

TSUBAME 共同利用 平成 25 年度 産業利用 成果報告書

利用課題名 大規模高性能室内外建築環境解析システムの開発

英文: A High Performance Numerical Simulation for the Building Indoor and Outdoor in Large Scale

利用課題責任者

Pham Van Phuc

所属: 清水建設(株)技術研究所

Affiliation: Institute of Technology, Shimizu Corporation

URL: <http://www.shimz.co.jp>

本利用課題では、TSUBAME スパコンで開発してきた建築環境解析システムの実用性とその可能性を調べた。本報では、建物の安全性評価について東北地方太平洋地震・津波の再現計算を対象にして、大規模数値流体計算や観測記録結果との比較により、建築建物の転倒被害メカニズムの解明などに貢献し、解析システムの有効性を明らかにした。

Procedures have been done to evaluate the practicalities and performances of the numerical simulation system which was developed in Tsubame supercomputer. An example for reproducing the Tsunami in the Great East Japan Earthquake 2011 is introduced to verify the system in comparison with observation results and building falling mechanism. Result shows the validity of the system in further building manufacturing.

Keywords: Large Scale Simulation, Coupling Method, Tsunami Forces, Buildings, VOF method

背景と目的

周辺環境を配慮して、安全・安心かつ快適な建築環境を提供できるかどうか建物の性能評価において重要な課題の一つである。この課題を解決するためには詳細な室内環境や広域な屋外環境の双方を考慮できる室内外環境の連成解析が必要となるが、計算量及び計算時間は膨大となるため、限られる範囲でそれぞれの検討対象、たとえば周辺の風環境、温熱環境、音響環境、光環境の評価、さらには建物本体の風荷重や津波波力の推定に対して屋内または屋外をモデル化して、異なる計算モデルで解析が行われている現状である。近年の計算機の性能向上や数値流体シミュレーション技術の進歩により室内・屋外を含めた大規模流体解析は建築環境評価において有効な計算手法の一つとして期待されている。

本利用課題は建築分野の流体問題を対象にして TSUBAME の計算資源を利用することで、周辺の地形や市街地形状及び屋内環境まで考慮できる数百億計算格子レベルの大規模屋内外建築環境のモデル化システムを構築した。特に、実測などとの比較により大規模計算による計算精度を検証するとともに、大規模屋内外建築環境の評価基盤を確立した。

概要

建物の性能評価としては、建物の安全性について構造本体に作用する風荷重・津波力など、建物の快適性について風環境・温熱環境・音響(騒音)環境と光環境などの多くの流体問題を総合的に評価するものとなる。

平成 22 年度~24 年度では、「建築物の室内外環境の連成解析とその高速化技術の開発」利用課題にて、TSUBAME スパコンの活用を通じて既存の流体計算ソフトや解析ソルバー及び最新の CPU・GPU ハードウェアアーキテクチャーの性能特性を調べており、超大規模数値流体計算の実施に向けてマルチブロック・マルチカラー法と適応格子細分化法による新たな超大規模分散プリ・ポストシステムを開発し、本システムの利用により数百億計算格子の作成を可能にした。また、実験レベルを中心に、実験結果との比較により建築環境問題におけるシステムの予測検討を行ってきた。

本利用課題では、建築分野のモノづくりにおいて実スケールレベルにおける解析システムの実用性を調べた。本報では、特に開発したシステムを用いて、東北地方太平洋地震・津波の再現計算、転倒建物に作用する津波荷重の予測および転倒メカニズムの解明に適用した事例について報告する。ここでは、津波再現計算に

ついて、従来の非線形長波モデルに基づく平面 2 次元解析と VOF 法による 3 次元解析を接続したハイブリッド津波解析手法を構築し、観測記録との比較によりその妥当性を検証した。

結果および考察

1. 女川市街地の津波再現計算

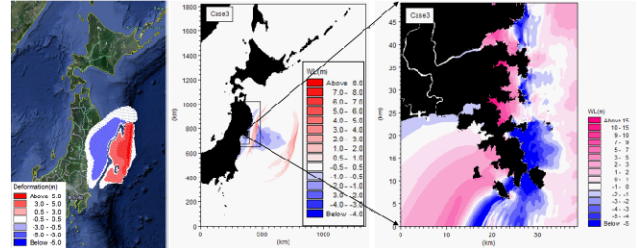
津波解析については、従来では、浅水長波理論に基づく平面 2 次元計算で行われることが多い。この解析手法では、波源域を含む広領域における津波の伝播・遡上の再現に適している反面、建築物や土木構造物などに作用する波力を直接的に算定できない問題がある。一方、昨年度まで TSUBAME で開発した VOF 法による 3 次元的手法では、地形や街区形状を詳細に再現でき、構造物に作用する津波荷重を直接算定することが可能であるという特長がある。しかし、平面 2 次元計算に比べて計算負荷が格段に大きいため、現状で実用的なレベルで解析できるのは十数 km 程度の範囲にとどまる。

