

活動報告【大規模HPCチャレンジ】

「FrontISTRによる構造物－地盤連成系の地震時挙動解析」

高橋容之 坂敏秀 小磯利博 山田和彥

鹿島建設株式会社

森田直樹

東京大学生産技術研究所

橋本学 奥田洋司

東京大学新領域創成科学研究科

1. まえがき

本稿では、東京大学情報基盤センターが所有する FX10 スーパーコンピュータシステム (Oakleaf-FX) を利用した大規模 HPC チャレンジの課題「FrontISTR による構造物－地盤連成系の地震時挙動解析」の成果報告を行う。

2. はじめに

原子力発電所建屋は、非常に大きい地震が発生した場合においても、安全性を確保する必要がある。大地震が生じた場合、建屋は地盤内の波動伝播の影響を受け非常に複雑な挙動を示し、その挙動を数値解析により推定することは、安全性を確認するために非常に重要である。そこで、建屋とその周辺地盤および遠方地盤を 3 次元有限要素にてモデル化し、震度 7 相当の揺れが発生した時の挙動を詳細に計算することを試みた。

これまで、原子力発電所の建屋に関しては、主に質点系モデルによる種々の非線形特性を考慮した地震応答解析が行われている。種々の非線形特性を考慮した建屋の適切な地震時挙動を得るためにには、時間刻みを十分短くした時間積分が必要であり、数十秒の地震波に対する計算は数万～数十万ステップとなる。一方で、近年では、質点系モデルに加えて、シェル要素を用いた建屋全体系の線形解析や建屋質点系・地盤 3 次元有限要素モデルによる解析も行われている。局部の非線形挙動を把握するためには、建屋全体も含めた有限要素による詳細なモデル化が必要であり、計算規模が非常に大きくなる。したがって、大規模モデルの多ステップの計算を行うには多大な計算時間を要することになり、計算の高速化が不可欠となる。そこで、並列計算を利用した有限要素解析について、東京大学新領域創成科学研究科奥田洋司教授との共同研究を進めている。

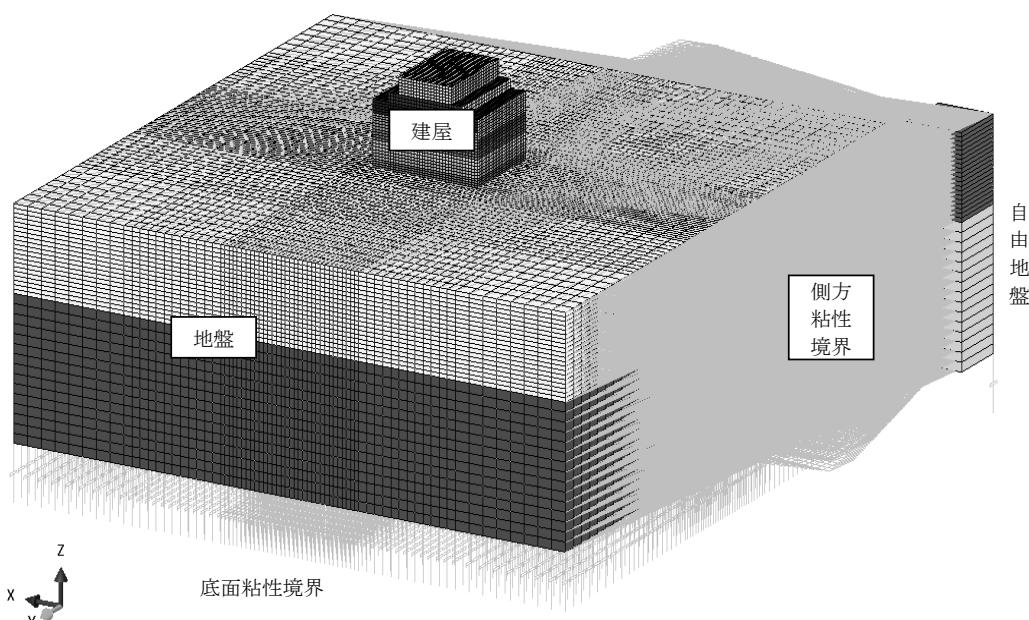
ここでは、建屋－地盤連成系の地震応答解析を FrontISTR で実施するために必要な機能を新たに追加し、将来的に非線形解析を実施する際にあるべき自由度の解析モデルを用いて、FrontISTR による建屋－地盤連成系の非線形時刻歴地震応答解析の実行性について、大規模 HPC チャレンジという機会を活用して検討した。

