共同利用(産業利用トライアルユース:先端研究施設共用促進事業『みんなのスパコン』TSUBAMEによるペタスケールへの飛 翔) 成果報告書 平成 年度 課題種別

利用課題名 高層ビルの大規模非線形地震応答解析 Large scale non-linear seismic structural analysis of high-rise building

利用課題責任者 秋葉 博

Hiroshi Akiba

所属 (株)アライドエンジニアリング

Allied Engineering Corporation

http://www.alde.co.jp/

建築構造物を、ソリッド要素を用いて標準的な有限要素法解析を行う試みは、実施者らの知り得る限り、 世界的に見ても例がない。当社は、防災科学技術研究所・数値震動台開発分科会の協力を得て、汎用並 列有限要素法コード ADVENTURECluster ソルバに大規模地震応答解析の機能を備えるべく、開発を 進めている。本解析では、TSUBAME の並列性能を最大限引き出し、大規模地震応答解析コードの実用化 を目指す。

To our knowledge, no prior FE-analysis of building structures modeled by solid elements has been found in the world. We have been enhancing our parallel structural analysis code, ADVENTURECluster for seismic response analysis in cooperation with Hyogo Earthquake Engineering Research Center (E-Defense), National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED). We performed seismic analysis of high-rise building on TSUBAME.

Keywords: Structural analysis, Parallel processing, Seismic analysis, High-rise building

1. 背景と目的

地震に強い建造物,地震に強い都市,国土を作る に当たり,複雑・大型化して行く建造物の耐震強度 の定量的・定性的な性質を今まで以上に正確に知る ことが強く求められている。しかし,高層ビルなど 大規模建造物の3次元解析が,一般の構造設計時に 手軽に実施でき,解析結果が数値的に十分信頼でき る解析ソフトウエアは世界的に見て存在していない。

当社では、これまで大規模解析が可能な汎用並列 有限要素法コード ADVENTURECluster ソルバを 開発し、多くの構造物の解析に適用してきた。平成 19年度から TSUBAME を利用し、5階ビルモデルの 固有値解析と地震応答解析を進めている。パフォー マンス調査のため 2.4GHz マシン <u>256 コア</u>(64nodes x4 cpu/node x 1core/cpu)で5階ビルモデル(1340 万自由度)の計算を試みた。結果は、1 ステップ

(0.01 sec 刻み)で 15,806 s = 4.39 h である。地
震の継続時間としては 20 秒程度(0.01 sec 刻みで
2000 ステップ) が必要なので、4.39 時間 x 2000

ステップ = 8780 時間 = 366 日掛かることになる。 本解析では31階ビルの地震応答解析を行う準備を 進めている。現状では、現コードを高層ビルの大規 模非線形地震応答解析に適用するには、困難な面が あり、コードの高速化を図ると共にモデルの改善に 取り組みパフォーマンスを向上させる必要がある。

本研究では、当社が開発しているソルバをベース に、防災科学技術研究所・数値震動台開発分科会の 協力をもとに高層ビルを3次元ソリッド要素により モデル化し、フルモデルの解析を行うための非線形 地震応答解析プログラムを開発することを目指して いる。非線形解析は、大きな地震加速度の入力に高 層ビルの鉄骨構造が大きく応答し、塑性変形・座屈 に至る挙動を解析するためである。入力地震波は、 阪神・淡路大震災における JR 鷹取駅で計測された 「鷹取波」である。

本プロジェクトでは、31階鋼構造骨組を3次元ソリ ッド要素で分割した精密なメッシュにより作成され た有限要素モデルに対して、記録された鷹取地震 波を入力し、弾塑性地震応答解析を実施した。出 来得る限り TSUBAME の並列性能を向上させて、 512コアを占有利用することにより、大規模な数値解析 が可能となり、世界に先駆けて、7,400 万以上の自 由度を持つ高層ビルの固有値解析と地震波の加震時 間8秒にわたる弾塑性地震応答解析が実施でき、新し い知見を得ることが出来た。

2. 概要

当社では、当社が開発している大規模解析が可能 な 汎 用 並 列 有 限 要 素 法 コ ー ド ADVENTURECluster Solver をベースに、平成19 年度の新規利用拡大課題「高層ビルの大規模耐震構 造解析」などを通じて耐震解析コードの開発を行っ て来た。その成果を拡張し、非線形性を取り入れた 高層ビルの大規模非線形地震応答構造解析プログラ ムを開発することを目指す。3次元ソリッド要素に よる高層ビルの耐震解析は、実施者らの知り得る限 り、世界的に見ても例がない。ソルバの開発と共に、 プレ・ポストシステムの機能拡張など、課題は多い が、本解析が実用に供されるようになれば、社会基 盤としての、地震による都市災害シミュレーション への道が開ける。

3. 結果および考察

解析対象の高層ビルの層数は 31、軒高は 129.7m で、 平面形状は 50.4 m x 36.0 m の長方形



図1. 高層ビルの柱と梁から成る鋼構造骨組 である。当初実施計画に基づき2008年5月15日まで に、31階鋼構造骨組をソリッド要素で分割した精密なメ ッシュを生成し、有限要素モデルを作成した。生成した メッシュの一例を図1に示す。図1に示した柱と梁の接 合部付近では、要素寸法が70mm程度になるように要 素分割した。建物全体の大きさに比べて要素寸法が十 分小さく、解析が大規模になることが推定される。

