red Hat Enterprise Linux 7.7
CPU	Intel Xeon Gold 6284 (2.5GHz, 20core)×2
Memory	192GB
Node	56 node

PBS では、ジョブは指定したコア数が全て使用可能になるまで、待ち状態が継続し実行されないといった問題点がある。本研究のように、複数の計算ノードを使用するような多数のコアを使用する場合、その全てのコアが使用可能になるまで、膨大な待ち時間が発生する可能性がある。本研究では、この待ち時間を抑制するため、一つの計算ノードのコアについて、総数毎にジョブを投入するジョブ投入方法を作成した。図 6 にジョブ投入方法 (解析数が 10、4 コア/計算ノードの場合) の概要を示す。

解析数：10 4コア/計算ノードの場合



図6 ジョブ投入方法概要

実行スクリプトは通常のものを使用し、コア数指定部分には使用する計算ノードの全コア数を指定した。この時、一つの実行スクリプトで指定する計算ノード数は1とする。スクリプト内の解析実行を指示するコマンド入力部分には、指定した全コア数と同数のジョブを非同期処理させるプログラムの実行命令を記述する。そのプログラム概要を図7に示す。

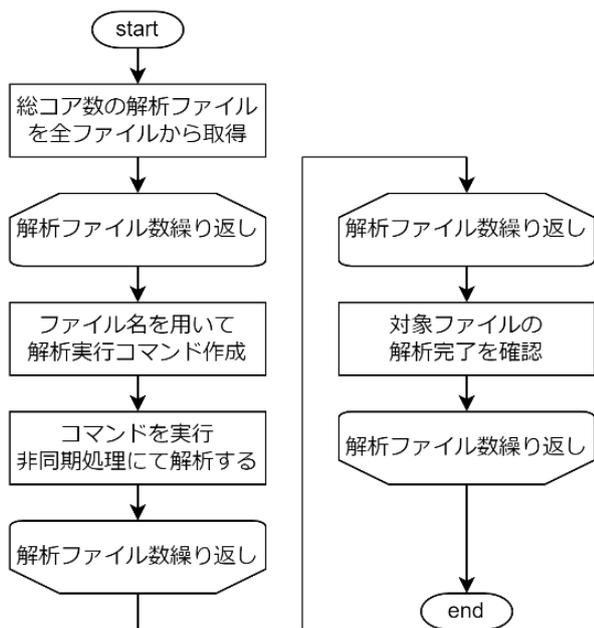


図7 非同期プログラム概要

非同期処理で実行する全解析の完了を確認した後、次のジョブを実行する。なお、非同期処理プログラムは Python3.9.7 を用いて実装した。

5. おわりに

本研究では、自動で数千個の立体フレームモデルを生成する枠組みを利用し、生成された立体フレームモデルの時刻歴応答解析について自動でパラメトリックスタディを実施するため、単純な一部材モデルの材料特性テストを実施した。また、陰解法解析ソフトウェア上で作成した異なるパラメータを持つ複数の解析モデルを、動的陽解法ソフトウェアへ自動変換するプログラムを作成した。さらに、数千オーダーのパラメトリックスタディを自動で連続する枠組みを作成した。

今後の目標として、本報で作成したジョブ投入方法では、ジョブ同士の間にも他者の解析ファイルが混入する可能性があるため、ジョブ同士の連続実行を自動で行い、ジョブ間に混入する他者のジョブも排除する方法を開発する。そして、本報で示した枠組みを用いて検討数が数千オーダーである立体フレームモデルのパラメトリックスタディを実施し、解析結果を自動収集する枠組みを作成することで、2つのプログラムの解析結果を統計的に分析する。

謝辞

本研究は、株式会社竹中工務店「スーパーコンピューターを活用した構造解析手法の研究」による成果の一部であり、自動で数千個のモデルを生成する枠組みを利用した。また、本研究内の動的陽解法による地震応答解析においては、株式会社 J-SOL 猿渡智治氏の協力を得て実施した。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 水島靖典, 向井洋一, 猿渡智治: 鋼構造建築物の地震時終局挙動に関する詳細有限要素モデルとフレームモデルによる応答比較, 日本建築学会 構造工学論文集 Vol.60B, pp.213-218, 2014.03
- 2) 株式会社 JSOL: LS-DYNA@KEYWORD USER'S MANUAL, 2020.03

*1 兵庫県立大学大学院 情報科学研究科 博士前期課程院生
 *2 兵庫県立大学 環境人間学部 学部学生
 *3 兵庫県立大学 環境人間学部 講師・博士(工学)
 *4 兵庫県立大学大学院 情報科学研究科 教授・博士(工学)

Grad. Stud., Grad. Sch. of Inf. Sci., Univ. of Hyogo
 Stud., Sch. of Human Sci. and Environ., Univ. of Hyogo
 Lect., Sch. of Human Sci. and Environ., Univ. of Hyogo,
 Dr. Eng.
 Prof., Grad. Sch. of Inf. Sci., Univ. of Hyogo,
 Dr. Eng.