3. 解析モデル

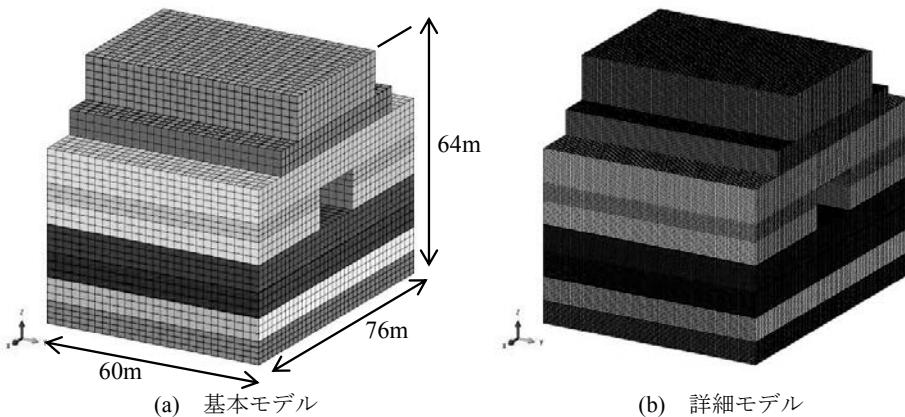
検討に用いる解析モデルは、原子力施設を模擬した建屋および建屋周辺の地盤をモデル化したものである。まず、近年実務で使用されている規模を想定した解析モデル（基本モデル）を作成し、次に基本モデルの要素細分化を行って大規模 HPC チャレンジ用の解析モデル（詳細モデル）を作成した。基本モデル全体を第 1 図に示す。この解析モデルは、建屋部、地盤部に加えて、自由地盤部、地盤部側面と自由地盤部を結ぶ側方粘性境界、地盤部底面と固定点を結ぶ底面粘性境界から構成される。なお、詳細モデル全体は、要素分割の可視化が困難なため、本稿では省略する。

解析モデルの建屋部を第 2 図に、地盤部を第 3 図に示す。建屋部は、X 方向 76m、Y 方向 60m、Z 方向 64m であり、シェル要素の壁・床・屋根およびソリッド要素の基礎版で構成されている。地盤部は、X 方向 400m、Y 方向 400m、Z 方向 160m であり、ソリッド要素からなる。

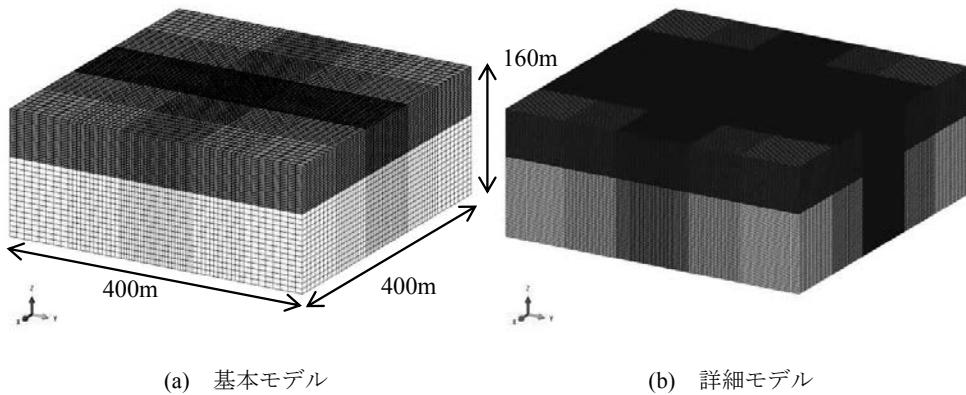
自由地盤部は、地震時の遠方地盤のせん断振動を表現するためのモデルで、建屋部や地盤部の応答の影響を受けないように非常に大きな質量を与えていた。側方および底面粘性境界は、建屋部や地盤部の応答の逸散を表現するために設けられ、3 方向のダッシュポットでモデル化されている。また、大地震時には建屋が地盤から浮き上がる可能性があるため、建屋部と地盤部の間には接触挙動を考慮するためのギャップ要素を設けている。