H25 年度では、これら 2 つの計算手法を接続することで、波源から陸域までを含む広領域の津波の伝播・遡上と、建物に作用する津波荷重を一貫した条件で計算できるハイブリッド津波解析手法を構築した。

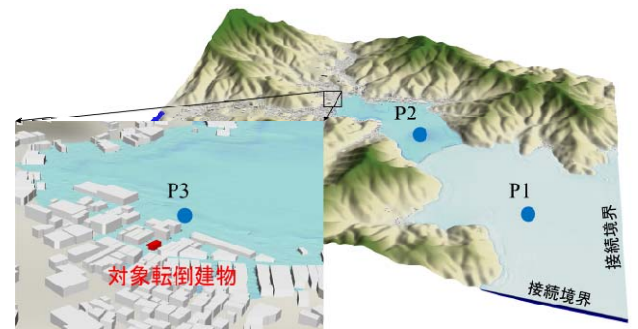
ここでは、平面 2 次元計算と VOF 法による 3 次元計算を併用したハイブリッド津波解析手法の妥当性の検証を主目的として、東北地方太平洋沖地震津波の再現計算を行った。平面 2 次元津波計算では、防波堤と護岸を含めた中央防災会議のデータに基づく計算モデルを用い、浅海域ではネスティングによる 4 次領域(格子サイズ: 1350m, 450m, 150m, 50m)を採用した。津波波源モデルは文献 10) のモデルを用い、地震発生から実現象での 3 時間を時間刻み 0.25 秒で計算した。なお、解析では津波来襲時の推算潮位 T.P. -0.1m を考慮した。女川市街地を対象とした VOF 法による 3 次元計算では、ゼンリン住宅地図 Zmap-TOWNII に基づいて震災前の街区形状を再現するとともに、国土地理院の標高データと中央防災会議のデータなどを融合させ、陸域と海底地形、および堤防等の構造物を詳細にモデル化した。津波の第一波(最大波)に相当する 1500~3000 秒の水位と流速を平面 2 次元計算の結果を元に境界条件として与えた。

図 1(a)には平面 2 次元計算による初期波源と海洋伝

播結果とその拡大図を、図 1(b)には 3 次元計算の結果と対象建物周辺の拡大図を示す。VOF 法による 3 次元津波計算で用いた計算格子は図 2 である。計算格子の水平幅は 10m であるが、建物や堤防など近傍の格子を 0.1m 程度さらに細分化した。

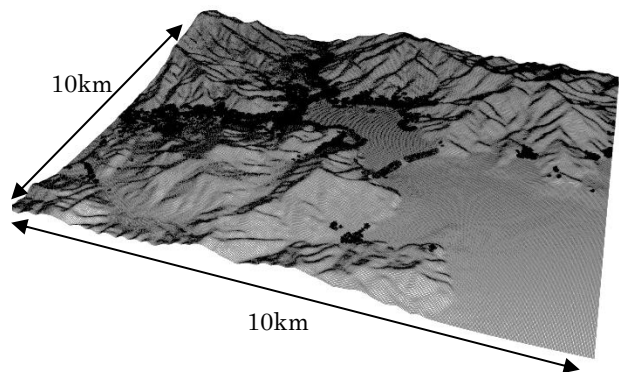


(a) 平面 2 次元津波計算(初期波源(左), 伝播過程)