ソリッド要素で分割された有限要素モデルの規模は、 要素数が15,635,158個、節点数が24,783,633個、自由 度数が74,350,770である。このように大規模なモデルで、 高層ビルの固有値解析並びにその結果を反映させた 地震応答解析を実施することは世界的に見て本研究が 最初である。

当初の実施計画に示されている31階モデル本計算 (1)として、実施計画通りTSUBAME 16ノード4コアを 使用した固有値解析を行い、期待通りの結果を得た。 演算時間は約29時間であった。TSUBAMEの性能を最 大限に引き出せるように、解析規模に応じて使用する計 算機のノード数並びに CPU 数を最適化すべく努力した。 しかし、TSUBAME の利用率が非常に高く、解析時間を 大幅に短縮できる最適な計算機のノード数並びに CPU 数の知見を得ることは出来ていない。上述した固有値 解析に要する演算時間を考慮し、これ以上固有値解析 に関してパフォーマンスの向上を目指すことは、現段階 では諦めざるを得ない。

得られた固有値の一部を表1に示し、その固有 値に対応した固有モード図を図 2(a)-(f)に示す。

表1. 31層モデルの固有値

モード	振動数(Hz)	角振動数(1/s)
1	0.3704	2.3274
2	0.4235	2.6611
3	0.4596	2.8880
4	1.1035	6.9334
5	1.2346	7.7573
6	1.3392	8.4147

第1固有モードは短辺方向の並進モード、第2、3固有 モードは高さ方向の回りのねじれモード、第4固有モー ドは、短辺方向の並進2次モード、第5、6固有モードは 並進とねじれの連成モードである。昨年度実施した5階 ビルでは、第1、2固有モードはそれぞれ短辺、長辺方 向並進モード、第3固有

(様式第20)成果報告書





図 2(e)第5固有モード

図 2(f)第6固有モード

モードは高さ方向の回りのねじれモード、第4、5固有モ ードはそれぞれ短辺、長辺方向並進2次モードで、第6 固有モードが床の振動1次モードである。これら5階と3 1階ビルの固有モードの比較から、図2(b),(c),(e),(f)に示 された並進とねじれの連成モードは、高層ビルの特徴と 考えられる。これらの固有モードの違いが地震応答現 象にどのように現れるかは興味深いことである。

当初の実施計画の31階モデル本計算(2)として、固 有値解析を行った大規模な有限要素モデルに「鷹取 波」を入力し、弾塑性地震応答解析を実施すべく準備 を進めた。計算機資源を見積もるためとパフォーマンス 調査のため 2.4GHz マシン <u>256 コア</u>(64nodes x 4 cpu/node x 1core/cpu) で5階モデル(1340万自由度) の弾塑性地震応答解析を実施し,1 ステップ(0.01 sec 刻み)で 15,806 s = 4.39 h 要した。 地震応答解析に必 要な地震の継続時間は 20 秒程度(0.01 sec 刻みで 2000 ステップ) であり、4.39 時間 x 2000 ステップ = 8780 時間 = 366 日かかることになる。実用的には厳し い状況であることを認識し、出来る限り、高速化が達成 されるように、有限要素モデルを作成する段階まで遡り、 モデルを作成し直した。この新しいモデルでは、計算機 の並列性能を十分引き出せる可能性があり、 TSUBAME 512 コア (64nodes x 8 cpu/node x 1core/cpu)で実行し、演算時間の大幅な短縮を目指し、 当初実施計画通り、解析の準備を終了させた。2008年 度末は、計算機資源の確保が難しく、解析は当初実施 計画よりは遅れた。しかし、2009年度に入り、貴センタ ー共用促進事業推進室からの適切なご助言とご支援に より、計算機資源が確保された。更に、2009年9月29 日から hcp1 キューが利用できるようになり、解析が実施 計画に沿って進められた。

本解析で採用した「鷹取波」はJR 鷹取駅近郊で記録 された地震波で、水平2方向と上下1方向の合わせて3 方向ある。初期動0~2秒間は、振幅が小さいため、加 震地震波から除き、2秒から12秒までの10秒間を加震 地震波とした。本報告では、解析が済み、結果の整理 が進んでいる8秒までの解析結果の一部を報告する。

先ず、全体の変形状態を示すために、表示倍率を1 0倍に設定して描いた加震後6秒における相対変位を 図3に示す。最大値は873 mm で建物の高さに応じて相 対変位が大きくなっていることが見て取れる。さらに、建 物全体が長い辺に沿って、ほぼ並進運動していること が分かる。

次に、加震後7.99秒における相対変位を図4に示 す。相対変位の最大値は469 mm である。 図2(b)(c) の固有モード図で見られた高さ方向の周りのねじり運動 が見られ、図3との大きな違いである。



図3.加震後6秒における相対変位 (表示倍率を10倍にしてある)