第 1 図：有限要素モデル（全体：粘性境界考慮建屋地盤）[基本モデル]



第2図：解析モデル建屋部



第3図：解析モデル地盤部

第1表：有限要素モデル諸元（粘性境界考慮建屋地盤全体）

	基本モデル	詳細モデル
節点数	227,558	12,559,652
要素数	247,243	13,405,339
自由度数	682,674	37,678,956

以上より、地震応答解析に用いる粘性境界を考慮した建屋地盤全体の解析モデルは第1表に示す規模となる。大規模HPCチャレンジでは、詳細モデルの計算を実施した。ただし、要素細分化の影響を確認するため、基本モデルの計算を別途実施している。

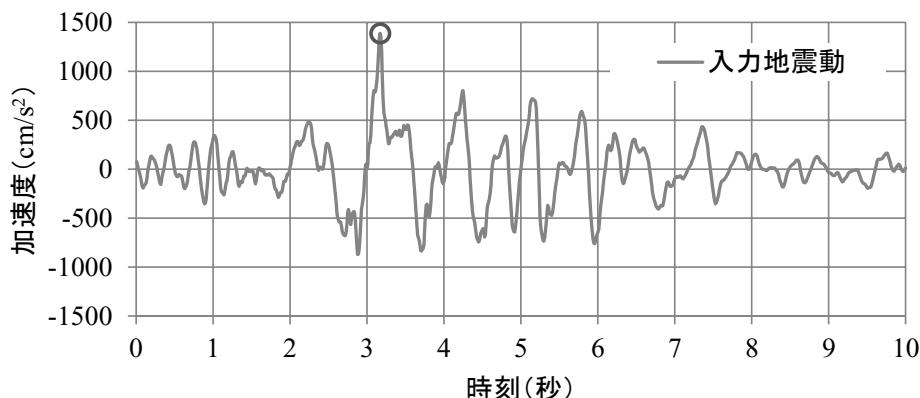
4. 解析条件

“6. 本解析”で本解析を実施するための並列計算条件について、“5. 予備解析：並列性能の確認”で検討した。本解析と予備解析の解析条件を第2表に示す。

解析に用いる入力地震動を第4図に示す。2016年熊本地震（2016年4月16日1時25分）により、（国研）防災科学技術研究所が運営する強震観測網 KiK-net の観測点（KMMH16：益城）で得られた地震観測記録の地表EW成分の一部を切り出し、その1.2倍を解析モデルのX方向に入力する。地震応答に強非線形挙動が現れるよう、地震観測記録を係数倍している。なお、10秒間の計算を目標として準備したが、本解析では4.5秒までの計算が完了した。

第2表：解析条件

	本解析	予備解析
解析コード	オープンソース大規模並列有限要素解析コード FrontISTR	
解析モデル	粘性境界を考慮した建屋地盤全体の詳細モデル	
時間刻み	0.0005秒	
継続時間	4.5秒	0.015秒
計算ステップ数	9,000	30
時間積分法	Newmark- β 法 ($\beta=1/4$)	
線形ソルバ	共役勾配法	
前処理	ブロック対角スケーリング (3×3) ／ MPC 陽的自由度消去法	
収束判定閾値	1.0×10^{-8}	
非線形方程式の求解	Newton-Raphson法	
収束判定閾値	1.0×10^{-1}	
領域分割数	38,400	第3表
並列手法	フラットMPI並列	第3表
履歴出力	0.0005秒 (1ステップ) ごと	
可視化出力	0.02秒 (40ステップ) ごと	0.005秒 (10ステップ) ごと
リスタート出力	0.5秒 (1000ステップ) ごと	0.0075秒 (15ステップ) ごと