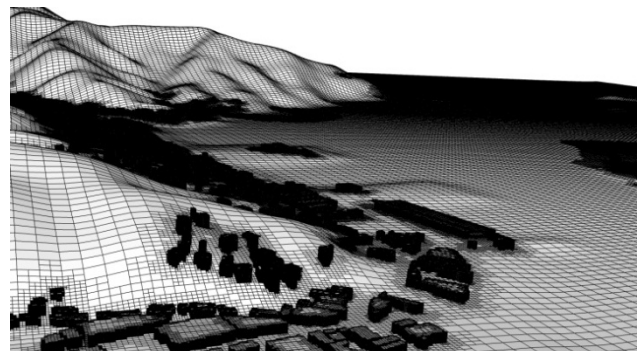


(b) VOF 法による 3 次元津波計算

図 1 女川市街地の 2D・3D のハイブリッド津波再現計算



(a) 計算格子の全体図



(b) 計算格子の一部拡大図

図 2 VOF 法による 3D 津波計算で用いた計算格子

また、津波界面を精度よく再現するためには、計算格子の鉛直幅は T.P. 0m 近傍に 0.5m 以下にした。全体の計算格子数は約 8000 万である。

図 3 には水位変動の観測記録と計算結果(平面 2 次元解析)を示すが、両者は良好に一致していることがわかる。図 4 には湾外 P1 位置、湾内 P2 位置、転倒建物近傍の P3 位置での平面 2 次元計算の伝搬・遡上解析(2D)とハイブリッド津波解析、構造物あり(3D w/t Structure)と構造物なし(3D w/o Structure)の計算結果の比較を示す。いずれの地点でも波形はほぼ一致しており、異なる解析手法を接続しても良好な再現性が得られることが分かる。また、湾内の陸域に近い P2, P3 の位置ではハイブリッド津波解析の水位が若干大きくなっているが、これは、ハイブリッド津波解析の 3 次元計算において、地形などを詳細に再現したためであると考えられる。さらに、気象庁によると漁港において 14.8m の浸水高が観測されており、平面 2 次元解析に比べ 3 次元解析を適用したハイブリッド津波解析の手法がより近い値となっていることを確認できた。

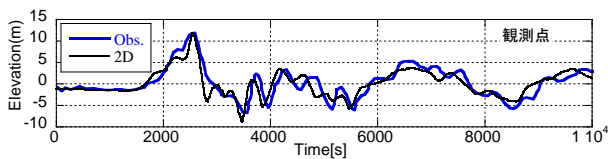
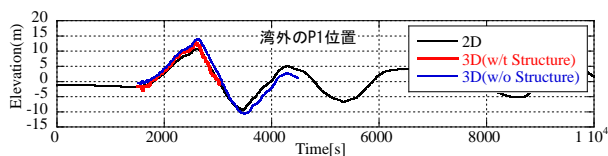
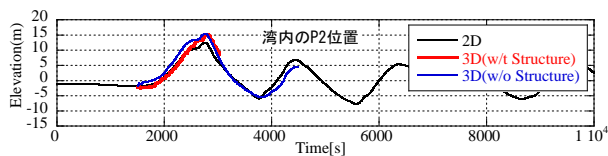


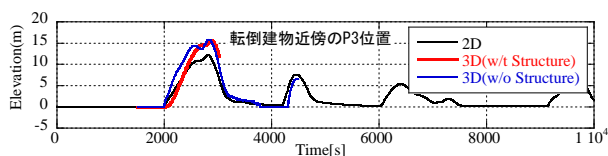
図 3 津波記録水位と平面 2D 計算結果との比較



(a) 湾外 P1



(b) 湾内 P2



(c) 転倒建物の近傍 P3

図 4 平面 2D 津波計算とハイブリッド津波解析の水位比較

2. 建物転倒メカニズムの解明

本節は図 5 に示す転倒建物を対象として、上記のハイブリッド津波解析により直接に津波荷重を算出する。この建物は鉄筋コンクリート構造 2 階建てであり、直径約 30cm の杭が破断して長さ約 1.5m の部分が引き抜かれた状態で横倒しになった。その転倒方向は南北に走る海岸線とほぼ平行で、津波の波力が作用すると思われる方向とは直交する向きであった点が特徴的である。また、建物があった元の位置には津波による洗堀、さらに隣接の建物周辺には地盤沈下の痕跡が見られており、こうした地盤の変状が転倒に何らかの影響を与えていた可能性が指摘されている。

建物の詳細な寸法については過去文献に参照した。なお、建物の開口部を考慮しない。地盤の液状化に伴う沈下については、実際の状況を詳細に再現するのは困難であるため、地盤の状態を図 6 のように 3 ケースを仮定した。ケース A は地盤に変状が生じない場合を、ケース C は敷地全体が沈降した状況をそれぞれ想定した。

さらに両者の中間的なケースとして約半分が沈降したケース B を設けた。以下、建物の短辺方向のみを対象とした転倒評価を行う。外力によって生じる転倒モーメントは上記のハイブリッド津波解析の結果を用い、図 7 に示す転倒支点を考慮して算出した。なお、基礎底面が接地している部分には海水が浸入しないため、例えばケース A では浮力などの上向き荷重はほとんど発生しなかった。