図4. 加震後7. 99秒における相対変位 (表示倍率を10倍にしてある)

図3~4に示したのは、解析結果の一例であるが、地 震波の影響により高層建築物では、並進運動とねじれ 運動が連成し、複雑な応答を示すことが明らかに見て 取れる。

次に、地震応答解析で得られた建物の応力の状態を 示す。先ず、以下の図で示されている部位を明らかに するために、建物の真上から眺めた図



図5. x1y1, x1y6, x8y1, x8y6の部位

を図5に示す。柱の位置をx軸の負側から数えて1番目 をx1、8番目をx8で示す。同様に、y軸の負側から数え て1番目をy1、6番目をy6で示す。以下の図で出てくる 部位を示す記号として使われているのは、図5に示した 通りである。高さの違いは z 軸座標の値で示す。その値 は以下の図の説明に示してある。また、x 軸の正の方向 を東側、y 軸の正の方向を北側とする。

先ず、x1y1 通りの柱の位置に沿って一番下(z = - 700 mm)の位置での節点応力を図6に、高さ



図6. X1Y1 通りにある1層柱南向き面下部中 (高さ z = -700 mm)における節点応力の時刻歴







図8. X1Y1 通りにある31層柱上端中央 (高さ z = 129.7 m)における節点応力の時刻歴

z = 92.8 m の位置での節点応力を図7に、最上部 z = 129.7 m の節点応力を図8に示す。図6~8並びに以下の図で、紺色は応力の x 軸成分、紫色は y 軸成分、黄色は z 軸成分を表している。図6では図示できる有効桁数の範囲で x 軸成分とy 軸成分の大きさは区別できな

(様式第20)成果報告書

いので、重ね合わされて表示されている。z 軸は高さ方 向に沿っている。当然のことではあるが、建物の最上部 では、図8から分かるように、応力の z 軸成分は殆ど生じ ていない。他方、最下部では、図6から見られるように、 応力の z 軸成分は x,y 軸成分よりも大きく、妥当な結果 である。また、x,y 軸成分の大きさが高さと共に位相の違 いも含め変化していることが図7~8から見て取れる。

続いて、x1y6 通りの柱の位置に沿って一番下(z = -700 mm)の位置での節点応力を図9に、高さ z = 92.8 mの位置での節点応力を図10に、最上部 z = 129.7 mの節点応力を図11に示す。



図9. X1Y6 通りにある1層柱北向き面下部中央(高さ z = -700 mm)における節点応力の時刻歴



図10. X1Y6 通りにある22層柱北西隅上端 (高さ z = 92.8 m)における節点応力の時刻歴



図11. X1Y6 通りにある31層柱上端中央 (高さ z = 129.7 m)における節点応力の時刻歴

3番目の例として、x8y6 通りの柱の位置に沿って一番 下(z = - 700 mm)の位置での節点応力を 図12に、 高さ z = 92.8 m の位置での節点応力を 図13に、最上 部 z = 129.7 m の節点応力を図14に示す。



図12. X8Y6 通りにある1層柱北向き面下部中央(高さ z = -700 mm)における節点応力の時刻歴



図13. X8Y6 通りにある22層柱北東隅上端 (高さ z = 92.8 m)における節点応力の時刻歴



図14. X8Y6 通りにある31層柱上端中央 (高さ z = 129.7 m)における節点応力の時刻歴

最後に、x8y1の柱の位置に沿って一番下(z = -700 mm)の位置での節点応力を図15に、高さ z = 92.8 mの 位置での節点応力を図16に、最上部 z = 129.7 mの節 点応力を図17に示す。



X8Y1 通りにある1層柱南向き面下部中央(高さ z = -700 mm)における節点応力の時刻歴



図16. X8Y1 通りにある22層柱南東隅上端 (高さ z = 92.8 m)における節点応力の時刻歴



X8Y1 通りにある31層柱上端中央 (高さ z = 129.7 m)における節点応力の時刻歴

4. まとめと今後の課題

TSUBAME <u>512 コア</u>を占有利用することにより、大規 模な数値解析が可能となり、世界に先駆けて、7,400 万 以上の自由度を持つ高層ビルの固有値解析と地震波 の加震時間8秒にわたる弾塑性地震応答解析が実施 され、新しい知見が得られた。

TSUBAME の演算性能を最大限利用し、理論的な最高の計算機資源を引き出すためのチューニング作業を 実施できる環境の下で、TSUBAME に特化したソルバの 開発が大きな課題で、解析時間の飛躍的な短縮の道が 拓ける。大規模解析で出力される結果は、数百 TB のデ ィスク容量を占有する。それらの結果を可視化するソフト ウエアの開発が2つ目の課題である。これらの課題が克 服されるならば、実験的には知見を得ることが難しい大 規模な耐震構造物の非線形地震応答解析が可能にな り、防災対策と国民生活に貢献できる計り知れない知見 が得られる。

謝辞

解析モデルの作成は防災科学技術研究所・数値震動 台開発分科会の協力を得た。TSUBAMEの運用には, 学術国際情報センター西川武志准教授はじめ共用促 進事業推進室の方々の支援を得た。ここに記して感 謝の意を表します。