第4図：入力地震動（地震観測記録の1.2倍）

5. 予備解析：並列性能の確認

本解析の並列計算条件を決定するために、種々の計算条件による並列性能を確認した。並列性能を確認した計算条件の一覧と計算時間を第3表に示す。可視化ファイルの出力は10ステップごとに、リスタートファイルの出力は15ステップごとに行うこととし、先頭30ステップの全計算時間を計測した。最も計算時間の短かった計算条件はID:7で、229秒だった。

第3表：並列性能の確認

ID	ノード数	領域分割数	スレッド数	コア数	セクタキャッシュ	計算時間(秒)	
						30 step	1 step
1	4,800	4,800	1	4,800	6way	356	11.9
2	4,800	9,600	1	9,600	6way	262	8.73
3	4,800	9,600	1	9,600	12way	261	8.70
4	4,800	9,600	8	76,800	6way	287	9.57
5	4,800	19,200	4	76,800	12way	249	8.30
6	4,800	38,400	1	38,400	6way	236	7.87
7	4,800	38,400	1	38,400	12way	229	7.63
8	4,800	38,400	2	76,800	12way	276	9.20

6. 本解析

6.1. 並列計算条件

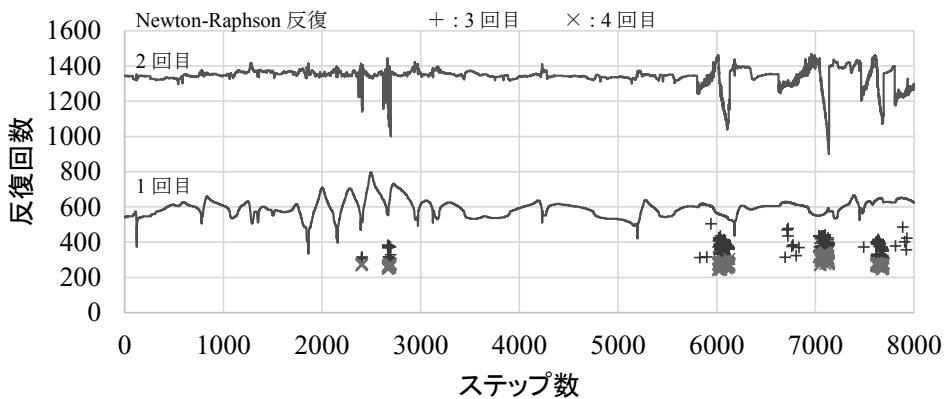
“5. 予備解析：並列性能の確認”の結果より、本解析での並列計算条件として、38,400領域分割のフラットMPI並列(8MPI/ノード)を採用した。

6.2. 解析結果

本解析の計算時間を第4表に示す。先頭の30ステップで推定した1ステップあたりの計算時間は、第3表に示されているようにID:7の7.63秒であり、本解析の1ステップあたりの計算時間7.17秒を的確に捉えていたと考えられる。また、線形ソルバの平均反復回数は918回、平均work ratioは8.58%であった。Newton-Raphson反復ごとの線形ソルバの反復回数の推移を第5図に示す。なお、本解析では、ギャップ要素による残差力が収束しない場合があり、Newton-Raphson反復回数を最大4回で打ち切っている。