建物に作用する荷重の時刻歴を図 8 に示す。なお、いずれのケースの水平荷重はほぼ同じであるため、図 8(a)にはケース B のみを記載した。得られた水平荷重の向きは建物の転倒方向と一致し、計算の妥当性を確認したが、鉛直荷重と比べその値が小さい。



図 5 女川市街地の建物の転倒方向と対象とした転倒建物

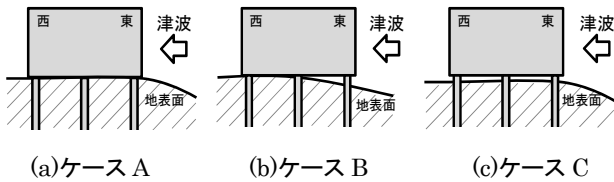


図 6 検討対象ケースの建物の接地領域

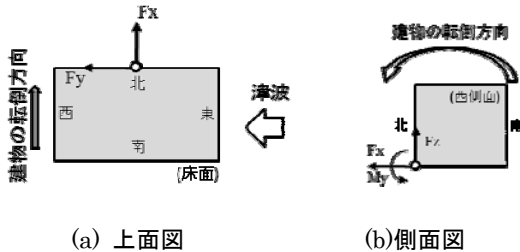
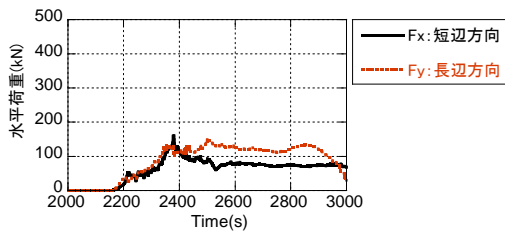
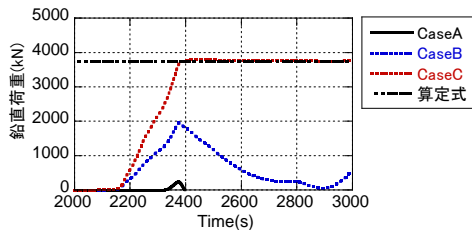


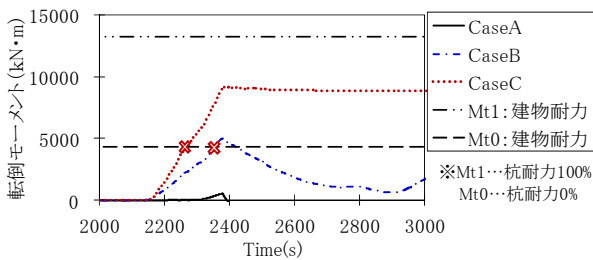
図 7 転倒支点と水平荷重方向の定義



(a) 水平荷重



(b) 鉛直荷重



(c) 短辺方向転倒モーメント

図 8 建物に作用する津波荷重の時刻歴変化

これは対象建物位置の浸水深が徐々に増加し、建物に作用する静水圧分布が津波来襲面(前面)と背面に同程度となり水平成分が相殺されたためと考えられる。なお、鉛直荷重について、ケース C では建物位置での水位変化に追随、増加し、ほぼ定常となった時点での値

は算定式による浮力の値とほぼ一致した。一方、ケース B では、水位が建物よりも高くなった時点($t=2400s$)で屋根面に下向きの荷重が作用しはじめ、上向き荷重は徐々に低下する。

次に転倒モーメントと建物耐力を比較し、建物の転倒判定を行った。建物耐力については杭の損傷度をパラメータとし、杭耐力が健全な 100%強度時と、杭が損傷した 0%強度時を比較した。図 8(c)により杭が 100%強度時の M_{t1} の場合、いずれの解析ケースも転倒には至らない判定となった。一方、杭が損傷した 0%強度時の M_{t0} の場合、ケース B および C で転倒に至る転倒判定となる。図 5 に示すように、対象とした建物の杭基礎が杭頭ではなく途中で破損しているという被害状況を踏まえると、津波到来時に既に杭基礎が破損しており、転倒に対する耐力が低下していた可能性が高いと考えられており、本開発システムの実用性を確認できた。

まとめ、今後の課題

本利用課題では、TSUBAME スパコンで開発してきた建築環境解析システムの活用と大規模数値流体計算により、従来予測困難とされてきた実在建物の津波波力を解析し、観測記録との比較検討により計算の妥当性と解析システムの実用を明らかにした。

今後は、この解析システムを活用して、GPU などによる処理高速化及び超大規模数値流体解析による厳密計算を実施し、建築環境のモノづくりに貢献する。