第4表：本解析の計算時間

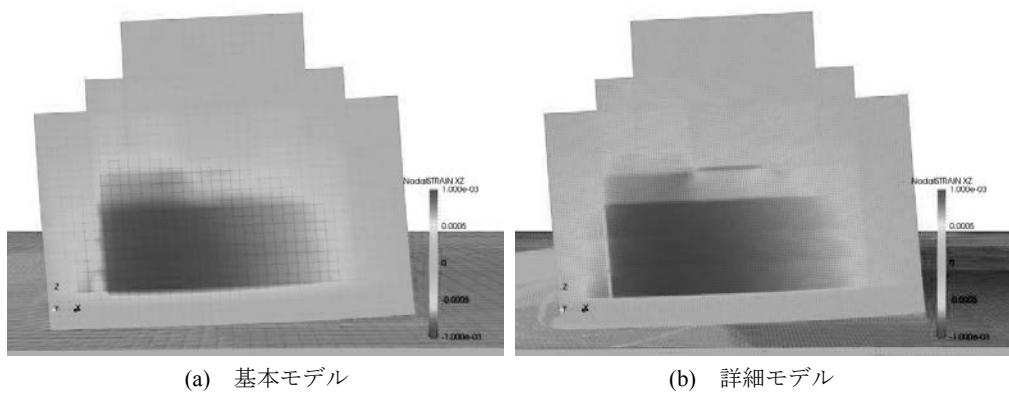
項目	計算時間(秒)	1ステップあたりの計算時間(秒)
行列生成時間	9,043.	1.01
線形ソルバ	46,710.	5.19
可視化ファイルI/O	8,731.	0.970
合計時間	64,484.	7.17



第 5 図：線形ソルバの反復回数

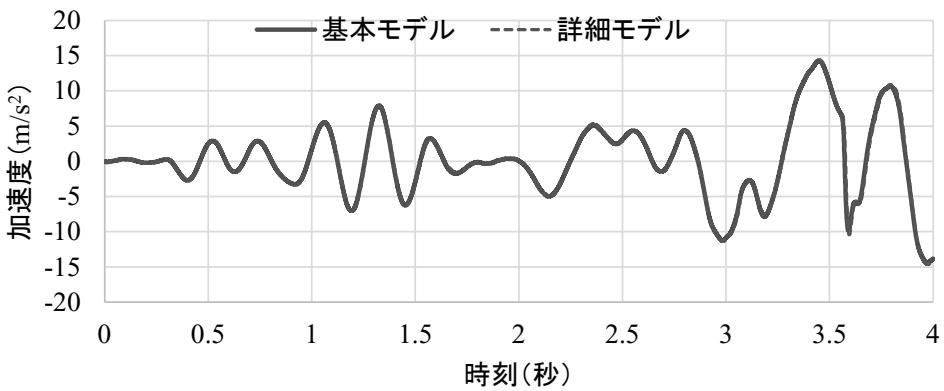
変形図に重ねたせん断ひずみコンターを第 6 図に示す。コンターは節点ひずみとして表示しているため、要素細分化によるひずみ分布の差異は小さい。しかし、要素分割が細かくなると、壁・床接合部周辺のひずみ分布が明瞭になっていることが分かる。また、建屋が地盤から浮き上がっていることが確認できる。

代表節点の応答加速度を第 7 図に、接地率*を第 8 図に示す。入力地震動が大きくなるにつれて、X 方向の応答加速度は大きくなっているが、Z 方向の応答加速度は 3.0 秒周辺および 3.5 秒周辺で急激な応答を示しており、建屋が地盤から浮き上がったことによる影響が表れている。接地率を見ると、3.0 秒周辺で 80%、3.5 秒周辺で 40% 程度まで接地率が小さくなっていることが確認できる。また、基本モデルの応答加速度および接地率に比べて、詳細モデルの応答加速度は絶対値が若干大きく、接地率は小さくなっており、要素分割を細かくした影響によることが確認できる。

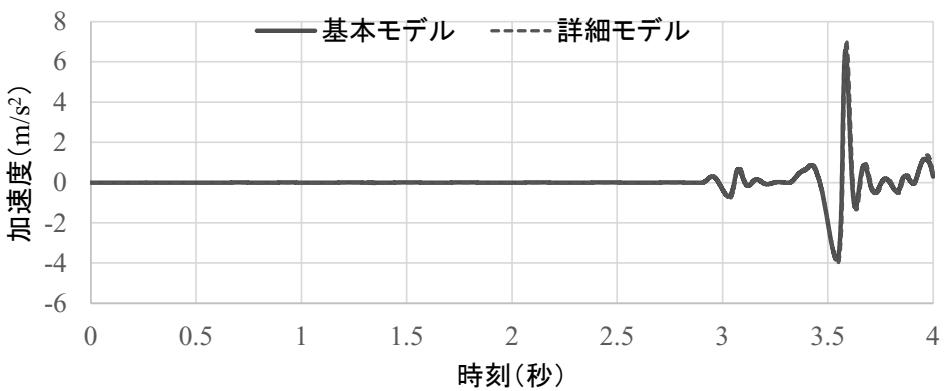


第 6 図：せん断ひずみコンター（変形倍率 100 倍）

* 接地率とは、建屋基礎の底面積に対する接地面積の比率である。

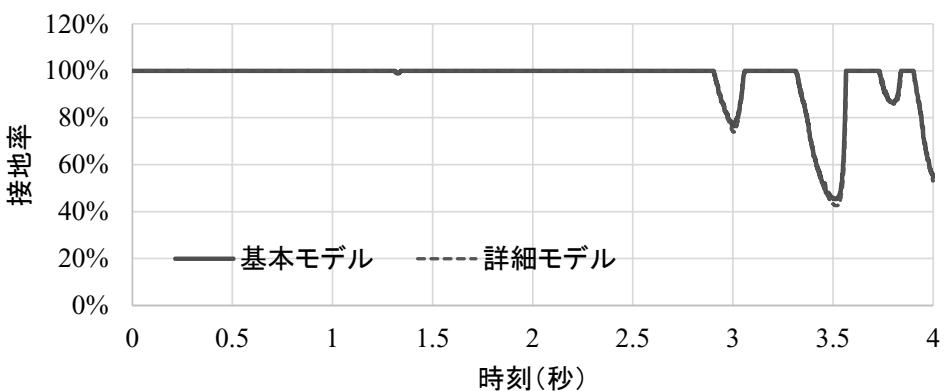


(a) X 方向加速度



(b) Z 方向加速度

第 7 図：代表節点の応答加速度



第 8 図：接地率

7. まとめ

オープンソース大規模並列有限要素解析コード FrontISTR を用いて、38,400 並列の建屋－地盤連成系の非線形時刻歴地震応答解析を実施した。大規模 HPC チャレンジという限られた時間の中ではあるが、約 3,700 万自由度規模に及ぶ 9,000 ステップの非線形問題を 18 時間で解析可能であることが確認できた。また、基本モデルと詳細モデルの応答の差異が僅かであることも確認できた。

本稿では、建屋の浮き上がりに関する非線形特性は考慮しているが、建屋や地盤の材料非線形特性を考慮した解析は実施できていない。今後、これらの非線形特性を考慮した大規模地震応答解析を実施し、並列計算性能を確認する必要がある。

8. あとがき

本稿では、大規模 HPC チャレンジの課題「FrontISTR による構造物－地盤連成系の地震時挙動解析」の成果報告を行った。また、本稿に係る研究は、東京大学奥田洋司教授との共同研究「構造物－地盤連成の大規模地震応答解析の高速化に関する研究」の一環として実施したものである。

参考文献

- 橋本学、他 3 名，“地盤－建物モデルに対する並列有限要素法の性能評価”，日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集，J0110105, (2015).
- 国立研究開発法人 防災科学技術研究所，“強震観測網（K-net, KiK-net）”
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- MORITA Naoki, et al. (Five others), "Development of 3×3 DOF blocking structural elements to enhance the computational intensity of iterative linear solver", Japan Society of Mechanical Engineers, Mechanical Engineering Letters, Vol.2, (2016).
- 高橋容之、他 5 名，“FrontISTR を用いた大規模建屋－地盤連成モデルの地震応答解析技術の開発”，日本機械学会 第 29 回計算力学講演会梗概集，F01-1, (2016).
- 高橋容之、他 3 名，“400 万自由度の建屋－地盤一体モデルの有限要素解析法”，日本建築学会 2016 年度大会学術講演梗概集，20152・20153, (2016).